

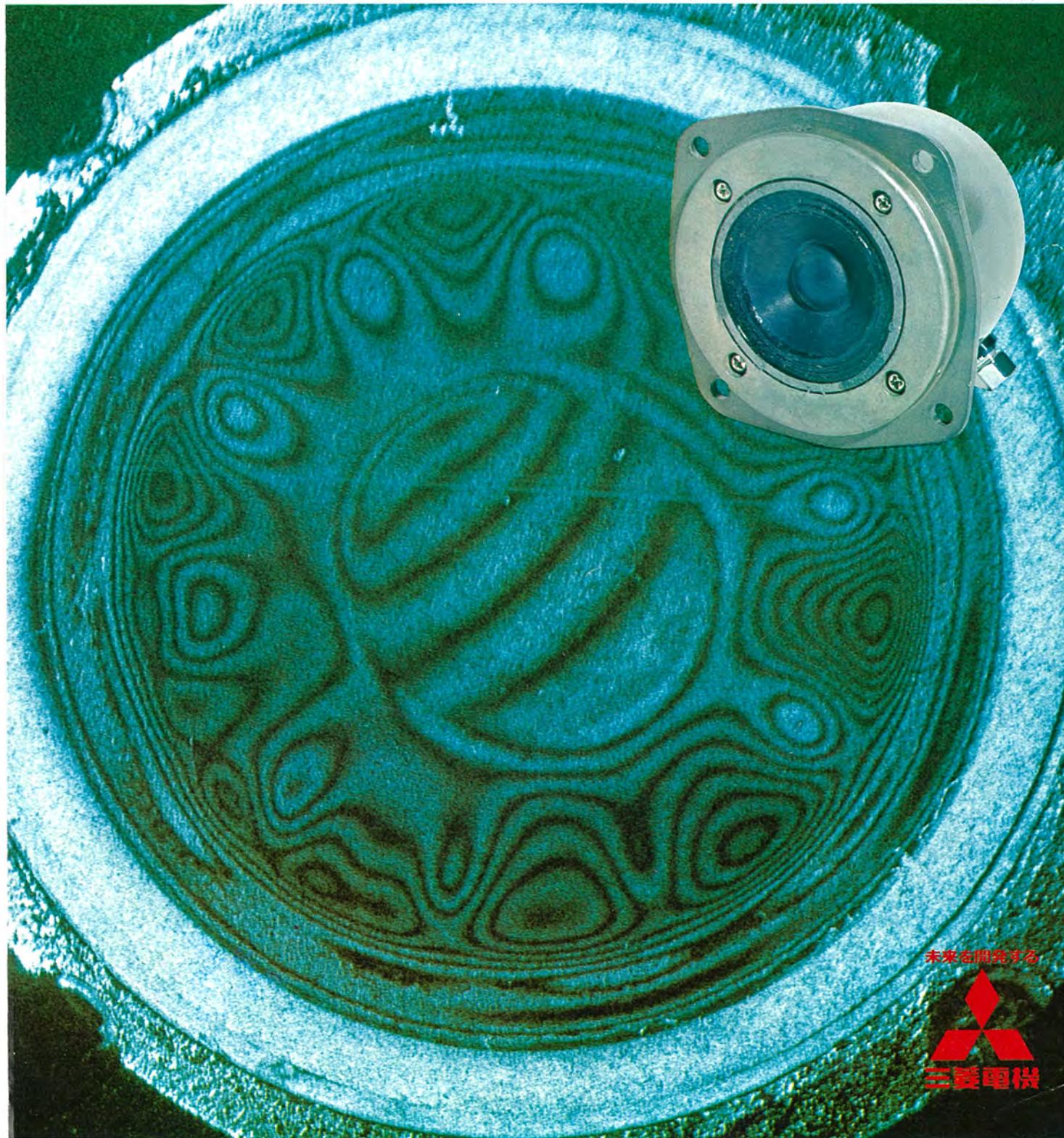
**MITSUBISHI DENKI GIHO**  
**三菱電機技報**

Vol. 45 June 1971

研究およびノーヒューズしゃ断器特集

6

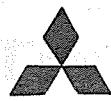
ホログラフィーによるスピーカ・コーンの振動状態観測写真



未来を開拓する



# 三菱電機技報



## 研究特集・ノーヒューズしゃ断器特集

### 目次

#### 《研究特集論文》

油冷・油浸構造による屋外形サイリスタ高圧バルブ	大野栄一・光岡 宏・木村好男・多田一彦	683
人工衛星熱制御系のQT法	下地貞夫・芦田恭子・植田剛夫	690
FSM形磁性薄膜記憶装置		
.....磯崎 真・重徳良夫・土屋英司・杉浦俊夫・井上康郎・近藤 隆・沢江哲則	697	
半硬質磁性合金 FNC(Fe-Ni-Cu)	中島陽三・大谷昌平	704
差動増幅形半導体磁気センサー	藤川恭一郎・高宮三郎	708
小形玉軸受の高域騒音	平野一郎・武藤 浩・小川 仁	712
薄壁形冷蔵庫の現場発泡硬質ウレタンフォーム断熱材		
.....祖父江晴秋・村山邦彦・市川健一・吉田匡一・西崎俊一郎	720	
減圧気中におけるTIG溶接アークの金属加工への応用	山本利雄・島田 弥	727
エボキシ樹脂の力学的性質とガラス転移現象	柴山恭一・宮本晃男	736
半導体集積回路の製造におけるガスプラズマ技術の応用	植松滋幸・阿部東彦・奈良愛一郎	740

#### 《ノーヒューズしゃ断器特集論文》

ノーヒューズしゃ断器の技術動向	福島二郎・松尾昭二	749
NF3200形ノーヒューズしゃ断器	和田宏康・長谷川清博	753
限流形ノーヒューズしゃ断器Rシリーズ	兼本成則・藤沢 稔・山本清美・前田信吾	757
ノーヒューズしゃ断器の付属装置	松浦 清・藤井 保	762
ノーヒューズしゃ断器と電磁開閉器の協調	岡戸弘行	767
永久ヒューズ付きしゃ断器 NFU形	山本啓一・寒森俊夫・原 文吾	774
永久ヒューズー自己復旧形限流素子ー伊藤利朗・宮本紀男・土方明躬・和田勇一・井上武男・石井勇男	779	
永久ヒューズ用金属材料の耐アルカリ金属性	落合温之・原田辰巳・西楽隆司	785
システムサーキットブレーカとその応用	和田宏康・山本啓一・三好明好	790
AB形低圧気中しゃ断器	江口清司	794
高速高感度形漏電しゃ断器の実用上の2,3の問題点	松浦 清・山本清美・中山 豊	797

#### 《普通論文》

特殊連系装置の方式開発	平山 尚・馬場準一・山田郁夫・木下裕道	805
東京電力 駿河変電所向け 66 kV 特殊連系装置	鈴木賢三・荒井曾二郎・平山 尚・迎 久雄・山田郁夫 木下裕道・塚本昭三・三浦良和・仁科重雄	811

#### 《新製品紹介》

400 Hz 単相 115 V 電動送風機・超大形ショーブレーキ完成・受電設備の合理化を図る“MISSET システム”	817
---	-----

#### 《ニュースフラッシュ》

わが国初の西独向けシリコン整流器完成・東京電力 鹿島火力発電所 68 万 kVA 主変圧器完成	820
---	-----

#### 《特許と新案》

イオン発生器付き電気集塵装置・冷蔵庫の温度調節器・加湿装置付き熱交換器 空気調和機の制御装置・電気冷蔵庫・磁気録音機・交流電動機の速度制御装置	747 & 803
--	-----------

#### 《表紙》

##### 表紙1 ホログラフィーによるスピーカー コーンの振動状態観測写真

レーザを応用した新しい技術“ホログラフィー”を利用して、当社の代表的なスピーカーである TW-25 (トゥイータ、口径 5 cm) の振動状態を観測した写真である。ヘリウムネオレンザ光 (波長  $\lambda_1 = 0.6328 \mu\text{m}$ , 赤) を用いて振動しているコーンのホログラム (1枚の写真乾板に被写体の立体情報が記録されているもの)を作り、これにアルゴンレンザ光 (波長  $\lambda_2 = 0.4880 \mu\text{m}$ , 青) をあててコーンの像を再生した。各しま (縞) が振動の等振幅線であり、1しまの差は振動振幅にして約  $\lambda_1/4$  (約  $0.16 \mu\text{m}$ ) に相当する。表紙写真は高音の分割振動域における振動状態であるが、場所による振幅のこまかい変化のようすがあざやかに現われており、コーン全体の振幅分布が一目で観察できる。

##### 表紙2 三菱金属表面処理用サイリスタ整流装置

##### 表紙3 三菱カーステレオ

##### 表紙4 三菱ノーヒューズしゃ断器






---

**SPECIAL EDITION : (1) RESEARCH AND DEVELOPMENT  
(2) NO-FUSE BREAKERS**


---

**CONTENTS**
**SPECIALLY COLLECTED PAPERS (1)**

Development of Oil-Cooled • Oil-Immersed HV-DC Thyristor Valves for Outdoor Installation .....	E. Ohno • H. Mitsuoka • Y. Kimura • K. Tada...693
QT Data Reduction Method of Temperature Control System of Medium Altitude Satellites .....	S. Shimoji • Y. Ashida • T. Ueda...690
Fine Striped Memory (FSM) .....	S. Isozaki • Y. Shigetoku • H. Tsuchiya • Y. Inoue • T. Kondo • T. Sawae...697
Semi-hard Magnetic Alloys FNC (Fe-Ni-Cu) .....	Y. Nakajima • S. Ohtani...704
Differential Amplification Magnetic Sensor .....	K. Fujikawa • S. Takamiya...708
High Frequency Noise Characteristics of Small Size Ball Bearings .....	I. Hirano • K. Taketo • N. Ogawa...712
Foam-in-Place Rigid Polyurethane Foam for Thin-Wall Refrigerators .....	H. Sobue • K. Murayama • K. Ichikawa • K. Yoshida • S. Nishizaki...720
Application of TIG Welding Arc for Metal Working at Reduced Gas Pressure .....	T. Yamamoto • W. Shimada...727
Dynamic Mechanical Properties and Glass Transition Phenomena of Epoxy Resin .....	K. Shibayama • T. Miyamoto...736
Application of Gas Plasma Technique to the Fabrication of Semiconductor Integrated Circuits .....	S. Uematsu • H. Abe • A. Nara...740

**SPECIALLY COLLECTED PAPERS (2)**

Technical Trend of No-Fuse Breakers .....	J. Fukushima • S. Matsuo...749
Type NF 3200 No-Fuse Breakers .....	H. Wada • K. Hasegawa...753
Type NF Current Limiting Molded Case Circuit Breakers Based on Electro-dynamic Action .....	S. Kanemoto • M. Hujisawa • K. Yamamoto • S. Maeda...757
Accessories of No-Fuse Breakers .....	K. Matsuura • T. Fujii...762
Coordination between No-Fuse Breakers and Magnetic Starters .....	H. Okado...767
Molded Case Circuit Breakers with Permanent Power Fuses, Type NFU .....	K. Yamamoto • T. Zitsumori • B. Hara...774
Development of Permanent Power Fuses —Self Recovering Type Current Limiting Device— .....	T. Ito • T. Miyamoto • A. Hijikata • Y. Wada • T. Inoue • I. Ishii...779
Corrosion Resistance of Metals used in Permanent Power Fuses with Nak (Binary Eutectic of Na and K) .....	H. Ochiai • T. Harada • T. Nishiraku...785
System Circuit Breakers and Their Application .....	H. Wada • K. Yamamoto • A. Miyoshi...790
Type AB Low Voltage Air Circuit Breakers .....	K. Eguchi...794
A Few Discussions on Application of High-Speed and High-Sensibility Earth-Leakage Circuit Breakers .....	K. Matsuura • K. Yamamoto • U. Nakayama...797

**TECHNICAL PAPERS**

Development and Analysis of System Interconnector .....	T. Hirayama • J. Baba • I. Yamada • H. Kinoshita...805
66 kV System Interconnector installed in Suruga Substation of Tokyo Electric Power Co. ....	K. Suzuki • S. Arai • T. Hirayama • H. Mukae • I. Yamada
.....	H. Kinoshita • S. Tsukamoto • Y. Miura • S. Nishina...811

**NEW PRODUCTS**

817

**NEWS FLASH**

820

**PATENT AND UTILITY MODEL**

747 &amp; 803

**COVER :**
**Observation Picture of Vibrating State of Speaker Cone by means of Holography**

By making use of new technique "Holography" based on laser application, observation has been made on the Vibrating state of a representative speaker of Mitsubishi TW-25 (Twitter, 5 cm caliber).

A picture has been made available as illustrated. With helium-neon laser light (wavelength  $\lambda_1=0.6328 \mu\text{m}$ , red) a hologram of the vibrating cone has been made (stereoscopic information of an object is recorded on one photographic plate). When this picture is subjected to argon-ion laser light (wavelength  $\lambda_2=0.4880 \mu\text{m}$ , blue), an image of the cone is reproduced. Each stripe is an equi-amplitude line of vibration. Difference of one stripe corresponds about  $\lambda_1/4$  (about  $0.16 \mu\text{m}$ ) as a vibration amplitude. This picture shows the devided vibrating state in a high frequency range. It distinctly shows minute changes depending on a place and helps to observe the distribution of amplitudes all over the cone at a glance.

# 「三菱電機技報」アブストラクト

UDC 621.314.63: 621.314.5

油冷・油浸構造による屋外形サイリスタ高圧バルブ

大野栄一・光岡 宏・木村好男・多田一彦

三菱電機技報Vol.45, No.6・P683~689

直流送電などを対象にしたサイリスタ高圧バルブは、容量的には実規模相当のものが試作できる段階にきており、今後いかにしてこれをコンパクト化するかが実用化に際しての最大の課題である。

当社では、このたびこの点に主眼をおき、変圧器と同様な鉄製タンク内に収納した油冷・油浸構造による70kV 屋外形サイリスタバルブの開発に成功し、その基礎技術を確立した。このバルブは、量産品としては世界最高耐圧の当社製4,000Vサイリスタ64個をもって構成している。本文では、油冷・油浸構造に伴う問題解決とあわせ、このバルブの基本構成、冷却方式、分圧方式、高压点弧方式、故障検出方式、および試験結果について記している。

UDC 629.783: 62-524

人工衛星熱制御系のQT法

下地貞夫・芦田恭子・植田剛夫

三菱電機技報Vol.45, No.6・P690~696

人工衛星のような複合システムの開発の各段階におけるQT (Qualification Test) の役割を明確にする必要性が高まっている。ここでは、人工衛星熱制御系の開発を目的として、QTデータによる熱制御サブシステム設計の評価法およびそのために試験項目として必要なものを系統的に調べた。設計へのフィードバックに指針を得るには、QTデータに基づく数学モデルの導出法が有力な手段となるので、これまでの方法のサーベイを行ない、妥当と考えられる方法を組立てた。現段階では定常測定データが対象であるが、回帰分析的な性格の手法で、小形衛星の実測データに適用したところ、いくつかの興味ある結果が得られた。

UDC 681.142.04: 164: 621.318

FSM形磁性薄膜記憶装置

磯崎真・重徳良夫・土屋英司・杉浦俊夫・井上康郎・近藤隆・沢江哲則

三菱電機技報Vol.45, No.6・P697~703

電子計算機主メモリーの性能／価格比向上への要求はきびしく、長い間その主流を占めてきたコアメモリーに代わって磁性薄膜メモリー、半導体メモリーが注目されている。半導体メモリーの将来性も大きいが、記憶が不揮発性で大容量での信頼性や発熱の点で有利であり、しかも高速性能の磁性薄膜メモリーの果すべき役割は大きい。

磁性薄膜が実用化されたものとしてワイヤメモリーがあるが、国際電気研究所では、これをしきぐ革新的な磁性薄膜メモリーとして昭44年にFine Striped Memory(FSM)を発表した。当社では同研究所のご指導によりFSMの研究開発を行ない、すでに実用的な4キロバイト容量のメモリーブレーンを開発した。FSMの概要および現研究成果を報告する。

UDC 621.318: 669.018.58

半硬質磁性合金Fe-Ni-Cu(Fe-Ni-Cu)

中島陽三・大谷昌平

三菱電機技報Vol.45, No.6・P704~707

Fe-Ni-Cu合金(Ni12~20%, Cu4~7%)の熱処理および加工方法を検討し、方向性材料として、保磁力Hc20~80Oe、残留磁束密度Br10~18kG、角形比Br/B<sub>200</sub> 90%以上の半硬質磁性合金を開発した。この合金は従来の半硬質磁性合金とことなり、必要な磁気特性を持つ棒材あるいは板材として供給され、使用者は機械加工をほどこして組立加工ができる、自己保持形繼電器の鉄心などに利用、製造工程の省力化をはかるに有利である。

UDC 621.375.4

差動増幅形半導体磁気センサー

藤川恭一郎・高宮三郎

三菱電機技報Vol.45, No.6・P708~711

差動増幅形半導体磁気センサー(DAMS)はホール素子とホール電圧を差動増幅する2個のトランジスタとを配した複合素子で、モノリシックICを縮約した構造をしている。モールド形DAMSを試作測定した結果、磁気感度が7V/kG、不平衡電圧が0.5V程度、磁界に対する非線形性はあまり大きくなかった。DAMSは直流弱磁界あるいは交流広帯域磁界の検出には適さないが、電圧感度が高いことおよび磁界方向に対称性をもつなどの特長があるので無接触磁気スイッチあるいはHallモータ等への応用に適している。



UDC 534.83: 621.822.7

小形玉軸受の高域騒音

平野一郎・武藤 浩・小川 仁

三菱電機技報Vol.45, No.6・P712~719

荷重を受けて回転する玉軸受からは、玉軸受特有の高周波領域の騒音が発生する。この騒音は玉軸受が用いられる電気機械の軽量化高速化につれて大きくなる傾向がある。したがって使用に際し、玉軸受から発生する騒音の性質を十分知っておくことがたいせつである。

以上の見地から小形玉軸受が、ラジアル垂直荷重、スラスト荷重および合成荷重を受ける場合の高周波領域における騒音の特性につき実験的に検討した。これにより、二つの特定の周波数帯域の音圧レベルが極大となること、これらの音圧レベルは荷重の増減によって変化すること、合成荷重の時の騒音特性がラジアル垂直荷重の時とスラスト荷重の時の騒音特性からはば推測できることを示した。

UDC 621.565.923: 678,664

薄壁形冷蔵庫の現場発泡硬質ウレタンフォーム断熱材

祖父江晴秋・村山邦彦・市川健一・吉田匡一・西崎俊一郎

三菱電機技報Vol.45, No.6・P720~726

フロンガスを発泡剤とする硬質ウレタンフォームは、熱伝導率がガラスウールの約1/2であるところから、冷蔵庫の断熱材に適用した場合、キャビネットの壁厚が約半分になり、庫内容積を大幅に増大させうるので、大きなメリットになる。また、現場発泡が可能であることこの材料の特長の一つで、そのため断熱材の組み込み工程を自動化でき、加えて機械的強度が大きいので、キャビネットのプラスチック化をも可能にした。

本文では、この新材料を導入するにあたり、発泡原液の配合処方と冷蔵庫における現場発泡技術を実験して検討した結果を述べている。

UDC 621.791.754: 621.9.048

減圧気中におけるTIG溶接アークの金属加工への応用

山本利雄・島田 弥

三菱電機技報Vol.45, No.6・P727~735

高融点金属あるいは化学的に活性な金属材料を溶接する方法の一つとして、アルゴンガスなどを封入した容器の中でTIGアーク溶接を行なう方法がある。この場合ふんい気圧力を減少させると、陰極直下にアーク柱より輝度が高く色が異なる球状の発光体があらわれることを見出し、この発光体が高エネルギー密度状態にあり、そのエネルギーが陰極部の発生エネルギーにもとづくことを明らかにした。

この発光体を軸交流によって拘束するとそのエネルギー密度はさらに高くなり、しかも低圧中では軸交流のモーメンタムも著しく大きくなるので、これを各種金属のガウジング、溶断、せん孔および溶接などの特殊な加工に応用しうることがわかった。



UDC 541.68: 539.2

## エポキシ樹脂の力学的性質とガラス転移現象

柴山恭一・宮本晃男

三菱電機技報Vol.45.No.6·P736~739

三次元高分子の構造と性質との間の関係をよりよく理解することを目的として、三次元高分子の中で最も広く実用されているエポキシ樹脂について橋かけ密度の異なる同族体試料を調製し、力学的性質とガラス転移現象について調べた。

比体積の温度依存性から求めた各試料の占有体積はほぼ等しいが、橋かけ密度の増加とともに自由体積分率は減少する。このことから橋かけのおもな効果は自由体積を減少させることであると結論される。

自由体積理論に従えば、橋かけ密度の減少とともに自由体積の消失する温度は低温側へ移行し、分子鎖  運動に必要な空孔はより小さくなることが推定される。

UDC 621.382: 533.95

## 半導体集積回路の製造におけるガスプラズマ技術の応用

植松滋幸・阿部東彦・奈良愛一郎

三菱電機技報Vol.45.No.6·P740~745

半導体集積回路の製造において多種多様の技術が用いられているが、性能や生産性の向上のために、また公害を起さない製品技術としてガスプラズマが注目されている。この技術は、(1)半導体ウエハ表面清浄化、(2)写真製版用ホトレジストの除去、(3)導体および絶縁体薄膜の形成、(4)半導体ウエハ表面膜の微細加工などのプロセスに応用できるか、これらの目的に対し適切なプラズマを形成する必要がある。ここでは(2)のプロセスを中心に、ガスプラズマの応用について得られた知見を述べ、今後、この技術がさらに発展するために検討しなければならない問題について  考察を行なった。

UDC 621.316.57

## ノーヒューズしゃ断器の技術動向

福島二郎・松尾昭二

三菱電機技報Vol.45.No.6·P749~752

ノーヒューズしゃ断器は、わが国においては昭和8年に当社が50Aフレームを開発したのが最初である。以来電力の需要の伸びとともに著しく普及し、技術的にも進歩してきた。特に当社は、永久ヒューズ付きしゃ断器・NF3200Aフレーム等低圧電路用においては、世界最大のしゃ断容量、定格電流をもつ画期的なしゃ断器を開発してきた。しかし近代産業の発達に伴い、電気設備はさらに高度化・近代化されるとともに、しゃ断器に対する要求は安全性・信頼性を含めて、よりきびしくなりつつある。

ここにノーヒューズしゃ  断器の技術動向、ならびに当社製品の概要について述べる。

UDC 621.316.57

## NF3200形ノーヒューズしゃ断器

和田宏康・長谷川清博

三菱電機技報Vol.45.No.6·P753~756

低圧気中しゃ断器の一種にモールドケースタイプのノーヒューズしゃ断器があるが、その特長は相間がモールド壁で隔離されているため、一般のABCより小形にできる点にあった。しかし大容量になるにつれ、モールドケースの重量増加がいちじるしく、加えてモールドケースが熱放散を阻害するなど、不利な点が目立ち、その容量は2,500Aあたりでしづん巡していた。当社福山製作所では、2年前から3,000A級のノーヒューズしゃ断器の研究を行なってきたが、ここにNF3200形として3,200Aのノーヒューズしゃ断器の発売を行なったので、その概要を説明  する。もちろん現段階では世界最大のノーヒューズしゃ断器である。

UDC 621.316.57

## 限流形ノーヒューズしゃ断器 Rシリーズ

兼本成則・藤沢 稔・山本清美・前田信吾

三菱電機技報Vol.45.No.6·P757~761

受電設備容量の増大による故障時短絡電流の増加に対するしゃ断容量アップ、重要負荷に連続給電を行うための信頼性の向上、配電設備の経済性・合理性の追求による小型化・機種の多様化等が低圧保護機器であるノーヒューズしゃ断器に要望されている。これらの要望にこたえるため、小形・高しゃ断容量・高信頼性の限流形ノーヒューズしゃ断器Rシリーズ(100Aフレーム~800Aフレーム)を開発したので、その特長・仕様・構造・限流しゃ断性能・試験結果・カスケード方式への適用について紹介する。



UDC 621.316.57

## ノーヒューズしゃ断器の付属装置

松浦 清・藤井 保

三菱電機技報Vol.45.No.6·P762~766

ノーヒューズしゃ断器が普及し、多様化するにつれて、盤取り付け用付属品をはじめ、遠方制御や自動制御装置まで、ノーヒューズしゃ断器の付属装置の要求が増してきた。本文ではノーヒューズしゃ断器の付属装置の中で、警報スイッチ、補助スイッチ、不足電圧引きはすし装置、電圧引きはすし装置、電動操作装置など、電気表示装置と遠方制御電気操作装置について、動作関係を中心にしてベーシケンス制御上参考になると思われるデータを紹介した。



UDC 621.316.57: 621.316.545

## ノーヒューズしゃ断器と電磁開閉器の協調

岡戸弘行

三菱電気技報Vol.45.No.6·P767~773

ノーヒューズしゃ断器と電磁開閉器が組み合わされて使用されるケースは一般的な分岐回路においてその例がきわめて多い。しかしながらノーヒューズしゃ断器と電磁開閉器の間の保護協調は、両者の境界領域の問題であるため、今まで必ずしも十分な検討がなされないまま使用されてきた傾向がある。分岐回路を一つのシステムとしてその信頼性を考えるうえでは、この保護協調は不可欠の問題であり、本文ではこの問題を取り上げて考え方を整理し、かつN F形しゃ断器とM S形電磁開閉器の保護協調についても具体的な検討を加え、その概要を明らかにした。



UDC 621.316.57

## 永久ヒューズ付きしゃ断器 NF U形

山本啓一・実森俊夫・原 文吾

三菱電機技報Vol.45.No.6·P774~778

近年の加速度的な文明の発達と電力需要とは比例しており、ビル・工場・船舶等の配電系統にあっては電源容量を大きく設計しなければならなくなっている。このような情勢において、当社は永久ヒューズ付きしゃ断器NF U形を発表した。

このしゃ断器は、内部に自己復旧形限流素子“永久ヒューズ”を備えることにより、大きな率の限流特性、大しゃ断能力およびしゃ断後の再使用の機能もたせたものである。これから保護機器は、電路の電源容量の増大に対すると同時に、その安全性および連続給電の要求を満足させなければならないが、永久ヒューズ付き  しゃ断器は、この時代の要求に対処して開発されたものである。

UDC 621.316.923

**永久ヒューズ——自己復旧形限流素子——の開発**

伊藤利朗・宮本紀男・土方明躬・和田勇一・井上武男・石井勇男

三菱電機技報 Vol.45.No.6・P779～784

永久ヒューズなる名称のまったく新しい電力用の非直線抵抗素子の開発に成功したので、その構造・特性・応用などについて詳細に述べたものである。永久ヒューズは素子材料として金属ナトリウムが用いられ、一定の通過電流の自乗時間積のエネルギー注入によるジュール加熱によって、ナトリウムが高温、高圧のプラズマに変化し、素子の抵抗が大幅にかつ急激に増加する性質をもった自己復旧形の限流素子であって、電力用のくり返し使えるヒューズであり、世界に先駆けて開発に成功したものである。



UDC 621.316.923

**永久ヒューズ用金属材料の耐アルカリ金属性**

落合温之・原田辰巳・西楽隆司

三菱電機技報 Vol.45.No.6・P785～789

永久ヒューズの構造上、アルカリ金属が構成部品に直接ふれるのでこれらの部品が長期の使用に耐えるかどうかを検討した。

Liquid-Metals Handbookなどの情報をもとに、ステンレス、銅合金など耐食性の良いといわれているものを、実際にそくした状態を想定してナトリウムとカリウムの共融物であるNaK中に長期浸漬し、外観、重量変化、機械強度試験、浸漬界面のE.M.X.(エレクトロンマイクロプローブX線アナライザ)測定などをを行ない、異常のないことを確認した。



UDC 621.316.57

**システム サーキット ブレーカとその応用**

和田宏康・山本啓一・三好明好

三菱電機技報 Vol.45.No.6・P790～793

低圧電路の連続給電と安全性がきびしく要求されるにしたがい、引きはずし特性が従来品より正確かつ自由に調整でき、小電流の地絡をもしゃ断する機能をもつ新しいしゃ断器の開発が必要となってきた。当社は静止形リレーを採用することにより、前述の要求を満足するしゃ断器——Systems Circuit Breaker (S.C.B.)を開発した。

S.C.B.の使用により、電力系統の選択性およびアークによる地絡保護性能が得られ、機器間の保護協調も達せられる。



UDC 621.316.57

**AB形低圧気中しゃ断器**

江口清司

三菱電機技報 Vol.45.No.6・P794～796

低圧回路の保護にあたる気中しゃ断器に対する要求は多岐多様であるが、船舶などの比較的小容量の発電機保護を目的として、新しくAB形気中しゃ断器を開発したので紹介する。このAB形しゃ断器は、開閉機構部分、接点および消弧室がモールドケースに覆われており、従来の気中しゃ断器に比較して、小型で取扱いが容易である。

フレームは400A、600A、および800Aで、吸引目盛は、定格電流の80%から160%まで調整できる。600Aおよび800Aフレームは短限時引きはずし装置が装備でき、NFBとの選択しゃ断が可能である。



UDC 621.316.57

**高速高感度形漏電しゃ断器の実用上の2.3の問題点**

松浦 清・山本清美・中山 豊

三菱電機技報 Vol.45.No.6・P797～801

感電災害防止機器のエースとして電流動作形の高速高感度形漏電しゃ断器がクローズアップされてきたが、人命保護に関する機器だけに高い信頼性が要求される。一方人間の電気に対する生理現象から漏電しゃ断器の定格感度電流は、30mA程度の高感度のものが要求される。このような高感度の漏電しゃ断器をフィールドで実際使用した場合に発生しがちな問題点を明らかにし検討を加えた。



UDC 621.311.161: 621.316

**特殊連系装置の方式開発**

平山 尚・馬場準一・山田郁夫・木下裕道

三菱電機技報 Vol.45.No.6・P805～810

将来の巨大電力系統を全系並列することは、スケール メリット が大きい半面、短絡容量の抑制、事故波及による大停電の防止などに十分な対策が必要となり、スケール メリット を相殺する。このため系統を適正規模のブロックに分割し、これらブロック間を特殊な機能をもつ連系装置で連系する、抜本的解決策が考え出された。この具体的な方式として結合変圧器式特殊連系装置を開発し、そのモデル装置を試作、試験して機能を検証した。また、モデル系統についてデジタル計算機による系統解析により系統に及ぼす効果を解析した。



UDC 621.311.161: 621.316

**東京電力駿河変電所向け66kV 特殊連系装置**

鈴木賢三・荒井曾二郎・平山 尚・迎 久雄・山田郁夫  
木下裕道・塙本昭三・三浦良和・仁科重雄

三菱電機技報 Vol.45.No.6・P811～816

東京電力と三菱電機とは、短絡容量の抑制、大停電の防止など電力の安定供給を目的とする特殊連系装置の共同開発をすすめているが今回方式開発にひきつづいて、500kV 実規模装置への第1歩として、66kV 特殊連系装置の開発に成功し、1970年12月東京電力駿河変電所に設置した。本装置は結合変圧器式特殊連系装置とよばれるもので、結合変圧器1号、2号、調整変圧器、サイリスタ装置などから構成され、非同期連系時に間けつ応援をおこなうことができる工事試験および現地試験の結果、本装置が常時、自由連系、限流、非同期連系など所要の機能を満たすことが確認された。本装置は今後長期の実運用をおこなう予定である。



UDC 621.316.57

**AB形低圧気中しゃ断器**

江口清司

三菱電機技報 Vol.45.No.6・P794～796

UDC 621.316.57

**AB形低圧気中しゃ断器**

江口清司

三菱電機技報 Vol.45.No.6・P794～796

UDC 621.316.57

**AB形低圧気中しゃ断器**

江口清司

三菱電機技報 Vol.45.No.6・P794～796

# 油冷・油浸構造による屋外形サイリスタ高圧バルブ

大野 栄一\*・光岡 宏\*\*  
木村 好男\*\*・多田 一彦\*\*

## Oil-Cooled Oil-Immersed HV-DC Thyristor Valves for Outdoor Installation

Central Research Laboratory

Eiichi OHNO・Hiroshi MITSUOKA  
Yoshio KIMURA・Kazuhiko TADA

Thyristor high voltage valves to be used for DC transmission are in a stage to be built for trial in a scale of practical service as far as the capacity is concerned. The maximum problem in future is how to turn them to compact for the advantage of operation.

Mitsubishi is now successful in the development of 70 kV outdoor type thyristor valves with the above object in mind, and fundamental technique is established. They are housed in steel tanks similar to a transformer and operate oil-cooled and oil-immersed. They consist of 64 pieces of 4,000 V thyristors of Mitsubishi make, the world highest voltage devices as production in quantities.

The article describes fundamental construction of the valves, cooling system, voltage sharing method, high voltage firing system, fault inspection and test results as well as a solution of problems encountered in the construction of oil-cooled and oil-immersed.

### 1. まえがき

将来の電力需要の急増に対処し、安定度対策・短絡容量対策・広域運営などに対する一つの有効な手段として、わが国でも直流送電技術が大きく注目されてきている。

従来、この直流送電の心臓部ともいべき交直変換装置には、水銀整流器（水銀バルブ）が用いられているが、逆弧（特に連続逆弧）の絶無を期すに至らず、これが運転信頼度を大きく阻害する要因となっている。他方、近年の電力用サイリスタの進歩はまことにめざましく、これを用いたサイリスタバルブの研究開発が世界各国で進められている<sup>(13)～(17)</sup>。

当社では、昭和33年高島において、わが国初の直流送電実用化試験に先駆けてつけるとともに<sup>(1)</sup>、この貴重な経験をもとに、以後信頼度の向上を主眼に水銀バルブからサイリスタバルブへとその研究開発を進めている<sup>(2)～(12)</sup>。

サイリスタバルブは、多数個のサイリスタを直並列に接続し、あらゆる

運転状態において、これをあたかも1個の高電圧・大容量サイリスタとして動作せしめるようにしたのである。このために必要な分圧および高圧点弧方式などの基礎技術の開発はほぼ終了し、容量的にはすでに実規模相当のものが試作できる段階にきていている。今後いかにしてこれをコンパクト化するかが、実用化に際しての最大の課題である。

当社では、今回この点に主眼をおき、図1.1に示すように、変圧器と同様な鉄製タンク内に収納した油冷・油浸構造による屋外形サイリスタバルブの開発に成功し、その基礎技術を確立した。このバルブは、量産品としては世界最高耐圧の4,000 Vサイリスタ64個を直列に接続したもので、70 kV 900 Aの変換容量を有するものである。

油冷・油浸構造では、従来の空冷構造に比べて新たに次の主要問題の解決が必要となる。

#### (1) 分布漏遊容量に起因する問題の解決

##### (a) 分圧乱れの問題

##### (b) ターンオン時の $di/dt$ 抑制の問題

#### (2) 油中使用部品の検討

#### (3) 協調のとれた冷却系の開発

#### (4) 油中使用に適した点弧方式の開発

#### (5) タンク収納油浸構造に適した故障検出法の開発

以下、本文では、これら油冷・油浸構造に伴う問題解決とあわせ、本バルブの基本構成、冷却方式、分圧方式、高圧点弧方式、故障検出方式、および性能評価試験結果について述べる。

### 2. バルブの基本構成

サイリスタバルブの大きな魅力の一つは、水銀バルブのような精密な温度制御を必要とせず、単に冷却するのみでよいために、屋外設置形にして高価なバルブホールを省略できる点にある。このためには、油を冷却および絶縁媒体としてコンパクト化を計ると同時に、電力用変圧器と同様な鉄製タンク内に収納することが、バルブから発生する有害なラジオノイズしゃへいの点からも好ましい構造と考えられる。

このバルブの構成は、上記の考え方を基本にしている。交直変換

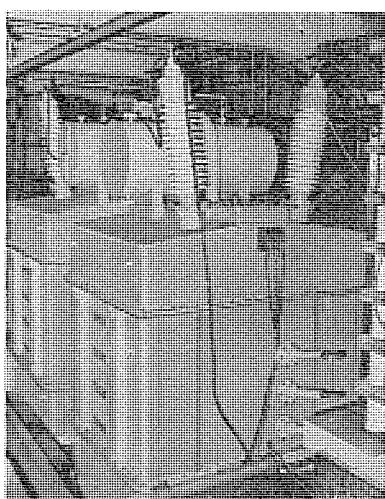


図1.1 70 kV バルブの外観  
Exterior view of 70 kV valve.

装置用としては、バルブの陽極あるいは陰極のいずれか一方をタンク電位と同一にし、必要に応じてタンクを絶縁架台上に設置することが、互換性をもたせるうえからは好ましいが、このたびのバルブは交流スイッチとしての使用を考慮し、タンクと中身との間に60号相当の絶縁を施し、タンクを接地するとともにバルブの陽・陰両極共それぞれ60号ブュッシングで外部に導出せしめた。

## 2.1 サイリスタ素子特性

これに使用したサイリスタ素子は、前述のごとく、量産品としては世界最高耐圧の当社製4,000V平形サイリスタFT500A-80で、その主要特性は次のとおりである。

せん頭くり返し順・逆電圧	: 4,000 V
実効順電流	: 500 A
平均順電流	: 320 A
サージ電流	: 5,000 A
せん頭順電圧降下	: 3.3 V 以下 (1,250 A で)
臨界順電圧上昇率	: 200 V/ $\mu$ s 以上
臨界順電流上昇率	: 100 A/ $\mu$ s
点弧遅れ時間のばらつき	: 1 $\mu$ s 以内
残留キャリアのばらつき	: 400 $\mu$ C 以内 (-10 A/ $\mu$ s で)
残留のキャリア最大値	: 1,100 $\mu$ C
順・逆もれ電流	: 20 mA 以下
接合部フィン間の定常熱抵抗	: 0.05°C/W

サイリスタ素子の耐圧は、部品数の低減による高信度化のうえからもできるだけ高いことが望まれる。しかし、一般にサイリスタの耐圧を上げれば、それに伴って順電圧降下、ターンオフ時間、残留キャリアが増加し、かつ  $di/dt$  耐量が低下するという問題がある。また、耐圧上昇にみあった  $dv/dt$  耐量の増加も非常に困難な問題である。上記4,000Vサイリスタは、これら各要素間の実用的な共調を十分考慮したうえで量産化に成功したもので、諸特性の低下をきたすことなく、同形素子に比べて約1.3倍の制御容量増加を実現したものである。

## 2.2 バルブの構成

本体は、上記サイリスタ素子64個を直列接続したもので、図2.1にその内部構造を示す。これはモジュール、ステージ、バルブの3部に区分できる。モジュールは本体を構成する最小ユニットで、図2.2に示すごとく、後述の4SスタックとともにCR分圧回路、分配用ゲートransistor、故障表示回路などの補助部品一式をしゃへいを兼ねた軽合金製の組立基板に取りつけた一体構造のものである。したがって、これだけで1個の高圧サイリスタとしての機能を完全に具備している。組立基板は上下一対でモジュール内部をサンドウイッチ状にはさみ、これをスタックの中間電位に固定し、内部を完全に静電しゃへいしている。このモジュール4個と空心アノードリアクトル4個を用いて図2.3および図2.4に示すように1ステージを構成し、さらにこのステージを必要な段数重ねて所要電圧定格のバルブを得るようにした。

この組立構成のおもなる特長は、

- (1) 分割そう入アノードリアクトルを、各段間の支持がい子を軸とする位置に配置してコンパクト化したこと。
- (2) モジュールをユニットとして、本体と簡単に着脱できるようトレイ構造にしたこと。
- (3) 所要電圧定格にあわせ段数を任意に選らべるようにしたことである。各ステージは20kV定格で、12段(192S, 200kV定格)まで積みうるように設計している。



図 2.1 70 kV バルブの内部構造  
Inside construction of 70 kV valve

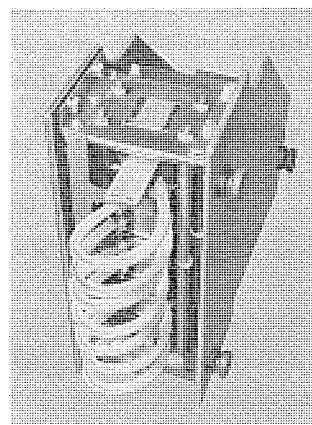


図 2.2 サイリスタモジュール Thyristor module.

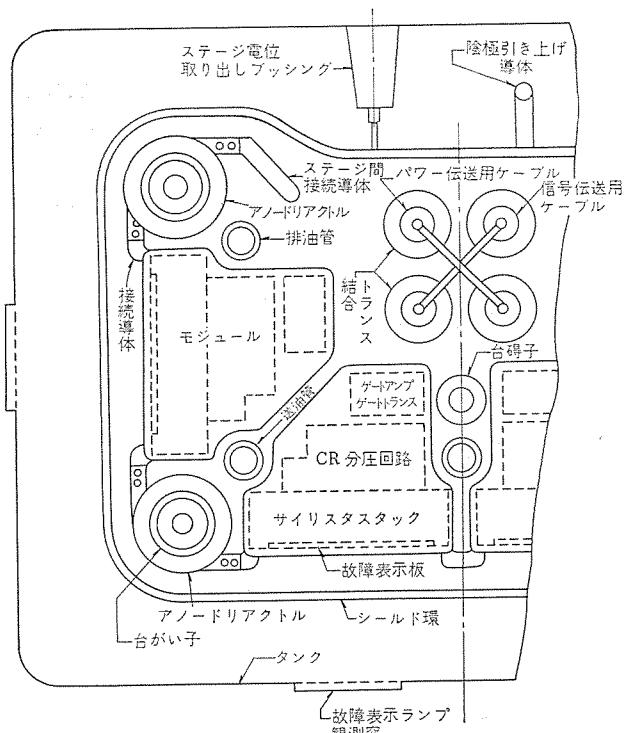


図 2.3 ステージ内部部品配置図  
Arrangement of parts inside the stage.

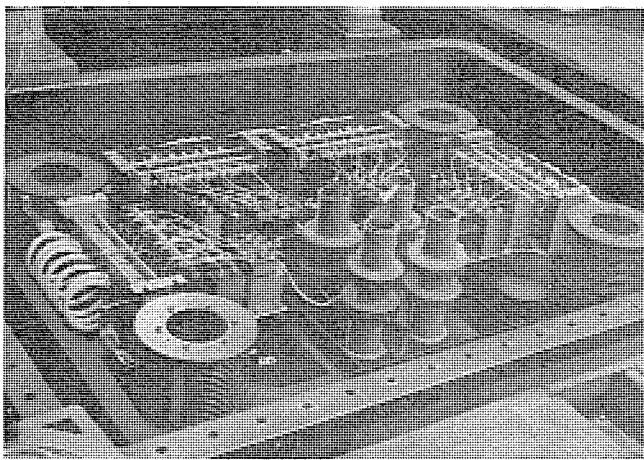


図 2.4 試験中の 1ステージ One stage in test.

今回開発したバルブは4段積みで、そのおもなる仕様は次のとおりである。

形 式	: 屋外形、送油水冷式
結線方式	: 交流単相逆並列、直流三相ブリッジ
定格電圧	: 交流 50 kV、直流 70 kV
定格電流	: 交流 500 A、直流 320 A
周波数	: 50 Hz, 60 Hz
転流電流変化率	: 10 A/ $\mu$ s
順・逆せん頭耐圧	: 210 kV
過電流耐量	: 4,800 A, 5 サイクル

これは、単相交流スイッチとしては 50 kV 700 A (35 MVA) の制御容量を、また三相ブリッジの交直変換器としては 70 kV 900 A (63 MW) の変換容量を有するものである。

### 3. 冷却方式

#### 3.1 サイリスタ スタックの冷却

サイリスタ スタックは、図 3.1 に示すとく、4 個の平行素子と内部油通路をもつ液冷 ブロックフィンを交互にはさんで一体の圧接構造としたもので、この構造は当社ではすでに鉄鋼・化学用装置などで多くの実績を持っている。

図 3.2 にこの液冷 ブロックフィンの変圧器油に対する熱抵抗を示す。これからわかるように、この内部冷却構造は非常にコンパクトであるにもかかわらず、油流量 13 l/min で  $0.045^{\circ}\text{C}/\text{W}$  の低い熱抵抗が得られる。スタック内の各液冷 ブロック油通路は、テフロン 製の絶縁ホースで順次直列に連結し、両端をそれぞれ後述のような送・排油管に並列に接続した。

#### 3.2 冷却・絶縁油の循環方式

図 3.3 に冷却・絶縁油の循環系統図を示す。従来当社では、このような液冷 スタックには、低粘度で冷却効率の高い合成油を開発し、実用しているが、本油冷・油浸構造では冷却と絶縁媒体に同一の変圧器油を用いることにし、万一冷却系統内で多少の油もれが生じたとしても運転上全く支障をきたさないよう考慮をはらった。このように同一媒体を用いる場合には、主 サイリスタと各補助電気部品の間で協調のとれた冷却を行なうことが重要である。分圧回路、ゲート増幅器などの油中使用部品に対する連続使用周囲油温度と、主 サイリスタの許容油温を比較検討した結果、前者を  $40^{\circ}\text{C}$ 、後者を  $60^{\circ}\text{C}$  と決定した。このため図 3.3 のごとく、冷却器を出た後の最も低温の油をタンク内に放出し、これによってまずタンク内の補助電気部を冷

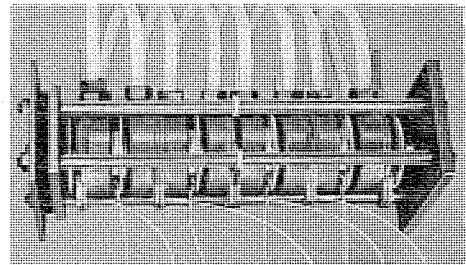


図 3.1 油冷 4S サイリスタ スタック  
Oil cooled 4S thyristor stack.

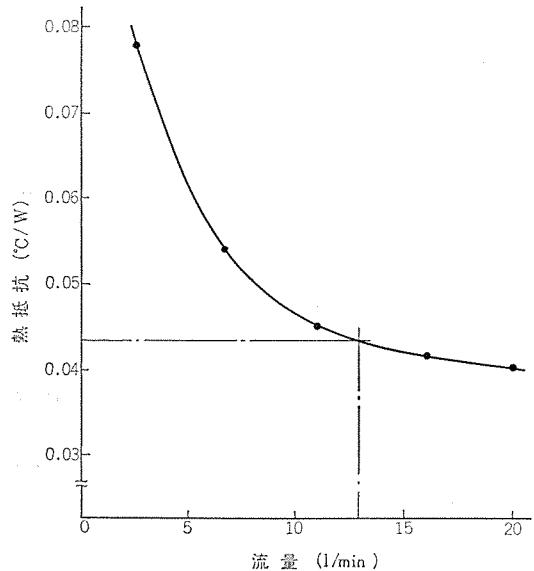


図 3.2 変圧器油に対する液冷 ブロックフィンの熱抵抗  
Thermal resistance of oil-cooled heat sink for transformer oil.

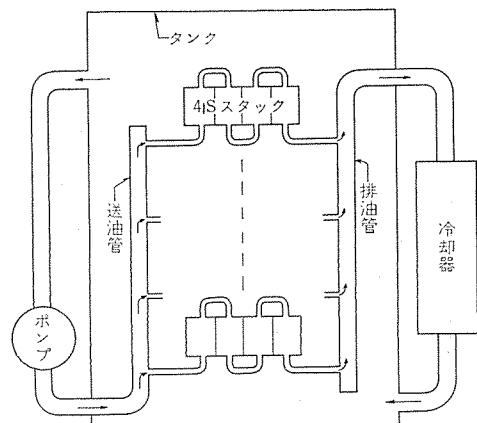


図 3.3 冷却・絶縁油の循環系統  
Circulating system of cooling and insulating oil.

却した後、ポンプでこれを各 16 個のサイリスタ スタックに送り込むようにした。このような循環方法によれば、冷却系のヘッドロスがタンクの内圧として作用しないために、タンクを軽量化できる利点もある。

図 3.4 にこの冷却系のヘッドロスとポンプの揚程を示す。全油流量は  $210 \text{ l}/\text{min}$  で、これに要するヘッドロスは約  $9 \text{ mAq}$  である。各並列 スタックには  $13 \text{ l}/\text{min}$  の油が均等に分流するよう送・排油管のロスを十分小さくすると同時に、各スタックに対し送・排油管のロスが等しくなるようにした。

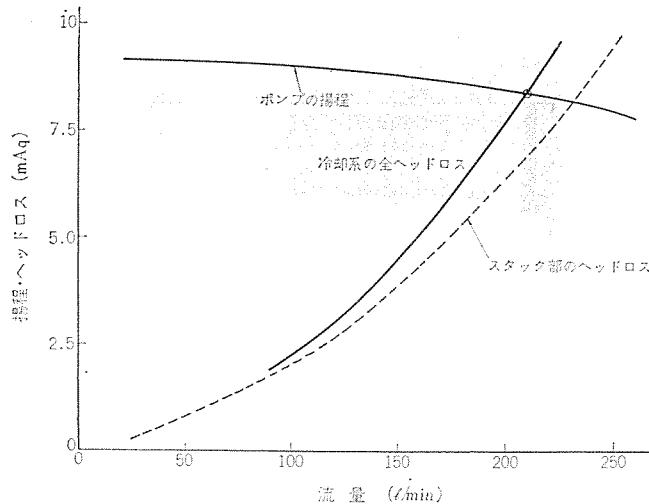


図 3.4 変圧器油に対するポンプ揚程と冷却系のヘッドロス  
Head loss of cooling system and pumping head for transformer oil.

#### 4. 分圧方式

本バルブの分圧回路は、図 4.1 に示すとく、分割そう入リアクトルと各素子に並列に接続した CR のみからなる最も単純な分圧方式とし、部品数の低減による高信頼化とコンパクト化を計った。

各定数は、サイリスタ素子諸特性のばらつきのほかに、分布漏遊容量 500 PF/段を考慮し、これに対する分圧乱れを 20 %、ターンオン時のスイッチング損失を 0.43 J/個以下に抑制するとともに、転流インダクタンス 57 mH まで転流振動電圧に対するダンピングがとれるように設計した。

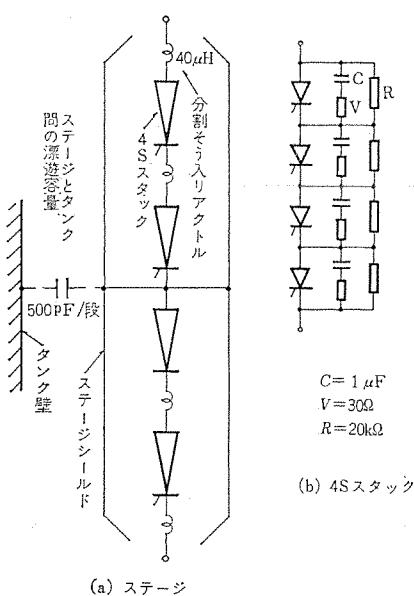


図 4.1 70 kV バルブの分圧回路  
Voltage sharing circuit for 70 kV valve

#### 5. 高圧点弧方式

高圧点弧方式は、代表的なものとして、光により絶縁を行なう光点弧方式と、電磁的に絶縁を行なう電磁点弧方式が考えられる。当社では、将来の油浸構造を念頭におき、これに適した電磁点弧方式として、いちはやくケーブル CT 形各種高圧点弧方式の研究開発を進めてきた<sup>(4), (8), (9)</sup>。

図 5.1 に示す本バルブの高圧点弧方式は、先に開発し発表した<sup>(8)</sup> (9) ケーブル CT 形間接点弧方式で、高電位側の各モジュールに変調 High-Gate 形のゲート増幅器を設け、これによって各モジュール内の素子をいっせい点弧するとともに、これら各ゲート増幅器をいっせい制御するための ON-OFF 信号と、これに必要な電力を 2 組のケーブル CT 形変成器によって絶縁伝送するものである。図 5.2 にケーブル伝送部の写真を示す。ケーブル製作には、従来の油中ドライタイプブッシングの技術を駆使し、十分な信頼性を確保している。また、バルブ電圧急変時のノイズ電流は、最も過酷な状態を考慮して 50 A とし、この電流までは動作しないよう設計した。このような間接形点弧方式では、高電位側ゲート増幅器の信頼度が最も大きな問題となるが、これには GTO と磁心トランジスタ発振器の組み合せによる最も単純な回路を用いて使用部品数をできるだけ少なくするとともに、十分な部品吟味と余裕ある使い方によって高信頼度化を計った。

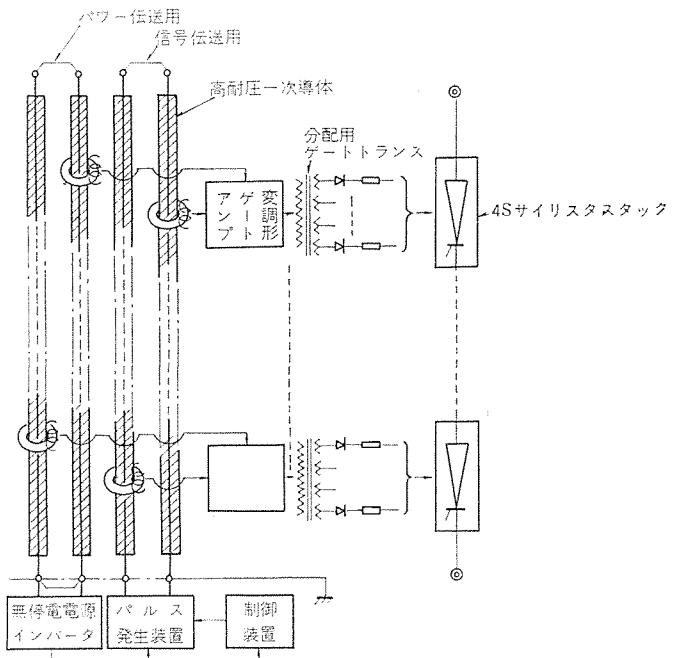


図 5.1 70 kV バルブの点弧方式  
Firing system for 70 kV valve.

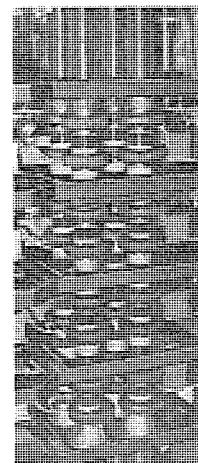


図 5.2 高圧点弧装置の伝送部  
Transmitting portion of firing system.

#### 6. 故障検出方式

多数個のサイリスタを直列接続して成るサイリスタバルブでは、あらか

じめ、最小必要直列個数のほかにいくつか余分の素子を加えて構成しておき、これが故障するまでは運転を継続しうるようにして必要信頼度を確保することが行なわれる。このためには、故障素子数が上記の余分個数内にとどまっているか否かを運転中に常時監視する必要がある。

本バルブは、この余分直列個数を4個または1モジュールとして設計した。故障検出には各サイリスタとゲート増幅器に表示ランプを設け、これを各モジュールごとにまとめてその前面に配列し、運転中、隨時、この点灯状態をタンク側面の観測窓から監視できるようにした。

高位側に表示ランプを設けるこの種の光故障検出方式では、ランプの寿命および信頼性が最大の問題である。光源としては、タングステンランプ、発光ダイオードおよびネオン管が考えられる。これらについて種々比較検討の結果、この内で、寿命、信頼性共に最もすぐれているネオン管を採用した。ネオン管はフィラメント断線のような致命的な寿命終止がなく、そのうえ、サージなどに対しても強く、信頼性が非常に高い。また、有効寿命（明るさが初期値の60%になる時間）は一般にランプ電流の3乗に反比例するといわれている。この点から考え、本バルブでの使用条件では連続使用で10年以上の寿命が期待できる。

このほかに、この光故障検出方式では、バルブ運転休止時に各サイリスタに接続されているCR分圧回路の全部品のチェックもできる。このチェックは次のようにして行なわれる。

- (1) バルブ陽・陰極端子に数百Vの直流電圧を印加し、特定のランプが点灯すれば、これにつながる分圧抵抗Rの断線故障。
- (2) バルブ陽・陰極端子に数百Vの交流電圧を印加し、特定のランプが点灯すれば、これにつながるコンデンサ直列抵抗rの断線故障。
- (3) バルブ陽・陰極端子に10kV以上の交流電圧を印加し（運転時も同じ）、特定のランプが点灯しなければ、サイリスタ素子自身、あるいはこれにつながる分圧用コンデンサCの短絡故障。

このチェック方法は、特にバルブ組立完了時の予備試験として非常に有効である。

図6.1にタンク側壁の観測窓からみた1モジュールの故障表示ランプを示す。中央がゲート増幅器、両側4個がそれぞれ各4Sサイリスタ素子のものである。

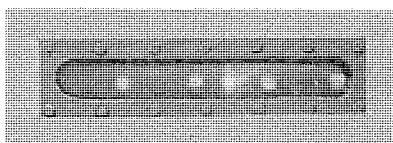


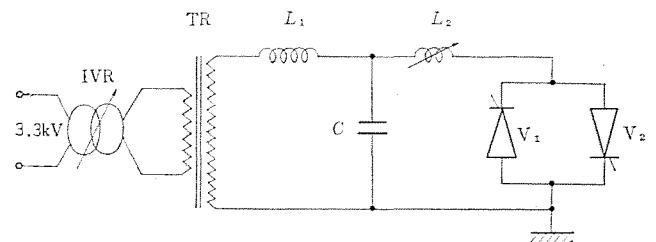
図6.1 観測窓から見た故障表示ランプ  
Damage indicating lamp viewed from the window.

## 7. 試験結果

以下、本70kVバルブに対する各種の性能評価試験結果について記す。

### 7.1 各ステージの予備試験

バルブ本体の組立に先立ち、前記図2.4に示したような油を満たしたオープンタンク内で、全ステージに対し20kV相当の等価試験を行なった。この予備試験において、ステージ内の全素子に対するゲート信号のばらつきと分担電圧を実測し、各ステージが設計どおりの性能を有することを確認した。この試験では、ステージを12段積みにした場合の分布漏遊容量(500PF/段)を模似し、0.04μFの並列コンデンサをステージ両端に付加している。



IVR : 誘導電圧調整器 (0~6.5 kV)  
TR : 升圧変圧器 (150 kV/6.6 kV)  
L<sub>1</sub> : 充電用リアクトル (IVRとTRの漏れインダクタンス)  
C : 高圧コンデンサー (0.2~4 μF)  
L<sub>2</sub> : 転流リアクトル (3~15 mH)  
V<sub>1</sub>, V<sub>2</sub> : 供試バルブ

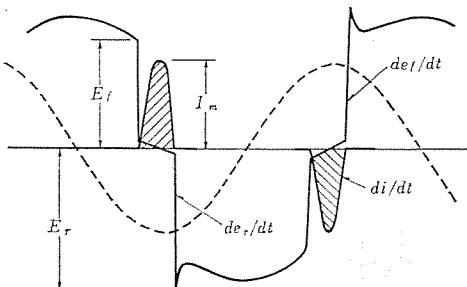
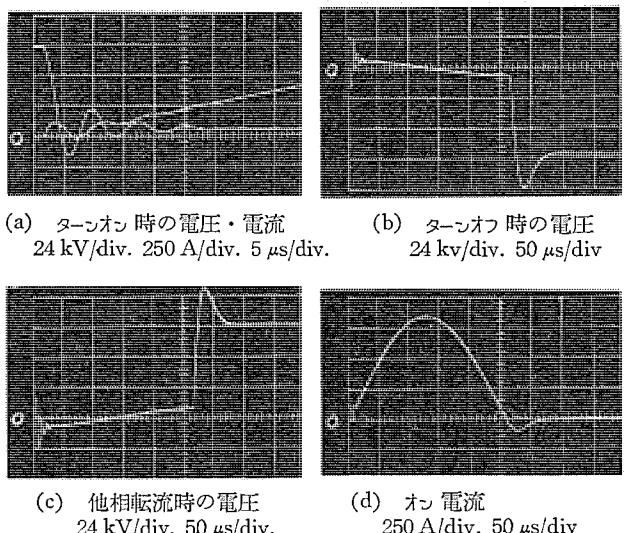


図7.1 高圧転流試験回路と電圧・電流波形  
High voltage commutating test circuit and waveforms.



(a) ターンオン時の電圧・電流  
24 kV/div, 250 A/div, 5 μs/div. (b) ターンオフ時の電圧  
24 kV/div, 50 μs/div

(c) 他相転流時の電圧  
24 kV/div, 50 μs/div. (d) オン電流  
250 A/div, 50 μs/div

図7.2 高圧転流試験時の代表的な電圧・電流波形  
Typical voltage and current waveforms of high voltage commutating test.

### 7.2 バルブの高圧転流試験

図7.1に高圧転流試験回路を示す。これを用いて、高圧変換器として要求される各種の転流過渡責務に対する試験を広範囲に行なうことができる。

図7.2に高圧転流試験時の代表的な電圧・電流波形を示す。この試験における各責務は次のようになっている。

電流波高値  $I_m=850 \text{ A}$

転流時の電流変化率  $di/dt=10 \text{ A}/\mu\text{s}$

ターンオン直前の順阻止電圧  $E_f=72 \text{ kV}$

ターンオフ時の飛躍逆電圧  $E_r=96 \text{ kV}$

ターンオフ時の電圧上昇率  $dE_r/dt=8.5 \text{ kV}/\mu\text{s}$

他相転流時の順電圧上昇率  $dE_f/dt=9.0 \text{ kV}/\mu\text{s}$

図7.3にターンオン、ターンオフ時の各ステージの電圧分担を示す。これは、前記図2.3に示したステージ電位取り出し用の補助ブッシング

を用いて測定したものである。これからわかるようにターンオン、ターンオフ時共各ステージはほぼ均等に電圧を分担している。ターンオン時に、下段にゆくに従って若干のオーバーシュート電圧がみられるが、これは下段にゆくに従ってタンクとステージ間の漏遊容量放電電流が増加するためである。

図7.4および図7.5にそれぞれこの場合の各素子の分担電圧の分布を示す。これは、前記ステージ試験時の各ステージ内素子分担電圧と上記ステージ間の電圧分担をもとにして求めたものである。

分布図には2バルブ分128個の素子についてのものがまとめて記入してあるが、各バルブ内ではさらに分担電圧のばらつきは少なく、ほぼ設計値( $4,000\text{V} \times 0.1 = 400\text{V}$ )内におさまっている。

### 7.3 インパルス電圧に対する分圧試験

図7.6(a), (b), (c)にそれぞれ波頭長がほぼ $1\mu\text{s}$ ,  $3\mu\text{s}$ ,  $10\mu\text{s}$ なるインパルスを印加した場合の各ステージ間の電圧分担を示す。

タンクと各ステージ間の分布漏遊容量(ケーブル伝送部も含む)のために、急変電圧に対する電圧分担は上段(線路端)にゆくほど大きくなる。

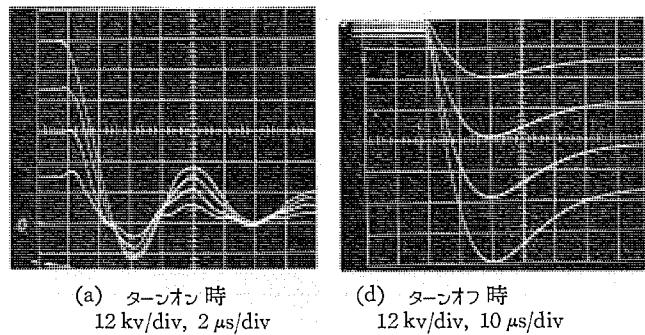


図7.3 転流時の各ステージの電圧分担  
Voltage sharing of each stage at commutating term.

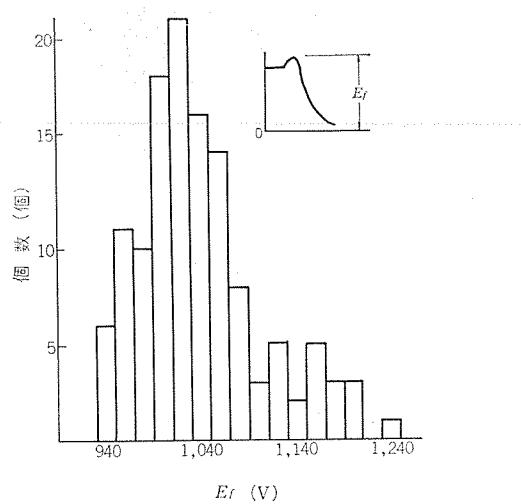


図7.4 各素子のターンオン時の電圧分担  
Shared voltage of each thyristor at turn on.

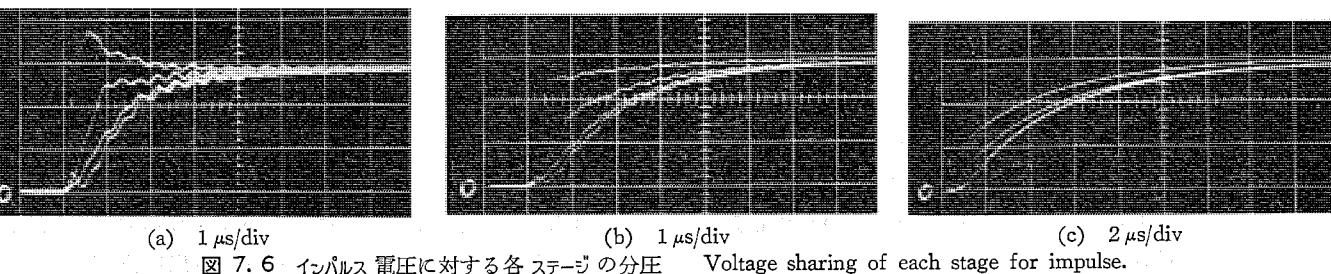


図7.6 インパルス電圧に対する各ステージの分圧  
Voltage sharing of each stage for impulse.

なる。図(a)のごとく、 $1\mu\text{s}$ 程度の急変電圧に対しては最上段には35%程度の過分担がみられる。しかし、図(b)のごとく $3\mu\text{s}$ 程度になれば、もはや過電圧分担はみられず、さらに図(c)のごとくこれが $10\mu\text{s}$ 程度になれば $dv/dt$ も均等に分担されるようになっている。なお、これらは分割入りアノードリクトルを含む各ステージ間の電圧分担であり、各サイリスタ素子の電圧分担はこれよりもはるかに均等化されていることが、等価モデルを用いた実験結果から確認されている。

この試験結果から、次のことが言える。

(1) 開閉サージや変圧器を介しての雷移行サージのごとく、波頭長が $10\mu\text{s}$ 以上の外来サージに対しては、電圧分担および $dv/dt$ 共に全く問題はない。

(2) 波頭長が $1\mu\text{s}$ 程度の外来サージに対しては、分圧の乱れそれ自体はせいぜい35%程度で問題はないが、素子の $dv/dt$ 耐量からみて、これを許容することはできない。したがって、屋外に設置する場合にはバルブに対する直撃雷を防止することが必要条件となる。

(3)  $3\mu\text{s}$ 程度の電圧変化は、一般に6相グレーティング変換器の他相転流時にみられる現象で、電圧自身は低いが $dv/dt$ の点ではこれが最も過酷な条件となってくる。これを抑制するためにはバルブと直列にアノードリクトル、さらにはバルブダンピング回路を併用することも行なわれるが、本バルブではこれに相当する電圧領域で特に高い $dv/dt$ 耐量を有する素子を用い、この問題解決を計った。

### 8. むすび

今後、直流送電などを対象としたサイリスタ高圧変換器の実用化には、油冷・油浸構造によるコンパクト化・屋外形化が必要要件になるものと考えられる。

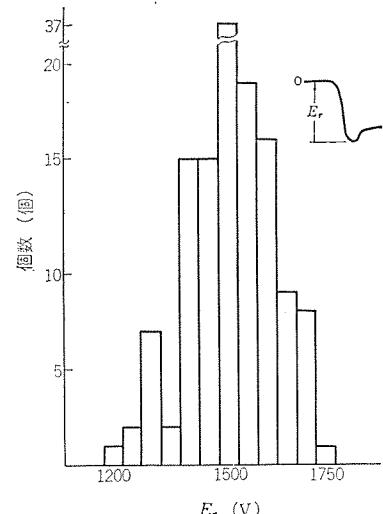


図7.5 各素子のターンオフ時の電圧分担  
Shared voltage of each thyristor at turn off.

当社では、この点に主眼をおいた研究開発を進め、このたび油冷・油浸構造による完全な屋外形 70 kV バルブを完成し、その基礎技術を確立した。

かかる油冷・油浸構造では、分布漏遊容量の増加に伴う問題解決とともに、信頼度の向上を計ることが特に重要である。前者に対しては、サイリスタ素子自体の  $di/dt$  および  $dv/dt$  耐量の向上を計るとともに、これとの共調を考慮した分割入りリアクトルの設計方法を確立することである。また後者に対しては、油冷・油浸構造に適した方式（分圧、高圧点弧、故障検出など）の開発とともに、あらゆる油中使用部品に対する長期の試験検討がその基礎となる。

本バルブは、このような基礎的な研究の積み上げによって完成したものであり、現在引き続き各種の試験を行なっているが全く問題を生じておらず、設計どおりの性能が十分に期待できる。

この成果をもとに、引き続き図 8.1 に示すような 140 kV 定格のバルブを開発中である。これは容量的にも実規模相当のものであり、将来の屋外形 サイリスタ 交直変換所の原形となりうるものである。



図 8.1 開発中の 140 kV モデルバルブ  
140 kV model valve in development

なお、本バルブの開発にあたり、サイリスタ素子および本体構造についてはそれぞれ当社北伊丹製作所と伊丹製作所のご協力を得た。関係各位に感謝いたします。

## 参考文献

- (1) 三菱電機株式会社：高島＝岳路直流送電試験研究報告書（昭33-6）
- (2) 阿部ほか：三菱電機技報, 37, No. 7, 865 (昭37)
- (3) 大野, 光岡, 木村：昭43電気学会東京支部大会, No. 393
- (4) 光岡, 木村：昭43電気学会関西支部連大, No. 3-9
- (5) 大野, 光岡, 木村：三菱電機技報, 42, No. 12, 1,567 (昭43)
- (6) E. Ohno, H. Mitsuoka, Y. Kimura : IEE, Power Thyristor Conf. Paper, No. 53, Pt. 1, 406 (1969-5)
- (7) I. Mikami et al. : Direct Current, 1・1 (New Series), No. 4, 139
- (8) 光岡, 木村, 多田：昭44電気学会連大, No. 683
- (9) 迎, 大野, 光岡, 多田：昭44電気学会東京支部大会, No. 362
- (10) 光岡, 多田：昭45電気学会連大, No. 1,044
- (11) 光岡, 多田：昭46電気学会全国大会, No. 541
- (12) 光岡, 木村, 多田：昭46電気学会全国大会, No. 560
- (13) E. Anwander, J. Förster, J. Weber : ETZ-A, Bd. 89, H. 8, 183 (1968)
- (14) H. Martensson, I. Boksjö : Power Engineering, 38, (1968-12)
- (15) J. J. L. Weaver, A. M. Eccles, W. O. Kelham : IEE, Power Thyristor Conf. Paper, No. 53, Pt. 1, 339 (1969-5)
- (16) C. G. Dewey, M. A. Dranchak, B. D. Leete : IEE, Power Thyristor Conf. Paper, No. 53, Pt. 1, 373 (1969-5)
- (17) J. Hengsberger, R. Wüthrich, F. Scherbaum : CIGRE, August～September 1970, 14-04

# 人工衛星熱制御系の QT 法

下地 貞夫\*・芦田 恒子\*\*・植田 剛夫\*\*\*

## QT Data Reduction Method of Temperature Control System of Medium Altitude Satellites

Central Research Laboratory

Sadao Shimoji • Yasuko Ashida

Kamakura Works Takao Ueda

Necessity is rising in making clear the role of qualification test (to be abbreviated to QT) at each developing step of a compound system like an artificial satellite. A study has been made, with the object of developing a thermal control subsystem of artificial satellites, on evaluation of a thermal control subsystem design by QT data and test items needed for it. To derive a mathematical model based on QT offers the most effective means to obtain a guide for the feedback to the design; existing methods in the past have been surveyed to work out a process considered appropriate. At a present step regular data are the object, but when the process was adapted to measured data of a small satellite by techniques of regressing analytical character, a number of interesting results have been obtained.

### 1. まえがき

認定試験 (Qualification Test, QT) という概念が、宇宙開発など、複合システムの各開発段階を表わす Conceptual-, Definition-, Acquisition-, Operational-Phase などの概念とともに、次第に技術として明確なものになってきた<sup>(1)~(4)</sup>。後に詳述するが、QT は機器の耐環境性を含めた能力の決定および設計の妥当性を評価する試験、とあらかじめができる。

ここでは、人工衛星の受動形熱制御系<sup>(5)~(7)</sup>を対象とし、試験項目設定法については簡単にふれるにとどめ、試験結果を解析して設計の妥当性を評価する方法を主題とする。

人工衛星の熱制御系は環境制御系の一部であり、所要の温度環境を生成し、積載機器を過酷な宇宙環境から保護することを目的とする。熱制御系の QT は、人工衛星の熱モデル<sup>(9), (10)</sup>をスペースシミュレータによって試験し、寿命期間中における外因条件の変化の下で、積載機器が所要温度範囲内に保護されうるかを調べる。

一方、熱制御系の設計にあたっては、飛行計画・構造設計・材料の光-熱的 (Thermo-Physical) 性質および積載機器諸元などに基づき、一連のプログラムシステムを用いて、数学モデル (Thermal Mathematical Model) の作成・解析を行なう。数学モデルの改善を繰り返して、外因条件の変化の下で、積載機器の予測温度が要求範囲内に十分、入るものを得ることができた時点で計算は完了する<sup>(11)~(14)</sup>。

この計算は、複雑な形状における放射エネルギー交換の精密な取扱いを必要とするので、現在のところ一般に、多ノード解析法に依存している。また、現象を可及的精密にシミュレートする目的で、設計プログラムシステムの開発には膨大な努力が傾注されてきた<sup>(15)~(17)</sup>。したがって、初期の熱モデル試験には、設定された数学モデルの実証という考え方方が強かった<sup>(8), (10)</sup>。

しかしながら、設計プログラムが完成するにつれて、ここ数年来、一方にはライトデータとの照合を目的として NASA から、他方にはスペースシミュレーション試験の意義づけの探究結果、ESTEC から測定された温度を用いて数学モデルを補正する、すなわちテストデータを数学モデルにフィードバックする方法が開発されるようになってきた。

われわれも同様の観点から研究を進め、設定された数学モデルに

ハードパラメータを導入する方法、および独立変数相互間に関数関係の含まれる場合に、これを除去しつつ回帰分析を進める方法を検討した。2~3の新しい結果も含めて、概要を報告したい。

以下、2章に QT の定義、これまでの熱モデル試験データ解析法および設計の評価法の比較検討、およびわれわれの案出した方法の内容・特長を述べる。3章には小形衛星熱モデルについての実測値を解析した結果を示す。

### 2. 热制御系 QT データの解析法

#### 2.1 QT の定義的説明

NASA の Quality Program Provisions<sup>(1)</sup> および CR-60410<sup>(4)</sup> などによると、次のように要約することができる。

(1) QT は、機器が仕様条件に耐える能力を決定するために、実際の使用に先立って、機器の設計上の能力の最小レベルを確認し、実証する試験である。この試験は、また、信頼性および取扱い、輸送中に遭遇する環境ストレスに耐える能力についての設計の妥当性の評価をも兼ねる。

(2) 試験条件は一般に Field Condition よりきびしいが、非現実的な故障モードをおこすほど、きびしくはない。試験にあたっては、顕著な設計上の欠陥を探すこと、正確な試験記録・故障記録・不合格記録・技術データを残すこと、特に重要である。

したがって、試験項目の設定は、概念 (Conceptual-Phase) 設計における最も困難な作業の一つである。われわれは、機器の設計理論を開発するという立場から、これらの試験データを解析して設計にフィードバックし、設計の妥当性を評価する方法を必要とする。人工衛星の場合、周知のように、各サブシステムごとに BBM (Bread Board Model, いわゆる バックセット) を作成、インターフェイスコントロールを受けて、EM (Engineering Model) を、次に PM (Proto-Type Model) へと開発が進められ、各段階ごとに QT を受ける。熱制御系についても各段階に相当する開発課題がある<sup>(18)</sup>。PM 設計に総合される前に、少なくとも EM レベルに相当する熱モデル試験を行なって、設計の評価、改善を行なっておくことが望ましい。

#### 2.2 多ノード方程式および熱モデルの試験

人工衛星熱制御系の設計にあたっては、複雑な形状における放射

熱交換を精密に取扱う必要上、一般に多ノード解析法が用いられている。すなわち、全体を多数の等温ノードにランプ化し、ノードの温度に対する方程式を基礎としている<sup>(5)</sup>。

軌道飛行時における人工衛星へのエネルギー入力は、太陽直射  $Q_S$ 、地球のアルビド  $Q_a$  および赤外放射  $Q_R$  などである。他に、発熱源として積載電子機器を考える。また、表面各部の温度の4乗に比例する宇宙空間への熱放散がある。ノード間の熱エネルギー伝達は伝導および放射の形で行なわれ、以上をまとめると、ノードの温度に対する方程式は、よく知られた

$$C_i \frac{dT_i}{dt} = \sum_{j=1}^n D_{ij} \cdot (T_j - T_i) + \sum_{j=1}^{n+S} \sigma \cdot F_{ij} \cdot (T_j^4 - T_i^4) + Q_{Si}(t) + Q_{ai}(t) + Q_{Ri}(t), \quad i=1, \dots, n \quad \dots \dots (2.1)$$

と書ける。添字  $i$  はノード番号で、1から  $n$  までとする。また、 $C_i$ 、 $D_{ij}$  および  $F_{ij}$  はそれぞれノード  $i$  の集中熱容量、 $i-j$  間の伝導のコンダクタンス および 放射交換係数を表わす。 $T_{n+1}, \dots, T_{n+S}$  は外部の温度で、スペースシミュレータによる試験の場合も考えて、 $S$  個の異なる一定温度を考えている。軌道飛行時には、もちろん  $S=1$  で  $T_{n+1}=0$  と考える。

各ノードの温度には積載機器などから許容範囲が要求されている。受動型熱制御法は、線形あるいは非線形 フィードバック要素を用いず、式(2.1)に含まれる伝導と放射の二つのエネルギー伝達のモードに対するコンダクタンスの値、および  $Q_S$  などに陰に含まれる外部と授受するエネルギー伝達に対するコンダクタンスの値を選定して、所要の温度環境を生成しようとするものである。すなわち、設計プログラムシステムを用いて軌道飛行中に変化する入力  $Q_S(t)$  などを予測しつつ、要求温度範囲に入るような解  $T_i, i=1, \dots, n$  を与えるような  $D_{ij}$  および  $F_{ij}$  などが見出された時点で設計計算は完了し、数学モデルが設定されたといえる。

能動型制御を必要とする場合には、非線形要素を含んだフィードバックを表わす式を連立させ、上に得られた解を基礎として、さらに数学モデルの設定を進める。

次に、宇宙環境は温度制御の観点からは高真空、極低温および強い太陽光による照射を主要なストレスとして特長づけられよう。スペースシミュレータにおいて、これらのストレスを単独、あるいは組合せて熱モデルに印加することにより QT データが得られる。

スペースシミュレータの種類、構造、設計およびこれを用いた熱モデルの試験法について多くの研究開発がなされている<sup>(6), (9), (10)</sup>。試験条件の設定にあたっては、上記3種のストレスのうち、太陽光による照射を含む軌道加熱と呼ばれるものの変化を考慮する必要がある。すなわち、人工衛星の寿命期間中における軌道条件および姿勢の変化が重要である。短い期間を考えると、軌道および姿勢は慣性空間において定まったものと見なすことができ、その期間においては、人工衛星は、日照および地球による日陰によって、軌道周期を周期として一定の振幅で変化する軌道加熱を受ける。通常、寿命期間中における軌道条件と姿勢の変化を、このような定まった条件のいくつかによって代表させる。

非線形 フィードバック要素を含まない場合、熱制御系はエネルギー拡散的であるから、個々の軌道加熱条件の下における各ノードの温度の、それぞれの平均値および振幅によって系の特性が定められる。

われわれは、加熱法として、ブロックヒータ、スキンヒータ、加熱ランプ列および集光装置のついたソーラシミュレータの4種を比較検討して、次のとき測定手順を設定した<sup>(19)</sup>。すなわち、

(1) 真空(常温)環境下で、熱モデルの特定の積載機器に相当するノードに、ブロックヒータで一定熱量を加え、定常温度分布を測定する。これを数段階の異なる熱入力について行なう。

(2) 真空、冷却環境下で、外被の内面の適当な部分にスキンヒータで一定熱量を加え、定常温度分布を測定する。

(3) 真空、冷却環境下で、一定の軌道加熱条件に従って、ソーラシミュレータ光を照射し、温度変化分布を測定する。

第(1)項により、人工衛星内部におけるノード間の熱伝達係数に関する情報を得ることができる。可及的多数の積載機器について、この測定を行なうことが望ましい。第(2)項は、外部への熱エネルギー放散を定めるに必要な測定で、各スキンヒータへの注入電力配分を2~3とおりに変えたデータは、きわめて有意な解析結果を与える。第(3)項は、軌道飛行時における人工衛星熱制御系の能力を評価するに十分なもの、とされ、われわれが地上で行ないうる最善のテストではあるが、ソーラシミュレータによる照射エネルギー量の絶対値を知ることの困難さなどから、第(1)項および第(2)項による測定結果を援用し、解析することが必要と考えられる。

これらの測定項目の詳細内容および技術課題などについては、別の機会に報告することとし、試験条件として項目設定の目的および要点を示したものである。

### 2.3 QT データ解析法の検討

地上試験あるいはフライテデータにより設計を評価するにあたっては、いわゆるアウトプットデータ、熱制御系の場合は測定温度、を予測値と照合するにとどまらず、数学モデルに還元する手法が重要である。すなわち、測定された温度を解析して数学モデルに導くような手法は、設計の改善に対して、一つの明確な指針を与えるであろう。

多ノード方程式(2.1)を基礎式とし、設計計算におけるとは逆に、 $T_i$  および  $dT_i/dt$  を与えて、係数  $C_i$ 、 $D_{ij}$  および  $F_{ij}$  を求めることを考える。行列  $\{D_{ij}\}$  および  $\{F_{ij}\}$  は、対称性などから、合わせて  $n^2$  個の未知要素を持つ。解析の結果、これらの  $n^2$  個の要素の大部分は0として除去され、残された  $D_{ij}$  および  $F_{ij}$  の値が定まり、温度に関する測定値から熱抵抗/容量等価回路を定めるのである。

代表的な解析法の要約を行なって、われわれのアプローチを組立ててゆくことにしよう。測定値に含まれる誤差を減小する目的で統計解析的手法が用いられている。

NASAにおいては、モデル実験およびシミュレーションデータが豊富にあるので、設計段階で設定された数学モデルは、含まれるべき要素と除去すべき要素について、ほとんど正しく構成されているものとし、誤差の大きい要素(パラメータ)の補正を目的とした解析法が多く開発されている。Browne<sup>(20)</sup>の伝導抵抗回路網補正法、Ishimoto-Bevans<sup>(21)</sup>の放射抵抗回路網要素値変動の予測温度への影響の研究がある。また、Ishimoto-Bevans<sup>(22)</sup>は測定データの sparsity に著目し、これに耐える解析法の重要性を強調している。すなわち、すべてのノードの温度に関する測定値が与えられれば、数学モデルは deterministic に求められるが、測定値はわずかな(sparse)なノードに対してしか得られないとして、設定された数学モデルの感度解析を行ない、補正すべきパラメータの重要度を定めた。不確定の要素の大きいパラメータをソフトパラメータ、確定しているものをハードパラメータと名づけた。カルマンのプロセッサ方程式を変形し、予測温度と測定温度の差の平方和を最小にするようにパラメータの補正を行なっている。

ESTECにおいては、ESRO-Iの設計におけるランプ化の欠陥が、

QT 試験によって発見されたため<sup>(23)</sup>、数学モデルの構成に関心が持たれ、Toussaint-Doenecke<sup>(24)</sup>によって、温度に関する測定値から数学モデルを導く方法がくふうされている。すなわち、多ノード方程式を

$$-C_i \left( \frac{dT_i}{dt} \right)_m + \sum_{j=1}^n D_{ij} \cdot (T_{j,m} - T_{i,m}) + \sum_{j=1}^n R_{ij} \cdot (T_{j,m}^4 - T_{i,m}^4) - R_i \cdot T_{i,m}^4 + E_i(t_m) + S_i(t_m) = r_{i,m} \quad i=1, \dots, n \quad \dots \dots \dots (2.2)$$

と書く。足字  $m$  は時刻  $t_m$  における測定値、 $E_i$  および  $S_i$  はそれぞれ赤外および太陽光照射を表わす。また、 $R_{ij} = \sigma F_{ij}$  で、 $r_{i,m}$  は残差不平衡分である。熱エネルギー不平衡分の2乗和中、

$$\phi = \sum_{i=1}^n \sum_{m=1}^M r_{i,m}^2 \quad \dots \dots \dots (2.3)$$

を最小にする条件から、 $D_{ij}$  などに対する正規方程式を導き、ガウスの消去法を用いて、解を求めていた。92 ノードの実例を示しているが、未知数は物理的考察から  $\sim 1/4$  に減じてある。 $(dT_i/dt)_m$  の作成法に技巧がこらしてある。

わが国においては、大島氏<sup>(25)</sup>が、連立常微分方程式の基本解を実験的に求めるという観点に立ち、定常測定の解析から研究を進めている。すなわち、ノード  $i$  に一定熱量  $P_i^{(k)}$  を加えると、式 (2.1) から、

$$\sum_{j=1}^{N+S} D_{ij} \cdot (T_{j,(k)} - T_{i,(k)}) + \sum_{j=1}^{N+S} R_{ij} \cdot (T_{j,(k)}^4 - T_{i,(k)}^4) + P_i^{(k)} = E_i^{(k)} \quad i=1, \dots, n \quad \dots \dots \dots (2.4)$$

となる。一組の  $P_i^{(k)}$  の加熱条件における測定値から、 $D_{ij}$  および  $R_{ij}$  に対して  $n$  個の方程式が得られる。 $k$  組の加熱条件によって  $n \times k$  個の方程式が得られ、式 (2.3) と同様に  $E_i$  の平方和を最小にする条件から  $D_{ij}$  などに対する正規方程式を導き、回帰分析の手法を用いて、解を求めていた。各種の解法を適用比較し、未知量に対し、偏相関係数、 $F$  値、および得られた数学モデルについて重相関係数などを計算している。

いずれの方法も、最小自乗法を基礎としているが、熱制御系の概略設計には、式 (2.1) の線形近似方程式が用いられ、妥当な結果を与えるので、この方法はおおむね適用できるものと考えられる。しかしながら、ここで、計算された  $D_{ij}$  などの有意性の検討が重要であることを強調したい。例として、Draper-Smith が Hald のデータを各種の方法で解析した結果<sup>(26)</sup>を引用する。すなわち、4 変数の線形モデル、

$$Y_t = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4 \quad \dots \dots \dots (2.5)$$

の当てはめを試み、1)すべての可能な回帰式の検討、2)後退消去、3)前進選定、および 4)階段回帰を適用して  $\beta_0, \dots, \beta_4$  を求めたところ、いずれも、97% 以上の重相関係数を持つ予測式が得られたが、それぞれの予測式における母数  $\beta_i$  の値は全く異なったものであった。これは、与えられた独立変数のデータに  $X_1 + X_2 + X_3 + X_4 = \text{一定}$  という関数関係が、理論的に含まれているためである。数学モデルの実証においては、 $D_{ij}$  および  $R_{ij}$  の推定値の有意性が、最終的に重要である。

この問題の性質を解明するためのアプローチとして、以上、要約した方法の検討を行ないつつ、定常測定データの解析法から組立ててゆくことにしよう。

## 2.4 人工衛星内部の熱抵抗／容量等価回路

測定温度に基づく数学モデルを導くにあたっては、 $D_{ij}$  および  $R_{ij}$  のうち、除去するものと取り入れるものとを定めることが、目的の一

つである。QT データから人工衛星の外部とのエネルギー授受を計算するためには、スペース シミュレータの光・熱放射に対する吸収および反射特性、および擬似太陽光の強度・分光特性を調べることが作業の主要な部分となる。ここでは、人工衛星内部におけるエネルギー伝達特性を対象としよう。アプローチの手段として、定常温度の測定値の解析を行なう。

われわれの目的のためには、等価回路の、いわば、結線状態を既知としている Ishimoto-Bevans の方法を直ちに適用することはできないが、ハード パラメータおよびソフト パラメータは重要な概念である。大島氏の方法においては、 $n$  個のノード系において、伝導を表わす  $D_{ij}$  が  $n(n-1)/2$  個、放射を表わす  $R_{ij}$  が、最少  $S=1$  として、 $n(n+1)/2$  個、未知量の数は  $n^2$  個ある。加熱ノードの数を  $k$  とし、多ノード方程式の非線形性を考えなければ、得られる独立な方程式は  $n \times k$  個であり、加熱量を変えて測定を繰返しても、正規方程式の行列式がランク落ちする危険性がある。

人工衛星の構造を考慮に入れると、未知量  $D_{ij}$  および  $R_{ij}$  のうち、明らかに除去すべきものが相当数ある。特に、行列  $\{D_{ij}\}$  は Sparse で、通常、ノード数の 3 ~ 6 倍といわれている。未知量のうち、 $n \times (n-k)$  個のものを除去しておけば、正規方程式を予想されるランク数の次元に縮小することができる。この場合にも、繰返し測定を行なって、余分の式を数多く求めておくことは、純誤差の推定および測定誤差の影響を減少させるに有効である。

正規方程式は、温度の予測値と実測値の差の平方和を最小にする条件から組み立てるほうが理論的検討上からは好ましいが、熱量の残差平方和を最小にする条件から導いたものは、 $D_{ij}$  および  $R_{ij}$  を直接、解として与えるので、これを採用することにする。

データが時間とともに変化しない形で与えられているとき、正規方程式は Toussaint-Doenecke にも見られるように、最小自乗法あるいは回帰分析によって解くことができる。独立変数の間に関数関係がない、換言すれば高い相関性のない場合には、容易に回帰を進めることができる。しかしながら、いま、各ノード 温度  $T_i$  の間に相関性がないとはいえない。すでに述べた Draper-Smith の解析が示すように、それぞれの方法で、いずれも高い重相関係数を与えるにもかかわらず、全く異なった母数を持つ回帰式が導かれることになる。測定温度から導かれる数学モデルについても全く同様の現象が現われる<sup>(25)</sup>。

ここで、もし、観測方程式 (2.2) あるいは式 (2.4) が、測定誤差について“線形”であり、回帰の適用可能性に関する条件<sup>(27)</sup>が成立つものとすれば、目的とする  $D_{ij}$  および  $R_{ij}$  の有意性すなわち、それらの導入あるいは除去、null hypothesis に関する検定は、それに対する偏  $F$  値によって行なわれる。したがって、われわれは、Draper-Smith によって段階的回帰手順を採用するのが妥当である、と結論することができる。段階的回帰の計算のフローは Efroymson<sup>(28)</sup> のものが標準とされている。

以上をまとめると、次のようになる。人工衛星内部のエネルギー伝達を主として表わす数学モデルを測定温度から導くにあたり、構造的にみて、明らかに除去すべきパラメータを選んで、正規方程式の次元を加熱ベクトルの張る次元まで落として、ランク落ちの危険を避ける。また、解法としては、各独立変数  $T_i$  の間に相関関係の高いものがあるので、段階的回帰手順により、パラメータ  $D_{ij}$  および  $R_{ij}$  の偏  $F$  検定を行なって導入および除去を進めていく、この方法で得られた解を、他の前進回帰などで得られたものより正解に近いものとする。

なお、定常問題における感度解析に対応するものとして、変換後の  $Q_i$  に対する偏相関係数が高く、かつ誤差の大きい変数を選び、これをソフト パラメータと考えることができよう。

### 3. QT データによる数学モデルの解析

解析法の組立てに続く作業としては、初めにアルゴリズムの数値解析的精度の検証、次に測定誤差が検定の有意性に及ぼす影響の分析、第3に試設計によって設定した数学モデルの予測値に基づく試設計の評価ということになろう。しかし、ここではむしろ、QT データの解析によって得られる結果を述べ、QT 解析の目的と手法の適用性を明らかにすることに努める。

熱制御系 QT データを統一的に扱う手法へのアプローチとして、ここに組み立てた解析法を、ある小形衛星熱モデル試験データに適用し、解析のプロセスを示そう。この人工衛星の概略は次のとくである。すなわち、一板の プラットフォーム を主構造とし、内部積載機器はほとんど、この上に取り付ける。外形は短い多角柱をなし、側面には太陽電池をちょう(貼)布、上ふた(蓋)にはサンセンサを取り付ける。プラットフォームは、また、底板を兼ね、下側にロケットとの分離機構を取り付けるものとする。

ノード数は 12 とし、このうち 11 のノードに熱量を加えることができる。特定のノードに一定熱量を加え、12 のノードの定常温度の測定を行なう。さらに、一つのノードに対する加熱レベルを 3 段階に変えて測定が繰り返され、結局、 $12 \times 11 \times 3 = 396$  個のデータが与えられている。

未知量  $D_{ij}$  および  $R_{ij}$  に対する方程式は

$$\sum_{j=1}^{12} D_{ij} \cdot (T_j^{(k)} - T_i^{(k)}) + \sum_{j=1}^{12} F_{ij} \cdot (\sigma \cdot T_j^{(k)4} - \sigma \cdot T_i^{(k)4}) + F_{i0} \cdot (\sigma \cdot T_0^{(k)} - \sigma \cdot T_i^{(k)4}) + P_i^{(k)} = E_i^{(k)} \quad \dots \dots \dots (3.1)$$

$$i=1, \dots, 12; k=1, \dots, 33$$

と書ける。 $T_0^{(k)}$  は シュラウド の温度である未知量の大きさの程度をそろえるために、 $R_{ij}$  から  $\sigma$  を出しておく。熱制御系が dissipative であることから、多ノード 方程式の係数行列は正値対称、すなわち

相反関係  $D_{ij}=D_{ji}$ ,  $F_{ij}=F_{ji}$  なることが要請される。したがって、 $D_{ij}$  および  $F_{ij}$  がそれぞれ、 $12 \times 11/2 = 66$  個、 $F_{i0}$  が 12 個、合計 144 個の未知量がある。

方程式の数は、式 (3.1) の形のものが  $12 \times 33 = 396$  個ある。熱エネルギー 不平衡の平方和、 $\sum E_i^{(k)2}$  を最小にする条件から、母数  $D_{ij}$ ,  $F_{ij}$  および  $F_{i0}$  に対する 144 元の正規方程式が導かれる。ここで、不平衡分、すなわち残差平方の和の取り方に注意を要する。Ishimoto-Bevans<sup>(22)</sup> の議論がある。系全体の不平衡分、 $\sum_{i=1}^{12} \sum_{k=1}^{33} E_i^{(k)2}$  を考えねばならないが、あるいは、 $\sum_{k=1}^{33} E_i^{(k)2}$ ,  $i=1, \dots, 12$  と分割し、正規方程式を既約化しうるものか、について十分明確でない。ここでは、前者を採用しておこう。すなわち、 $D_{ij}$  などを合わせて 144 元のベクトルとして扱う。

次に、連立された 144 元の方程式の独立性を検討しよう。33 個の加熱ベクトル  $P^{(k)}$  のうち、独立なものの数は 11 個である。したがって、仮りに多ノード 方程式が線形であれば、 $I^{(k)}$  ベクトルの独立なものは 11 個しか選べない。正規方程式のうち、独立な式は  $11 \times 12 = 132$  個となる。われわれは、144 元の正規方程式の一般逆行列を求め、一次独立な式の数を調べたところ、144 個あることが知れた。これは、放射を表わす項の非線形性の効果によるものと思われる。しかしながら、一方、正規方程式は未知量あるいは母数  $D_{ij}$  などについて線形であるから、変数相互間に陰に閲数関係を含んでいるであろうが、回帰分析を適用して、ある程度の有意推定値を得ることができるものと期待される。

Draper-Smith に従って、この 144 元の正規方程式に階段回帰を行なった結果を表 3.1 に示す。それぞれのわく内の上段は  $D_{ij}$  および下段は  $F_{ij}$  で、見やすい値に単位を取つてある。変数の導入順序は応答に対する偏相関係数の 2 乗により定め、母数の導入あるいは除去は偏  $F$  検定によって行なつた。いまのように母数が 100 個以上にもおよぶ問題の場合には、回帰の成立する仮定がすべて満たされているものとすれば、 $F$  値の下限は 2 以上で、十分な有意性を持つ。

表 3.1 によって表わされる伝導および放射のマトリクスは、重相関係数  $R^2 > 98\%$  である。換言すれば、全残差平方和の 98% 以上

表 3.1 正規方程式の階段的回帰による母数の推定量 (144 元)  
Estimated values of parameters by stepwise regressions for normal equation (144 dimensions).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1 0.025752				0.013704								
2 0.13386		-0.060065 0.092713			0.28801 -0.26081	-0.005259	-0.033851 0.047588		0.0096688		0.0083042	0.098566 -0.11799
3 0.064088		0.064088	0.0039146		-0.075711 0.15688	①		② 0.0066473	0.0050596	0.010431	② 0.020582	
4 0.028383					0.058960 -0.050489	②	②		③		①	
5 0.30823					0.011510	0.016585	0.010406	0.0044157	0.0096848	0.012193	-0.087605 0.11067	
6 0.023096						0.002862				④	0.002750	
7 0.032882							0.003481			0.004084	0.004427	
8 0.007824												
9 0.027582								0.003518	0.012633	-0.042669 0.047328		
10 0.019206									0.003451	0.003660		
11 0.044619										0.014087		
12 0.067451												

を説明することができて、2%以上の精度で熱エネルギーの平衡を満たす回帰式を与える。しかしながら、われわれの目的は、個々の母数の精度を得ることである。検討を要するものとして、1) 負のコンダクタンスが推定されている、および、2) 外被に囲まれている内部積載機器と外部との間に直接の放射エネルギー交換  $B_i$  が存在すると推定されている、この2点が直ちに指摘される。

一方、人工衛星の構造から見て、確かに0とおいてよい  $D_{ij}$  および  $F_{ij}$  が相当数あり、これは一種のハードパラメータと見なすことができ、いま“0-パラメータ”と呼ぶことにしよう。積載機器で離れて取り付けられたものの相互間の直接の伝導  $D_{ij}$  などは、最も自然な0-パラメータであろう。表3.1において、負の伝導コンダクタンスが推定されているものも含めて、 $D_{ij}$  に12個の0-パラメータを導入し、

132元の正規方程式を作成、階段回帰を行なった結果を表3.2に示す。132元は、本来、独立と考えられる式の数である。

0-パラメータの導入によって、 $D_{ij}$  および  $F_{ij}$  の推定値に興味ある変化が観察される。表3.1および表3.2におけるそれぞれのわくを太線とし、現われた現象に番号をつけて区別した。第1は  $D_{3,5}$  および  $D_{5,12}$  のごとく、初めに表3.1において負の値が推定されたものを0とおき、また、 $F_{2,5}$  および  $F_{5,11}$  もある値が推定されていた場合である。表3.2には、丁度、差引の結果が  $F_{ij}$  の値に現われている。第2は、初めに、 $D_{ij}$  は0、 $F_{ij}$  にある値のあった場合で、0-パラメータとしたことの影響はどこにも現われていない。第3は、 $D_{5,9}$  のごとく、正であったものを0とした場合で、隣接する  $D_{5,10}$  に負の値を生じ、同時に、差引き元の値に近くなるように

表3.2 正規方程式の階段的回帰による母数の推定量(132元)  
Estimated values of parameters by stepwise regressions for normal equation (132 dimensions).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0.027401		0.013206									
2		0.14265	-0.086886 0.12428		0.2375 -0.19977	0.005298	-0.02972 0.043142		0.010514		0.010141	0.058898 -0.07375
3			0.062459	0.0036114	X 0.071312	①	②	X	②	X 0.007396	0.005640	X 0.010811 ② 0.021166
4				0.029482	0.05695 -0.048995	②	②			③		①
5					0.31252	X 0.011789	X 0.017467	0.010178	X	-0.024817 0.033426	0.010579	X 0.017818
6						X 0.025536	0.0027656		X	X	④	X
7							0.032931		0.0032687		0.003971	0.004638
8								0.0084526				
9									0.030642	0.003033	0.012610	-0.05172 0.057192
10										0.022804		0.0041255
11											0.046239	0.015122
12												0.067454

表3.3 階段的回帰手順による変数の導入順序(左:144元、右:132元)  
Order of introduction of variables by stepwise regressions.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	41	39		42	40							
2			10	10	30 21	30 21	7 33	7 33	46 23	47 23		
3				12	12	51 49	43 2	X 2	①		X 25	② 25
4					18	18	28 39	28 41②				③
5							1	1	24 24	4 4	20 32	22 32
6								17	17	55 51		
7									15	15		38 44
8										31 31		
9											14 14	40 50
10											16 16	56
11												13 13
12												11 11

表 3.4 階段的回帰のステップに対する  $D_{ij}$ ,  $F_{ij}$  の変化  
Variations of  $D_{ij}$  and  $F_{ij}$  vs. step of stepwise regressions.

Step \	(1) $F_{5-5}$	(3) $F_{3-12}$	(6) $D_{11-12}$	(7) $D_{2-5}$	(9) $F_{4-6}$	(18) $F_{4-4}$	(20) $D_{5-8}$	(22) $D_{5-11}$
1								
2	0.362							
3	0.348							
4	0.350	0.072						
5	0.336	0.072						
6	0.336	0.072						
7	0.336	0.059	0.043					
8	0.284	0.060	0.043	0.091				
9	0.284	0.055	0.044	0.092				
10	0.284	0.055	0.044	0.092	0.022			
11	0.292	0.055	0.044	0.084	0.022			
12	0.295	0.041	0.032	0.082	0.022			
13	0.300	0.031	0.032	0.084	0.022			
14	0.304	0.031	0.020	0.082	0.022			
15	0.309	0.030	0.020	0.080	0.022			
16	0.316	0.028	0.019	0.083	0.022			
17	0.320	0.029	0.018	0.082	0.022			
18	0.323	0.028	0.017	0.081	0.013			
19	0.329	0.027	0.016	0.079	0.001	0.043		
20	0.329	0.027	0.016	0.079	0.0	0.043		
21	0.325	0.027	0.016	0.078	0.0	0.043	0.016	
22	0.329	0.021	0.016	0.069	0.0	0.043	0.016	
23	0.322	0.028	0.015	0.069	0.0	0.042	0.015	0.017
24	0.323	0.028	0.015	0.065	0.0	0.042	0.015	0.017
25	0.319	0.028	0.016	0.063	0.0	0.042	0.015	0.017
26	0.318	0.027	0.016	0.064	0.0	0.041	0.015	0.017
27	0.314	0.025	0.016	0.065	0.0	0.041	0.014	0.015
28	0.314	0.024	0.014	0.066	0.0	0.041	0.014	0.012
29	0.311	0.024	0.014	0.066	0.0	0.033	0.014	0.009
30	0.310	0.025	0.015	0.065	0.0	0.033	0.014	0.009
31								
50	0.314	0.021	0.015	0.239	0.0	0.030	0.010	0.011

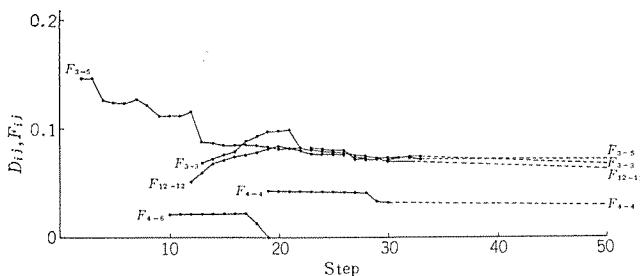


図 3.1 階段的回帰のステップに対する  $D_{ij}$ ,  $F_{ij}$  の変化  
Variations of  $D_{ij}$  and  $F_{ij}$  vs. step of stepwise regressions.

表 3.5 0-パラメータの導入による  $D_{ij}$ ,  $F_{ij}$  の変化  
Variations of  $D_{ij}$  and  $F_{ij}$  by introduction of 0-parameters.

0-パラメータ $D_{ij}$ および $F_{ij}$	なし	4 個	8 個	12 個	14 個
$D_{1-3}$	0.013704	0.013087	0.013206	0.013206	0.013206
$D_{2-5}$	-0.075711	×	×	×	×
$D_{4-5}$	0.058960	0.058761	0.056945	0.056945	0.056945
$D_{5-8}$	0.010406	0.011043	0.010178	0.010178	0.010178
$D_{5-9}$	0.004416	0.0	×	×	×
$D_{5-10}$	0.0	0.0	-0.024817	-0.024817	-0.024817
$D_{5-12}$	-0.087605	-0.098769	×	×	×
$F_{3-5}$	0.15688	0.074120	0.071312	0.071312	0.071312
$F_{3-11}$	0.010431	0.011289	0.010811	0.010811	0.010811
$F_{5-12}$	0.11067	0.12059	0.017818	0.017818	0.017818
$F_{6-12}$	0.002750	0.003097	0.0	0.0	0.0
$F_{7-8}$	0.0	0.002544	0.0	0.0	0.0
$F_{10-11}$	0.003451	0.003701	0.0	0.0	0.0
$F_{2-2}$	0.13386	0.13305	0.14265	0.14265	0.14265
$F_{5-5}$	0.30823	0.30932	0.31252	0.31252	0.31252

$F_{5,10}$  を増加させている。第4は、初めに0と推定されていた  $D_{6,12}$  を0-パラメータとしたところ、 $F_{6,12}$  も消失してしまったような場合である。

これらの144元および132元の正規方程式に階段回帰を行なったときの変数の導入順序および除去の様子を、表3.3に比較して示した。いくつかの母数を0-パラメータとしたことによって、相関マトリクスは異なったものになっているにもかかわらず、変数の導入および除去の順序はほとんど影響を受けていないことが著しい。

変数の導入に伴う母数の推定値の変化を表3.4および図3.1に示した。最初に  $F_{5,0}$  が導入され、これが7番目の  $D_{2,5}=D_{5,2}$  の導入時点で、 $D_{2,5}$  の値に近い変化を示している。2番目の  $F_{5,3}$  によっても、同様の変化を受けているようである。さらに、 $D_{2,5}$  は33番目の負の  $F_{2,5}$  によって、0.06程度であったものが0.24程度にも大きな値となったが、初めに  $D_{2,5}$  を導入したときとは異なり、 $F_{5,0}$  にほとんど影響を与えていない。また、 $F_{3,12}$  の場合には、 $D_{11,12}$  および  $F_{12,12}$  の導入によって、それぞれの値に相当する減少分を示している。そして、 $D_{11,12}$  は  $F_{12,12}$  および  $F_{11,11}$  によって減少した後、まもなく一定値に安定している。

負の推定量は回帰のあの段階で導入される、すなわち  $F$  値も低いものであることに注意したい。

すなわち第1の現象は、Draper-SmithがHaldのデータを分析したときに母数に現われたと同様の現象と見られ、同じノード対を結ぶ伝導と放射のコンダクタンスの間の密接な相関を示唆し、第2は推定の有意性を確証し、第3および第4は第1の現象が他のノード対に及んだものといえよう。

正規方程式を導くにあたって、全残差平方和を最小とするという条件は、少し不十分であって、推定量にあいまいさを生じたものと思われる。0-パラメータの導入は、必要な条件を加え、変数間の関数関係を避けつつ回帰を進めるに役立ったといえる。表3.5に、0-パラメータを4, 8, 12および過剰な14とした場合の推定量の変化を示した。 $D_{ij}$  および  $F_{ij}$  とも、0-パラメータの8個くらいから一定値に近づいていることがわかる。

前に指摘した、内部積載機器の  $F_{10}$  の存在は、符号の問題をおくと、加熱ヒータのリード線による  $D_{10}$  と考えることができる。試験データの解析にあたって見落としていた因子を見出していくことも肝要である。

現段階では、残差平方和の取り方、回帰における情報量の定め方に不明確な点があるので、これらの問題の解決と合わせて、0-パラメータの系統的導入法を進めることにより、等価回路診断法のごときものが統計解析の方面からも開発されていくであろう。

#### 4. む す び

人工衛星熱モデルのQTデータ解析法を述べた。複合システムの各開発段階で行なわれるQTの共通な役割を検討し、設計の評価・改善法を主題とした。QTデータに基づく数学モデルが、そのための指針を与えるものとなることから、試験項目として必要なもの、およびこれまでの解析法を調べて、数学モデル導出法を組み立てるプロセスを説明しつつ、われわれの案出した方法を述べた。

この方法は、統計解析的な性格のものであり、階段回帰を骨子とした。回帰の母数に0-パラメータなるものを導入し、0-パラメータを系統的に導入あるいは動かすことにより、QTデータに基づく数学モデルを決定していく。現在のところ、定常温度測定結果のみを解析し

うる段階であるが、データサンプリング法およびスプライン近似と総合することにより、時間的に変化する温度測定結果についても適用可能となる。これらの方針についても近く報告したい。

研究の遂行にあたり、ご援助いただいたNASDA 平井総括開発部員やほかのかたがた、ならびに社内関係各位に深く謝意を表す。

(昭和46・4・7受付)

### 参考文献

- (1) J. E. Condon : NASA NHB 5300.4 (1B), Quality Program Provisions (1969)
- (2) N. L. Gelbwaks : IEEE, SSC-3, 6 (1967)
- (3) R. J. Westerheid : 8th R/M Conf. (169)
- (4) J. G. Jackson : NASA CR-60410, A Study of Spacecraft Testing Philosophies and Techniques
- (5) B. A. Nevelli et al : NASA CR-65580, An Introduction to Spacecraft Thermal Control
- (6) Toussaint et al : ESRO TN-29 (ESTEC) 5, Spacecraft Technology, V Space Environment
- (7) 平井、下地、芦田、植田 : 三菱電機技報, 45, No. 5 (昭46)
- (8) B. Hartel : TFS Technology Report (1968), III Thermal Analysis and Test
- (9) T. Buna : AIAA 3rd Thermophysics Conf. (1968)
- (10) R. Linton : NASA TND-3642, Thermal Design Evaluation of PEGASUS
- (11) W. Keating : NASA TND-1369, Temperature Control of the Explorer IX Satellite
- (12) I. W. Russell et al : NASA CR-66380, Conceptual Mechanization Studies
- (13) W. C. Snoddy : AIAA Thermophysics Conf. (1965)
- (14) 大島、下地、植田、若杉 : 第13回宇宙科学技術講演会 (昭45)
- (15) H. D. Shultz : NASA CR-65581, Thermal Analyzer Computer Program
- (16) J. T. Anderson : ASME Paper No. 65-WH/HT-40
- (17) H. L. Finch et al : NASA TR R-278, A Computer Program for Calculating External Thermal-Radiation Heat Loads
- (18) P. J. Reichard et al : AIAA Paper No. 67-333 (1967)
- (19) 下地 : 航空宇宙学会誌, 18巻, 198号 (昭45)
- (20) B. H. Browne, Jr. : ASME Paper No. 63-HT-43
- (21) T. Ishimoto et al : J. Spacecraft, 5, p. 1,372 (1968)
- (22) T. Ishimoto : NASA CR-99599, Digital Computer Program for Thermal Network Correction
- (23) M. Toussaint et al : ESR TN-21 (ESTEC), A Study of the Thermal Behaviour of the ESR-I Satellite
- (24) J. Doenecke : J. Spacecraft, 7, p. 720 (1970)
- (25) 大島 : 航空宇宙学会誌, 18巻, 199号 (昭45)
- (26) N. R. Draper et al : Applied Regression Analysis, 中村訳 : 応用回帰分析, 森北出版 (昭43)
- (27) 竹内 : 数理統計学, 東洋経済出版 (昭38)
- (28) A. Ralston et al : Mathematical Method for Digital Computers, John Wiley & Sons (1960)

# FSM 形磁性薄膜記憶装置

磯崎 貞\*・重徳 良夫\*

土屋 英司\*\*・杉浦 俊夫\*\*・井上 康郎\*\*・近藤 隆\*\*

沢江 哲則\*\*\*

## Fine Striped Memory (FSM)

Kamakura Works      Shin ISOZAKI · Yoshio SHIGETOKU  
 Central Research Laboratory      Hideshi TSUCHIYA · Toshio SUGIURA  
 Yasuo INOUE · Takashi KONDO  
 Communication Equipment Works      Tetsunori SAWAE

Requirements for elevating the cost/performance of the computer main memory are very severe. The magnetic thin film memory and the semiconductor memory are now in the limelight taking the place of the core memory which has played an important part for a long time. Though the semiconductor memory has promising future, a great expectation is entertained on the magnetic thin film memory with its non-volatility of stored information, advantage in the point of reliability at a large capacity and heat generation, and yet with high speed performance. While there is the wire memory as practical application of a magnetic thin film, the laboratory of the Kokusai Denshin Denwa Co. (Japanese International Telegraph and Telephone Corporation) made public the Fine Striped memory in 1969 as a renovated magnetic thin film memory excelling the former. Mitsubishi has made study on FSM under a guidance of the laboratory and developed a practical memory plane with a capacity of 4 kilo-byte. This article is a report on the outline of FSM and the present results of our study on it.

### 1. まえがき

電子計算機の性能を示すうえで、主メモリーのスピードおよびその容量は最も重要とされるものであり、またコスト的にも主メモリーはシステム全体の20~30%を占めるのが普通である。したがって電子計算機の性能／価格比の向上が競われている現在、主メモリーの性能、コストへの要求はきびしい。

主メモリーはこれまで磁気コアによるものが大部分であったが、向上を続けてきたサイクルタイムと、超小形コアの編組に多くの工数を要することなどから、そのコストにも限界を感じられるようになった。

そこで登場するのが久しく磁気コアの二重的存在に甘んじてきた、ワイヤメモリーを主とする磁性薄膜メモリー、および最近の半導体技術の進歩から脚光を浴びるようになったLSIメモリーである。

すでに米UNIVAC社より1110形超大型機、また沖ユニバック(株)にて国産化もされている9000シリーズ、さらには当社MELCOM-350/5F小形高速化システムにもワイヤメモリーが採用されている。

一方IBM社大形機360/85、370/165などにはバッファメモリーとして高速のバイポーラICメモリーが、また中形機370/145には主メモリーとして全面的にバイポーラICメモリーが採用されている。またMOS形ICメモリーも将来のコストダウンの可能性が大きく、中・小形機用メモリーとして注目されている。

磁性のコアあるいは薄膜メモリーはLSIメモリーに比較して情報の持久性、すなわち電源を切った際記憶内容が失われることがない点をはじめ、放射線に耐えること、大容量化したときの信頼性や発熱の点ですぐれている。したがってたとえばオンラインの制御システムや情報システムの大容量メモリーなど、用途によって磁性メモリーの果すべき役割は大きく、とくに磁性薄膜メモリーはその高速性から将来的メモリーとして重要な一角を占めるものと考えられる。

磁性薄膜はワイヤメモリーとしてすでに実用化されつつあるが、昭和44年春に国際電信電話株式会社(KDD)研究所より、ワイヤメモリーをしのぐ革新的な磁性メモリーとしてファインストライプメモリー(FSM)が発表された。

当社では以前より蒸着カッパードフィルムメモリー、電着磁性メモリーの研究をおこなって技術の蓄積をしてきたが、現在同研究所のご指導をえてFSM形磁性薄膜メモリーの研究開発を実施中である。

ここではFSMメモリーの概要とともに、当社におけるこれまでの研究開発状況について紹介する。

### 2. FSM の特長

#### 2.1 構造

原理的構造を図2.1に示す。けた線は非常に幅の狭い平行線状のもので、中心の銅をパーマロイ膜でおおってある。これは銅に直流(けた電流)による磁界が効果的に磁性薄膜内を通るように閉

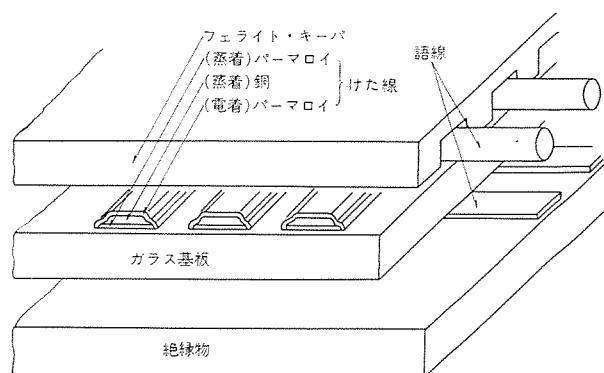


図2.1 FSMの構造  
Structure of the Fine Striped Memory.

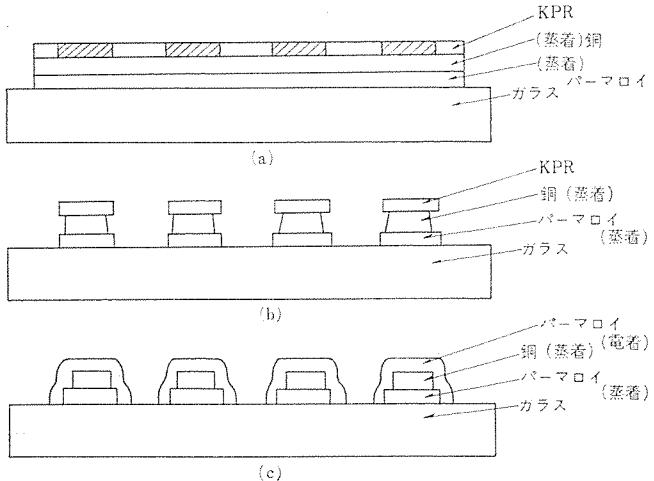


図 2.2 製造工程  
Manufacturing process of the FSM.

磁路構造とするためである。けた線が閉磁路構成になっているためけた線間の相互干渉が少なく、けた線ピッチを著しくつめることができる。またけた線の断面積が小さいため書き込み電流が少なくてすむ。

語線はフェライトキーパのみぞに埋込み、語電流による磁界を有効にけた線に作用させる。これで語磁界の広がりを小さくして、語電流を少なくする。また語線間の干渉が少くなり語妨害に強くなる。その他語線とけた線との間隔をとることができたため静電誘導による語雑音を減少させうる。フェライトキーパを用いることにより語線間隔をつめることができるが、フェライトキーパのみぞ幅に比例して読み出し電圧が増減する。

図 2.2 にはけた線の製造工程を示す。ガラス基板上にパーマロイ ( $1,500 \text{ \AA} \sim 2,000 \text{ \AA}$ ) を蒸着、次に銅 ( $3,000 \sim 10,000 \text{ \AA}$ ) を全面蒸着する。この上に KPR 等を塗布乾燥し露光すると図 2.2 (a) ができる。これをエッティングして図 2.2 (b) ようのストライプ形とする。ストライプ形にしたところで KPR 等の感光剤を取り除き、パーマロイを電着すると図 2.2 (c) ようのけた線ができる。このメモリーの特長を列挙する

- (1) けた線が閉磁路構成である。
  - (a) けた電流が少ない
  - (b) 隣接けた線からの妨害がない
  - (c) 読出し電圧が大きい
  - (d) 狹いけた線幅でも出力の減少がない
  - (e) 外部磁界の影響が小さい
  - (f) 厚い磁性膜でも反磁界は小さい
- (2) フェライトキーパのみぞに語線を埋込んでいること。
  - (a) 語電流が少ない
  - (b) 語電流による雑音が小さい
  - (c) 語妨害に強い
- (3) フォトエッティング法による高密度の一體製造ができる。
- (4) エッティング用マスクは 1 回使用だから高精度の位置合わせ不要以上になるが、記憶密度が向上したため、端末処理をどうするか、フェライトキーパの加工が容易にできないか、磁性膜の一様性、歩どまりを向上すること、高密度化された記憶細胞の能率的検査をどうするか等の諸問題を含んでいる。

## 2.2 メモリー素子の読み出し電圧

メモリー素子からどの程度の読み出し電圧が期待できるものか計算し

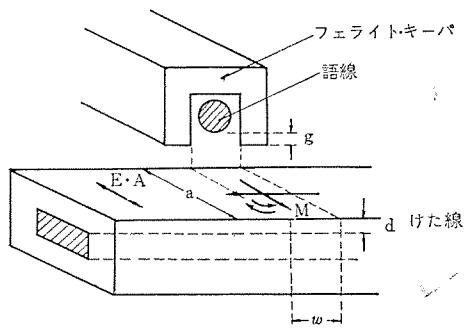


図 2.3 メモリー素子の部分拡大図  
Analytical structure of the memory element.

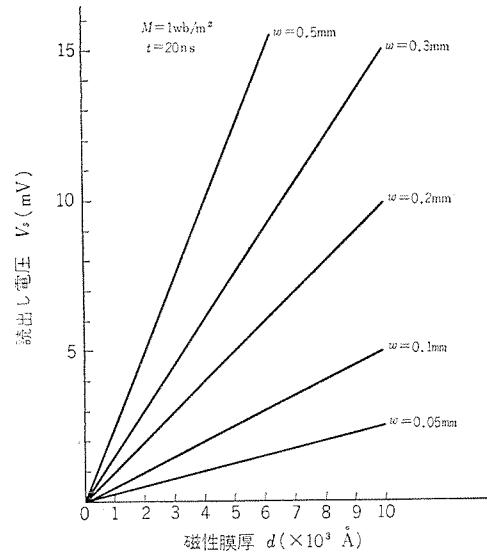


図 2.4 読出し電圧—磁性膜厚の関係  
Sense voltage vs. magnetic film thickness.

てみる。下側の磁性膜の影響は考慮しないで、フェライトキーパが完全に動作するとすれば読み出し電圧は式 (2.1) となる。読み出し電圧はけた線の幅には関係しない(図 2.3 参照)。

$$V_S = -\frac{d\phi}{dt} = -\frac{dM \cdot S}{dt} \quad (2.1)$$

ただし  $S = w \cdot d$ ,  $M$  : magnetization

代表的数値として  $M = 1 \text{ wb/m}^2$ ,  $w = 3 \times 10^{-4} \text{ m}$ ,  $d = 1 \times 10^{-6} \text{ m}$ ,  $t = 20 \text{ ns}$  とすれば  $V_S = 15 \text{ mV}$  となる。 $w$  をパラメータとして読み出し電圧と磁性膜厚の関係を図 2.4 に示す。

## 2.3 静電容量による語雑音計算

図 2.3においてけた線幅  $a$ , キーパのみぞ幅  $w$ , 語線と磁性面のギャップを  $g$  とする。語線とけた線の対向面の容量を  $C$  とすれば

$$C = \frac{a \cdot w \cdot \epsilon_0}{g} \quad (\epsilon_0: \text{誘電率}) \quad (2.2)$$

となる。けた線の抵抗を  $R$  とし、けた線に誘起する電圧  $V_n$  は

$$V_n = RC \frac{dV}{dt} = \frac{R \epsilon_0 a w}{g} \frac{dV}{dt} \quad (2.3)$$

となる。ただし  $V$  は語線の印加電圧である。代表的数値として  $w = 3 \times 10^{-4} \text{ m}$ ,  $t = 20 \text{ ns}$ ,  $V = 10 \text{ V}$ ,  $a = g = 1 \times 10^{-4} \text{ m}$ ,  $R = 100 \Omega$  とすれば  $V_n \approx 133 \mu\text{V}$  となる。この計算にはフェライトキーパを通して誘導する雑音は含まれない。静電誘導による語雑音の関係を図 2.5 に示す。

## 2.4 語電流による磁界の広がり

フェライトキーパは磁気ヘッドに類似していることから、理想磁気へ

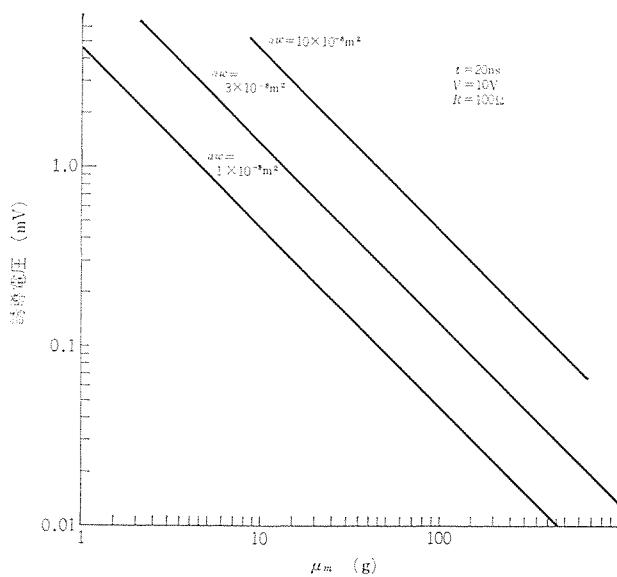


図 2.5 語線からの誘導電圧  
Static noise induction from word line.

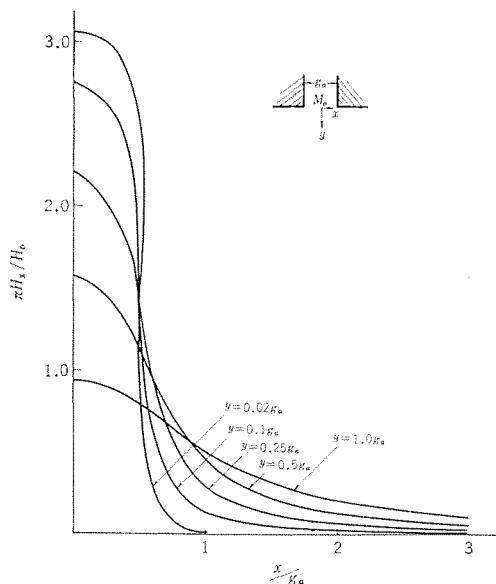


図 2.6 磁界の広がり  
Dispersion of the magnetic field.

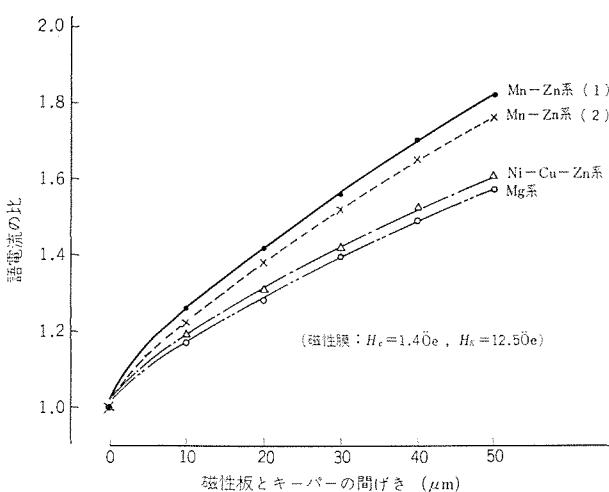


図 2.7 磁性板とキーパーの間隔を変えたときの語電流の変化  
Word current ratio to switch magnetic domains vs. gap thickness between digit lines and keeper.

ドの計算結果を利用して磁界の広がりを検討する。キーパーの空げき  $g_a$ (図 2.6 参照)に対して十分に厚いヘッドを仮定し、キーパーの透磁率を無限大とする。 $H_0$  は空げき内の磁界の強さで、 $H_x(x, y)$  は  $(x, y)$  における磁界の  $x$  成分である。 $y$  成分は記録に関係しない。キーパー空げきによる磁界は理想的な場合式 (2.4) で示される。

$$H_x(x, y) = \frac{H_0}{\pi} \left\{ \tan^{-1} \frac{\frac{g_a}{2} + x}{y} + \tan^{-1} \frac{\frac{g_a}{2} - x}{y} \right\} \quad \dots \dots \dots \quad (2.4)$$

式 (2.4) の計算結果を図 2.6 に示す。語電流による磁界は図 2.6 に示されるとおり、キーパーを使用することにより磁界が集中する。これは効果的に語磁界を線に作用させることになり語電流の低減に役立つ。またフェライトキーパー面と磁性膜の密着性が良いほど効果的となる。

図 2.7 には磁性板とフェライトキーパーの間隔を変えたときの語電流の増分を実験したものを見せる。この実験ではフェライト面に深さ 0.6 mm、幅 0.3 mm のみぞを切り直径 0.2 mm のホールマール線を埋込んで語線とした。その上に厚さ 1,000 Å の蒸着磁性板の膜面がフェライトキーパー側になるように重ねる。語電流 ( $f=60$  Hz) によって磁性膜の磁区を反転させ語電流を求める。このとき磁区の様子はカーフェラードによる  $B$ - $H$  ループトレーサーで観測した。ただし語電流の絶対値は異なる。均一な特性のメモリー素子を作る場合、フェライトキーパーと磁性板の平たん度はかなり良好にしなければならない。

### 3. 磁性板の特性

#### 3.1 磁性板

今回製作した磁性板は 2.1 節で述べた方法で製作した。ガラス基板は 76 mm × 76 mm × 0.5 mm で、中央 60 mm × 60 mm 部分を精密写真製版法により、ピッチ 0.25 mm、線幅 0.18 mm のストライプ群にした。パーマロイの蒸着、電着の際には、磁性線の幅方向が磁化容易軸となるようにヘルムホルツコイルによって 60 Hz の交流磁界を加えた。

以上により作成した磁性板の周辺部を裁断し、中央 50 mm × 50 mm 部分を、メモリープレーンへ組込み用の磁性板とした。

#### 3.2 パーマロイ膜の $B$ - $H$ 特性

Kerr 効果を応用した  $B$ - $H$  曲線測定装置により、60 Hz 交流磁界での、蒸着パーマロイ膜の磁化容易軸方向と困難軸方向との  $B$ - $H$  特性を測定した。これを図 3.1 に示す。

蒸着膜の  $H_C$  (抗磁力) は 1.5~2.5 Oe、 $H_K$  (異方性磁界) は 11~13 Oe であった。図 3.2 は、ガラス基板 1 枚内の蒸着パーマロイ膜

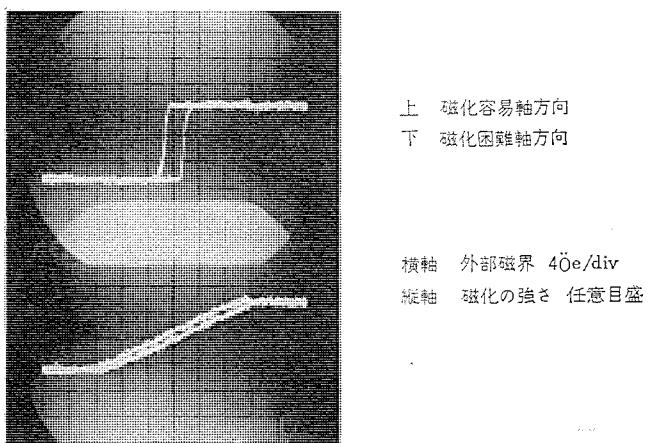


図 3.1 蒸着パーマロイ膜の  $B$ - $H$  曲線  
Hysteresis curves of evaporated permalloy film.

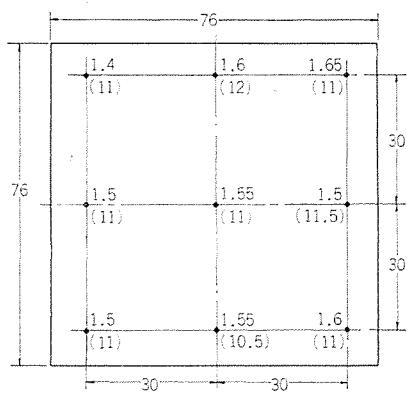


図 3.2 蒸着パーマロイ膜の  $H_c$  ( $H_k$ ) の一様性  
 $H_c$ , ( $H_k$ ) values of evaporated permalloy film.

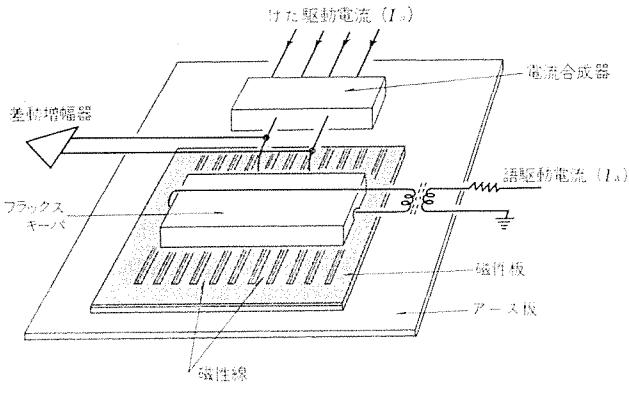
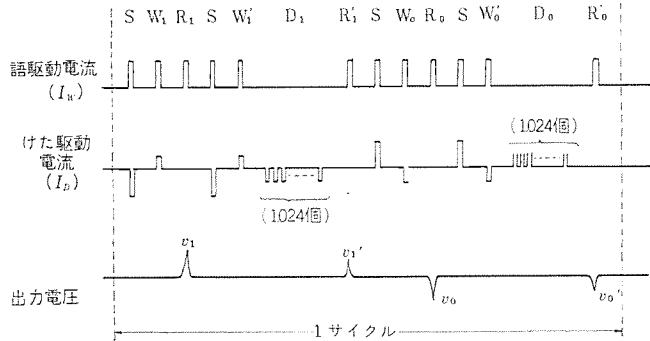


図 3.3 磁性板の記憶特性測定治具  
Memory performance test set.



項目	測定法		けた電流特性	語電流特性
パルス繰返し時間			1.5 $\mu$ s	1.5 $\mu$ s
語電流 ( $I_w$ )	パルス幅	200 ns	200 ns	
	立ち上り時間 (Tr)	20 ns	20 ns	
	立ち下り時間 (Tf)	20 ns	20 ns	
けた電流 ( $I_d$ )	電流値	500 mA	0~800 mA	
	パルス幅	200 ns	200 ns	
	立ち上り時間 (Tr)	15 ns	15 ns	
リセット パルス (S)	立ち下り時間 (Tf)	15 ns	15 ns	
	電流値	0~100 mA	25 mA	
$I_d$ 妨害 パルス (D)個数	1,024 個 (波形 $I_d$ と同じ)			
リセット パルス (S)	$I_w$	500 mA ( $I_w$ と同じ波形)	0~800mA ( $I_w$ と同じ波形)	
	$I_d$	200 mA ( $I_d$ と同じ波形)	200mA ( $I_d$ と同じ波形)	

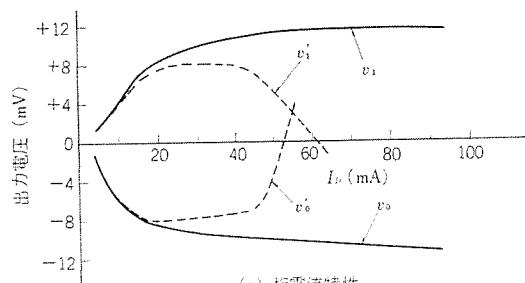
図 3.4 記憶特性測定パルスプログラム  
Pulse current program for memory performance tests.

の  $H_c$  ( $H_k$ ) の一様性を示す例である。

### 3.3 磁性板の記憶特性

磁性板の記憶特性は図 3.3 に示す記憶特性測定治具を用い、図 3.4 のパルスプログラムで測定した。

測定において、情報書き込みの直前に十分大きな電流により、



(a) けた電流特性

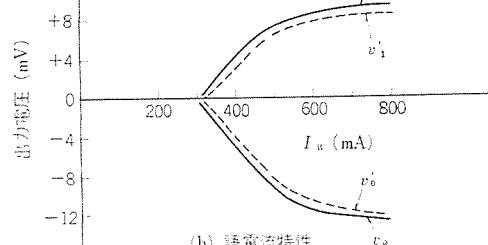
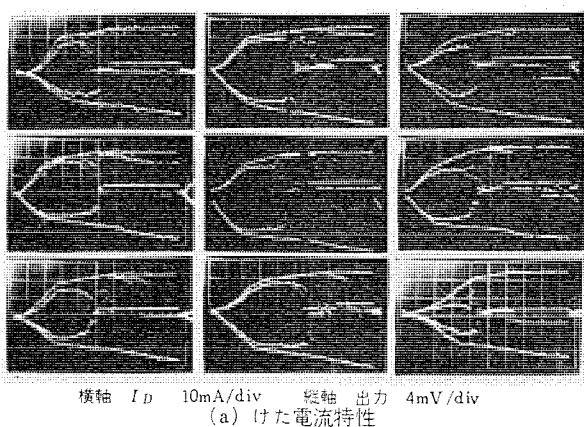
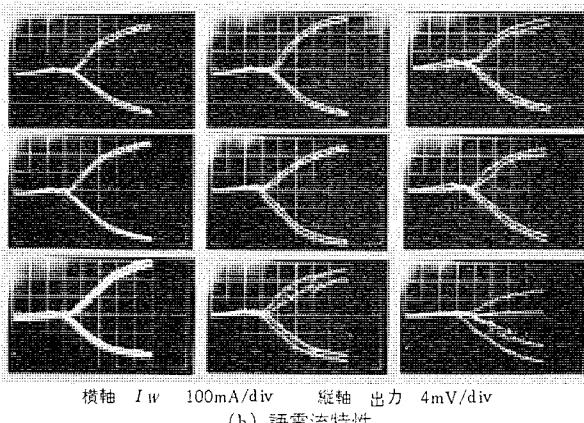


図 3.5 磁性板の記憶特性  
Memory performance of a plane.



(a) けた電流特性



(b) 語電流特性

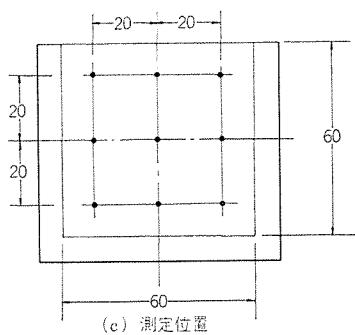


図 3.6 磁性板の記憶特性一様性  
Uniformity of a plane performance.

いったん逆情報を書込むリセットパルスを設けた。またけた電流の妨害パルスは1,024個を印加した。

測定結果の例を図3.5、図3.6に示す。けた電流特性は語電流( $I_{Wt}$ )を500mAに固定し、図3.4のパルスプログラムの $W_1$ 、 $W_1'$ 、 $D_1$ 、 $W_0$ 、 $W_0'$ 、 $D_0$ のけた電流をプログラムの1サイクルおわるごとに約1mAずつ増加させて、これに対応する読み出し出力電圧( $v_1$ 、 $v_1'$ 、 $v_0$ 、 $v_0'$ )のピーク値をサンプリングしてオシロスコープ上に描かせた。

また語電流特性は同様にプログラムのけた電流( $I_D$ )のリセット用パルスは200mAに、その他は25mAに固定し、語電流( $I_{Wt}$ )を1サイクルごとに約8mAずつ増加させて測定した。

この例では、語電流( $I_{Wt}$ )が約400mA以上必要で、均一性も十分でない点不満足であるが、語電流500mA、けた電流30mA前後で出力5mVの実用に供しうる磁性板であると判断される。

なお、測定においてけた電流の妨害パルスを32,768個まで印加した場合でも、1,024個印加のときと $v_1$ 、 $v_0$ の値には差異がなかった。

#### 4. メモリープレーンの構造

FSMメモリーは前述のとおり磁性薄膜としての高速性のほか、高い信号対雑音比や高記憶密度が得られることなどそれを特性をそなえているが、これを実用化する場合には、とくに構造上フェライトキーパの付属する語線とけた線との対向保持方法や、語線の戻り線の処理、それからとくにけた線の密度が高いだけに、その外部引き出し接続の方法が問題となる。

さらに高記憶密度の可能性を生かして、周辺回路を含めハイブリッドIC化することを追及するなど、構造上の研究課題は多い。

しかし今回はとくに著しい高密度化をめざすことは避け、むしろ高い信号対雑音比、大きい読み出力電圧、駆動電流が比較的少なくてすむことなどの電気的諸特性を生かして使いやすい、かつ低成本のメモリーを開発して、実用化の第一段階とすることを目標とした。

いっそうの高密度化や周辺回路との高度集積回路化は次の段階としてひきつき研究することとする。

##### 4.1 1キロバイト FSM メモリープレーン

まずFSMメモリー実用化検討のため、約1キロバイト容量のFSMメモリープレーンを試作した。外観は図4.1に示すものである。

###### 4.1.1 構成

###### (1) 記憶容量

1,024バイト(パリティビットとも9,216ビット、256語×36ビット)

###### (2) 記憶方式

2交点1ビット方式、破壊読み出し

###### (3) 外形寸法

182mm×140mm×約10mm プラグインカード式

###### (4) 構成

アルミ基板上に磁性板および接続板、端子板を取り付けたものをディジット(けた)プレーン、1枚のプリント配線基板にキーパつき語線および語選択トランジスタマトリックスを取付けたものをワード(語)基板と称する。

ディジットプレーンと、ワード基板を組み合わせてメモリープレーンを構成する。

通常語線の戻りは磁性板の裏側を経由して折返されるため、メモリープレーンは一体として組立てられるのが普通であるが、本1キロバイトプレーンは語線の戻りをキーパの裏側にまわすことによって、ワード基板を独立して製作することができ、組立てが容易となった。

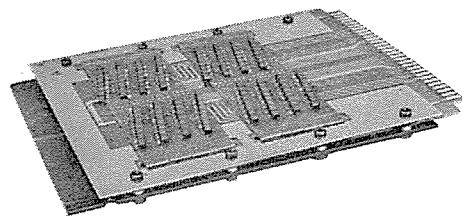


図4.1 1キロバイト FSM メモリープレーン  
1 kB FSM memory plane.

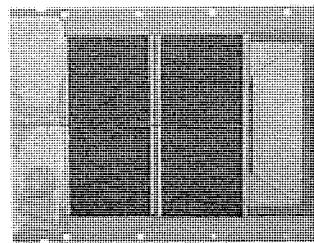


図4.2 1キロバイト用 ディジットプレーン  
Digit plane of 1 kB memory.

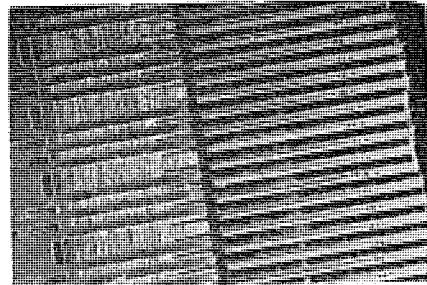


図4.3 ボンディング状況  
Wire bonding connections.

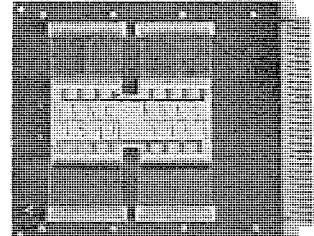


図4.4 1キロバイト用ワード基板  
Word plane of 1 kB memory.

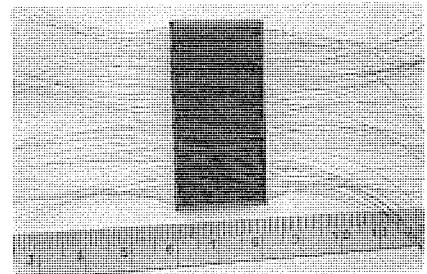


図4.5 フェライトキーパーおよび語線  
Ferrite keeper and word lines.

けた線におよぼす電磁界にもほとんど差はない、特性上問題はない。

##### 4.1.2 ディジットプレーン

これを図4.2に示す。50mm×50mm磁性板は4枚使用され、けた線ピッチ0.2mm、けた線幅0.1mmである。

磁性板相互、および引出し端子板、折返し用接続板との間はアルミニウム線の超音波ボンディングによっている。ボンディング状況を図4.3に

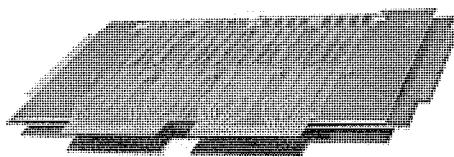


図 4.6 4キロバイト FSM メモリープレーン  
4 kB FSM memory plane.

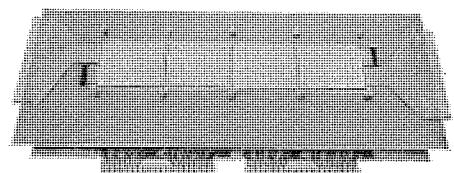


図 4.7 4キロバイト用 ディジットプレーン  
Digit plane of 4 kB memory.

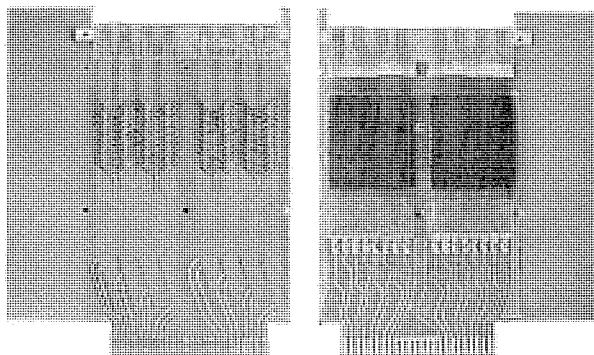


図 4.8 4キロバイト用 ワード基板(表、裏)  
Word planes of 4 kB memory.

示す。

幅広に見える導体は、相隣る2本のけた線を2交点1ビット方式として使用するための折返し接続点であり、プレーン内で折返すことによって引出し端子数を節約している。

#### 4.1.3 ワード基板

これを、図4.4に示す。キーパーは寸法20 mm×40 mm×3 mmのNi-Zn系フェライトで、語線ピッチ0.6 mmとなるよう幅約0.3 mm、深さ0.4 mm～0.5 mmのみぞが各64本設けてある。これを磁性板1枚につき1個ずつ、計4個使用し、各みぞには直径0.2 mmのホルマール銅線を図4.5のごとく埋込み、一端はプリント基板、他端も同じプリント基板上、語選択トランジスタマトリックスに接続されている。

キーパーと基板の間にはクッションを置いて磁性板とキーパーとがよく密着するようにしている。

トランジスタマトリックスと語線の間には、プリント基板導体によりシールド層を設けてある。

#### 4.2 4キロバイト FSM メモリープレーン

1キロバイトプレーンの試作結果より、これを改良して図4.6に示す実用的メモリープレーンを開発した。

記憶方式、ディジットプレーンとワード基板の分離構造、磁性板のサイズ、語線ピッチなど、基本的には1キロバイトプレーンと同じであるが、次の諸点について改良が加えられた。

#### 4.2.1 構成

##### (1) 記憶容量

磁性主メモリー大容量化のすう勢にこたえて、4,096バイト(パリティとも36,864ビット、512語×72ビット)とした。1交点1ビットで8キロ

バイトとしても使用できる。

#### (2) 外形寸法

172 mm×320 mm×約15 mm。プラグインカード式

#### (3) 構造

容量増加のため、ディジットプレーンは両面を使用し、ワード基板は両側からディジットプレーンをはさむ形で4枚に分割している。

#### 4.2.2 ディジットプレーン

図4.7に示すごとく、磁性板は片面4枚ずつ、計8枚使用している。

磁性板全面を有効に使用するため、語構成を8バイト(72ビット)幅としたので、2交点1ビット方式でけた線144本を使用している。

けた線ピッチは0.25 mmとして接続がいっそう容易なものとし、けた線幅は約0.18 mmと広くして線路インピーダンスの低下をはかった。

磁性板はプリント配線基板の両面におう(凹)部を設けてめ込まれ、その基板の両端に設けられた接せん(栓)端子に引き出される。磁性板上のけた線は2群に分けられていて、図4.7に見える左側から上側けた線群に入り、右側で裏へ折返され、同じく左側の裏面接せん端子に戻るものと、この逆に右側から下側けた線群を通って右側裏面に戻るものがある。

すなわちけた線は全部両端が引出され、1交点1ビット方式や、ブリッジ式ノイズ打消接続など自由に使用できる。しかも両端は最短位置に引出されているので、外部ノイズの誘導を受けにくく。

#### 4.2.3 ワード基板

キーパーは寸法40 mm×46 mm×3 mmとしたほか、基台を4層プリント配線基板とし、内層2層を用いて語線を一括製作し、基板と一体化して接ぎ目をなくした。

語選択はコスト低減のためダイオードマトリックスとしている。

また製作を容易にするため、ワード基板はキーパー2個128語分ずつに分割し、表裏各2枚によってディジットプレーンをはさみ込むものとした。

#### 4.2.4 特長

とくに4キロバイトプレーンとして実用化されたメモリープレーンの特長を要約すると、下記のようになる。

(1) 語線をキーパーの背面に折り返して、ワード基板とディジットプレーンを分割構造にしたため、組立・保守が容易となっている。

(2) ワード基板の内層を引出して語線としているため、接続点が減少し、信頼度を高めている。

(3) 語選択ダイオードを内蔵し、接続端子数が減少している。

(4) メモリープレーンをカード式とし、そう(挿)脱自由である。

(5) キーパーの背面にクッションを入れ、磁性板との密着性を確保している。

(6) 両面構造にして記憶容量を増した。

(7) 全けた線両側を引出し、自由な接続ができる。

(8) 1交点1ビットで8キロバイトプレーンとしても使用可能。

### 5. プレーン特性

#### 5.1 1 kB プレーン特性

1 kB プレーンの読み出し波形の一例を図5.1に示す。図5.1の上側は語電流でこの場合約300 mAで、下側はその読み出し波形である。読み出し電圧は4 mV強程度で、理論計算による出力は5 mVとなる。ただし磁性膜厚 $d=5,000 \text{ \AA}$ 、キーパーみぞ幅 $w=300 \mu\text{m}$ 、電流の立ち上がり時間 $t=30 \text{ ns}$ とした計算である。読み出し波形には語雑音の影響が

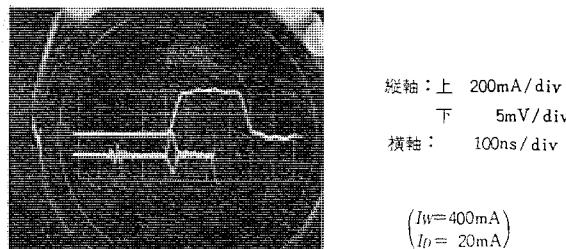


図 5.1 1 キロバイトプレーン 読出波形  
Read-out signal of 1 kB plane.

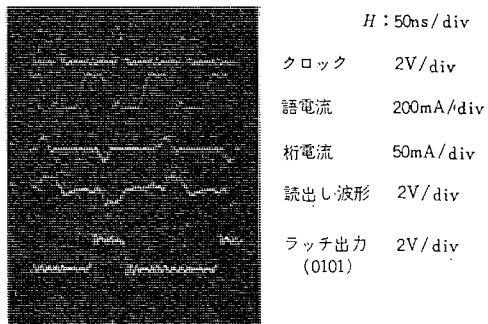


図 5.2 1 kB プレーン動作試験 (サイクルタイム 160 ns)  
Read-write cycle running test (1 kB plane, cycle time 160 ns).

非常に少ない。これは語線とけた線の間が離れているため、語線とけた線間の静電容量は  $0.27 \times 10^{-12} \text{ F/m}$  くらいの計算値となる。語線のインダクタンスは  $0.08 \mu\text{H/cm}$  でフェライトキーパによる影響は少ないとえに、磁性膜とフェライトキーパの密着性が良いため語電流を少なくしている。

### 5.2 1 kB プレーン動特性

このメモリープレーンの雑音は語雑音とけた雑音に大別される。語雑音は読み出し電圧の S/N に関係し、プレーンの構造に大きく影響を受ける。また検知回路に差動増幅器を用いて、コモンモード雑音を抑止し S/N を向上することができる(図 5.1 の読み出し波形参照)。

けた雑音は検知増幅器を飽和させるため、サイクルタイムを大きくする。このためけた雑音はメモリーの性能を決定する重要な要素となっている。けた雑音の影響を少なくするため、けた駆動回路を平衡駆動とし検知点を常にバランスさせる方法、パルストランスを用いてけた雑音をキャンセルする方法または検知回路ができるだけ飽和させない方法等種々考慮されている。

語駆動回路は大別して Drive 回路・Sink 回路・Discharge 回路に分けられ、1 kB プレーン上に実装されているトランジスタマトリックス  $16 \times 16$  を駆動している。クロックパルスより語電流の流れ始めるまで、すなわち語駆動系のディレータイムは約 50 ns、語電流の立ち上り時は約 30 ns(電流値 350 mA)である。けた線は 2 交点 1 ビットで使用し、センサアンプの入力端子はグランドレベルにあるように磁性線の中点より取り出した。けた雑音抑止方法にパルストランスを用いることもできるが、レベルシフトが起りやすいので直結方式とした。

図 5.2 にサイクルタイムの実験結果を示した。サイクルタイム 160 ns、アクセスタイム 90 ns であった。各種ドライバー、センサアンプのディレータイム

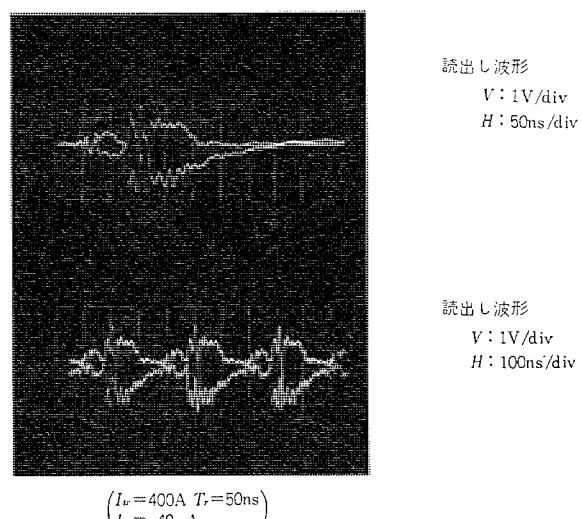


図 5.3 4 kB プレーン動作試験 (1 交点 1 ビット、サイクルタイム 300 ns)  
Read-write cycle running test (4 kB plane, 1 dot per bit, cycle time 300 ns).

を少なくし、けた電流の立ち上りを速くすること等によりサイクルタイム 150 ns、アクセスタイム 70 ns 以下が実現可能と考えられる。

### 5.3 4 kB プレーンの動特性

4 kB プレーンはサイクルタイム等の性能よりもむしろ経済的に重点を置いたものである。語電流選択用のマトリックスにはダイオードを用いてビットコストを安くしている。図 5.3 にはサイクルタイム 300 ns の実験結果を示す。この写真は 1 交点 1 ビットでとったものであり、S/N から見て十分 1 交点 1 ビットで使用可能である。

## 6. む す び

FSM メモリーは前述のように実用的な 4 キロバイトメモリープレーンの開発をほぼ完成した。しかしながら製品として安定した供給をおこなうためには、とくに磁性板の量産体制の確立およびいっそうの品質、歩どまりの向上をはかる必要がある。後者としてはより精密なプロセスの制御をおこなうための地道な研究をつづけている。

さらに大容量記憶装置としての特性や周辺回路のあり方を追及するため、16 キロバイト容量の記憶モジュールを試作試験中であるが、これについては追って報告することとした。

さいごに本開発研究推進にあたり、基本的ご指導と多くの助言をいただいている国際電信電話株式会社研究所、材料部品研究室のかたがたに厚くお礼申上げるとともに、多くの当社内協力者、関係者にも謝意を表する次第である。(昭和46-4-7 受付)

## 参 考 文 献

- (1) 大島ほか：昭44連大, No. 3,157
- (2) 大島ほか：電算機研究会資料 EC 69-7
- (3) 小林ほか：電子回路部品材料研究会資料 CPM 67-33
- (4) 小林ほか：電算機研究会資料 EC 68-43
- (5) 秦 ほか：昭45電通全大, No. 856
- (6) 秦 ほか：昭45電通全大, No. 859
- (7) A. S. Hoagland : Digital Magnetic Recording, John Wiley & Sons Inc. (1963)
- (8) 大島ほか：昭45連大, No. 303
- (9) 太田ほか：昭46電通全大(春), No. 1,199
- (10) 太田ほか：昭46電通全大(春), No. 1,200
- (11) 太田ほか：昭46電通全大(春), No. 1,201

# 半硬質磁性合金 FNC (Fe-Ni-Cu)

中島 陽三\*・大谷 昌平\*

## Semi-Hard Magnetic Alloys FNC (Fe-Ni-Cu)

Sagami Works Yozo NAKAJIMA・Shohei OHTANI

Studies have been made on the process of heat treatment and plastic deformation of Fe-Ni-Cu alloys (Ni 12~20 %, Cu 4~7 %) to improve magnetic properties. As a result it has been successful in the development of semi-hard magnetic alloys as oriented materials with properties of He 20~80 Oe, Br 10~18 kG and Br/B<sub>200</sub>>90 %. Unlike the alloys of the kind in the past, the new materials are available in the shape of rods or plates having necessary magnetic properties and mechanical workability. Purchasers can put the materials to use in assembling latching relays and the like without heat treatment of the magnetic core.

### 1. まえがき

従来の磁性材料の使用法は、変圧器鉄心のように磁束の変化を利用する場合と、永久磁石のように残留磁束を利用する場合とに分離されていた。たとえば、永久磁石では着磁されたその材料によって生じる静的な磁場が利用され、使用中の磁化状態は変化しないことが望まれる。これに対し、“磁気記録”に代表されるような使用法では、残留磁束を利用するものではあるが、使用中にしばしば磁化反転がおこなわれる。そのため、この種の用途では、残留磁束をともつため、その磁気回路に応じて保磁力が必要ではあるが、磁化反転あるいは着磁および消磁を円滑におこなうためには、不必要に保磁力を大きくすることはさけなければならない。

このような“磁気記録的”な応用は、信号記録だけにはとどまらない。たとえば、従来の繼電器の鉄心をこの種の材料におきかえることにより、磁気保持形の自己保持形繼電器とすることができる。この繼電器では、動作および復旧時のパルス通電により駆動されるので、従来の繼電器にくらべて、電力を節約し温度上昇を防ぐことによる装置の小型化、高速動作、あるいは停電時の安全性などの特長がある。

この種の制御装置の小型繼電器に利用される材料としては、保磁力が 20 ないし 80 Oe 程度の範囲で任意に選択でき、残留磁束密度が高く、磁化曲線の角形性の良い磁性材料が要望されている。

この種の、一般に半硬質磁性材料と呼ばれる用途の合金を開発するにあたり、われわれは以下のような考察をおこなった。すなわち永久磁石の発展過程にみられるように、強磁性合金の保磁力を高める方法としては、加工あるいは相変態等により合金内に内部応力をふやす方法、および析出相等による非磁性相を合金内に適度に分散させる方法があげられる。しかし、たんに内部応力を増加させるだけで、保磁力を 20 Oe 以上にすることは困難と思われる。また、微量の添加元素が保磁力の増加に直接重要な役割をはたす場合には、保磁力を一定の範囲内に管理することに困難が予想される。さらに小形部品として多量に使用される応用であるから、磁気特性の安定性のほかに、種々の形状に加工するための、機械的性質もきわめて重要である。したがって、析出相により磁気的に硬化すると同時に機械的にいちじるしく硬化する合金は適当でない。また、適当な熱処理状態においてのみ機械加工が可能であり、必要な磁気特性を

得た状態では機械加工が不可能であることは、多量の小形部品をとりあつかう場合に好ましいことではない。

磁気的な硬化が機械的な硬化をともなうのはさけられないようであるが、機械的にきわめてかたい化合物による非磁性相が析出した状態よりは、相変態による非磁性の高温相、すなわち、鉄合金における  $\gamma$  相を非磁性相として利用するほうが、機械的には軟質となることが期待できる。また、 $\gamma$  相の導入は飽和磁束密度の減少を予想させるが、機械加工性を利用し、熱処理のほかに圧延あるいは線引加工をくみあわせて異方性材料とし、特定方向のヒステリシス曲線を角形化することにより、残留磁束密度を向上させて飽和磁束密度の低下をおぎなうことが期待できる。

以上の考察から、Fe-Ni-Cu 三元合金を対象にえらび、半硬質磁気特性を向上させるための処理方法を検討することとした。この合金は成分の管理がたやすく、機械的にも比較的かたさが低い特長がある。従来、Fe-Ni-Cu 三元合金では特にすぐれた半硬質磁気特性は得られないとされ、これに添加元素をくわえることが提案されているが<sup>(1)(2)</sup>、Ni 20 重量 % 付近の Fe-Ni 合金は古くから複雑な変化を示す不可逆合金として知られており、処理方法をさらに深く検討することで、半硬質磁気特性を向上させる可能性が残されていると判断されたからである。

### 2. 基本的な現象

#### 2. 1 热処理温度の影響

鉄へのニッケル添加量を増すと  $\gamma$  相の安定性がまし、 $\alpha$ - $\gamma$  変態温度が純鉄の 910°C からしだいに低下すること、あるいは銅もニッケルと同様に  $\gamma$  相を安定させる元素であることは、よく知られているとおりである。図 2. 1 に Fe-16 % Ni-6 % Cu 合金の熱膨張曲線を示したが、この組成では変態温度はかなり低くなり、500°C 付近から変態が始まり、650°C 付近で変態を終了して全体が高温相にかわっていることがわかる。

図 2. 2 はこの変態温度付近における加熱のうちに合金がどのような磁気特性を持つかを示したものである。変態温度の領域に入ると、磁束密度が低下し、保磁力が増加する。特に興味深いことは、低温相  $\alpha$  と高温相  $\gamma$  の共存領域である 550°C ないし 600°C の加熱後に、保磁力がもっとも大きくなり、全体が非磁性の  $\gamma$  相となる高温に加熱されたのちに冷却された試料では、むしろ保磁力は低くな

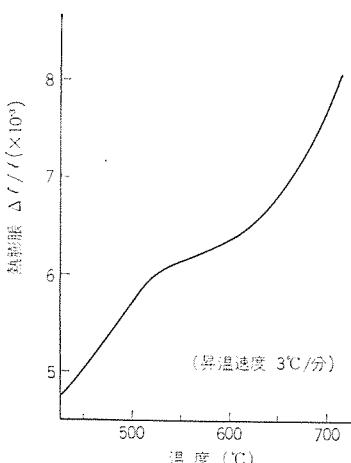


図 2.1 Fe-16 % Ni-6 % Cu 合金の熱膨張曲線  
Thermal expansion curve of Fe-16 % Ni-6 % Cu alloy

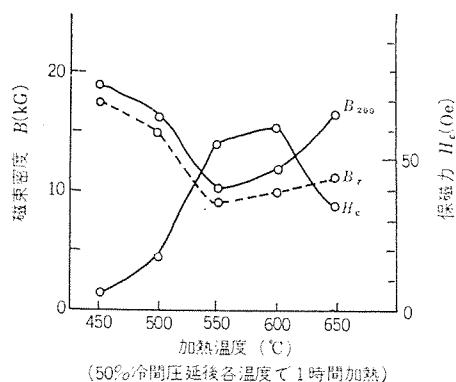


図 2.2 Fe-16 % Ni-6 % Cu 合金の加熱温度と磁気特性  
Magnetic properties of Fe-16 % Ni-6 % Cu alloy  
after heat treatment.

り、磁束密度も増加するという挙動である。

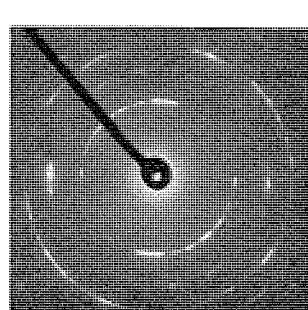
この現象を説明するものとしておこなった電子顕微鏡による観察結果を図 2.3、図 2.4 および図 2.5 に示す。

800°C の加熱後、厚さ減少率 50 % の冷間圧延をほどこされた試料の透過写真は図 2.3 (a) のとおりであり、一般の加工組織のように転位網をふくむ状態である。また、このときの電子回折像は図 2.3 (b) であり、 $\alpha$  相の回折像だけを示している。この試料を 550°C に加熱すると図 2.4 (a) に示すように、微細な結晶粒に再結晶した組織となる。この状態での電子回折像は図 2.4 (b) のとおりであり、 $\alpha$  相の回折像のほかに、かなりの強度の  $\gamma$  相の回折像も認められる。これにたいし 600°C に加熱された試料では、図 2.5 (a) のようにふたたび転位網を多くふくむ、大きな結晶粒に変化している。また、この状態での電子回折像、図 2.5 (b) では、550°C に加熱された場合の図 2.4 (b) とくらべて、 $\gamma$  相の回折像の強度が弱まっている。

以上の観察結果から、つぎのことが推定される。すなわち、一部分が  $\gamma$  相になるような 550°C の加熱では、2 相の共存のため結晶粒の成長がおさえられ、微細な結晶粒度にとどまっている。また、この状態で得られた  $\gamma$  相は比較的安定であり、室温に冷却されたのちにも相当量が  $\alpha$  相に変態せずに、 $\gamma$  相のまま残留している。これにたいし、ほとんどが  $\gamma$  相となる 600°C に加熱された状態では、 $\gamma$  相として結晶成長しているが、この  $\gamma$  相は比較的不安定であり、室温への冷却後には大部分が  $\alpha$  相に変態する。なお、その変態に伴い転位が増加する。800°C に加熱した場合には、600°C 加熱でみられた状

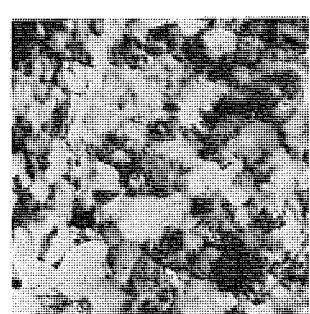


(a) 透過写真 ( $\times 30,000$ )

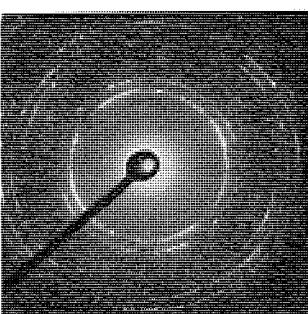


(b) 回折像

図 2.3 800°C 加熱後、50 % 冷間圧延状態の透過電子顕微鏡写真および電子回折像  
Transmission electron micrograph and diffraction pattern.  
The specimen is treated with heat at 800°C and cold rolled 50 % thickness.

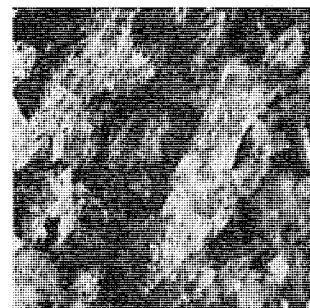


(a) 透過写真 ( $\times 16,000$ )

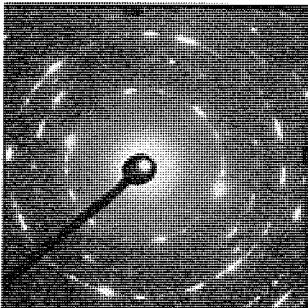


(b) 回折像

図 2.4 550°C 加熱後の透過電子顕微鏡写真および電子回折像  
Transmission electron micrograph and diffraction pattern  
of specimen treated with heat at 550°C.



(a) 透過写真 ( $\times 16,000$ )



(b) 回折像

図 2.5 600°C 加熱後の透過電子顕微鏡写真および電子回折像  
Transmission electron micrograph and diffraction pattern  
of specimen treated with heat at 600°C.

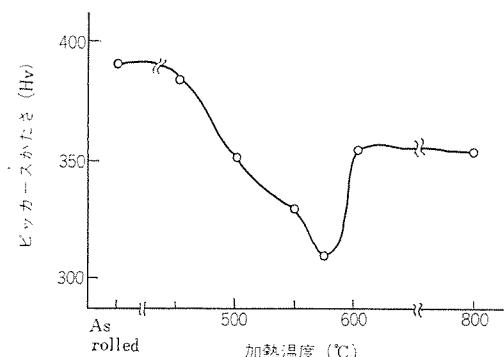


図 2.6 Fe-16 % Ni-6 % Cu 合金の加熱温度とかたさ  
Vickers hardness of Fe-16 % Ni-6 % Cu alloy after  
mechanical working and heat treatment.

態はさらに進み、特に圧延加工を受けたのちには、 $\gamma$ 相は認められなくなり、変態と加工にともない増加した転位をふくむ $\alpha$ 相となる。

なお、これらの試料のかたさ変化を図2.6に示した。500°C附近から再結晶にともなう軟化が認められるが、加熱温度が600°Cになると、ふたたびかたさが増加する。この結果は、高温で加熱された試料が冷却中に変態して転位の多い $\alpha$ 相となることを示す組織写真と対応する。

## 2.2 成分の影響

どの範囲の成分の合金において、 $\gamma$ 相の残留により保磁力が増加するかを調査した結果を図2.7に示す。ニッケル量が20%までは添加にしたがい保磁力が増大するが、さらにニッケル量がまし25%になると、磁束密度の減少とともに、保磁力も急減する。また、保磁力を増加させるためには、ニッケルだけでなく銅の共存が必要であり、5%以上の銅の添加により高い保磁力が得られるが、さらに添加量をまし10%としても加熱後の保磁力を高める効果は少ない。

一部分が $\gamma$ 相となる温度での加熱により安定な $\gamma$ 相が得られる理由としては、その状態では添加元素、とくに銅の偏析がおこり、 $\gamma$ 相中の濃度をまし、その $\gamma$ 相を安定化することが推定される。高温で加熱された状態では、全体が成分的に均質な $\gamma$ 相となるために特に安定な $\gamma$ 相が得られないものであろう。

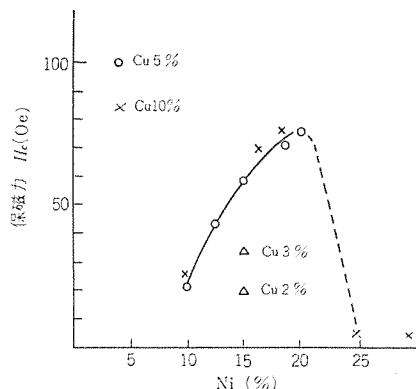


図2.7 550°C、1時間加熱後の保磁力にたいする成分の影響  
The effect of Ni and Cu contents on coercive force of Fe-Ni-Cu alloys after heat treatment at 550°C for one hour.

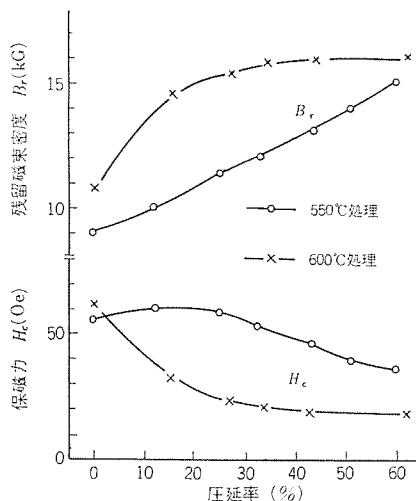


図2.8 熱処理後の加工による磁気特性の変化  
The effect of cold rolling on magnetic properties of heat treated Fe-16% Ni-6% Cu alloy.

## 2.3 热処理後の加工の影響

Fe-Ni-Cu合金を半硬質磁性合金として利用しようとする従来の研究は、成分および熱処理前の加工度を検討し、最終的に熱処理をおこない適度に非磁性相を析出させることにより、図2.2に示されるような曲線上から、保磁力および磁束密度を得るのにもつも適當な条件を求める方向にむけられていた。そして、この方法で得られる特性としては、図2.2から読みとれるように、12kG程度の残留磁束密度を得ようとすると、保磁力は30Oe程度となり、残留磁束密度を減少させずに保磁力を増加させることはできなかった。

これにたいしわれわれは、高温相の析出により保磁力が増加するこの合金では、析出処理後にむしろ機械的には軟化することに着目し、最終的にそ性加工をほどこすことにより、析出相の異方性を利用し、方向性材料としての磁気特性の向上をはかった。その結果加工方向に平行な方向の磁気特性が向上し、角形性のすぐれた磁化曲線が期待どおりに得られるとともに、さきにのべた熱処理温度による $\gamma$ 相の安定性の変化と関連した図2.8に示す現象をみいだした。すなわち、加工にともない磁束密度、特に残留磁束密度は増加するが、保磁力は減少する。そして、550°Cにおいて処理された試料にくらべて、600°Cにおいて処理を受けた試料ではその変化は急激におこる。比較的安定な $\gamma$ 相をふくむ550°C処理の試料では、少ない加工度の範囲では磁束密度のみ向上し、保磁力は減少せず、むしろわずかに増加する範囲もある。この試料では、図2.8に示されているように、40Oeの保磁力とともに14kG以上の残留磁束密度を得ることができる。この値は、従来の成分と熱処理をくみあわせたFe-Ni-Cu合金の研究では得られなかつた特性であるとともに、コバルト等をふくむ他の合金系と比較しても劣らない半硬質磁気特性である<sup>(3)</sup>。

なお、この方針にしたがい、さらに $\gamma$ 相を安定化させた状態をつくることにより、80Oe程度の保磁力の範囲まで、角形磁化曲線を持つFe-Ni-Cu合金(FNC)を開発することが可能になった。以下その特性を紹介する。

## 3. FNC合金の諸特性

### 3.1 FNC合金の代表的特性

表3.1にFNC合金試作結果の代表的磁気特性を示す。ニッケル量を増加させることにより高い保磁力が得られやすくなるが、同一成分の合金においても、処理工程の変更により保磁力を変えることができる。一般に保磁力の増加は磁束密度の低下をまねく。

製造工程中、特に強度の加工度を必要としないので、かなり広範囲の断面積の形状を持つ合金において、角形比90%以上の磁気特性が得られる。ただし、ヒステリシス曲線は長方形ではなく平行四辺

表3.1 FNC合金の代表的磁気特性  
Typical magnetic properties of FNC.

成 分 (重量%)	形 状	磁 気 特 性			
		Ni	Cu	保 磁 力 $H_c$ (Oe)	残 留 磁 束 密 度 $B_r$ (kG)
18.5	6.5	6φ直線材	68	12	0.96
18.5	6.5	6φ直線材	60	13	0.96
16	6	3t板材	45	14	0.91
16	6	0.2t板材	45	14	0.97
16	6	0.55直線材	40	15	0.97
16	6	0.55直線材	20	17	0.97

表 3.2 FNC 合金の物理的および機械的性質  
Physical and mechanical properties of FNC.

密度	約 7.95 g/cm <sup>3</sup>
電気抵抗率	30~40 $\mu\Omega \cdot \text{cm}$
線膨張係数	100~130 $\times 10^{-7}/^\circ\text{C}$ (30~400°C)
かたさ	330~410 Hv
引張り強さ	100~150 kg/mm <sup>2</sup>
伸び	1~3%

表 3.3 測定温度による磁気特性の変化  
Change of magnetic properties of FNC depending on measuring temperature.

測定温度 °C	磁束密度		保磁力 Hc (Oe)
	B <sub>200</sub> (kG)	Br (kG)	
0	13.2	12.7	59
25	12.9	12.4	61
50	12.6	12.1	64
100	11.8	11.3	71

表 3.4 磁気特性の経年変化 (測定温度 25°C)  
Stability of magnetic properties of FNC.

保持時間	磁束密度		保磁力 Hr (Oe)
	B <sub>200</sub> (kG)	Br (kG)	
初期状態	13.0	12.5	61
150°C, 200 h	12.8	12.4	61
150°C, 500 h	13.1	12.6	61
150°C, 1,000 h	12.9	12.5	61
初期状態	12.9	12.4	61
200°C, 200 h	12.9	12.4	60
200°C, 1,000 h	13.0	12.4	59

形に近い形状であり、飽和磁束密度と残留磁束密度で表示される角形比はきわめて高いが、減磁曲線上の最大エネルギー積をあたえる磁界の強さは、保磁力の値よりも 15% 程度小さい。したがって、磁気回路の設計にあたって、残留磁束の安定性をたもつたためには、反磁界のほかに、この減磁曲線のかたむきをみこんで保磁力の大きさをえらぶ必要がある。

FNC 合金の物理的性質および機械的性質のあらましを表 3.2 に示した。処理状態により変動はあるが、標準的なかたさは ピッカースかたさ 380 程度であり、保磁力の大小との対応はすくない。

### 3.2 磁気特性の温度係数および経年変化

FNC 合金の磁気特性が測定温度によりどのように変化するかの一例を表 3.3 に示した。測定温度の上昇にともない、保磁力は増加し磁束密度は減少する。この変化は、可逆的なものであり、FNC

合金において保磁力の増加に関係している非磁性相(弱い強磁性体)の磁気変態温度が比較的低いためにおこるものと、推定される。

なお、不可逆的な変化、すなわち経年変化にたいする安定性を見るために、150°C および 200°C において、1,000 時間保持した場合の磁気特性の変化を調査した結果を表 3.4 に示す。150°C の保持中には磁気特性の変化は認められなかった。保持温度を 200°C にあげた場合には 2 Oe 程度の保磁力の減少が認められた。この結果から、室温付近での使用中の経年変化は無視しうるものと考えられる。

## 4. むすび

Fe-Ni-Cu 合金の熱処理および加工方法を検討し、ニッケル 12~20%，銅 4~7% の範囲において、方向性材料とし、保磁力 Hc 20~80 Oe、残留磁束密度 Br 10~18 kG、角形比 Br/B<sub>200</sub> 90% 以上の半硬質磁性合金 FNC を開発した。この FNC 合金は従来の半硬質磁性合金と比較して、以下のような特長がある。

(1) 必要な磁気特性を持つ状態で供給されるので、使用者は部品加工後の熱処理を必要としない。

(2) 表面を研削された寸法精度のよい直線材等の状態で供給されるので、部品加工工数を簡略化できる。

(3) 必要な磁気特性を持つ状態で、切削、打抜、まげ、あるいはかしめ止め等の加工ができるので、組立工程を簡単にする設計ができる。

(4) 部品加工処理後の磁気特性のばらつきによる品質管理のわざらわしさがない。

(5) 化学的に活性な元素をふくまないので、製造上の組成管理が容易であるとともに、製品のメッキ処理がたやすい。

(6) 広範囲の断面積形状において、磁化曲線の角形性のよい合金が得られる。角形性のよい鉄心を用いることにより自己保持形継電器の動作を安定にするとともに、周囲への磁気干渉をすくなくすことができる<sup>(4)</sup>。

(7) 特に高価な原料をふくんでいない。

おわりに多大のご指導をいただきました、日本電信電話公社 電気通信研究所 高村継電器研究室長に感謝します。

## 参考文献

- (1) 中村, 門: 特許公報, 昭 43-14590
- (2) 奈良, 徳吉, 平林, 五十嵐: 日本金属学会昭 42 秋期大会
- (3) 杉原: 硬質磁性材料, 信学誌 53 卷, 5 号, 645~653 (昭 45)
- (4) 鈴木ほか: Fe-Ni-Cu 鉄心を用いた自己保持形継電器, 昭 45 信学全大, No. 352

# 差動増幅形 半導体磁気センサー

藤川恭一郎\*・高宮三郎\*\*

## Differential Amplification Magnetic Sensor

Kitaitami Works Kyoichiro FUJIKAWA  
 Central Research Laboratory Saburo TAKAMIYA

A differential amplification magnetic sensor (abbreviated to DAMS) is a composite device of a Hall device and two transistors differentially amplifying Hall voltage. It has intensively condensed monolithic integrated circuits in construction. As a result of trial manufacture of DAMS, measurement of it has revealed that the magnetic sensibility is 7 V/kG, unbalanced voltage is to the extent of 0.5 V and nonlinearity against a magnetic field is not very large. DAMS is not suitable to the detection of DC fields or AC wide-band fields, but because of its features of high voltage sensibility and asymmetry for the direction of magnetic field, it is to be well adapted to contactless magnetic switches or Hall motors.

### 1. まえがき

ホール効果および磁気抵抗効果は古くから知られており、素子の高感度化には電子移動度を大きく、素子の厚みを薄くすることが必要であることは広く一般に知られている。したがって、電子移動度の大きな材料を作る方法および素子の厚みを薄くする技術が長年にわたり研究されてきた。

一方、ダイオード化<sup>(1)</sup>、トランジスタ化<sup>(2)</sup>等構造を変えて他の物理現象との組合せで感度の増大を図ったり、集積回路製作技術を使って増幅回路やスイッチング回路を組み合わせると同時に素子の微小化を図ったり<sup>(3)</sup>、あるいは無接触スイッチ、無接点ボリューム等<sup>(4)</sup>一つの目的に沿った部品としての構造をなす新しいものが、ここ数年間に次々と報告されている。特にSiを材料とするプレーナー形ホール素子は、感度の点ではInSb、InAs等を材料とする素子に劣るが、集積回路との結合が容易であること、小形で簡便であること、および量産が容易で低廉な価格でできること等の利点があるので、磁界に対する応答の精度特に必要としない比較的強磁界の場合への実用素子として注目されている。現在研究、開発あるいは実用化されている半導体磁気センサーを分類すると次のようになる。

- (1) ホール素子
  - (a) 半導体薄膜を使ったもの
  - (b) 半導体バルクを使ったもの
  - (c) MOSチャネルを使ったもの
  - (d) 拡散層あるいはエピタキシャル成長層を使ったもの
- (2) 磁気抵抗素子
  - (a) 半導体薄膜を使ったもの
  - (b) 半導体バルクを使ったもの
  - (c) 同上に金属膜を入れたもの<sup>(4)</sup>
- (3) 磁気抵抗ダイオード
- (4) 磁気抵抗トランジスタ
  - (a) ベース抵抗変化を用いたもの<sup>(5)</sup>
  - (b) 伝導率変化を用いたもの
  - (c) FETのソース・ドレイン間抵抗の変化を用いたもの<sup>(6)</sup>
- (5) ホール効果トランジスタ
  - (a) エミッタでホール効果を起こすもの

- (b) ベースでホール効果を起こすもの
- (6) マディスタ形感性トランジスタ
  - (a) 二つのコレクタへの分流比を変えるもの<sup>(2)</sup>
- (7) ホール素子を含む複合素子
  - (a) 差動増幅形磁気IC<sup>(7)</sup>
  - (b) スイッチング回路を含むIC<sup>(8)</sup>

以下に述べる差動増幅形磁気センサー(DAMS)はホール素子と2個のトランジスタを組み合わせたもので、HoneywellのIC化磁気スイッチあるいはPhilipsの差動増幅形磁気ICの一部分に担当する機能を持ち、構造的にはモノリシックICをさらに縮約した構成になっている。次章以下にDAMSの構造、動作機構、電気的磁気的特性ならびに用途について述べる。

### 2. 差動増幅形磁気センサーの構造と動作機構

DAMSの半導体チップは一辺1mmの正方形で図2.1(a)に示されるプレーナ構造をしている。二つのコレクタに囲まれたホール領域は基板と同じ伝導形のエピタキシャル成長層から成り、左右のトランジスタのベース領域も兼ねている。また、この長さ方向の中央の両側端に $0.02 \times 0.02$ のエミッタがそれぞれ配置されており、左右のエミッタは互いに短絡されている。同図(b)に示されるごとく、左右のコレクタの間隔(隙)部分以外ではホール領域はコレクタによって基板から分離されており、間隔部はバイアス状態においては空乏層の広がりを利用して分離される。したがって、ホール領域は、く(矩)形ホール素子と考えることができる。

動作機構の面から見ると、DAMSは図2.2の点線内部に示されるごとく一つのホール素子と、ホール電圧を差動増幅すべく結線された二つのトランジスタに分解して考えることができる。すなわち、図2.1(a)における第1、第2ベース電極間に電流を流し紙面に垂直方向に磁界を加えると左右のエミッタ近傍のベース領域間にホール電圧が発生するが、エミッタは互いに短絡されているので、ホール電圧が左右のトランジスタのエミッタ・ベース間電圧の差となる。この結果、第1、第2コレクタ間に増幅されたホール電圧が得られる。ホール電圧が十分に発生するにはエミッタ・ベース間の微分抵抗が小さすぎないことが必要であるのでエミッタ電流は数mA以下に押えて使われる。したがって出力電流を大きくすることはできないが、出力抵抗が $10M\Omega$

以上の大きさを持っているので、出力電圧を大きくとり出すことができる。

図2.3には試作DAMSの外形を示す。実用状態では磁界を有効

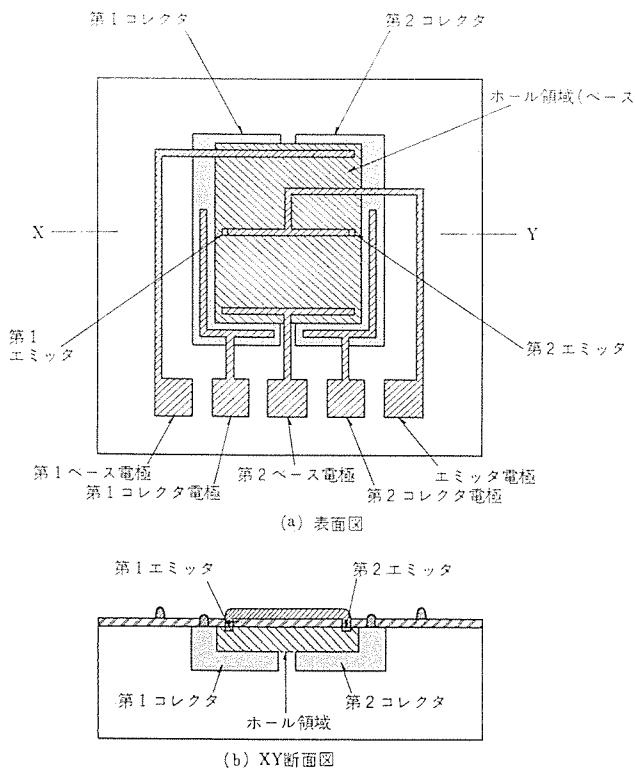


図2.1 差動増幅形磁気センサーの構造  
Structure of the DAMS chip.

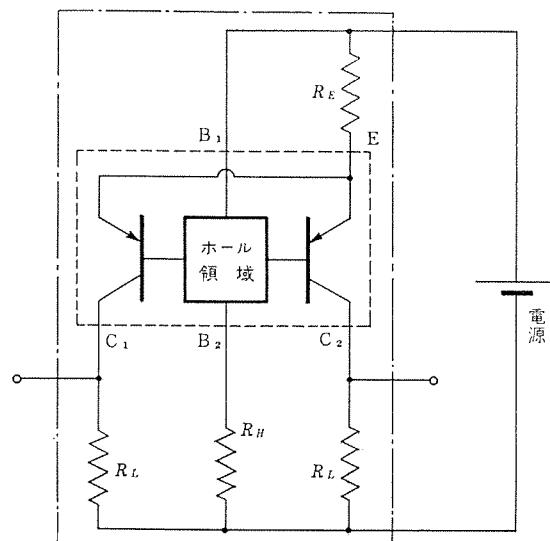


図2.2 差動増幅形磁気センサーの機能的分解図と  
四端子素子としての結線例  
Operation mechanism of the DAMS, and an example  
of its connection as a four terminal device.

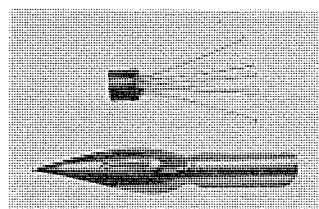


図2.3 モールド化された差動増幅形磁気センサー  
Mold type DAMS.

に使うために磁気回路の空げきをできるだけ狭くして磁束の広がりを防ぐ必要があり、磁気センサーとしては体積あるいは厚みの小さなものが有利であるが、DAMSは厚さ0.5mmまで薄くすることができる。磁束を集中するためにフェライト等の強磁性材料に磁気センサーをはり付けることが一般に行なわれているが、ここに述べるDAMSは特に磁束集中の手段をとっていない。

### 3. 差動増幅形磁気センサーの電気的・磁気的特性

試作されたDAMSの電気的特性を表3.1に示す。電流利得( $h_{fe}$ )の測定においては、二つのエミッタおよび二つのコレクタをそれぞれ同時につなぎ、左右のトランジスタを並列にした状態で測定を行なった。磁気感度はホール領域を構成するエピタキシャル成長層の厚さおよび比抵抗に大きく依存しており、厚さと比抵抗にはエミッタバイアス電流をパラメータとして最適な組み合わせが存在する。また、他の入力抵抗、耐圧、電流利得からの制約で上記の最適組み合わせからはずれた組み合わせをとる場合があるが、大体において、ホール領域

表3.1 差動増幅形磁気センサーの電気的特性  
Electric characteristics of the DAMS.

試料番号	No. 1	No. 2	No. 3	備考
ホール入力抵抗	1.3	1.2	0.8	kΩ
エミッタ順方向電圧	3.8	1.2	1.5	V ( $I_E=1\text{mA}$ )
エミッタ・ベース間耐圧	20.0	19.0	19.0	V
ベース・コレクタ間耐圧	38.0	37.5	37.0	V
不平衡抵抗	0.025*			%
等価雑音磁場	0.001*			G·Hz <sup>-1</sup>
応答速度	$10^{-5}$ *			sec. ( $RL=100\text{k}\Omega$ )
左右並列 $h_{fe}$	15.5	14.2	12.5	

\*印は計算値

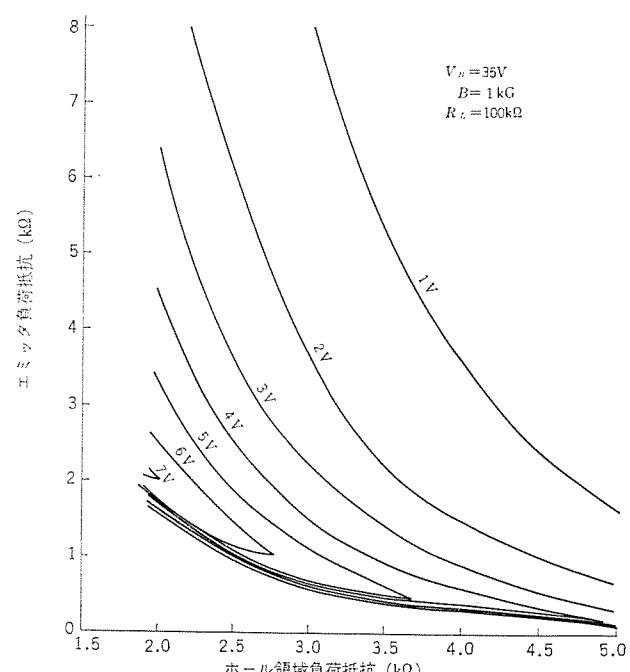


図3.1 差動増幅形磁気センサーの磁気感度  
Magnetic sensitivity of the DAMS.

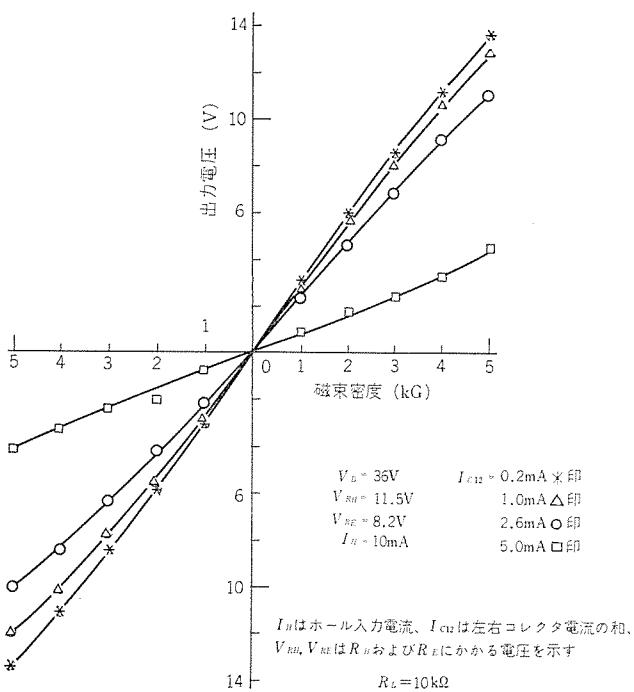


図 3.2 直流磁気感度特性  
Magnetic sensitivity of the DAMS.

の層厚が  $2\sim 6 \mu\text{m}$ 、比抵抗が  $0.1\sim 0.5 \Omega \cdot \text{m}$  の範囲になる。

DAMS を図 2.2 のごとく結線すると通常のホール素子と同じく 4 端子となり、高感度ホール素子として使うことができる。このときの磁気感度を  $1 \text{ kG}$  の磁束密度に対する出力電圧の形で図 3.1 に示す。図の曲線は磁束密度を固定した場合の等出力電圧曲線で、エミッタ負荷抵抗とホール領域負荷抵抗の組み合わせが同一曲線上にあれば磁気感度が等しいことを示す。エミッタ負荷抵抗を小さくし、エミッタ・ベース間電圧を高くすると磁気感度が高くなるが、コレクタ負荷で降下する電圧が増加するにつれてベース・コレクタ接合に加わるバイアス電圧が浅くなるので、図 3.1 に尾根となって見られるごとくエミッタ負荷抵抗とホール領域負荷抵抗の最適組み合わせが存在する。したがって、電源電圧を高くしてベース・コレクタ接合のバイアス電圧に余裕を持たせることによって、さらに感度を上昇させることができるが、この増感効果はホール領域の出力抵抗とエミッタ・ベース間微分抵抗が等しくなるバイアス条件に達すると飽和する。

図 3.2 には磁界方向および磁束密度の変化に対する出力電圧の変化を示す。磁界方向に対する差動出力の反対称性は当然であるが、 $1 \text{ kG}$  程度の磁束密度範囲ではかなりの直線性も見られる。後者は左右エミッタ間に発生するホール電圧が  $25 \text{ mV}$  すなわち  $kT/q$  に対してはるかに小さいことを意味している。

表 3.1 の不平歟抵抗は第 1、第 2 ベース電極位置に対する第 1、第 2 エミッタ位置の配置ずれから算出した値で、ホール領域入力電圧  $10 \text{ V}$  のとき左右のエミッタ・ベース接合に最大  $2.5 \text{ mV}$  の不平歟電圧を与えるが、コレクタ負荷にはバイアス電圧の最大  $10\%$  の不平歟電圧が発生する。実測では  $100 \text{ k}\Omega$  のコレクタ負荷に  $10 \text{ V}$  のバイアス電圧がかかっている状態で  $0.5 \text{ V}$  程度の不平歟電圧が発生している。

表 3.1 における等価雜音磁場は理論計算によって求めた値であるが、ホール領域の実効出力抵抗の熱雜音が DAMS の雜音の主成分と考えられる。

#### 4. 差動増幅形磁気センサーの応用例

ホール素子の S/N は移動度が大きいほど大きくなるので、Si ホール素子とトランジスタからなる DAMS は InSb, InAs 等を使ったホール素子ほどには S/N が大きくなない。また、出力電圧／不平歟電圧の比も移動度の大きなホール素子より小さい。しかし DAMS の特長はあくまでも製作が容易で価格が安いこと、および電圧感度がきわめて高いことである。したがって、用途としては精密な磁場計測とか広域交流磁界の検出よりもむしろ、狭帯域交流磁界あるいは  $\text{kG}$  オーダーの直流磁界の ON-OFF 等に適している。

前者の例としてはホールモーター、電流テスター、電力計等への応用をあげることができる。図 4.1 には DAMS を用いたホールモーターの基本回路 (a) と基本構成 (b) を示す。巻線  $W_1$  と  $W_3$  および  $W_2$  と  $W_4$  はそれぞれ互いに相反する方向の磁界を発生するように構成されている。したがって、 $W_1$  と  $W_3$  に電流が流れている場合にはその差の電流が磁界発生に有効に寄与し、残りは無効電流となるが、DAMS を使う場合、モーターの小形永久磁石で得られる磁束密度が数  $\text{kG}$  あれば、FET のゲート電圧に  $10 \text{ V}$  以上の変化を容易に与え

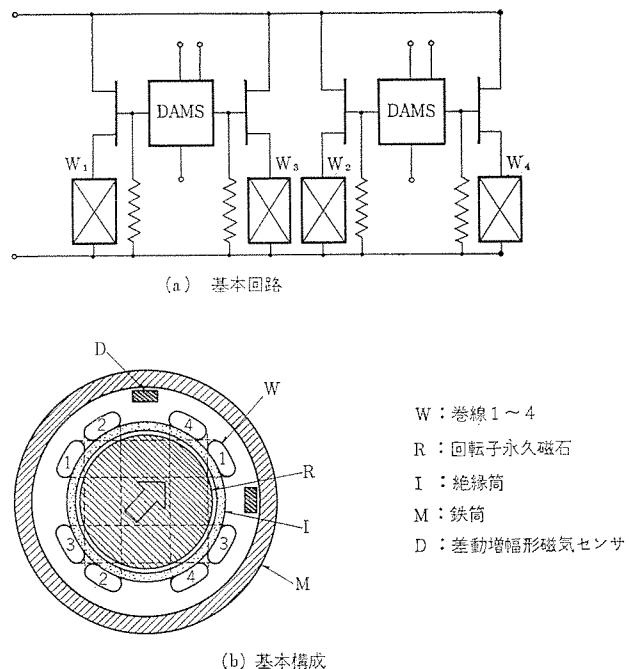


図 4.1 無刷子モーターの基本回路と基本構成  
Structure of a brushless motor.

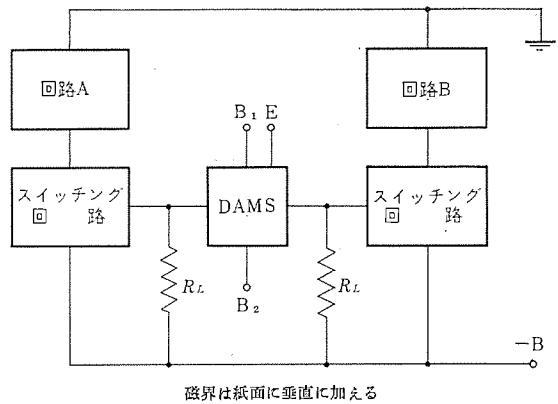


図 4.2 双方向スイッチの基本構成  
Application to a binary switch.

ることができるので、無効電流成分をほとんど理想に近い小さな値に押えることができる。巻線に流れる電流の効率は  $2/\pi$  に近い値が得られる。

後者の例としては、DAMS を小形永久磁石およびスイッチング回路と組み合わせて構成される無接触スイッチがあるが、素子の配列、機械的構造をくふうすることによってキーボードスイッチ、ロータリースイッチ、双方向スイッチ、リミットスイッチ等々多種のスイッチを無接触化することが可能である。さらに、たとえば可変容量ダイオードと組合わせることによって無接触同調器としてもできる。図 4.2 に双方向スイッチの基本構成を示す。

## 5. む す び

半導体磁気センサーの高性能化は電子移動度の大きな良質の材料を製造する技術が進んだことによるものである。最近特に活発になっている磁気センサー実用化の動きは、センサーの高性能化に加えて、プレーナ技術の導入によって素子が微小化されると同時に安価に量産されるようになったことにもよっている。両方の技術を巧みに組合わせた例としては片岡等による InSb 磁気抵抗素子<sup>(4)</sup>があるが、Honeywell<sup>(5)</sup> や Philips<sup>(7)</sup> の例にも見られるように、材料自体の低移動度を、素子の安定性と十分に開発された製作技術が補なった Si-IC 化磁気センサーも現状では見逃しがたいものである。

本文で述べた DAMS はプレーナ形ホール素子と 2 個のトランジスタが

一つの複合素子として一体化されており、高感度ホール素子として設計製作されたものである。これによつて Si ホール素子を使った差動増幅形磁気センサーの基本的特性を知ると同時に応用面での可能性と限界を明確にすることができた。結果的にはほぼ設計どおりの磁気感度特性を得ることができた。また DAMS の特性は電圧出力は大きいが、不平衡電圧を小さくすることがむずかしいことがわかつた。したがつて、用途に即した IC 化を図る場合にも無接触スイッチとかホールモーター等への応用を前提として設計すべきである。Philips<sup>(7)</sup> の例に見られるようにプレーナ形ホール素子をモノリシック IC 化したものと、図 2.1 に見られるように、一つの複合素子として一体化したものと比較すると、後者には微小化、配線の省略等の利点がある。

## 参 考 文 献

- (1) 青木、山田：エレクトロニクス、No. 6, 639 (昭 43)
- (2) R. H. Cushman : EDN, 73 (1969)
- (3) R. H. Cushman : EDN, 87 (1968)
- (4) 片岡、山田：電子材料、No. 10, 54 (昭 44)
- (5) 特願公告、昭 45-21541 号
- (6) F. F. Fang, et al : IBM Technical Disclosure Bulletin, 11, No. 6, 637 (1968)
- (7) 特願公告、昭 45-26461 号

# 小形玉軸受の高域騒音

平野 一郎\*・武藤 淳\*・小川 仁\*\*

## High Frequency Noise Characteristics of Small Size Ball Bearings

Central Research Laboratory

Ichirō HIRANO・Kiyoshi TAKETŌ

Nakatsugawa Works Nin OGAWA

A rotating ball bearing under load generates an airborne noise of high frequency peculiar to it. With the trend of electric machines getting of higher speed and of lighter weight, the airborne noise of the ball bearing has come to impose increasingly serious trouble. This makes it necessary to bring the light to the noise characteristics.

In this paper are described experimental results on the noise characteristics in question with a small size ball bearing under concentrated radial, thrust and combined load. It is made known that a sound pressure level in two specific zones becomes the maximum and the two maximum sound pressure levels change with the change of the load. Then the noise characteristics in case of the combined load can be estimated from those of under concentrated radial and thrust load.

### 1. まえがき

近時、生活空間の快適性の向上に伴って、電気機器の低騒音化が強く要求されてきている。このすう勢をふまえて、当社でも騒音低下に関する一連の研究を強力に進めているが、ここではその一環として、これらの電気機器に数多く用いられる小形の回転機の軸受騒音についての二、三の研究結果について報告する。

ここで対象としてとり上げた軸受は、この種機器で最も普遍的に用いられる単列深みぞ形玉軸受であるが、その発生する騒音については、かなり以前から種々の研究が行なわれている。

たとえば、曾田<sup>(1)</sup>は高速回転時の玉軸受から発生する騒音を検討し、回転数の変化によって変化する周波数成分と変化しない周波数成分があることを指摘し、西村・高橋は<sup>(2)(3)</sup>発生騒音の音圧レベルと回転数との間に一定の関係があることを示した。また Gustafsson<sup>(4)</sup>は騒音に関連する振動として、外輪を剛体とする種々の振動があり得ることを示した。

一方荷重変化と騒音変化に関連して、田中<sup>(5)</sup>はスラスト荷重をかけた場合に発生する騒音について検討し、音響スペクトラム中に現れる、いくつかのピークと軸受外輪の振動との関連を示唆し、ついで五十嵐は<sup>(6)</sup>、田中の研究を進めて、音の発生機構についてそれぞれ有益な成果をあげてきている。しかし、ころがり軸受から発生する騒音は、軸受形式や使用条件によって大きく異なり、種々の原因のうちいずれが寄与するかを統一的に扱うことがきわめて困難なために、それぞれの条件ごとに検討し、資料を蓄積する必要がある。

そこで、電気機器、特に生活空間に近接して使用する機器を直接の対象とする場合、聴感・経済性を考慮して、人耳の感度のよい高周波数域の騒音を特殊な形式のものや、特殊な潤滑条件などを用いないで検討することが望ましい。

この見地から、ここでは通常のグリース潤滑の場合にラジアル垂直荷重、スラスト荷重および合成荷重が、周波数の高い領域の騒音にどのような影響をおよぼすかを実験的に調べた。

### 2. 実験方法および実験装置

実験に用いた玉軸受と実験の条件および装置について述べる。

#### 2.1 試験軸受

一般に、寸法の大きなころがり軸受では、これを使用する機械自体が大きくなり、軸受以外の部分から発生する機械的、流体的、および電磁的原因による騒音が大きいために、軸受のみに起因する騒音が重大な問題となることはまれである。これに比べ、比較的小形のころがり軸受では、これを使用する機械自体が小さく、軸受以外の原因による騒音そのものが小さく、これが問題化することは少ない。

したがって、相対的に軸受からの騒音が問題となる。このような観点から、ここでは最も一般的に用いられる玉軸受のうち、6202形を用いることにした。寸法を表2.1に示す。軸受内部のラジアルすきまは、電動機用標準すきまとして定められているCMすきまである。実験にあたっては、このCMすきまのうち、すきまの小さいグループに属するもの(A)とすきまの大きいグループに属するもの(B)とに2分し、各グループにつき5個ずつ、計10個を用いた。

#### 2.2 実験条件

つきの実験条件を選定した。

ラジアルすきま： ラジアルすきまが9~16μのものを使用した。このうち9~12μのものを(A)グループ、13~16μのものを(B)グループとする。

回転輪： 最も一般的な使用方法を考えて内輪回転とした。

回転速度： 1,200 rpm一定とした。特別な高速回転(20,000 rpm程度)の場合を除けば、音響スペクトラム中のピークは、回転速度の変化によって音圧レベルだけが変化し、周波数は移動しないことが知られている<sup>(7)</sup>。

荷重負荷位置： 外輪の半径上の1点と、側面全周とに負荷した。前者はラジアル垂直荷重の場合、後者はスラスト荷重の場合である。

内輪と回転軸とのねじあい：  $15\phi^{+0.002}$ (軸)一定とした。

潤滑方法： シェルアルミニヤグリース#3を用いた。今までに報告されているものは、ほとんどが潤滑油のもの(白灯油・スピンドル油・ターピン油等)で、実用上最も一般的なグリース潤滑の場合については、発生する騒音レベルがターピン油等に比べ高くなることが指摘されている程度で、系統的に検討されたものは見当らない。

軸受周囲温度：  $20^{\circ}\pm2^{\circ}\text{C}$ 一定とした。

表 2.1 単列深みぞ形玉軸受 6202  
Single-row deep groove ball bearing 6202.

寸法 公差	ラジアルすきま*		試料番号							
	Aグループ		Bグループ		ラジアル垂直荷重の場合		スラスト荷重の場合		合成荷重の場合	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
外径 <i>D</i>	35φ <sup>-0.063</sup> <sub>-0.067</sub>		No. 1 5	No. 6 10	No. 11 15	No. 16 20			No. 21 25	
内径 <i>d</i>	15φ <sup>-0.002</sup> <sub>-0.005</sub>									
幅 <i>B</i>	11									
ラジアル すきま <i>C<sub>R</sub></i>	0.009 0.012	0.013 0.016								

\* CMすきまを更に2グループに分けた

荷重の負荷方向と変化範囲： ラジアル垂直荷重は 0.5~6 kg, スラスト荷重は 0.5~5 kg のそれぞれの範囲で, 0.25ないし 0.5 kg と並んで変化した。合成荷重の場合は、荷重比  $\lambda = L_T/L_R$  ( $L_T$  はスラスト荷重,  $L_R$  はラジアル垂直荷重) を定義し、この  $\lambda$  の値が 0.25, 0.5, 1.0 等一定値となるように  $L_T$ ,  $L_R$  を組み合わせた。ただし  $L_T$ ,  $L_R$  の値は、いずれもラジアル垂直荷重、スラスト荷重のそれぞれを単独で負荷した場合の範囲内とした。

荷重の負荷方向は今までの報告例では、ラジアル方向のみかスラスト方向のみであって、2方向同時の合成荷重の場合は見られない。ところが実際に軸受を使用する場合は、合成荷重となる場合が大多数である。この点からここでは、一方向のみの荷重の他に合成荷重の場合をとりあげた。また荷重の最大値は、ラジアル玉軸受の使用に際して一般的に採用される、静負荷容量  $C_0$  の 1/10~1/100 程度を考えて、ここでは  $C_0$  の 1/50 とした。

### 2.3 実験装置

実験装置は、おもに軸受を回転させるための駆動装置と軸受に荷重をかけるための負荷装置、騒音を測定分析するための騒音の分析記録装置から構成されている。これらの実験装置すべてを、十分に防音された無響室 (4 m × 4 m × 5 m) 内に設置して実験した。

図 2.1(a) は軸受内輪の駆動装置で、防音箱中に低騒音モータを入れ、一方が外部に突出した駆動軸の先端に JIS の規定\*に準じた円錐形の軸受取付軸をはめ合わせてある。試験軸受はこの軸受取付軸の先端につける。図 2.1(b) および(c) は、ともに負荷装置で、ラジアル垂直荷重とスラスト荷重とをかけるもので、合成荷重をかける場合は (b), (c) を共用する。

一方騒音の測定分析はつぎのようにした。軸受取付軸を含む水平平面上と垂直平面上とで、それぞれ軸受取付軸と角度 45° をなし、取り付けられた試験軸受の中心から 5 cm の距離にコンデンサマイクロホンを設置した。コンデンサマイクロホンからの信号を増幅した後ヘテロダイナ形の自動周波数分析装置を通し、得られた分析結果をレベルレコードで

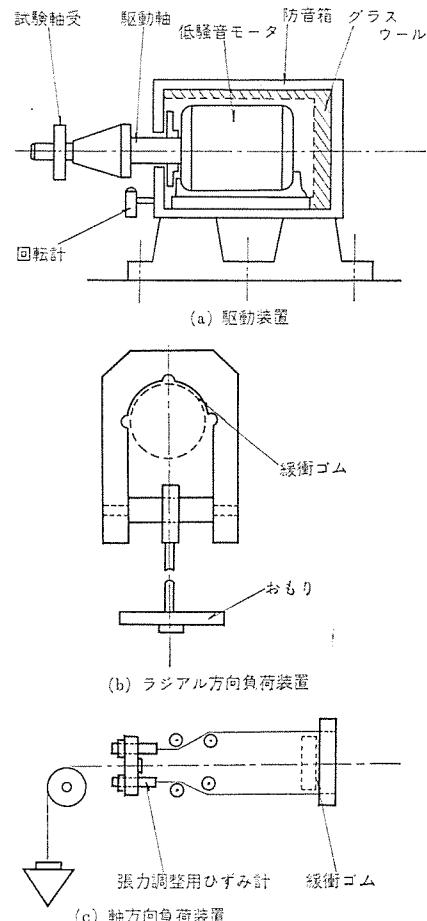


図 2.1 駆動装置および負荷装置  
Drive and load arrangements.

記録した。この騒音の分析記録システムの総合周波数特性は、周波数に関しては (20~15,000) ± 1 % + 2 Hz であり、音圧レベルに関しては ± 0.5 dB である。

### 3. 実験結果

ラジアル垂直荷重のみを負荷した場合、スラスト荷重のみを負荷した場合、およびラジアル垂直荷重とスラスト荷重を同時に負荷した合成荷重の場合の三つについて実験結果を述べる。

#### 3.1 ラジアル垂直荷重のみを負荷した場合

図 3.1(a) はラジアル垂直荷重のみを負荷した場合の、騒音の周波数特性の一例を示す。ラジアルすきまは、表 2.1 に示した A グループに属する 9 μ のものと、B グループに属する 14 μ のものである。ただし 9 μ のものについては、ラジアル垂直荷重が 3 kg の場合だけを示した。

図 3.1(a) のラジアルすきまが小さい場合、大きい場合のいずれの騒音の周波数特性にも共通していることは、騒音の音圧レベルがとつ(凸)状となっている周波数域が、ラジアル垂直荷重を 0.5 kg から 5 kg に増加してもほとんど高いほうにも低いほうにも変化しないことと、音圧レベルだけが、ラジアル垂直荷重の増加につれて高くなっていくことである。

ラジアルすきまの異なる A, B 両グループ間での騒音の周波数特性を比較してみると、たとえば図 3.1(a) のラジアル垂直荷重  $L_R$  が 3 kg の場合には、ラジアルすきまの小さい A グループに属する軸受のほうが、5 dB 程度音圧が低くなっている。なおこの騒音の周波数帯域で、音圧レベルがとつ状となっている二つの周波数帯域 6~8 kHz, 10~

\* JIS B 1548-1960

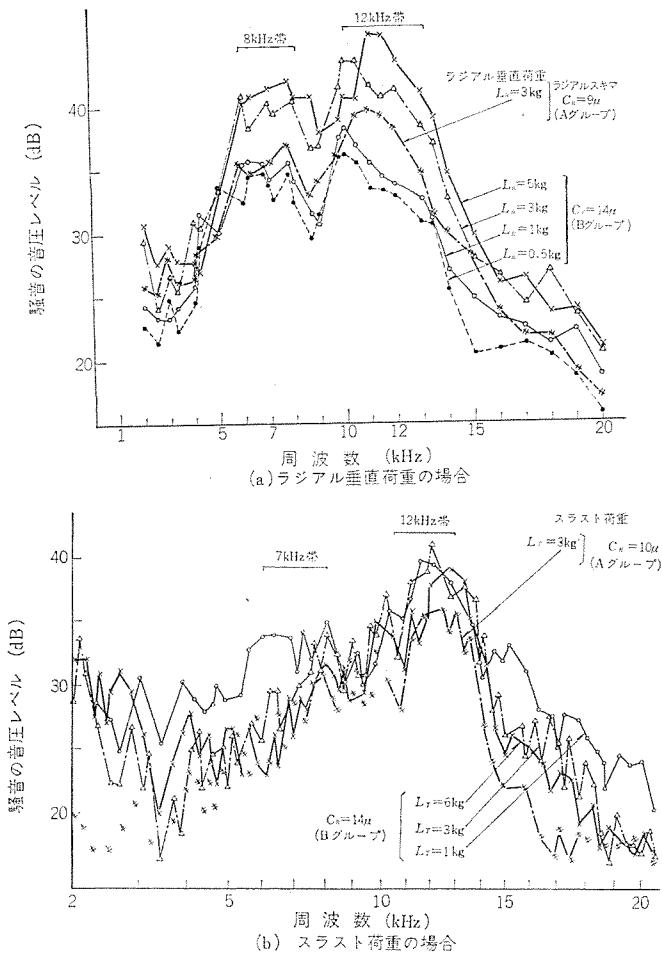


図 3.1 ラジアル垂直荷重およびスラスト荷重の場合の騒音の周波数特性

Noise frequency characteristics under concentrated radial load and thrust load.

13 kHz を、その中心周波数を代表して 7 kHz 帯、12 kHz 帯としてすることにする。

### 3.2 スラスト荷重のみを負荷した場合

図 3.1(b) はスラスト荷重のみを負荷した場合の騒音の周波数特性を示す。これはラジアル垂直荷重の場合と同様、ラジアルすきまが、A, B 両グループに属する軸受の一例である。スラスト荷重の場合にも、ほぼ 6~8 kHz と 10~13 kHz の二つの周波数帯域で騒音の音圧レベルはとつ状を示している。この二つの帯域をラジアル垂直荷重の場合と同様 7 kHz 帯、12 kHz 帯とする。すでに述べたラジアル垂直荷重の場合と異なる点は、とつ状を示す周波数帯域がスラスト荷重の増加につれて周波数の高いほうへ移動する点である。特に 12 kHz 帯の音圧レベルは、この傾向が著しい。

図 3.2 はとつ状を示す周波数帯域の移動を調べるために、スラスト荷重を負荷した場合の騒音の周波数特性のうち、スラスト荷重が 0.5, 2.0, 6.0 kg の三つの場合をとりあげて比較したものである。図 3.2 によると、スラスト荷重が 2.0 kg 程度以上では、6~8 kHz に現われていたとつ状のレベルは、スラスト荷重の増加につれて、しだいにとつ状とは認めがたくなる。

一方 12 kHz 帯に現われていたとつ状レベルの周波数帯域は、スラスト荷重の増加につれて少しずつ周波数の高いほうへ移動して、スラスト荷重が 6 kg 程度に達すると 14 kHz 近くまで移動していることがわかる。つぎに合成荷重の場合の騒音の周波数特性の測定結果について述べる。

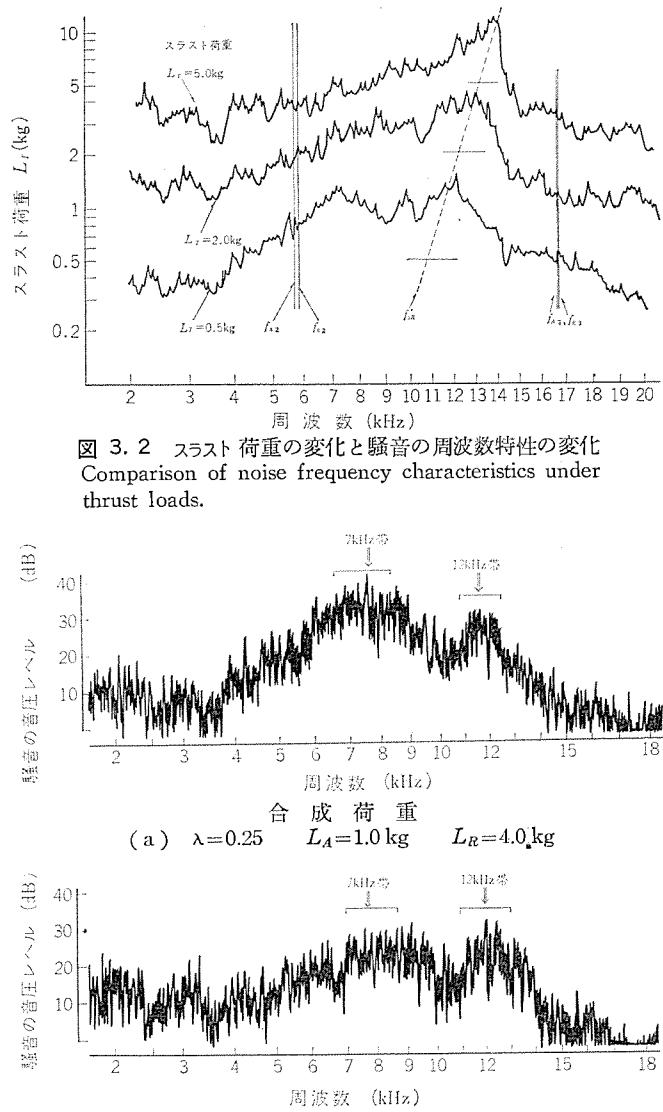


図 3.2 スラスト荷重の変化と騒音の周波数特性の変化  
Comparison of noise frequency characteristics under thrust loads.

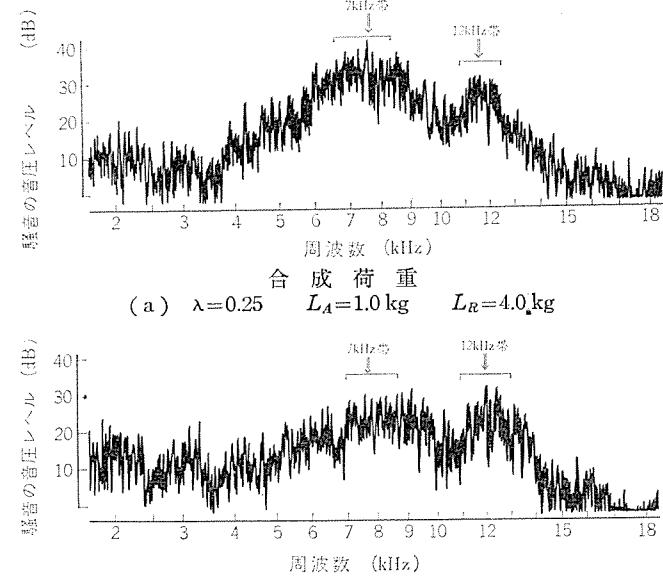


図 3.3 合成荷重の場合の騒音の周波数特性  
Noise frequency characteristics under combined load.

### 3.3 合成荷重を負荷した場合

騒音の周波数特性の分析結果と、この結果を最大接触力を用いて整理した場合の結果を述べる。

#### 3.3.1 騒音の周波数特性

図 3.3(a), (b) に荷重比  $\lambda = 0.25$  と  $\lambda = 1.0$  の場合の騒音の周波数特性の例を示す。図 3.3 により合成荷重の場合においても、ラジアル垂直荷重のみ、あるいはスラスト荷重のみの場合と同様に、騒音の周波数特性には二つのとつ状を示す周波数帯域が現われている。これら二つの周波数帯域を、3.1 節で述べたと同様に 7 kHz 帯、12 kHz 帯とする。この二つの周波数帯域のうち、7 kHz 帯の周波数帯域はすでに述べた荷重比  $\lambda$  が変化しても、ほとんど高いほうへも低いほうへも移動しないのに対して、12 kHz 帯の周波数帯域は周波数の高いほうへ移動する。

一方音圧レベルは、 $\lambda$  が変化すると 7 kHz 帯、12 kHz 帯ともに変化する。そこでこの音圧レベルが合成荷重によって変化する量を表示することが必要であるが、このためには合成荷重をかけた場合の軸受内の負荷状況を一義的に表わし得るパラメータで表示するのが便利である。このようなパラメータとして、軸受内のすべての接触点に

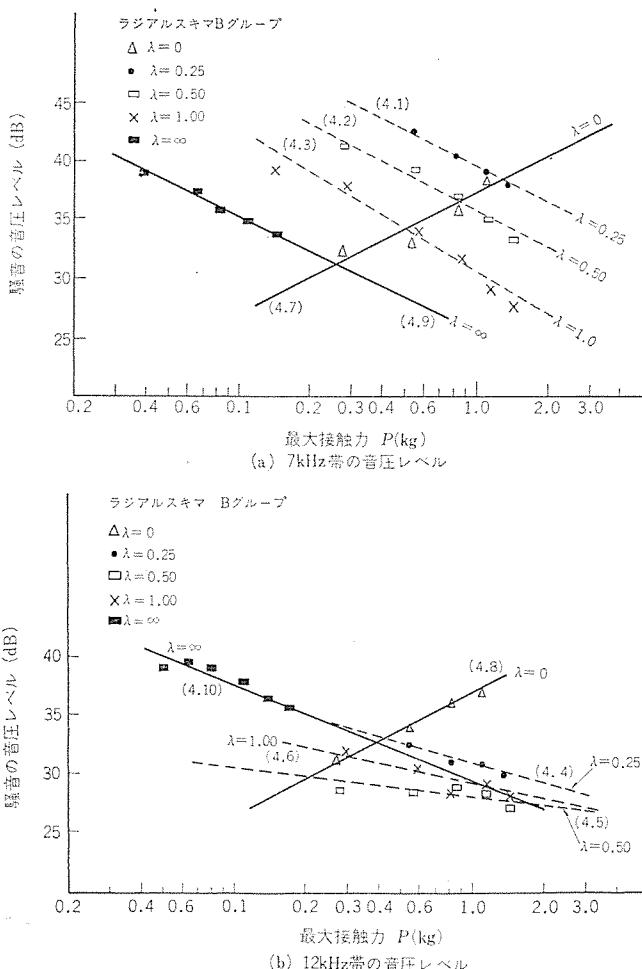


図 3.4 7 kHz 帯および 12 kHz 帯の音圧レベル  
Sound pressure level of 7 kHz and 12 kHz zone.

働く接触力のうちその最大のものをとることにし、これを最大接触力  $P_{kg}$  としている。最大接触力  $P$  と ラジアル垂直荷重  $L_R$  と スラスト荷重  $L_T$  の間の関係は、軸受内の力の釣り合いを考慮することにより式(3.1)の形で表わすことができる。なおこの式の誘導は付録に示す。

$$P = L_R / z(\lambda / \sin \alpha + K / (2 \cos \alpha)) \dots \dots \dots (3.1)$$

ただしここに  $z$  は軸受内の全玉数を、 $\lambda$  は荷重比を、 $\alpha$  は軸受の接触角を、 $K$  は玉軸受に特有の定数<sup>(8)</sup> (単列深みぞ形玉軸受では 4.37) を示す。この  $P$  を用いて 7 kHz 帯、12 kHz 帯の音圧レベルの変化を整理した結果について述べる。

### 3.3.2 特定帯域の音圧レベルと最大接触力

図 3.4(a), (b) はそれぞれ合成荷重を負荷した場合に現われた 7 kHz 帯、12 kHz 帯の騒音の音圧レベルの変化を、最大接触力  $P$  について整理したものである。併記した荷重比  $\lambda = 0, \lambda = \infty$  はそれぞれラジアル垂直荷重のみの場合、スラスト荷重のみの場合の特性である。図 3.4 により 7 kHz 帯および 12 kHz 帯の音圧レベルは、ともにスラスト荷重  $L_T$  のみの場合は、一記号で示した実験値のように最大接触力  $P$  の増加につれて低下する傾向を示し、一方 ラジアル垂直荷重のみの場合には、△記号で示した実験値のように最大接触力  $P$  の増加につれて増大する傾向を示している。

また合成荷重の場合には、 $\lambda$  の値のいかんによらず常に、最大接触力  $P$  が増加するにしたがって音圧レベルが低下する傾向を示しており、この傾向はスラスト荷重のみの場合の傾向に非常に近い。さらに合成荷重の場合、荷重比  $\lambda$  の値が大きくなるにつれて、すなわち

ラジアル垂直荷重に比べてスラスト荷重の比が大きくなるにつれて、7 kHz 帯および 12 kHz 帯のレベルは、 $\lambda = \infty$  のスラスト荷重のみの場合の音圧レベルの変化に近くなっている。逆に  $\lambda$  の値が小さくなれば、ラジアル垂直荷重  $L_R$  に比べ、スラスト荷重  $L_T$  が小さくなつてみると、二つの帯域の音圧レベルと最大接触力の関係は、 $\lambda = 0.25$  と  $\lambda = 0$  との実験値に示したように急激に変化する。

つぎにこれらの実験結果をもとに、二、三の考察を述べる。

## 4. 考 察

ラジアル垂直荷重のみを負荷した場合、スラスト荷重のみを負荷した場合、合成荷重を負荷した場合のそれぞれの騒音の周波数特性に現われた音圧レベルが極大を示す周波数帯域の出現原因と、その音圧レベルの荷重に対する変化を最大接触力を介して考察する。

### 4.1 音圧レベルが極大を示す周波数帯域

ラジアル垂直荷重、スラスト荷重、合成荷重のそれぞれの場合に騒音の周波数特性に現われた音圧レベルが、とつ状となる周波数帯域で起こっている振動挙動と音との関連を追求することは、玉軸受使用に先だって、この特定帯域の周波数群を予測する方法を知ることにつながる点で重要である。したがってここでは、玉軸受の構造上予測される振動系を考慮するとともに、二、三の資料<sup>(9)</sup>にもとづいて高域騒音の発生原因について推定する。玉軸受の高域騒音の発生に関連すると考えられる振動を大別するとつぎの二つとなる。

(1) 玉軸受の外輪・保持器・玉・内輪のそれぞれが単独に弾性振動するもので、これを EV 系列の振動とする。

(2) 玉軸受の外輪・玉・内輪は一種の剛体質量で、これにこの 3 者が互に接触している点で生じるローカルな接触変形によるばね作用が加わることによって構成される振動系の振動によるもので、これを SV 系列の振動とする。この 2 種類の振動は、いずれも何らかの強制入力を受けることにより発生するはずである。強制入力としては、

(a) H. Perret によって指摘された玉通過によるもの

(b) 軸受の製作精度不良に起因するもの  
などが考えられる。

このうち (a) によって発生する振動入力の周波数は、内輪回転数に全玉数を乗じた周波数  $N \cdot Z$  であるから、全玉数が 10 個前後の小形玉軸受では、たとえ回転数が 6,000 rpm (100 Hz) 程度に上昇しても、 $NZ = 1,000$  Hz でこれ以上の周波数とはならないから、(a) による玉通過の振動入力によって 1,000 Hz 以上の高域騒音が発生することは少ないと考えてよい。

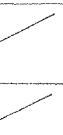
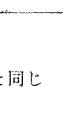
これに比べ (b) の場合、特に製作精度の不良のうち、玉軸受の内外輪のレース面および玉の表面上にあるうねりを含むおうとつ(凹凸)による強制変位によって上記の騒音が発生すると考えられる。このおうとつの片振幅値が、超仕上の場合でも  $1/100 \sim 1/1,000 \mu$  (rms) 程度のものが十数個以上、数百個にわたって、ほぼ不規則に存在していることが知られており<sup>(10)</sup>、また筆者の行なった実験でも、無負荷の状態で回転した場合に生じる騒音の周波数特性は、周波数が 500 ~ 20,000 Hz にわたってほぼ一定レベルのホワイトノイズに近い特性になることから、レース面および玉の表面のおうとつによって生じる振動入力の周波数は、特定の周波数帯域のものではなく、ほぼあらゆる周波数を不規則に含んだものと考えることができる。

玉軸受が、今述べた振動入力を受けければ、その振動がすでに述べた EV 系列・SV 系列を問わず、共振状態のところで振幅が極大と

なり、したがって音圧レベルも大きくなると考えることができる。したがって音圧レベルがとつ状となる周波数帯域は、いずれもすでにのべたEV系列・SV系列の振動の自由振動数群にきわめて近い周波数となるはずである。そこでつぎにEV系列およびSV系列の自由振動モードを考慮するとともに、自由振動数を計算する。

EV系列の振動としては、外輪、保持器および内輪によるものをおあげができる。このうち内輪は軸受取付軸と堅く固定されるから、内輪だけの弾性振動は非常に発生しにくうえに、起りえたとしても、その自由振動数は20kHz以上で人耳には聞えない。したがって残るものは外輪と保持器である。外輪も保持器も、その断面形状は複雑であるが、一種のリングと見ることができる。したがって、外輪および保持器の自由振動モードとしては、リング面内の曲げ自由振動  $f_{R2}$ 、リング面内に垂直な変位とねじれとの両方を含む曲げ自由振動  $f_{A2}$ を考えればよい。これら二つの振動モードの自由振動数のうち外輪に関するものを  $f_{R2}$ 、 $f_{R3}$ 、 $f_{A2}$ 、 $f_{A3}$  とするし、

表4.1 玉軸受(6202形)の高周波域の自由振動  
Natural frequencies in high frequency region of ball bearing.

振動の系列	名称	記号	自由振動のモード	自由振動数 Hz (計算値)	自由振動数 Hz (実測値)	騒音分析に現われたとつ(凸)状レベルの帯域 Hz
EV <sup>※2</sup>	外輪面外第二次振動	$f_{R2}$		5,730	5,690 5,740	6,000 ↓ 8,000
EV	外輪面内第二次振動	$f_{R2}$		5,890		7 kHz 帯
SV <sup>※3</sup>	外輪のラジアル振動	$f_{SR}$		8,590 9,350 9,820 10,180 10,500 10,710	$L_7$ 1 2 3 4 5 6 kg	10,000 ↓ 12 kHz 帯
EV	外輪面外第2次の2倍振動	$2 \cdot f_{R2}$		11,460	9,810 11,460	13,000
EV	外輪面内第2次の2倍振動	$2 \cdot f_{R2}$		11,780		
EV	保持器の面外第二次振動	$Hf_{A2}$	$f_{R2}$ と同じ	11,270		
EV	保持器の面内第二次振動	$Hf_{R2}$	$f_{R2}$ と同じ	11,600		
EV	外輪面外の第3次振動	$f_{A3}$		16,410		
EV	外輪面内の第3次振動	$f_{R3}$		16,600		

※1 打撃による自由振動数を実測した値である。

※2 Element Vibrationの略

※3 System Vibratlonの略

保持器に関するものを  $Hf_{R2}$ 、 $Hf_{A2}$  とするす。サフィックス2と3はそれぞれ第二次、第三次の振動モードを示す。

一方SV系列の振動モードとしては外輪を剛体とし、外輪玉・内輪の各接触点での変形をばねとするスラスト方向  $f_{ST}$ 、ラジアル方向  $f_{SR}$  および傾斜方向(外輪と内輪との間にモーメント負荷がかかる場合の振動方向)  $f_{S\theta}$  の振動モードが考えられ、このうち  $f_{SR}$  を除いて他2者は、その自由振動数<sup>(11)</sup>が1kHz程度およびそれ以下であるのでここではとりあげない。

以上の各系列の固有振動数の計算値と、一部については実験によって求めた値とを比較して表4.1に示す。なお表4.1には、3章に述べた各種の荷重方向によって現われた騒音のとつ状レベルの周波数帯域を併記した。つぎにそれぞれの荷重の場合に現われた二つの周波数帯域; 7kHz帯と12kHz帯の性質から、簡単にその発生因を考える。

#### ラジアル垂直荷重の場合

スラスト荷重が零であるから、表4.1に示したSV系列の振動による騒音は発生しないことになる。したがってラジアル垂直荷重の場合の高域騒音はおもにEV系列の振動によると考えられる。7kHz帯の周波数帯域は、表4.1の  $f_{R2}$  および  $f_{A2}$  の振動数に近く、これによりわずかに高い値になっていること、さらに外輪のみを軸受から取りはずして自由振動数を実測した値5,690Hz、5,740Hzと近い。この事実は外輪が基本的には  $f_{A2}$ 、または  $f_{R2}$  の振動モードで振動するが、玉との接觸位置におけるばね拘束のために、外輪の自由振動数がまったく自由な場合に比べて、いくぶんか高くなったものと考えられる。

一方12kHz帯に近い周波数の計算値は、保持器のEV系列の自由振動数  $Hf_{A2}$ 、 $Hf_{R2}$  と外輪の同じくEV系列の自由振動数  $f_{A2}$ 、 $f_{R2}$  の2倍高調波である。このうち保持器はラジアル垂直荷重を受けても拘束されないから、ラジアル垂直荷重の増加によっては保持器の振動による音圧レベルは変化しないことになり、これは現実に12kHz帯の音圧レベルが変化する事実と矛盾する。したがって12kHz帯は外輪のEV系列の振動による  $f_{A2}$  および  $f_{R2}$  の2倍高調波と見るほうが妥当である。なお、白灯油潤滑の場合、表4.1に計算値を示したEV系列の第三次モードの自由振動数に相当する周波数でピークレベルが現われた報告例<sup>(12)</sup>があるが、筆者らの場合には認められなかった。

#### スラスト荷重の場合

7kHz帯、12kHz帯のうち7kHz帯の周波数帯域は、スラスト荷重が増加しても、移動の事実が認めがたいが、12kHz帯のそれは明らかに周波数の高いほうへ移動する。この点でラジアル垂直荷重の場合の12kHz帯とは性質を異にする。スラスト荷重が増加すると、外輪はスキマの減少と弾性変形のために軸方向に変位して、ラジアルスキマが零となり、すべての玉は外輪・内輪と接触し接触力は増加するから外輪の拘束が強くなる。

したがってスラスト荷重が小さい範囲では、すでに述べ

\* 第一次モードは現われない。

た外輪の  $f_{A2}$ ,  $f_{R2}$  の振動が出やすいが、スラスト荷重が大きいと、これらの  $f_{A2}$ ,  $f_{R2}$  の振動は発生しにくくなる。このように考えると、すでに示した図3.3において、スラスト荷重  $L_T$  が0.5kg程度では明らかにとつ状となっている7kHz帯の音圧レベルが、 $L_T=5\text{kg}$ では、ほとんどとつ状とは認めがたくなる事実が理解できる。

一方図3.2に示したように、12kHz帯の周波数帯域  $f'_{SR}$  は、明らかにスラスト荷重  $L_T$  の増加で大幅に変化するから、基本的には表4.1に示したSV系列の振動  $f_{SR}$  に近い性質のものであると考えられる。

#### 合成荷重の場合

合成荷重の場合の騒音の周波数特性に現われるとつ状レベルの性質は、すでに述べたラジアル垂直荷重のみの場合、およびスラスト荷重のみの場合の性質を共有しているが、外輪とすべての玉と内輪は常に接触していて、ラジアルすきまもスラストすきまも零である点はスラスト荷重のみの負荷状態に近いので、その性質もスラスト荷重のみの場合に近くになると推定できる。この観点から、合成荷重の場合の特定帯域の騒音は、その発生因という点ではすでに述べたラジアル垂直荷重・スラスト荷重の場合と基本的に異なるものではないと考えられる。工学的には、むしろ特定帯域の音圧レベルに対し、ラジアル垂直荷重  $L_R$  とスラスト荷重  $L_T$  のいずれの寄与率が大きいかが重要である。

#### 4.2 合成荷重の場合の特定帯域の音圧レベル

ここではおもに二つの帯域7kHz帯、12kHz帯の音圧レベルの荷重に対する変化について、すでに述べたラジアル垂直荷重・スラスト荷重のそれぞれの場合と比較しながら考察する。玉軸受に合成荷重を負荷することによって、玉とレース面との接触面に生じる最大接触力  $P$  と上に述べた二つの帯域のとつ状レベルの音圧との関係を整理し、すでに一部報告した<sup>(13)</sup>。

図3.4(a), (b)に示した音圧レベル  $S$  と最大接触力  $P$  との実験値を直線近似して表示すると、つぎに示す式(4.1)～(4.10)がえられる。

#### 合成荷重の場合

$$S_{RT}=39+20 \log P^{-\frac{1}{3.12}} \quad \lambda=0.25 \quad \dots \dots \dots \quad (4.1)$$

$$S_{RT}=35+20 \log P^{-\frac{1}{3.02}} \quad \lambda=0.50 \quad \dots \dots \dots \quad (4.2)$$

$$S_{RT}=31+20 \log P^{-\frac{1}{2.66}} \quad \lambda=1.00 \quad \dots \dots \dots \quad (4.3)$$

$$S_{RT}=36+20 \log P^{-\frac{1}{5.00}} \quad \lambda=0.25 \quad \dots \dots \dots \quad (4.4)$$

$$S_{RT}=28+20 \log P^{-\frac{1}{7.70}} \quad \lambda=0.50 \quad \dots \dots \dots \quad (4.5)$$

$$S_{RT}=29+20 \log P^{-\frac{1}{6.25}} \quad \lambda=1.00 \quad \dots \dots \dots \quad (4.6)$$

#### ラジアル垂直荷重の場合

$$S_R=37+20 \log P^{\frac{1}{3.05}} \quad \lambda=0 \quad \dots \dots \dots \quad (4.7)$$

$$S_R=37+20 \log P^{\frac{1}{3.03}} \quad \lambda=0 \quad \dots \dots \dots \quad (4.8)$$

#### スラスト荷重の場合

$$S_T=25+20 \log P^{-\frac{1}{3.03}} \quad \lambda=\infty \quad \dots \dots \dots \quad (4.9)$$

$$S_T=29+20 \log P^{-\frac{1}{3.81}} \quad \lambda=\infty \quad \dots \dots \dots \quad (4.10)$$

ここで  $S$  は音圧レベルdBを、 $S$  の左側サフィックスはとつ状レベルの周波数帯域を、 $S$  の右側サフィックスは荷重の種類を示しており、 $R_T$  は合成荷重の場合、 $R$  はラジアル垂直荷重のみの場合、 $T$  はスラスト荷重のみの場合を示す。また荷重比  $\lambda=0$  のときはラジアル垂直荷重のみ、 $\lambda=\infty$  のときはスラスト荷重のみであることを示す。

合成荷重の場合の二つの帯域の音圧レベルを表わす式(4.1)～(4.6)の最大接触力  $P$  の指数  $n$  はつぎの範囲にある。

$$-1/2.56 \leq n \leq -1/7.70$$

一方ラジアル垂直荷重のみの場合には、7kHz帯、12kHz帯とともに  $n=1/3.03$  であり、スラスト荷重のみの場合には7kHz帯では  $n=-1/3.03$  で、12kHz帯では  $n=-1/3.84$  となる。田中は<sup>(14)</sup>、玉とレース面との接触平面に垂直な方向に働く強制力が、静的な接触力  $P$  の1/3乗に比例するという仮定にもとづいて、外輪の振動による音圧レベルは、 $P^{\frac{1}{3}}$  に比例することを示したが、筆者らの実験ではラジアル垂直荷重の場合には、 $n$  の値はほぼ1/3となり前者と一致するが、スラスト荷重の場合には  $n$  の値は負となり、最大接触力  $P$  の増加につれて音圧は減少するという逆の傾向を示している。

スラスト荷重のみの場合の全騒音レベルについてのこの  $n$  に相当する値をこれまでの報告例からもとめると、 $1/2.63 \sim 1/3.12$ <sup>(15)</sup>、 $1/4$ <sup>(16)</sup>、 $1/5$ <sup>(17)</sup> と相当にばらつきがあるが、負にはなっていない。筆者らの実験で  $n$  の値が負になる点については、つぎのように考える。

音圧レベルがすべて接触力  $P$  の1/3乗に比例するとの考え方だけでは、上に示した指数  $n$  のばらつきは説明ができない。したがって全騒音レベルを構成しているピークレベルないしは、とつ状レベルの中には、接触力  $P$  の1/3乗に比例する性質のものほかに、 $P$  の指数が負となる性質の特殊帯域の音圧レベルが存在し、この音圧レベルが全騒音レベルにおよぼす寄与率が大きいために、全騒音レベルの指数  $n$  が1/3より小さい場合が現われるものと考える。筆者らのとり上げた高周波数域のとつ状レベルは、上のべた特殊帯域の音圧レベルに相当するものであるとみなすことができる。スラスト荷重が増加するにしたがって、外輪が玉との接觸点からうける拘束力は増加し、すでに述べたEV系列の振動振幅が減少し、音圧が低下するものと推定する。

合成荷重の場合の最大接触力  $P$  の指数  $n$  の値は、すでに示したように、7kHz帯、12kHz帯ともに負となっている。これは合成荷重が働いた場合、そのスラスト方向分力によって外輪と内輪の間のラジアルすきま、スラストすきまは零に近くなるため、外輪が玉から接觸点を介して受ける拘束条件は、スラスト荷重のみが働いた場合と近い状態である。したがって合成荷重の場合の騒音の性質は、スラスト荷重の場合の性質に近くなるものと考えられる。

#### 4.3 騒音の寄与係数

合成荷重の場合の騒音の音圧レベル  $S_{RT}$  が、ラジアル垂直荷重のみの騒音の音圧レベル  $S_R$  とスラスト荷重のみの騒音の音圧レベル  $S_T$  との重ね合わせによって合成されていると仮定した場合、 $S_R$ ,  $S_T$  が  $S_{RT}$  の中でしめる比率を表わす係数  $K_R$ ,  $K_T$  が、荷重比  $\lambda$  に対してどのような変化をするかを知ることは、実用上たいせつである。

そこで、すでに述べた二つの周波数帯域、すなわち7kHz帯と12kHz帯の合成荷重を負荷した場合に発生する音圧レベルを式(4.11)の形に置くこととする。

$$S_{RT}=K_R \cdot S_R + K_T \cdot S_T \quad \dots \dots \dots \quad (4.11)$$

ここに  $K_R$ ,  $K_T$  はそれぞれ  $S_{RT}$  の中にしめる  $S_R$ ,  $S_T$  の比率を示す係数で、以下ラジアル騒音寄与係数、およびスラスト騒音寄与係数とする。式(4.11)の左辺の  $S_{RT}$  に、すでに実験的にえられた式(4.1)～(4.6)までの合成荷重の場合の音圧レベルと最大接触力との関係式を用い、一方  $S_R$ ,  $S_T$  も同様式(4.7)～(4.10)のラジアル垂直荷重とスラスト荷重の場合の音圧レベルの式を用いて、それぞれの荷重比  $\lambda$  における  $K_R$ ,  $K_T$  の値を計算した。これらの騒音寄与係数

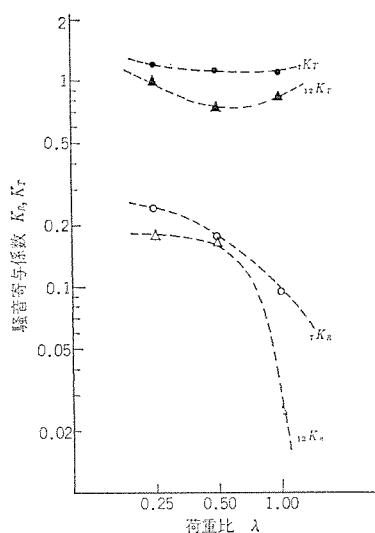


図 4.1 騒音寄与係数  
Radial and axial noise influence coefficients.

$K_R$ ,  $K_T$  と荷重比  $\lambda$  との関係を図 4.1 に示す。

図 4.1 にもとづいて、つぎの点が考察される。荷重比  $\lambda=1.0$  の近傍、すなわちラジアル垂直荷重  $L_R$  とスラスト荷重  $L_T$  の大きさがほぼ等しいような合成荷重を受ける場合（このような使用法は、実用上は比較的荷重の大きさが小さい値の領域でしか用いない）には、スラスト騒音寄与係数  $K_T$  に比べて、ラジアル騒音寄与係数  $K_R$  が  $1/10$  ないし  $1/50$  程度と小さく、したがって合成荷重を受ける場合の音圧レベル  $S_{RT}$  におよぼす、スラスト荷重の場合の音圧レベル  $S_T$  の影響が非常に強いことになる。

一方  $\lambda=0.25$  の近傍および  $\lambda$  がこの値以下の領域の合成荷重を受ける場合（この使用法は最も一般的な場合に相当する）では、スラスト騒音寄与係数  $K_T$  とラジアル騒音寄与係数  $K_R$  の大きさが接近する。したがって合成荷重を受ける場合の音圧レベル  $S_{RT}$  におよぼすラジアル垂直荷重の場合の音圧レベル  $S_R$  と、スラスト荷重の場合の音圧レベル  $S_T$  の寄与が接近してくることになる。ただし  $\lambda=0$ 、すなわちラジアル垂直荷重、以外のいかなる  $\lambda$  の値においても、スラスト騒音寄与係数  $K_T$  がラジアル騒音寄与係数より大きい。この事実はプレードにより騒音が低下するという一般概念と一致する。

## 5. むすび

小形玉軸受（6202、グリース潤滑）の高周波数域における騒音を、おもに軸受にかかる荷重と対比して実験的に検討した。その結果、

(1) ラジアル垂直荷重をかけた場合、スラスト荷重をかけた場合、合成荷重をかけた場合のそれぞれの騒音の高周波領域での周波数特性には、特定の二つの周波数帯域（7 kHz 帯、12 kHz 帯）において、騒音の音圧レベルが極大となる現象が現われること。

(2) ラジアル垂直荷重の場合は、上記二つの周波数帯域の騒音のおもなる周波数は、玉軸受外輪の第二次モードの自由振動数群およびその2倍高調波振動数群に近接し、ラジアル垂直荷重が増加しても、

周波数群域は移動しないこと。

(3) スラスト荷重の場合には、二つの周波数帯域のうち 7 kHz 帯の騒音のおもな周波数は、ラジアル垂直荷重の場合と同じく玉軸受外輪の第二次自由振動数群に近接し、12 kHz 帯の騒音のおもな周波数は、玉軸受の外輪の質量と外輪と玉との接触部に生じる局部的なばねとからなる振動系のラジアル方向の振動数と密接な関連があること。

(4) 合成荷重の場合、上に述べた二つの周波数帯域は、上記(2), (3)の性質を共有し、一方その音圧レベルは、玉軸受中の最大接触力  $P$  の増加につれて減少し、荷重比  $\lambda$  が大きくなるほどスラスト荷重のみの場合の音圧レベルの傾向に近づくことを指摘し、合成荷重の場合の 1 kHz 以上の高周波領域における騒音の特定帯域の音圧レベルと最大接触力との関係式を示した。

さらにこれを用いて、合成荷重の場合の騒音の音圧レベルに、ラジアル垂直荷重およびスラスト荷重の場合の音圧レベルがおよぼす影響を知るため、騒音寄与係数  $K_R$ ,  $K_T$  をもちこみ、これによって合成荷重の場合の音圧レベルには、スラスト荷重の場合の音圧レベルの影響が大きいことを明らかにした。

これらの結果は今後設計・運転・試験に対して有益な示唆を与えると考える。当社ではすでに、この結果を応用し小形玉軸受に起因する電気機器の騒音を低減・防止するための具体的方策を種々実施している。

（昭和 46-4-8 受付）

## 参考文献

- (1) 曽田：機械学会誌, 59, 454, (昭 32)
- (2) 西村・高橋：精密機械, 28, 4, (昭 37)
- (3) 西村・高橋：精密機械, 30, 6, (昭 39)
- (4) O. Gustafsson : SKF Report, AL 63 L 023, (1963)
- (5) 田中：機械の研究, 9, 6, (昭 32)
- (6) 五十嵐：機械学会論文集, 30, 220, (昭 39)
- (7) 高橋, ほか 1 名：第 34 期機械学会総会講演会前刷, 講演番号 505 号, (昭 34)
- (8) H. Sjövall : Teknisk Tidskrift, Mekanik, 9, (1933) (佐々木, 小林 : Engineering 42, 2, (昭 30))
- (9) たとえば A. E. H. Love : Treatise on the Mathematical Theory of Elasticity, Cambridge U. P., (1934)
- (10) 前出 (6)
- (11) 小林 : 潤滑, 5, 2, (昭 35)
- (12) 五十嵐 : 機械学会論文集, 25, 158, (昭 34)
- (13) 平野・太田・武藤 : 機械学会関西支部講演論文集, 44-10, (昭 44)
- (14) 前出 (5)
- (15) 前出 (5)
- (16) 小林, ほか 2 名 : 機械の研究, 20, 2, (昭 43)
- (17) 伊藤 : マシナリー, 2, 5, (昭 33)

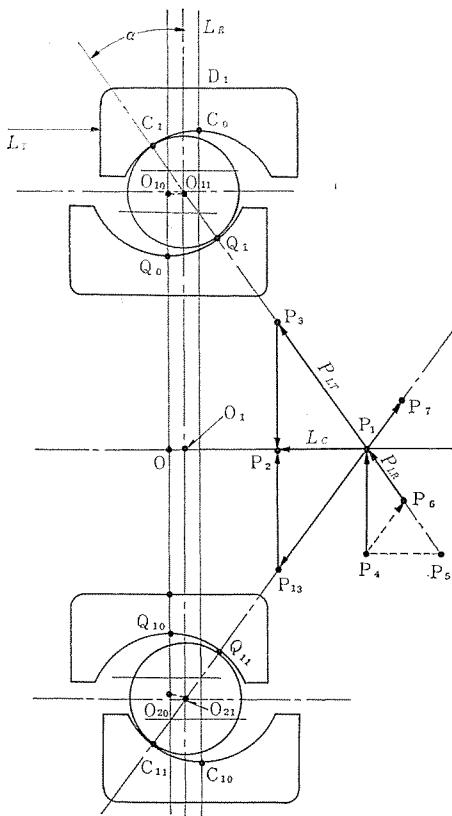
## 録

輪の外周上の 1 点  $D_1$  にラジアル垂直荷重  $L_R$  が働く状態で、内輪  $O$  が紙面に垂直な面内で回転すると、玉はつぎつぎに外輪の荷重点  $D_1$  の直下  $C_0$  を通過することになる。玉の一つがちょうど外輪の直下  $C_0$  に位置した場合を考えると、この接触点  $C_0$  には、軸受中で最

玉軸受の最大接触力  $P$  の誘導

玉軸受に合成功が働けば、負荷領域は  $360^\circ$  に近づくことになり、接触力の大きさは玉が空間的にどこに位置するかによって異なる。

合成荷重が働く場合の軸受の玉の位置を付図 1 に示す。まず外



付図 1 合成荷重を受ける玉軸受  
Ball bearing under combined load.

も大きな接触力が働くことになる。ラジアル垂直荷重のほかにスラスト荷重  $L_T$  が同時に働けば、接触点  $C_0$  が  $C_1$  へ移動して、接触力の大きさは変化するが、その大きさが最大であることに変わりはない。この合成荷重が働いた場合の  $C_1$  あるいは  $Q_1$  点に働く接触力を最大接触力  $P$  とする。この  $P$  とスラスト荷重  $L_T$ 、ラジアル垂直荷重  $L_R$  との関係は、軸受内の力の釣り合いを考慮することによりもとめられる。

付図の  $C_0$ ,  $O_{10}$ ,  $Q_0$ ,  $O$  は無負荷時のそれぞれの外輪と玉の接触点、玉の中心玉と内輪の接触点、内輪の中心を示す。 $C_{10}$ ,  $O_{20}$ ,  $Q_{10}$ ,  $O$  は下部に位置する玉と外輪・内輪との同様の関係を示す。まずスラスト荷重  $L_T$  が働くと、軸受の内部スキマと接触点の弾性変形によって内輪と外輪とは互いに軸方向に反対向きに変位し、玉の中心は  $O_{10}$  から  $O_{11}$  へ移動し、外輪・玉・内輪の各接触点は  $C_1O_{11}Q_1$  線上にくる。 $\angle O_1O_{11}P_1$  は接触角  $\alpha$  である。接触点  $Q_1$  において接触平

面の法線方向に働く力は  $\vec{P}_1\vec{P}_3 (= \vec{P}_{LT})$  であり、この  $\vec{P}_1\vec{P}_3$  をラジアル方向とスラスト方向に分解した力が  $\vec{P}_3\vec{P}_2$  と  $\vec{P}_1\vec{P}_2$  である。 $\vec{P}_1\vec{P}_2$  を  $L_c$  とする。したがって  $P_{LT}$  と  $L_c$  の関係は式(付1)で示される。

$$P_{LT} = L_c / \sin \alpha \quad \dots \dots \dots \text{(付1)}$$

一方スラスト荷重  $L_T$  は、玉の全数に均一に負荷されると仮定するから、 $L_c$  と  $L_T$  の関係は、 $Z$  を玉数とすると、式(付2)で表わせる。

$$L_c = L_T / Z \quad \dots \dots \dots \text{(付2)}$$

(付1)と(付2)の式から、スラスト荷重  $L_T$  だけが働く場合の最大接触力は式(付3)で表わせる。

$$P_{LT} = \frac{L_T}{Z} \cdot \frac{1}{\sin \alpha} \quad \dots \dots \dots \text{(付3)}$$

つぎに、スラスト荷重  $L_T$  が働いているところへ、さらにラジアル垂直荷重  $L_R$  を負荷した場合も考える。スラスト荷重  $L_T$  によって、接触角  $\alpha$  が決まっている状態で、ラジアル垂直荷重  $L_R$  が働き、最上部に位置する玉  $O_{11}$  の接触点  $Q_1$  に  $\vec{P}_4\vec{P}_1$  の力が生じているとする。この力  $\vec{P}_4\vec{P}_1$  を接触面の法線方向  $P_1Q_1$  と  $P_1Q_{11}$  方向に分解して  $\vec{P}_6\vec{P}_1$  と  $\vec{P}_4\vec{P}_6$  とする。このうち  $P_6P_1$  がラジアル垂直荷重  $L_R$  によって最上部の接解点に働く力でこれを  $P_{LR}$  とする。一方ラジアル垂直荷重  $L_R$  によって、接触角  $\alpha$  が変化する量が微少であることが G. Lundberg 等によって明らかにされているから、 $\alpha$  の変化を無視すると、力  $\vec{P}_4\vec{P}_6$  は  $\vec{P}_1\vec{P}_7$  に等しくなる。 $\vec{P}_1\vec{P}_7$  は最下部に位置する玉の接触点に働く力  $\vec{P}_1\vec{P}_{13}$  を減少させる向きに働く。 $\vec{P}_4\vec{P}_1$  とラジアル垂直荷重  $L_R$  との関係は、式(付4)で与えられる。

$$\vec{P}_4\vec{P}_1 = K \cdot L_R / Z \quad \dots \dots \dots \text{(付4)}$$

$K$  は玉の数によって決まる定数であることはすでに本文でのべた。一方  $\vec{P}_4\vec{P}_1$  と  $\vec{P}_6\vec{P}_1$  の関係は、 $\vec{P}_6\vec{P}_1 = P_{LR} = \vec{P}_4\vec{P}_1 / (2 \cdot \cos \alpha)$  で表わせるから、式(付4)を用いてラジアル垂直荷重が働くことによつて、玉の接触点  $Q_1$  または  $C_1$  に加わる接触力は式(付5)で表わせる。

$$P_{LR} = K \cdot L_R / (2 \cdot Z \cdot \cos \alpha) \quad \dots \dots \dots \text{(付5)}$$

$C_1$  または  $Q_1$  に働く最大接触力  $P$  は、スラスト荷重による接触力  $P_{LT}$  とラジアル垂直荷重による接触力  $P_{LR}$  の和となるから、 $P$  は式(付6)となる。

$$P = P_{LT} + P_{LR}$$

$$= L_R \cdot \{\lambda / \sin \alpha + K / (2 \cdot \cos \alpha)\} / Z \quad \dots \dots \dots \text{(付6)}$$

ただし ラジアル垂直荷重だけの場合は  $\alpha=0$  となる。

# 薄壁形冷蔵庫の現場発泡硬質ウレタンフォーム断熱材

祖父江晴秋\*・村山 邦彦\*・市川 健一\*\*・吉田 匠一\*\*・西崎俊一郎\*\*\*

## Foam-in-Place Rigid Polyurethane Foam for Thin-Wall Refrigerators

Consumer Products Research Laboratory

Haruaki SOBUE・Kunihiro MURAYAMA

Shizuoka Works

Kenichi ICHIKAWA・Kyōichi YOSHIDA

Central Research Laboratory

Shunichirō NISHIZAKI

Rigid polyurethane foam using R-11 as foaming agent has thermal conductivity of about one half of that of glass wool. When it is used for the heat insulation of refrigerators, the thickness of cabinet can be reduced to a half of the conventional one, resulting in a sharp increase of the interior volume to bring out a marked feature. Another merit is to have foam-in-place so that the foaming process can be automatized in setting in the heat insulation material, moreover, its large mechanical strength enables the cabinet to be plasticized.

This article describes, in introducing this new material, the formulation of foam systems and test results on foam-in-place technique adapted to refrigerators.

### 1. まえがき

R-11(フロンガス)を発泡(泡)剤とする硬質ウレタンフォームは、熱伝導率がガラスウールの約1/2であるところから、断熱材として、冷蔵庫・フリーザー・ショーケースなどの保冷分野、浴そう(槽)などの保温分野に利用されつつある。冷蔵庫に用いた場合、キャビネットの壁厚が約半分になり、庫内容積を大幅に増大させるので、大きなメリットになる。また、現場発泡が可能であることとこの材料の特長の一つで、そのため冷蔵庫製造時の断熱材組み込みの工程が自動化され、そのうえ外箱・内箱との一体化構造により、キャビネットの機械的強度が増してプラスチック構造化を可能ならしめるようになった。さらに、原料として安価なイソシアネート(Crude TD 1)が利用できるようになり、価格面でも十分実用性がでてきた。

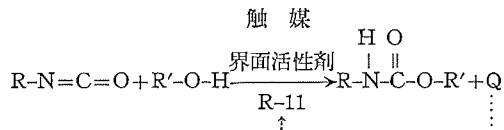
当社では、かねてより本材料の実用化研究を進めていたが、このほど冷蔵庫の量産に適したウレタン発泡原液の処方と現場発泡仕様を確立したので、45年度機種より導入した。これらは、現在薄壁形冷蔵庫として、市場で好評を博している。

ここでは、硬質ウレタンフォームを冷蔵庫の断熱材に適用するにあたり、原液配合と現場発泡技術について実験検討した結果を説明する。

### 2. 硬質ウレタンフォームの製法

#### 2.1 生成反応

硬質ウレタンフォームは、次式の反応により生成する。



すなわち、イソシアネート(R-NCO)とポリオール(R'-OH)が触媒の作用のもとで重合反応(ウレタン結合)を起こして、ポリウレタンを生成する。これは発熱反応であるから、反応系に沸点が23.8°CのR-11を共存させておくと、これが反応熱(Q)を吸収・気化し、生成物があわ

状のものになる。そこで適当な界面活性剤を添加すると、微細な独立気泡からなる高断熱性のフォームができる。この過程は常温・常圧下で進行するので、現場発泡が可能である。

#### 2.2 原料

イソシアネートとしては、NCO含量35~39%のCrude TD 1を用いる。

プレポリマを用いるプレポリマ法に対し、このCrude TD 1を用いる方法をワンショット法という。

もう一つの反応成分であるポリオールには、おもにシーコローズベースの8官能ポリエーテルを使用する。

また、フォームのもうさを防ぐための助剤として、3~5官能のアミン系ポリエーテルも用いられる。OH値は、450~550が適当である。使用ポリエーテルの種類およびOH値により架橋密度が変わるので、フォーム物性にとって、この成分の選択は重要である。

触媒としては、適当な反応速度に調節するために、アミン系触媒にスズ系触媒を併用して、その相乗効果を利用するのが得策である。たとえば、アミン系にはトリエチルジアミン、スズ系にはジブチルスズジラウレートが用いられる。

界面活性剤は、イソシアネート・ポリオール両成分の混合促進、気泡の細分安定化のために添加されるものである。硬質ウレタンフォーム用としては、UCC社製のシリコーン油系L-5320が最も普及している。

発泡剤としてのフロンガスは、他の気体と比較して熱伝導率が低く、断熱材用に適している。とくに、常温附近に沸点のあるR-11が使用される。市販品としてウレタンフォーム用安定剤入りのものがあり、分解に対する安定性の点で良好である。

#### 2.3 発泡原液

当社では、表2.1に示す配合処方を順次冷蔵庫の生産に使用してきた。

これらはいずれも、いわゆるコンベンショナル発泡用の原液である。NCO/OH比は、1.00が化学量論的な標準であるが、硬質フォームの場合、物性向上のために1.05~1.10までイソシアネートを過剰にするのが普通である。

表 2.1 発泡う原液の配合処方  
Typical formulations of foam systems.

(単位 : 質量%)

成 分	No. 1	No. 2	No. 3
Crude TD 1	40	40	40
主ポリオール (A)	35	—	—
主ポリオール (B)	—	35	—
主ポリオール (C)	—	—	35
調 ポ リ オ ー ル	3	3	3
触 媒	1	1	1
界 面 活 性 剤	1	1	1
発 泡 う 剤 (R-11)	20	20	20
NCO/OH 比	1.10	1.05	1.05

実用的な発泡う原液としては、ポリオール・触媒・界面活性剤および発泡う剤をあらかじめ混合しておいたプレミックス液とイソシアネート液の2液にまとめたものが用いられる。以下イソシアネート液をP液、プレミックス液をR液と称する。R液には、原液成分の変質の問題がある。R-11の分解とその生成物によるアミン系触媒の劣化、ポリオール中の水分によるスズ系触媒の加水分解、シリコーン油系界面活性剤の分解または分離などの化学的・物理的変化が考えられる。また、P液のほうでも、空気に触れるとその水分により尿素結合の反応が起こって、固体物を生じる。したがって、原液の保存期間は制限されることになり、通常約1カ月とされている。

#### 2.4 発泡う操作

試験発泡うに適用しているフリー発泡うおよびパネル発泡うを例にとって、発泡う操作の手順と条件を説明する。

- (1) 原液 (P液, R液) の温度を20°Cに調整する。
- (2) 所定の配合比にしたがって、P液・R液をひょう(秤)量する。
- (3) 2液をかくはん・混合する。
- (4) 混合した原液をすばやくフリー発泡う容器または予熱(プレヒート)したパネル発泡う容器に注入し、発泡うさせる。
- (5) 発泡うが終わったら、ただちに加熱硬化処理(アフターキュア)して、フォームを仕上げる。

フリー発泡う容器は、タテ200mm・ヨコ200mm・深サ200mmのふたのない木製の箱である。このなかで自由に発泡うしたフォームをフリーフォームといふ。これに対して、パネル発泡う容器は、アルミ板と木製のスペーサーを組み立てた形で、タテ400mm・ヨコ400mm・厚サ25~35mmのいわゆるパネルフォームを作成するためのものである。この場合、発泡う時の壁面抵抗があり、しかも壁面からの反応熱の逸散が大きいので、フリーフォームより密度の高い異なったフォームが得られる。この方法は、実際の冷蔵庫における発泡うに近いものになっている。パネル発泡う容器のプレヒート温度としては、40~60°Cが適当である。アフターキュアの条件は、温度60~70°C、時間10~15分としている。

図2.1は、パネル発泡うの状況を示したものである。写真に付記した時間は、原液注入直後からのものを示している。ウレタンの重合反応とR-11の気化膨張が同時に起こっているので、50秒経過するとゲル化が進んで側壁にかなりの圧力がかかるようになる。このとき原液からの発泡う率は30~40倍に達している。

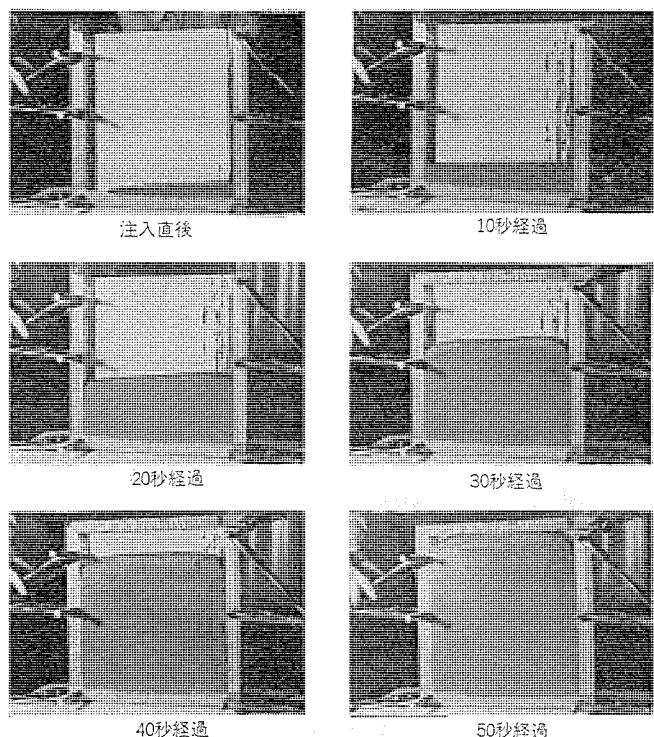


図 2.1 パネル発泡う状況  
Foaming phenomena in panel blowing.

### 3. 硬質ウレタンフォームの評価試験法

#### 3.1 発泡う特性の測定

フリー発泡うによって、原液のクリームタイム(CT)・タックフリータイム(TFT)およびフォームタイム(FT)を測定する。CTとは、原液をかくはん・混合したのち、反応を開始してクリーム状態になるまでの時間、TFTとは、フォームのゲル化が進んで、表面の粘着性がなくなるまでの時間、FTとは、ウレタンの重合反応がさらに進行して、生成物が硬化し、フォームの膨張が終了するまでの時間をいう。これらの値は、冷蔵庫の場合、現場発泡う仕様を決める基になるので、非常に重要である。すなわち、CTは、原液が液状を保っている時間になるので、この長短で液もれを防ぐシールの仕方が異なってくる。また、正常な発泡うを行なわせるためには、この時間以内に原液の注入を終了する必要があるので、CTを短くすると大容量の発泡う機を用意しなければならなくなる。FTは、原液の発泡うがアフターキュアを残して一応完了する時間であるから、これは冷蔵庫の生産性に関係する。TFTは、FTとの関連によって評価されるべきもので、FTより短すぎると、液の流动性が下がったまま無理に発泡うすることになるので、発泡う圧が増大する。

#### 3.2 物性測定試料の採取

##### (1) フリーフォーム

アフターキュアも含めて発泡うの完了したフリーフォームを、さらに12時間以上室温に放置したのち、物性の測定に供する。室温放置は、フォームの状態調節として行なうものである。ここで試験する項目と測定試料の寸法は、つぎのとおりである。a) 外観(フリー発泡うのまま), b) カサ比重(150×150×150 mm), c) 圧縮強度(50×50×50 mm): 平行方向および垂直方向, d) 独立気泡率(20×20×100 mm), e) 気泡径(单セル層からなる薄片)。なお、圧縮強度の平行方向とは、発泡うと平行な方向から加圧変形させたときフォームが10%ひずむ応力を指す。垂直方向とは、これと直角の方

向における値である。

#### (2) パネルフォーム

状態調節後、各物性測定試料を採取する。試験項目と試料の寸法は、つぎのとおりである。a) 外観(パネル発泡のまま), b) 密度( $350 \times 350 \times 25 \sim 35$  mm), c) 圧縮強度( $50 \times 50 \times 25 \sim 35$  mm) : 垂直方向, d) 曲げ強度( $150 \times 75 \times 25 \sim 35$  mm) : 平行方向および垂直方向, e) 寸法安定性( $100 \times 100 \times 25 \sim 35$  mm) : 耐寒試験・耐熱試験・一次収縮, f) 热伝導率( $300 \times 300 \times 25 \sim 35$  mm)。ここで、平行方向の曲げ強度は、破断面が発泡方向と平行になるように曲げたときの破断強さをいう。垂直方向はこれと直角な方向である。

### 3.3 フォーム物性の測定

#### (1) 外観

原液配合处方の予備的な検討や現場での品質管理などに、簡便な方法として、この外観検査が多く採用される。フリーフォーム上部の盛り上がった部分から細片を切り出し、それをよく観察する。気泡が粗大であれば、界面活性剤の不足・麥芽またはかくはん不良が考えられる。また、フォームがもろくて、こすったとき粉末状になるようであれば、P液過剰、逆に柔軟性があれば、R液の過剰というように配合比率のずれもある程度判別できる。パネルフォームの場合は、表面スキン層に生じたボイドをおもに調査して、フォームの均一性を判定する。

#### (2) カサ比重または密度

寸法安定性・機械強度などの物性さえ許せば、コスト上、フォームの密度は低いほどよい。最近、フリーフォームのカサ比重が $0.025 \text{ g/cm}^3$ 以下のものが実用になっている。しかし、パネルフォームでは、表面のいわゆるスキン層の密度(スキン密度)が高いので、これまで $0.030 \text{ g/cm}^3$ 以下にすることは困難であった。この場合、コア(心)層の密度(コア密度)はフリーフォームとほぼ同じであるから、発泡特性の改良によりスキン層を薄くしてパネルフォーム密度を下げられる可能性がある。

#### (3) 圧縮強度

フォームを構成するセルは発泡方向に長い円形をしているので、平行方向の強度が垂直方向に比べて大きくなる。また、平行方向には、数%ひずみの所に降伏点が現われるという特長もある。パネルフォームの場合スキン層があるので、平行方向の測定は意味がない。実用的には垂直方向の強度が問題になり、一般に $0.5 \text{ kg/cm}^2$ 以上あれば十分とされている。

#### (4) 曲げ強度

セルの形状がだ円をしているため、平行方向の強度は小さいが、 $1.0 \text{ kg/cm}^2$ 以上あれば実用上問題はない。

#### (5) 寸法安定性

耐寒試験・耐熱試験の条件はつぎのとおりである。

耐寒試験:  $-30^\circ\text{C}$ , 48時間

耐熱試験:  $70^\circ\text{C}$ , 48時間

パネルフォーム試料の厚さの変化率を求める。冷蔵庫の場合、フリーザ部分が約 $-25^\circ\text{C}$ 、庫内温調用ヒータ部分がから焼きの場合 $60^\circ\text{C}$ 近くになるので、この試験条件はやや過酷なものになっている。これらの収縮率が2~3%以下あれば十分使える。

一次収縮特性は、とくにアフターキュア直後から $0^\circ\text{C}$ で12時間以上放置したときの寸法変化率をいう。この試験は、冬季アフターキュアのすんだ冷蔵庫がただちに冷気に触れる想定して行なうもので

ある。耐寒性・耐熱性試験より著しい収縮が起こるので、現状ではこれがフォームの低密度化に限界をもたらしている。

#### (6) 热伝導率

高温側と低温側の平均温度で求められた値を次式により $0^\circ\text{C}$ における値( $\lambda_0$ )に換算した。

$$\lambda_0 = \lambda_T - 0.00012T$$

ここで  $\lambda_0$ :  $0^\circ\text{C}$  における熱伝導率(kcal/m·h·deg)

$\lambda_T$ : 実測値(kcal/m·h·deg)

T: 平均温度( $^\circ\text{C}$ )

#### (7) 独立気泡率および気泡径

独立気泡率の測定はデュポン式の測定器を用いて行なう。また気泡径は単セル層からなる薄片を顕微鏡観察して求められる。

## 4. 硬質ウレタンフォームの発泡特性

### 4.1 各種原液の発泡特性

表2.1に示した3種類の原液の発泡特性は、図4.1のとおりである。これらの発泡率一時間曲線よりCT, TFT, FTを求めた結果が図に付記されている。図から明らかなようにNo.2およびNo.3の原液はNo.1に比べて発泡速度がかなり大きくなっている。CTが短縮された結果、冷蔵庫前面フランジ部からの液もれを簡単なシール方法で完全に防止することができるようになった。また、FTが約半分になったので、その分だけ生産性が向上している。発泡速度が大きくなるとフォームの充てん(填)性に多少問題が出てくる可能性があるが、No.2およびNo.3はTFTとFTの差が少ないので、発泡圧および密度の分布に関してはNo.1よりむしろ改良されている。

#### 4.2 原液の経時安定性

No.2の原液について発泡特性の経時変化を試験した結果を表4.1に示す。これは、原液を $20^\circ\text{C}$ および $50^\circ\text{C}$ で30日間密せん(栓)保存したときのものである。 $50^\circ\text{C}$ では30日後に発泡速度の減少が認められるが、 $20^\circ\text{C}$ のときは変化がなさそうである。この

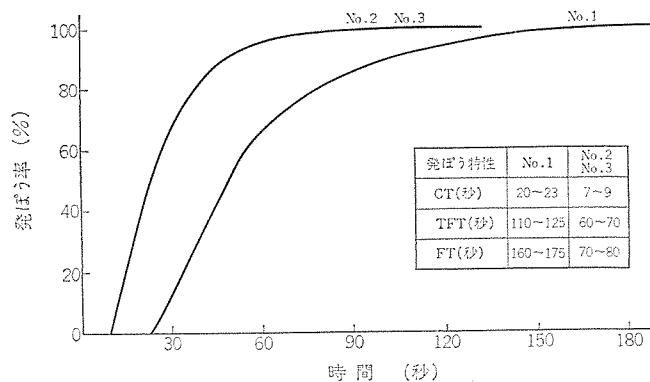


図4.1 発泡特性  
Foaming characteristics.

表4.1 発泡特性の経時変化(No. 2原液)  
Changes in foaming characteristics with aging.

発泡特性	製造直後	3日後		7日後		15日後		30日後	
		$20^\circ\text{C}$	$50^\circ\text{C}$	$20^\circ\text{C}$	$50^\circ\text{C}$	$20^\circ\text{C}$	$50^\circ\text{C}$	$20^\circ\text{C}$	$50^\circ\text{C}$
CT(秒)	8	8	8	8	9	8	8	8	10
TFT(秒)	65	64	64	66	70	70	67	65	75
FT(秒)	75	70	70	70	75	75	75	75	90

発泡特性の変化は、触媒の劣化によるものと考えられる。原液の保存温度としては、20°C が適当である。

## 5. 硬質ウレタンフォームの物性

### 5.1 密度によるパネルフォーム物性の変化

パネルフォームの密度による一次収縮特性・耐寒寸法安定性・耐熱寸法安定性・熱伝導率・圧縮強度および曲げ強度の変化を測定した結果を図 5.1~5.6 に示す。

一次収縮特性は、フォーム低密度化の限界を決める重要な項目なので、3種類の原液について比較検討している。実測値にかなりのバラツキがあるが、密度の低下にともなって一次収縮率が大きくなる傾向があり、No. 1, No. 2, No. 3 の順に特性が向上していることは明らかである。図から一次収縮率 5% のときの密度を求めると、No. 1 0.030~0.031 g/cm³, No. 2 0.028~0.029 g/cm³, No. 3 0.024 g/cm³ 以下になる。後述するように、実際の冷蔵庫における発泡では 3~5% のオーバーパックをするので、上部を開放したパネル発泡において、5% ぐらいの一次収縮があっても十分実用にできる。フォームの一次収縮特性はセルを形成するウレタン樹脂の架橋密度によって左右されるが、原液の発泡特性にも影響されることがわかっている。

二次収縮特性ともいえる耐寒 (-30°C), 耐熱 (70°C) 寸法安定性は非常によい。一次収縮特性によって規制される密度範囲では、No. 2, No. 3 とともに寸法変化率 1% 以内である。

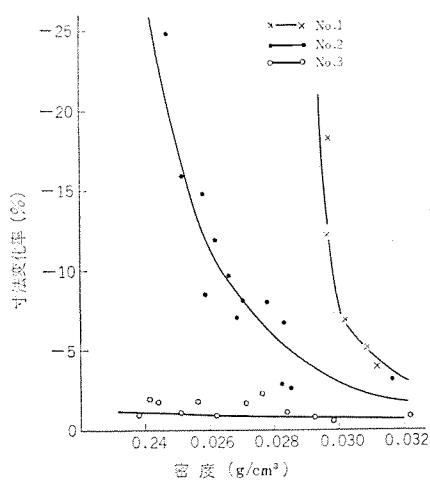


図 5.1 密度による寸法安定性の変化—一次収縮特性  
Effect of foam density on dimensional stability—primary shrinkage.

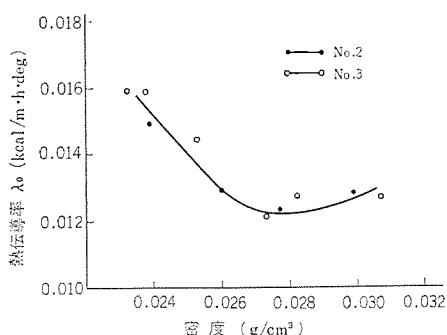


図 5.4 密度による熱伝導率の変化  
Effect of foam density on thermal conductivity.

熱伝導率の密度依存性は、これまでフォームの密度が 0.033~0.035 g/cm³ のとき最小になることが認められていたが、本結果では 0.027~0.028 g/cm³ のところに最小値がありそうである。No. 2, No. 3 には、とくに差が認められなかった。このように熱伝導率が最小になる密度が低くなった原因は、原液の改良によりフォームの独立気泡率が上がったためと考えられる。ここで得られた熱伝導率の値を他の断熱材と比較すると、たとえばガラスウールの場合 0.033 kcal/m·h·deg, 発泡スチロールの場合 0.032 kcal/m·h·deg であるから、約 1/2.5 になる。なお No. 3 の密度としては、図から明らかなように、あまり低密度にすると断熱性能が低下してかえってコスト高を招くので、0.025~0.026 g/cm³ が最適であろう。

ガラスウールに比し、機械強度が大きいものこの材料の特長で、冷蔵庫では内箱との一体構造化によりキャビネットの強度が著しく増大する。No. 3 の強度が No. 2 より小さいのは、このフォームにフライアビリティがあるためであろう。しかし実用的には 0.025~0.026 g/cm³ の密度で圧縮強度 0.5~0.6 kg/cm², 曲げ強度 (平行方向) 1.1~1.2 kg/cm³ になっているので問題はない。

### 5.2 一時収縮特性

フォームの一次収縮特性については、とくに詳細な検討を行なった。図 5.7 は、アフターキュア直後からの一次収縮率経時変化をパネルフォームの各点について求めたものである。④は、原液の注入口近辺のためとくに収縮率が大きい。現場発泡の冷蔵庫でも、これに対応した収縮をしている。経時変化は、ほぼ 12 時間で止まった。したが

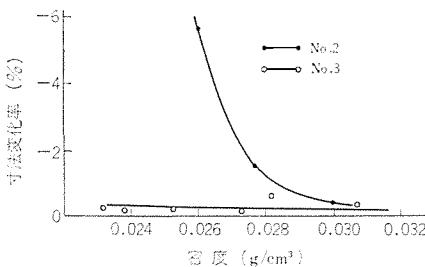


図 5.2 密度による寸法安定性の変化—耐寒性 (-30°C)  
Effect of foam density on dimensional stability at -30°C.

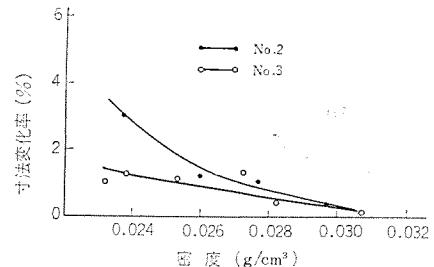


図 5.3 密度による寸法安定性の変化—耐熱性 (70°C)  
Effect of foam density on dimensional stability at 70°C.

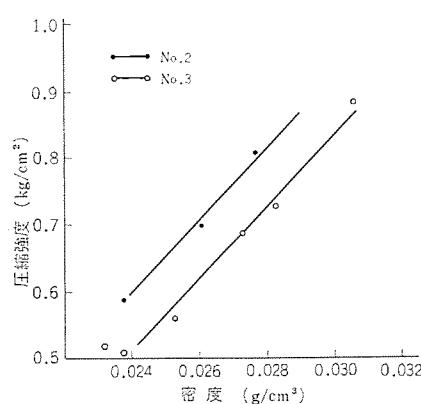


図 5.5 密度による圧縮強度の変化  
Effect of foam density on compression strength.

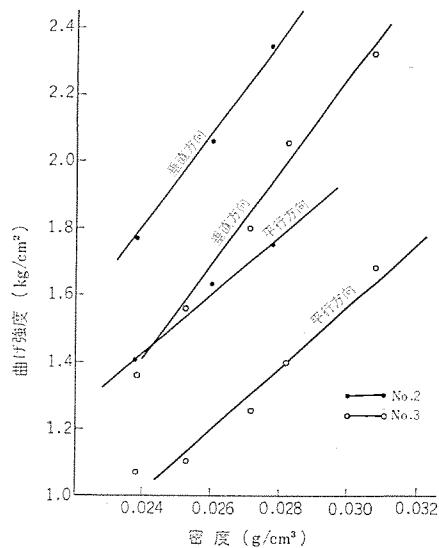


図 5.6 密度による曲げ強度の変化  
Effect of foam density on flexural strength.

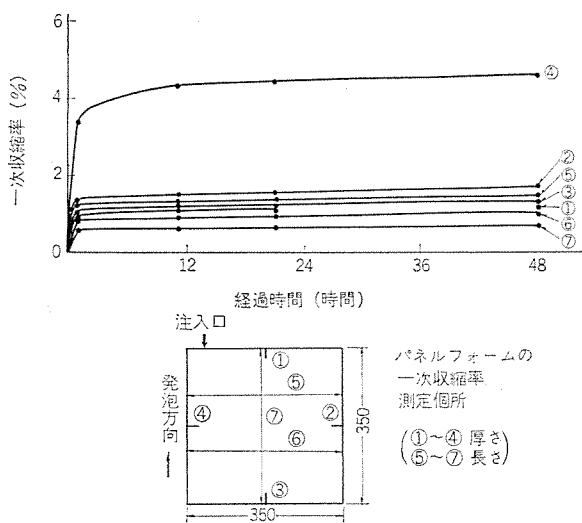


図 5.7 一次収縮率の経時変化  
Changes in primary shrinkage with aging.

表 5.1 オーバーパックフォームの一次収縮特性 (No. 2 原液)  
Primary shrinkage of overpacked foam.

オーバーパック率 %	0	3	6	10
一次収縮率 %	5.3	0.9	0.8	0.8
減量 g	2~3	0~1	0~1	0~1

表 5.2 フリーフォームの物性  
Physical properties of free-blown foam.

試験項目	No. 1	No. 2
カサ比重 g/cm <sup>3</sup>	0.021~0.022	0.019~0.020
圧縮強度 kg/cm <sup>2</sup>	平行方向	1.4~1.5
	垂直方向	0.7~0.8
独立気ほう率 %	89 以上	85 以上
気ほう径 mm	0.5 以下	0.7 以下

って、12時間以上の放置で一次収縮特性の評価が可能である。なお、放置温度を10°Cにすると、0°Cにおける収縮率の約1/2になった。

表5.1は、パネル発ぼう容器へオーバーパック（過剰注入）したときの一次収縮特性を示している。オーバーパックの効果は顕著で、3%のオーバーパックで一次収縮率を約1/5にすることがわかる。パック率を増して3%以上にしても、とくに効果を認めなかった。また、収縮とともにフォームが減量することも明らかである。これは独立気ほうからの収縮によるR-11の逸散によるものと考えられる。

### 5.3 フリーフォームの物性

No. 2およびNo. 3の原液についてフリーフォームの物性を測定した結果を表5.2にまとめた。パネルフォーム試験の結果、No. 2は0.028~0.029 g/cm<sup>3</sup>、No. 3は0.025~0.026 g/cm<sup>3</sup>の密度で使用できることがわかったので、その配合処方（具体的にはR-11含量）で実験を行なった。フリーフォームのカサ比重はパネルフォームそれに比し、かなり低い値になる。この差は、パネルフォームにおける高密度なスキン層によるものである。すなわち、パネル発ぼうの場合、壁面に付着したあわが繰返し破壊されて、フォームの表面に樹脂皮膜を生成するので、平均密度としては相当高くなる。圧縮強度の方向性は、表5.2のとおり、平行方向が垂直方向の約2倍であった。独立気ほう

率は、試料の表面積の影響を受けて実際より小さな値になるが、ここでは90%弱の結果が得られている。気ほう径はだ円形の長径で約0.5 mmであった。このような独立気ほう体であるため、硬質ウレタンフォームは、すでに述べた高断熱性能を發揮する。また、気体透過率の低い強固なセルからなっているので、その経年変化も少ない。水分を含みやすいガラスウールと比較したとき、この材料のすぐれた性質が明らかである。

## 6. 冷蔵庫における現場発ぼう技術

### 6.1 一体発ぼう方式の特長

冷蔵庫の外箱と内箱を組み合せたキャビネットの断熱壁内に直接発ぼう原液を注入することによって硬質ウレタンフォームを充てんし、断熱容器を構成する方式を一体発ぼうという。それに対して、あらかじめ適当な治具を用いてキャビネットの形状をしたフォームを作成し、このものに内箱または外箱をはめこむ分離発ぼうと称されている方式もある。硬質ウレタンフォームを冷蔵庫の断熱材に応用する方法としては、そのほかウレタンフォームボードを利用し、ガラスウールと同様に裝てんすることも行なわれている。表6.1は、これら三つの方法の得失を比較したものである。

### 6.2 現場発ぼうに必要な生産設備

#### (1) 発ぼう機

70~90 Lの断熱層容積を有する冷蔵庫の現場発ぼうでは、一度に2~3 kgの原液を必要とするので、その温調・計量・混合・かくはんおよび注入には専用の装置を用いる。この装置の機構例を図6.1に示す。これは、マシンタンクに保存されている原液(P液・R液)を、

表 6.1 冷蔵庫における発ぼう方式の得失  
Comparison of methods of filling polyurethane foam in refrigerators.

発ぼう方式	利点	欠点
一体発ぼう	(i) 外箱・内箱間にフォームを完全に充てんすることができる。したがって壁厚を薄くすることができます。 (ii) 外箱・フォーム・内箱が一体構造になるので、硬質フォームの硬度をキャビネットに活用できる。 (iii) 断熱材装てんの自動化・省力化ができる。	(i) 充てん不良の発見困難、手直し作業は不可能に近い。 (ii) ポリスチロール製の内箱は劣化してクラックを生じことがある。 (iii) あわもれを防止するためのシール作業がはん雑である。
分離発ぼう	(i) キャビネット完成前にフォームの充てん状況を検査することができる。 (ii) 内部の電気配線が容易で補修することもできる。 (iii) 内箱分離発ぼうの場合には内箱劣化の問題がない。	(i) 内箱または外箱のはめこみ作業の都合で断熱壁に空気層ができるので十分薄壁にならない。 (ii) 内箱入れの作業が困難である。 (iii) 吸湿による断熱性能の低下が無視できない。
フォームボードの使用	(i) シールの必要がなく、ガラスウールの場合と同じラインが使える。	(i) フォームのロスが多いのでコスト高になる。 (ii) ガラスウールの併用を必要とし、あまり薄壁にならない。 (iii) フォームの機械的強度をさせない。

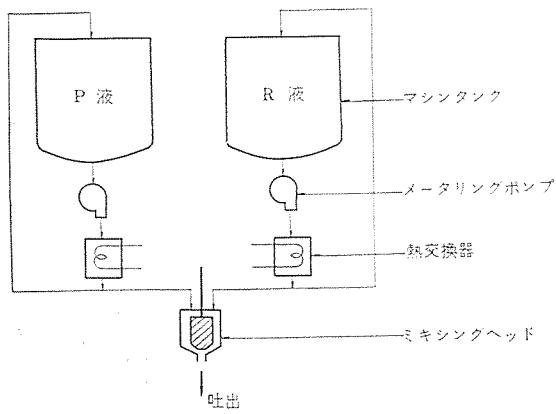


図 6.1 発泡機の作動原理  
Operating principle of foaming machine.

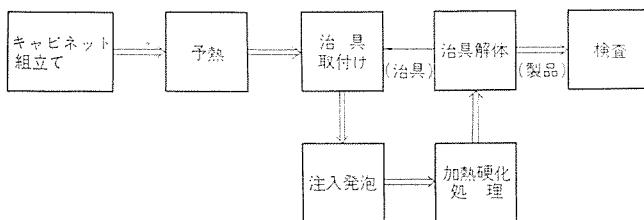


図 6.2 冷蔵庫の現場発泡工程  
Foaming-in-place process in refrigerators.

當時は温調サイクルをさせ、吐出の際は切換弁を作動させて、メータリングポンプにより所定の配合比になるよう計量し、ミキシングヘッドで混合・かくはんして吐出するようになっている。発泡機の性能としては、a) 一定の吐出量、b) 一定の原液温度、c) 一定の混合比、d) 十分な混合かくはん、e) 完全な洗浄、f) 簡単な操作と保守が要求される。

### (2) 発泡治具

ウレタンフォームの発泡圧によるキャビネットの変形を防止するための治具も冷蔵庫現場発泡における主要な設備の一つである。キャビネットに原液を注入してから60秒くらい経過すると、発泡中のフォームのゲル化が進んで、側壁に  $0.2 \text{ kg/cm}^2$  近い圧力がかかる。フォームの充てんを確実にするためにオーバーパック率を増すと、この圧力はさらに大きくなる。したがって、キャビネットにフォームを充てんする際には、内箱・外箱を適当な治具で保持する必要がある。とくに、加熱時のプラスチック内箱は機械的に弱いので、内側治具にはたな受け部などの複雑な形状によく合ったものを用いなければならない。

### (3) 付属設備

キャビネットの予熱や発泡完了後加熱硬化処理を施すための炉、製品の搬送手段としてのコンベアが現場発泡に欠かせない設備としてあげられる。

図 6.2 は、冷蔵庫の現場発泡工程を示したものである。このブロックダイヤグラムを順に説明すると、まず塗装仕上げされた鋼板外箱にプラスチックの真空成形品である内箱をはめこみ、ここで組み立てられたキャビネットをコンベアラインに乗せてプレヒート炉を通して所定の温度に予熱する。つぎにこのキャビネットを治具に組み込んで、再びコンベアにより発泡機の所にまで運ぶ。ただちに原液を注入して発泡させる。フォームの充てんが終わったらそのままの状態で  $60\sim70^\circ\text{C}$  に保たれたアフターキュア炉を通して硬化処理したのち、治具からキャビネットを取出す。からになつたじ具は元のステーションに戻って繰り返し使用されることになる。

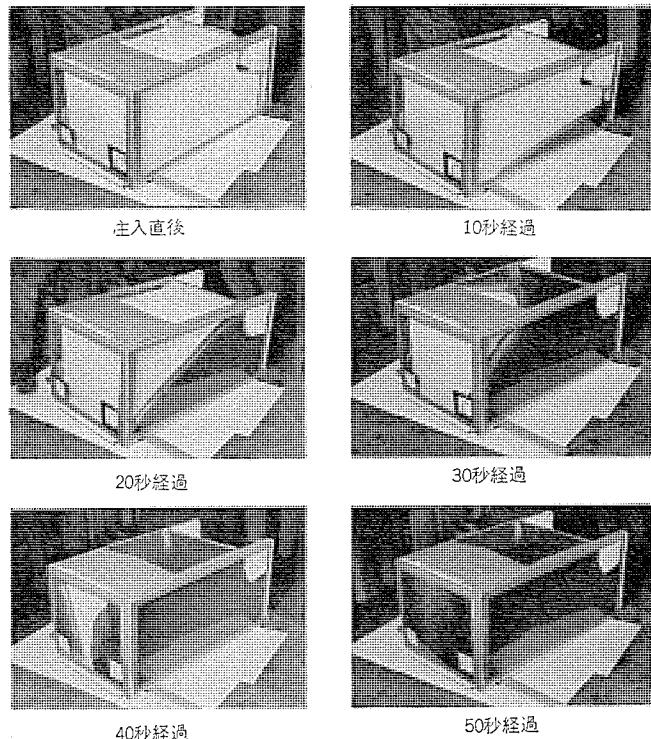


図 6.3 冷蔵庫における発泡充てん状況  
Foaming phenomena in refrigerators.

## 6.3 注入発泡方法

### (1) 当社仕様

原液を注入し発泡させる際のキャビネットの向きは、フォーム充てんの難易、治具の取付け・解体の作業性から考えて、フランジ面が下になるようにするのがよい。しかしこの場合注入された原液が内箱と外箱を圧着しているだけのフランジ面にたまるので、この部分からの液もれが問題になる。そこで、ここに適当なシール材をつめて液もれを防止することにした。そのほか、内箱の部品取付孔のシールには接着テープを用いている。原液注入口の位置は、冷蔵庫の背面上部両端である。2個所から注入するようにしたのは、両側壁におけるフォームの立上がりを均一にするためである。空気抜きの穴は、フォームの充てん終了する天井面後部に設けられている。したがって、ボイド有無のチェックは、この中央部分で行なえばよい。原液の注入量は、フォーム完全充てんの信頼性を高めるために、3~5%過剰にするのが普通である。

### (2) 冷蔵庫試作発泡実験

図 6.3 は、当社仕様にしたがってキャビネットに原液を注入し、発泡させてフォームを充てんしていく状況を示したものである。これら一連の写真により、未充てん部ができる可能性は全くないことが明らかである。

### (3) 内箱クラック対策

内箱にプラスチックを使う場合、その材質によっては硬質ウレタンフォームが密着したとき、化学的または機械的原因でクラックの発生することがある。すなわち、フォームが一次収縮した場合、飛散したR-11の一部が内箱に達して、いわゆるソルベントクレイジングの現象が起こる。また、内箱に衝撃が加わった場合には、まずウレタンフォームのスキン層にクラックが発生し、ついでノッチエフェクトにより内箱のほうへ伝ば(播)していくとされている。したがって、内箱のクラック対策としては、当然R-11のしゃへい効果があり、しかもストレスの集中を緩和できるフィルムの被覆が考えられる。そこで、ポリエチレンフィルム

のほか各種のラテックス塗装を検討した。ポリエチレンフィルムを袋状にして内箱全体にかぶせる方法は、最も簡単でクラックの防止効果も大きいが、製品になった場合、内箱がべこつく欠点があるのに対して、ラテックス塗装は、作業性に問題があるが、内箱とフォームのコンポジットストラクチャが得られて、内箱の強度が増大する利点のあることがわかった。ラテックス塗装による内箱のクラック発生防止は材料および塗装法の選択により可能である。

## 7. む す び

図7.1は、当社の薄壁形冷蔵庫MRA-185FBの完成品を示したものである。

冷蔵庫の断熱材に現場発泡する硬質ウレタンフォームを採用したことにより、製品性能および製造工程上につぎのようなメリットが生まれた。

- (1) 薄壁になったので、庫内容積が大幅に増加した。
- (2) 断熱性能の経年変化に対する信頼性を増した。
- (3) キャビネットとフォームの一体化により、剛性強度が増大した。
- (4) キャビネットとフォームの一体化により、大型冷蔵庫のプラスチックキャビネット化が可能になった。

現在、品質管理面の充実とともに、この種冷蔵庫の生産を急ピッチで進めている。

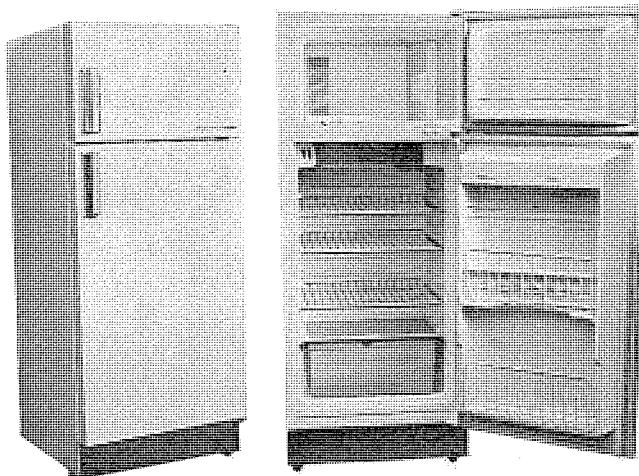


図7.1 薄壁形オールプラスチック冷蔵庫(MRA-185 FB)  
Thin-wall refrigerator (MRA-185 FB).

## 参 考 文 献

- (1) フェリーノ(遠藤訳)：硬質プラスチックフォーム(昭42)朝倉書店
- (2) J. M. Buist : J. Cellular Plastics, 1, No. 1, 101 (1965)

# 減圧気中における TIG 溶接アークの金属加工への応用

山本 利雄\*・島田 弥\*\*

## Application of TIG Welding Arc for Metal Working at Reduced Gas Pressure

Manufacturing Development Laboratory

Toshio YAMAMOTO・Wataru SHIMADA

TIG arc welding in gas tight chamber filled with special gas such as argon and helium is often used as one of the welding methods of refractory or active metals. It has been found that beneath the cathode appears a spherical luminosity brighter than the outer arc column and with different color when the gas pressure is reduced. This sphere (called a cathode zone hereafter) is found to have a high energy density, the energy based on that of the cathode. When the cathode zone is constricted by axial gas stream, the energy density becomes much higher. At the same time the momentum of the stream becomes remarkably strong at reduced gas pressure. As a result it has been made known that the cathode zone thus constricted is applicable to special metal working.

### 1. まえがき

高融点金属あるいは化学的に活性な金属材料を溶接する方法の一つとして、不活性ガスなどの特殊気体を封入した容器内で溶接を行う、いわゆる“可変ふんい気溶接法”があり、通常大気圧ふんい気中で溶接が行なわれているが、本報告の中で述べるようにふんい気圧力を減少させると、陰極直下に外周アーカ柱より輝度が高い球状の発光体が見られるようになり、しかもこの発光体のエネルギー密度が外周アーカ柱より著しく高いことが明らかになった。

このような発光体については従来まったく報告されておらず、その特性についても未知な点が多くて、主として加工応用面からその熱源としての特性を検討した。その結果、この発光体のエネルギーは陰極エネルギーとして与えられており、熱源として従来のアーカとは異なる特異な挙動を示すことが明らかになった。そこでこの発光体を熱源として、表面肉盛り・溶接・ろう付けなどの各種金属加工法への応用について検討を加え、実用上興味ある結果を得た。

またアーカの軸方向に気流を流して発光体を強制的に冷却することにより、その形状を任意に制御し、エネルギー密度を高めうることがわかったので、その特性変化についても詳細に検討した。その結果、軸気流によって陰極域のエネルギー密度が高くなるのみならず、軸気流のモーメンタム自体も著しく大きくなることが明らかになり、金属材料のガウジング・溶断・せん孔およびキーホール溶接などの加工に対し、従来のアーカはみられない特長ある効力を發揮することがわかった。本報告では、以上に述べた陰極域の特性とそれによる各種金属加工法の特長について詳細に報告する。

### 2. 実験装置および実験方法

実験に用いた装置の概略図を図 2.1 に示す。観察窓を設けた内容積 500 l のステンレス鋼製真空容器の中に水冷溶接トーチと水冷銅陽極板とを配置している。溶接トーチのタンクステン電極（以下 W 電極と略称する）としては、通常の TIG 溶接の条件を標準にして直径 4 mm の 2% Th-W 電極の先端を約 25° の鉛筆状にとがらせたものを用いた。溶接トーチはモータ駆動により上下に移動できるようになっている。水冷銅陽極板は裏面を 4.0 l/min の流水で冷却されてお

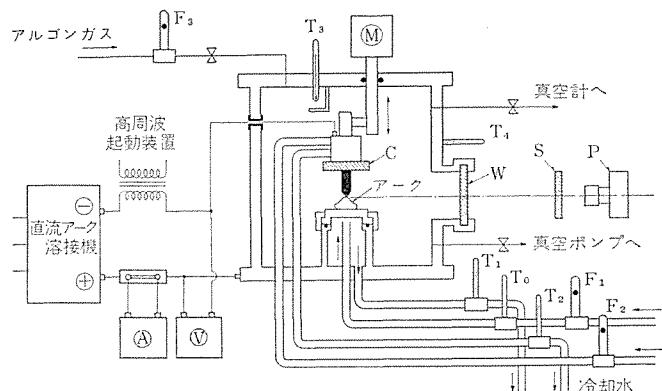


図 2.1 実験装置概略図  
Schematic diagram of the apparatus.

り、冷却水の流量および温度上昇を測定することにより陽極吸収熱量を測定できるようになっている。水冷銅陽極板あるいは金属陽極試片は走行台車上に乗せて容器内を水平に走行させることができるようとした。溶接電源としては定格電流 500 A の三相全波整流自己飽和形直流アーカ溶接機（垂下特性）を使用した。溶接機の二次回路に直列に高周波アーカ起動装置を接続した。

実験方法としては、まず真空容器を  $2 \times 10^{-4}$  mmHg 程度まで排気した後、99.99% の溶接用アルゴンガスを所定の圧力まで封入し、高周波起動により直流正極性のアーカを発生させた。第 3 章では、低圧静止ふんい気中において W 電極と水冷銅陽極板の間に発生させたアーカの電圧特性および陰・陽極の吸収熱量を測定し、また水冷銅板上に設置した金属陽極試片の溶け込み形状を求めるこことにより、陰極域の特性を明らかにした。第 4 章では溶接トーチの W 電極の外側にノズルを設けて軸気流を流し、陰極域を拘束した場合のアーカの電圧特性および各部の吸収熱量の変化を測定した。この場合軸気流のモーメンタムが母板に及ぼす圧力を評価するため、ノズル内圧力とアーカ直下の陽極板上の圧力を同時に測定した。また、第 5 章では軸気流で拘束された陰極域の熱量および軸気流のモーメンタムを金属陽極試片に作用させて、ガウジング・溶断・せん孔および溶接などの加工実験を行なった。

### 3. 低圧アークにおける陰極域の挙動とその応用

#### 3.1 低圧アークにおける陰極域の形態

陰極直下の球状発光体に注目して、溶接用緑色をフィルタ通して撮影したアーク外観写真を図3.1に示す。写真より明らかかなように760 mmHgのアルゴン気中では、アーク柱中央部の輝度が著しく高くなっている。それが陽極板のほうまで伸びているが、このような圧力条件では、アーク柱の輝度が高いため、および球状発光体自体の大きさが小さいため、発光体はきわめて判別しにくい。ふんい気圧力の低下に伴いアーク柱は輝度を減じながら半径方向および上方に広がるようになり、陰極直下に濃空色の球状発光部（以下これを“陰極域”（Cathode Zone）と称することにする）が明確に判別できるようになる。圧力の低下に伴い外周アーク柱が膨張して著しく輝度が低くなるので陰極域はきわめて明確に判別されるようになるが、その直径は120 mmHg程度のふんい気圧力では約4 mm, 32 mmHgでは約10 mmになり、圧力の低下とともに次第に大きくなる。このような陰極域は、陰極としてW, Ta, Mo, Nbなどの高融点金属を用いた場合にのみ存在し、その直径が陰極材料の融点が高いほど大きいことから、熱電子放出に関連した現象であると考えられる。

陰極域および外周アーク柱の状態を調べるために、低圧アークの分光分析を行なった結果の一例を図3.2および図3.3に示すが、この結果から陰極域はA II, 外周アーク柱はA I状態にあることがわかる。図3.3は図中(a), (b)の位置における5,141 ÅのA II線および5,558 ÅのA I線のスペクトル線の強度分布をミクロフォトグラフで測定した結果であるが、A II線の強度分布が陰極域の境界付近で著しく立上った形になっているのが注目される。なお分光分析の結果から、大気圧アルゴンTIGアークにおいても陰極直下に陰極域が存在することを確認した。

#### 3.2 低圧アークの電圧特性と陰・陽極の吸収熱量

3.1節で述べたふんい気圧力の低下に伴うアーク外観の変化、とくに陰極域の形態の変化に対応して、アーク電圧特性および陰・陽極吸収熱量は特長的な変化を呈すると考えられる。

図3.4はふんい気圧力Pを変化させた場合の各電極間距離Lにおけるアーク電圧Vを測定した結果を示す。図中でL=0 mmの場合のアーク電圧は、Lの変化に対するVの変化をオシログラフに記録して、短絡直前の値を求めたものである。図の傾向はつぎのように解釈される。一般に大気圧アークにおいて、他の条件を一定に保ってLのみを変化させた場合のV変化はアーク柱電圧降下V<sub>P</sub>の変化のためであり、陰極電圧降下V<sub>K</sub>と陽極電圧降下V<sub>A</sub>の和V<sub>A+K</sub>はほぼ一定であるとされている<sup>(1)</sup>。本実験の場合、低圧条件においてもLの変化に対して陰極域の形状および大きさはほとんど変化していないので、陰極側の現象はLに対して一定であり、V<sub>K</sub>も一定であると考えられる。他方陽極側についてはLが変化すると陽極板前面のアークの温度が変化するので、V<sub>A</sub>も変化する可能性はあるかも知れないが、たとえばP=18 mmHgの条件におけるVは、L=0 mmとL=25 mmとではわずか1.4 Vしか違っておらず、かりにアーク柱電圧降下V<sub>P</sub>が零であるとしても、V<sub>A</sub>は1.4 Vしか変化していないことになり、これらの結果から、アーク電流が250 A程度であれば、Lの変化に対するV<sub>A</sub>の変化はほとんどないと考えてよい。以上の考察から図中のL=0 mmの場合のアーク電圧はほぼV<sub>A+K</sub>を示していると判断されるが、V<sub>A+K</sub>はPの低下につれて増大している。これに対して任意のLにおけるVからV<sub>A+K</sub>を差引

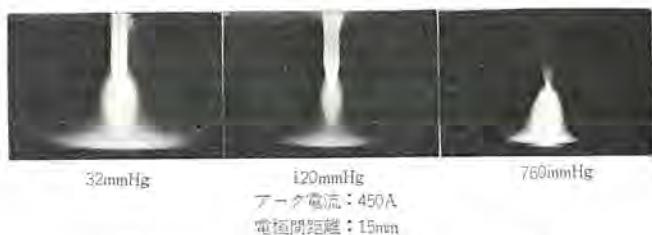


図3.1 各ふんい気圧力におけるアーク外観  
Appearance of arc at different gas pressures.

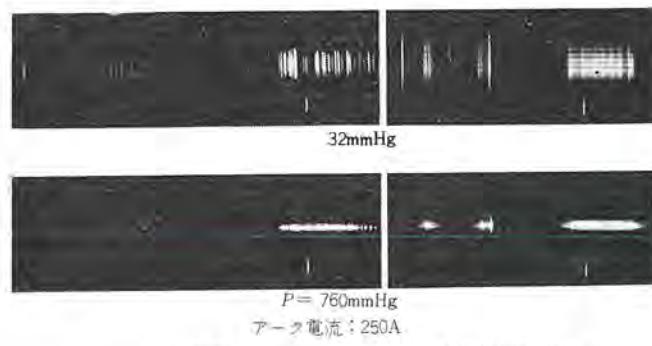


図3.2 減圧気中のアルゴンTIGアークの分光分析  
Spectrum analysis of argon TIG arc at reduced gas pressure

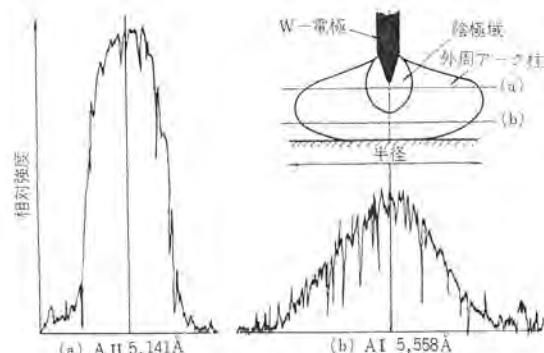


図3.3 アークスペクトルの相対強度分布  
Relative intensity distribution of the spectrum of the arc.

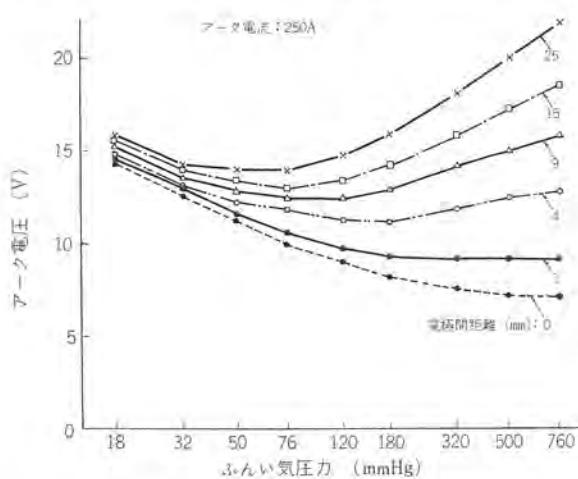


図3.4 ふんい気圧力に対するアーク電圧の変化  
Variation of arc voltage with gas pressure

いた値はV<sub>P</sub>を示すものと考えられるが、図よりV<sub>P</sub>がPの低下に伴い減少しているのがわかる。

ふんい気圧力の変化に対するV<sub>A</sub>, V<sub>K</sub>, V<sub>P</sub>の変化についてはつぎのように考察される。まずV<sub>A</sub>については陽極前面のアークの温

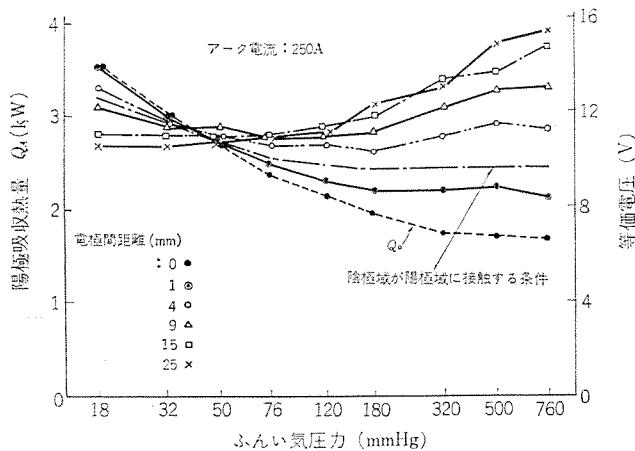


図 3.5 ふんい気圧力に対する陽極吸収熱量の変化  
Variation of anode power with gas pressure.

度が低いほど大きくなることが報告されている<sup>(2)</sup>が、3.1節で述べたように、 $P$ が低下すると陽極前面のアーカーの温度は低下すると考えられるので、 $V_A$ は定性的には $P$ の低下につれて増大すると考えられる。つぎに $V_K$ については、陰極域を、アーカーが維持されるに必要な電子流の一部を補給するための熱電離領域であると考えると、 $P$ の低下につれてこの領域が大きくなるのでここからの熱損失も大きくなり、それを補うため $V_K$ は大きくなるとして理解される。 $V_K$ と陰極域の熱量については後に詳述する。 $V_P$ が $P$ の低下につれて減少するのは、気体粒子密度が低くなっているアーカー柱からの熱損失が小さくなり、したがってアーカー柱電位傾度 $E$ が小さくなるためである。このため電磁吸縮力にもとづいて発生するプラズマ気流も次第に弱くなることを実験的に確認した。

アーカー電圧 $V$ の測定と同時に測定した陽極吸収熱量 $Q_A$ の $P$ に対する変化の傾向を図3.5に示す。大略の傾向は図3.4の $V$ の傾向に似ているが、 $L$ の増大に伴う $Q_A$ の増加の程度は、同じ条件における $V$ の増加の程度と比べるとかなり小さくなっている。とくに $P$ が50 mmHg以下の圧力条件では、 $L$ の増大につれて $Q_A$ が減少しているのが注目される。これに対しアーカー電力そのものは $L$ の増大に伴ってわずかではあるが増大しているので、もし $L$ の増大に伴う $Q_A$ の変化がアーカー柱発生熱量のみの寄与によるものであれば、たとえその陽極への寄与が零であっても $Q_A$ が減少することはありえないはずで、このことから陰極域の熱量寄与を考えざるを得ない。すなわち陰極域のエネルギーが外周アーカーより著しく高いと考えると、 $L$ が小さい条件ではそのエネルギーの大部分が陽極に吸収されるが、 $L$ が大きくなるにしたがい、この陰極域から空間に放散される損失熱量の割合が次第に大きくなり、陽極への移行率は低下するものと推察される。 $P < 50$  mmHgで $L$ の増大に伴って $Q_A$ が減少するのは、アーカー柱発生熱量が小さく、その陽極への寄与量が小さいのに対し、陰極域から陽極へのエネルギー寄与が著しく減少するためと解釈される。

このような陰極域はより高い圧力条件においても存在するので、上述の考え方は同様に成立するはずであるが、 $P$ が高くなるにつれて陰極域は小さくなり、そのエネルギー自体も小さくなるので、 $L$ の変化に対する寄与率の変化も小さくなると考えられる。また $P$ が高い条件ではアーカー柱発生熱量が大きくなり、それが強力なプラズマ気流によって陽極に運ばれるので、結果として $L$ の増大に対して $Q_A$ は著しく大きくなる。

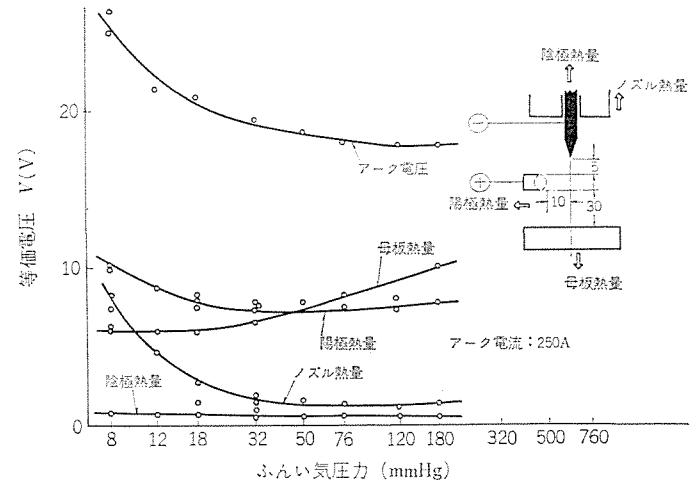


図 3.6 水冷銅管陽極とW陰極間に発生されたアーカーの熱量特性

Energy characteristics of the arc formed between the water cooled pipe anode and W-cathode.

以上のような陽極吸収熱量の変化に対し、陰極吸収熱量 $Q_K$ は $P$ の変化に対してさほど変化せず、等価電圧で0.8 V程度の値を占めるのみである。このことから $IV_K$ のエネルギーの大部分は陰極に吸収されずに、何かの形で外部へ放出されていることが推定される。

以上に考察したアーカー入熱と各部の吸収熱量の関係をさらに明確にするため、図3.6に示すように、水冷母板を絶縁して設置し、中空に浮かせて固定した水冷陽極銅管とW電極の間にアーカーを発生させた場合の各部の吸収熱量を測定した。アーカー電圧は $P$ の低下に伴い上昇しているが、陽極熱量は多少増大する程度であり、陰極熱量はほぼ一定である。これに対してノズル熱量は著しく増大しており、母板熱量は逆に減少している。これらの熱量の $P$ に対する変化の傾向はつぎのように理解される。まず陽極熱量については $P < 32$  mmHgの条件で次第に大きくなっているが、これは陰極域が大きくなっている水冷銅管陽極との距離が近くなり、ある程度の熱量を与えるためと解釈するのが妥当であり、陽極熱量自体は図に示すごとく大体8 V程度の等価電圧で表わされる。一般に陽極エネルギー $Q_A$ は、

$$Q_A = I(V_A + V_W + V_T)$$

$V_W$  : 仕事関数

$V_T$  : 電子がアーカー柱で保有していた運動エネルギー

で表わされる<sup>(3)</sup>が、いま $V_W$ を4 V、 $V_T$ を1.5 V程度とすると $V_A$ は2.5 V程度となり、 $P$ に対して変化しているとしてもその値は案外小さいことになり、結局 $P$ の低下に伴う $V_{A+K}$ の増大の主原因は $V_K$ の増大にあることがわかる。ノズル熱量は $P$ の減少とともに、 $V$ の増大と同程度に増大しているが、これは $P$ の低下とともに陰極域が増大して直接ノズルを加熱するためであり、このエネルギーを補給するために $V_K$ がさらに増大するものと判断される。

### 3.3 母板の溶融現象より見た陰極域の熱的性質

低圧アルゴン気中で、板厚19 mmの軟鋼陽極試片上にアーカーを発生させた場合の試片の溶け始め時間を図3.7に示す。図より明らかなように、陰極域が試片に接触している条件では、接触した部分は直ちに溶け始めるが、 $L$ を大きくして陰極域を試片に接しなくすると、溶け始め時間は急に著しく長くなる。このことから陰極域のエネルギー密度が外周アーカー柱に比べて著しく高いことがわかる。

板厚10 mmのステンレス鋼試片上に一定時間アーカーを発生させた場合の試片の溶け込み断面形状を図3.8(a), (b)に示す。図3.8

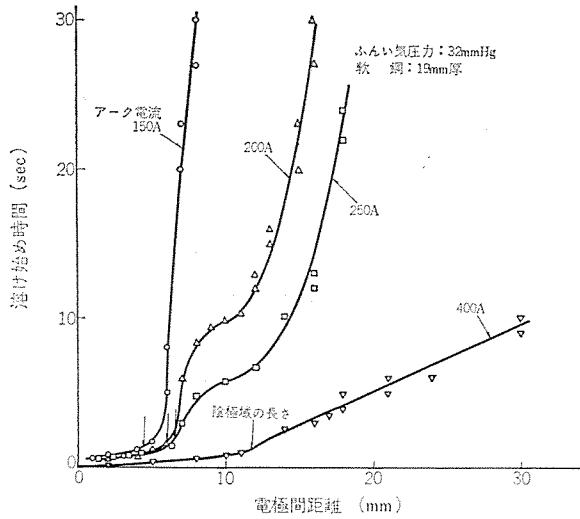


図 3.7 板厚 19 mm 軟鋼試片の溶けはじめ時間  
Incubation time for the melting of 19 mm thick mild steel specimen.

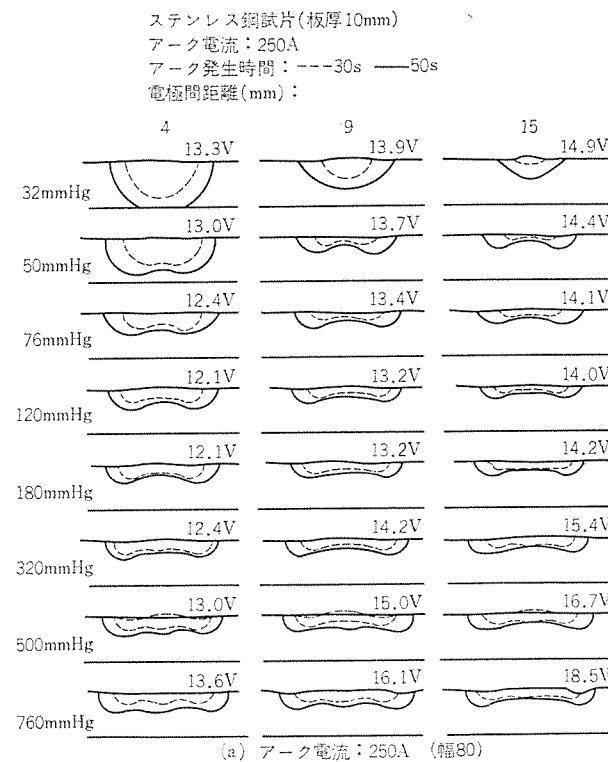
(a) より明らかなように、低圧条件では、 $L$  が小さく陰極域が母板に十分接触している場合には、溶け込みは著しく大きくなっているが、 $L$  が大きくなると溶け込みは急激に小さくなる。これに対し高圧条件では、溶け込みは  $L$  に対してさほど変化しておらず、いずれも溶融金属の対流の影響が受けられる。また図 3.8 (b)においてもほぼ同様の傾向がみられるが、この場合は電流値が大きいので、高圧力条件では電磁吸収力にもとづくプラズマ気流により、溶融中央部が著しく下方へ溶け込んでいる。以上の結果から、低圧気中における陰極域は、プラズマ気流を伴わない高温面熱源として作用することが明らかである。

以上の実験結果を総合すると、低圧アーカーにおける陰極域は、陰極から放出された熱電子が、陰極電圧降下  $V_K$  で加速されて、衝突によって気体粒子を高度に電離しうる減衰領域に対応し、電離によって生成された電子はアーカーを維持するための電子流として働くものと考えられる。溶け込み実験結果や熱量測定結果から判断すると、陰極域は高エネルギー密度状態にあるが、 $IV_K$  のかなりの割合が陰極域のエネルギーとして供給されており、陰極域からの熱損失とつり合っている。 $P$  の低下につれて  $V_K$  が大きくなるのは、平均自由行程が長くなって陰極域の大きさが大きくなり、それに伴って陰極域からの熱損失も増大するためとして理解される。このことから、ノズルによる直接冷却、あるいは軸気流によって陰極域からの熱損失を増大させることによって、逆に陰極域のエネルギーおよびエネルギー密度を高めうることが推察される。

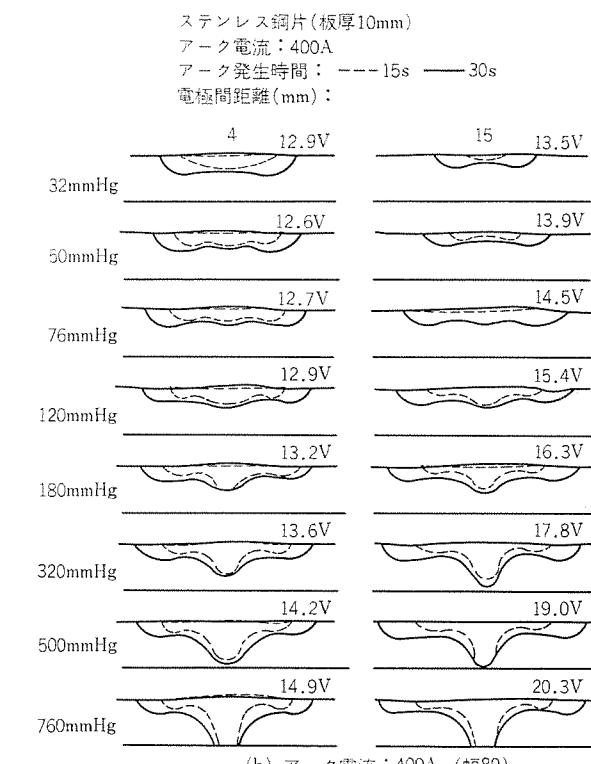
### 3.4 低圧アーカーの金属加工への応用

3.2 節および 3.3 節で述べたように、低圧アーカーは大気圧アーカーと異なる電気的および熱的特性を有しているが、このような特性を利用することにより、大気圧アーカーではなしえない特殊な加工を行なうことができる。

既述のごとく、低圧アーカーにおける陰極域はプラズマ気流を伴わない高温の面熱源として利用できるが、金属試片を走行させながら陰極域を接触させて溶融せしめると、プラズマ気流が弱いため大電流条件においても固体面の露出の傾向が少なく、きわめて美しいビードが形成される。試料の走行速度を早くすると図 3.9 に示すように溶け込み深さは浅くなるが、ビード幅は陰極域の幅に近くなるようになり、陰極域の直径を調整することにより任意のビード幅をうるこ



(a) アーチ電流: 250A (幅80)



(b) アーチ電流: 400A (幅80)

図 3.8 水冷銅板上に設置された金属試片の溶込み形状  
Penetration in metal specimens set on the water cooled copper plate.

とができる。このような特長は、比較的厚板の耳溶接を溶け落ちを発生させずにスムースに行なうのに適している。

図 3.10 は軟鋼板の上に板厚 2 mm のニッケル板を置いて、低圧気中の陰極域で溶融させて肉盛り溶接を行なった例であるが、大電流条件にもかかわらず、プラズマ気流が弱いため深い溶け込みが得られている。

図 3.11 は低圧アルゴン気中で W電極とアルミニウム板の間に交流アーカーを発生させた場合の母板の清浄域を示すものである。写真より

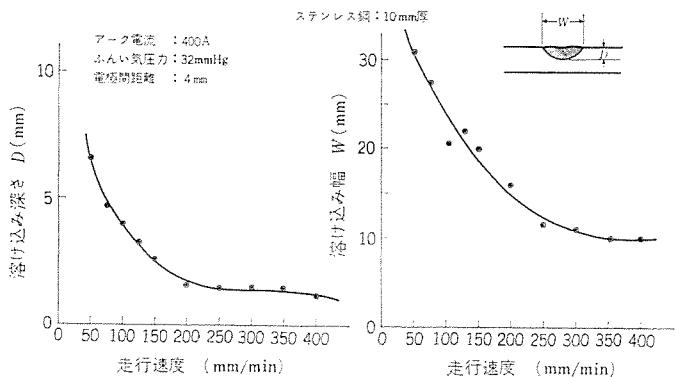
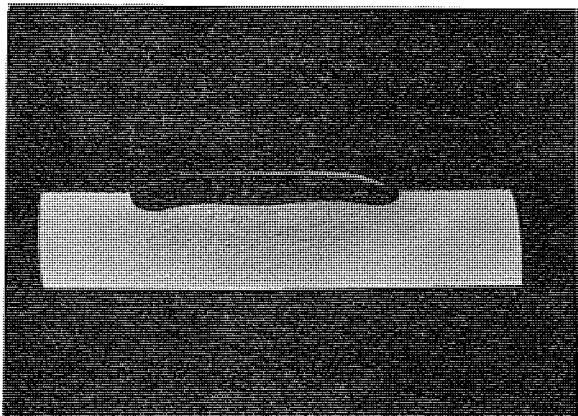
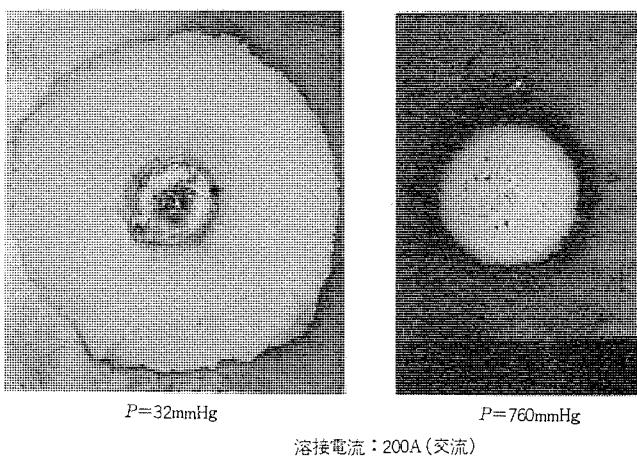


図 3.9 走行速度に対するビード溶込み寸法の変化  
Change in the dimensions of bead penetration with travel speed.



ふんい気圧力 : 32mmHg  
アーク電流 : 400A  
走行速度 : 50mm/min  
10mm厚軟鋼 + 2mm厚ニッケル

図 3.10 低圧アーカによる軟鋼板上のニッケルの肉盛溶接ビード  
Overlay weld bead of nickel on mild steel plate formed by the TIG arc at reduced gas pressure.



溶接電流 : 200A(交流)

電極間距離 : 10mm

図 3.11 各ふんい気圧下の交流アーカによるアルミニウム板表面の清浄域  
Cleaning zone on aluminum plate at different gas pressure formed by AC TIG arc.

明らかなように、低圧条件ではアーカ柱電位傾度  $E$  が小さくなるため、アーカはアルミニウム板表面の酸化膜を求めてより遠方まで伸びることができ、清浄域は大気圧条件の場合と比べると著しく広くなる。この現象は単に金属表面酸化膜の除去法として有効なだけでなく、そのうえにロウ材をなじませたり、拡散肉盛り接合を行なわせたりすることもできる。図 3.12 は減圧アルゴン気中で交流 TIG アーカに

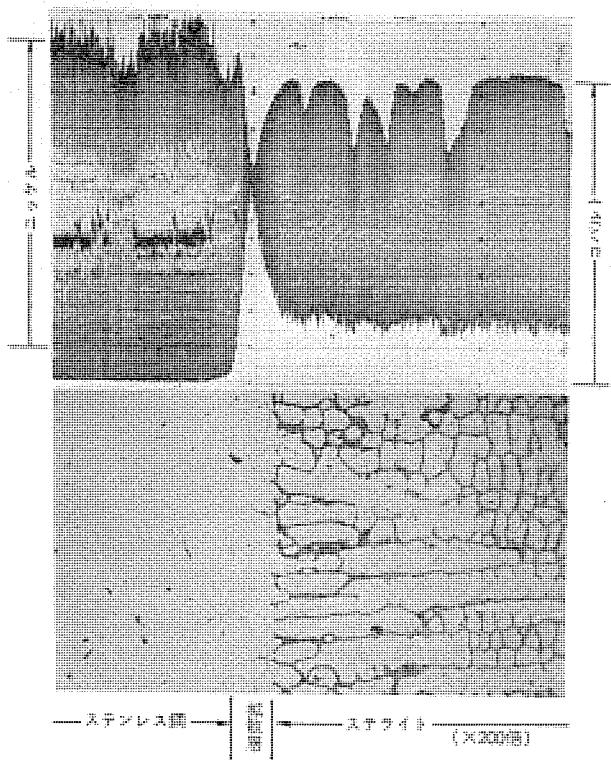


図 3.12 低圧交流アーカによるステライトとステンレス鋼の拡散接合部の顕微鏡写真  
Microphotographs of diffusion bonded specimen of stellite and stainless steel formed by the low pressure AC arc.

より清浄にしたステンレス鋼板上に、陰極域中にステライト心線を突き込んで溶融滴下させることによって得た接合部の一例である。X線マイクロアナライザによる測定結果から明らかなように、境界部は良好な拡散接合状態を呈している。

#### 4. 軸気流による陰極域の形状および特性の制御

##### 4.1 軸気流による陰極域の形状および特性の変化

前章における実験結果から、陰極域を外部からなんらかの方法で冷却することによって、逆に陰極エネルギーを大きくして陰極域のエネルギーを増大させうることが推察されるが、図 4.1 に示すようにノズルを通じて軸方向に気流を流すことによって陰極域を冷却、拘束した場合のアーカの形態および特性について検討した。

図 4.2 は低圧アーカの陰極域を軸気流によって冷却、拘束した場合の外観写真である。(a)はノズルから W 電極を長く突き出した場合の外観であるが、図 3.1 の 32 mmHg の場合の陰極域の形状と比

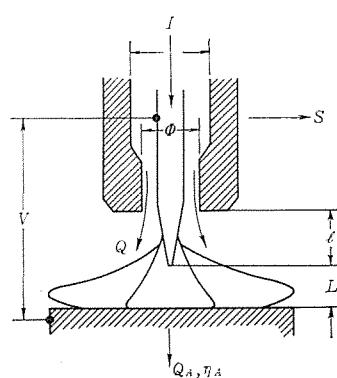


図 4.1 実験に使用したトーチの構造と略号  
Structure of the torch and symbols used in the experiment.

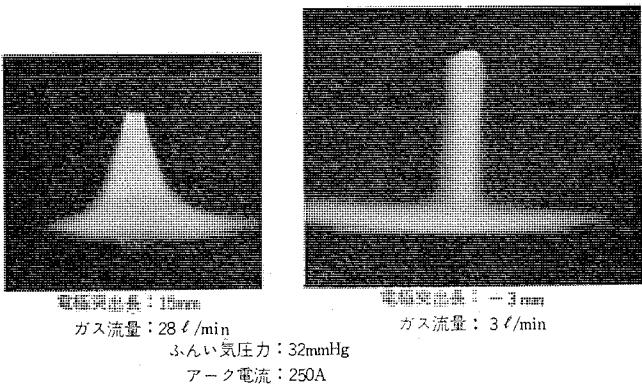


図 4.2 軸気流下におけるアーチ外観  
Appearance of arc under axial gas stream.

較すると、球形をしていた陰極域が、軸気流の作用によって円錐形に変形している様子がよくわかる。これに対して(b)はW電極をノズル内部に約3mm引き込んだ場合の外観であるが、陰極域は針状に鋭くとがった形になっており、軸気流の拘束効果がきわめて顕著であることを示している。

このように軸気流で拘束された低圧アーチの電気的特性の一例を図4.3に示す。図はW電極—母板間距離Lの変化に対するアーチ電圧の変化を測定した結果であるが、軸気流アーチ下のアーチ電圧は静止ふんい気中のアーチのそれと比較して著しく高くなっている。その内容を吟味してみると、Lに対するVの増加率は両者間で案外差が少なく、むしろL=0mmのアーチ電圧、すなわち $V_{A+K}$ が軸気流アーチにおいて著しく高くなっていることが明らかである。これは第3章の考察からも明らかなように、陰極域が軸気流によって冷却され、その熱量を補うため $V_K$ が大きくなつたためと解釈される。図4.4は図4.3とほぼ同様の条件下のアーチにおける各部の吸収熱量を等価電圧の形で表示したものである。ガス流量を著しく少なくした場合を除き、アーチ入熱は陽極に高い割合で吸収されているが、このことは、軸気流によって増大した陰極域のエネルギーが、軸気流によって母板に運ばれて、母板を効率よく加熱していることを示している。なおガス流量を少なくした条件においては、アーチ電圧が急激に上昇しているが、これは軸気流の拘束効果が小さくなつて、図4.2中に示すように陰極域が球状に近くなり、ノズルによる冷却作用が有効に働きだすためと考えられる。ノズル吸収熱量がガス流量の減少に伴い著しく増大していることが、それを裏付けていると考えられる。この場合には陰極域が母板から遠ざかり、しかも軸気流によってエネルギーが母板に運ばれることもないので、陰極域のエネルギーが増大するにもかかわらず、陽極吸収熱量は激減している。

軸気流で拘束されたアーチによる陽極板の加熱、溶融特性の一例を図4.5に示す。図はW電極のノズルからの突き出し長さを変えたトチを用いて、板厚19mmの軟鋼板上にアーチを発生させ、電極間距離の変化に対する母板の溶け始め時間(溶け始め時間)を求めたものである。図から、軸気流の拘束の程度が大きいほど溶け始め時間が短くなっていること、および陰極域が母板に接触する条件ではとくに溶け始め時間が短くなっていることがわかるが、これより、拘束された陰極域のエネルギー密度が非常に高いことが明らかである。

#### 4.2 低圧アーチにおける軸気流のモーメンタムが溶融金属に及ぼす作用

前節に述べたように、低圧アーチは軸気流によって著しい拘束作用を受けるが、この強力な軸気流のモーメンタムは金属の加工に際して有効に利用しうるものと考えられる。図4.6は気流の流速を推

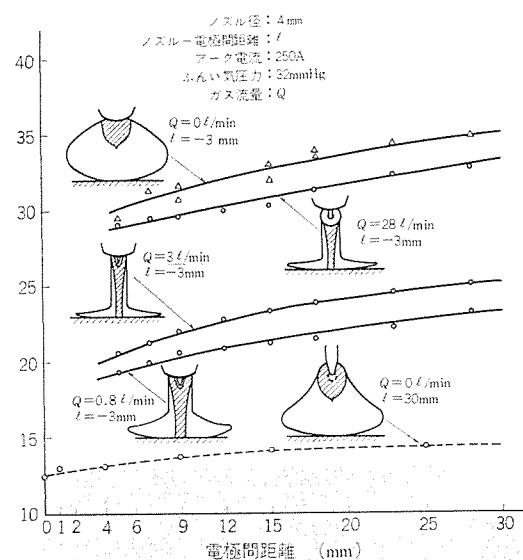


図 4.3 軸気流アーチにおけるV-L特性  
V-L characteristics of arc under gas stream.

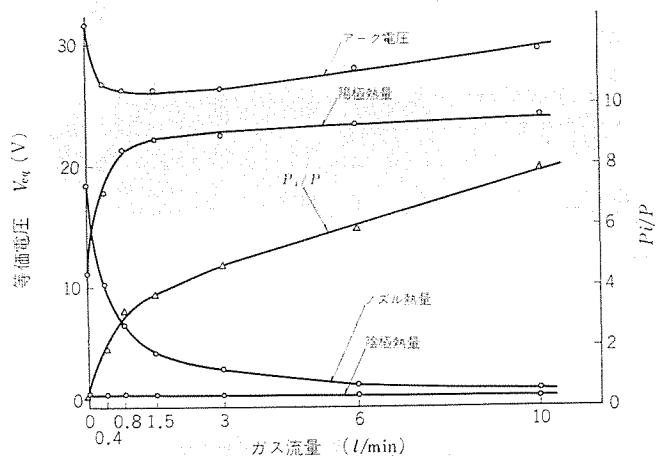


図 4.4 軸気流アーチにおける吸収熱量とガス流量の関係  
Relation between absorbed energy and gas flow rate in gas stream arc.

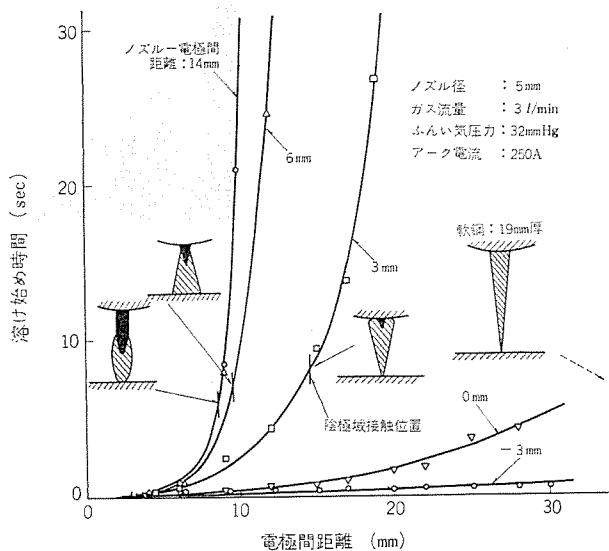


図 4.5 低圧アーチによる試片の溶けはじめ時間の電極間距離に対する変化  
Change of electrode distance in incubation time for melting of specimen with arc.

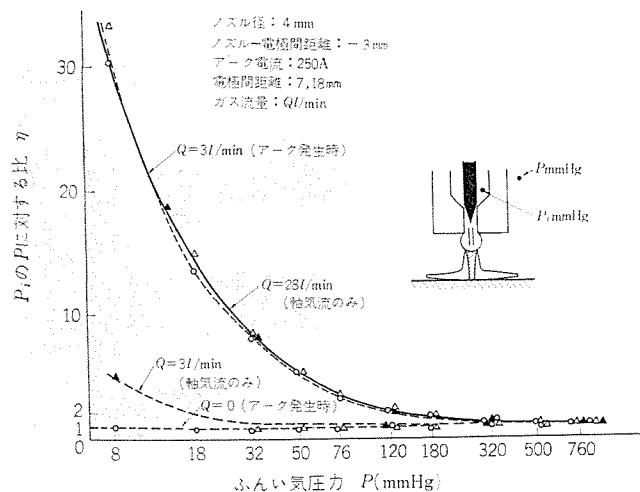


図 4.6 ふんい気圧力に対する圧力比  $P_i/P$  の変化  
Change in the ratio  $P_i/P$  with gas pressure.

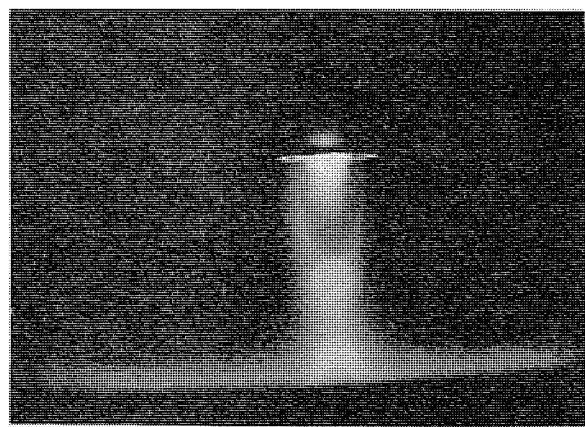


図 4.7 低圧軸気流アーカにおける衝撃波  
Shock wave in low pressure arc under gas stream.

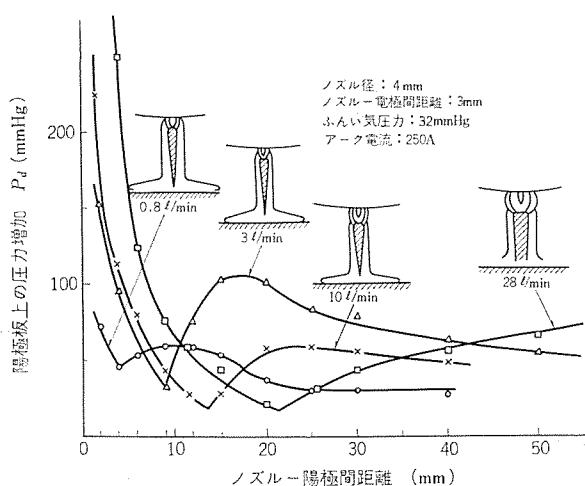


図 4.8 軸気流のモーメンタムによる陽極板上の圧力増加  
Pressure increase on anode plate by the momentum of axial gas stream.

測するため、ノズル内圧力  $P_i$  を測定し、設定圧力  $P$  に対する比  $\eta$  を求めた結果である。一般にアルゴンふんい気の場合、内圧  $P_i$  と外圧  $P$  の比が 2.03 の条件で流速は音速に達する<sup>(4)</sup>が、図 4.6 は、低圧条件で流速が音速を十分越えうることを示している。図 4.7 はそのような条件下のアーカにおいて、流速が超音速から亜音速へ急変

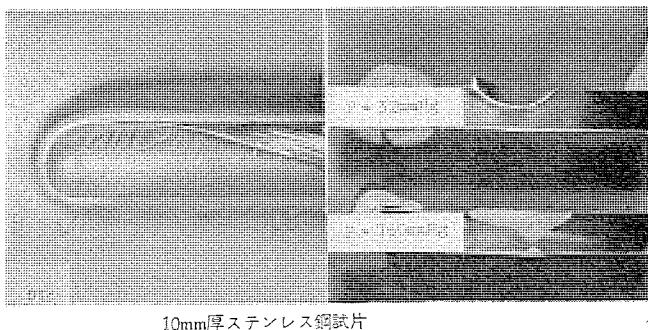


図 4.9 軸気流によってはつられた試片の外観  
Appearance of specimen gouged by the axial gas stream.

する際に発生する衝撃波の存在を示すアーカ写真の一例である。図 4.8 は 32 mmHg の圧力条件下で軸気流アーカを発生し、水冷陽極板の中心にあけた直径 1 mm の穴を通してふんい気圧力に対する陽極板上の圧力増加を測定した結果である。一般的傾向としては、ノズルからはなるにしたがい圧力は単調に減少するが、衝撃波の発生位置、すなわち超音速から亜音速へ流速が急変する位置において急激な圧力増加が存在し、たとえば 3 l/min の条件でその値は 100 mmHg にもなる。図に示されているように、ガス流量をむやみに大きくしても、圧力増加が必ずしも大きくならないことは、実用上注意する必要がある。

低圧アーカにおける軸気流のモーメンタムの作用の一例を図 4.9 に示す。板厚 10 mm のステンレス鋼板上に軸気流アーカを発生させると、気流の強力なモーメンタムにより溶融金属が順次除去されるため、写真のような美しいガウジングみぞが形成される。(b)下方に同様な条件でふんい気圧力を 760 mmHg にした場合のビード断面を示してあるが、溶融金属の除去現象は強力ではない。

## 5. 軸気流で拘束した陰極域による金属加工

第 4 章では、低圧アーカの陰極域を軸気流によって拘束、変形させることによって、そのエネルギーおよびエネルギー密度を高めうこと、および強力な軸気流のモーメンタムによって試片上の溶融金属を除去しうることを明らかにした。このような特性を用いて各種金属材料の特殊な加工を行なうことができる。

### 5.1 ガウジングおよび溶断加工への応用

32 mmHg のアルゴン気中で、W 電極をノズルから約 15 mm 突き出したトチを用い、大きな流量をガスを流した状態でアーカを発生させた場合の、W電極—母板間距離に対するガウジングみぞ寸法の変化を図 5.1 に示す。図中で横軸が負になっているのは、W電極が試片表面より下方へ突き込んでいる状態を示す。図より明らかのように、電極間距離を小さくして陰極域を母板に接触させると、幅が陰極域の直径に対応した深いみぞが形成され、さらにW電極を下方に下げるについにはアーカ切断になる。いずれの場合においても、図 5.2 に示すようにみぞ内部には溶融金属の残存ではなく、完全な固体面が露出している。このような加工法は、大気中では酸化やすい金属のガウジング加工に適している。なお、みぞ周辺に付着する凝固金属については、側方から別の気流を吹きつけることにより除去しうることを明らかにしている。

図 5.3 は W 電極をノズルの内側に引き込んだトチを用いて、板厚 19 mm の軟鋼板の溶断加工を行なった結果の一例であり、各圧

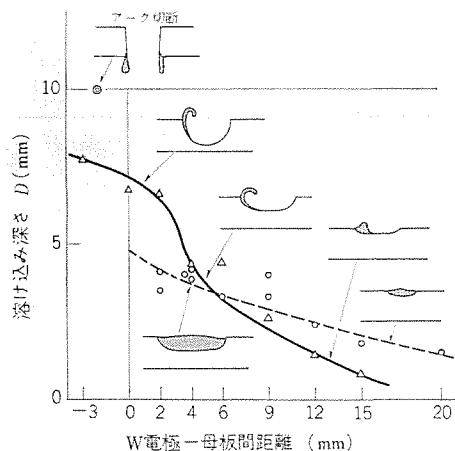
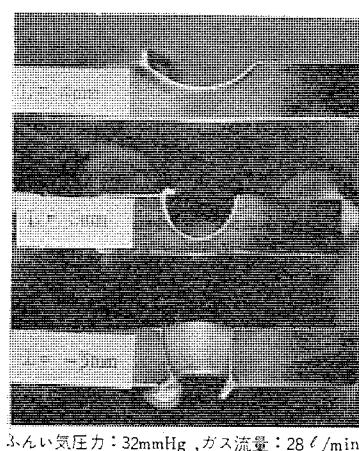
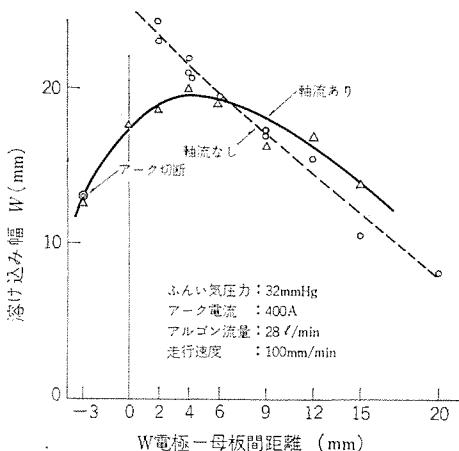


図 5.1 電極間隔に対するアーカガウジング みぞ寸法の変化  
Change in the dimensions of arc gouged groove with electrode distance.



ふんい気圧力 : 32mmHg, ガス流量 : 28 l/min  
アーカ電流 : 400A, 走行速度 : 100mm/min  
ステンレス鋼 10mm厚

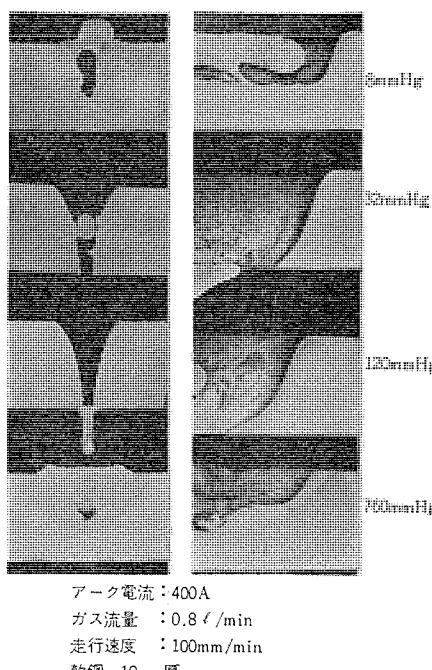


図 5.3 アーカ切断された試片の横および縦断面  
Transverse and longitudinal crosssection of arc cut specimen.

力条件における試片の横および縦断面形状を示している。ふんい気圧力が 32 mmHg, 120mmHg の場合は、同一条件下の 760 mmHg の場合より良好な結果が得られる。これは軸気流のモーメンタムが大きいいためである。8 mmHg の場合は逆に溶断深さが小さくなっているが、これは実測結果によるとふんい気圧力が低すぎると母板上の圧力増加がかえって小さくなること、およびアーカのエネルギー密度が小さくなるためであることがわかった。

## 5.2 せん孔加工への応用

大気圧からふんい気圧力を減じた場合の軸気流アーカによる軟鋼板のせん孔形状を図 5.4 に示す。せん孔深さは、圧力が 50 mmHg から 180 mmHg の範囲で大きくなっているが、これは図 4.8 に示した母板上の圧力増加が、この圧力範囲で大きいためであることがわかっている。大気圧条件のせん孔形状は、軸気流の効果よりむしろ自然発生的なプラズマ気流によって決まっているようである。大気圧アーカの場合は、母板上の圧力増加が小さいので溶融金属が穴周辺に残存し、溶融金属の温度が高いのでそこに大きな溶け込みを形成してしまう。これに対して低圧条件の場合には、溶融金属は気流に

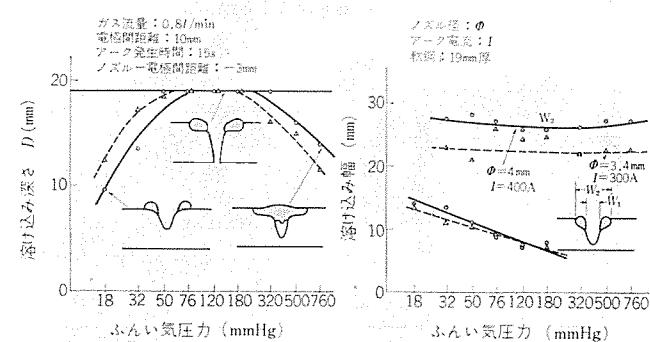


図 5.4 ふんい気圧力に対するアーカせん孔形状の変化  
Change in the shape of arc drilled hole with gas pressure.

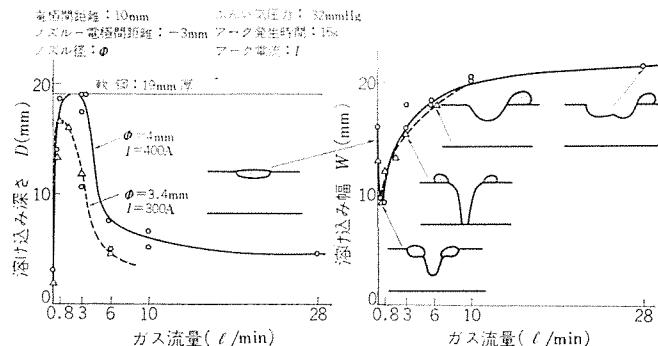


図 5.5 ガス流量に対するアーカせん孔形状の変化  
Change in the shape of arc drilled hole with gas flow rate.

よって直ちに遠方に除去され、たとえ穴周辺に残存する場合でも、溶融金属の温度が低いため長時間放置しないかぎり大きな溶け込みを形成しない。

図 5.5 はガス流量の変化に対するせん孔形状の変化を示すものである。ガス流量が 3 l/min の場合には、図 4.8 に示すように圧力増加が大きいのでせん孔深さが大きい。流量をさらに大きくすると、圧力増加が減少すること、および乱流の発生によって陰極域のエネルギー密度が低下することのために、なべ底座の浅い溶け込みになる。

図 5.6 はせん孔断面写真の一例であるが、アーカ発生条件を変えることにより、せん孔形状を種々制御できることが明らかである。以上に述べた低圧気中の軸気流アーカを用いることにより、50 mm 厚の各種鋼板や 70 mm 厚のアルミニウム板のせん孔加工が可能になった。

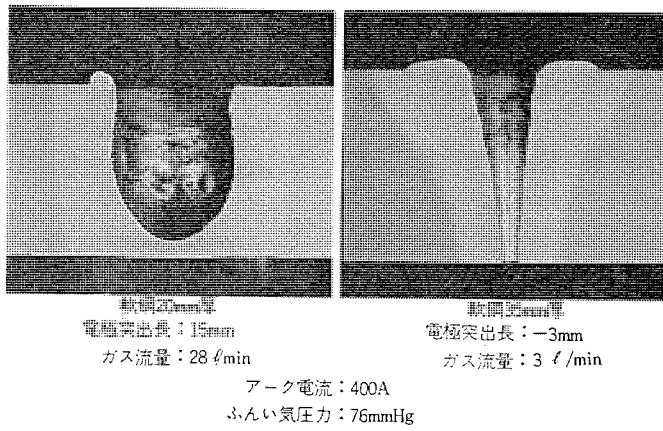


図 5.6 アークせん孔された試片の断面  
Crosssection of arc drilled specimen.

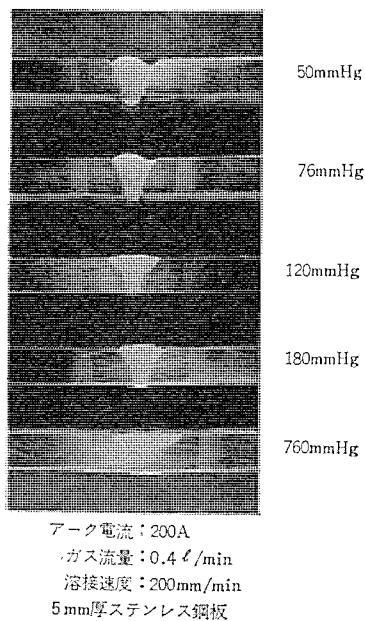


図 5.7 各圧力下におけるキーホール溶接部断面  
Crosssection of key-hole welded specimen at various gas pressure.

### 5.3 溶接への応用

低圧軸気流アークにおける陰極域の高エネルギー密度と軸気流のモーメンタムは、いわゆるキーホール溶接を行なううえで都合よく利用することができる。図 5.7 は各ふんい気圧力下で、板厚 5 mm のステンレス鋼をキーホール溶接した結果である。同一条件の 760 mmHg の場合に溶け込みが裏面に至っていないのに対し、低圧条件では良好な溶接結果が得られている。ただ圧力の低下に伴い陰極域の直径が大きくなるので、それに対応してキーホールの直径も大きくなり、裏ビ

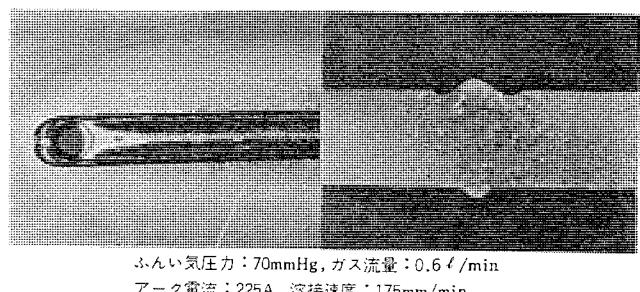


図 5.8 10 mm 厚チタニウム板のキーホール溶接部  
Key-hole welded specimen of 10 mm thick titanium.

ードはやや幅広くかつ多少垂下した形になっている。

図 5.8 は板厚 10 mm のチタニウム板の I 形突合せ継手を片面一層溶接した結果であり、冶金的にもすぐれた継手性能を有していることがわかっている。以上述べたように、低圧軸気流アークは、高融点金属あるいは活性金属の溶接法としてすぐれた能力を有している。

### 6. むすび

以上の研究により、低圧アルゴン気中で発生させたアークにおける陰極直下の球状発光部“陰極域”について、その電気的および熱的性質を明らかにした。すなわち陰極域は外周アーク柱と比較するときわめて高いエネルギーを有しており、そのエネルギーは陰極エネルギーとして与えられていることを示した。さらに陰極域の周間に軸気流を流して冷却・拘束することにより、陰極域のエネルギーおよびエネルギー密度を高めうることを示し、その場合に軸気流のモーメンタムが母板に大きな圧力を及ぼすことを明らかにした。

また以上に述べた陰極域の特性を利用して、従来のアーク加工法とは異なった特殊な加工を行なえることを示した。すなわち、静止ふんい気中の陰極域は、プラズマ気流を伴わない静かな面熱源としての特性を有しているが、これにより表面肉盛り・溶かし溶接、さらにはロウ付け・拡散接合などの加工が行なえることを明らかにした。また軸気流アークにおける陰極域により、金属のがウジング・溶断・せん孔およびキーホール溶接などの加工を行なった。

このような低圧アークは、大気中で酸化しやすい高融点金属あるいは活性金属の特殊な加工法として広範な用途があると考えられる。

### 参考文献

- (1) 安藤、長谷川：溶接アーク現象、38～39（昭37）
- (2) G. Busz, W. Finkelnburg : Z. Phys., 68～76 (1968)
- (3) 安藤、長谷川：溶接アーク現象、73～74, 80～96 (昭37)
- (4) 西口：溶接学会誌、35, No. 3, 5～14 (昭41)

# エポキシ樹脂の力学的性質とガラス転移現象

柴山恭一\*・宮本晃男\*\*

## Dynamic Mechanical Properties and Glass Transition Phenomena of Epoxy Resin

Central Research Laboratory Kyoichi SHIBAYAMA・Teruo MIYAMOTO

With the object of elucidating relation between structure and properties of network polymers, a study has been made on dynamic mechanical properties and glass transition phenomena with homologue series of crosslinked epoxy resin which is one of the most typical examples of crosslinked polymer now widely in practice. It has been observed that when crosslink density increases, occupied volumes are kept almost constant while free volumes decrease. This leads to a conclusion that the crosslink affects to decrease the free volume. According to the existing theory of free volume, the temperature causing the disappearance of the free volume shifts toward a lower side and a critical volume required for segmental motion decreases with the decrease of crosslink density.

### 1. まえがき

高分子材料については学問的にも工業的にもこの20年の間に急速な発達がつまれてきた。また今後も各種の反応を利用してあるいはまだ用いられたことのない構成材料を使って新しい高分子が合成されることが期待されるが、性能から要請される構造をもった高分子を、具体的な計画のもとに合成する段階への到達が今日強く要望されている。このような目的のために比較的努力がなされてきたものの一つにエポキシ樹脂がある。これは樹脂の種類、硬化剤の種類充てん剤の種類、その他の添加剤の種類など広く選択することによって、そしてそれらの適宜な組合せによって広い範囲の各特性をそなえたものを経験的に作ることが可能になってきた。しかしエポキシ樹脂を含む三次元高分子については、

(1) 組成的に複雑である。

(2) 溶解などの方法で分子1本の研究ができない。

(3) 多くは無定形で各種の回析法が有効に使えない。

などの理由から性質と構造との間の研究は十分なされているとはいえない。

エポキシ樹脂の力学的性質は数多くの測定結果が集積されてきた<sup>(1)～(4)</sup>。あるいは硬化剤の種類を変えて測定したものもある<sup>(5)(6)</sup>が三次元構造と力学的性質との間の関係を論じたものは比較的少くない。最近一つの手段としてアミン硬化エポキシ樹脂の橋かけ密度を理論値と力学的に求めた値とを比較することにより構造と性質との間を関係づける試みがなされている<sup>(7)</sup>。理論的取扱としてはTobolskyの報告がある<sup>(8)</sup>。

一般に橋かけ密度が変化しても占有体積は変化しない測定例が多い<sup>(9)～(12)</sup>が、芳香族系酸無水物硬化エポキシ樹脂の同族体<sup>(13)</sup>、酸無水物硬化エポキシ樹脂の硬化時間変化<sup>(14)</sup>について占有体積の橋かけ密度依存性が見られる。同じエポキシ樹脂でも脂肪族系酸無水物硬化エポキシ樹脂には一般的な挙動が観測され<sup>(13)</sup>特異な現象を示す。

そこで三次元高分子の性質と構造との間の関係をよりよく理解するため、エポキシ樹脂の力学的性質とガラス転移現象から、(1)橋かけ密度とガラス転移温度との関係、(2)ガラス転移点前後の比体積がどのように変化するか、(3)占有体積と橋かけ密度との関係、(4)そのためセグメント運動にどのような影響を与えるか、について

議論することとした。

### 2. 試料および測定

ビスフェノールA型エポキシ樹脂(Shell Chem. Corp. 製Epon 828、エポキシ当量175～210)と、酸無水物とを重量比で1対1の割合に混合して硬化させた。硬化剤には無水ヘキサヒドロフタル酸(HHPA)を用い、橋かけ密度を調節するため無水安息香酸(BA)を適量添加して一連の同族体を得た。硬化剤組成および硬化条件は表2.1に示した。

粘弾性測定はバイブロンDVII型(東洋測器製)を用いて、貯蔵弾性率E'(dyne/cm<sup>2</sup>)および力学的損失正切tan δを求めた。

比体積一温度測定は比体積測定用に改造した直示天びんを用い、シリコーン油(信越化学社製、KF 96, 10 cs)を媒体として、この中の温度による重量変化から求めた。

橋かけ点間分子量の逆数である橋かけ密度はゴム弾性率E<sub>2'</sub>と比体積の逆数である密度から求めた。

表2.1 硬化剤組成および硬化条件  
Composition of curing agents and curing conditions.

試料番号	硬化剤組成(モル分率) (HHPA/BA+HHPA)	硬化条件
1	1.00	○促進剤 4-methyl-2 ethylimidazol
2	0.91	○硬化 (120°C×24 h)+ (140°C+2 h)
3	0.81	
4	0.72	
5	0.59	

### 3. 結果と解析

#### 3.1 橋かけ密度

エポキシ樹脂の酸無水物による硬化の機構は複雑であるがここでは第2級水酸基と、エポキシ基の反応によるエーテル結合の生成は硬化剤組成によって変わらないと仮定すると硬化剤組成を変えることによって橋かけ密度の異なる同族体高分子が生成する。貯蔵弾性率E' と力学的損失正切tan δの温度依存性を図3.1に示す。一塩基酸である無水安息香酸の量が増すとtan δピークの高さは増加し、ピークを与える温度位置は低温側へ移行している。ピークの高さは異なっても各ピークの半値幅は17°Cと等しいので同じ転移挙動を示しているもの

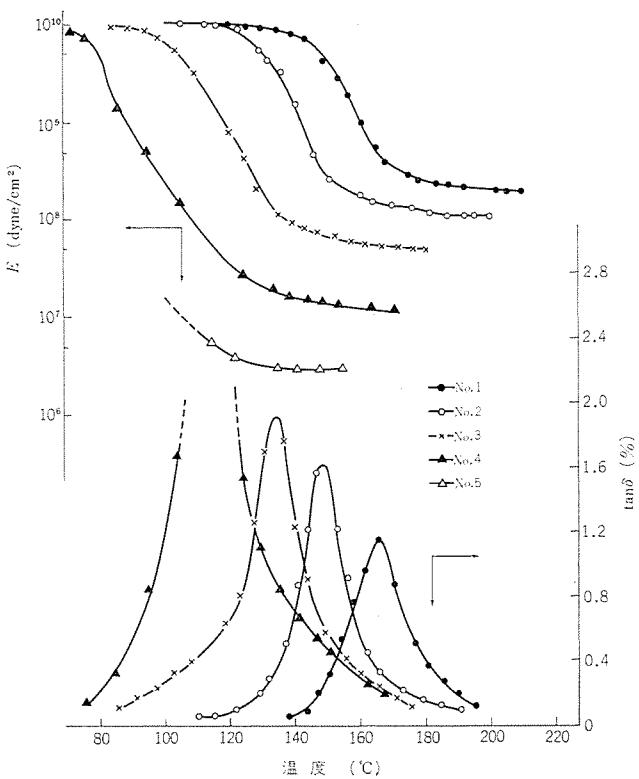


図 3.1 粘弾性温度分散 (測定周波数 110 Hz)  
Dynamic mechanical properties of crosslinked epoxy resin system.

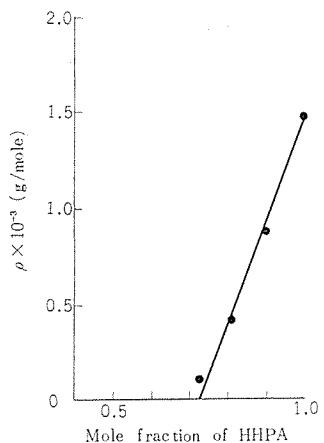


図 3.2 橋かけ密度の HHPA のモル濃度変化  
Crosslink density ( $\rho$ ) vs. mole fraction of HHPA relations.

と考えられる。したがって  $\tan \delta$  ピークの高さは橋かけ点間の分子量に関係していることがうかがわれる。橋かけ点間分子量  $M_c$  はゴム状態の弾性率  $E'_g$  から求められる。

$$E'_g = 3dRT/M_c \quad \dots \dots \dots (3.1)$$

ここで  $d$  は橋かけ密度、 $R$  は気体定数、 $T$  は絶対温度である。橋かけ密度  $\rho (=1/M_c)$  に関するパラメータを表 3.1 に示す。式(3.1)で求めた橋かけ密度の二塩基酸濃度 (モル分率) 依存性を図 3.2 に示す。図から橋かけ密度は式 (3.2) のように表わせる。

$$\rho = An + B \quad \dots \dots \dots (3.2)$$

ここで  $A$  はエポキシ基とカルボキシル基との当量関係によって定まる定数で、 $B$  はエーテル結合による分子成長の程度と線状重合体をつくるのに要する二塩基酸無水物の量によって定まる定数である<sup>(13)</sup>。

### 3.2 ガラス転移現象

図 3.3 に比体積の温度変化を示す。直線の交点はガラス転移温度

表 3.1 橋かけ密度を表わすパラメータ  
Values of characteristic parameters representing crosslink density.

試料番号	ガラス転移温度 $T_g$ (°C)	$T_g+100^{\circ}\text{C}$		橋かけ密度 (mole/g)
		密度 (g/cm³)	$E'$ (dyne/cm²)	
1	105	1.145	$2.03 \times 10^8$	$1.47 \times 10^{-3}$
2	90	1.145	$1.19 \times 10^8$	$0.870 \times 10^{-3}$
3	81	1.145	$0.520 \times 10^8$	$0.430 \times 10^{-3}$
4	70	1.144	$0.120 \times 10^8$	$0.0946 \times 10^{-3}$
5	60	1.143	$0.0304 \times 10^8$	$0.0251 \times 10^{-3}$

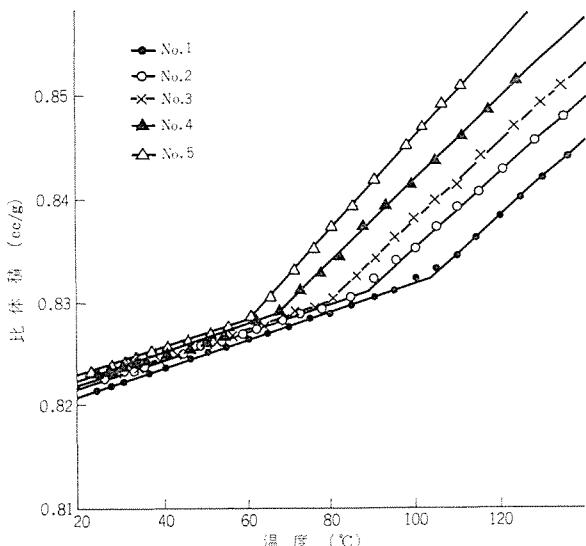


図 3.3 比体積の濃度変化  
Specific volume vs. temperature relations

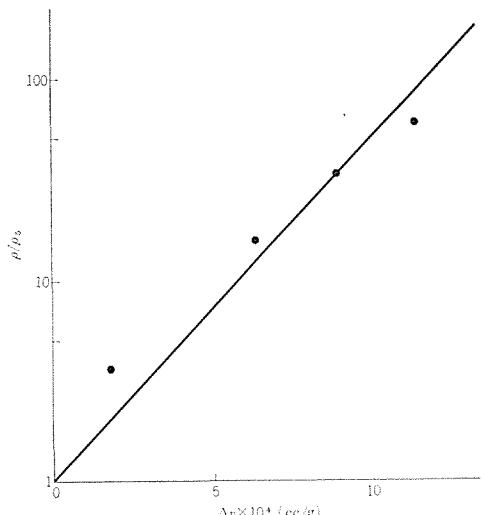


図 3.4 橋かけ密度による比体積の変化  
Change of specific volume vs. crosslink density relations.

$T_g$  を表わす。一塩基酸の安息香酸の量が増すにつれ  $T_g$  は低温側に移動し比体積は増加している。

橋かけ密度が  $\rho_1$  から  $\rho_2$  に増加したとき 比体積の変化  $\Delta v$  は式 (3.3) によって表わされる<sup>(15)</sup>。

$$\Delta v = -\alpha \ln(\rho_1/\rho_2) \quad \dots \dots \dots (3.3)$$

ここで  $\alpha$  は橋かけによって起こる単位重量当たりの体積収縮 (cc/g) で  $\rho_1$  は同族体中最も低い No. 5 の橋かけ密度  $\rho_5$  を用い  $\Delta v = \rho_1 - \rho_2$  について図示すると図 3.4 のようになる。図より  $\alpha$  の値を求める

共重合体の  $0.02 \text{ cc/g}$ <sup>(16)</sup>、線状高分子のガラス転移点における自由体積分率に対する推定値  $0.025 \text{ cc/g}$ <sup>(17)</sup>と比較すると酸無水物硬化エポキシ樹脂の体積収縮はかなり小さいことになる。

ガラス 転移温度  $T_g$  と橋かけ密度  $\rho$  との間の関係は次式によつて表わせる<sup>(11)</sup>。

$$T_g = K_1 \ln K_2 \rho \dots \quad (3.4)$$

ここで  $K_2$  は定数,  $\beta$  は自由体積を表わす尺度で 0 ~ 1 の値をとる,  $\Delta\alpha$  はガラス転移点前後の熱膨張係数の差である。式(3.4)に従って  $T_g$  と  $\rho$  との関係を図示すると図 3.5 のようになり, 式(3.3)で求めた  $\alpha$  の値を用いて  $\beta$  の値を求める  $\beta = 0.13$  になる。このように  $\beta$  が小さいときは橋かけが比体積に与える影響が転移温度にも同様の影響を与えていていることになり, 自由体積が比較的均一に分布していることを示す。アルキッド樹脂の 0.81<sup>(10)</sup>, 被照射のポリエチレンの 0.93<sup>(9)</sup> のように  $\beta$  の値が高い樹脂は自由体積の偏在が著しいことを示している。このようにガラス転移温度の橋かけ密度依存性は自由体積の偏在度  $\beta$  に支配され,  $\beta$  はその分子鎖に固有な値をとるものと考えられる。

### 3.3 热膨胀と自由体積

单一周波数での温度分散から WLF パラメータ  $C_1$ ,  $C_2$  は次式によつて求められる<sup>(18)</sup>。

$$= h C_1 (T - T_m) / (C_2 + T - T_m) \quad \dots \dots \dots (3.5)$$

ここで  $T_m$  は  $\tan \delta$  ピークを与える温度,  $h$  は周波数分散の鋭さを表わすパラメータである。式(3.5)と Doolittle 式の対応によって熱膨張係数  $\alpha_f (= 1/2.303C_1 \cdot C_2)$  が求められる。各試料の  $\alpha_f$ ,  $\Delta\alpha$ ,  $h$  の比較を表 3.2 に示す。一般に  $\alpha_f$  は  $\Delta\alpha$  と等しい値を与えるはずであるが異常に大きな値を示す。酸無水物硬化エポキシ樹脂のように  $\alpha$  分散がおこる高温では極性基の熱解離がおこると思われる場合は周波数分散が鋭くなりすぎ、 $C_1 \cdot C_2$  から  $\alpha_f$  や自由体積分率などの分子的諸定数を求めることはできないようである。そこで平井<sup>(10)</sup>の方法から熱膨張係数と自由体積分率との間の関係を求める。ガラス

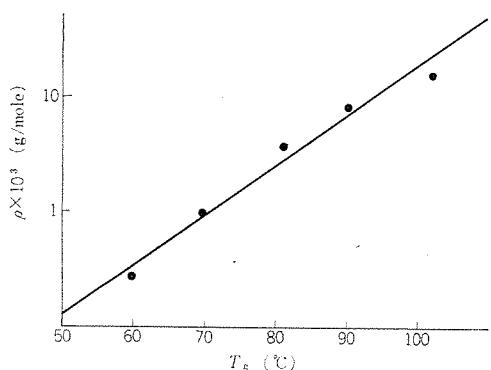


図 3.5 ガラス転移温度の橋かけ密度変化  
Glass transition temperature vs. crosslink density relations.

表 3.2 热膨胀係数と周波数分散の鋭さ  
Thermal expansion and steepness of frequency dispersion.

試料番号	$\frac{d\alpha}{(cc/\text{deg})}$	$\frac{\alpha_0}{(cc/\text{deg})}$	$h$
1	$2.78 \times 10^{-4}$	$8.43 \times 10^{-4}$	0.776
2	$2.92 \times 10^{-4}$	$9.26 \times 10^{-4}$	0.926
3	$3.02 \times 10^{-4}$	$15.2 \times 10^{-4}$	0.940
4	$3.21 \times 10^{-4}$	—	—

転移温度以上の高分子物質の熱力学的性質は液体の挙動と類似の挙動を示すので自由体積の温度による変化を液体の空孔理論を用いると、比体積 $\gamma$ は温度の上昇とともに次式によって増加する。

$$v = v_0 \{1 + \exp(-\varepsilon/RT)\} \quad \dots \dots \dots \quad (3.6)$$

ここで  $v_0$  は分子鎖 1 g 当たりの van der Waals 体積（以後占有体積と呼ぶ）、 $\varepsilon$  は 1 モルの空孔を分子鎖の相互作用に抗して新たに作るための エネルギー である。熱膨張係数の定義から式 (3.6) は式 (3.7) によって表わされる。

$$T_g \cdot \Delta\alpha = -f_g(\ln f_g + 1) \quad \dots \dots \dots \quad (3.7)$$

ここで  $f_g$  は自由体積分率 ( $=v/v-v_0$ ) である。一般に式(3.7)は線状高分子の  $f_g$  は普遍的な値をとるので左辺は一定値を与える。式(3.7)にならって  $T_g \cdot \Delta\alpha$  の橋かけ密度依存性を図3.6に示すと橋かけ密度の減少とともに増加している。 $T_g \cdot \Delta\alpha$  より求めた占有体積を同様に図3.6に示すと橋かけ密度に関係なく一定になる。このことから橋かけのおもな効果は自由体積を減少させることであると結論される。

### 3.4 セグメント運動の自由体積依存

以上のように橋かけ点では分子鎖の受ける束縛のため自由体積が欠乏し、中間の自由な部分に自由体積が偏在すると考えられる。したがって分子鎖が空間をいかに占有 ( $=v \cdot v_0$ ) するかによって存在状態が決まる。ガラス転移点以上の温度の分子鎖運動は液体の挙動に似ているので同様の扱いができる。Cohen-Turnbull によれば液体中の拡散係数  $D$  は次式で表わされる<sup>(20)</sup>。

$$D = D_0 \exp(-\gamma v^*/v_f) \quad \dots \dots \dots \quad (3.8)$$

ここで  $D_0$  は比例定数,  $\gamma$  は自由体積の重りを表わす パラメータで 1 ~ 0.5 の値をとる。 $v^*$  は分子の移動に必要な空孔の大きさで自由体積の再配列によって形成される。粘性係数  $\eta$  と拡散係数との間に Storkes-Einstein の式によって反比例関係にあることと、自由体積  $v_f (=v-v_0)$  は

$$v_f = \alpha \bar{v}_m (T - T_0) \quad \dots \dots \dots \quad (3.9)$$

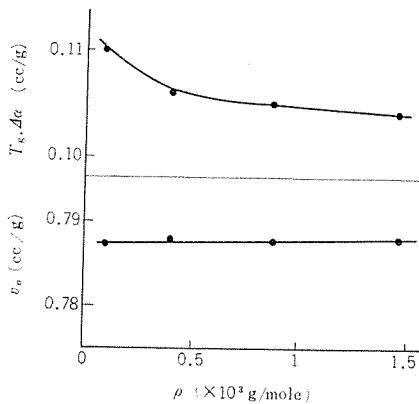


図 3.6  $T_g \cdot \Delta\alpha$ , 占有体積の橋かけ密度変化  
 $T_g \cdot \Delta\alpha$ , occupied volume vs. crosslink density relations.

表 3.3 自由体積が消失する温度とセグメント運動に必要な体積

Temperature at which free volume disappears and critical volume required for segmental motion.

試料番号	$T_g^0$ (°C)	$\gamma v^*(\rho)/\gamma v^*(\rho_1)$
1	-207	1
2	-219	0.722
3	-239	0.458
4	-244	0.400

で表わせるので式(3.8)は次式で表わされる。

$$\eta = \eta_0 \exp\{\gamma v^*/\bar{v}_m \alpha(T - T_0)\} \dots \quad (3.10)$$

ここで  $\alpha$  は熱膨張係数、 $\bar{v}_m$  は分子の体積、 $T_0$  は  $v_f$  が消失する温度、 $\eta_0$  は定数である。 $\eta$  は動的弾性率  $E'' (= E \tan \delta)$  と比例関係にある<sup>(21)</sup>ので図 3.1 のデータを適用する。 $T > T_g$  の領域で式(3.10)の最も確かな  $T_0$  を選んで  $\log \eta \sim 1/T - T_0$  プロットを行なえば直線が得られることを意味し、その傾きより  $\gamma v^*/\bar{v}_m$  が求められる。 $T_0$  は式(3.7)の占有体積から求め  $\alpha$  にガラス転移点前後の熱膨張係数の差を用いて計算した。結果は No. 1 の  $\gamma v^*/\bar{v}_m$  を 1 としたときの比較値  $\gamma v^*(\rho)/\gamma v^*(\rho_1)$  を表 3.3 に示す。高分子の場合  $\bar{v}_m$  を分子鎖の容積と考えれば橋かけの減少によってより小さな空孔で分子鎖運動が可能なことがわかる。

#### 4. む す び

エポキシ樹脂の橋かけ密度を変化させた同族体試料について力学的性質とガラス転移現象について調べた。その結果、比体積の温度依存性から求めたおのおのの試料の占有体積はほぼ等しいが、自由体積分率は増加する傾向にある。このことから橋かけのおもな効果は自由体積を減少させることが結論される。

自由体積理論から橋かけ密度が減少とともに自由体積が消失する温度は低側へ移行し、分子鎖運動に必要な空孔はより小さくなることが想像される。 (昭和 46-4-7 受付)

### 参 考 文 献

- (1) D. H. Kaelble : SPEJ, 15, 1,071 (1959)  
 (2) D. E. Kline : J. Polym. Sci., 47, 237 (1960)

- (3) D. E. Kline, J. A. Saver : SPE Trans., 2, 21 (1962)
  - (4) C. A. May, F. E. Weir : SPE Trans., 2, 207 (1962)
  - (5) T. K. Kwei : J. Polym. Sci., A-2, 4, 943 (1966)
  - (6) F. R. Dammont, T. K. Kwei : J. Polym. Sci., A-2, 5, 761 (1966)
  - (7) T. Murayama, J. P. Bell : J. Polym. Sci., A-2, 8, 437 (1970)
  - (8) D. Katz, A. V. Tobolsky : J. Polym. Sci., A, 2, 1,959 (1964)
  - (9) A. Charlesby, M. Ross : Proc. Royal Soc., A 217, 122 (1953)
  - (10) E. Butta, A. Charlesby : J. Polym. Sci., 33, 119 (1958)
  - (11) 柴山 : 高化, 18, 183 (昭36)
  - (12) 島崎 : 工化誌, 64, 1,295 (昭36)
  - (13) 柴山, 児玉 : 高化, 20, 587 (昭38)
  - (14) A. Shimazaki : J. Polym. Sci., C, 23, 555 (1968)
  - (15) 柴山 : 色材, 35, 2 (昭37)
  - (16) 柴山 : 三菱電機技報, 37, 1 (昭38)
  - (17) M. L. Williams et al. : J. Am. Chem. Soc., 77, 3,701 (1955)
  - (18) 柴山 : 高化, 19, 543 (昭37)
  - (19) 平井 : 日化誌, 75, 683 (昭29)
  - (20) M. H. Cohen, D. Turnbull : J. Chem. Phys. 31, 1,164 (1959)
  - (21) S. D. Gehmann : J. Appl. phys., 13, 402 (1942)

正誤表

本誌45巻2号に掲載の論文、「VE-30P形バンデグラーフ 加速器」に誤記がありまし  
るので、下記のとおりに訂正いたします。

ページ	誤	正
230 ページ 左下から 5 行目	……が最高 $250 \text{ mA}$ の……	……が最高 $250 \mu\text{A}$ の……

# 半導体集積回路の製造におけるガスプラズマ技術の応用

植松 滋幸\*・阿部 東彦\*・奈良愛一郎\*

## Application of Gas Plasma Technique to the Fabrication of Semiconductor Integrated Circuits

Central Research Laboratory Shigeyuki UEMATSU・Haruhiko ABE  
Aiichiro NARA

In the manufacture of semiconductor integrated circuits, multifarious techniques are used. Recently, gas plasma technique is paid much attention for the improvement of performance and productivity. Further, this new technique does not pollute the water and air. This technique is available for the processes of (1) cleaning the surface of a wafer, (2) the removal of a photolithographic resist on wafer, (3) the formation of conductor and insulator thin films, and (4) the formation of fine patterns on wafer. It is very important to use an appropriate plasma available for each purpose.

The article discusses mainly the experimental results when the plasma technique is applied to the process (2), and also the problems to be studied for developing the plasma technique further.

### 1. まえがき

ガスプラズマ技術の半導体集積回路製造に関する応用は、スパッタリングとガスエッチング工程に見られる。前者は半導体表面の金属あるいは絶縁物薄膜の製作<sup>(1)</sup>やエッチング<sup>(2)</sup>を行ない、後者はガスプラズマ中に半導体ウエハを浸すことにより、写真製版工程で使用するホトレジスト膜の除去<sup>(3)</sup>や半導体表面の清浄化を行なうものである。

スパッタリング現象が見出されて以来、放電管の陰極を損傷する主役として厄介視されたが、超小形回路の開発が進むに従って、かえって、高融点金属薄膜の製作法として注目されてきた<sup>(4)</sup>。

その後、ハイブリッド集積回路の開発に関して種々のプラズマ装置やスパッタ装置、また、放電形式が検討され、現在、ほとんどすべての材料の薄膜化が可能となった。また、真空蒸着で製作した膜と比較すると、下地に対する接着性が良いこと、下地のおうとつ(凹凸)による蒸着粒子の影ができるないこと、膜厚の均一性が良いことなどの長所を持つことが予想される。

逆スパッタリングは、アルゴンあるいはクリプトンなどの不活性ガス放電中の正イオンが、負電位に置かれた半導体ウエハを衝撃させてエッチングを行なうもので<sup>(5)</sup>、化学エッチングよりも鋭いエッヂを持つパンの製作が可能であり<sup>(6)</sup>、半導体素子や薄膜素子の性能向上に役立つ技術として期待されている。さらに、化学薬品を使用しないために薬品事故や公害を起こすおそれがなく、また、製造工程の省力化・自動化に結びつくものと思われる。

ガスプラズマ技術のエレクトロニクスへの応用は古くから試みられ、たとえば、コンデンサ用誘電体膜の製作技術として、モノマーの重合や有機物の分解現象が注目されてきた。最近では、半導体素子の表面保護膜として有用な窒化シリコン膜の製作法として検討が進められてきた<sup>(8)</sup>。

他方、反応性に富む活性ガスを用いて有機物質の分解や、半導体表面に形成された酸化物層や汚染物質の除去を行なうことが検討され<sup>(9)</sup>、集積回路のパンを半導体ウエハ上に形成するのに使用したホトレジスト膜の除去に採用されている<sup>(10)</sup>。

以上述べた、ガスプラズマ技術は比較的低温低濃度のプラズマ現象に

関して進められてきた研究成果の現われであり、特に、高周波放電や流体としてのガスの流れや磁場とプラズマの相互作用などの知見が、今日のプラズマ装置の性能向上に寄与しているものと思われる。

しかしながら、これらのプラズマ装置を半導体製造工程に取り入れた際に問題となるのは、プラズマが半導体表面に影響を与えることである。この問題については、検討が進められているが<sup>(11)</sup>、MOS形LSIのごとく本質的に半導体表面現象を利用するデバイスにとっては、半導体表面とプラズマとの関係を明らかにすることは非常に大切なことである。

ここでは、プラズマ処理装置を中心に最近の半導体集積回路製造への応用例として、感光性樹脂の除去、逆スパッタによるパンニングおよびスパッタリングによる半導体素子へのメタライゼーションについて述べる。

### 2. プラズマ装置

ガスプラズマは、電子・イオンおよび中性粒子から構成されており、中性粒子の多くは励起状態にあるものと思われる。これらのプラズマを半導体集積回路の製造に応用する方法は、大別すると、1) ガスプラズマ中のイオンが電界から受けるエネルギーを利用する。2) 励起されている多数の中性粒子の化学的ポテンシャルを利用する。になる。

これらのガスプラズマの物理的・化学的性質は気体の種類(不活性ガス・反応性ガス・混合ガスなど)、動作圧力および放電形式(電極構造、配置、印加電圧および磁界など)によって、著しく異なることが知られている<sup>(12)</sup>。したがって、これらのプラズマ生成条件を、目的とする半導体製造工程に合致させる必要がある。

半導体集積回路に対するプラズマ技術の応用は、次のとおり分類に集約できる。

(1) 導体および絶縁体薄膜の製作

(2) 薄膜の微細パン形成

(3) 半導体表面の清浄化やホトレジスト膜の除去

他方、プラズマ装置を作用からながめると、次の2項にまとめることができる。

(a) プラズマ中のイオンと被処理物との物理的反応

(b) プラズマ中の励起中性粒子と被処理物との化学的反応

前者(a)の代表例はスパッタリングによる半導体上のメタライゼーションであり、高速イオンをPt, Au, Alなどのターゲットに衝突させることによって、ターゲット材料の原子あるいは分子を自由空間中に飛び出させ、これらの飛しょう(翔)粒子を半導体ウエハ上に付着させる。(b)の代表例は、酸素プラズマによるホトレジスト膜の除去であり、励起された活性な中性粒子と有機物との反応により、ホトレジスト膜を分解、気化させる<sup>(3)(13)</sup>。

上述の半導体製造へのプラズマ技術の応用に際して考慮すべき点は、半導体製造工程の目的にかなったプラズマを使用することであり、したがってプラズマ発生方式の選択が重要となる。

プラズマ発生装置は次のように分類できる。

- (i) 高周波放電 { 内部電極方式  
外部電極方式 }
- (ii) 直流放電 { 热陰極方式  
冷陰極方式 }

図2.1にこれらの放電形式の原理図を示す。高周波放電は、熱陰極直流放電に比較して、ほとんどすべてのガスが使用できる特長を持っている。特に、外部電極方式の高周波放電では、電極材料による半導体ウエハへの汚染がなく、純粋にガスプラズマによる反応のみが期待できる。このことは、外部電極方式の高周波放電形式が半導体集積回路に対する汚染を避けなければならない製造工程に最適であり、また、量産性の点もすぐれている。

他方、直流放電、特に熱陰極放電は金属薄膜の製作に応用されるが、使用可能なガスの種類に制限があり、プラズマの安定性や再現性に問題があり、また、処理枚数が少ないなどの欠点を有する。

一般に、半導体集積回路の製造に用いるプラズマ装置は次のような条件を満たすことが望ましい。

- (ア) 短時間に数多くのシリコンウエハが処理できること。
- (イ) プラズマの再現性と安定性がすぐれていること。
- (ウ) プラズマおよび中性ガスの空間密度分布が均一であること。
- (エ) 操作が容易であり、もし誤った操作を行なっても故障しないこと。

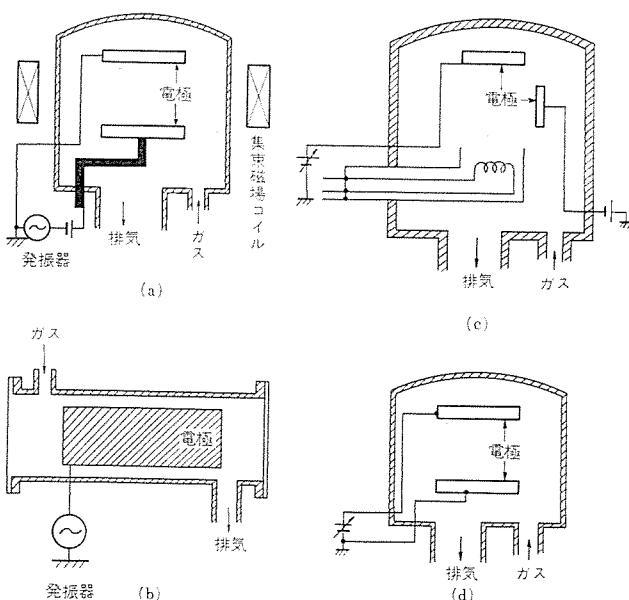


図2.1 プラズマ装置  
Plasma apparatus.

### 3. 半導体製造への応用例

#### 3.1 感光性樹脂の灰化除去

図3.1に示したような通常の半導体集積回路製造における写真製版工程では、エッチング終了後、レジストを熱濃硫酸または熱有機酸処理によって基板から剥離除去する。ところが、高い化学的親和力をもつた酸素プラズマ中に、レジストの塗布された基板を置くことにより、レジストを除去できる<sup>(3)(13)</sup>。この方法は、化学薬品を使用しないという意味でドライプロセスと呼ばれ、集積回路製造用の新しい処理技術として注目されている。表3.1に、従来の薬品処理法との比較結果を示した。

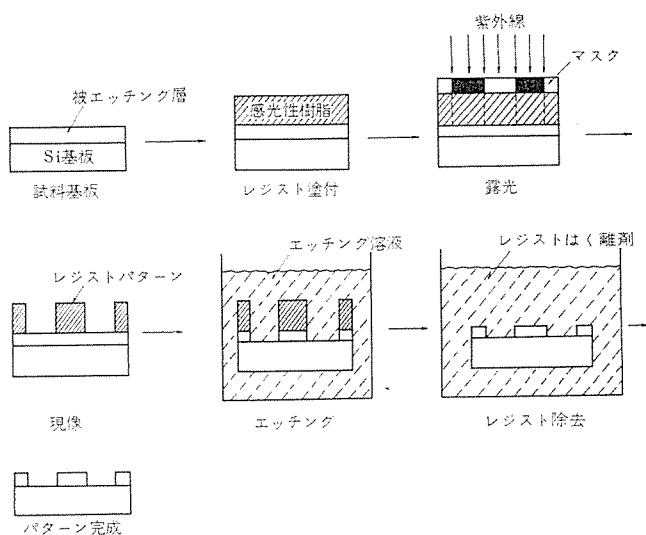


図3.1 写真製版工程  
Photolithographic process.

表3.1 ドライ方式とウェット方式の比較  
Comparison between dry system and wet system.

処理方法	ドライ方式	ウェット方式
	ガスプラズマ(O <sub>2</sub> , Ar)	熱濃硫酸、熱有機酸
安全性	無害、無毒	危険物、劇物
処理時間(比率)	1/3 ~ 1/4	1
処理能力(比率)	5 ~ 8	1
コスト(比率)	1/1,000 ~ 1/10,000	1
自動化	可能	困難

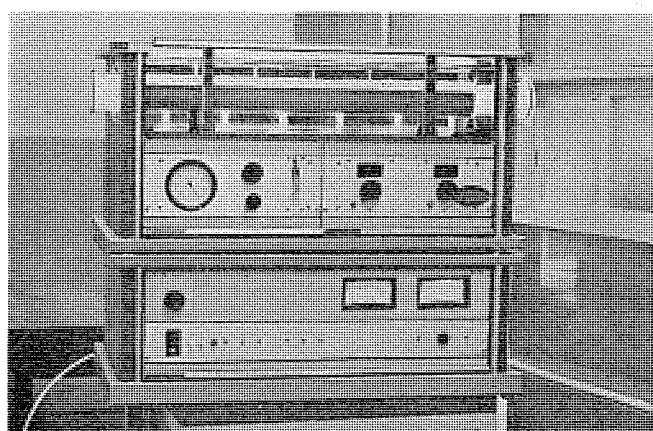


図3.2 低温プラズマ灰化装置  
Low temperature plasma incineration device.

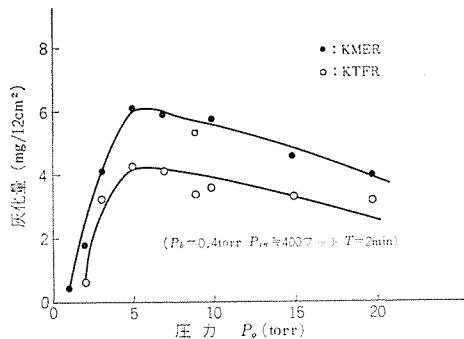


図 3.3 酸素圧力 ( $P_o$ ) と灰化量 ( $W$ )  
Relation between  $O_2$  pressure ( $P_o$ ) and  
weight loss ( $W$ ).

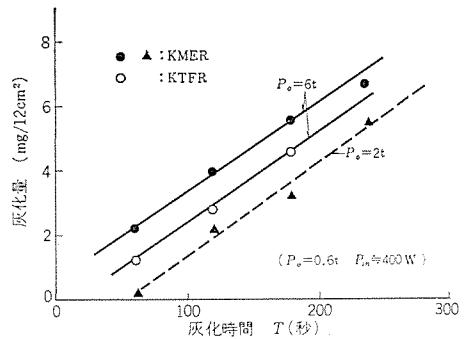


図 3.4 灰化時間 ( $T$ ) と灰化量 ( $W$ )  
 Relation between incineration-time ( $T$ )  
 and weight loss ( $W$ )

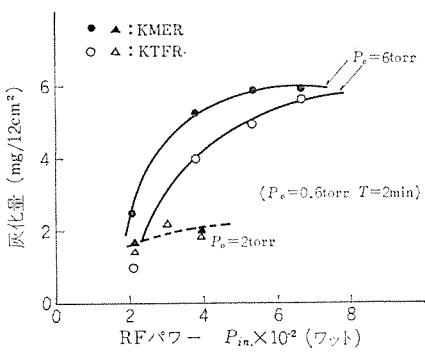


図 3.5 RF パワーと灰化量 ( $W$ )  
Relation between RF power and weight loss ( $W$ ).

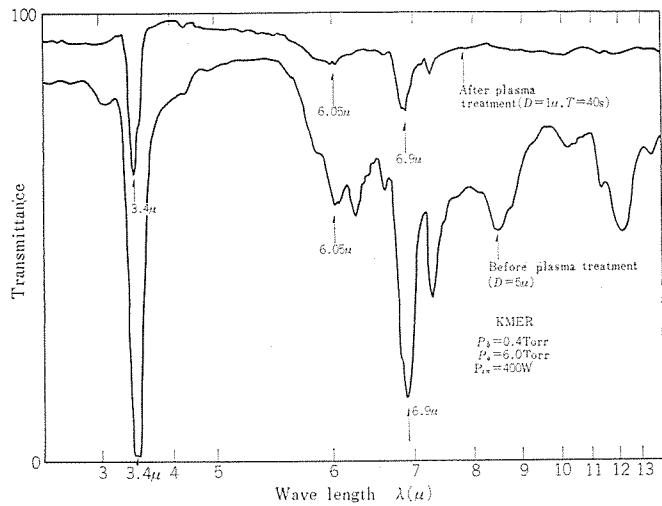


図 3.6 プラズマ処理によるレジストの赤外線吸収スペクトルの変化  
Change of infrared spectrum of KMER by O<sub>2</sub> plasma treatment.

次に酸素プラズマによる灰化実験の結果を示す。

使用したレジストは IC 製造で常用されている感光性樹脂 (KMER, KTFR : コダック 社製) を用いた。樹脂はシリコン基板上に塗布した後、光および熱処理を施した<sup>(14)</sup>。レジストの灰化量は重量法で、またレジストの変化は赤外線吸収 スペクトル (IR) 法で調べた。基板上の残留レジストの有無は、X 線マイクロアナライザ法 (EMX) で調べた。

図3.3に、酸素圧力  $P_0$  と灰化量  $W$  との関係を示す。 $P_0 \approx 5\sim 6$  Torr で  $W$  が最大になるが、これは、この圧力で励起酸素原子あるいは分子が多量に発生しているためであろう。 $P_0$  の小さい領域では、酸素イオンの数は増加するが、励起原子の数は逆に減少し、したがって灰化量も減少する。

図3.4は灰化時間  $T$  と灰化量  $W$  との関係を示す。灰化速度はほとんど一定値を示す。このことは、レジスト層は表面から順次灰化されていくことを意味し、ガス圧の違ひは安定灰化状態に達するまでの時間の長・短にきいてくる。灰化量が印加高周波電力によって変わる様子を図3.5に示した。したがって、最適灰化条件として、 $P_0=6\text{ Torr}$ 、印加高周波電力400ワットとしたときの灰化速度は  $0.5\text{ mg/cm}^2\cdot\text{m}$  となる。

次に、酸素プラズマ処理後のレジストの変質を赤外線吸収スペクトルの変化から考察する。図3.6中に示した3.4, 6.05, 6.9 μの代表的各吸収位置の帰属は次のとおりである<sup>(15)</sup>。(使用したレジストはポリイソブレン系樹脂である)。

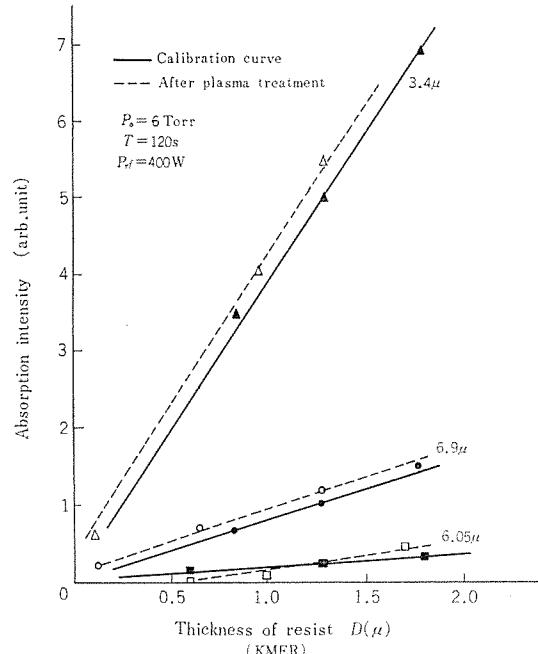
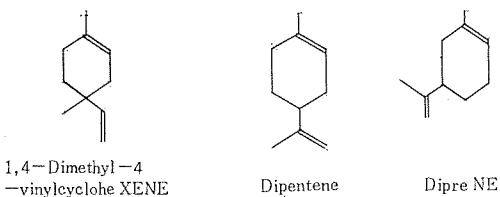
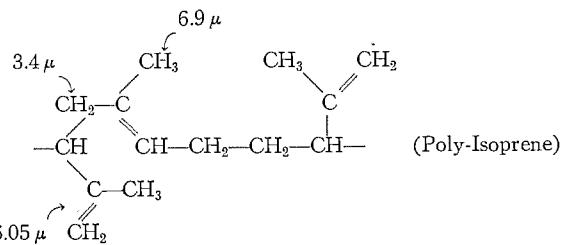


図 3.7 レジストの IR 吸収スペクトル強度の膜厚依存性  
Relation between infra-red absorption intensity and thickness of resist.



### 図 3.8 イソプレンのダイマー Formulas of isoprene dimers.



灰化が進むにつれて、レジストの膜厚は次第に減少し、吸収強度も全体的に小さくなる。この関係を図3.7に示す。検量線と比較した場合、 $6.05\mu$ の吸収は途中で著しく小さくなっている。この結合は主鎖の影響を強く受けやすい位置にある。一般に、ポリイソブレンを

熱分解した場合、モノマー単位(イソプレン)で主鎖が切れるのではなく、複数個のモノマー単位(二つ結合したダイマーが最も多い)で分解すると考えられている<sup>(16)</sup>。その代表例が図3.8で、いずれも環化し、二重結合の位置も変わっている。この変化が、前述のIRスペクトルの変化と対応するものと思われる。

感光性樹脂(たとえば、KMER)はポリイソプレンを主体とした高分子溶液で、その中に増感剤・無機物性不純物などが数%含まれている<sup>(17)</sup>。含有不純物の代表例は酸化第2すず(SnO<sub>2</sub>)であり(図3.9)，通常の精製法では完全除去は不可能である。したがって、酸素プラズマ処理によりレジストの樹脂成分(有機物)は灰化除去されるが、

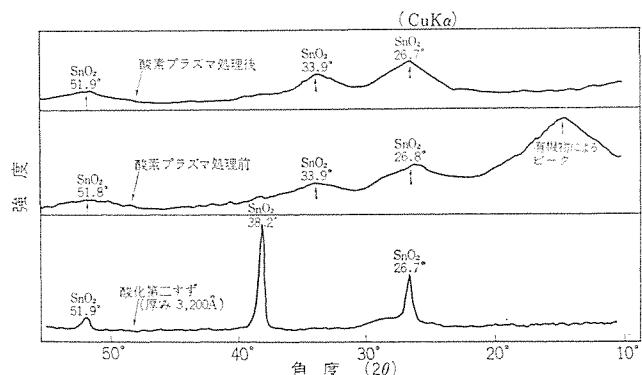


図3.9 KMER不純物のX線回析図  
Diffracted X-ray chart of impurities in Kodak metal etch resist (KMER).

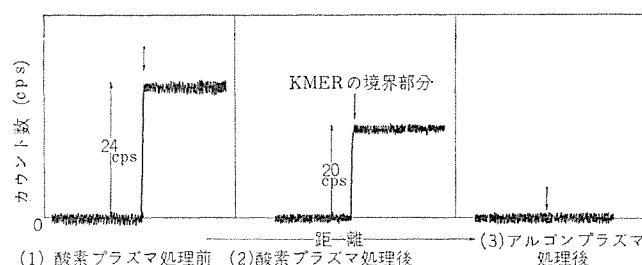


図3.10 EMX分析法によるレジスト中のSn量  
Quantities of Sn in KMER by EMX analysis.

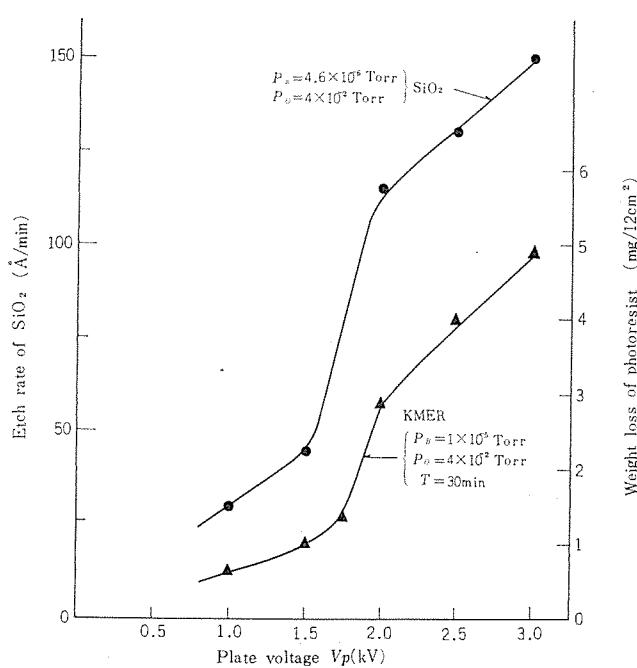


図3.11 印加高周波電力とエッチング量との関係  
Dependence of etch rate and weight loss on RF power.

上記無機不純物は残さ(渣)として基板上に残る。これは、基板上にアルミニウム薄膜を蒸着すると、残さ部分が白濁することからも知られ、またEMX分析法でも確認された(図3.10)。このような不純物は素子の特性を変化させるおそれがある。また金属残さは低圧アルゴンプラズマ処理により除去できる場合もある。

### 3.2 逆スパッタリング

逆スパッタリング装置の原理図は図2.1に示したものと同一である。すでに述べたように、この方法は、プラズマ中の正イオンと被処理物との物理的反応、すなわち、衝突によるスパッタリング現象を利用したもので、金属だけでなく絶縁物も容易にスパッタできる。平行平板形電極上におかれた絶縁体表面は負の電位にバイアスされ、プラズマ中の正イオンは加速され、絶縁体表面に衝突し、表面層のスパッタリングが起こる<sup>(2)</sup>。しかし、この方法は、量産性が低く、しかも電極面内でプラズマの均一な領域が比較的狭い等の欠点を有する。またこの方法は、別にイオンエッチング法と呼ばれ、これによって鋭いエッヂのパターンを作成できる。しかし、半導体表面に高速イオンが衝突することによって半導体表面の帶電や、結晶の損傷のために半導体素子の電気特性が変化するおそれがある。

イオンエッチング法によって半導体基板上に微細パターンを作成する場合、下地の保護膜として普通、感光性樹脂を使用する。したがって、感光性樹脂とシリコン酸化膜のエッチング率を知ることがたいせつである。図3.11に高周波電源電圧 $V_p$ とシリコン酸化膜のエッチング率および感光性樹脂の質量損失との関係を示した。この図から、衝撃イオンのエネルギーが一定の値を越えるとスパッタ率が急速に増大することを示している。この結果はスパッタリングの理論的予想および他の実験結果とも一致する。図3.12はシリコン酸化膜のエッチング率および感光性樹脂の質量損失とアルゴンのガス圧との関係を示す。エッチング率、質量損失共に $4 \sim 5 \times 10^{-2}$  Torr付近で最大になり、圧力を増すとともに急激に減少する。このことは $P_0 = 4 \sim 5 \times 10^{-2}$  Torr付近でイオンのエネルギーおよび密度が最大になり、圧力の増加とともに、イオンのエネルギーが急激に減少するためである。さらに、イオンエッチ

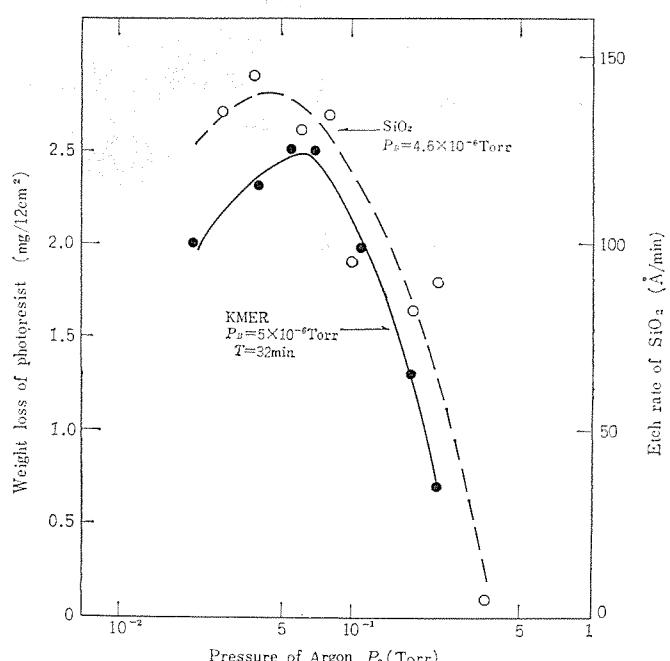


図3.12 アルゴンガス圧とエッチング量との関係  
Dependence of etch rate and weight loss on argon gas pressure.

グ技術において、残留酸素ガスによる下地保護用感光性樹脂の灰化を最小限におさえるために、真空容器はあらかじめ  $10^{-6}$  Torr 以下に排気しておく必要がある。これは、残留ガスの量が増大すると感光性樹脂の質量損失が増大することから推察される。またシリコン酸化膜は時間的に一定の割合でエッティングされるが、感光性樹脂はイオン衝撃による組成変化を起こし、一定の放電条件の下では、一定の時間以後は、もはやスパッタされなくなる。すなわち、イオン衝撃による硬化現象を示す<sup>(13)</sup>。

### 3.3 メタライゼーション

半導体集積回路に対するスパッタ技術の応用の第一歩は、いわゆるビームリード素子の実験であった。しかし、通常の半導体素子製造工程では真空蒸着法や気相成長法と競合する立場にある。

半導体素子の製作には金属や絶縁体薄膜を付着する段階があるが、これらの膜の役割は、金属の場合、1) 半導体とのオーム性接触、2) 導電性であり、絶縁体の場合は、1) 半導体表面の保護効果、2) 絶縁耐圧である。しかしながら、半導体製造工程に対するスパッタ膜の適用について量産性が問題となる。この点、気相成長法や真空蒸着法などの成膜法に比較して劣る。しかし、スパッタ膜は付着力が強く、特に高温で熱処理が施せない半導体素子に対して効果的である。通常、真空蒸着により半導体上に付着したメタライズ膜を高温で熱処理することにより、半導体と金属とのオーム性接触を形成するが、スパッタ法では条件を適当に選べば熱処理は不要になる。図3.13はシリコンに対する白金のメタライズによるオーム性接触の出来具合を示すもので、左半分はメタライズ後に熱処理を施したもので、右半分はスパッタのみで熱処理を行っていない。右半分のコンタクトホールがPtSiの形成により褐色になっているが、左半分はPtSiの合金化になっ

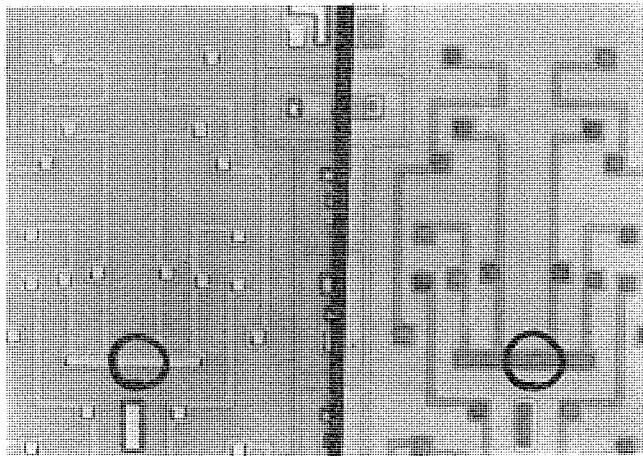


図 3.13 オーミックコンタクトの比較  
A : 蒸着法 B : スパッタ法  
Comparison of ohmic contact.

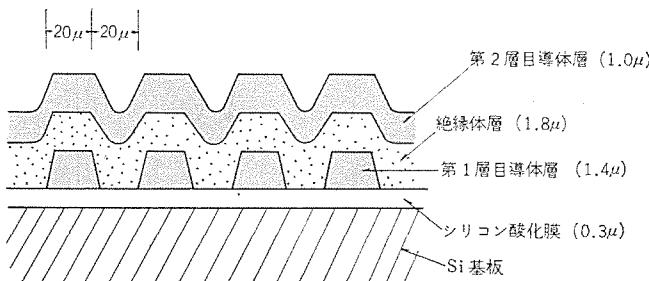


図 3.14 おうとつ面に対するスパッタ膜  
Deposition of the sputtered thin film on the uneven surface.

ていない。このことから、スパッタリングは半導体とのオーム性接触形成に有効であることがわかる。

半導体集積回路の信頼性をそこなう現象に半導体表面上のおうとつによる配線の断線があるが、これはスパッタリング効果により緩和できる。図3.14はおうとつの激しい下地電極上に高周波スパッタリングによりガラス薄膜を全面に形成し、さらに上部電極を全面に付着したパターンの断面の模型図である。この場合、絶縁耐圧は  $10^6$  V/cm あり、平行平面形の金属一絶縁膜一金属構造の耐圧とほとんど差がない。このことはスパッタ膜がおうとつの多い基板に有効であり、たとえば多層配線LSI製造用メタライゼーションとして効果的であることを示している。スパッタ膜の膜厚の均一性は良い。たとえば、ターゲットの大きさ  $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ 、ターゲットと基板間の距離  $7\text{ cm}$  の場合、 $8\text{ cm} \times 8\text{ cm}$  の基板上の膜厚分布は、光学濃度の測定結果から、 $\pm 1\%$  程度の均一性を示す。

## 4. 考 察

前章までガスプラズマ技術の半導体集積回路製造へのもろもろの応用例について述べてきたが、ここではプラズマ処理技術を利用する場合に注意すべき事柄について述べる。

検討すべき事項は次の三つに要約できる。

(1) 半導体集積回路製造工程の適用場所に合致した、プラズマ条件およびその処理方法の正しい選定

(2) プラズマ中の正イオン、あるいは電子の半導体表面に対する衝撃による素子の特性の変化<sup>(18)</sup>

(3) プラズマ処理による半導体表面の再汚染の可能性

ガスプラズマ処理技術を半導体集積回路製造工程に適用する場合に最もたいせつなことは、その目的に合致したプラズマ条件、使用すべき装置の選択あるいは開発である。特に、使用する気体の選択と処理条件、あるいは2~3種類の気体プラズマ処理をする場合の処理順序の正しい決定は、ガスプラズマ処理による被処理半導体素子の特性の劣化の防止、製品の歩どまりの向上のためには重要である。

ガスプラズマ技術を製造工程に導入する場合の最大の問題点は、上述の(2)の項目である。半導体素子を処理する際、その表面がプラズマと接触するために、プラズマ中のイオンあるいは電子の衝撃による損傷や、その侵入による電荷の蓄積を受け、素子の電気的特性が設計値からずれるおそれがある。実際、前述のイオンエッティング法によって微細パターン作成した後の素子には、p-n接合における耐圧の低下が観測される場合がある。さらに、MOS構造素子のように本質的に半導体表面の特性を利用したデバイスでは、半導体表面の微小な変化が素子の特性の大きな変化をもたらす危険がある。バイポーラIC製造工程でシリコン表面の清浄化にガスプラズマを使用しても、シリコン基板表面にはほとんど影響を与えないことが電気的特性の測定結果から判明している。しかし、プラズマ処理をMOSデバイスのゲート酸化膜上から行なうと、そのフラットバンド電圧  $V_{FB}$ 、あるいはしきい値電圧は大きく変化し、リーク電流の増加をもたらす場合もある。これはシリコン酸化膜内へ浸入した荷電粒子による電子-正孔対の発生、トランプ準位の発生、界面準位の変化等に帰因する。しかし多くの場合、このような特性の変化は温度処理、B-T処理等の事後処理によって回復する。図4.1にMOS構造のゲート酸化膜の上からプラズマ、プラズマ中のイオンおよび電子を照射した後の容量-電圧特性の変化の一例を示す。ここで注目すべきことは、容量-電圧特性に与えるイオンと電子の効果は互いに逆であるということである。

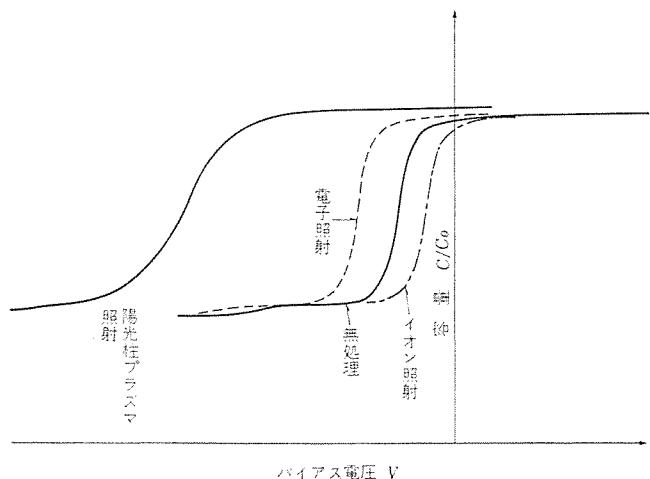


図 4.1 MOS C-V 特性に及ぼす プラズマの影響  
Influence of bombardment of plasma, ion and electron on C-V characteristics of MOS structure.

ガスプラズマ処理によって、半導体表面上の有機物あるいは無機物等の不純物を除去する際の問題点の一つは、不純物の再付着による表面の汚染である。先に述べた感光性樹脂除去の場合、大部分の樹脂成分は酸素プラズマとの接触化学反応によって分解し、気体状になって外に排出される。しかし、一部は容器の内壁に付着したり、あるいは組成の変った樹脂膜として半導体表面上に残ることも予想されるし、また樹脂中の微量金属粒子はそのまま半導体表面上に残る。このうち、突然内壁に付着した樹脂成分はプラズマ衝撃によって再び半導体表面に再付着する可能性がある。このように表面に付着した有機物、あるいは無機物の不純物は素子の特性の劣化の重要な要因となる。ガスプラズマによる半導体表面処理技術では、表面に付着した金属微粒子をいかに効果的に除去するかがたいせつであり、この問題は使用するガスの種類を選択することによって解決できる。

## 5. む す び

以上の議論から推察されるように、半導体集積回路製造用プラズマ技術は、近年急速に研究実用化されつつある。特にプラズマによるスパッタ現象を利用した金属あるいは絶縁膜の作成技術は、研究室段階ではほぼ確立されたものといえる。しかし、現在の装置なり技術なりがそのまま量産工程に適用できるか否かということは、また別のもんだいである。最近の低温低密度プラズマによる半導体表面清浄化技術の進歩には目ざましいものがあり、遠からず現在の化学薬品処理工程にとって代わるものと期待されている。これは製造工程の簡素化・自動化を可能にするだけでなく、薬品による環境汚染の心配もなくなる。

将来、プラズマ技術が半導体素子製造工程に正しく使われるためには、前章で述べたいくつかの問題点、特に半導体素子の電気的特性に及ぼすプラズマの影響を十分検討する必要がある。

これはガスプラズマ処理技術の正しい適用方法と、新しい適用分野の開拓へと続くものである。

終わりに本論文の作成に当たり、多大のご指導をいただいた関係

各位に厚くお礼申しあげます。

## 参 考 文 献

- (1) たとえば L. Holland : Vacuum Deposition of Thin Films, p. 401 (Chapman and Hall, London) (1966); R. W. Berry et al : Thin Film Technology, p. 191 (D. Van Nostrand Co., Inc., Princeton) (1968)
- (2) たとえば R. T. C. Tsui : Ion Etch Technique and its Application, p. 53 (2nd Symposium on the Deposition on Thin Films by Sputtering, Rochester) (1967)
- (3) たとえば S. M. Irving : A Dry Photoresist Removal Method, 2, 26 (Kodak Photoresist Seminar Proceedings—1968 Ed.)
- (4) D. Gerstenberg : Properties of Tantalum Sputtered Films, Proceedings 1962, Electronics Components Conference, p. 57 (1962)
- (5) たとえば織田：スパッタリング技術の最近の進歩、真空, 12, No. 4, 116 (昭44)
- (6) R. Heil et al : Sputter Etching of Microcircuits and Components, Solid State Technology, 11, 42 (1968)
- (7) 植松、近藤：イオネッティング法を用いた微細パターンの製作、昭和45年電気四学会連合大会講演論文集 No. 422
- (8) M. Parnell : Glow-Discharge Formation of Inorganic Films for Capacitors, Electrical Communication, 43, 63 (1968)
- (9) 植松、阿部、奈良：未発表論文
- (10) S. M. Irving : A Dry Photoresist Removal Method, Kodak Photoresist Seminar Proceedings, Los Angeles, II, 26 (1968)
- (11) 豊蔵：Sputtered  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ -Si系の界面に及ぼす熱処理効果、日本学術振興会第44回研究会資料 No. 236；植松、中尾、近藤： $\text{SiO}_2$ -Siに及ぼすスパッタリングの影響、同上 No. 237；中塚：Arプラズマの  $\text{SiO}_2$ -Si系に及ぼす影響、同上 No. 238
- (12) L. B. Loeb : Basic Process of Gaseous Electronics, University of California Press, Berkeley, (1961)
- (13) 奈良、阿部、植松、山崎：感光性樹脂のプラズマによる分解、第31回応用物理学会講演予稿集, 2, 301 (昭45)
- (14) Chemical Milling with Kodak Photosensitive Resists, E. Kodak Co. (1968)
- (15) L. Binder : J. Polymer Sci., 40, 37 (1963); I. Kössler : Collection Czechoslov. Chem. Commun., 26, 2,419 (1964); J. Vodehnal : Ibid, 29, 2,428~2,435, 2,859~2,862 (1964); D. W. Fraga : J. Polymer Sci., 41, 522 (1959); L. Hunter : Photographic Sci. and Eng., 13, No. 5, 271 (1969)
- (16) J. Hackathorn : Polymer Letters, 8, 617 (1970)
- (17) A. Harrell, M. Streater : Kodak Photoresist Seminar Proceedings, 1, 18 (1968)
- (18) 阿部、奈良、植松：第30回応物学会予稿集 2, 218 (昭45)

==== 最近登録された当社の特許 =====

名 称	登 録 日	登 録 番 号	発 明 者	関 係 場 所
ネットワーク 給電線保護装置	44- 8- 6	550836	森 健	神戸製作所
ネットワーク 給電線保護装置	44- 8- 6	550837	森 健	神戸製作所
エレベータ扉の制御装置	44- 8- 6	550838	高村 明・小沢靖彦	稻沢製作所
電圧変動表示装置	44- 8- 6	550833	武田克己・三好明好	福山製作所
静止回路装置	44- 8- 6	550834	森 健	神戸製作所
パルス 幅変調装置	44- 8- 6	550835	園田幸男	長崎製作所
半導体装置の製造方法	44- 8- 6	550840	赤桐行昌	北伊丹製作所
6極 誘導丹筒形繼電装置	44- 8- 6	550841	三上一郎	神戸製作所
水銀放電灯	44- 8- 6	550830	土橋理博・三上龍夫	大船製作所
保温庫	44- 8- 6	550831	(東邦 弘・野上昭夫 岡上 廉)	群馬製作所
電流一致選択駆動形 磁心記憶装置	44- 8- 6	550831	福永圭之介・畿田博靖	鎌倉製作所
ホール 素子装置	44- 8- 6	550842	杉岡八十一・梶原康也	北伊丹製作所
負荷時 タップ 切換変圧器	44- 8- 6	550843	堤 長之	伊丹製作所
電磁開閉器	44- 8-12	551654	茂手木良夫・吉田太郎	名古屋製作所
回転電機	44- 8-12	551655	松尾 昇	神戸製作所
テープレコーダ の ピンチローラ 操作装置	44- 8-12	551656	和田庄次・上村達雄	郡山製作所
油圧 ブレーキ 制御装置	44- 8-19	552794	金子敏夫・沢井昭雄	鎌倉製作所
トースター	44- 8-19	552795	高沢正二・古屋芳明	商品研究所
ナトリウム 金属封入高圧水銀放電灯	44- 8-19	552797	林 次郎・平野昌彦	中央研究所
電気掃除機	44- 8-19	552798	武井久夫	群馬製作所
アーク 溶接機用 自動電撃防止装置	44- 8-19	552793	竹内友彦・野口昌介	名古屋製作所
電圧変動表示装置	44- 8-19	552796	武田克己・三好明好	福山製作所
補極付無整流子電動機	44- 8-19	552799	河村博敏	神戸製作所
自動調光遮光板	44- 8-19	552800	伊吹順章・山本利雄	中央研究所
薄膜素子の製法	44- 8-21	552801	榎本龍弥	北伊丹製作所
秘話装置	44- 8-21	552802	(小林信三・大西熊一 中村信弘)	通信機製作所
電磁流体発電機の電極装置	44- 8-21	552803	(森川鉄也・伊藤利郎 村井 裕)	中央研究所
レーダ 指示装置	44- 8-21	552804	(種田方寿・遠藤義昭 田 隆吉)	通信機製作所
自動点滅装置	44- 8-21	552805	三好明好	福山製作所
陰極線管	44- 8-22	553360	上羽保雄・塙谷満幸	京都製作所
往復運動制御装置	44- 8-22	553361	浅野哲正	姫路製作所
往復動の制御装置	44- 8-22	553362	浅野哲正	姫路製作所
時計装置	44- 8-25	553884	新川成美	福山製作所
自動 トースター	44- 9- 3	554501	(野畑昭夫・岡上 廉 熊沢 裕)	群馬製作所
光磁気共鳴磁力計	44- 9- 3	554502	小川 徹	中央研究所
沃化物入り高圧水銀 ランプ の点灯装置	44- 9- 3	554508	土橋理博・三上龍夫	大船製作所
ポンプ の保護装置	44- 9- 3	554503	加来政博	長崎製作所
ポンプ の保護装置	44- 9- 3	554504	加来政博	長崎製作所
マルチパルス 信号方式	44- 9- 3	554505	前田良雄・平沢茂一	中央研究所
半導体整流装置	44- 9- 3	554506	清水潤治・中田仗祐	北伊丹製作所
放電加工装置	44- 9- 3	554507	(斎藤長男・小林和彦 荒井伸治)	名古屋製作所
信号検出回路装置	44- 9- 3	554509	川上 昭・中村信弘	通信機製作所
昇降機出発管理方式	44- 9-11	554938	宮城 晃・板垣晃平	稻沢製作所
位相変調装置	44- 9-11	554939	細野 勇	伊丹製作所
静止回路装置	44- 9-16	555086	森 健	神戸製作所
減圧ふん囲気中において使用する溶接又は溶解装置	44- 9-16	555087	山本利雄・島田 弥	中央研究所
固定子に絶縁層を施す方法	44-10- 7	556041	国崎 重・小井川 茂	福岡製作所
放電加工 パルス 発生装置	44-10- 7	556043	(斎藤長男・荒井伸治 小林和彦・太田幹男)	名古屋製作所
電気車制御装置	44-10- 7	556044	小原太郎・森田宣雄	伊丹製作所
フィルタ 保護継電装置	44-10- 7	556045	三上一郎・仁科重雄	神戸製作所
保護継電装置	44-10- 7	556046	北浦孝一	神戸製作所
保護継電装置	44-10- 7	556047	北浦孝一	神戸製作所



# 特許と新案

## イオン発生器付き電気集じん(塵)装置

考案者 原 仁吾・平林庄司・田畠則一

この考案は、電気集じん装置にイオン発生器を組み合わせ、このイオン発生器の動作時間を制御することによって、清浄な自然の空気と同じ程度のイオン濃度を有する空気を送給するようにしたイオン発生器付き電気集じん装置に関するものである。

図において(1)はイオン化電極(2)と集じん電極(3)を備えた電気集じん装置、(4)は主通風機、(5)はイオン発生器、金属細線(6)とこれに対向する金網電極(7)で構成された電極系で示してある。(8)(9)は、細線電極(6)に数μ秒ないし10μ秒の幅を有

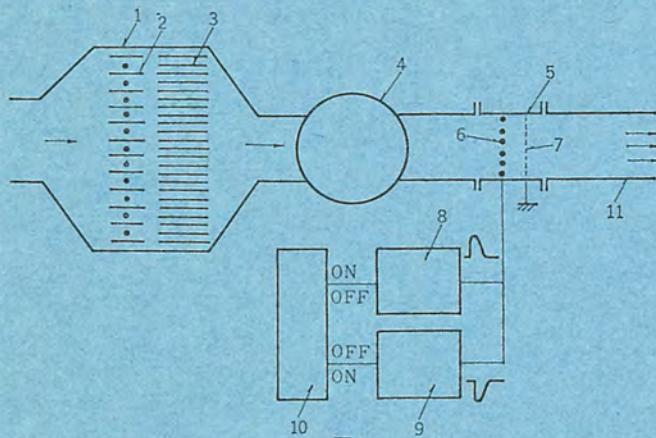


図1

する高電圧の繰返し正パルスあるいは負パルスを印加する正パルス発生器および負パルス発生器、(10)は各パルス発生器の動作時間制御器である。図2は、動作時間制御器(10)によって制御される各パルス発生器の動作時間シーケンスの一例である。

従来の電気集じん装置を室内の空気調整に使用すると、集じん作用と同時に大気中のイオンも除去し、室内の空気は自然の大気とは異なり、正および負のイオン濃度が非常に少ない空気となる。これに対しこの考案によれば、正および負のパルス発生器の動作時間を制御することにより、正あるいは負イオンを任意に発生することができ、自然大気と同様のイオン濃度で、しかもじんあいのない清浄な空気を得ることができるものである。

(実用新案 第877003号) (伊藤記)

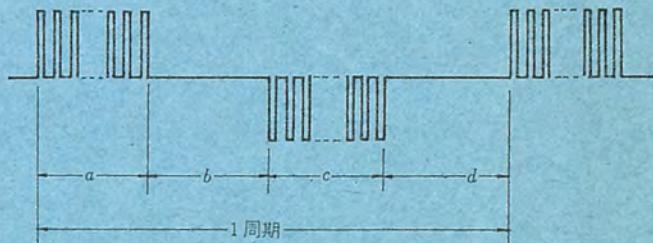


図2

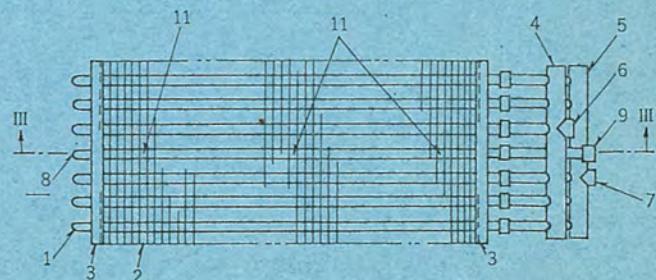
## 加湿装置付き熱交換器

考案者 野田富士夫

この考案は、暖房時使用される加湿器と熱交換器を一つのユニットにまとめて小形化したもので、複数本で管群を構成した温水などの媒体流通管(1)のうち、少なくとも1本を他の流通管の流路と分離して、これを加湿管(8)として用いる。この加湿管(8)は一端に蒸気入口(9)を備え、他端は閉鎖され、複数個の蒸気噴霧口(11)を設けている。

こうして暖房と同時に加湿ができるが、媒体流通管(1)に冷媒を供給すれば、冷房用冷却器としての使用も可能である。

(実用新案 第908219号) (萩原記)



# 特許と新案

## 冷蔵庫の温度調節器

考案者 田中毅・吉田匡一

この考案は、冷蔵庫の温度調節器とくに感温部の取付装置の改良に関するものである。

図1, 2はこの考案の実施例を示すもので、箱形の冷気吹出カバー(18)を、図1に示すように、冷蔵庫の内壁面の冷気吹出部分に着脱自在に取り付け、この冷気吹出カバー(18)の裏面には、図2に示すように、温度調節器(25)の機械部(26)と弾性ブラケット(30)を取り付

けるとともに、温度調節器(25)の感温部(21)を弾性ブラケット(30)に着脱自在に支承している。

上記のように構成した冷蔵庫の温度調節器は、機械部(26)と感温部(21)とが一個所にまとめて取り付けられ、かつ感温部の着脱が容易であるので、交換等に余分な手数と時間を要しないという効果がある。  
(実用新案第893465号)(大須賀記)

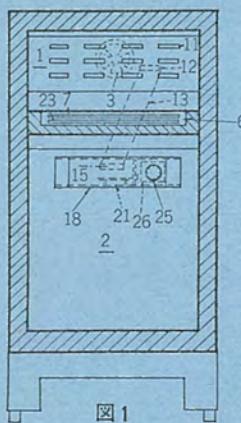


図1

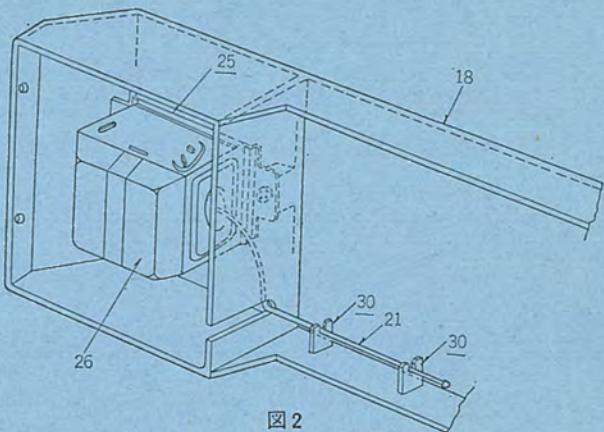


図2

## 電動機のブラシ摩耗報知装置

考案者 長嶺元

この考案は、ブラシの過摩耗を自動的に検知できるようにした電動機のブラシ摩耗報知装置に関するものである。

図において、(1)は電動機フレーム、(2)は整流子、(3)は一对のブラシ、(4)はブラシを進退自在に保持する保持筒、(7)は導電性の押え板、(9)はブラシと押え板との間に介そう(挿)され、かつこの両者を電気的に接続する給電スプリング、(9)は端子で、ブラシが所定寸法に摩耗したときスプリングの下端部と接触導通する。(10)はパイ

ロットランプである。そして、スプリング(8)と端子(9)およびパイロットランプ(10)は、ブラシ(3)と電源間にそう入され報知回路を形成している。

以上のようなこの考案によれば、ブラシが所定の寸法に摩耗したとき、スプリングと端子とが接触導通してパイロットランプを点灯し、新しいブラシと交換する時期を知らせるものである。また、ブラシおよびスプリングに従来の部品をそのまま使用できるため、その交換に不便さがなく、しかも原価高にならないなどの利点がある。

(実用新案第899569号)(近藤記)

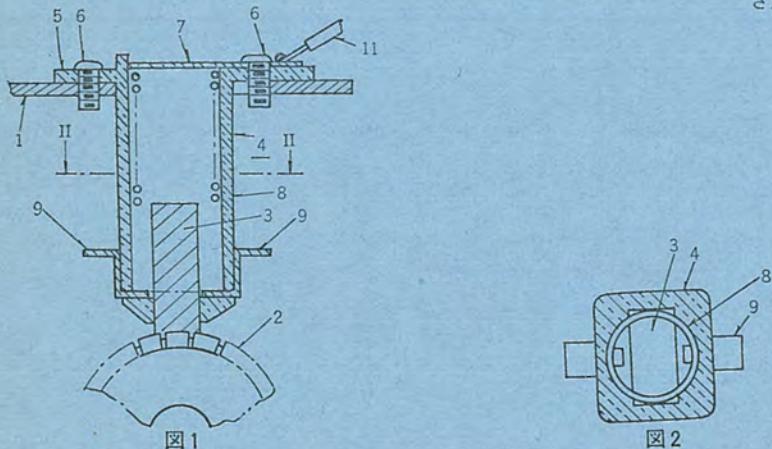
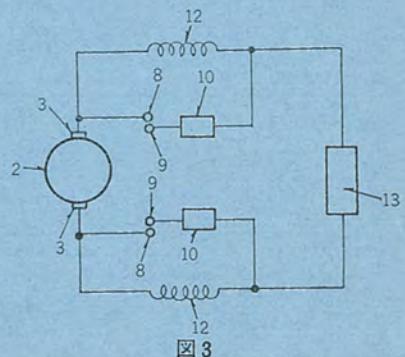


図1



# ノーヒューズしゃ断器の技術動向

福島二郎\*・松尾昭二\*

## Technical Trend of No-Fuse Breakers

Fukuyama Works Jiro FUKUSHIMA・Shoji MATSUO

In 1933 Mitsubishi produced 50 amp. frame no-fuse breakers for the first time in Japan. Since then they have come into wide use with the growth of power generation, and their technical progress is also remarkable. Particularly, type NFU breakers with P. P. F. (permanent power fuse) and type NF 3200 no-fuse breakers of recent development by the Company are epochal products. The former have the world largest interrupting capacity of 200,000 A at 460 V AC, and the latter the rated current of 3200 A at the maximum. However, the demand is getting severer for the safety and reliability of the low voltage equipment with the advance of modern industry.

This paper describes the technical trend of no-fuse breakers and the outlines of Mitsubishi products in this line.

### 1. まえがき

ノーヒューズ しゃ断器は、わが国においては昭和8年に当社が50 A フレームを開発したのが最初である。以来電力の使用量の増大、電気機器の発達に伴い著しく普及し、技術的にも進歩した。現在は各メーカーがそれぞれ多様の機種を製造し、低圧電路用 しゃ断器としては一応そろったような感がある。しかし近代産業の発達に伴い工場の新設・増強・改善が行なわれ、電力の需要がさらに増大し、受電容量および設備容量が増加するとともに、工場設備も著しく近代化・高度化される傾向となった。さらに超高層ビルの建設も続々と実現され、また各種産業の自動化、電気機器の普及等のため、短絡電流は50~100 kA またはそれ以上という大きな値が必要となるとともに、電気設備は高圧・低圧あるいは大容量・小容量を問わず、電力利用の機器に対するエネルギー供給源として高性能・高信頼を要求されており、特に最近は負荷設備の自動制御の高精度、無停電化等の要求も多くなってきている。また保守管理面においても省力化のため、集中監視制御等が実施されはじめ、迅速確実な運営とともに安全性も要求されるようになった。これらの要求に対して、今までのノーヒューズ しゃ断器では、しゃ断容量一つにしても必ずしも十分でない状態である。以下にノーヒューズ しゃ断器の現在ならびに将来の技術動向を述べ、あわせて当社の製品の概要を紹介する。

### 2. ノーヒューズ しゃ断器の現状

#### 2.1 技術動向

各メーカーは需要家の要求に応じて、次の項目に対して努力しつつあると考えられる。

##### (1) しゃ断容量の増大

電源の大容量化に伴い、その短絡電流は増加の一途をたどっている。そのため系統機器を保護する しゃ断器は、大しゃ断容量をもつことが要求されてきている。ノーヒューズ しゃ断器においてもこの傾向は顕著で、100 kA 程度の需要も急激に増加してきており、各メーカーでは高性能製品として大しゃ断容量をもつ製品のシリーズ化を進めている。しゃ断容量増大の方法は大別して、

(a) モールドケースの強化による方法

(b) 限流素子による方法

(c) 限流しゃ断器による方法

によっている。

(a) はしゃ断容量の増大とともに増大するアーカによる熱およびガス圧に対し、機械的・熱的に耐え、絶縁劣化しないモールドの開発が問題となるが、これにはモールド材料ならびに成形技術の進歩が必要である。モールドの材料はフェノール系樹脂が主体であったが、最近はポリエチル系樹脂にガラス繊維を混入補強した強化モールドを使用するものがでてきた。しかし材料の変更のみで画期的に改良される

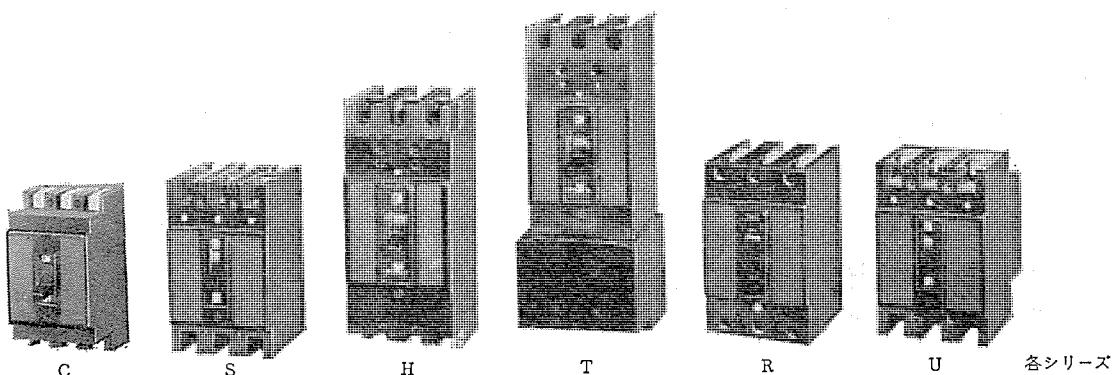


図 2.1 三菱 ノーヒューズ しゃ断器の各シリーズ (100 A フレームの例)  
Series of Mitsubishi no-fuse breaker (An example of 100 A frames)

表 2.1 三菱ノーヒューズ シヤ断器の仕様  
Types and ratings of Mitsubishi no-fuse breakers.

アーチ形		名	NF 30-S	NF 30	50	100	225	400	600	800	1000	1200	1600	2000	2500	3200			
定格電流 A		3,5,10,15, 20,30	10,15,20, 30,40,50	10,15,20, 30,40,50	15,20,30,40, 50,60,75, 90,100	NF 50-S-A (100) NF 50-S-B (225) NF 50-S-C (350)	NF 100-E (100) NF 100-B (250) NF 100-C (350)	NF 200-B (450) NF 200-C (500)	NF 300-B (500)	NF 400-B (550)	NF 500-B (550)	NF 600-B (550)	NF 800-B (550)	NF 1000-B (550)	NF 1200-B (550)	NF 1600-B (550)	NF 2000-B (550)	NF 2500-B (550)	NF 3200-B (550)
定格電圧 V		AC 250	460	550	550	550	550	550	550	550	550	550	550	550	550	550	550	550	
定格しゃ断り 容量 kA		AC 550	—	—	5	5	15	25	30	30	35	35	35	35	35	35	35	35	
AC 460		2.5	2.5	5	7.5	15	30	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	
AC 220		2.5	2.5	5	7.5	20	40	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	
DC 250		1	1	5	5	10	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	
外形寸法 mm		130	138	150	152	165	257	275	406	406	406	406	406	406	406	406	406	406	
外形寸法 mm		75	90	90	105	105	140	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	
外形寸法 mm		68	68	68	86	86	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	
外形寸法 mm		NF 30-C	NF 50-CA	NF 50-C	NF 100-CA	NF 100-C	NF 225-C	NF 400-C	NF 600-C	NF 800-H	NF 1000-H	NF 1200-H	NF 1600-H	NF 2000-H	NF 2500-H	NF 3200-H	NF 2500-H	NF 3200-H	
外形寸法 mm		3, 5, 10, 15, 20, 30	10, 15, 20, 30, 40, 50	10, 15, 20, 30, 40, 50	60, 75, 90, 100	60, 75, 90, 100	125, 150, 175, 200, 225	250, 300, 350, 400	500, 600	500, 600	500, 600	500, 600	500, 600	500, 600	500, 600	500, 600	500, 600	500, 600	
外形寸法 mm		AC 220	460	460	460	460	460	460	460	460	460	460	460	460	460	460	460	460	
外形寸法 mm		DC 250	—	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	
外形寸法 mm		AC 550	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
外形寸法 mm		AC 460	—	2.5	2.5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	
外形寸法 mm		AC 220	—	2.5	5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	
外形寸法 mm		DC 250	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
外形寸法 mm		96	150	120	150	152	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	
外形寸法 mm		67.5	90	90	90	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105	
外形寸法 mm		52	85	68	85	68	86	86	86	86	86	86	86	86	86	86	86	86	
外形寸法 mm		NF 50-H	NF 50-H	NF 50-H	NF 100-H	NF 100-H	NF 225-H	NF 400-H	NF 600-H	NF 800-H	NF 1000-H	NF 1200-H	NF 1600-H	NF 2000-H	NF 2500-H	NF 3200-H	NF 2500-H	NF 3200-H	
外形寸法 mm		1, 3, 5	100	100	15, 20, 30, 50, 60, 75, 90,	125, 150, 175, 200, 225	250, 300, 350, 400	500, 600	500, 600	500, 600	500, 600	500, 600	500, 600	500, 600	500, 600	500, 600	500, 600	500, 600	
外形寸法 mm		AC 460	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
外形寸法 mm		DC 250	—	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	
外形寸法 mm		AC 550	—	—	20	20	30	30	35	35	40	40	40	40	40	40	40	40	
外形寸法 mm		AC 460	—	50	50	30	40	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	
外形寸法 mm		AC 220	—	—	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	
外形寸法 mm		DC 250	—	—	—	10	10	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	
外形寸法 mm		90	90	105	105	140	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	
外形寸法 mm		68	68	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	
外形寸法 mm		NFT 100	NFT 100	NFT 225	NFT 400	NFT 600	NFT 800	NFT 1000	NFT 1200	NFT 1600	NFT 2000	NFT 2500	NFT 3200	NFT 2500	NFT 3200	NFT 2500	NFT 3200		
外形寸法 mm		15, 20, 30, 50, 60, 75, 100	125, 150, 175, 200, 225	250, 300, 350, 400	500, 600	500, 600	500, 600	500, 600	500, 600	500, 600	500, 600	500, 600	500, 600	500, 600	500, 600	500, 600	500, 600	500, 600	
外形寸法 mm		AC 460	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
外形寸法 mm		DC 250	—	—	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	
外形寸法 mm		AC 550	—	—	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	
外形寸法 mm		AC 460	—	—	—	301	301	384	384	511	531	531	531	531	531	531	531	531	
外形寸法 mm		AC 220	—	—	—	118	118	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	
外形寸法 mm		DC 250	—	—	—	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	
外形寸法 mm		AC 550	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
外形寸法 mm		AC 460	—	—	35	35	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	
外形寸法 mm		AC 220	—	—	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	
外形寸法 mm		DC 250	—	—	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	
外形寸法 mm		AC 550	—	—	165	165	225	225	257	257	257	257	257	257	257	257	257	257	
外形寸法 mm		AC 460	—	—	105	105	107	107	145	145	145	145	145	145	145	145	145	145	
外形寸法 mm		AC 220	—	—	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	
外形寸法 mm		DC 250	—	—	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105	
外形寸法 mm		AC 550	—	—	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105	
外形寸法 mm		AC 460	—	—	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	
外形寸法 mm		AC 220	—	—	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	
外形寸法 mm		DC 250	—	—	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	
外形寸法 mm		AC 550	—	—	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	
外形寸法 mm		AC 460	—	—	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	
外形寸法 mm		AC 220	—	—	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	
外形寸法 mm		DC 250	—	—	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	
外形寸法 mm		AC 550	—	—	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	
外形寸法 mm		AC 460	—	—	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	
外形寸法 mm		AC 220	—	—	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	
外形寸法 mm		DC 250	—	—	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	
外形寸法 mm		AC 550	—	—	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	
外形寸法 mm		AC 460	—	—	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	
外形寸法 mm		AC 220	—	—	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	
外形寸法 mm		DC 250	—	—	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	
外形寸法 mm		AC 550	—	—	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	
外形寸法 mm		AC 460	—	—	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	
外形寸法 mm		AC 220	—	—	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	
外形寸法 mm		DC 250	—	—	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	
外形寸法 mm		AC 550	—	—	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	
外形寸法 mm		AC 460	—	—	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	
外形寸法 mm		AC 220	—	—	103</														

までに至っていない。

(b) は限流素子によりしゃ断電流を限流する方法で、一般には限流ヒューズが使用される。最近のヒューズは種々改良され、各種電気回路の保護装置としてその要求に対応するヒューズが作られるようになったが、それだけによく性能を確かめて選定する必要がある。当社が一昨年発表した永久ヒューズ（自己復旧形限流素子）は、金属ナトリウムの相変化を利用して周期的な限流素子で、ノーヒューズしゃ断器と組み合わせたものは、200 kAという低圧しゃ断器では世界最高のしゃ断容量をもち、かつ繰り返し使用のできるものである。

(c) はしゃ断器自体に限流機構をもたせたもので、十数年前より欧州を中心に発達してきたものである。過大電流の電磁力をを利用して限流を行なう方法である。

#### (2) 定格電流の増大

従来大定格電流のものに対しては、気中しゃ断器(ACB)等が使用されてきたが、最近はノーヒューズしゃ断器で大定格電流のものが次々に開発されてきて、ACBの分野へ食い込んできている。小形・低価格・安全で保守点検が容易であるなどのメリットによるものと考えられる。現状では当社の3,200 Aフレームを最大容量とし、3,000 Aフレーム・2,000 Aフレーム等が販売されている。大定格電流になるとモールド形の製作、大電流による電磁力、導電部の温度上昇等が問題となる。

#### (3) コンパクト化、経済性

最近の電気設備は、設計段階において特に安全の面に重点をおかれるようになった。これに伴い従来刃形開閉器が使用されていたところに、ノーヒューズしゃ断器が代わって採用されるようになってきている。すなわちノーヒューズしゃ断器は、大容量の分野へも小容量の分野へも進出してきているわけである。これは一面メーカーがしゃ断容量は少ないが、小形で価格の安いノーヒューズしゃ断器をシリーズ化したことにもよるが、ユーザー自身がしゃ断器の使い方を理解して大短絡電流は高性能品に分担させ、システム全体として経済的にする方式を採用するに至ったからである。コンパクト・経済形のものは従来の標準品に比べて同一定格電流で大きさは大体1フレーム小形になっている。コンパクト化できた要因の一つとして接点材料の進歩があげられる。ノーヒューズしゃ断器の接点としては耐溶着性・耐消耗性があり、温度上昇の小さいことが必要であるが、種々研究改良されてきている。しかし今後ともしゃ断器の改良に併いいろいろの研究改良が要求されるであろう。

#### (4) 機種の多様化

先にも述べたように最近は、ユーザーがノーヒューズしゃ断器の使い方を理解してきていることも一つの原因であるが、しゃ断器の応用分野がしだいに拡大されてくるにつれて、メーカーも次々と機種を増してきた。この結果現在では、フレームとしては小は30 Aフレームより大は3,200 Aフレームまで、しゃ断容量としては、200 kAに至るまで相当な数となっている。ほとんどのメーカーが標準品シリーズ、高性能品シリーズ、コンパクトで経済的なシリーズ、限流ヒューズ付きシリーズ等シリーズ化しており、ユーザーとしてはしゃ断器の性能を握したうえでいっそう便利に機種選定をすることができるようになった。

#### (5) システム化

工場・ビル・船舶等のあらゆる分野において、電力は設備の心臓部を形成しており、電力需要は複雑かつ増大の一途を辿っている。このような状況においては、予期しない停電による損害は甚大であり、極力これをさけ最大限の給電の連続性を追求していかねばなら

ない。このためには高圧側との協調を考慮したうえで、低圧側においてシステム全体の選択性をもたせることが最も重要であり、低圧電路には選択性が大幅に採用されていくであろう。また既設の設備において、負荷の増大があった場合、臨機応変にそれに対応した電路の協調が得られるシステムが望ましい。

この系統全体の協調はしゃ断器の引きはずし特性によって達成されなければならない、長限時・短限時・瞬時および地絡のおのの引きはずし特性を広い範囲の自由度をもって容易に変化させうるものが必要である。

システム サーキットブレーカ(S.C.B)は、引きはずしリレー部を静止化し、その特性をユーザーのセットにより可変としたもので、電力用電路システム全体としての協調を追求する時代の背景から生れたものの一例である。

#### 2.2 当社のノーヒューズしゃ断器の概要

当社では昭和44年にSCHATシリーズを発表したが、本年はさらにRシリーズ(限流しゃ断器)と、Uシリーズ(永久ヒューズ付きしゃ断器)が追加された。

##### (a) Sシリーズ(はん用品)

標準品シリーズで、30 Aフレームより3,200 Aフレームまで豊富に機種がある。

##### (b) Cシリーズ(小形品)

取付寸法ははん用品の2/3以下で低価格品であり、30 Aフレームより600 Aフレームまである。

##### (c) Hシリーズ(高性能品)

はん用品と同一寸法であるが、しゃ断容量はさらに大きい。50 Aフレームより1,200 Aフレームまである。

##### (d) Tシリーズ(トライパックしゃ断器)

限流ヒューズ付きしゃ断器で、しゃ断容量は180 kAもあり、100 Aフレームから800 Aフレームまである。

##### (e) Rシリーズ(限流しゃ断器)

Hシリーズより小形であり、しゃ断容量は大きい。100 Aフレームより800 Aフレームまである。

##### (f) Uシリーズ(超高性能品)

200 kAのしゃ断容量をもち、繰り返ししゃ断が可能、事故後の復旧が容易で、停電時間を最少にすることができます。100 Aフレームと225 Aフレームがある。

別表にシリーズ一覧を表2.1示し、各シリーズの例として100 Aフレームの写真を図2.1に示す。以上のほかにシリーズとして次のものがある。

##### (g) ABシリーズ(船用気中しゃ断器)

可調整の長限時・短限時・瞬時引きはずし要素を備えた高性能気中しゃ断器で、短限時要素を備えているので選択性が可能である。400 Aフレームから800 Aフレームまである。

##### (h) SCBシリーズ(システムサーキットブレーカ)

電路の高度の保護協調性を実現するため、長限時・短限時・瞬時引きはずし特性をいずれも可調整としたしゃ断器で、地絡保護也可能である。リレー部分は、Solid State化したもので、電力の連続給電の確保ができる。600 Aフレーム・1,200 Aフレーム・2,000 Aフレームがある。

#### 3. ノーヒューズしゃ断器の将来

電力需要の増大に伴い配電々圧の高圧化が推進され、そのため配

電の末端にある家庭配線は AC 200 V、工場・ビル等は 400 V 配電に移行すると思われる。このためノーヒューズシャン断器はさらに高性能のものが要求されるとともに、機器の安全性・信頼性の高いものおよび取扱いの容易なものが、強く要求されるものと考えられる。ここ 2~3 年は全般的には現状のものと形状・構造ともあまり変わらないもので、1) 小形で安いもの、2) 取扱いの容易なもの、3) 大しゃ断容量をもつもの、4) 安全性の高いもの、5) 信頼性の高いもの、6) ほかの機器と協調のとれやすいもの、7) 複合機能をもつもの、などの要件を充足するような製品が出てくるものと思われる。10 年後ともなると予想することは困難であるが、外観的に見ても現状品とは相当違ったものになると思われる。

生活様式・建築様式の変化により、また材料・工作技術等の発達によりユーザーの要求の高度化は増大し、それにこたえるべきメーカ

ー側の能力も向上してくるので、まったく画期的なものが次々と生まれ出ることが予想される。

#### 4. む す び

以上ノーヒューズシャン断器の技術動向ならびに当社製品の概要について述べた。ノーヒューズシャン断器の需要は電力の需要の伸びとともにますます伸びるであろう。当社は、永久ヒューズ付きシャン断器・NF 3,200 A フレーム等低圧電路用においては世界最大のしゃ断容量、定格電流をもつ画期的なしゃ断器を開発してきたが、今後は単にノーヒューズシャン断器としてだけでなく、配電設備機器の一部として環境の変化に応じ、ユーザの要求にこたえるように努力を続けてゆく所存である。この特集号がユーザ各位のご参考になれば幸いである。

## NF 3200 形ノーヒューズしゃ断器

和田 宏康\*・長谷川 清博\*

## Type NF 3200 No-fuse Breaker

Fukuyama Works Hiroyasu WADA・Kiyohiro HASEGAWA

Mitsubishi no-fuse breakers are of typical molded case type, taking full advantage of molded walls that insulate live parts of three poles one another so as to save the space on power distribution panels. In heavy current application, however, the weight of case and poor heat dissipation due to their thermal impedance of molded parts upset the merit of their high insulation. Consequently, no larger units than 2,500 A rating have been put into practice for the present. Through two years studies Mitsubishi is now successful in developing type NF 3200 no-fuse breakers, rated at 3,200 A, the world largest capacity available in the market. The outline of the new product is dealt with in this paper.

## 1. まえがき

ノーヒューズ しゃ断器は、JIS C 8370-1970「配線用しゃ断器」では1,000 A までのものが規定されており、JEM-1071「配線用 しゃ断器」は目下改訂審議中であるが、2,000 A までのものが規定される予定である。これに対して国内でも、すでに2,500 A のものが実用化されており、固定形ではあるが3,000 A のものも発表されている。

この種 モールドケース しゃ断器では、モールドケースなるが故の放熱の困難と、大形モールド成形機の設備の制限から、その容量に限界があるものと考えられる。それはまた低圧気中しゃ断器との経済性の優劣にも関係する。電力設備が大形化するほどには電気設備スペースや保

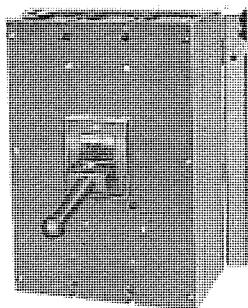


図 1.1 NF 3200 形 ノーヒューズ しゃ断器  
Type NF 3200 no-fuse breaker.

表 1.1 NF 3200 形 ノヒューズ しゃ断器の定格  
Ratings of type NF 3200 no-fuse breakers.

名		NF 3200	
極	数	2	3
定 格 電 壓 (V)		550	
定 格 電 流 (A)		2,800 3,000 3,200	
定 格 周 波 数 (Hz)		50, 60	
定格しゃ断電流非対称三相平均値 (KA)	瞬 時 付	AC 550 V	75
		AC 460 V	100
		AC 220 V	150
	短 限 時 付 (4サイクル)	AC 550 V	50
		AC 460 V	50
		AC 220 V	50
定 格 接 入 電 流 (KA)			110
定格短時間電流 (KA・4サイクル)			50
直 流 定 格	定 格 電 壓 (V)		250
	定 格 電 流 (A)		2,800 3,000 3,200
	しゃ断電流 (KA)		50

守陣容を大形化できない最近の事情から、小形・無保守をめざすノーヒューズ しゃ断器が ACB に代わって用いられる気運にある。NF 3200 形 ノーヒューズ しゃ断器は、この気運に応ずべく容量の限界にいどんだものである。なお 3,200 A については 400 V 2,000 kVA の変圧器の二次電流が 2,890 A であることから、10 % の裕度を持つように定めたのである。以下にその構造・特性等について述べる。図 1.1 はその外観写真を示し、表 1.1 に定格を示す。

## 2. 構 造

図 2.1 に NF 3200 形 ノーヒューズ しゃ断器の内部構造図を示す。この NF 3200 形 ノーヒューズ しゃ断器は、操作が安全で簡単、三極同時しゃ断、接触子の速入-速切動作、引きはずし自由機構、瞬時引きはずし電流可調整など、これまでのノーヒューズ しゃ断器と同様の構造である。ここでは開発過程において種々の試作、試験の結果解決した大容量化に伴う問題点について述べる。

## (1) 開閉機構

十分な接触子個数と、接触子圧力を得るためにトグルリンク 機構の機構バネの荷重を大きくした。機構各成部分がこの大きな荷重に十分耐えるよう、材質・形状・熱処理など技術的に十分吟味した。

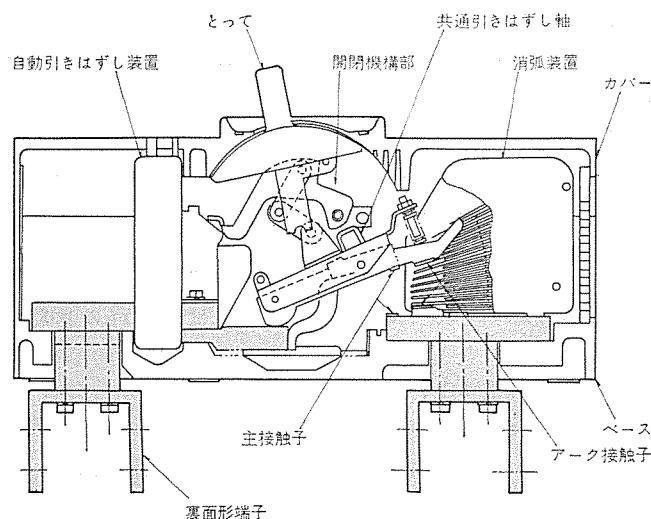


図 2.1 NF 3200 形 ノーヒューズ しゃ断器の内部構造  
Internal construction of type NF 3200 no-fuse breaker.

## (2) 通電路近接部材

電流通路に近接した磁性構造部材が鉄損により発熱し、シャンク断器に悪影響を与える。このため通電路に近接した部品には非磁性材料または、鉄損の少ない素鋼板を使用した。

## (3) 接 点

接触子構成は、1極あたり主接触子10個、アーカ接触子1個とし、かつ定格電流通電に十分な接触圧力をもつようにした。また、接触圧力は、接触子個々に働く構造とし、通電の信頼性を増した。特に主接点材料には、低接触抵抗で、しかも耐溶着性のすぐれた3元銀合金を使用した。従来品と同様、接触子は、早入-早切動作であるから、大電流シャンク断後も接点の消耗は非常に少なく、定格シャンク断後の短時間通電も異常温度上昇がなく安心して行なえる。

## (4) 引きはずし装置

長限時引きはずし特性は、空げき(隙) CT二次コイル発熱方式を採用した。

この二次コイルに対するバイメタルの受熱面積を大きくして、過負荷領域における引きはずし時間を短くし、他の保護機器との協調が楽に取れるようにした。

また、通電中に瞬時引きはずし素子の可動鉄片が振動して発生する騒音は、特殊の騒音吸収機構を採用して解決した。

## (5) 内部導体

大容量導体は、自己インダクタンスによる表皮効果、あるいは近接効果などによってシャンク断端子間の実効抵抗は、計算値よりはるかに大きな値を示す。

く(矩)形導体の場合、幅/厚さが大きくなるほど、また同一幅/厚さ値でも導体断面積(厚さ×幅)が大きくなるほど表皮効果は著しく、交流抵抗/直流抵抗の値が大きくなる。このためNF3200形ノーヒューズシャンク断器の内部導体は、表面積の大きい断面形状にし、表皮係数(交流抵抗/直流抵抗)の低減をはかるとともに、放熱面積を大きくした。

## (6) 消弧装置

十分な接触子シャンク距離と長いアーカホーン、および大きな消弧装置の相乗作用で大電流のシャンク断も余裕をもって行ないうる。

## (7) 端 子

端子以外が絶縁物でおおわれている配線用シャンク断器において、その連続通電容量は、モールドケース内部で発生する熱量をいかに効率よく放熱するかによって大きく左右されるものである。

このためNF3200形の端子は、十分な放熱面積を有するU字形構造とした。

## (8) モールド品

ベースカバーの材料は、耐熱性・機械的強度・耐アーキ性・絶縁性にすぐれているガラス繊維強化ポリエチレン樹脂を採用した。

## 3. 引きはずしおよびシャンク断

NF3200形ノーヒューズシャンク断器の引きはずしあつぎのものより成る。

### (1) 長限時引きはずし

これはサーマルバイメタルによるもので、適用できる規格は国内にはないが、NEMA規格に準拠して2,500Aフレームの延長と考えると最小引きはずし電流は、定格電流の125%、また200%電流動作時間は24分以内である。これに対してNF3200形の引きはずし特性は、図3.1に見られるように200%電流引きはずし時間は8分前後と

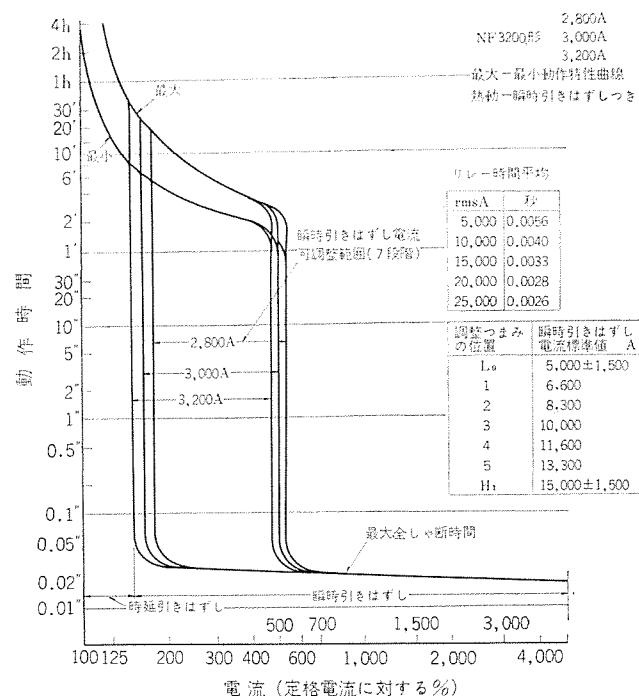


図 3.1 NF 3200 形動作特性曲線 (熱動-瞬時引きはずし)  
Maximum and minimum characteristic curves  
(instantaneous tripping).

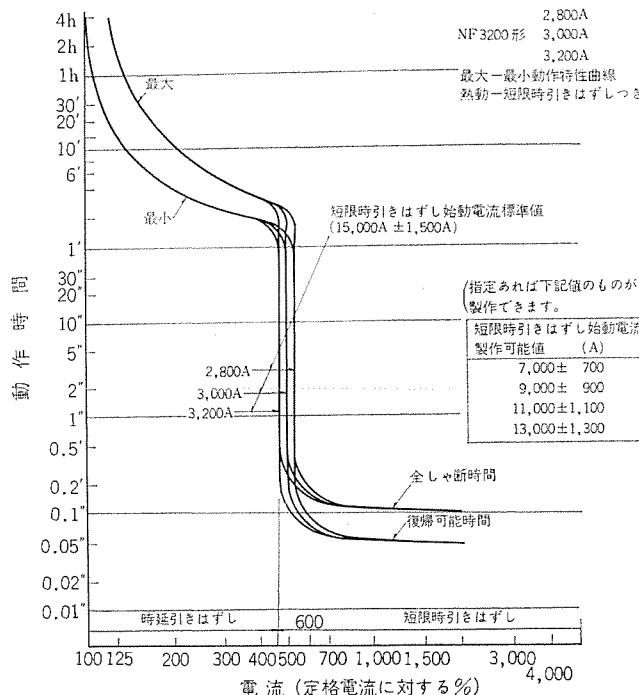


図 3.2 NF 3200 形動作特性曲線 (熱動-短限時引きはずし)  
Maximum and minimum characteristic curves  
(short-delay tripping).

比較的短かい。一般にノーヒューズシャンク断器は、定格電流の5~6倍以上の過電流に対して動作時間が長く、高圧ヒューズなどとの協調が得られがたいのが欠点であるが、当社NFBはこの点においても最大限の考慮を払っている。

### (2) 短限時引きはずし

これは下位のNFBと選択シャンク断を行なわせることを目的としているので、その復帰可能時間は、通常のNFBの最大全シャンク時間より長くしておけばよいので、図3.2に示すように約50msとなっている。通常のNFBの全シャンク時間は高々1サイクルであるので

表 3.1 NF 3200 形 ノーヒューズ しゃ断器試験成績書  
Test results of type NF 3200 no-fuse breaker.

試験品	形名		NF 3200			
	定格電圧(AC・V)	550				
	定格電流(A)	3,200				
	極数	3				
構造・操作	接觸圧力(kg)		4.5~5.0			
	アーケ接觸子		8~9			
時延引きはずし	しゃ断距離(mm)		40~42			
	手動操作力 (補助とつ付き)(kg)	ON	25			
		OFF	15			
		リセット	28			
電磁引きはずし	125%引きはずし時間		48'21"			
	200%引きはずし時間	左極	12'21"			
		中極	12'40"			
		右極	12'45"			
過負荷	引きはずし電流(A)	HI	14,500			
		5	13,500			
		4	11,300			
		3	9,500			
		2	7,800			
		1	6,000			
		LO	4,600			
	試験回路 3φ, AC 600 V, 8,850 A, PF 0.48 lag 責務(ON→TRIP→RESET) 1回/分 20回					
連続電流容量	3,200 A 8時間通電後の温度上昇値(deg)	過負荷試験前	接触子 75以下 端子 50以下			
		過負荷試験後	接触子 80以下 端子 50以下			
		耐久試験後	接触子 90以下 端子 55以下			
	試験回路 3φ, AC 600 V, 3,250 A, PF 0.78 lag ○責務I(閉鎖) 2回/分 500回通電 2,000回無通電 ○責務II(TRIP) 2回/分 1,000回無通電					
耐久	時延引きはずし、電磁引きはずし					
	前記参照					
絶縁耐力	しゃ断器“閉”	異極導電部間				
	しゃ断器“開”または“引きはずし”	導電部接地間 電源一負荷端子間				
しゃ断試験(一例)	試験回路I	回路電圧(AC・V)				
		平均電流(kA)(asym)				
		力率(lag)				
		オシロ No.				
	試験回路II	回路電圧(AC・V)				
		平均電流(kA)(asym)				
		力率(lag)				
		オシロ No.				
	試験結果I	回路	瞬時付	全しゃ断時間(ms)	O	13.4, 17.4
					CO	14.3, 14.6
				O		21844
					CO	21845
	試験結果II	回路	短限時付	全しゃ断時間(ms)	O	70, 73
					CO	21500
				O		81, 83
					CO	21501

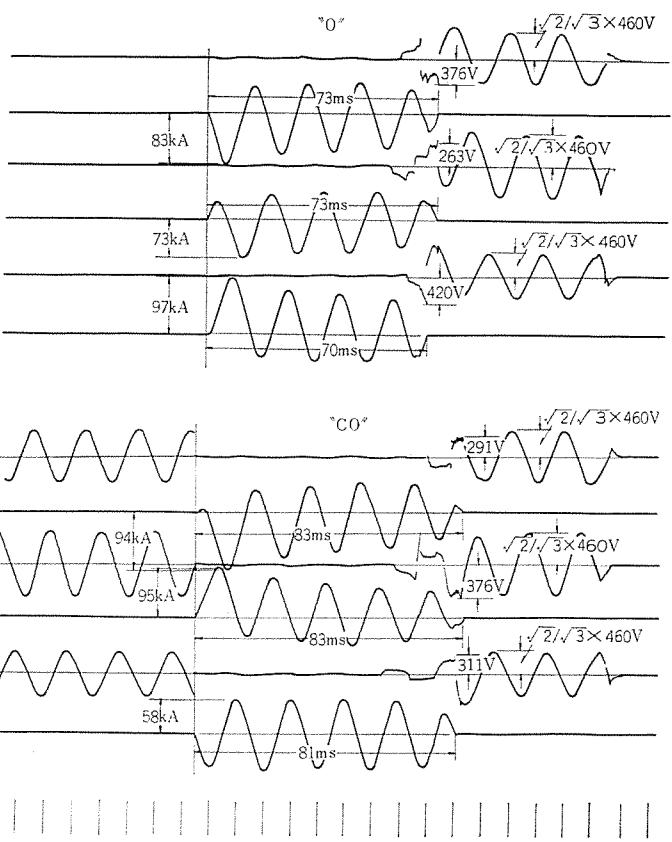


図 3.3 NF 3200 形 ノーヒューズ しゃ断器(短限時付き)の  
しゃ断試験 オシログラム(460 V 50 kA system).

Interrupting test oscillograms of type NF 3200 no-fuse breaker (short-delay tripping).

50 ms は十分な時間であるが、安定性のうえからは、これより短くすることはむずかしく、また熱容量のうえからはこれより長くすることは好ましくない。

また短限時引きはずしの pick-up 電流値は、15,000 A を標準としているが、指定により 7,000 A までのものが製作できる。

### (3) 瞬時引きはずし

瞬時引きはずし時間は電磁石の動作と機構部の動作に要する時間で、NFB では通常  $\frac{1}{2}$  サイクル程度であるが、pick-up 電流値付近ではかなり不安定で 1 ~ 2 サイクルを要することもある。瞬時引きはずしの pick-up 電流値は、図 3.1 に示すように 5,000 A から 15,000 A までの範囲に設定できる。

### (4) しゃ断

しゃ断は従来の NFB と同様、デイオン消弧装置による。一般に NFB では瞬時引きはずしが高速であるため、投入電流で接点の浮上りがあつても、しゃ断動作がそれに追従する。デイオン消弧装置の消弧能力はきわめて優秀であるから、しゃ断容量は大きいが、投入電流での接点の浮上り現象は比較的低い電流で起こるので、瞬時引きはずし装置をつけないばあい、短時間許容電流および投入容量は小さい。表 1.1 に見られるように 460 V では瞬時付きのしゃ断容量が 100 kA であるのに対して、短限時付きのばあいは 50 kA (対称 42 kA) となっているのは、このような理由による。なお表 3.1 および図 3.3 はこれらの試験成績の一例を示す。

## 4. 大電流導体構成に関する配慮

構造の項でも述べたように導電部分については、つぎのような配慮が必要であった。

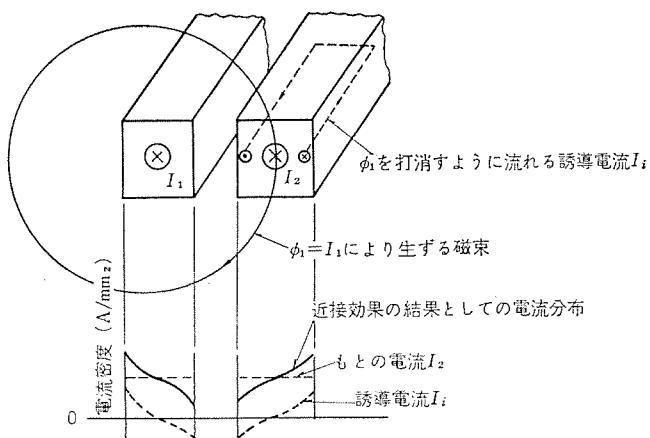


図 4.1 近接効果  
Proximity effect.

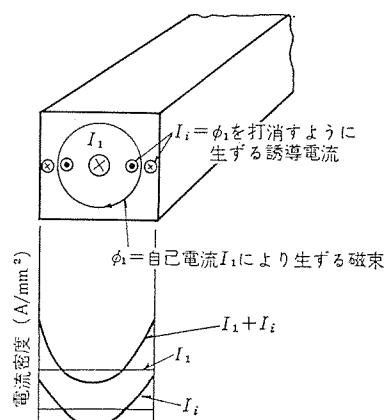


図 4.2 表皮効果  
Skin effect.

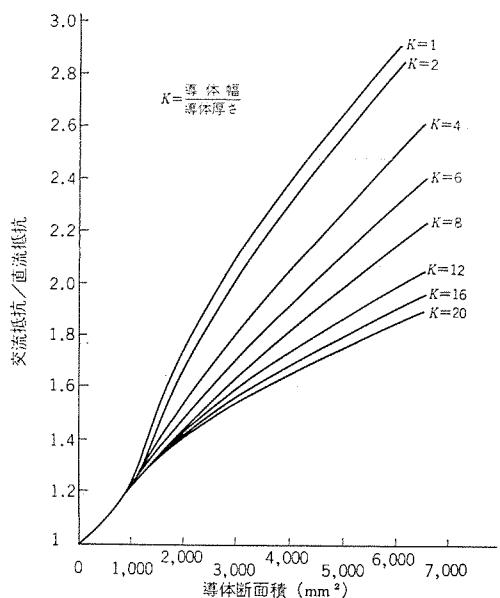


図 4.3 銅導体の表皮効果 (60 Hz)  
Skin effect in strap copper conductors (at 60 Hz).

### (1) 鉄損

これは近接磁性体中に発生する交番磁束によるヒステリシス損と渦電流損である。ヒステリシス損は、できるだけ磁性体を使わないようすることにより減少させることができる。そのため電磁石以外の構造材には、できるかぎりステンレスや黄銅を用いた。

### (2) 誘導電流損

大電流になると磁性体以外の近接構造体中にも交番磁界により磁束が発生し、構造導体中に渦電流損が生ずる。これは構造導体の導電率が大きいほど大きくなる。したがって構造材としても黄銅より導電率の低いステンレス等を用いたほうがよい。

### (3) 近接効果

誘導電流はその近接導体が同相導体、あるいは異相導体であっても生ずる。同相導体のはあい、誘導電流は近いほうには逆方向、遠い側には同方向の向きとなるので、本来の電流を近い側で電流密度が低く、遠い側で電流密度が高くなるような分布にする。異相導体のはあいはこの逆になる。このような電流密度の不均一は、見かけ上導体抵抗が増加したのと同じ作用を呈して  $I^2R$  損を増加させる。

図 4.1 は近接効果の生ずる模様を示す。NFB ではその外形寸法上これを避けることはできないが、導体を並列方向に対して積層し相互に絶縁ねん(撲)架すれば近接効果の減少が考えられる。しかし NFB 内部ではこれは不可能に近い。

### (4) 表皮効果

近接効果は他導体の電流による誘導電流の結果生ずるものであるが、誘導電流は自導体電流によつても発生する。図 4.2 はその様子を示したものであるが、結果としては図に示すように電流密度は外周で高く内部で低くなる。これも見かけ上導体抵抗が増加したのと同じ作用を呈して  $I^2R$  損を増加させる。図 4.3 は H. C. Forbes と J. L. Gorman により計算された表皮効果のグラフを示す。この効果を減少させるには、外周ばかりの薄皮導体とすればよい。しかしこれは外形寸法を小さくできるという意味からではなく、材料と重量の節約ができるという意味からである。

以上の(1)～(4)はすべて交流実効抵抗の増加という形で表わすことができる。このほかに大电流導体の電流容量を減少させるものに熱放散係数の減少がある。これは密接した導体配置が対流を阻害するからである。しかし NFB では内部を空気が貫流するようになつてないので、これはあまり重要ではない。むしろ端子や接続導体からの放熱が大きな役割を占める。

## 5. むすび

低圧気中しゃ断器の分野では、比較的大容量・重責務のものには ACB を、比較的小容量・軽責務のものには NFB を、という具合に従来使いわけられていたが量的拡大が質的変化を喚起し、大容量のものでも軽責務のものでよいかが増加し、NFB と ACB の分野が重疊し大容量回路にも用途別・責務別に NFB と ACB の使いわけ、選択ができるようになった。今後 SCB の開発によってこの傾向はますます強められるものと思われる。

# 限流形ノーヒューズしや断器 R シリーズ

兼本 成則\*・藤沢 稔\*・山本 清美\*・前田 信吾\*

## Type NF Current Limiting Molded Case Circuit Breaker Based on Electro-Dynamic Action

Fukuyama Works

Shigenori KANEMOTO・Minoru FUJISAWA

Kiyomi YAMAMOTO・Shingo MAEDA

Electro-dynamic force between two paralleled conductors is used to open a pair of contact carrying arms of a circuit breaker directly in advance of electro-magnetic tripping relay.

Opening action due to electro-dynamic force is fast enough to assure effective current limiting interruption and make it possible to design a small sized, more dependable circuit breaker with high interrupting capacity.

Mitsubishi announced a new series current limiting circuit breaker-Type NF-R- incorporating electro-dynamic force into low voltage molded case circuit breaker up to 800 ampere continuous current rating. Outline of Type NF-R breakers are dealt with in this paper.

### 1. まえがき

過密都市における電力需要の増大、工場設備の大形化などにより受電設備容量がますます増大し、これにより故障時の短絡電流は50~100 kA または、それ以上という大きな値になってきている。また自動化装置・電算機等の重要負荷の増大に伴い電力供給の信頼度向上が必要とされており、高性能・高信頼度の機器が要求されている。さらに配電設備の合理性・経済性の追求から小形化・機種の多様化も要求されている。

これらの要望に対して、ノーヒューズしや断器（以下 NFB という。）の分野では、（1）小形化、（2）大容量化、（3）しや断容量の増大、（4）系統しや断器としての進出、などが開発の主眼とされている。

当社では長年の製作経験と研究結果をもとに、モールドケース材料の強度向上・接点材料の進歩・消弧装置の改良などにより小形化をさらに、大電流による熱的・機械的ストレスを減少させるため短絡電流

を限流してしや断する必要から、NFB に限流特性を持たせてしや断容量増大を計った、小形・高しや断容量の限流形 NFB R シリーズの開発を完了したので、以下その概要を紹介する。

### 2. 特長および仕様

#### 2.1 特長

限流形 NFB R シリーズは、次のような特長を備えている。

- (1) 限流しや断器では、国内最小の外形寸法である。
- (2) 限流しや断機構の採用により、しや断容量が飛躍的に大きくなつたばかりでなく、直列機器に与える熱的・機械的ストレスを軽減できる。
- (3) モールドケースカバーは強度・耐アーキ性のすぐれたガラス繊維強化ポリエスル樹脂を採用しており、短絡電流を確実にしや断する。
- (4) 消弧装置に耐アーキ性のすぐれた消弧板を採用しており、消弧能力が増大している。

表 2.1 R シリーズの仕様一覧

Specification of NFB R series.

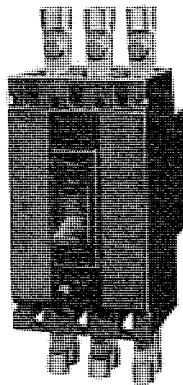


図 2.1 NF 400-R  
形ノーヒューズ  
しや断器  
Type NF 400-R  
no-fuse breaker

形 名		NF 100-R		NF 225-R		NF 400-R		NF 600-R		NF 800-R		
フレーム A		100		225		400		600		800		
定格電流 A		15 40 75	20 50 90	30 60 100	125 175 225	150 200	300	250 350 400	300	500 600	700 800	
極 数		2	3	注) 2	3	注) 2	3	注) 2	3	注) 2	3	
定格電圧 V	AC	550		550		550		550		550		
	DC	250		250		250		250		250		
定格しや断容量 kA	AC 460V	35		50		80		80		80		
	DC 250V	40		40		40		40		40		
外形寸法 mm	a	70	105	107		145		210		210		
	b	165		225		257		320		390		
	c	120		120		120		120		120		
	ca	141		148		154		170		177		
	d	—		—		50		71		88		
製品重量 kg			2.0	3.0	3.5	4.5	7.5	9.0	14	17	19	22
標準引きはずし方式			熱動-電磁		熱動-可調整電磁		熱動-可調整電磁		熱動-可調整電磁		熱動-可調整電磁	

注) 2 极しや断器は 3 极しや断器の中央極導体を取り除いたものである。

(5) 端子構造が豊富で、かつ容易に変更できる。締め付けも確実である。

(6) ハンドル窓わく(枠)を NFB 中心線に対し振分けに配置し、盤設計を容易にし、外観意匠を統一している。

## 2.2 仕様

Rシリーズの仕様を表2.1に、NF 400-R形の外観写真を図2.1に示す。

### 3. 構造および動作

#### 3.1 構造および動作

図3.1はNF 100-R形シャンターアンブレアの構造を示したものである。構造は、開閉機構、自動引きはずし装置、消弧装置、接触子、端子およびモールドケースカバーなど通常のNFBの構成に限流機構・リセット機構を加えたものである。

通常の接点の開閉は、開閉バネとトグルリンク機構によるクイックモーションを利用していているので、ハンドルの操作速度には関係なく接点は速入・速切動作をする。ある定められた限度までの過電流に対しては、自動引きはずし装置内のバイメタルが湾曲変位し、引きはずし軸を回転させ、ラッチと止め金の係合が解かれ、これにより受け金が回転し、トリガが駆動され、開閉バネの力により接点を急速に開離する。さらに大きな電流になると電流通路にまたがって取り付けられている瞬時引きはずし用電磁石の可動鉄心が吸引し、引きはずし軸を回転させ、瞬時に接点を開離する。瞬時引きはずし電流値は、被保護機器との保護協調の上で重要なものであるが、100 AFでは指定によっ

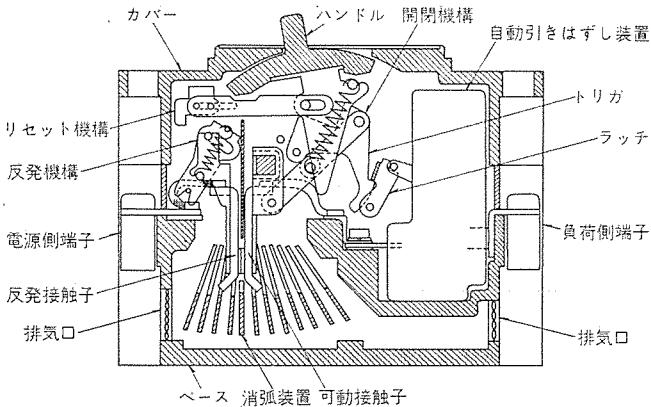


図3.1 NF 100-R形の構造  
Construction of type NF 100-R.

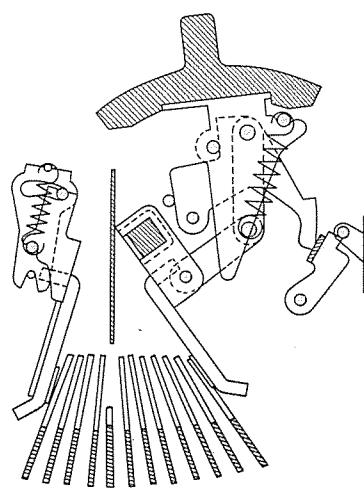


図3.2 全開離の状態  
Repulsion and trip position.

て、225 AF以上のものではすべて調整つまみを外から回転することにより、三極同時に調整できる。

短絡電流のような大電流が流れると、新しく開発された限流機構により接点は、瞬時引きはずしによる開閉機構の動作を待たずに高速に開離し、このあと開閉機構の動作が続いて起り限流しゃ断する。

#### 3.2 限流機構

Rシリーズには、当社独自の限流機構を採用している。図3.1に示すように、反発接触子と可動接触子を平行して配置し、短絡電流のような大電流が流れた場合、接触子相互間に電磁反発力を発生させ、この力が、反発機構バネにより与えられている反発接触子の接触圧力より大きくなると、反発接触子が開離を始める。開離運動を始めた反発接触子は、電流の増加とともに反発機構バネに反抗して運動を続け、電磁力がさらに大きい場合には、バネは、その死点を越え反発接触子を開離させる力に変わり、急速に開離させる。

反発接触子が開離を始める電流値は、瞬時引きはずし電流値よりも大きい値に定められており、反発接触子開離後は必ず開閉機構による開閉動作(トリップ)が後続するので、不必要的接点の浮き上がりによる接点の消耗、溶着がない。

反発接触子、可動接触子が共に開離した短絡電流しゃ断の状態を図3.2に示す。この場合、全開離距離は、これまでのNFBに比べて約2倍となるため、消弧装置の消弧能力が増大し、しゃ断能力を飛躍的に高める効果を有している。開離した反発接触子は、ハンドル操作による開閉機構リセットの動作の際、反発接触子リセット機構により元の状態に戻る。

### 4. 限流特性

#### 4.1 限流しゃ断の原理

短絡電流しゃ断時の回路図を図4.2(a)、電流・電圧の関係を図4.1に示す。 $t_0$ で短絡事故が発生すると、回路固有の短絡電流(推定短絡電流)  $i_p$  が流れはじめる。この電流は増加して  $t_1$  でNFBの瞬時引きはずし機構動作開始電流  $i_m$  に達する。このあとNFB固有の開閉時間だけ遅れて  $t_2$  で接点が開離し、アーケ電圧を発生する。接点の開離につれてアーケ電圧は上昇する。アーケ電圧により限流された短絡電流は、アーケ電圧と回路抵抗による電圧降下の和が電源電

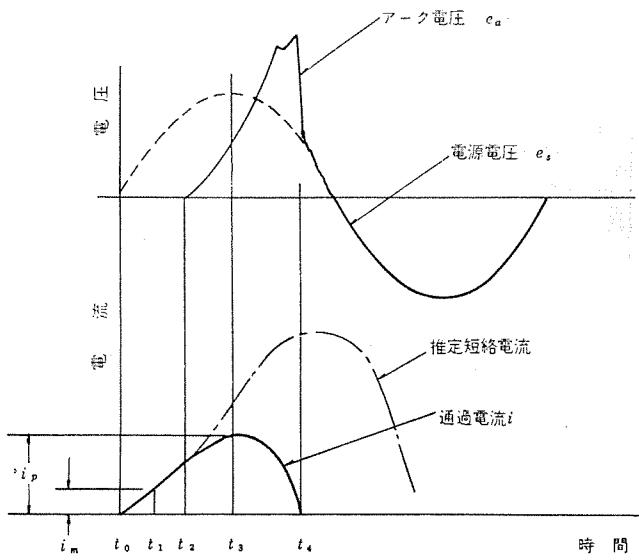
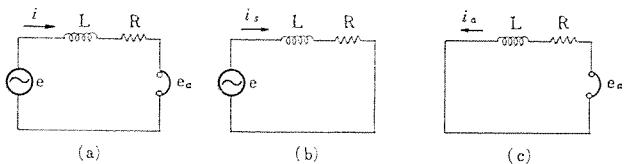


図4.1 しゃ断現象図  
Current limiting interruption.



し：回路のインダクタンス R：回路の抵抗 e：電源電圧(V)  
i：通過電流(A)  $i_s$ ：推定短絡電流(A)  $i_a$ ：NFBのアーカによる逆方向電流(A)

図 4.2 重ねの理の説明  
Description of superposition principle.

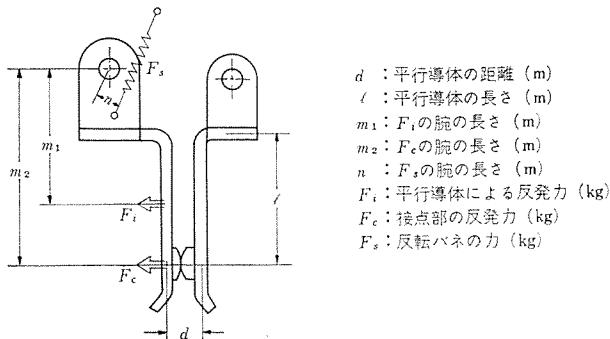


図 4.3 電磁反発力の説明  
Description of electromagnetic force.

圧と等しくなる時刻  $t_3$  で最大値  $i_p$  となる。その後アーカ電圧はさらに上昇し、電流は急速に減少し  $t_4$  でしゃ断を完了する。このように通過電流を制限してしゃ断することを限流しゃ断といふ。これにはアーカ電圧が重要な役割を果す。

アーカ電圧による限流作用について重ねの理により考えてみる。図 4.2 に示す短絡回路の電流  $i$  は、回路固有の短絡電流  $i_s$ (A) とアーカ電圧による逆電流  $i_a$ (A) の和で表わすことができる。 $i_s$  に関する回路方程式は電源電圧を  $e$ (V)、回路インピーダンスを  $R+j\omega L(\Omega)$  とすると

$$e = L \frac{di_s}{dt} + Ri_s \quad (4.1)$$

となる。 $i_s$  は電源電圧に関与するから  $e = E \sin(\omega t + \theta)$  とおくと

$$E \sin(\omega t + \theta) = L \frac{di_s}{dt} + Ri_s \quad (4.2)$$

となる。これを解くと

$$i_s = I_s \{ \sin(\omega t + \theta - \varphi) - e^{-\frac{R}{L}t} \sin(\theta - \varphi) \} \quad (4.3)$$

$$I_s = \frac{E_s}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}$$

$\varphi$  : 力率角 (rad)  $t$  : 時間 (s)

となる。

アーカ電圧  $e_a$  が直線的に増加するすれば、式(4.1)において  $e = at$  とおいて解くことができ

$$i_a = a \left\{ \frac{L}{R^2} e^{-\frac{R}{L}(t-t_2)} + \frac{1}{R} (t-t_2) - \frac{L}{R^2} \right\} \quad (4.4)$$

$t_2$  : 接点開離時間 (s)

となる。

通過電流  $i$  は

$$i = i_s \quad 0 \leq t < t_2 \quad (4.5)$$

$$i = i_s - i_a \quad t_2 \leq t < t_4 \quad (4.6)$$

$t_4$  : 全しゃ断時間 (s)

となる。限流しゃ断の条件は、回路の推定短絡電流  $i_s$  に対してアーカ電圧による逆電流  $i_a$  をいかに早く近づけるかにある。すなわち、

表 4.1 限流機構動作開始電流  
Starting current of current limiting mechanism.

フレームの大きさ	100 A	225 A	400 A	600 A	800 A
限流機構動作開始電流 A	3,300	6,400	11,500	20,000	21,300

(1) 短絡発生後アーカ電圧が発生するまでの時間を短縮する。

(2) アーカ電圧の上昇を急速にする。

従来の瞬時引きはずし機構を有する NFB では短絡発生後接点が開離し、アーカが発生するまでの時間が 2 ms~10 ms 程度であるためアーカ発生時には、通過電流が大きな値となっており限流効果が期待できない。

限流形 NFB R シリーズにおいては平行に配置した導体に働く電磁反発力により、定められた値以上の電流では瞬時引きはずしによる開閉機構の動作を待つことなく接点を瞬時に開離し、アーカ電圧を発生させる。さらに平行導体に流れる電流による磁界でアーカに駆動力を与え、アーカを急速に伸長させてアーカ電圧を高める。大きな消弧装置がこの効果を高める。

これらの特長をもつ R シリーズは限流しゃ断の条件を十分に満たすものである。

#### 4.2 電磁反発力による接点の開離

二つの平行した導体に異方向の電流が流れると反発力が働く、このときの力  $F_i$  は

$$F_i = 2.04 \frac{l}{d} i^2 \times 10^{-8} \text{ (kg)} \quad (4.7)$$

$l$  : 平行導体の長さ (m)  $d$  : 平行導体の距離 (m)

また、接点には電流集中による反発力が働く。このときの力  $F_C$  は概略 Snowdon の式で求められ

$$F_C = 1.02 \cdot i^2 \ln \frac{A}{a} \times 10^{-8} \text{ (kg)} \quad (4.8)$$

$A$  : 電流 path の envelope の半径 (mm)  $a = \sqrt{\frac{P}{\pi H}}$   
 $P$  : 接触圧力 (kg)

$H$  : 接点材質の圧縮強さ (kg/mm<sup>2</sup>)

これらの力の和が反発力となる。したがって反発接点子に働くモーメントの総和は

$$M_1 = m_1 F_i + m_2 F_C \quad (4.9)$$

となる。反発接点子は反発機構バネにより接触圧力を与えられており、この力を  $F_S(\theta)$  とすると、接触圧力を与える方向のモーメントは、

$$M_2 = n F_S(\theta) \quad (4.10)$$

これらより  $M_1 > M_2$  となると、接点は開離をはじめることがわかる。このときの電流  $i_r$  は

$$i_r = \sqrt{\frac{n F_S(0)}{2.04 m_1 \frac{l}{d} + 1.02 m_2 \ln \frac{A}{a}}} \times 10^4 \text{ (A)} \quad (4.11)$$

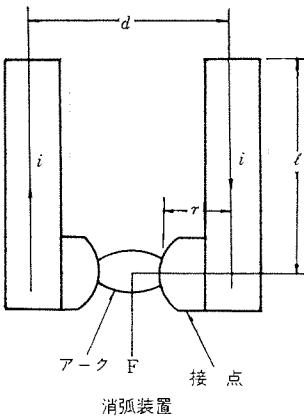
式(4.11)より R シリーズ各フレームの  $i_r$  を求めると表 4.1 が得られる。600, 800 A フレームは主接点とアーカ接点を有するので、100~400 A フレームと異なる構成であるが、その点も考慮してある。

#### 4.3 平行電流によるアーカの駆動力

磁界中の電流には、電磁力が働くことはよく知られている。(Fleming の左手の法則) 図 4.3 のこのときの力は

$$F = \frac{\mu_0 i^2}{19.6} \left\{ \ln \frac{d-2r}{\sqrt{(d-2r)^2 + l^2 + l}} - \ln \frac{r}{\sqrt{r^2 + l^2 + l}} \right\} \text{ (kg)} \quad (4.12)$$

$\mu_0$  : 空気の透磁率 (H/m)



F: アーク駆動力 (kg)  
r: 导体と接点間の距離 (m)  
その他の記号は図4.3と同じ

図 4.4 アークの駆動力  
Driving force of arc

となる。NF 600-R 形では

$$d = 13 \times 10^{-3} \text{ (m)}$$

$$r = 3.3 \times 10^{-3} \text{ (m)}$$

$$l = 50 \times 10^{-3} \text{ (m)}$$

であるので式(4.12)によると

$$F = 1.36 \times 10^{-8} \cdot t^2 \text{ (kg)} \quad \dots \dots \dots \quad (4.13)$$

の力がアーカに働くことになる。たとえば、30 kA のアーカ電流では  $F = 12.3 \text{ kg}$  となる。このように大きな力でアーカは消弧装置に押し出され、引き伸ばされ、冷却されて、そのエネルギーを失う。三菱限流しゃ断器 R シリーズは、このアーカに加わる駆動力を最大限に利用している点に大きな特長がある。

## 5. しゃ断性能

### 5.1 しゃ断性能

R シリーズは、これまで述べたように良好な限流性能を有するので短絡しゃ断時の通過電流せん頭値が小さいばかりでなく、通過最大  $I^2 \cdot t$  が少ないので電線・負荷機器の熱的・機械的ストレスを大幅に軽減できる。図 5.1 に限流特性、図 5.2 に通過最大エネルギー  $I^2 \cdot t$  特性を示す。

短絡しゃ断時には、全しゃ断時間は 1 サイクル程度であるから通過電流により導体内に発生する熱は外部へ逃げずに、すべて導体温度を上昇させるのに使われると考えてよい。したがって導体材料が銅の場合通過  $I^2 \cdot t$  と導体温度の関係は次の式で表わされる。

$$\int i^2 dt = 5.05 \times 10^4 \times S^2 \log_e \frac{234 + T}{234 + T_0} \quad \dots \dots \dots \quad (5.1)$$

$S$  : 导体の断面積 ( $\text{mm}^2$ )

$T$  : 短絡時の導体温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_0$  : 定格電流通電時の導体温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )

600 V ゴムあるいはビニル絶縁電線の場合、定格電流通電時の許容温度を  $60^{\circ}\text{C}$ 、短時間許容温度を  $150^{\circ}\text{C}$  とすると式(5.1)より電線の許容  $\int i^2 dt$  が求められる。これより定格しゃ断容量に等しい推定短絡電流の回路で保護され得る最小電線太さが求められる。これを表 5.1 に示す。

実用の回路では分歧電線が接続されるので、この電線による限流があり通過最大  $I^2 \cdot t$  が図 5.2 より小さくなることが多いので、これより細い電線が使用できる。

### 5.2 試験結果

R シリーズの性能確認は JISC 8370, JEM-1071 により形式一連試験を実施したが、いずれも良好な成績であった。表 5.2 にしゃ断

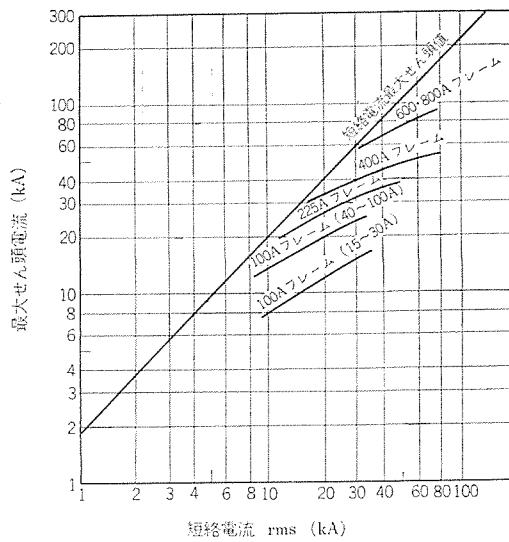


図 5.1 R シリーズ 限流特性  
Maximum let-through current characteristics of R series.

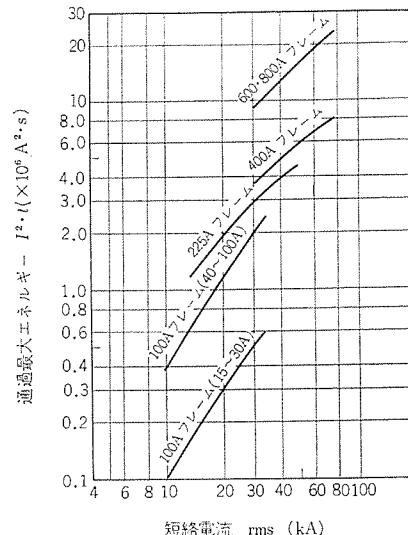


図 5.2 R シリーズ 通過最大エネルギー  $I^2 \cdot t$  特性  
Maximum let-through  $I^2 \cdot t$  characteristics of R series.

表 5.1 定格しゃ断容量に等しい推定短絡電流の回路で  
熱的に保護され得る最小電線  
Minimum wire size protected by NFB R series.

フレームの大きさ	最小電線太さ mm <sup>2</sup>	
	15~30 A	40 A 以上
100 A	8	14
225 A	22	
400 A	30	
600 A	50	
800 A	50	

表 5.2 しゃ断試験結果  
Interrupting test result.

フレームの大きさ	回路条件 AC 3φ		全しゃ断時間 Hz	最大通過電流 kA	通過最大エネルギー $\times 10^6 \text{ A}^2 \text{ s}$
	定格電圧 V	定格しゃ断電流 kA			
100 A	460	35	0.3~0.5	16	0.6
				25	2.4
225 A	460	50	0.3~0.6	38	4.5
400 A	460	80	0.3~0.6	55	8
600 A	460	80	0.5~0.8	90	24
800 A	460	80	0.5~0.8	90	24

注) 全しゃ断時間は 60 Hz ベースとする。

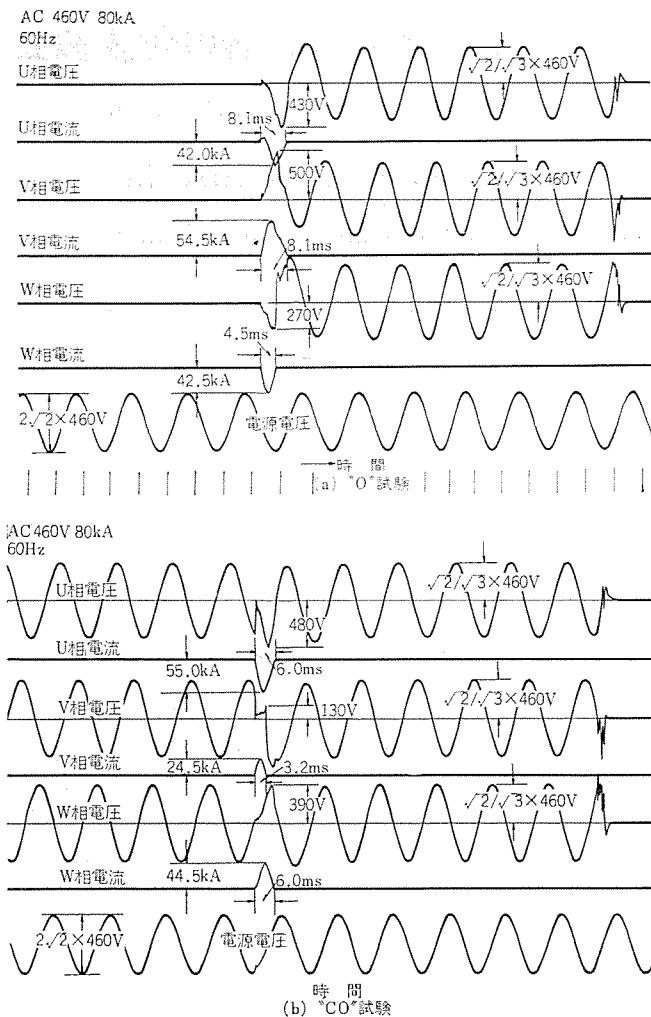


図 5.3 しゃ断試験オシログラム (NF 400-R 形)  
Interrupting test oscilloscopes (Type NF 400-R 400 A)

試験結果を、図 5.3 にオシログラムを示す。

### 5.3 カスケード方式への適用

分岐 NFB 設置点での推定短絡電流が分岐 NFB のしゃ断容量を越える場合、主回路用 NFB によって後備保護を行なわせようとするものであり、主回路・分岐どちらの NFB も短絡時の開極時間が非常に短いことに着目し、分岐 NFB のアーケに主回路用 NFB のアーケを重畠させて分岐 NFB に加わるアーケエネルギーを少なくするものである。

図 5.4 の回路で NFB 2 がカスケードで保護されるためには、 $E_1$  (NFB 1 のアーケエネルギー) +  $E_2$  (NFB 2 のアーケエネルギー) は回路の短絡エネルギーより定まるもので、一定であるから  $E_1 > E_2$  として NFB 2 の負担を軽くする必要がある。このためには NFB 1 として開極時間が短くて、アーケ電圧の高いものが適している。しかし NFB 1 としてはフレームの大きいものが使用されるので開極時間が長く、アーケ電圧も低くなりがちである。

R シリーズは、前述した特長を備えているので主回路用 NFB との条件を十分満足するものであり、ロイド規格カスケード保護の判定

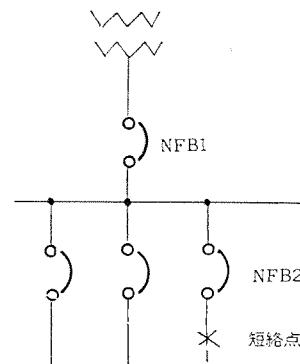


図 5.4 短絡回路図  
Diagram of short-circuit.

表 5.3 カスケードしゃ断容量  
Interrupting capacity by cascade protection system

AC 3 相 500 V (kA)

後備保護 NFB 分岐 NFB	NF 100-R	NF 225-R	NF 400-R	NF 600-R NF 800-R
NF 30-S	5	5	5	—
NF 50-A	10	—	—	—
NF 50-C	7.5	5	5	5
NF 100-E	—	50	50	—
NF 100-C	15	—	—	—
NF 225-G(F)	—	—	80	50
NF 225-C	—	30	30	—
NF 400-B	—	—	—	80
NF 400-C	—	—	—	50

基準によると表 5.3 に示すしゃ断容量が得られる。

### 6. むすび

以上、電磁反発式の限流機構を有する NFB R シリーズの概要について述べた。R シリーズは、小形化・大しゃ断容量・信頼性の向上といふ要望に十分こたえるものである。今後 NFB は配電機器のなかの保護機器の主力製品として、ますます進展を示し限流機構を有する NFB もその用途は急速に普及するものと考えられる。今後ともいっそうの研究を重ね、信頼性および性能の向上に努める決意である。なお意匠設計を担当された当社商品研究所の意匠課各位に謝意を表する。

### 参考文献

- (1) 和田：電設工業, 15, No. 5, 43 (昭 44)
- (2) Daniele Fabrizi : L'ENERGIA ELETTRICA, No. 12, 743 (1966)
- (3) E. W. Boehne : AIEE Transactions, 66, 1172~1180 (1947)
- (4) 田中：電学誌, 74, No. 791, 941 (昭 29)
- (5) B. W. Jones and J. A. Scott : T. A. I. E. E., 65, Oct., 644 (1946)

# ノーヒューズしゃ断器の付属装置

松浦 清\*・藤井 保\*

## Accessories of No-fuse breakers

Fukuyama Works Kiyoshi MATSUURA・Tamotsu FUJII

As the no-fuse breaker becomes prevalent and a variety of types come into use, accessory equipment going with it is in high demand. The following are representative devices to be quoted : accessories to be mounted on a panel and remote control or automatic control devices.

This article describes them of electrical remote indicators and electrical remote operating devices, for example the operation of alarm switches, auxiliary switches, under-voltage trip devices, shunt trip devices, motor operating mechanism. A number of data considered to serve as a good reference to those designing sequence control are introduced herein.

### 1. まえがき

ノーヒューズしゃ断器が普及し多様化するにつれて、盤取り付け用付属品をはじめ、遠方制御や自動制御用装置までノーヒューズしゃ断器の付属装置の要求が強くなってきた。とくに、大形のノーヒューズしゃ断器は、電源主しゃ断器として設置されることが多いため、警報スイッチ、補助スイッチなどの動作表示装置や不足電圧引きはずし装置、電圧引きはずし装置、電動操作装置などの制御装置がたいてい用いられている。

以下、これらノーヒューズしゃ断器（以下NFBと呼ぶ）の付属装置の構造、問題点などについて述べる。

### 2. NFB 付属装置の種類

付属装置には、現在つぎの種類がある。

#### 電気表示装置

- (1) 警報スイッチ
- (2) 補助スイッチ

#### 遠方制御電気操作装置

- (1) 不足電圧引きはずし装置
- (2) 電圧引きはずし装置
- (3) 電動操作装置

#### 盤取り付け用付属品およびその他の付属装置

- (1) 裏面スタッド
- (2) 埋込形取付わく
- (3) さし込み形端子台
- (4) 引出形取付わく
- (5) 裏面スタッド絶縁管
- (6) 端子カバー
- (7) 操作とて
- (8) 付属装置リード線端子台
- (9) 機械運動子
- (10) とてロック装置

このうち、電気表示装置と遠方制御電気操作装置について以下述べる。盤取り付け用付属品およびその他の付属装置については、カタログにその詳細が記載されているので省略する。

### 3. 警報スイッチ・補助スイッチ

#### 3.1 警報スイッチ・補助スイッチの構造と定格

警報スイッチは、NFBのトリップの状態を電気的に表示するスイッチである。補助スイッチはNFBのON・OFFの状態を電気的に表示するスイッチである。いずれもNFB内部にマイクロスイッチがとりつけてある。スイッチの端子記号を図3.1に、接触方式を表3.1に、定格を表3.2に示す。マイクロスイッチは、立石電機（株）製オムロンマイクロスイッチを使用している。一部定格が、オムロンマイクロスイッチとしての定格と異なるところがあるが、これは、NFBに組込んで使用したときの、開閉回数、使用条件を考慮して定めたものである。

定格事項のうち、マイクロスイッチの誘導負荷・電動機負荷とは、JIS C 4505（マイクロスイッチ）によると、つぎの条件で開閉したときの定格である。

#### マイクロスイッチの誘導負荷とは

- 交流力率 0.3~0.4 の負荷
- 直流時定数 7 ms の負荷

#### マイクロスイッチの電動機負荷とは

- 5倍電流閉路（交流のばあい 力率0.3~0.4）
- 1倍電流しゃ断（交流のばあい 力率0.6~0.7）の負荷

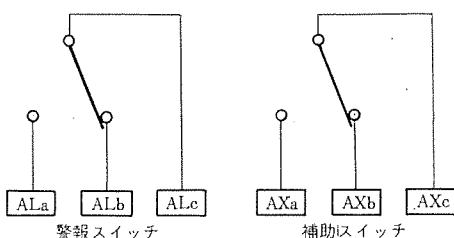


図3.1 警報スイッチ・補助スイッチの端子記号  
Terminal symbols of alarm switch and auxiliary switch.

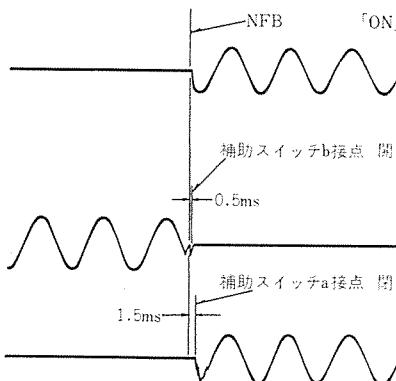
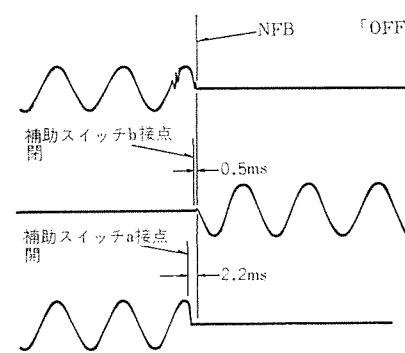
表3.1 警報スイッチ・補助スイッチの接触方式  
Contact operation of alarm switch and auxiliary switch.

付属装置	しゃ断器の状態 端子	ON		OFF	トリップ
		ON	OFF	OFF	ON
警報スイッチ	ALa-ALc間			ON	OFF
	ALb-ALc間			OFF	ON
補助スイッチ	AXa-AXc間	ON			OFF
	AXb-AXc間	OFF			ON

表 3.2 警報スイッチ・補助スイッチの定格

Electrical ratings of alarm switch and auxiliary switch.

形名	使用マイクロスイッチ	AC						DC					
		電圧V	電流A					電圧V	電流A				
			抵抗負荷	誘導負荷	ランプ負荷	電動機負荷			抵抗負荷	誘導負荷	ランプ負荷	電動機負荷	
NF 50-C	S-5	250 125 —	5 5 —	4 4 —	0.5 0.7 —	0.8 1.3 —	250 125 30	0.2 0.4 5	0.2 0.4 4	0.03 0.05 3	0.03 0.05 3		
NF 30 NF 50-S NF 100-E NF 225-C MB 100-E	NF 30-S NF 50-H NF 100-R NF 225-F MB 30-S	NF 50-CA NF 100-CA NFU 100 NF 400-C MB 50-S	V-15	460 250 125	5 10 10	2 2 10	0.75 0.8 3	250 125 30	0.3 0.4 10	0.2 0.4 10	0.05 0.1 4	0.05 0.1 4	
NF 50-A NF 225-G NF 225-R NF 400-H NF 600-C	NF 100-C NF 225-F NF 400-B NF 400-R NF 600-H	NF 100-H NF 225-H NF 400-C NF 600-B NF 600-R		460 250 125	5 10 10	2 2 10	0.75 0.8 4	250 125 30	0.3 0.4 10	0.2 0.4 10	0.05 0.1 4	0.05 0.1 4	
NF 800-B NF 1000-B NF 1200-H NFT 100 NFT 400 NFU 225	NF 800-H NF 1000-H NF 1200-H NFT 100 NFT 600 MB 225-G	NF 800-R NF 1000-B NF 1200-B NFT 225 NFT 800	X-10 G	460 250 125	5 10 10	2.5 10 10	0.75 1.25 1.5	250 125 30	5 10 10	3 6 10	0.75 1.5 3	1 4 6	
NF 1600 NF 2000 NF 3200	NF 2500	X-10 G		460 250 125	5 10 10	2.5 1.25 1.5	0.75 1.25 2.5	250 125 30	5 10 10	3 6 10	0.75 1.5 3	1 4 6	

図 3.2 補助スイッチの動作時間(ON操作)例  
Operating time of auxiliary switch on ON operation.図 3.3 補助スイッチの動作時間(OFF操作)例  
Operating time of auxiliary switch on OFF operation.

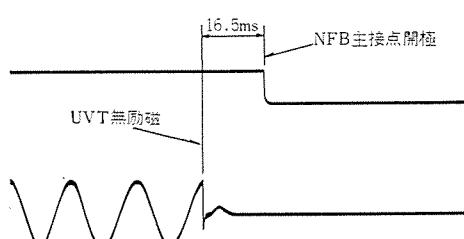
### 3.2 警報スイッチ・補助スイッチの動作と主接点の動作

NFBを、ON・OFF・トリップさせたときの主接点動作と、警報スイッチ・補助スイッチの動作との時間ずれが、シーケンス制御上問題になることがある。このずれ時間はNFBの機種により異なり一定していない。補助スイッチの動作時間例を図3.2、図3.3に示す。

警報スイッチの動作時間例を後述の図5.1、図5.2に示す。

### 4. 不足電圧引きはずし装置

不足電圧引きはずし装置は、保持回路電圧が規定の値(定格電圧の70%以下20%に至るまで)以下に低下した場合NFBをトリップさせる装置である。保持回路電圧をNFBの回路電圧にとれば、停電のときNFBがトリップするので、停電が回復したとき、電気機械が知らぬ間に運転状態となると危険な場合などの安全装置として利用できる。

図 4.1 不足電圧引きはずし装置の動作時間例  
Tripping time of under-voltage trip device.

保持回路電圧が定格電圧の85%以上に回復すると、不足電圧引きはずし装置が復帰するので、NFBのとてをリセットしてON操作すれば再通電される。

NFBの機種によっては、保持回路電圧が回復していない状態でも、リセットしうる不足電圧引きはずし装置がある。これは、構造上不足電圧引きはずし装置の復帰動作にNFBの可動接触子の動きを利用しているものがあるので、この構造の不足電圧引きはずし装置では、保持回路電圧が回復していない状態ではリセットし、ON操作を行なう途中において引きはずしが行なわれトリップ状態となる。したがって補助スイッチが瞬間に動作したり、あるいは主接点が瞬間に閉じたりすることがある。この動作がシーケンス制御上問題となる場合には、遅延リレーで動作を遅らせるなどの方式とする必要がある。

不足電圧引きはずし装置が動作してNFBの主接点が開極するまでの動作時間の一例を図4.1に示す。

### 5. 電圧引きはずし装置

電圧引きはずし装置は、引きはずしコイルに電圧を加えてNFBをトリップさせる装置である。回路に異常が生じたとき、検出リレー等の動作によって引きはずしコイルに電圧が印加されたり、あるいは人為的に押しボタンスイッチで電圧が印加されたりする。

電圧引きはずし装置の引きはずしコイルは、短時間定格であるため電圧は連続して印加できない。電圧を連続印加するときは、前述

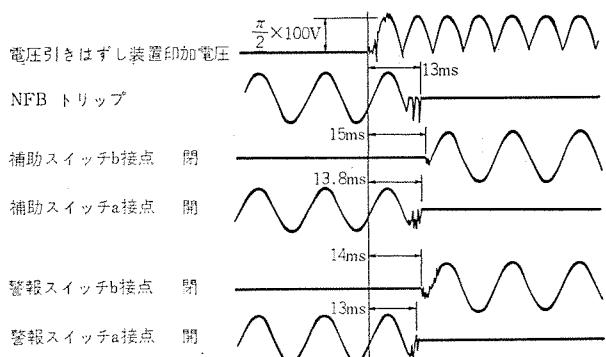


図 5.1 電圧引きはずし装置の動作時間と警報スイッチ・補助スイッチの動作例  
Operating time of shunt trip device, alarm switch and auxiliary switch.

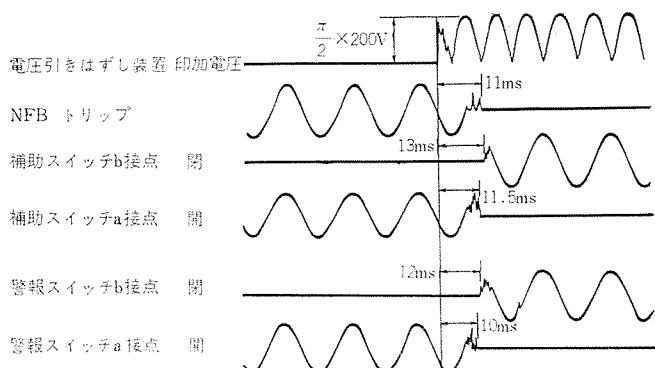


図 5.2 電圧引きはずし装置の動作時間と警報スイッチ・補助スイッチの動作(印加電圧 200 %)  
Operating time of shunt trip device, alarm switch and auxiliary switch.

の補助スイッチを直列に組み合わせて、NFB がトリップしたときに印加電圧をしゃ断する。

また電圧引きはずし装置は、まれに定格電圧の2倍程度の高い電圧を印加して使用することがある。これは NFB の開極時間(引きはずしコイルに電圧が印加されてから、主接点が開くまでの時間)ができるだけ短くしたいとき、あるいは客先で引きはずしコイルを共用化したいときに時々使用されている。しかしこのばあい注意すべきことは、コイルの焼損を防ぐ処置はもちろん必要であるが、引きはずし機構に与える衝撃力が大きくなること、直列接続の補助スイッチが過電圧励磁電流をしゃ断しうるか、など各機種について使用可否を検討したうえで採用する必要がある。

電圧引きはずし装置が動作して、NFB の主接点が開極するまでの動作時間、および警報スイッチ・補助スイッチの動作状態の一例を、図 5.1 に示す。図 5.2 は電圧引きはずし装置に定格電圧の2倍の過電圧を印加した場合の動作状態を示す。

## 6. 電動操作装置

電動操作装置は、NFB を遠方から ON・OFF する場合に使用する。操作電動機は整流子形直流分巻電動機で、操作電圧が交流のときは、シリコン整流スタックで直流に変換し電動機を回転させる。操作電圧が交流・直流とも 100 V 以上のときは直列抵抗を入れて電動機は直流 100 V を使用している。これは電動機が間欠定格で小形高出力としているため、電機子に流れる電流が大きく、整流子の整流作用が高電圧になるほど悪くなるので、直流 100 V 以上の電動機は使用していないためである。

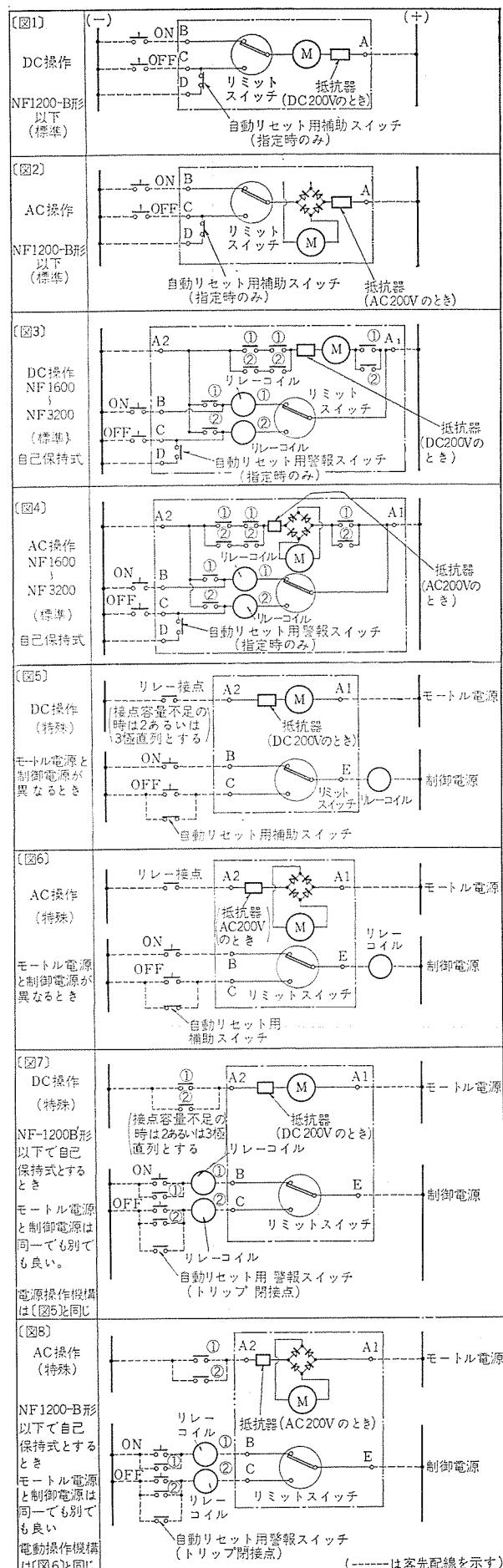


図 6.1 電動操作装置内部配線と操作回路配線  
Connection diagrams of motor Operator mechanism.

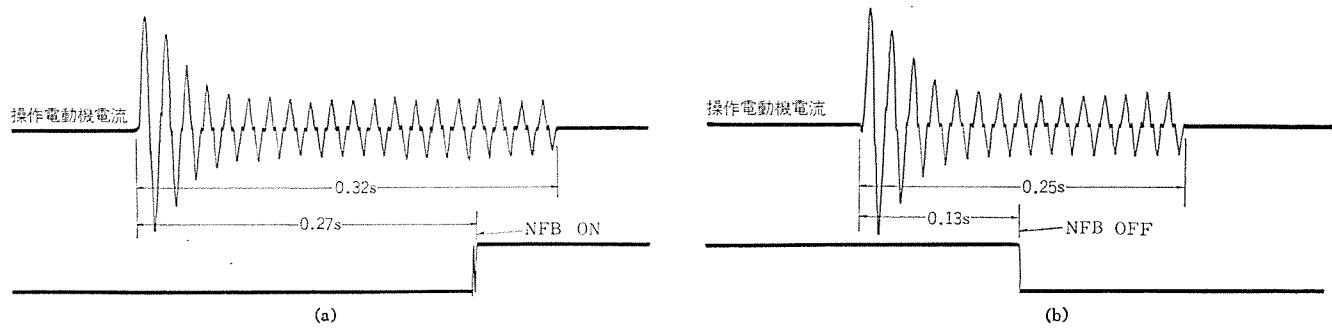


図 6.2 電動操作装置の動作時間 (NF 100-R 形の例)  
Operating time of motor Operator.

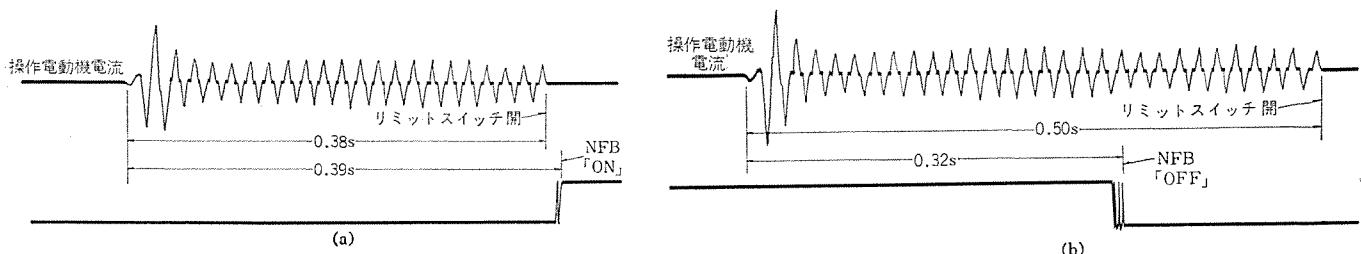


図 6.3 電動操作装置の動作時間 (NF 3200 形の例)  
Operating time of motor Operator.

付属装置	使用例 (接続図)	摘要
警報スイッチ		しゃ断器がトリップしたとき (PL1) が点灯する
補助スイッチ		しゃ断器がONのとき (PL1) が点灯する しゃ断器がOFFまたはトリップのとき (PL2) が点灯する
警報スイッチ + 補助スイッチ		しゃ断器がONのとき (PL1) が点灯する しゃ断器がOFFのとき (PL2) が点灯する しゃ断器がトリップのとき (PL2) と (PL3) が点灯する
警報スイッチ 2個 + 補助スイッチ		しゃ断器がONのとき (PL1) が点灯する しゃ断器がOFFのとき (PL2) が点灯する しゃ断器がトリップのとき (PL3) が点灯する

付属装置	使用例 (接続図)	摘要
電圧引きはずし装置		押しボタンスイッチを押すとしゃ断器をトリップさせることができる
電圧引きはずし装置 + 補助スイッチ		電圧引きはずし装置の電源が別にあり、電圧引きはずしと補助スイッチを直列に接続して、コイル焼損を防ぎ、連続定格の電圧引きはずし装置として用いる。しゃ断器の機種によっては、標準の電圧引きはずし装置でこのコイル焼損防止補助スイッチがついているものがある
不足電圧引きはずし装置		主回路の電圧が70~20%以下になったばあいあるいは停電するとしゃ断器がトリップする
不足電圧引きはずし装置 + 補助スイッチ		電源 A か B のいずれか一方のみから、負荷に供給するばあいの電気的インタロック

注) 1. 警報スイッチの接続図はしゃ断器がトリップのばあいの状態を示す  
2. 補助スイッチの接続図はしゃ断器がOFFのばあいの状態を示す

図 6.4 付属装置の使用例  
Connection diagrams of accessories of no-fuse breakers.

電動操作装置の内部配線と操作回路配線の例を図 6. 1 に示す。この電動操作装置は、NFB の開閉寿命以上の耐久力をもつてるので、電動機のブラシ交換・注油などの保守は不要である。

### 6.1 自動リセット式

電動操作装置で自動リセット式の操作方法を用いることがある。これは、NFB がトリップしたとき補助スイッチ（操作方式が自己保持リレー式のときは警報スイッチ）の動作により電動機を動かし、自動的にリセット操作を行なうものである。再投入するばあいには、リセット操作信号なしで ON 信号だけですむ利点がある。しかし当然のことながら、トリップ原因を除かないで（たとえば、負荷側で短絡した個所がありそれを直さずに）ON 操作をすると、ON 信号が持続している間は、ON—トリップ—リセット—ON—…… を繰り返すことになるので、ON 操作信号を与える時間を制限する処置が必要である。

前述の不足電圧引きはずし装置が NFB に付属し、NFB が OFF の状態でそれが動作したときには、NFB 内部ではトリップしているので、自動リセット式操作方法でないものは、つぎに ON 操作しても電動機が空転することがある。このようなばあいには空転後一度 OFF 操作を行ない、しゃ断器をリセットさせて再度 ON 操作を行なう必要があるが、この自動リセット式操作方法にすれば ON 信号だけで再投入される。

### 6.2 電動操作装置のリミットスイッチと補助スイッチの動作関係

NFB の主接点の動作と補助スイッチとの動作関係は前述したが、電動機のリミットスイッチの動作と補助スイッチの動作時間ずれが、シケ

ンス制御上問題にあることがある。この時間ずれは、NFB の機種や操作速度によって異なる。傾向としては大形の NFB になるほど、また操作速度が速くなるほど、補助スイッチの動作よりリミットスイッチの動作が早くなる。この理由は、NFB の主接点はトグルリンク機構と引きばねの作用によって開閉されるが、電動機が高速で回転し、NFB のとつを急激に操作した場合は、引きばねの作用線がトグルリンクのデッドポイントを越えても、その瞬間に主接点は動作せず、慣性のため少し遅れて動作するためである。

操作電動機に電圧が印加されてから NFB が ON・OFF されるまでの時間例を図 6. 2、図 6. 3 に示す。補助スイッチの動作は図 3. 2 図 3. 3 に示すように NFB 主接点とほとんど同時に動作する。

前述した NFB 各種付属装置の使用例（接続図）を図 6. 4 に示す。

## 7. む す び

以上 NFB の付属装置について述べてきた。付属装置で現在課題となっているものに、電動操作装置の操作時間短縮がある。これは船舶などで発電機の並列運転が行なわれる場合、並列運転開始時の同期投入上、操作時間の短いものが必要なためである。その他、サイリスタ制御回路では、異常発生からすばやく回路をしゃ断するために、電圧引きはずし装置で NFB をトリップさせる方が用いられているが、この動作時間短縮と励磁電流を小さくすること、また保持回路電圧が復帰可能電圧以下であってもリセットしうる不足電圧引きはずし装置では、シーケンス制御上不具合となるばあいがあるので、これをリセット不能な構造に改良すること、などがある。

# ノーヒューズしゃ断器と電磁開閉器の協調

岡戸弘行\*

## Coordination between No-fuse Breakers and Magnetic Starters

Nagoya Works Hiroyuki OKADO

There are many cases where no-fuse breakers and electromagnetic switches are used in combination on general branch circuits. However, as the protection coordination between the former and the latter is a problem falling on a boundary territory of the both, it has been a trend that not sufficient study is made on it in using them.

When reliability is taken into consideration on the branch circuits regarded as one system, the protection coordination is a matter of indispensable importance. This article takes up this problem and look into the matter thoroughly, making concrete discussion on the protection coordination between the no-fuse breaker and the electromagnetic switch and describing it in brief.

### 1. まえがき

ノーヒューズしゃ断器と電磁開閉器が組合わされて使用されるケースは、一般の分岐回路において、いわゆるコンビネーションスターとして、あるいはコントロールセンタ等とその例がきわめて多い。これら分岐回路に使用されるノーヒューズしゃ断器と電磁開閉器の選定については、それぞれ個々の器具の場合は、相当豊富な選定基準が示され、ほぼ適切な器具が使用されている。しかしながらノーヒューズしゃ断器と電磁開閉器の間の保護協調は、両者の境界領域の問題であるため、今まで必ずしも十分な検討がなされないまま使用されてきた傾向が

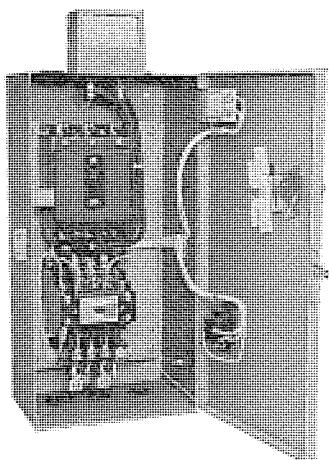


図 1.1 コンビネーションスターの一例  
Combination starter.

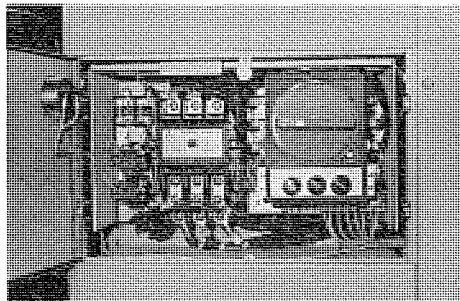


図 1.2 コントロールセンタユニットの一例  
Unit of control center.

あるが、分岐回路を一つのシステムとして、その信頼性を考えるうえでは、この保護協調は欠かすことのできない問題であると考えられる。ここでは、この問題を探り上げて考え方を整理し、かつ当社の製品である NF 形ノーヒューズしゃ断器と、MS 形電磁開閉器の保護協調についても具体的な検討を加え、ノーヒューズしゃ断と電磁開閉器の保護協調を考慮した選定のための参考に供したいと考える次第である。

### 2. ノーヒューズしゃ断器と電磁開閉器

ノーヒューズしゃ断器と電磁開閉器は、根本的に思想の異なる製品であり、したがってその保護協調を考えるに当たっては、先ずそれらの特性を理解しておく必要がある。

電磁開閉器は、本来誘導電動機の過負荷運転または拘束時の保護および通常の運転電流の開閉における長寿命という点に、その特長をもっている。したがって電磁開閉器の投入またはしゃ断しうる電流値は、その役割から電動機の運転で起こりうる最大電流を考慮して、各種規格にも表 2.1 のごとく規定されているが、定格電流の 10 倍を若干越える程度に設計されているものがほとんどで、短絡電流のような大電流をしゃ断する能力はもっていない。また電磁開閉器に一般的に使用されているサーマルリレーは、電動機の保護装置としての役割を果しているが、これも一般にヒータ定格電流の 10 倍以上の過電流域において、動作する前にヒータが溶断する点を必ず持っている。

電磁開閉器は電動機の制御および保護という点においては、精妙な特性をもっているが、上述のようにこれに期待しうる保護電流域は定格電流の 10 倍程度までと考えるべきで、それを越える電流域

表 2.1 電磁接触器に要求される閉路しゃ断容量(かご形電動機用)  
Making and breaking capacity required for magnetic contactors.

規格名	閉路電流容量	しゃ断電流容量	備考
JIS JEM	10I	10I	A級
IEC	12I (100A 以下) 10I (100A をこえるもの)	10I (100A 以下) 8I (100A をこえるもの)	AC <sub>4</sub> 級
VDE	12I (100A 以下) 10I (100A をこえるもの)	8I (100A 以下) 6I (100A をこえるもの)	4級
BS	8I	8I	A <sub>4</sub> 級

注) I は定格電流

については別の装置による必要がある。

分岐回路において、10倍を越える電流域の保護装置としては、ノーヒューズ しゃ断器が、使用上の便利さから最もポピュラーに使用されている。ノーヒューズ しゃ断器は配線保護を主体とした保護装置で、電線保護に適した動作特性を備えており、過電流域から短絡電流域までの保護が可能であるが、電動機の制御および保護には、開閉寿命および動作特性の点から必ずしも適さない。したがって電動機を負荷にもつ分岐回路においては、ノーヒューズ しゃ断器と電磁開閉器の組合せを使用し、そのカバーする電流域を適切に分担させることにより良好な協調形態が得られるが、この電流域の分担が確実に切れ目なくできるかどうかに保護協調の問題がある。

### 3. 保護協調の一般的な検討

#### 3.1 保護協調の要件

電動機を負荷にもつ、ノーヒューズ しゃ断器および電磁開閉器を備える分岐回路において、保護協調をとる場合に考える項目としては次が考えられる。

(a) 電磁開閉器は、電動機の正常状態において起りうる最大電流を確実に投入しや断できること。

(b) サーマルリレーは、電動機の過負荷および拘束時の保護を確実に行なえる動作特性をもつこと。

(c) ノーヒューズ しゃ断器は、各短絡点において流れうる短絡電流を確実にしゃ断しうる容量のものであること。(カスケード しゃ断も含めて)

(d) 分岐回路の電線の太さは短絡電流が流れた場合に、ノーヒューズ しゃ断器のしゃ断時間内に通過する  $I^{2t}$  により焼損しないサイズとすること。

(e) 分岐回路の配線は、サーマルリレーまたはノーヒューズ しゃ断器により過電流から確実に保護されること。

(f) ノーヒューズ しゃ断器は、電動機のラッシュ電流により誤動作しないこと。(特に投入時の半サイクルのラッシュ電流に注意)

(g) サーマルリレーとノーヒューズ しゃ断器の動作特性は交差点をもち、全電流域にわたって切れ目ない保護動作特性をもち、かつ交差点以下の電流ではサーマルリレーの特性が下まわっていること。

(h) 動作特性的交差点は、電磁開閉器のしゃ断容量以下の電流値であること。

(i) 短絡電流が電磁開閉器に流れた場合、ノーヒューズ しゃ断器がしゃ断するまでに、電磁開閉器が破損しないこと。

以上の各条件がすべて満足されれば、分岐回路の保護協調は万全であるが、経済性の点よりすべての条件を完備することは必ずしも得策とは言えない。分岐回路の保護協調の度合は、分岐回路のシステムとしての信頼性と解釈することができるが、このシステムとしての信頼性は、必要度と経済性との関連において、いくつかの段階で考えるべきであると思う。

上記の条件のうち、(a)～(f)の条件は必要不可欠で、また経済性の面でも支障なく実現できるが、(g)～(i)の条件は、その必要度に応じて検討されるべきものであると考える。

#### 3.2 ノーヒューズ しゃ断器と電磁開閉器の動作特性の関係

電磁開閉器のサーマルリレーの動作特性は、電動機を保護しかつ誤動作を発生しないために、E種電動機について少なくとも次の条件を必要とする。

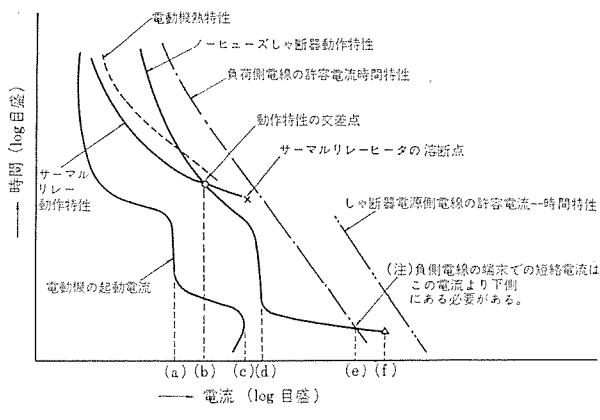
(1) 電動機全負荷電流の100%で不動作、125%では動作する

こと

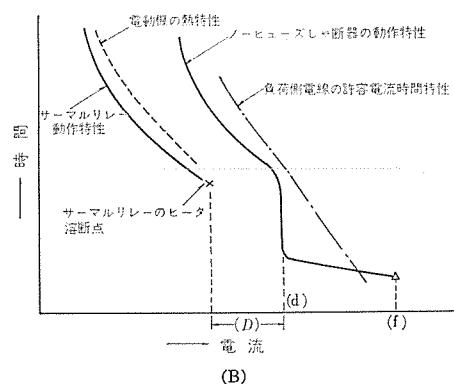
(2) 電動機の起動(拘束)電流で、3～30秒の間で動作すること

図3.1に、サーマルリレーの動作特性と電動機の熱特性および電動機の起動電流が示されているが、各曲線がこの図のごとき関係にあれば、条件は満足されている。この条件は、RC目盛のサーマルリレーでは、一般に電動機の全負荷電流に等しいヒータ定格のサーマルリレーを選定すれば実現できる。

一方これに組合せせるノーヒューズ しゃ断器は、電気設備技術基準の第185条四および第186条五により、電動機全負荷電流の3倍以下定格電流のものに制限されている。したがってこれ以下の定格電流のものを使用する必要があるが、あまり小さい定格電流のものを選定すると電動機起動時の突入電流による誤動作を発生する可能性がある。かご形電動機は起動時に5～7倍の定常的な起動電流



(A)  
(a) : 電動機の定常起動電流  
(c) : 電動機の過渡突入電流  
(d) : しゃ断器の瞬時引きはずし電流  
(f) : しゃ断器の定格しゃ断容量  
(設置点での短絡電流)



(B)  
図3.1 保護協調の各特性の関係  
Relation of each characteristics in coordination.

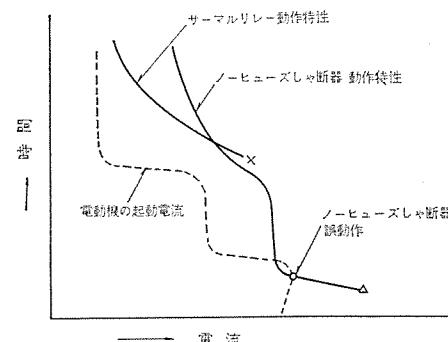


図3.2 ノーヒューズ しゃ断器の電動機突入電流による誤動作  
False tripping of no-fuse breaker according to rush current of a motor.

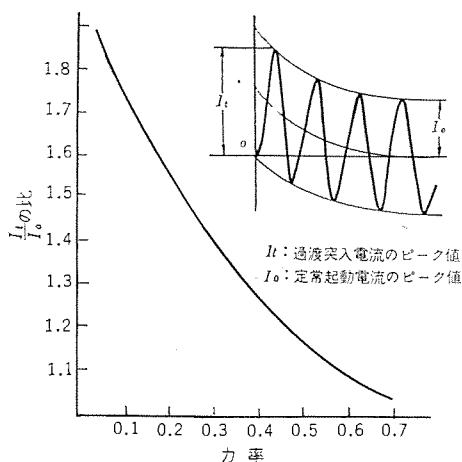


図 3.3 電動機の起動時の突入電流  
Rush current of a motor at the time of starting.

が流れるが、起動初期（特に最初の半サイクル）には直流分が重畠するため、さらに大きい過渡突入電流が流れ、その倍率は力率により図 3.3 のごとく変化する。電動機の起動力率を 0.4 遅れとすると、最大定常起動電流の約 1.3 倍となる。さらにまた瞬時再起動（電源切り後電動機が回転を停止する前に再起動）をする場合には、電動機の残留電圧の影響で最悪の場合さらに 2 倍、すなわち定常起動電流の 2.6 倍にも達することになる。図 3.4 に実際の電動機について実測した結果を示す。

ノーヒューズ しゃ断器の瞬時引きはずし時間は半サイクル程度で十分動作するので、選定に当たってはこの突入電流で動作しないように注意する必要がある。この突入電流による誤動作を避けるためには、実測結果より見て、しゃ断器の瞬時引きはずし電流は、定格電流の 14 倍程度にとれば支障ないようである。

このように電磁開閉器とノーヒューズ しゃ断器の動作特性を選定した場合、両者の動作特性に交差点をもたせることが問題となる。図 3.1(A) は 3.1 節(g) の条件を満足する場合、図 3.1(B) は条件を満たさない場合を示す。図 3.1(B) の場合は保護協調の切れ目(D) が存在するため、この領域の電流が流れた場合はサーマルリレーのヒータが溶断する。また図 3.1(A) の場合でも、動作特性的交差点が電磁開閉器のしゃ断容量を越える場合には、サーマルリレーが動作しても電磁開閉器はしゃ断不能となり破損する。したがって保護協調上、動作特性が交差点をもつ場合でも 3.1 節(h) の条件を満足する必要がある。

本節で述べてきた条件は保護協調上満足することが望ましいが、しかしこのような電流領域の幅は比較的狭く、またこの領域の流れる可能性も少ない（この領域の電流は主として電動機の巻線の接地、レバーに起因する）ので、確率的に無視することも可能かも知れない。

### 3.3 短絡電流が流れた場合の電磁開閉器

電磁開閉器に電流が流れた場合、接点間に、ほぼスノードンの式で表わされる反発力が生ずる。

この反発力により電磁開閉器は通常定格電流の 20~40 倍の電流から接点の浮き上がり（開離）を発生する。したがってこれ以上の短絡電流が流れた場合には、接点の浮き上がりにより接点間にアークを発生し、接点溶着を発生する可能性が出てくる。

短絡事故が発生した場合、短絡電流はノーヒューズ しゃ断器によりしゃ断されるが、その際通過する電流の波高値および  $I_{pt}$  は、規約

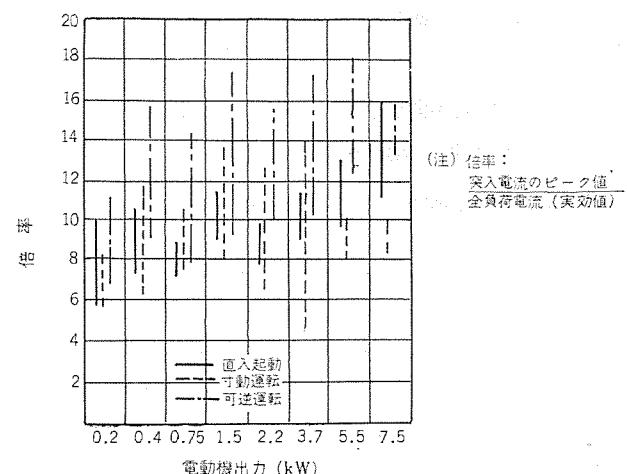


図 3.4 電動機の全負荷と起動突入電流の倍率  
Ratio of rush current and full-load current of a motor.

表 3.1 保護協調の形式  
Type of coordination.

保護協調の形式	許容される損傷（スタータについて）
a	いかなる損傷も許容、必要に応じ部品の交換または全体の取換えを行なう
b	過負荷继電器の特性のパラメントセットは許容その他については損傷のないこと
c	いかなる損傷もないこと

注) 接点の難度の落着は保護協調のすべての形式について許容される

短絡電流の閾数として、短絡電流の増加とともに増大傾向にあるので、ある限度を越えた短絡電流が流れる場合には、ノーヒューズ しゃ断器により電磁開閉器の破損を防止することは、この接点間でのアークの発生を防止する（接点が浮き上がりないようにする）か、ごく小量におさえないかぎり困難である。しかしながら短絡点が負荷側の先端で、短絡電流が小さい場合は、4.4 節に記載するように電磁開閉器の破損をまぬがれる場合もある。

### 3.4 保護協調の度合

ノーヒューズ しゃ断器は現在各種の性能・特性のものが製作されており、また電磁開閉器についても保護協調上若干の改良を加味しているので、3.2 節および 3.3 節で検討してきた事項に関連して、保護協調の度合として各種の段階のものが実現できる。この保護協調の度合にどの程度のものを要求するかは、先にも記載したように、その必要度と経済性の観点より決められるべきであろう。

この点に関連して、IEC 規格 292-1 “motor starter” の付録 C(案)には、短絡時の電磁開閉器の損傷の程度により、表 3.1 に示すような“保護協調の形式”(Type of coordination) が提示されている。形式 a はほとんど保護協調上の配慮の必要がなく最も安価な形式であり、形式 b, c に移行するに従ってそれなりの配慮が必要となり高価となってくる。

またその他の各種の規格での取り扱い方の例を記載すると、UL 規格（アメリカの安全規格）No. 508, CSA 規格（カナダ安全規格）C 22-2 No. 14 では、電磁開閉器をその定格電流の 3~4 倍の定格のヒューズまたはしゃ断器と組合わせて 5,000 A の短絡電流を流したとき電磁開閉器は異常ないこと（ただし接点の溶着は許容）と規定している。また NEMA 規格では、(1) 短絡電流は分歧のしゃ断器により完全に除去されること、(2) 電磁開閉器は修繕または取り換えが必要になってもよいと記載している。

これらの記載から判断して保護協調の度合は、IECの形式aまたはb程度が一般的と考へることができようか。

#### 4. MS形電磁開閉器とNF形ノーヒューズ しゃ断器の保護協調

##### 4.1 MS形電磁開閉器(S形電磁接触器)のしゃ断容量

ノーヒューズしゃ断器とサーマルリレーの動作特性の交差点は図3.1(A)に示すようなしゃ断器の反限時特性領域にあるとは限らず、図4.1のごとく瞬時引きはずし領域にある場合もある。このような場合、電磁開閉器はしゃ断容量に相当の余裕がないと、交差点が電磁開閉器のしゃ断容量をオーバする可能性がある。MS形電磁接触器はこの点を配慮して、しゃ断容量に相当余裕をもって設計されており、表4.1に示すごとく定格電流の15倍以上となっている。したがって動作特性の交差点が図4.1のごとき状態の場合でも、電動機に対して定格容量ぎりぎりの選定ができる、保護協調を考えた選定をする場合経済的に有利となっている。

##### 4.2 TH形サーマルリレーの過電流耐量

MS形電磁開閉器に使用しているTH形サーマルリレーは、1)動作特性の交差点をできるだけしゃ断器の反限時特性の領域にもってくるために、若干長めの動作時間限界をもたせている点、および2)ヒータの過電流耐量を大きくしている点など、NF形ノーヒューズしゃ断器との動作特性上の協調を前提にして設計されたものであり、特にサーマルリレーが動作する前にヒータが溶断するいわゆる溶断点は、図4.2に示されているが、最小ヒータ定格電流の15倍(一部小定格のもので12倍程度のものがあるが)となっており、NF形ノーヒューズしゃ断器と確実な協調が取れるように配慮されている。

また短絡事故時のサーマルリレーのヒータの溶断は、通過する $I^2t$ の大きさにより決定されるが、TH形は、このヒータ溶断 $I^2t$ の値も、比較的大きく設計しており、良好な保護協調が得られるように努めて

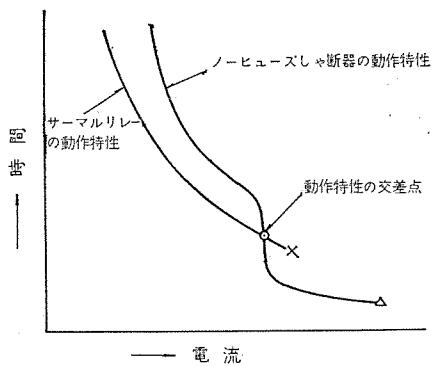


図4.1 しゃ断器とサーマルリレーの交差点

Cross point of characteristics between a no-fuse breaker and an overload relay.

表4.1 S形電磁接触器のしゃ断限界  
Maximum rupturing capacity of type S magnetic contactors.

形名	定格電流 A		しゃ断可能な電流 AC 440V A
	AC 440V レッド定格	AC 440V グリン定格	
S-10	6	7	150
S-18	13	15	270
S-25	18	20	400
S-35	25	35	700
S-50	50	60	1,000
S-80	80	85	1,600
S-100	100	110	2,000
S-150	150	165	2,500
S-300	300	300	4,500

いる。TH形サーマルリレーの許容 $I^2t$ およびヒータ溶断 $I^2t$ の概略の数値を表4.2に示す。

##### 4.3 動作特性の協調

図4.3～図4.7に、MS形電磁開閉器とNF形ノーヒューズしゃ断器の保護協調特性の数例を示す。これらはいずれも良好な協調を実現していることがわかる。

NF形配線用しゃ断器は、不必要的誤動作を防止するため、瞬時引きはずし電流を若干高い値に設定している。したがってMS形電磁開閉器との適切な保護協調をとるために、選定するNF形ノーヒューズしゃ断器の定格電流は比較的小さなものでよく、ほぼサーマルリレー定格の1.5倍程度となる。動作特性の協調を考慮して選定したNF形しゃ断器とMSO形電磁開閉器の組合せの一例を表4.3に示す。この組合せは、ほぼ図示のごとき良好な協調特性を実現している。

動作特性の協調を考えるうえでの一つの問題として、NF形ノーヒューズしゃ断器はサーマル式であるので、その定格電流の最低値が15Aであり、したがってTH形サーマルリレーの6.5A以下のヒータについては、保護協調がむずかしい点がある。このような場合の解決策としては、1) NF形ノーヒューズしゃ断器の代わりに、小定格のあるMB形モータブレーカを使用する方法と、2) TH形サーマルリレーを飽和リアクトル付きとする(飽和リアクトル付きはヒータの溶断点を定格電流の30倍以上とすることができる)方法の二つがある。この場合の保護協調特性の例を図4.8に示す。

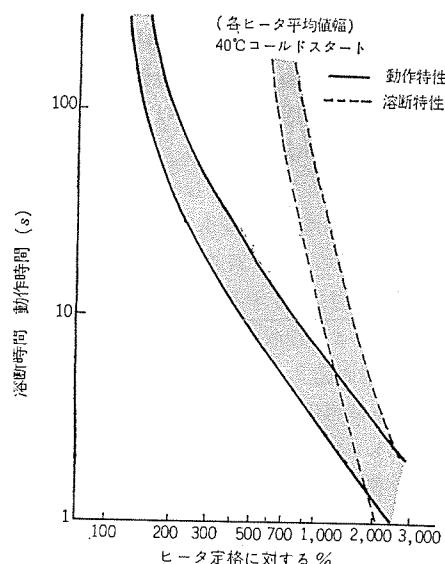


図4.2 TH-18, 18T, 35, 50, 100形サーマルリレーのヒータ溶断特性

Heater melting characteristics of the thermal relays types TH-18, 18T, 35, 50, 100.

表4.2 TH形サーマルリレーの短絡電流通過時の許容 $I^2t$   
Permissible  $I^2t$  of the thermal relays, series TH in short circuit.

形名	再使用可能な許容 $I^2t$ (A <sup>2</sup> s)	ヒータ溶断 $I^2t$ (A <sup>2</sup> s)	飽和リアクトル付きとした場合のヒータ溶断 $I^2t$ (A <sup>2</sup> s)
TH-18	120～300 $I_{TH}^2$	200～540 $I_{TH}^2$	10,000 $I_{TH}^2$
TH-35	150～300 $I_{TH}^2$	250～570 $I_{TH}^2$	10,000 $I_{TH}^2$ 以上
TH-50	200～350 $I_{TH}^2$	300～600 $I_{TH}^2$	10,000 $I_{TH}^2$ 以上
TH-100	250～400 $I_{TH}^2$	400～600 $I_{TH}^2$	10,000 $I_{TH}^2$ 以上
TH-150 TH-300	TH-150およびTH-300は専用のCTと組合せ使用されるが大電流域ではCTが飽和して、ヒータの溶断は発生しないと考えてよい。		

注)  $I_{TH}$  : サーマルリレーヒータ呼称電流

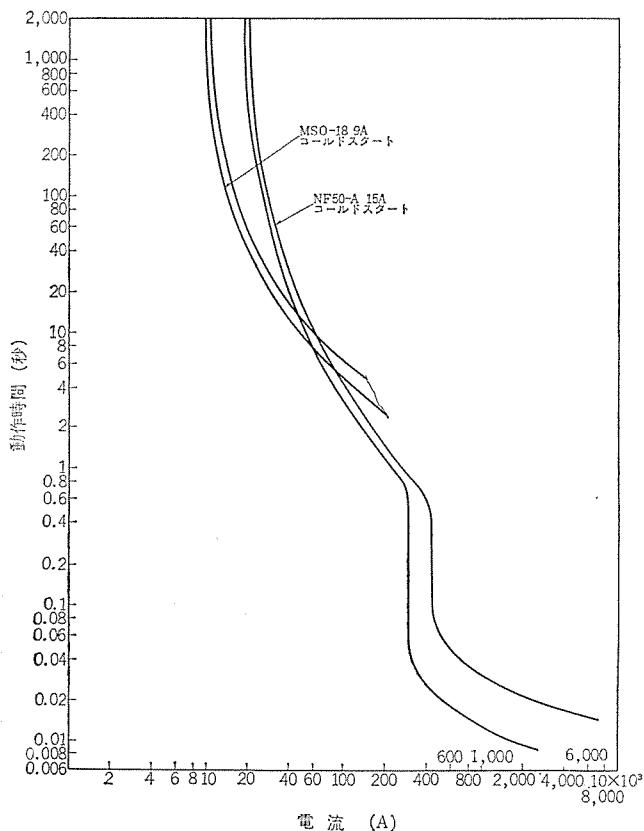


図 4.3 NF 50-A 形ノーヒューズ しゃ断器と MSO-18 形  
電磁開閉機の保護協調  
Coordination between type NF 50-A no-fuse breaker  
and type MSO-18 magnetic starter

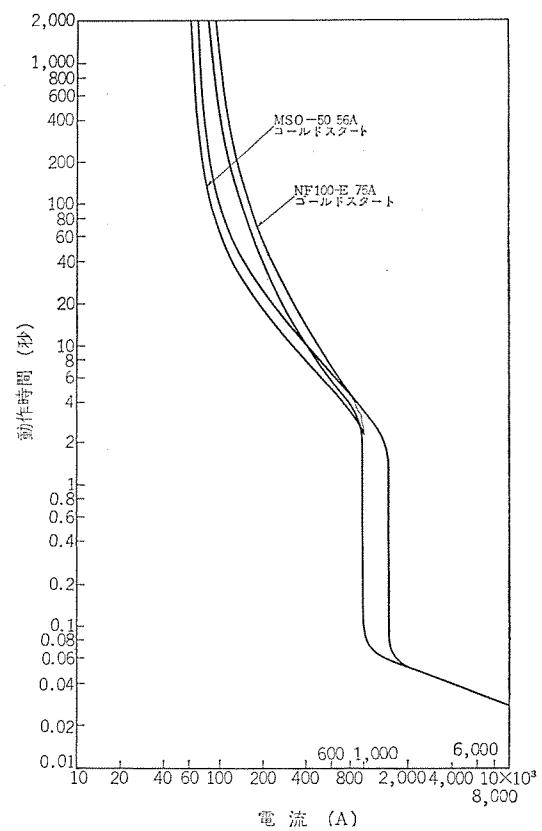


図 4.5 NF 100-E 形ノーヒューズ しゃ断器と MSO-50 形  
電磁開閉器の保護協調  
Coordination between type NF 100-E no-fuse breaker  
and type MSO-50 magnetic starter.

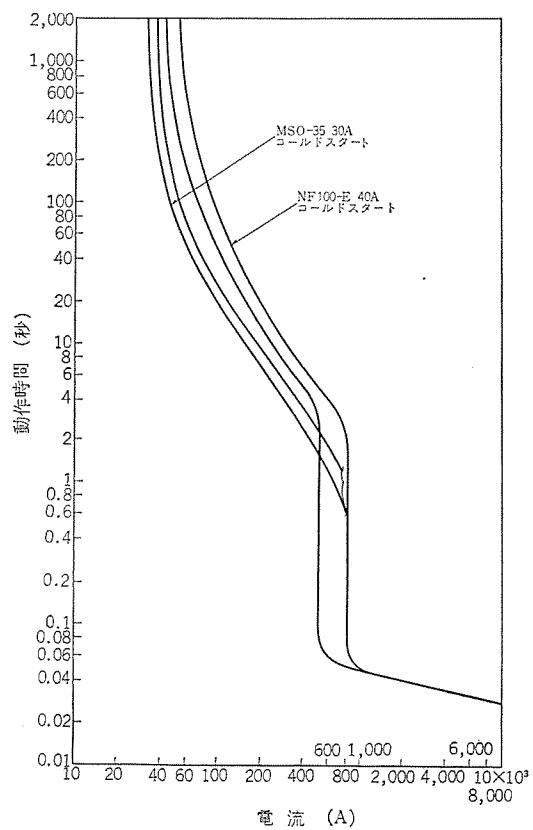


図 4.4 NF 100-E 形ノーヒューズ しゃ断器と MSO-35 形  
電磁開閉器の保護協調  
Coordination between type NF 100-E no-fuse breaker  
and type MSO-35 magnetic starter.

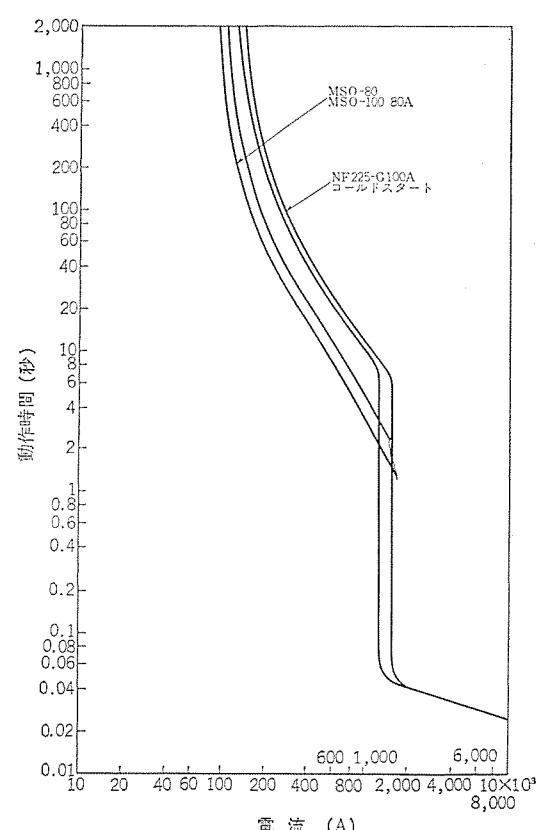


図 4.6 NF 225-G 形ノーヒューズ しゃ断器と MSO-80, 100 形  
電磁開閉器との保護協調  
Coordination between type NF 225-G no-fuse breaker  
and type MSO-80, 100 magnetic starter.

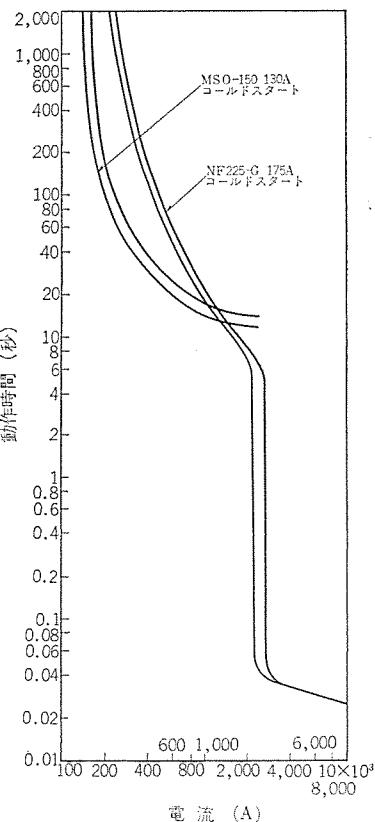


図 4.7 NF 225-G 形ノーヒューズ しゃ断器と MSO-150 形  
電磁開閉器の保護協調  
Coordination between type NF 225-G no-fuse breaker  
and type MSO-150 magnetic starter.

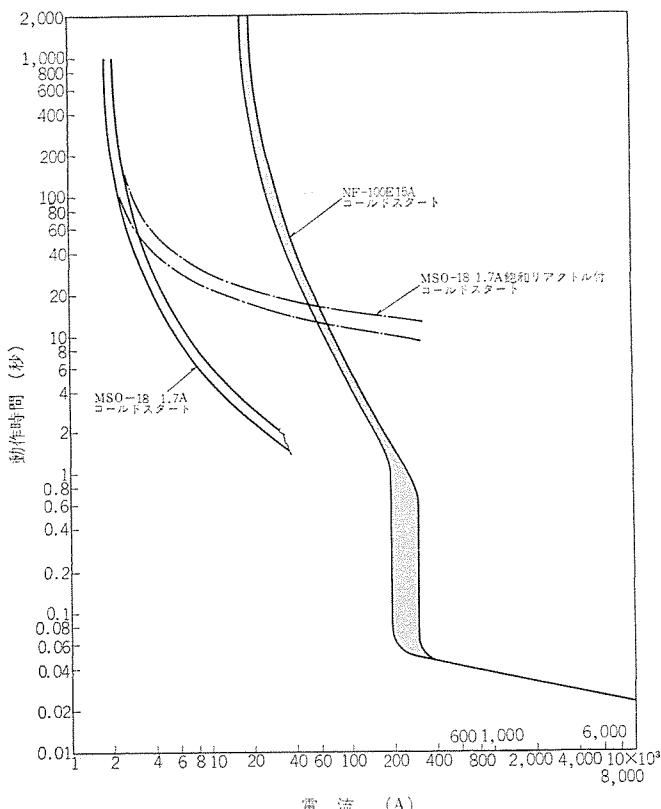


図 4.8 NF 100-E 形ノーヒューズ しゃ断器と MSO-18 形  
電磁開閉器(飽和トアクトル付)の保護協調  
Coordination between type NF 100-E no-fuse breaker and  
type MSO-18 magnetic starter (with saturating reactor).

表 4.3 NF 形ノーヒューズ しゃ断器と MSO 形 電磁  
開閉器の協調可能な組合せ

Combinations of type NF circuit breakers and type MSO magnetic starter for the desirable coordination.

組 合 せ	start 条件	適用電動機 kW		許容突入電流 A		
		NFB	MSO			
NF 50-B 12.5 A	MSO-18 7.5 A	cold	cold	3.7	180	
NF 50-B 15 A	MSO-18 9 A	cold	cold	2.2	180	
NF 50-B 20 A	MSO-18 9 A	cold	cold	2.2	220	
NF 50-B 20 A	MSO-18 11 A	cold	cold	5.5	220	
NF 50-B 30 A	MSO-18 15 A	cold	cold	3.7	7.5	300
NF 50-B 30 A	MSO-35 15 A	cold	cold	3.7	7.5	300
NF 50-B 40 A	MSO-35 22 A	cold	cold	5.5	11	500
NF 50-B 50 A	MSO-35 22 A	cold	cold	5.5	11	600
NF 50-B 50 A	MSO-35 30 A	cold	cold	7.5	15	600
NF 100-E 15 A	MOS-18 9 A	cold	cold	2.2	180	
NF 100-E 15 A	MSO-18 11 A	cold	cold	5.5	180	
NF 100-E 20 A	MSO-18 11 A	cold	cold	5.5	220	
NF 100-E 20 A	MSO-18 15 A	cold	cold	3.7	7.5	220
NF 100-E 30 A	MSO-35 18 A	cold	cold	3.7	7.5	330
NF 100-E 40 A	MSO-35 22 A	cold	cold	5.5	11	500
NF 100-E 40 A	MSO-35 30 A	cold	cold	7.5	15	500
NF 100-E 50 A	MSO-35 30 A	cold	cold	7.5	15	600
NF 100-E 50 A	MSO-50 41 A	cold	cold	11	22	600
NF 100-E 60 A	MSO-50 41 A	cold	cold	11	22	700
NF 100-E 75 A	MSO-50 56 A	cold	cold	15	30	900
NF 100-E 90 A	MSO-50 56 A	cold	cold	15	30	1,100
NF 100-E 90 A	MSO-80 67 A	cold	cold	19	37	1,100
NF 225-G 100 A	MSO-80 80 A	cold	cold	22	45	1,200
NF 225-F 125 A	MSO-80 80 A	cold	cold	22	45	6ノッヂ 1,200
NF 225-F 125 A	MSO-100 80 A	cold	cold	22	45	6ノッヂ 1,200
NF 225-F 150 A	MSO-100 107 A	cold	cold	30	45	6ノッヂ 1,500
NF 225-G 150 A	MSO-150 107 A	cold	cold	30	55	1,800
NF 225-G 175 A	MSO-150 130 A	cold	cold	37	75	2,100
NF 225-G 200 A	MSO-150 130 A	cold	cold	37	75	2,500
NF 225-G 200 A	MSO-150 160 A	cold	cold	45	90	2,500
NF 225-G 225 A	MSO-150 130 A	cold	cold	37	75	2,800
NF 225-G 225 A	MSO-150 160 A	cold	cold	45	90	2,800
NF 400-B 250 A	MSO-300 160 A	cold	cold	45	90	HI : 3,100
NF 400-B 300 A	MSO-300 160 A	cold	cold	45	90	HI : 3,700
NF 400-B 300 A	MSO-300 190 A	cold	cold	55	110	HI : 3,700
NF 400-B 350 A	MSO-300 230 A	cold	cold	65	132	HI : 4,400
NF 400-B 400 A	MSO-300 230 A	cold	cold	65	132	HI : 5,000
NF 400-B 400 A	MSO-300 270 A	cold	cold	75	150	HI : 5,000
NF 400-B 400 A	MSO-300 330 A	cold	cold	90	180	HI : 5,000

#### 4.4 短絡事故の検討

電動機を負荷にもち、ノーヒューズ しゃ断器および電磁開閉器を備える分岐回路において、このしゃ断器に関連する短絡箇所としては、図 4.9 の A～F の 6 個所で、その他の個所で短絡事故が発生する可能性はほとんどなく考慮する必要がないと思われる。したがってこれららの各点において短絡事故について以下に検討を加える。

先に 3.4 節で IEC 規格の保護協調の形式を紹介したが、図 4.9 の C または D 点で短絡事故が発生した場合は、短絡電流が大きく、これに対し S 形 電磁接触器の許容過電流は表 4.4 に示す程度であるので、保護協調の形式は一般に a 程度となり、b または c とすることは一般的には困難と思われる。しかしながら短絡点が図 4.9 の E または F の場合は、配線のインピーダンスによる電流の低減が相当大きく、図 4.9 の D, E 点間の電線こう長 50 m, 100 m について計算した結果 (D 点より上位のインピーダンスを 0 とした) は表 4.5 に示す数値となる。実際には D 点より上位のインピーダンスも加わるので、E 点で短絡した場合に電磁開閉器に流れる電流は表 4.5 の数値よりもさらに小さくなり、したがってこの場合には保護協調の形式として b または c にできる可能性が強い。F 点での事故の場合に

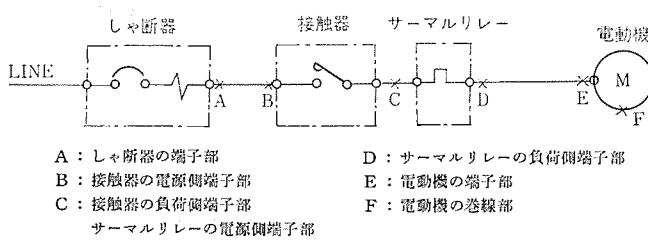


図 4.9 分岐回路の短絡点  
Short-circuit point at a branch circuit.

表 4.4 S形電磁接触器の許容過電流  
Permissible over current of type S magnetic contactors.

形名	通電10msのときの許容過電流A	許容過電流以下の短絡電流となる電線長m				
		電線の太さmm <sup>2</sup>	回路電圧			550V
			220V	440V	550V	
S-18	1,000	3.5	23	46	58	
S-25	1,200	8	46	93	116	
S-35	1,400	14	70	140	175	
S-50	2,000	22	80	160	200	
S-80	2,900	30	71	142	178	
S-100	4,000	38	65	130	163	
S-150	6,500	50	52	104	130	
S-300	10,000	150	85	170	213	

は、電流はさらに小さくなるためE点よりも条件は良くなる。表4.4に示したS形電磁接触器の許容過電流(NF形ノーヒューズしゃ断器のしゃ断時間と10msとし、短絡電流の限流なしと考えた場合の数値)をもとに、保護協調の形式Cを実現するために必要な電線こう長を計算した結果を表4.4に併記した。この数値はやはりD点より上位のインピーダンスを0として計算したものであるので、実際には電線のこう長はこれより若干小さくなるはずである。電線こう長が短い場合にも、1) 電磁接触器のサイズを上げる、2) ノーヒューズしゃ断器に限流効果のあるもの(当社NF形Rシリーズは規約短絡電流を20~50%に限流する)を使用する、等の方法によりある程度の長さまで、比較的容易に実現可能である。

TH形サーマルリレーについては、過電流耐量が表4.2に示したが、小容量定格のヒータを別にして一般的に保護協調の形式はbまたはcが比較的容易に実現できる。問題がある場合は飽和リクトル付きを使用すれば、ほとんどの場合解決が可能となる。

また図4.9のAまたはB点での短絡事故の場合は、ノーヒューズしゃ断器のしゃ断容量さえ十分であれば問題ないことは自明である。

#### 4.5 NF形ノーヒューズしゃ断器とMS形電磁開閉器の協調

以上に検討してきたように、NF形ノーヒューズしゃ断器とMS形電磁開閉器の協調は、それぞれの選定を適切に行なえば、3.1節で述べた保護協調の条件のうち(a)~(h)までについては、比較的容易に条件を満足しうる。しかし短絡事故時については、図4.9の

表 4.5 配線末端で短絡した場合の規約短絡電流(対称値)  
Prospective short-circuit current at the end of cable.

電線の太さ	短絡電流 A			
	電線こう長 50 m のとき		電線こう長 100 m のとき	
	220V	440V	220V	440V
1.6φ	300	600	150	300
2.0φ	460	920	230	460
5.5 mm <sup>2</sup>	800	1,600	400	800
8 mm <sup>2</sup>	1,100	2,200	550	1,100
14 mm <sup>2</sup>	2,300	4,600	1,150	2,300
22 mm <sup>2</sup>	3,100	6,200	1,550	3,100
30 mm <sup>2</sup>	4,100	8,200	2,050	4,100
38 mm <sup>2</sup>	5,200	10,400	2,600	5,200
50 mm <sup>2</sup>	6,700	13,400	3,350	6,700
60 mm <sup>2</sup>	8,000	16,000	4,000	8,000
80 mm <sup>2</sup>	10,500	21,000	5,200	10,500
100 mm <sup>2</sup>	13,000	26,000	6,500	13,000
125 mm <sup>2</sup>	15,000	30,000	7,500	15,000
150 mm <sup>2</sup>	17,000	34,000	8,500	17,000
200 mm <sup>2</sup>	19,000	38,000	9,500	19,000

EまたはF点での短絡で、IEC規格の保護協調の形式bまたはc程度、CまたはD点での短絡では、形式a程度となる。

CまたはD点の短絡事故時も短絡保護装置によっては(たとえば当社のNFT形またはNFU形しゃ断器など)保護協調の形式をcまたはbとすることは可能であろう。しかしながらcまたはD点の短絡は、電磁接触器またはサーマルリレーの端子部で発生するので、端子間の絶縁の劣化や端子の損傷は避けることは不可能で、結局電磁開閉器の取りかえを必要とするので、保護協調の形式をbまたはcとしてもそのメリットが少ないとと思われる。したがって短絡時の保護協調の形式としては、E点またはF点での短絡の場合は、c、CまたはD点の短絡の場合はa程度とするのが最も適切ではないかと考える。3.1節の(i)の条件は、EまたはF点での短絡の場合に適用すると解釈すれば、上述のようにNF形ノーヒューズしゃ断とMS形電磁開閉器の組合せにおいて、ある程度満足されると言える。

## 5. むすび

配線用しゃ断器と電磁開閉器の協調について、一般的な検討およびNF形とMS形の概況を記載した。この保護協調は二つの器具の境界領域の問題であるため、データも不足しかつ問題も多く、必ずしも十分な検討とならなかったが、概要はおわかりいただけたと考える。

また本文では電線についての検討を記載しなかったが、これについてはまた別の機会に譲りたい。さらにまた今後とも各種のデータを集積して、保護協調を考えた選定の基準を充実してゆきたいと考える。

# 永久ヒューズ付き しゃ断器 NFU 形

山本 啓一\*・実森 俊夫\*・原 文吾\*

## Molded Case Circuit Breakers with Permanent Power Fuses, Type NFU

Fukuyama Works Keiichi YAMAMOTO・Toshio ZITSUMORI・Bungo HARA

Recent marked progress of civilization owes to electric power. This makes it necessary to design a power source of large capacity in the distribution system of buildings, factories and ships. Under the circumstances, Mitsubishi has made public molded case circuit breakers with permanent power fuse, type NFU. They have current limiting characteristics of high rate and a large interrupting capacity with self-recovering current limiting elements, permanent power fuses in it. Protective apparatus in future must have function of safeguarding circuits and continuity of power supply as well as the measures of coping with increasing power capacities in the interruption. The circuit breakers with P. P. f's have been developed to meet the requirements of the times.

### 1. まえがき

国内の年ごとの電力需要の伸び率は 11 パーセント強と推定されているが、電力増加の大部分が小面積の都市にて消費されることは、人口流動からみて明らかであり、必然的に都市部の単位面積あたりの電力密度は急増する。その結果、低圧電路においては事故時の短絡電流が増大するため、これに対処して電気設備の安全性および連続給電の abilities を小形かつ経済的な方法にて確保しなければならない。

このような情勢のなかで、開発される低圧電路保護機器はつぎの事項のすべてもしくは一部において、現状のものより改善されたものであることが必要である。

- (1) 安全性
- (2) 電力の連続給電に対する進歩性
- (3) 電気設備の省力化
- (4) 保護機器自身の信頼性
- (5) 小形・経済性

このたび当社が開発した永久ヒューズ付き しゃ断器 NFU 形（以下 NFU といふ）は、設計当初から上記の改善を念頭におき製作されたもので、そのすべての項目につき明確かつ大幅な進歩の跡をみることができる。

まず安全であるということは電気設備にとって最重点の機能であるが、この しゃ断器においては しゃ断に際して エネルギー の大部分を永久ヒューズ内部で消費し、接点間に発生する アークエネルギー が少ないので、 しゃ断器排気口から出る電気的・熱的 エネルギー も少ない。したがって安全に関しては進歩したものといえる。

ビルや高度に工業化した工場においては、事故による停電のため生ずる損害は計り知れないほど大きくなってきており、電路の設計にあたっては、この ブラックアウト の時間および範囲をできるだけ少なくするようにしなければならない。永久ヒューズは しゃ断後すみやかにものとの状態に復旧することができ、しかも繰り返し再使用ができるので、電路に事故が生じた場合でも、事故原因を取り除くための最小かつ不可欠な時間のみの停電となるに過ぎない。 しゃ断器自身が損傷を受けないでひきつづき使用可能ということは、新品とりかえる必要のないことであり、電気設備の連続給電、省力化の点で大きなメリットとなる。

しゃ断器の第一の機能は、その名前が示すとく、短絡時に安全

かつ完全に短絡電流を しゃ断することであるが、その機能は普段に発揮されるものではなく、いったん緩急が生じたときのみ役割を果たすものである。NFU の しゃ断をつかさどるおもな部分は永久ヒューズであり、その しゃ断原理はアルカリ金属の固体→液体→気体の相変換を応用しており、機械的な可動部によらないことが信頼性を増す一つの要因となっている。

小形・経済性については普通の限流ヒューズと同等の外形をもつ永久ヒューズを開発し、 しゃ断器の裏面にそれを接続することにより表方向からみた しゃ断器の外形は標準のそれと同一であり、100 A フレームにおいては 8 段積 コントロールセナタ に適した外形である。

### 2. 自己復旧形 限流素子としての永久ヒューズ

電源容量の増大にもかかわらず、求められているのは小形・経済的な保護機器である。小さな外形・大きな しゃ断容量、この二つの相矛盾する命題を解決するためには“限流”という新しい機能を加えなければならない。これから低圧保護機器はなんらかの方法でこの“限流”機能をもつ方向にすすんでいくであろう。

短絡電流を しゃ断する際に しゃ断器および電路に加わる エネルギー としては、電路の インダクタンス 内にたくわえられた後放出されるもの ( $E$ )、通過電流による ジュール 熱 ( $J$ ) および通過電流による 電磁力 ( $F$ ) があり、それぞれ次式で示される（図 2.2 を参照）。

$$E = \frac{1}{2} L i_0^2$$

$$J \propto R \int i^2 dt$$

$$F \propto i_0^2$$

$i_0$ ：限流されたせん（尖）頭電流 (A)

$i$ ：通過電流 (A)

$L$ ：電路の インダクタンス (H)

$R$ ：電路の抵抗 ( $\Omega$ )

いずれの エネルギー および力も  $i_0^2$  もしくは  $i^2$  に比例しており、 $i$  および  $i_0$  を小さくすることにより、これらの値は大幅に低減される。したがって推定短絡電流をそのまま流さないで、それを小さく限ること、すなわち しゃ断に際して“限流”作用を行なわせることができ、小形・安価で大きな しゃ断容量をもつ しゃ断器を開発するばかりに不可欠のものとなる。“限流”という作用が しゃ断器の性能の

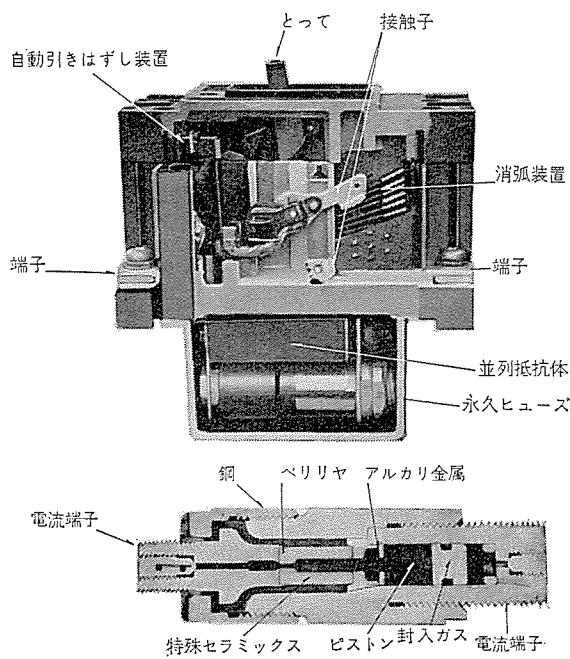
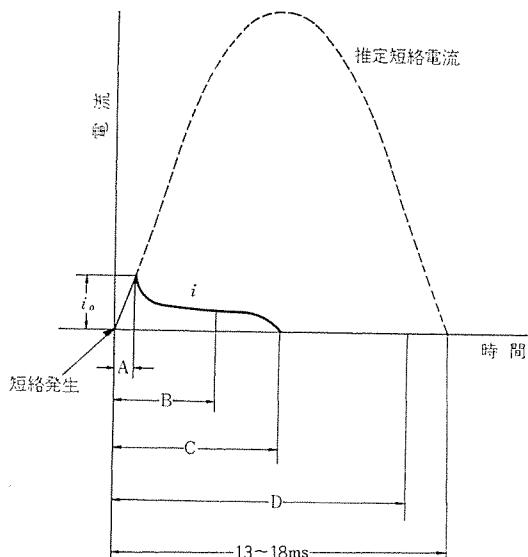


図 2.1 永久ヒューズ付きしゃ断器 NFU 形および永久ヒューズの断面写真

Crosssectional view of molded case circuit breaker with permanent power fuses and P.P.F



A : 永久ヒューズが気化する。永久ヒューズの抵抗が増大し、短絡電流は並列抵抗に移り、並列抵抗によりしぶられて小さなものとなる。

B : しゃ断器部の接点が開離しはじめ接点間にアーケが発生する。

C : 接点が十分な開離距離に達しアーケが消滅する。

D : 永久ヒューズが復帰する。

図 2.2 永久ヒューズ付きしゃ断器の限流しゃ断  
Current limiting action of molded case circuit breaker with permanent power fuses.

一つの要素として大きくクローズアップされ、世界の研究者・技術者がこの研究を行なっているのも前述の理由による。

このような近況のなかで当社は“永久ヒューズ”と呼ばれる自己復旧形限流素子を発表し、その応用製品として NFU の出現を見るにいたった。“永久”という文字を頭にいただいているのは、いわゆるヒューズと異なり、一度限流作用を行なった後でも再びもとの状態に復帰する性能をもっているためである。

永久ヒューズは図 2.1 の断面写真に示すように、二つの電流端子とその間に電気的に接続するアルカリ金属と、その周囲の絶縁物ならびに圧力緩衝要素から成りたっている。

表 2.1 各種金属の固有抵抗  
Specific resistance of metals.

材 料	固 有 抵 抗 $(10^{-6} \Omega \cdot \text{cm})$
銀	1.62
銅	1.69
アルミニウム	2.62
ナトリウム	4.6
鉄	6.9

表 2.2 ベリリヤ磁器の熱伝導率  
Heat conductivity of beryllia (BeO).

材 料	熱 伝 导 率 (Cal/s·cm·deg)
ベリリヤ	0.4
鉄	0.16
アルミニウム	0.48

異常電流が通過した際は、電流端子間のアルカリ金属が自己のジュール熱によって高温・高圧のプラズマ状の気体に変化し、端子間の抵抗が急激に増加する。すなわち短絡電流立ち上り途中において、回路に高抵抗をそう入したことと同じになり、電流は小さくしぶられる。このとき永久ヒューズ内部は高温・高圧の気体にさらされることがあるが、圧力緩衝要素としてのピストンの作用により、圧力上昇を緩和する。異常電流が限流され、最終的にしゃ断された後は、アルカリ金属は急速に冷却固化し、ピストンからの復帰力の助けによって、もとの状態にもどり、端子間の抵抗値ももとの状態に復元する。その復元時間はわずか千分の数秒といった短い時間である。

アルカリ金属は常温において良好な導電材料である。アルカリ金属の一例としてナトリウムの固有抵抗を他の金属と比較したものを表 2.1 に示しているが、導電材料として一般に使われている他の材料、銀、銅、アルミニウムにつぐ低い固有抵抗をもっていることがわかる。これは電力用電路に使われる材料としての第一の条件に適しており、上述のプラズマ状での高抵抗への変化の特性とともに限流素子の材料としての機能を本質的に備えていることを示している。

アルカリ金属の電路に絶縁物としてベリリヤ磁器が使われているが、これは表 2.2 に示すとおりアルミニウムに匹敵する高い熱伝導率をもっており、アルカリ金属の電路に発生する熱をベリリヤを通して外部に放出させることができる。電気的にはアルカリ金属部の細穴となっていても熱的にはベリリヤの太さの熱通路があることになり、電流の通電容量を著しくあげている。

### 3. 永久ヒューズとノーヒューズしゃ断器との協調

永久ヒューズは、異常電流立ち上り途中にて、そのアルカリ金属が高温・高圧・高抵抗に変化し、限流作用を行なうが、異常電流がしゃ断された後は数ミリ秒以下の短時間にてすみやかに旧状に復するものである。この特長のために世の注目をあびているのであるが、このことは適当な断路装置と組合せて使わなければならないことを意味している。もし、永久ヒューズの気化を感じし、それによって電気回路を切りはなす適当な断路装置がなければ、永久ヒューズは短絡電流により気化が続くことになり、長時間の気化によるエネルギーを永久ヒューズ内で処理できなくなる。

ノーヒューズ レンチスイッチ (以下 NFB という。) は短絡発生後、接点が開離はじめるまでの時間が非常に短く、ほとんど 7 ms 以下であり、このように短い時間の接点開離は他の種類のレインチスイッチの例をみない。いっぽう永久ヒューズは異常電流の立ち上り途中でエレメントとして使用されたアルカリ金属が高温・高圧のプラズマに変化し、特定の非線形動作を行なった後、数 ms 以下の短時間にて固化し、すみやかに旧状態に復するものである。NFB の短時間接点開離と永久ヒューズの短時間復旧、これらの性質をもつ二つの機器を一つに組合せることにより、短絡電流レインチスイッチ時に永久ヒューズの気化は 1 回ですみ、その復旧を待たずして、すばやく NFB 部の接点が開離し短絡を切りはなす。この意味で NFU は、最も理想的な永久ヒューズの応用製品である。

この組合せにおいて、過負荷保護の性能は NFB 部の熱動引きはずしおよび電磁引きはずし性能に任せており、過負荷電流により永久ヒューズは動作しない。また NFB 部の接点と永久ヒューズは直列に接続されているが、この永久ヒューズに並列に抵抗が加わっている。短絡電流を永久ヒューズがいったん限流した後、並列抵抗を流れる電流により、NFB 部の電磁石が働き、接点が開離する構造となっている。並列抵抗はこのほか、永久ヒューズ気化時の異常電圧防止の役目も果している。

#### 4. 動作特性およびレインチスイッチ性能

NFU の引きはずし特性の一例を図 4.1 に示す。クロスオーバーポイントまでの過電流に対しては NFB の引きはずし特性をそのまま生かしており、それ以上の短絡電流に対して永久ヒューズが気化し限流作用を行なうことを示している。従来のヒューズは溶断後再使用が不可能であるため、その動作特性を個々について検査して品質の定まったものとして出荷することができないが、永久ヒューズは自己復旧性能をもつて全数検査されて正規の特性のものが NFU 内に組み込まれている。これはちょうど NFB が定格の 2 倍の過電流にて、全数引きはずし時間をチェックすることができ、品質が安定していることに似ている。

NFU の通過電流せん頭値特性および通過  $I^2 \cdot t$  特性を図 4.2 および図 4.3 に示す。このように大きな割合の限流により、NFU は短絡時に電線およびバーを熱的および機械的破損から保護することができる。また NFB と同様、全体をモールドケースで囲み取扱上の安

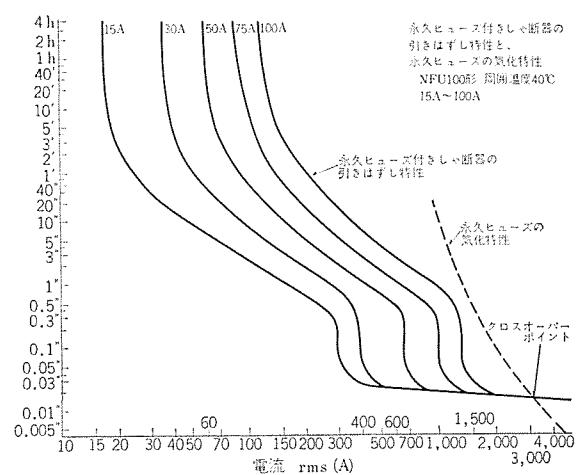


図 4.1 NFU 100 の動作特性  
Tripping characteristics of NFU 100

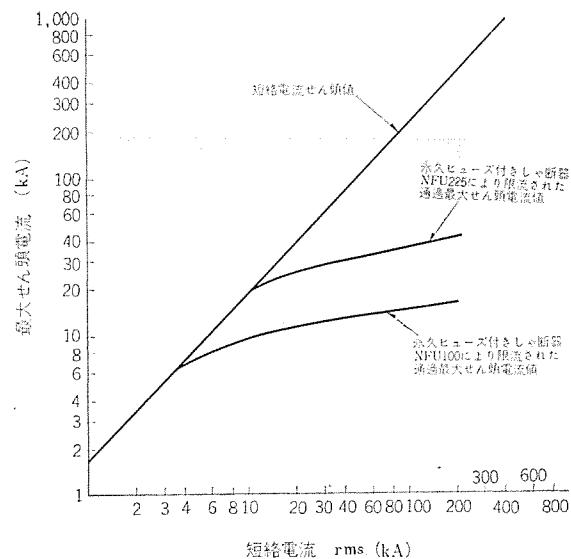


図 4.2 NFU 形レインチスイッチの限流特性  
Current limiting characteristics of type NFU breaker.

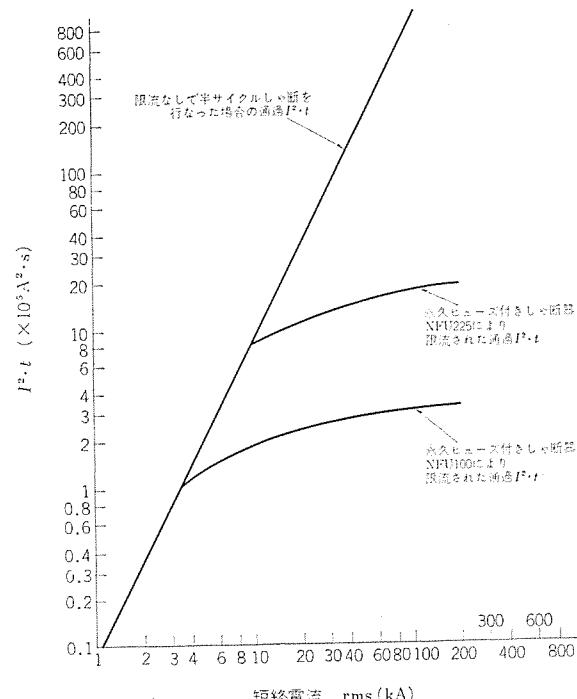
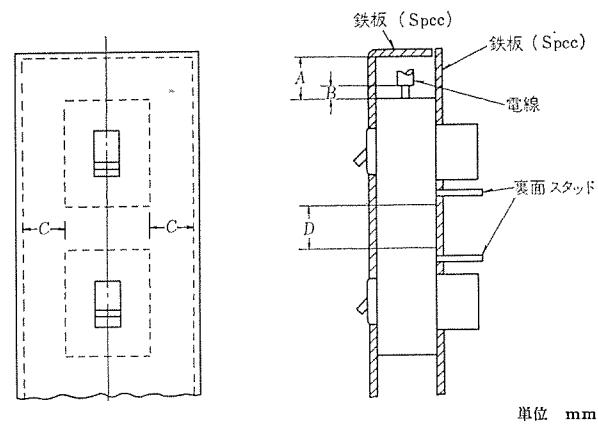


図 4.3 NFU 形レインチスイッチの限流  $I^2 \cdot t$  特性  
Let-through  $I^2 \cdot t$  characteristics of type NFU breaker.



NFU の形名	絶縁距離 min. A	max. B	min. C	min. D
NFU-100	25	15	25	25
NFU-225	35	15	35	35

図 4.4 NFU 形レインチスイッチと盤との間の絶縁距離  
Insulation distance between type NFU breaker and panel.

全をはかっており、短絡電流をしゃ断する際はしゃ断すべきエネルギーの大部分を永久ヒューズ内部で消費し、接点・消弧室に生ずるアーケネルギーは小さなものとなるため、アーカの外出は少ない。したがってしゃ断器と盤との間の絶縁距離を小さく設計することができ、電気設備の小形化がすすめられるようになった。NFUを設置した場合の絶縁距離を図4.4に示す。

## 5. カスケードしゃ断性能

NFUは大きな率の限流とアーケネルギーの永久ヒューズ内での分担により、しゃ断容量不足のNFBの後備保護を行なうことができる。

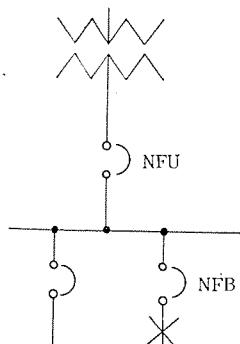


図5.1 カスケード接続  
Cascade system.

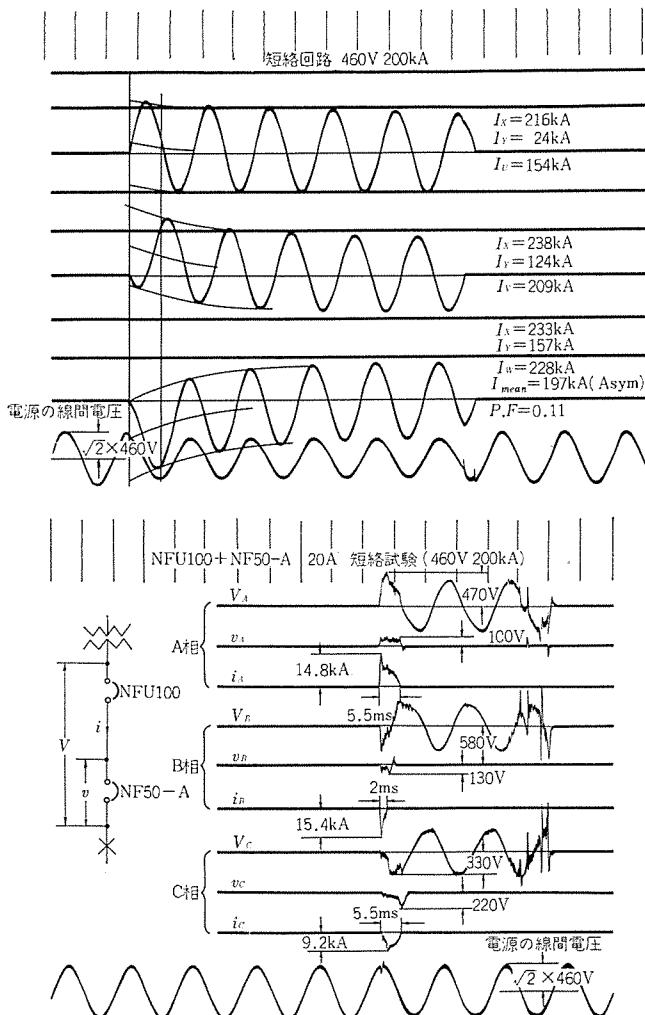


図5.2 NFU 100 と NF 50-A のカスケードしゃ断オシログラム (O責務)  
Cascade interruption oscillogram of NFU 100 and NF 50-A

表5.1 NFU 100 と NF 50 A のカスケードしゃ断におけるアーケネルギーの分担 (短絡回路 AC 460 V 200 kA)  
Arcing energy of NFU 100 and NF 50 A on cascading interruption (short circuit AC 460 V 200 kA).

	単位 J (Joule)	
	NFU 100	NF 50-A
A 相	$10.3 \times 10^3$	$3.9 \times 10^3$
B 相	$3.0 \times 10^3$	$1.13 \times 10^3$
C 相	$4.5 \times 10^3$	$2.75 \times 10^3$

図5.1に示すカスケード接続において、X点で短絡が生じたばあいNFUとNFBのそれぞれに分担されるエネルギーを $E_1$ ,  $E_2$ とすると

$$E_1 = \int v_1 i dt, E_2 = \int v_2 i dt$$

にて示されるが、 $E_1 > E_2$ が成立し、NFUは他のしゃ断器に比べて後備保護能力がすぐれているといえる。

図5.2のオシログラムはNFU 100 AフレームとNFB 50 Aフレームとのカスケードしゃ断試験(短絡回路3φ60Hz, 460V, 200kA, P.F.O. 11 lag.)の“O”責務の結果を示している。NFUおよびNFBに加わったアーケネルギー $\int v_1 i dt$ ・および $\int v_2 i dt$ の値は表5.1に示すようになる。しゃ断エネルギーの大部分をNFUが分担していることがわかる。

## 6. 永久ヒューズ付きしゃ断器の応用

永久ヒューズ付きしゃ断器は、ほとんど無限大と言ってよいほどの大しゃ断容量(AC 460 V, 200 kA)をもっており、大きな率の限流を行なうとともに、しゃ断時のアーケネルギーをほとんど永久ヒューズの筒内で消費するので、電路および電路につながった機器の保護のためには最適のものであり、その特長を十分に生かして、つぎのような応用がある。

(1) 主母線から直接NFUを介して負荷へ接続されるばあいビル、船舶等の配電において、できるだけ電気設備の床面積を節約するため、主母線から直接しゃ断器を介して負荷につなぐ必要がある。過去においてはしゃ断器のしゃ断容量不足のため、余儀なく、後備保護しゃ断器またはヒューズが使われていたが、不経済かつ必然的に電気設備の床面積を大きくしなければならなかった。NFUの出現により、容量の大きい主母線から直接NFUを介して負荷に給電することができるようになり電気設備の小形化が追求できるようになった。大容量の電路においては不慮の停電時間をできるだけ短くするよう設計する必要があるが、しゃ断後ただちに再投入および給電の可能なNFUは電路の連続給電に大きく貢献する。

### (2) スポットネットワーク 電路のばあい

低圧スポットネットワーク方式は、将来の負荷増加に対する裕度をもつことができ、また高圧側の事故に対しても低圧側の連続給電が可能であるためすぐれた方式でありビル等にしだいに応用されつつあるが、変圧器が並列に設置されているため短絡電流がばくだいなものとなる。このため思いきったスポットネットワーク方式を計画することができなかつたが、NFUの出現により自由にこの方式が採用できる。すなわちNFUはネットワークプロテクターの次の低圧幹線につながるしゃ断器として使用される。

### (3) 小形・小しゃ断容量のNFBを後備保護するばあい

5章で述べたようにNFUは、大きな率の限流、少ない通過 $I^2t$

表 6.1 NFU 100 の カスケード保護性能  
Cascade protection of NFU 100.

3φ 460 V 50, 60 Hz

後備しゃ断器 分歧しゃ断器	NFU 100 (kA)	
	対称値	非対称値
BH-G	150	200
NF 30	150	200
NF 50-A	150	200
NF 50-C	150	200
NF 60	150	200

およびアーキエネルギーの永久ヒューズ筒内の消費等により、小形・小しゃ断容量・安価なNFBの保護を行なうことができる。これはカスケード方式と呼ばれる保護方式である。一例としてNFU 100 Aフレームを主回路につかった場合、これにより保護される分歧回路用しゃ断器を表6.1に示す。このように小しゃ断容量の小形のしゃ断器のグループをバックアップするものとしてNFUは最もすぐれている。

## 7. むすび

永久ヒューズ付きしゃ断器NFU形の特長はつぎの事項である。

### (1) 世界最大のしゃ断容量

電力需要の増大に対処している。

(2) しゃ断後くりかえし再使用が可能

電気設備の省力化、電力の連続給電の改善に寄与する。

(3) 大きな率の限流性能

配線および機器の良好な保護

(4) 小形・コンパクト

NFUの表面の取付面積は標準のNFBとかわらない。

(5) 限流作用はアルカリ金属の相変換による

しゃ断性能が安定している。

(6) NFBの諸機能をすべてもっている

電路の開閉および過負荷保護もでき、絶縁物で囲われているので取扱上安全である。

NFUは上記のような特長をもっているので、将来ますます使われるようになるであろう。現在、100 Aフレームと225 Aフレームの2機種しか発売されていないが、永久ヒューズを世に先がけて開発した当社中央研究所とともに他のフレームについても逐次開発を行なっていくつもりである。

## 参考文献

- 伊藤、宮本、高野：Permanent Power Fuse, Self-Recovering Current Limiting Device, IEEE, Conference Paper, No. CP 601-PWR
- 山本：永久ヒューズ付きしゃ断器、船舶、44, 2月号(昭45)

# 永久ヒューズ—自己復旧形限流素子—

伊藤 利朗\*・宮本 紀男\*\*・土方 明躬\*\*  
和田 勇一\*\*・井上 武男\*\*\*・石井 勇男\*\*\*

## Permanent Power Fuses —Self-Recovering Type Current Limiting Device—

Central Research Laboratory

Toshio ITO・Toshio MIYAMOTO・Akemi HIJKATA・Yuichi WADA

Manufacturing Development Laboratory

Takeo INOUE・Isao ISHII

It has been successful in developing new power fuses, named "Permanent Power Fuse", having non-linear resistive element. Description have been made herein on the construction, characteristics and application of them. The fuse has metallic sodium as the material of element. When a let-through  $I^2t$  becomes a certain value, jule heat generated will work to produce plasma of high temperature and high pressure. This will cause to make a sharp and sudden increase in resistance of the element so as to recover the current limiting function. Development of reusable power fuses is realized for the first time in the world.

### 1. まえがき

わが国の近年における電力需要は、高度な経済成長とともに急速な増大を遂げ、今やわが国の電力技術は、その量的質的水準において諸外国をリードしようという時期を迎える。膨大な電力流通系統において、しゃ断装置は電力の発生から消費にいたるまでの全過程を通じ、またその常時の開閉と故障時の保護の全運用にわたって必要欠くことのできない機器であるが、近年系統規模の飛躍的拡大により、故障時の短絡電流もまた指数関数的に増大している。短絡電流の増大は、故障電流しゃ断時におけるしゃ断装置の熱的機械的過酷度の増大をもたらし、系統直列機器に対しても電磁機械的過酷度の増大はまぬがれないものとされ、短絡容量の増大とともに、しゃ断装置はもちろんのこと直列機器に至るまでを、その都度新らな設計により性能の格上げを行なわなければならない現状である。一方しゃ断技術の分野からみれば、交流電流の電流零点でのしゃ断が、在来しゃ断装置におけるしゃ断技術の根幹をなしており、電流零点を待機してのしゃ断であるため、しゃ断時間を1サイクル以下にすることは不可能であった。さらに、しゃ断完了までに回路を通過する電流も短絡電流がそのまま流れるため、直列機器の短絡時の過酷度が低減され得ないものであることはすでに述べたとおりである。これに対して、いわゆる「限流しゃ断」は、通過電流を短絡電流の値如何にかかわらず、ほぼ一定の値に抑制限流し、しかも1サイクル以下のしゃ断を可能にするという理想的な特長をもつしゃ断方式であるが、在来の限流ヒューズでは、限流効果が十分でなく、しかも1回の動作で取り換える必要があり、再投入・再使用の機能をもつしゃ断装置としては使用できないものである。すぐれた限流機能をもち、しかもくり返し使える素子の開発は上述のような理由から、しゃ断器技術者共通の夢であった。当社ではかねてより、かかる理想的な機能をもつ限流素子の開発を進めてきたが、このほど「永久ヒューズ」として完成し、しゃ断器技術者の夢を世界に先駆けて実現することに成功した。「永久ヒューズ」は、高温高圧力下における金属ナトリウムの特異な電気的特性を最大限に活用したもので、厳密にいえば、2端子を有する電力用非直線抵抗素子であって、端子間に流通する電流の自乗時間積が一定値を越えると、自己のジュ

ール発熱によって、ナトリウムが、高温・高圧力のプラズマに変化し、素子の抵抗が大幅にかつ急激に増加する性質をもつものである。かかる電力用の非直線抵抗素子自体、前例のないものであるだけに幅広い用途が考えられるが、特筆すべきことは、ナトリウムの相変化により、特定の非線形動作を行なったのち、すみやかに固化し自己復旧することであって、非線形動作をくり返して行なうるという決定的な特長をもっている。この素子にとって可能と考えられる用途のうち、もっとも適切な用途の一つが、すでに述べたとおり「くり返して使える限流ヒューズ」としての応用であり、「永久ヒューズ」(英語では Permanent Power Fuse (P.P.F.))なる呼称の由来でもある。

### 2. 永久ヒューズの基本構成と動作原理

永久ヒューズの構成は基本的には、図2.1のようなものであり、二つの電流端子と、この間を電気的に接続するナトリウムの電路ならびに圧力緩衝要素からなりたっている。ナトリウム電路は、耐熱性絶縁物円筒に貫通しておけられ、定常電流は、一方の端子からナトリウム電路を経て他方の端子へ流出する。異常電流の流通により、ナトリウム電路に沿って、ナトリウム自身のジュール発熱が発生し加熱されたナトリウムは、固相から高温高圧力のプラズマ状態に変化し、端子間の抵抗が急激に増加して限流動作が行なわれる。素子の端子の一方には図2.1に示すように、ピストンがもうけられており、常時、不活性ガスの背圧によってナトリウム電路に圧縮力が加えられている。上述した限流動作時には、ピストンが背圧に抗して高速で移動し、内圧上昇を緩和する作用をする。限流動作の終了後は、不活性ガスの背圧による復元力が作用し、ナトリウムはすみやかにものとの電路形状

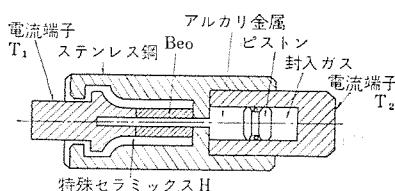


図2.1 永久ヒューズの基本構造  
Crosssectional view of the permanent power fuse.

に復するとともに、ピストンを介しての當時の加圧力により、ヒートサイクルによる電路の体積膨張、収縮に追従して電路抵抗の安定化が行なわれる構成になっている。図2.1の構成において、限流動作時、瞬間にではあるが、ナトリウム電路近傍は高温・高圧力のプラズマが発生するため、ナトリウム電路に直接触れる部分は、耐ナトリウム性にすぐれた耐熱性絶縁物が用いられている。一方、ナトリウム電路に沿って発生する高圧力に対しては、耐熱性絶縁物と特殊セラミックスHならびに補強外筒による3層耐圧容器構造が採用され、耐熱性絶縁物には「やきばめ効果」による強力な予備圧縮が加えられ、さらに、電気的に絶縁された耐内圧端子を備えた耐圧容器が構成されている。

### 3. 永久ヒューズに活用されている新技術

すでに述べたように、全く新しい機能を有する素子を具現するためには、

(1) 常温の抵抗が低く、しかもくり返してもとに復する電路材料を選択すること。

(2) 常温と限流動作時における電路材料の抵抗の変化率が大きく、限流動作が密閉された微小空間で行なわれ、かつ動作後も電路材料の変質のないこと。

(3) 限流波高値と定格電流の比が小さく限流容量が大きいこと。

(4) 電路材料気化時の瞬間的な内圧発生と高温に、くり返し十分耐えうる構造と材料の選定。

(5) 永久ヒューズの構成材料は、すべて耐ナトリウム性が十分高く安定したものであること。

などの条件に合致する材料や構造を採用する必要がある。これらの条件を満たすために永久ヒューズに導入された新技術の内容について、以下に述べる。

#### 3.1 限流材料としてのアルカリ金属の採用

すでによく知られているとおり、アルカリ金属は、

(1) 常温における抵抗がナトリウムでは、銀・銅・アルミニウムに次いで低い金属であり、電気の良導体である。

(2) 常温における硬度が著しく低いチーズ状物質であり、微小外力により容易に旧形状に復し、自己復旧性を有する。

(3) アルカリ元素は単原子金属であり、原子力用の高温冷媒として用いられている変質のない信頼性の高い物質である。

(4) アルカリ金属は沸点が低く、後述するように、相変化とともに高温でのエンタルピーが大きいため、限流波高値が低く、限流過程において大きな電磁エネルギーを処理する能力を備え、さらにアルカリ原子が、電子に対して大きな衝突断面積を有するために、高温プラズマ状態では、常温で高絶縁媒体である空気や窒素よりもむしろ高い抵抗を示し、(1)の効果とともに大きな抵抗変化率が得られる。

(5) アルカリ金属のうち、とくにナトリウムは、地球上に豊富に存在する物質であり、高純度の原子炉用のものが安価に国産されている。

など各種の条件・性能を兼ね備えた、自復性限流材料として、まさに最適の物質であるといえる。もっとも、自復性を備えた材料としては、水銀も考えられるが、水銀における決定的な欠点は、上記(1)・(4)の限流材料として不可欠の条件を備えていないことである。表3.1はアルカリ金属と水銀の主要物性値を比較して示したもので、とくにナトリウムが、水銀と比較して低い固有抵抗、高い気化潜熱、ならびに高い熱伝導性をもっていることが端的に示されて

いる。一方、ナトリウムと水銀について、相変化を含む高温領域における熱力学的特性を統計力学に基づき理論的に計算したものが図3.1であって、限流過程におけるエンタルピーとプラズマ伝導率の関係が示されている。図3.1によれば、 $10^4 \text{ J/g}$ までのエンタルピー値に対して、ナトリウムのプラズマ状態での固有抵抗が、水銀のそれの約 $10^4 \sim 10^5$ 倍であり、しかも形成されるプラズマの温度が、水銀に比較してはるかに低いことが示されている。このことは、限流時の気化圧力上昇が低く、限流が密閉された微小空間で行なうことを裏付けるものである。以上のべたとおり、限流材料としてアルカリ金属を採用することは、永久ヒューズを実現するために、導入された新技術の中でも最も重要なものの一つである。

#### 3.2 耐熱性絶縁物としてのベリリア(BeO)磁器の採用

導入された新技術の第2番目は耐熱性絶縁物として、BeO磁器を採用したことであって、耐熱性と耐アルカリ性にすぐれ、しかも絶縁物でありながら、金属アルミニウムに匹敵する高い熱伝導率をもつことで知られる特異な材料である。計算ならびに実測によれば、限流過程において、 $1,000^\circ\text{K} \sim 3,000^\circ\text{K}$ の高温のアルカリプラズマが形成されるため、これと直接触れる絶縁物には耐熱性が要求され、さらに常時使用状態においては、すぐれた耐アルカリ性が要求される。一方、すでに3.1節でのべたような理由により、アルカリ金属を用いる場合、常温におけるチーズ状の柔かい性質のため、電路材料とこれに触れる絶縁磁器間の熱接触は非常に良好で、定格電流通電時に電路

表3.1 アルカリ金属と水銀の主要物性値の比較  
Comparison of main physical properties between the sodium and mercury.

Na K % wt % wt	100 0	56 44	22 78	0 100	Hg
原 子 量	22.997	28.1	33.9	39.096	200.61
密 度 g/cc ( $20^\circ\text{C}$ ) ( $100^\circ\text{C}$ )	0.971 0.928	0.905 0.866	0.866 0.847	0.862 0.819	13.546 13.352
融 点 $^\circ\text{C}$	97.8	19	-11	63.7	-38.87
沸 点 $^\circ\text{C}$	883	825	784	760	357
融 解 热 cal/g	27.5			14.6	2.8
蒸 発 热 cal/g	1,005			496	69.7
比 热 cal/g $^\circ\text{C}$ ( $200^\circ\text{C}$ )	0.320 0.29	0.262 0.23	0.217 0.18	0.189 0.15	0.032 0.425
熱伝導度 $\frac{\text{cal}}{\text{cm} \cdot \text{sec} \cdot ^\circ\text{C}}$ ( $100^\circ\text{C}$ )	0.206	0.062	0.058	0.110	0.026
固有抵抗 $\mu\Omega \cdot \text{cm}$ ( $20^\circ\text{C}$ ) ( $100^\circ\text{C}$ )	4.6 9.65	31.8 35.5	36.1 41.0	7.0 15.4	95.5 103.2
常温から蒸発までの体積変化 (at 1 atm)	$4.00 \times 10^3$	$2.91 \times 10^3$	$2.22 \times 10^3$	$1.91 \times 10^3$	$3.40 \times 10^3$

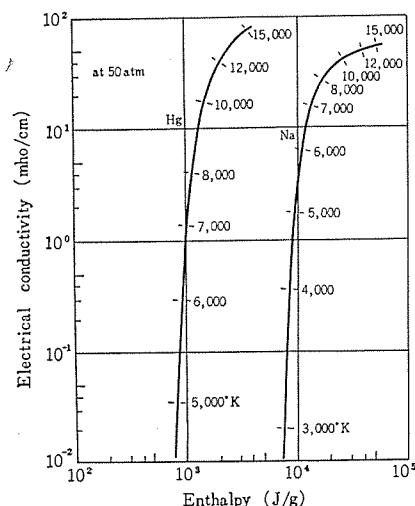


図3.1 高温におけるナトリウムと水銀のエンタルピーと電気伝導度の関係  
Electrical conductivity vs. enthalpy relations of the sodium compared with mercury.

に沿って発生する熱を絶縁磁器に有効に伝達できる。したがって、絶縁磁器の熱伝導率が高い場合には、電流はアルカリ金属に、熱流は絶縁磁器を通じて流すことができる。これらの関係を図示したものが図3.2である。外径D、長さlの絶縁磁器円筒に同軸状にもうけられた、内径dなる穴に電路材料がそう入された簡略化モデルについて熱伝導方程式を解き、絶縁磁器の熱的性質と限流性能との関係を以下に明らかにする。図3.2において絶縁磁器の両端は無限大のヒートシンクに接しているものとし、絶縁磁器のまわりは熱絶縁されているとみなされるので、軸方向のみの熱伝導方程式の解として、連続通電々流  $I_0$  と電路中央の温度上昇最大点の温度  $\Delta T_m$ 、ならびに磁器と電路を含めた実効熱伝導率  $\lambda_e$ との間に、次に示す式(3.1)が成立する。

$$\Delta T_m = \frac{\rho_e \cdot I_0^2 \cdot l^2}{8 \cdot S^2 \cdot \lambda_e} \quad (3.1)$$

ただし、 $\rho_e$ ：電路材料の固有抵抗値、 $S = \pi d^2/4$

$\lambda_e$ ：実効熱伝導率

$$\lambda_e = \lambda_1 \phi^2 + \lambda_2 (1 - \phi^2) \quad (3.2)$$

で与えられる。ここに  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  はそれぞれ電路材料と磁器材料の熱伝導率である。また  $\phi = d/D$  であり、永久ヒューズにおいて  $d/D \approx 0.1$  である。

式(3.2)において、 $d/D \approx 0.1$  の場合には  $\lambda_e \approx \lambda_2$  となり、式(3.1)の  $\Delta T_m$  は  $\lambda_2$  に逆比例することになるため、 $\lambda_2$  の大きな絶縁磁器を採用することにより、通電容量を大幅に格上げすることができる。一方、限流波高値  $i_c$  は電路材料の径を  $d$  とすると、

$$i_c = K d^{1/3} \quad (3.3)$$

で与えられることが近似計算より導かれ、限流波高値が電路径  $d$  の  $4/3$  乗に比例することがわかる。なお、 $K$  は、

$$K = \sqrt[3]{\frac{3C_p \cdot \gamma \cdot \Delta T \cdot \alpha}{\rho_e}} \quad (3.4)$$

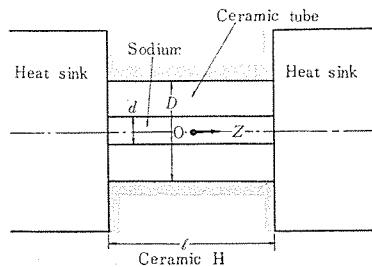


図3.2 永久ヒューズにおける熱放散検討のための単純化モデル  
Simplified model for the analysis of the heat transfer problem in P.P.F.

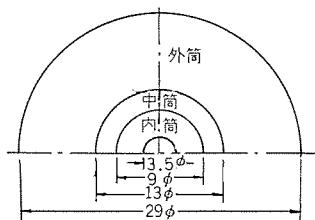


図3.3 永久ヒューズ耐圧容器の軸方向に垂直な断面図  
Crosssection of the pressure tight vessel of P.P.F.

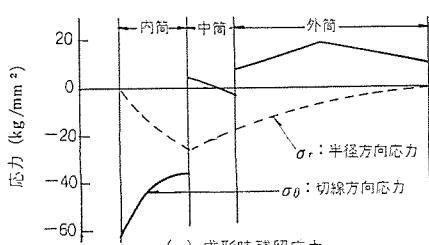


図3.4 半径方向ならびに切線方向応力分布の計算例  
Calculated radial and tangential stress distribution in P.P.F.

で与えられ、 $C_p$ 、 $\gamma$ 、 $\Delta T$ 、 $\rho_e$  は電路材料の比熱・比重・沸点・固有抵抗であり、 $\alpha$  は通過電流の傾斜を示す。限流性能は通電可能電流  $I_0$  と  $i_c$  の比  $i_c/I_0$  が小さいほどすぐれている訳であるが、 $i_c$  に直接影響する  $d$  を小さく保ちながら、 $I_0$  を大きくするためには熱伝導率の大きな磁器材料を選定することが非常に有効であって、ベリリア磁器を採用することによって、従来ヒューズよりも格段に限流性能のすぐれた永久ヒューズが実現できる。以上のべたとおり、ベリリア磁器の採用は、永久ヒューズの限流性能を決定づける重要な新技術である。

### 3.3 絶縁端子を有する耐内圧容器構造の採用

ベリリア磁器を採用することの技術的重要性はすでに述べたとおりであるが、ベリリア磁器単独では、限流過程で瞬間に発生する限流材料の気化圧力に耐えられないため、永久ヒューズでは3層構造の耐圧力容器が採用されている。一般にセラミックスが引張り応力には弱い反面、圧縮に対しては、金属と同等あるいはそれ以上の著しく高い応力に耐えうることはよく知られている性質であるが、永久ヒューズではベリリア磁器にも共通のかかる性質を最大限に活用し、ベリリア磁器と特殊セラミックスHならびに補強円筒を同軸3層状に配置し、補強円筒による強力な「やきばめ予備圧縮力」がベリリア磁器に加えられる構造が採用されている。特殊セラミックスHは図2.1に示すとおり、外筒のやきばめ力の伝達媒体であるとともに、外筒と一方の端子T<sub>1</sub>との間の絶縁媒体であり、さらに各層間の気密接着が同時に進行われる特異な材質である。特殊セラミックスHは高温においては、粘弾性を示す流体となり特定の転移温度以下で固体になる特性ももっており、この性質を利用して強力な「やきばめ力」がベリリアに加えられることになる。図3.3に示すような3層耐内圧容器について「やきばめ力」の定量的な解釈を行なった結果をつぎに述べる。図3.3において外筒はステンレス鋼とし、これがTrescaの降伏条件に従うものとしての一部弾塑性計算を行ない、各部の応力分布を求めたものが図3.4である。図3.4の(a)は、永久ヒューズの製造完了時の残留応力を示したもので、 $\sigma_\theta$ は切線方向の各部の応力、 $\sigma_r$ は半径方向の応力である。

また、図3.4の(b)は、(a)の状態で内圧3,000 kg/cm<sup>2</sup>が加わったと仮定した場合の各部の応力である。同図(a)によれば、製品のベリリア磁器には、60~40 kg/mm<sup>2</sup>の予備圧力が加えられており、(b)に示されているとおり、限流時においてもなお30 kg/mm<sup>2</sup>の残留圧縮力が存在していることがわかる。一方、多軸応力下の強度の判定基準が、最も一般的と考えられるGriffithの理論に従うものとすると、図3.4の(a)、(b)いずれの場合にもベリリア磁器は十分の余裕をもって耐えうることが裏付けられ、これは別途行なった耐内圧実測値ともよい対応が得られている。限流過程と等価な瞬間的な内圧に対する耐圧力値は、12,000~13,000 kg/cm<sup>2</sup>であること

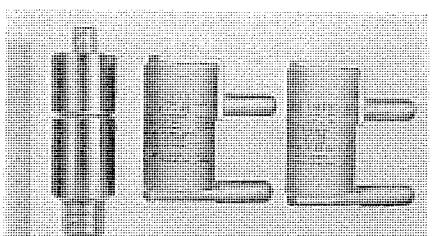


図3.5 従来ヒューズ(右)と永久ヒューズ(左)の比較  
Comparison of exterior views of the PPF with conventional fuses.

も確認されており、上述したような残留応力計算理論を背景に耐内圧構造が決定され、実際に採用されているが、かかる多層補強構造の開発によってはじめて、図3.5に示すように従来ヒューズと比較しても見劣りしない大きさのコンパクトな永久ヒューズが実現できたといえる。

以上、永久ヒューズに採用されている新技術のうちのとくに重要なものについて述べたが、このほかに永久ヒューズに使用される材料の耐ナトリウム性についての基礎研究が行なわれ、高速増殖炉用ナトリウム関係の大がかりな研究を参考にして、独自の材料試験を徹底的に行ない、長期間の安定性が検証された材料を選択している。耐ナトリウム性材料の選定等に関しては、本号別稿に詳細に述べられておりのでここでは省略する。

#### 4. 永久ヒューズの各種特性

永久ヒューズの大きさ、内部形状は用途に応じて多種多様の変形を行なうが、ここでは、表4.1に示すような寸法諸元の永久ヒューズについての特性について述べる。

##### 4.1 連続通電容量

永久ヒューズの連続通電容量は、導体との接続部における温度上昇限度によって決定されるため、当然のことながら冷却条件により大幅に変化する。表4.2は冷却条件と通電容量の関係を示したもので、モールドケース内自冷・フィン付き自冷・フィン付き風冷・フィン付き油冷の各場合についての実測値である。風冷は10 m/s、油冷は0.3 m/s、フィンは無風自冷0.6°C/W、風冷10 m/sにおいて0.1°C/Wの熱抵抗を有するものについての実測値である。すでに3.2節において述べたとおり、ベリリア磁器の採用により、永久ヒューズの熱的構造は、サイリスタなど半導体素子と酷似しており、熱抵抗もサイリスタに匹敵する低い値になっているため、表4.2に示されるとおり、冷却条件の影響がとくに顕著にあらわれることが裏付けられる。

##### 4.2 永久ヒューズの気化特性

永久ヒューズに過電流を一定時間流すと、電路材料が気化して抵抗が急変する点が求められるが、抵抗が急変するまでの電流と時間の関係を求めたものを、永久ヒューズの気化特性と呼ぶ。これは従来ヒューズの溶断特性に相当し、過電流保護特性として重要なものである。ただし、永久ヒューズは、くり返して使えるため溶断特性ではなく気化特性と呼ぶことにする。図4.1のⒶは表4.1に示すように電路の一端に断面縮小部をもうけた永久ヒューズの気化特性で、Ⓑ、Ⓒは電路形状が一様断面の1.5 mm、3.5 mmで長さ17 mmの永久ヒューズの気化特性である。ⒶはⒸの電路の一端にⒷと同一径の縮小部をもつ電路になっているが、図4.1のⒶの気化特性は、短時間領域ではⒷに、長時間域ではⒸに漸近する特性を示しており、ⒷとⒸの気化特性の合成特性としてaが求められ、しかも定常電流はⒸに近づいて大きく、過電流抑制性能はⒶの特性に近くなるという限流装置としてますます有利な特性が得られることになる。複合断面の電路としては多種多様の組合せが考えられるが、いずれも目的に応じて設計が可能である。図4.1にはⒶとして、100 Aノーヒューズブレーカの熱動引きはずし特性が与えられているが、ⒶとⒸの合成として得られるⒶにより、うまく協調がとれていることが示されている。

##### 4.3 永久ヒューズの限流性能

永久ヒューズの限流波高値は式(3.3)、(3.4)より電路径dの4/3乗に比例し、電流傾斜の1/3乗に比例することが導かれ、とくに電

表4.1 永久ヒューズの寸法諸元の一例

Geometrical dimensions of the P.P.F.

直 径	29
長 さ	94
端 子 T <sub>1</sub>	12
端 子 T <sub>2</sub>	20
ベ リ リ ア	9φ×17l
ナトリウム電路	1.5φ×3+3.5×14l

表4.2 冷却条件と通電容量の関係

Continuous current carrying capacity.

冷 却 条 件	電 流 rms
モールドケース内自冷	100 A
フィン付き自冷	400 A
フィン付き風冷	660 A
フィン付き油冷	720 A

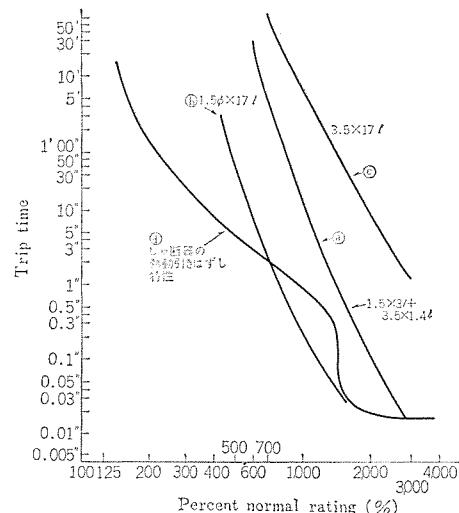


図4.1 永久ヒューズ気化特性例  
Over-current/time characteristics of the PPF

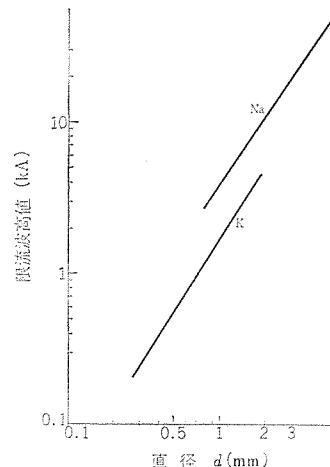


図4.2 アルカリ金属エレメント径と限流波高値の関係  
Relations between peak let-through current and the diameter of Alkali metal elements.

表4.3 エレメント形状と限流波高値、抵抗値の関係  
Relations among configurations of sodium element, its resistance & peak let-through current.

エレメント形状 (Na)	3.5φ×17l (c)	1.5φ×3+3.5φ×14l (a)	1.5φ×17l (b)
限流波高値	31 kA	6.7 kA	6.0 kA
抵抗値 20°C	0.115 mΩ	0.185 mΩ	0.530 mΩ

( ) 内a～cは図4.1の気化特性に対応する。

路筋に関しては、複合断面の電路の場合、最小断面部径の4/3乗に比例することになる。図4.2はナトリウム、カリウムをそれぞれ電路材料とした場合の最小断面部径と限流波高値との関係を示したものである。表4.3は、気化特性がそれぞれ図4.1のⒶ、Ⓑ、Ⓒであるような永久ヒューズの限流波高値と常温抵抗の関係を示したものである。複合断面の効果により、常温抵抗・限流波高値を共に下げう

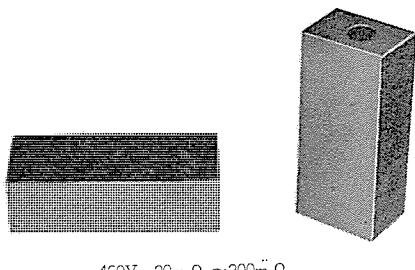


図 4.3 永久ヒューズ用並列抵抗体外観  
Outside view of a moulded resistor

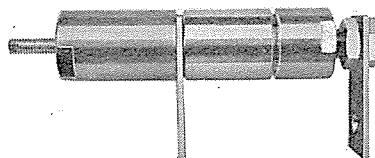


図 4.4 ピストンロッド飛出し形永久ヒューズ外観  
Plunger type modified P.P.F.

ることが示されている。限流性能の一例として、表 4.1 の寸法をもつ永久ヒューズの特性をまとめると、

気化までの $i^2 \times t$	: $7 \times 10^4 \text{ A}^2 \cdot \text{s}$
半波溶断電流 ( $I_{T/2}$ )	: $3 \text{ kA rms}$
限流波高値	: $16.5 \text{ kA crest}$
	(推定短絡電流が $200 \text{ kA}$ の回路において)

のことである。

#### 4.4 永久ヒューズと抵抗の並列接続

永久ヒューズが、限流する際の急激な抵抗変化によってヒューズ両端に発生する異常電圧を低減するために、永久ヒューズには、並列に抵抗が接続されているが、永久ヒューズは、本来非直線抵抗なのであり、並列に接続される抵抗の抵抗値  $R$  が次に示す範囲内で選定されなければ、永久ヒューズの機能が阻害されるものではない。すなわち、 $R$  は、

$$E/i_0 < R < nE/i_0 \quad \dots \dots \dots \quad (4.1)$$

で与えられる。ここに  $E$ 、 $i_0$  は相電圧ならびに限流波高値であり、 $n$  は過電圧の許容倍率を示す。左辺は限流機能の点から、右辺は過電圧抑制効果面からの制限を示すものである。このほか、並列抵抗は、限流時の電磁エネルギーを一部負担する効果があるため、永久ヒューズの耐圧容器がうける機械的ストレスを低減する作用をもっている。

#### 4.5 永久ヒューズの直列接続・並列接続

永久ヒューズの直列接続・並列接続はともに可能である。同一仕様の永久ヒューズの直列接続での限流時各ヒューズ端子間電圧分担は、非常に良好で ±7 % 以内である。並列接続も可能である。並列各分岐アームの接触抵抗を含む抵抗がバランスしておれば、電流分流平衡率は ±6 % 以内である。なお並列接続においては、限流波高値は各永久ヒューズの限流波高値の和で与えられる。

#### 4.6 ピストン飛出し形永久ヒューズの特性

永久ヒューズの内圧上昇を緩和するためにもうけられているピストンロッドを直結し、背圧をアルゴンガスの代わりにサラバネにすることによって、ピストンロッドの動作を外部に取り出すようにした永久ヒューズのモデルを図 4.4 に示す。図 4.4 の左のロッドがピストンに直結されており、限流時の内圧上昇により高速度で駆動される。ロッドの

動き、荷重を高速コマ取りカメラで観測した結果、

ロッドの駆動速度 :  $8 \sim 10 \text{ m/s}$

全ストローク移動時間 :  $400 \mu\text{s}$

推定される内圧力 :  $3,000 \text{ kg/cm}^2$

ロッドの受圧力 : 約 3 tons

などの値が得られ、これらの測定値であれば、永久ヒューズの動作と協調して他の機器の引きはずし、あるいは駆動が可能である。

#### 5. 永久ヒューズの応用

永久ヒューズは、すでに述べたとおり本質的には電力用の非直線抵抗であり、前例のない素子であるため幅広い用途が考えられる。永久ヒューズの応用可能用途のうち、最も重要でかつ応用の意義の大きい用途は、短絡あるいは過電流保護素子としての応用であり、結合する機器により、

(1) 本来ある程度の短絡保護機能をもっているものと、結合する場合

(2) 本来それ自身で短絡保護機能をもたないものと、結合する場合

に分けられる。(1)ではノーヒューズシャンターやノーヒューズシャンターカセットなどの一般のシャンタ装置と結合して、シャンタ性能の大幅な格上げが可能であるが、このほか限流リクトルの代わりに永久ヒューズを用いることにより、分岐回路に取り付けられているシャンタ器のシャンタ性能を実質的に格上げすることも可能である。(2)の場合については、電磁接触器との結合、電力用半導体素子との結合が考えられ、この場合には、永久ヒューズとの結合により、短絡保護機能が、新たに付加されることになり、応用製品開発の技術的意義はとくに大きい。以下にこれらの応用について述べる。

##### 5.1 ノーヒューズシャンタ器との結合

永久ヒューズを応用したノーヒューズシャンタ器については、本号別稿において詳しく述べられているので詳細は省略するが、永久ヒューズは取り換える必要があるので従来シャンタ器の背面に取り付け、シャンタ容量を永久ヒューズがない場合の  $460 \text{ V } 15 \text{ kA}$  から  $460 \text{ V } 200 \text{ kA}$  の実質的にほぼ無限大のシャンタ容量まで格上げすることができる。一方、回路の電磁エネルギーと電圧の大部分は、永久ヒューズが負担するため、消弧室の損傷なども著しく軽減され、長寿命で無保守・無点検のシャンタ装置が実現できる。さらに、永久ヒューズ付きシャンタ器のシャンタ容量が大きいため、給電系統計画を短絡容量を考えずに行なうことができ、理想的な選択シャンタシステムや、カスケードシャンタシステムを構成することも可能であって、給電の信頼性の向上と直列機器の保護が可能である。図 5.1 は、永久ヒューズ付きノーヒューズシャンタ器の外観を示したもので、 $225 \text{ A} \cdot 100 \text{ A}$  定格品である。永久ヒューズは、 $550 \text{ V}, 100 \text{ A} \cdot 225 \text{ A}$  用がとりつけられ、いずれもシャンタ容量は  $200 \text{ kA}$  である。 $100 \text{ A}$  定格品の限流波高値とシャンタ時間は、 $200 \text{ kA}$  の短絡回路において、約  $16 \sim 17 \text{ kA}$ 、 $5 \text{ ms}$  程度であり、全シャンタ  $i^2 \times t$  は  $3 \times 10^5 \text{ A}^2 \cdot \text{s}$  である。これは、同一電流定格の従来ヒューズの約  $1/8$  である。

##### 5.2 限流リクトルとしての応用

永久ヒューズを、図 5.2 に示すように基幹系統母線に入れることにより配電盤全体の合理化ができる。すなわち、事故電流はすべて永久ヒューズが限流し、ある一定限流波高値以上の電流は回路に流れないので、配線の電磁機械強度や配線の太さなどを連続通電性能に影響しない範囲で低減することができ、分岐回路シャンタ器  $C_1, C_2$

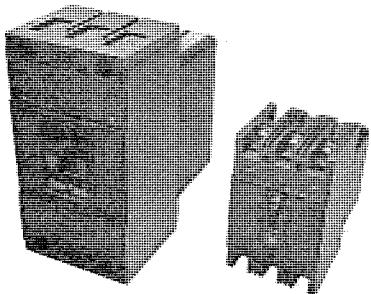


図 5.1 永久ヒューズ付きノーヒューズブレーカ NFU-225(左)ならびに NFU-100(右)  
Outside view of the moulded case circuit breaker type NFU-225 & NFU-100.

表 5.1 電磁接触器の再使用可能な  $i^2 \times t$  と対応する永久ヒューズの  $i^2 \times t$   
Permissible  $i^2 \times t$  of contactor series and  $i^2 \times t$  of coordinated P.P.F.

	電磁接触器の再使用可能な $i^2 \times t$ ( $A^2 \cdot s$ )	永久ヒューズの $i^2 \times t$
S-18	$1 \times 10^4$	$1.6 \times 10^3$
S-35	$2 \times 10^4$	$3 \times 10^3$
S-65	$4 \times 10^4$	$8 \times 10^3$
S-100	$1.5 \times 10^5$	$5 \times 10^4$
S-150	$4 \times 10^5$	$1 \times 10^5$

とのカスケードしゃ断も可能であるため、 $C_1$ 、 $C_2$ のしゃ断定格も低減でき、盤全体として最適な設計ができ合理化が可能である。

### 5.3 電磁接触器との結合

電磁接触器は、本来それ自体では短絡保護機能をもたないため、短絡保護はしゃ断器で行なうものとされているが、電磁接触器が損傷をうけないための許容  $i^2 \times t$  が非常に小さいため、しゃ断器で短絡保護をする場合にも、接点の浮き上がり、これによる溶着あるいは、熱動素子の溶断などの損傷が発生することは、避け得ないものと考えられている。しかし、永久ヒューズと電磁接触器との結合によれば、上述の一連の損傷が全く発生しないレベルまで  $i^2 \times t$  を低減し保護することができるだけでなく、短絡しゃ断も電磁開閉器の接点で行なうことが可能になる。表 5.1 は、当社製 S 形電磁接触器シリーズの再使用可能な  $i^2 \times t$  と、シリーズ各定格品に結合される永久ヒューズの全しゃ断  $i^2 \times t$  を示したもので、永久ヒューズの  $i^2 \times t$  が電磁接触器の許容  $i^2 \times t$  の  $1/10 \sim 1/3$  であることがわかる。

したがって、永久ヒューズと結合された電磁接触器では、保護協調のクラス d、すなわち、“いかなる電流領域でも無損傷であること”が保証されるとともに、多ひん度の電磁開閉機能はそのままに、大しゃ断容量をもつしゃ断装置としての機能をも備えうことになります、理想的な電磁開閉しゃ断器を実現することができる。電磁開閉しゃ断器は、すでに開発段階を終了し、製品化が進められている。

### 5.4 電力用半導体の保護への応用

永久ヒューズはすでに述べたとおり、熱的構造が半導体素子とよく似ているため、半導体素子の保護にとくに適している。永久ヒューズを、保護すべき半導体素子あるいは装置と直列に接続し、半導体のサージ耐量以下に通過電流を限流し、必要に応じてゲート制御することにより完全な短絡保護ができる。レオナード、インバータ、サイクロコンバータ、車両用チョッパなどサイリスタ応用製品別に短絡保護の研究が行なわれており、順電流 70 A から 500 A までのサイリスタ、トライアックをくり返し保護できる見通しが得られている。

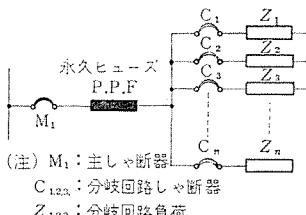


図 5.2 限流リアクタとしての応用例  
Example of the application of P.P.F. as a current limiting reactor.

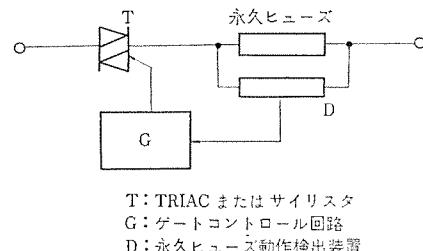


図 5.3 TRIAC 固体しゃ断器のスケルトン図  
Example of a solid state gate controlled circuit breaker.

### 5.5 無接点固体しゃ断器

元来、半導体は非くり返しの許容通過電流が小さく、しゃ断器としては現実性に乏しかったが、半導体のサージ耐量以下で、しかもゲート機能が阻害されないレベルまで限流できる永久ヒューズと結合すれば、半導体の保護はもちろんゲートしゃ断も可能であることは明らかである。図 5.3 は固体しゃ断器の 1 相分のスケルトン図であるが、具体的には多種多様の変形が考えられる。固体しゃ断器についても技術的な見通しは得られつつあり、製品化をすすめている。

### 5.6 その他の応用

以上のべたもののほかにネットワークプロテクタ用のヒューズとしての応用や、異常電流検出素子としての応用が考えられ、研究が進められている。

## 6. む す び

以上、永久ヒューズの構造・特性・応用についてのべたが、自己復旧性能をもつ限流素子として、その応用可能な範囲は広く、従来技術では実現できない新しい機能を有する製品を市場に送り出すことができると確信している。

なお、永久ヒューズの構造・回路方式・応用に関してはすでに 150 件の特許・実用新案を申請中であり、基本特許はすでに、米国、英国、仏、伊、など各国で成立している。また永久ヒューズは、純国産技術によって完成したものであり、昭和 44 年度 10 大発明にも選ばれている。最後に永久ヒューズの開発に協力ならびに有益な助言をいただいた関係各位、とくに生産技術研究所 加工技術部、当所 第二研究部・第三研究部・第四研究部、ならびに当社 福山製作所技術部・工作部の各位に心からの謝意を表します。

(昭和 46-4-7 受付)

## 参 考 文 献

- (1) T. Ito, T. Miyamoto, N. Takano : IEEE, Summer Power meeting Conference paper, 70-cp-601 PWR (1970)
- (2) 伊藤, 宮本, : OHM ジャーナル, pp. 18~20 (昭 44-11)
- (3) 伊藤, 宮本, 井上, 高野: 昭 45 電気四連大 721
- (4) 伊藤, 宮本, 和田, 森: 昭 45 電気四連大 722, 723
- (5) 伊藤, 宮本, 和田, 浜野: 昭 45 電気四連大 724
- (6) 村井, 和田, 宮本, 森: 昭 45 電気学会関西支連大 G 3-53
- (7) 伊藤, 宮本, 和田, 森: 昭 45 電気学会関西支連大 G 3-54
- (8) 土方, 宮本, 吉岡, 浜野: 昭 45 電気学会関西支連大 G 3-55
- (9) 宮本, 和田, 山本, 川畑: 昭 46 電気学会全国大会 694
- (10) 土方, 宮本, 吉岡, 浜野: 昭 46 電気学会全国大会 696
- (11) 伊藤, 宮本, 和田, 森: 昭 46 電気学会全国大会 697

## 永久ヒューズ用 金属材料の耐アルカリ金属性

落合温之・原田辰巳・西楽隆司\*\*

## Corrosion Resistance of Metals used in Permanent Power Fuses with NaK (Binary Eutectic of Na and K)

Fukuyama Works      Haruyuki OCHIAI • Tatsumi HARADA  
Central Research Laboratory      Takashi NISHIRAKU

From the standpoint of construction of permanent power fuses, it is unavoidable that alkaline metal comes in direct contact with the component parts. Study has been made to see how these parts can withstand long use. Based on information in a "Liquid-Metals Handbook", stainless steel and copper alloy reported to have good corrosion resistance were dipped for long time in solution of NaK, binary eutectic of Na and K on the assumption of a state conforming to actual operation. After that it was confirmed that there was nothing wrong with their appearance, change of weight, mechanical strength, and E. M. X. (electron microprobe X-ray analyzer) measurement.

## 1. まえがき

永久に繰返して使えるという、ながいあいだ技術者の夢であった永久ヒューズが開発され、交流 460 V 定格のノーヒューズしゃ断器と組み合わせて、世界ではじめてという 200 kA の大電流しゃ断可能な永久ヒューズ付しゃ断器が発売され、約 1 年が経過した。

永久ヒューズの構造上、ナトリウムが気化したときに発生する高圧力に耐える絶縁物容器、アルカリに耐える材料の調査試験など開発段階で技術的問題があったが、ここでは永久ヒューズに使用されている金属材料の耐アルカリ性について述べる。

ステンレス 鋼(以下 SUS 27 という)は、原子力発電高速増殖炉用熱媒体として使用されているナトリウムのループ配管材料として、600°Cでの使用実績があり<sup>(1)</sup>、電気用銅(以下 CuBE という)は、300°Cまでは長期の使用に耐える<sup>(2)</sup>という種々の情報をもとに、はじめ金属導電体・非磁性で機械強度のある耐アルカリ性のすぐれた市販の材料(10種以上)を検討し、使用状態にそくした材料試験を行なったが、ここでは5種の材料につき、アルカリ金属に浸漬前後の外観、重量変化、アルカリ金属との浸漬界面の E. M. X. 測定、機械強度試験などを求めた。また、腐食(ここでは試料の関係上重量変化)においてはSUS 27と比較した。なお永久ヒューズを使用状態と同一電圧電流条件で連続通電してはじめてほぼ3年以上経過しているが、現在もなんら異常なく試験続行中である。耐食性試験としては、当然使用するアルカリ金属自体の純度、市販供試試料の成分組成、アルカリ金属封入容器材質、封入操作、および試料の洗浄など、を詳細に検討すべきであるが、同一条件での相対的比較で行なった。アルカリ金属としては、常温で液体であり作業性のよいナトリウムとカリウムの合金である NaK を使用したが、実際の永久ヒューズではナトリウムを使用しており、NaK とナトリウムとの化学的活性の違いを考慮すると、この実験では実用品よりも過酷な試験になったと考えられる。

## 2. 実験方法

## 2.1 試 料

### 2. 1. 1 試料の種類および処理条件

永久ヒューズの構造上必要な特性をそなえ、しかも耐 NaK 性のよ

い材料として市販の SUS 27, CuBE, 快削ステンレス鋼（以下 AISI 303 という）、銅クロム（以下 Cu-Cr という）、および快削黄銅（以下 BsBM 2 という）の 5 種類を選んだ。試料の処理条件として無処理、熱処理品で表 2.1 に示すごとく常時引張りによる応力添加も条件に加えた。

## 2. 1. 2 試験片の形状

試験片の形状としては、NaK 中に脱気封入浸漬するときと、取り出して種々の試験をするという条件があるため、大きさおよび形状が制約されるので図 2. 1, 図 2. 2, および図 2. 3 に示す 3 種類の試験片を作成した。図 2. 2 の常時引張試験片は実機での使用にそくして、常時約  $0.1 \text{ kg/mm}^2$  の引張応力を加えるため図 2. 4 に示すごとく、SUS 27 パイプに試験片を入れ、図 2. 5 に示す皿ばね(SK 5)をかいして応力が  $0.1 \text{ kg/mm}^2$  になるようにしめつけた。

表 2.1 試料の処理および試験条件と試験内容  
Treatment of specimens and test conditions.

試 料		試 験 条 件				試 験 内 容						
試 験 片	処理条件 応力 ( $\text{kg/cm}^2$ )	浸漬 温度 (°C)				日 数 (日)	① 外 界 E M X	② 重 量 変 化	③ E M X	機械的特性		
		200	160	120	80					硬 度	引 張 度	耐 り き 力
引 張 試 験	な な し	U, K, C, S	S <sup>(1)</sup>	S	—	4~86	○ ○	○ U, C	○ ○	○ ○	○ ○	—
		560	S	—	—	25	○ ○	—	○ ○	○ ○	○ ○	—
		680	S	—	—	25	○ ○	—	○ ○	○ ○	○ ○	—
常 時 引 張	0.1 kg/ mm <sup>2</sup>	な し	U, C, E	U, C, E	U, C, E	U, C, E	21~62	○	—	—	○ ○	— ○ —
		530	U, C, E	U, C	U, C	U, C	21~62	○	—	—	○ ○	— ○ —
		530 (H, C) <sup>(2)</sup>	U, C	—	—	—	67(回)	○	—	—	○ ○	— ○ —
衝 撃	な し	U, K, C, E	—	—	—	62	○	—	—	—	—	○
		530	U, K, C, E	—	—	—	62	○	—	—	—	○

注) (1) 材料略号

U：ステンレス鋼(SUS27)

K：焼削ステンレス鋼

### C : 銅-クロム (Cu-Cr)

S : 快削黃銅 2 種 (BsBM 2)

## 2.2 試験条件

表2.1に示すとく、浸漬温度は80, 120, 160および200°C、時間は4~86日間の連続浸漬試験を行なった。また、熱処理後のSUS27, Cu-Crの常時引張試験片だけは、67回のヒートサイクル試験(8時間加熱、16時間室温)を行なった。

## 2.3 試験方法

### 2.3.1 NaK充てん方法

#### (1) NaKと装置

図2.6に示す装置を用い、試験片の寸法により(イ)  $15.5\phi \times 2t \times 200$  および(ロ)  $25\phi \times 2t \times 200$  の無酸素銅管を水素炉で800°C 30分間焼きなまして冷却・酸洗いした後、一端を圧接し完全にシールした容器を準備した。使用するNaKは、試薬一級のNaとKを重量比22:78で加え、不活性ガスふんい気中で加熱溶解し作成した。図2.6でNaKだめ・アルゴンガスだめはステンレス容器、配管コック類はすべて硬質ガラス製とし、NaKひょう(秤)量部の容積は、試料容器の大きさ試験片形状によりそのつど交換することにした。真空ポンプは油回転式ポンプで到達真空度は $10^{-4}$ mmHgである。

#### (2) 操作(図2.6参照)

脱脂・洗浄の終わった試験片を一端圧接した銅管中にそう入しV<sub>11</sub>の下にゴム弾性を利用してとりつける。つぎに真空ポンプでV<sub>11</sub>, V<sub>2</sub>, V<sub>1</sub>を経由して試料容器内を排氣する。(V<sub>10</sub>もあけておく)真空度はガイスター管および真空計(サーミスタ)によりよむ。一方V<sub>7</sub>を開いてアルゴンガスだめを排気し排気完了後V<sub>7</sub>をとじV<sub>9</sub>を開きアルゴンガスを満たす。真空計が0.01mmHgとなるとV<sub>2</sub>, V<sub>10</sub>, V<sub>11</sub>をとじ、V<sub>4</sub>, V<sub>5</sub>, V<sub>6</sub>を開いてNaKだめ中のNaKをNaKひょう量部に移送する。所定量のNaKの移送を完了したならV<sub>4</sub>, V<sub>5</sub>, V<sub>6</sub>はとじ、V<sub>8</sub>, V<sub>10</sub>, V<sub>11</sub>を開いてNaKひょう量部内のNaKを試料容器に移送する。つぎにV<sub>8</sub>を開いて試料容器内のアルゴンガスを排気減圧する。試料容器を圧接シールし、NaKと試験片を無酸素銅管中へ封じ込み操作を終わる。これを硬質ガラス管内に入れ減圧封止して圧接部を保護する。ついで電気炉中で所定の温度時間処理する。

### 2.3.2 試験片のとり出し

所定の処理を終わった試験片は、つぎの順序でNaK中よりとり出し処理する。

(1) ガラス管を切断、高圧絶縁油中で無酸素銅管を切断し試験片を取り出す。

(2) 試験片を高圧絶縁油で十分洗浄する。

(3) ベンゾール(試薬一級)、メタノール(試薬一級)で洗浄後15分3回メタノール(試薬一級)で超音波洗浄を行なう。

(4) 120°C 1時間乾燥後デシケータ中で放冷する。

### 2.3.3 外観

目視および実体顕微鏡(×32)により行ない、いちじるしい変化の出たものを写真撮影する。なお、表面からの侵食状態の断面組織を顕微鏡撮影する。

### 2.3.4 重量変化

試験片の浸漬前後における重量変化率を求める。試験前の重量はトリクレン脱脂、メタノール洗浄後乾燥してデシケータ中に1日放置した後すばやく化学天びん(秤)でひょう量する。

### 2.3.5 E. M. X. 觀察

SUS27(200°C 25日間浸漬)とCu-Cr(200°C 86日間浸漬)について、NaKの浸食状態を断面研磨してミクロ的に観察する。

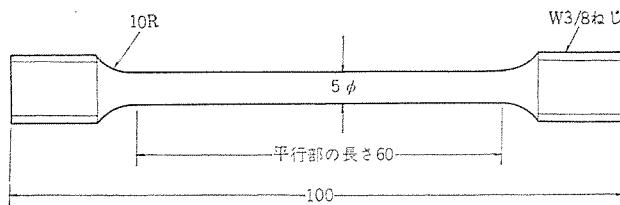


図2.1 引張試験片  
Tension test pieces.

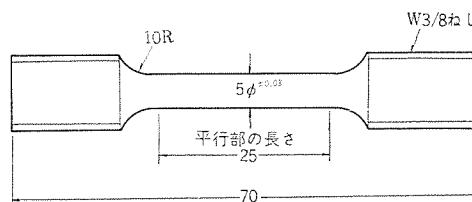


図2.2 常時引張試験片  
Tension-loaded test pieces.

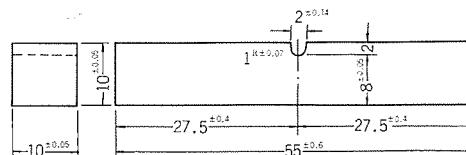


図2.3 シャルピー衝撃試験片  
Charpy impact test pieces.

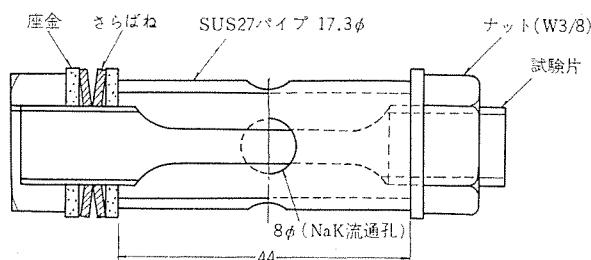


図2.4 常時引張試験治具  
Tension load jig.

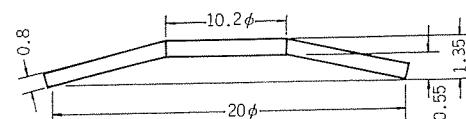


図2.5 さらばね(材質 SK 5)  
Pan type spring (SK 5).

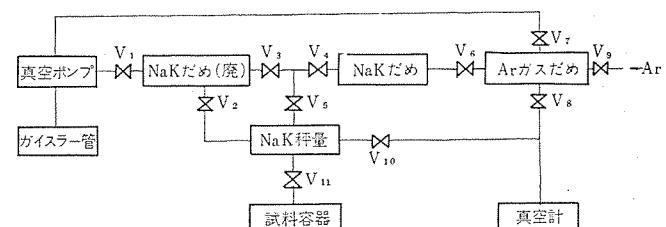


図2.6 NaK充てん装置ブロック図  
Block diagram of NaK filling apparatus.

測定装置：島津製E.M.X.2

条件：加速電圧20kV, 電子ビーム径 $0.5\mu$ , X線径 $3\mu$

### 2.3.6 機械的特性

#### (1) 硬度測定

測定器：微小硬度計 荷重500g, 1,000g

## (2) 引張試験

測定項目として引張強さ、0.2%耐力、伸びを測定する

## (3) 衝撃試験

シャルピー式 30 kg·m

### 3. 結果および考察

#### 3.1 外観および顕微鏡組織

(1) 外観は浸漬時間、温度、焼きなまし効果と試験条件を変えてもBsBM 2以外は初期の状態と光沢も変わらず、顕微鏡観察を行なっても変化は認められない。BsBM 2は、腐食はなはだしく表面の荒れ、クラックも肉眼ではっきり確認できる程度に大きい。またその程度は、時間・温度に比例し焼きなましを行なったものほど大きい傾向にある。なお、取り出し直後はまだ黄銅色を保っているが時間の経過とともに試験片の中からNaKが湧出したりして、だんだんと黒変していく。図3.1にSUS 27とBsBM 2の比較写真を示す。

(2) 横断面の顕微鏡組織は、BsBM 2以外は図3.2、図3.3に示すごとく表面からの腐食・変質は認められず良好である。

図3.4に示すようにBsBM 2は、結晶粒界割れで組織のぜい(脆)弱な粒界をNaKにより浸食されている。また $\beta$ 相が時間の経過とともに溶解除去され空げき(隙)を作り、さらにNaKが浸透している。顕微鏡組織観察中または撮影中にも時間の経過につれ内部よりNaKがゆう(湧)出してくるのはそれを裏付けている。

#### 3.2 重量変化

##### (1) 浸漬時間の影響

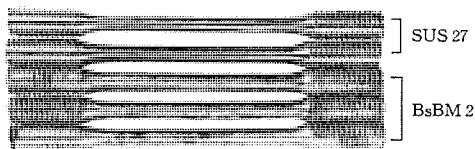


図3.1 NaK 浸漬後の SUS 27 と BsBM 2 の外観  
Appearance of SUS 27 and BsBM 2 steeped in NaK (200°C 20 days).

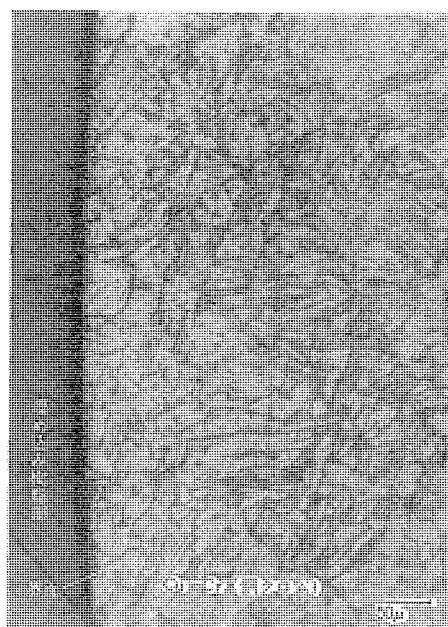


図3.2 NaK 浸漬後の Cu-Cr 横断面組織  
Cross-section microstructure of Cu-Cr after NaK steeping.

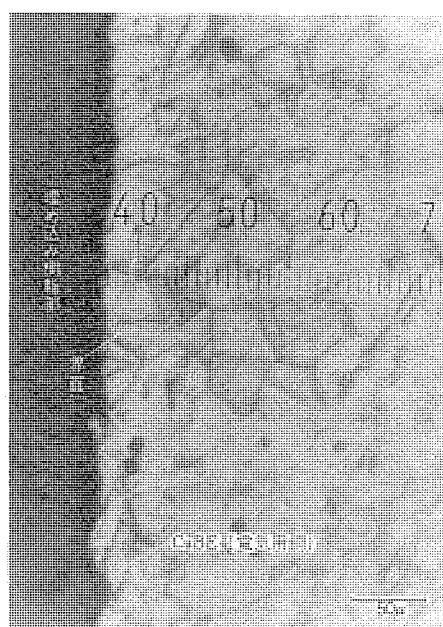


図3.3 NaK 浸漬後の CuBE 横断面組織  
Cross-section microstructure of CuBE after NaK steeping.

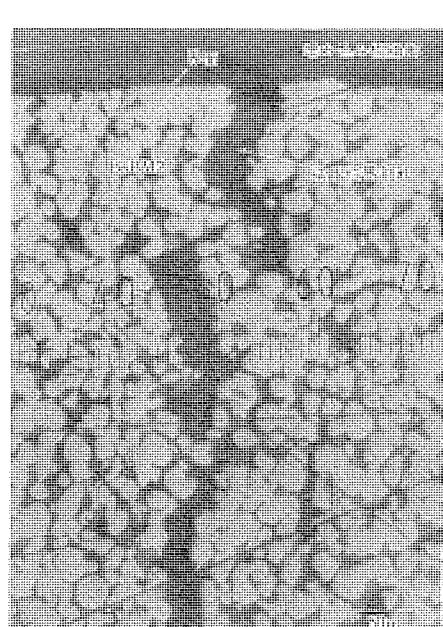


図3.4 NaK 浸漬後の BsBM 2 横断面組織  
Cross-section microstructure of BsBM 2 after NaK steeping.

図3.5に示すようにCu-CrおよびSUS 27の変化量は22日間に-0.003%以下できわめて少なく問題ない。CuBEは試料数が少ないがSUS 27と同じくらいの値で、AISI 303は22日間で0.01%前後の減少とともに良好といえる。BsBM 2は20日間で約1%の減少と非常に大きく使用にたえない。なお、Cu-Crは長期86日間の結果でも-0.001%以下と変化量は非常に少なく、測定誤差程度でほとんど変化ないものと考えてよい。浸漬時間との関係は最初の短期間(10日以内)に腐食はよく進行するが、それ以後は比較的緩慢で1カ月をすぎるとやや飽和する傾向がある。

##### (2) 浸漬温度および焼きなましの影響

BsBM 2について図3.6に浸漬温度特性、図3.7に焼きなまし特性を示す。温度の上昇に比例して腐食の度合い(重量減少率)は大きくなってくる。焼きなまし効果は焼きなますことにより表面がうすく酸化され、焼きなましをしないものよりは若干腐食率が高い傾向にある。温度効果は560°と680°Cでは特に差はない。

#### 3.3 E. M. X. (X線マイクロアナライザ) 測定

##### (1) SUS 27

試験片の断面における表面からの構成元素の分布をみると、鉄・クロム・ニッケルはまったく同一の傾向を示すので、鉄・クロムとそれに対応するナトリウムの分布を図3.8に示す。鉄・クロムともに界面で急激な立上りをみせ、選択的な溶出侵食はおこっていない。中央部と端部近傍とでも構成元素比に差がなくナトリウムもSUS 27中に侵入していない。

##### (2) Cu-Cr

86日間浸漬したCu-Crの断面における表面からの銅・クロム・ナトリウムの分布を図3.9に示す。主成分である銅は界面で急激な立上りをみせ、クロムは2~5μの偏折をしており、界面近傍ではなんら変化を示さない。銅の少ない部分に対応してクロムの増加がみられる。中央部と界面近傍とで構成元素比に差がなくナトリウムは侵入していない。

#### 3.4 機械的特性

##### (1) 浸漬時間の影響

図3.10に示すとくSUS 27, Cu-Cr, AISI 303はNaK浸漬前後においてほとんど特性の変化は認められない。長期間には若干の値の上下もあるが、これは同一試験片で破壊試験ができないこと、各試験片間およびロット間に材料特性のばらつきもあることなどから考えて、浸漬時間の影響が特にあるとは考えられない。ただミクロ的な表面硬度はわずかに低下する試料もある。

BsBM 2は3.1節、3.2節に述べたとく大きな腐食およびクラックが入るが、機械的強度も浸漬時間の経過とともに大きく低下する。特に、引張り強さは初期の1/2以下になる、また伸びはほとんどなく零に近い。そして破断面は粗粒であり破断後中心部よりNa Kが湧出してくる。なお強度低下は浸漬後4日目くらいまで急速に進行し、10日前後が一つの変曲点となり以後はわずかに進行する傾向にある。

#### (2) 浸漬温度および焼きなましの影響

BsBM 2について試験した結果、図3.11に示すとく温度の上昇に比例して諸特性も下る傾向にあり、4日間の浸漬でほとんど低

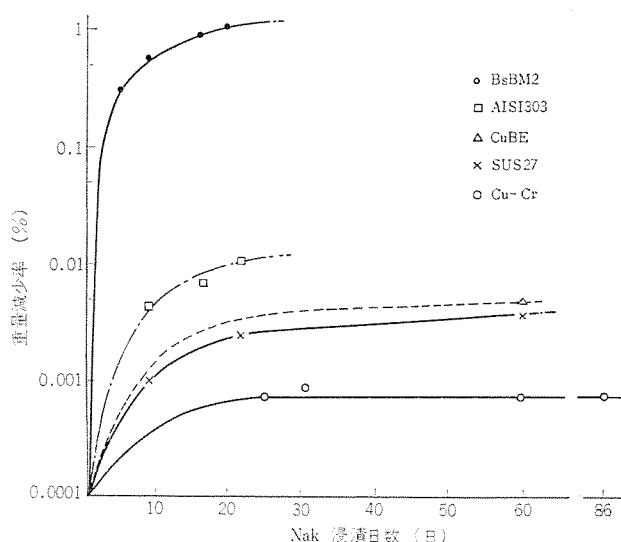


図3.5 NaK 浸漬時間と重量変化  
Relation between weight loss and steeping time  
(NaK temp : 200°C).

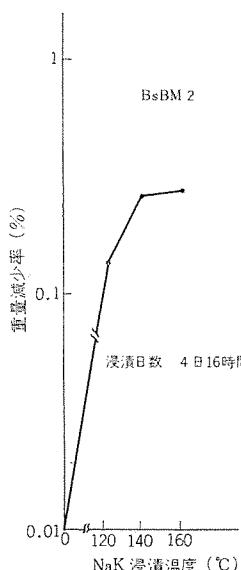


図3.6 温度特性  
Relation between weight loss and NaK temp (BsBM 2).

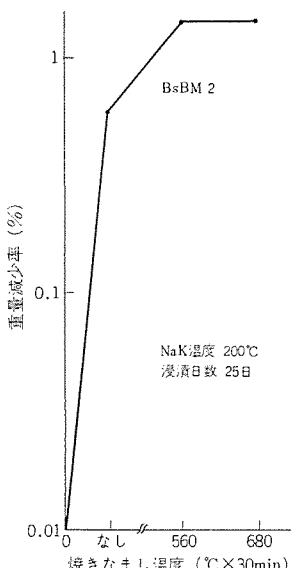


図3.7 焼なまし特性  
Relation between weight loss and annealing temp (BsBM 2).

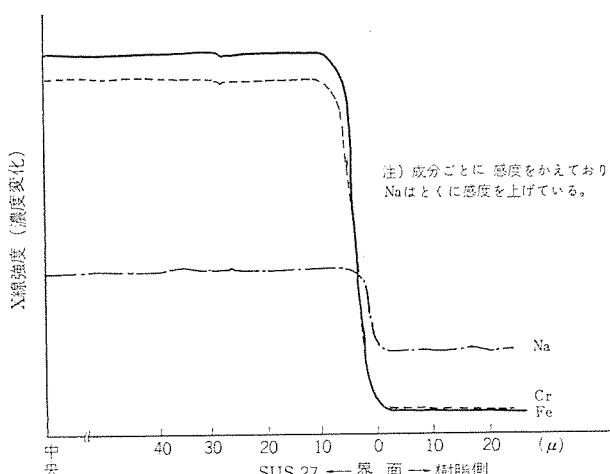


図3.8 E.M.X.によるSUS 27断面のFe, Cr, Naの分布  
Component-distribution change of steeped SUS 27  
(NaK temp. 200°C, 25 days).

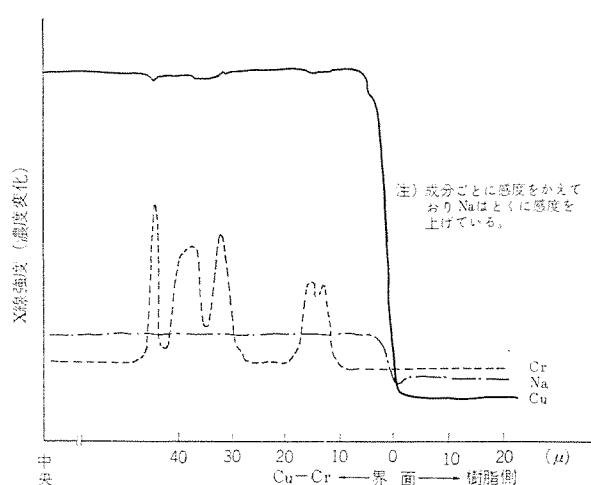


図3.9 E.M.X.によるCu-CrのCu, Cr, Naの分布  
Component-distribution change of steeped Cu-Cr  
(NaK temp. 200°C, 86 days).

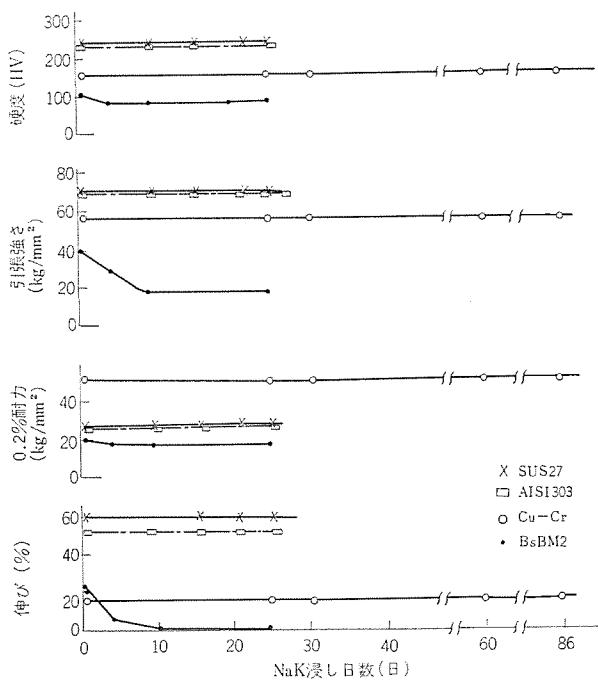


図3.10 NaK 浸漬時間と機械特性  
Relation between mechanical properties and steeping time in NaK.

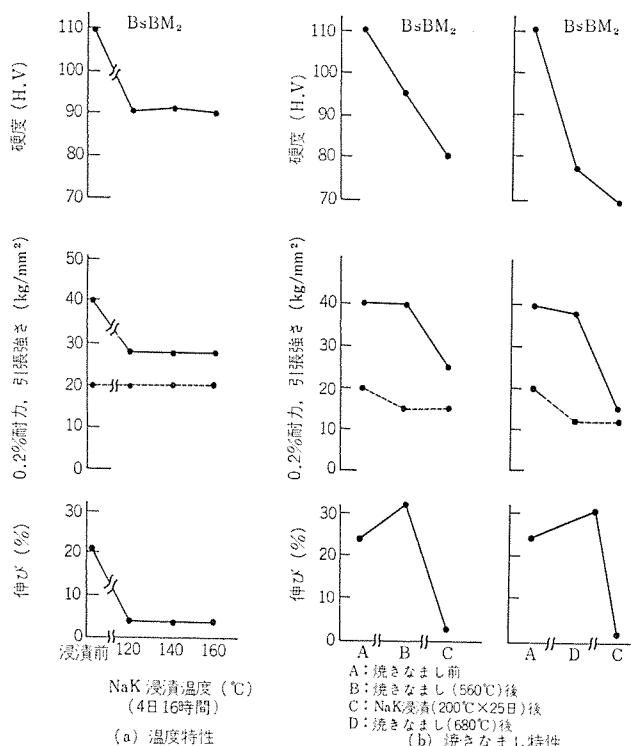


図 3.11 浸漬温度と焼なまし後の諸特性  
Relation between mechanical properties and steeping temp. (a), and annealing temp. (b) (BsBM2).

下しているのではっきりとした差がでなかった。焼きなましの影響としては、なますことにより強度が低下したままとなりなまし温度の影響はつかめなかった。

#### (3) 常時引張りの影響

図 3.12 に示すとく焼きなましを行なわないものは、ミクロ的な表面硬度がわずかに下るものもあるが、引張強さの低下は認められない。また、焼きなましを行なったものは、SUS 27 以外はいったん強度が下るが、それ以後の浸漬による強度変化は認められない。つまり、 $0.1 \text{ kg/mm}^2$  程度の引張応力では、NaK 温度および時間に関係なく強度変化は起こらないことが判明した。同様にヒートサイクルを行なったものでも変化は認められなかった。

#### (4) 衝撃試験

図 3.12 に示すとく無処理品は浸漬前後の強度に差は認められない。熱処理すると、いったん衝撃値は上がるが長期浸漬後も初期の値と変わらない。衝撃試験は腐食によるピットの発生などを考慮して衝撃強さが減少するのではないかと心配されたが、表面からの腐食がほとんどないことより、安全性が確認された。

## 4. む す び

以上永久ヒューズの構成金属材料の耐 NaK 性について述べたが、

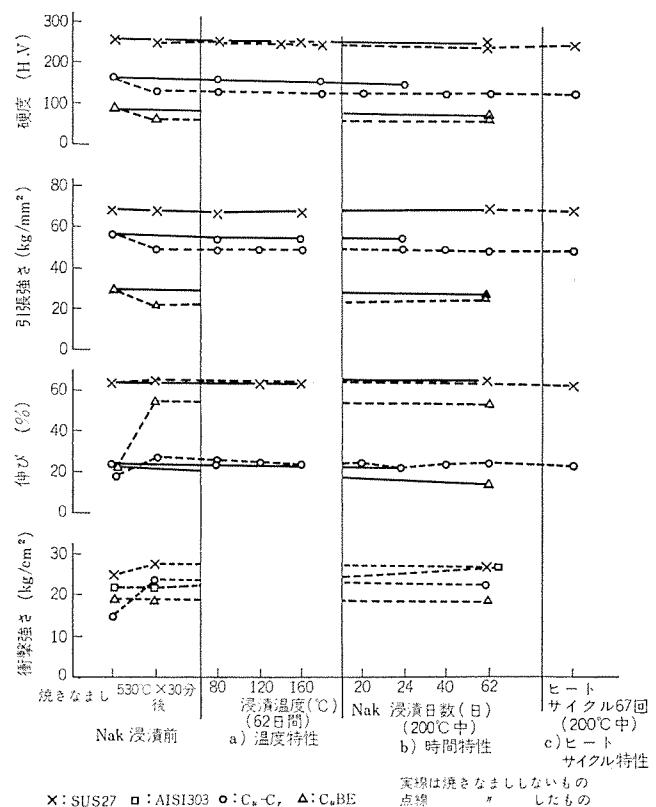


図 3.12 常時引張り後の諸特性および衝撃強さ  
Comparison of mechanical properties of tension-loaded specimens after NaK steeping.

現在永久ヒューズに使用している原子炉級のナトリウムおよびヒューズ部の温度上昇に比べ、この実験に使用した NaK のほうが、不純物としての酸素含有量も多く実験温度も高く当然過酷な試験にもかかわらず、BsBM 2 を除いて SUS 27, Cu-Cr, CuBE などは腐食、機械強度特性においてなんら異常のないことが判明した。現に、十数回使用した永久ヒューズを分解してこのことは確認されている。今回の実験をベースにさらに種々の電気材料について耐アルカリ性を究明し、永久ヒューズの発展をはかりたい。

おわりに、耐アルカリ性について、ご指導・ご協力をいただいた社内外の諸氏に誌上を借りて、心から謝意を表する。

## 参考文献

- 古川：最近の液体ナトリウム技術開発、電学誌、90-6, 34 (昭45)
- R. N. Lyon : Liquid-Metals Handbook, (1954) ; Atomic Energy Commission & Bureau of Ships, Dep of Navy, 148 (1954)

# システムサーキットブレーカとその応用

和田 宏康\*・山本 啓一\*・三好 明好\*

## Systems Circuit Breakers and Their Application

Fukuyama Works Hiroyasu WADA・Keiichi YAMAMOTO・Akeyoshi MIYOSHI

With the increase of demand for severe service continuity and safety for low voltage circuits, it has become necessary to develop new breakers with more exact and adjustable tripping characteristics than conventional ones and also with function of protecting circuits from ground faults.

Under the circumstances, Mitsubishi has been successful in working out circuit breakers to meet all the requirements referred to by employing solid state relays for them. They are now named Systems Circuit Breakers (to be abbreviated to S. C. B.). With the new device, selective tripping of branch circuit which localize blackout against short circuit faults and protective performance against arcing ground faults as well as coordination between the breakers and the electric devices in the system are available.

### 1. まえがき

低圧電路の連続給電および安全性の追求は、電力需要の増大とともにますますきびしくなってきている。これらの諸要求を満足させるために、保護機器としてのしゃ断器の特性は正確であると同時に、一段と自由度のある使いやすいものが求められるようになった。ここでしゃ断器に必要な機能を整理してみるとつぎのようになる。

- (1) 過負荷・短絡保護
- (2) 過渡的な突入過電流(モータ始動、変圧器突入電流、コンデンサ回路の過渡電流、タンクステンフィラメントの始動等)に対し動作しないこと
- (3) アークによる地絡電流が生じた場合、それをしゃ断すること
- (4) 電路の選択性を得るために、低圧側のしゃ断器間や低圧側

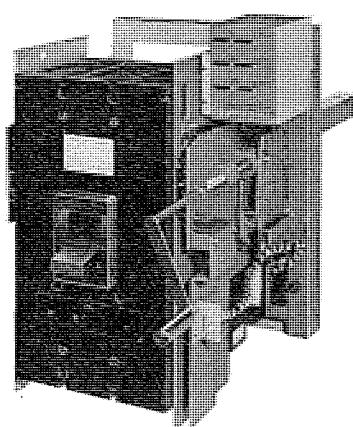


図 1.1 SCB-2000 の外観  
External view of SCB-2000.

表 1.1 SCB 形システムサーキットブレーカの定格一覧  
Ratings of type SCB systems circuit Breakers.

形名	定格電圧 AC V	最大連続 通電電流 A	定格しゃ断容量			
			非対称値		対称値	
			瞬時	短限時	瞬時	短限時
SCB-600	220	600	50,000	—	42,000	—
	460	600	35,000	—	30,000	—
SCB-1200	220	1,200	50,000	25,000	42,000	22,000
	460	1,200	35,000	25,000	30,000	22,000
SCB-2000	220	2,000	150,000	50,000	125,000	42,000
	460	2,000	100,000	50,000	85,000	42,000

のしゃ断器と高圧側のヒューズおよびしゃ断器との引きはずし特性のうえでの協調がなされること

これらの諸要求にこたえるため、しゃ断器の特性として可調整なつぎの四つの特性をもたさなければならない。

- (a) 長限時引きはずし特性
- (b) 短限時引きはずし特性
- (c) 瞬時引きはずし特性
- (d) 地絡引きはずし特性

従来のモールドケースしゃ断器は、バイメタルまたは電磁石を利用した固定形の長限時と瞬時引きはずし性能しか有していなかったが、本論文で述べるシステムサーキットブレーカ(S. C. B.)においては、静止形の電流感応素子により事故電流、予期以上の電流を検出し、上記四つの諸特性について正確かつユーザにおいて調整しうるリレー部を採用している。特に地絡引きはずし特性を有していることは画期的なことであり、電気火災事故防止のための最大の課題であったアーケによる地絡保護に関して、新しい機能が加わったことになり電気設備の安全性に大きく貢献することになる。

### 2. S. C. B. の動作および構造

S. C. B. のリレー部は、1) 変流器、2) 補助変圧器、3) 整流回路、4) 電源・信号回路、5) 長限時引きはずし回路、6) 短限時引きはずし回路、7) 瞬時引きはずし回路、8) 地絡引きはずし回路、9) 点弧回路、および10) 磁気シャント引きはずしコイルからなりたっている。変流器は過電流・事故電流を検出する部分で定格二次電流は5 Aで、一次側の過電流に比例した二次電流が定格の12倍まで流れるように設計されている。定格の12倍を越すと変流器は飽和しはじめ二次電流は必ずしも一次電流に比例していない。変流器からの信号は補助変流器に流れ、補助変流器の二次側はミリアンペアのオーダーに下げられている。さらに整流回路によってDCに整流され、半導体回路に給電される。電源・信号回路は二つの目的をもっている。

第1はしゃ断器の引きはずしのための磁気シャントコイルを励磁するに必要なエネルギーをコンデンサ内にたくわえておくことであり、もう一つの目的は電子回路の制御を行なうことである。長限時引きはずし回路は、過負荷電流の自乗に逆比例した時間にてしゃ断器を引きはずすよう設計されているが、これは過負荷時に、電流のいかんに

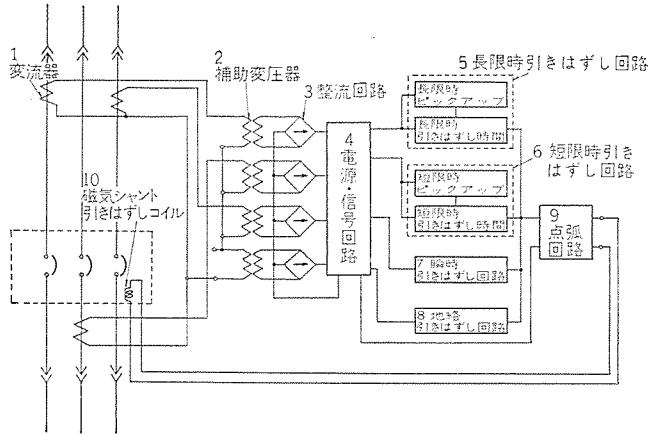


図 2.1 S. C. B. の構成図  
Schematic diagram of S. C. B.

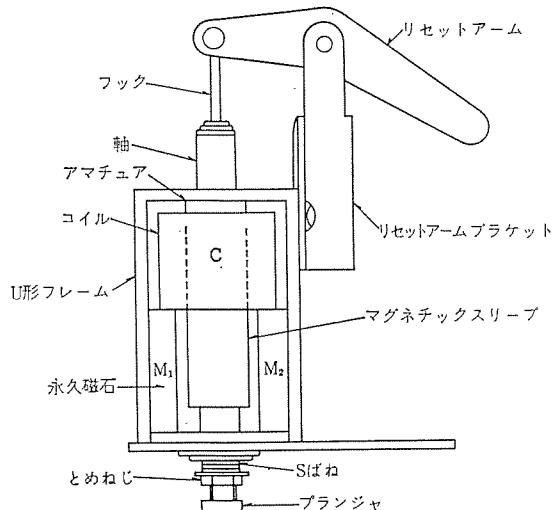


図 2.2 磁気シャント引きはずし装置  
Flux-Transfer shunt-tripping device.

かかわらず、電路に発生する熱的エネルギー  $I^2 \cdot t$  が一定値に達すると点弧回路が動作し、しゃ断器が引きはずされるようにすることにより、電路の熱的破損をさけて可能なかぎり過渡的な過電流を支障なく流すようにしている。

短限時引きはずし回路は長限時引きはずしよりも大きい過電流に応答し、電流の大きさに関係なくほぼ一定時間で動作する。時間は 2~10 サイクルの間で可変である。

瞬時引きはずし回路は電路短絡時の大電流にて応答し、瞬時に動作し、しゃ断器をトリップさせる。瞬時ピックアップ電流値は可変であるが引きはずし時間は一定である。

地絡引きはずし回路は、接地事故が発生したとき、接地電流に応答し、あらかじめ定められた時間で、しゃ断器をトリップさせる。

地絡引きはずし時間は可変であるが引きはずし電流の最小値は一定である。

点弧回路はサイリスタのゲートに信号を送るようにしておる、電力用電路のサージおよび電磁波による誤動作をさけるため、サイリスタのゲートおよびアノード・カソード間にコンデンサによるサージアブゾーをそろ入している。

しゃ断器内部には、低エネルギーの信号でしゃ断器を引きはずすことができる磁器シャントトリップコイルが使われている。この磁気シャントトリップコイル装置のリセットの位置における図を図 2.2 に示す。二つの永久磁石の磁束はフレーム、アマチュアのマグネチックスリーブを通ってお

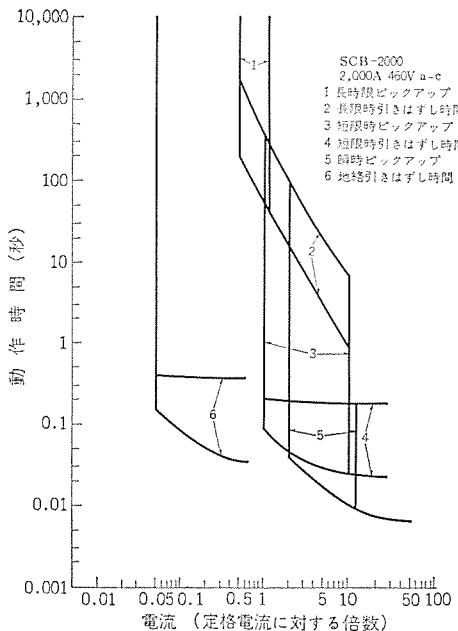


図 2.3 動作特性曲線  
Operating characteristics of type SCB-2000 systems circuit breakers.

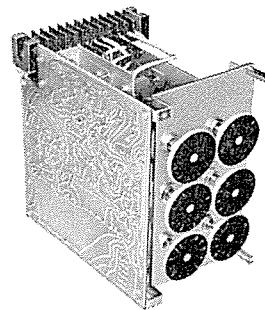


図 2.4 静止形リレーの内部構造  
Internal construction of solid state relay.

り、ばね S にうちかってアマチュアをリセットの位置に保持している。静止形リレー部から加えられる直流電圧によって、コイル C が励磁され永久磁石の磁束とは逆方向に磁束を生ぜしめ、永久磁石の力を弱め、ばね S の力によりプランジャーが突出し、しゃ断器の引きはずし機構を動作させる。しゃ断器がトリップししゃ断器の接点が開離すると同時にコイル C に加わっていた直流電圧がなくなり、接点開離の場合の機械的力によりアマチュアはもとの位置にもどる。

S. C. B. リレー部のしゃ断器引きはずし特性を図 2.3 に、リレーの内部を図 2.4 に示す。

### 3. 単相・三相別の引きはずし時間誤差

S. C. B. は図 2.1 に示すように、各相の変流器により事故電流を検出し、補助変流器を経てそれを全波整流し、電源・信号回路に伝達する。電源・信号回路においては、この信号電流を図 3.1(a)に示すように抵抗間の電圧降下になおし、コンデンサで平滑した後、負荷に送られる。図 3.1(a)を等価の定電圧回路にかきかえると図 3.1(b)のようになる。発生する定電圧  $e$  を単位の波高値をもつ電圧とし、ダイオードの純方向電圧を無視し、 $R_L$  に加わる電圧  $V_0$  は平滑された DC の定電圧であるとすると、 $R_L$  によってコンデンサが引き出される電荷と  $R_L$  によって入ってくる電荷は等しいので、次式が成立する。(図 3.1, 図 3.2 参照)

$$V_0 \left( \frac{\pi}{R_L} + \frac{2\theta}{R_1} \right) = \frac{2 \sin \theta}{R_1} \quad \dots \dots \dots (3.1)$$

$$\frac{R_1}{R_L} = \frac{2}{\pi} (\tan \theta - \theta) \quad \dots \dots \dots \quad (3.2)$$

式(3.1)および式(3.2)から  $R_1/R_L$  と負荷による電圧変化率  $1-V_0$  の関係を求めるとき、図3.3に示すようになる。この図からわかるように  $R_1/R_L$  が大きいほど  $1-V_0$  の値が大きくなる。

S. C. B. のリレー部においては  $R_1=150\Omega$ , 最小の負荷抵抗として  $R_L=4.84k\Omega$  を採用しており次式が成立する。

$$R_1/R_L=0.031$$

$$1 - V_0 = 0.03$$

すなわち電力用電路の単相に過負荷事故が生じたばいの負荷側の電圧変化率は3%であることを意味している。一方、電力用回路の3相とも過負荷事故が生じたときは、電源・信号回路において各相の変流器からの信号はおののの抵抗 $R_1$ にて電圧降下になおされるため、図3.1の点線で示すように並列に $R_1$ が加わることになり、合成抵抗は $1/3$ となる。したがって図3.3の $R_L/R_1$ は $1/3$ に減少し、次式が成立する。

$$R_1/R_L = 0.0103, \quad 1 - V_0 = 0.014$$

これは単相の過負荷事故と 3 相同時の過負荷事故時において、電

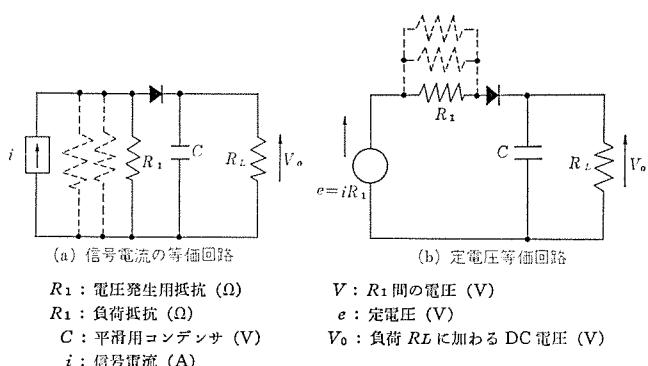


図 3.1 電源・信号回路の等価回路  
Equivalent circuit of power and signal circuit

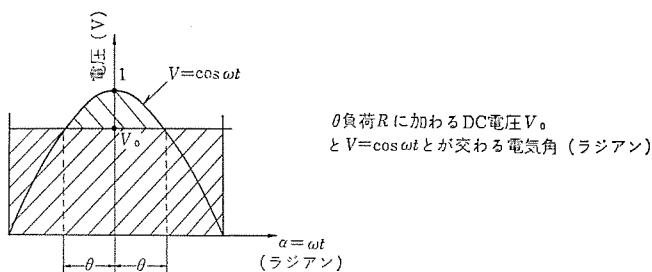


図 3.2 入力波形（半サイクル、せん頭値が単位電圧のばあい）  
Input waveform (half cycle).

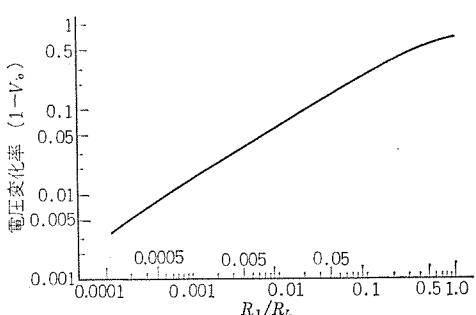


図 3.3 負荷による電圧変化率  
Voltage change due to loading effect

源・信号回路の負荷に加わる、電圧変化率を示しているが、また同時にリレー部の動作時間を比較することになる。したがって単相事故と3相事故時の動作時間の差は $3\% - 1.4\% = 1.6\%$ であり、しゃ断器として許される誤差であることを示している。

#### 4. 周囲温度による動作特性の変化

長限時引きはずし特性の周囲温度による影響を図4.1に示す。S.C.B.のリレー部は静止形で構成されるため広範囲の周囲温度において時限の影響はほとんどない。したがって温度による特性曲線の補正是必要としない。このことは短限時・瞬時の引きはずし特性についても言えることである。

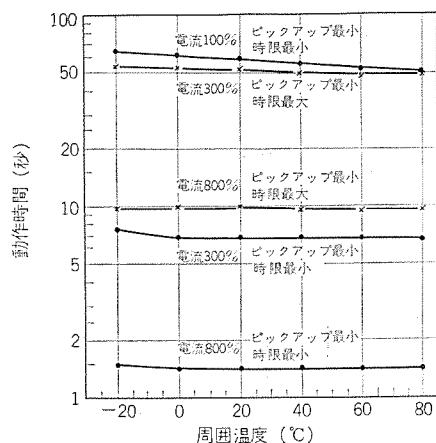


図 4.1 長限時引きはずし時間の周囲温度による変化  
Long-delay tripping time-ambient temperature characteristics.

## 5. 電路への応用

低圧電路の設計にあたっては、給電の連続性、設置機器間の保護協調および経済性を考慮して、下記の電路方式のいずれかが採用される。

- (1) 全定格方式
  - (2) 選択しゃ断方式
  - (3) カスケード方式

全定格方式は、すべてのしゃ断器がその設置点における最大短絡電流に対して十分なしゃ断容量をもつように構成されるものである。選択しゃ断方式は、主回路のしゃ断器と分岐のしゃ断器の動作特性が互いにまったく交差しないように構成されるものであり、主回路のしゃ断器が引きはずされるまでの保持時間が、分岐のしゃ断器の全しゃ断時間より長く設定しなければならない。カスケード方式とは分岐のしゃ断器の設置点での推定短絡電流がそのしゃ断容量を越えるばあい、主回路しゃ断器によって後備保護を行なわせる方式である。S. C. B. は、これらの電路方式のうち全定格方式と選択しゃ断方式の二つを同時にもった電路方式に適用されるしゃ断器である。

変圧器の一次側に設置されるヒューズは、変圧器の定格電流の概略2倍のものが選定され、変圧器の突入励磁電流に対して損傷を受けず、設置点の以後の短絡電流に対し十分なしゃ断容量をもつものが採用されている。このようにして最適のヒューズが一次側に設置されているからには、選択性をうるため、二次側のしゃ断器はこのヒューズと協調をとらなければならない。すなわち二次側のどの点で事故が生じようとも、すべての低圧しゃ断器は一次側ヒューズが動作する前にしゃ断する必要がある。S. C. B. の使用によりその可調

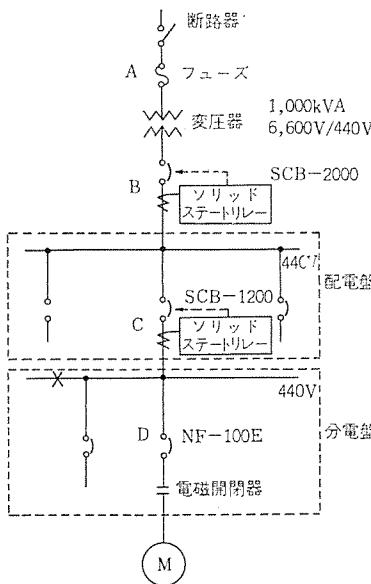


図 5.1 配電系統例  
An example of distribution system.

整なる動作特性を駆使して、最大の給電の連続性をもった電路を達成することができる。変圧器二次側の主回路に S. C. B. を設置するばあい、リレー部を下記のようにセットすることが可能である。

- (1) 変圧器の熱耐量を知り、変圧器の過負荷保護を行なう。
- (2) 母線または分岐線の短路電流やアーカによる地絡事故を防止する。
- (3) 分岐のしゃ断器群の動作特性と協調をとり、電路の選択性を達成する。主回路しゃ断器と分岐回路しゃ断器との間で動作特性上交差する点がまったくない。
- (4) 一次側のヒューズやリレーとの間で最良の協調をとることができる。一次側のヒューズの電流一時間動作特性曲線を二次側に換算し、S. C. B. のリレー部との協調を検討したとき、その2者間の最も近接した点において、ヒューズの溶断特性の 0.75 倍以下の時間にて、S. C. B. リレー部が動作するよう設定する必要がある。

上述のような考え方で最大の給電の連続性を追求した選択しゃ断方式の電路の例を図 5.1 に、その協調曲線を図 5.2 に示す。

しゃ断器の特性は、電動機等の負荷の過渡的な突入電流とは交差せず、また導体の熱的許容電流一時間特性とも交差しないことが必要である。すなわちしゃ断器の特性は、電力を消費する負荷の需要曲線と電力を供給する導体の熱容量との間にあるべきであるが、S. C. B. においては、その電流一時間特性が可変であるがゆえに、この理想像を容易に達成することができる。

また、発電機等の過負荷保護特性と S. C. B. の動作特性を協調させることができ、電源として 1,500 kVA 以下の発電機を積載している船舶の電路に使用される。

表 5.1 配電系統の定格と設定例  
An example of ratings and settings for distribution system.

	形名	長限時 ピックアップ	短限時 ピックアップ	瞬時引きはずし	地絡引きはずし
A	CL 200 A	高圧根流ヒューズ(取換用)	—	—	—
B	SCB-2000	1,600 A	5,000 A	20,000 A	0.3 s
C	SCB-1200	800 A	4,000 A	11,000 A	0.1 s
D	NF-100 E	モールドケースしゃ断器 (100 A 用)	2,000 A	—	—

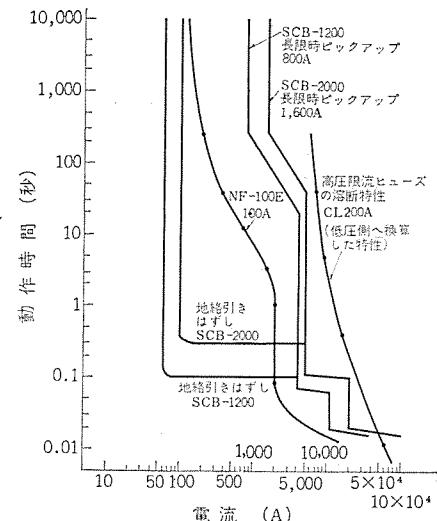


図 5.2 選択性をもった配電系統の動作特性の協調  
Selective tripping coordination of distribution system

## 6. む す び

SCB は従来の NFB と同様な簡易な取扱いで、従来の NFB のつぎのような欠点に解決を与えたものである。

- (1) 従来の NFB は、長限時保護特性は工場でのみ設定されるので、工事ごとに発注しなければならず、負荷の増大やレイアウト変更に対処できない。
  - (2) 従来 NFB は、長限時引きはずし特性が長くて高圧側保護機器との協調がとりにくく。
  - (3) 一般の NFB には短限時引きはずし装置をつけられるもののが少ないので、選択しゃ断方式の主回路用としては用いがたい。
  - (4) 大容量の NFB には短限時引きはずし装置がつけられるものもあるが、時間が一定であるので多段の選択しゃ断方式には用いられない。
  - (5) 従来の NFB には地絡保護要素がないので、アーカ地絡などで事故電流が小さいとしゃ断しない。
  - (6) 引きはずし特性の確認に大電流を流さなければできないので、リーチェックがフィールドでできない。
- このように SCB は従来の NFB ではできなかつ多くのことを可能にした画期的なモールドケースの系統しゃ断装置である。

## AB 形 低圧気中しや断器

江 口 清 司\*

## Type AB Low Voltage Air Circuit Breakers

Fukuyama Works Kiyoshi EGUCHI

Overload protection of marine generators have been conventionally attained by means of frequency relays or hydraulic or pneumatic over current relays in cooperated with air circuit breakers. Recently, the merits of molded case circuit breakers such as compactness, less expensive structure, safety for body due to insulated live parts and easy maintenance are highly appreciated by marine power boat builders. Type AB air circuit breaker announced by Mitsubishi is a type of molded case circuit breaker modified for application to marine generator protection, equipped with hydraulic long time delay tripping, the pick up current of which is adjustable between 80%~160% of nominal rating. Frame sizes of type AB breakers are 200, 400, 600, and 800 ampere frame and the latter two frames are also available with short time delay tripping devices which enable the breakers to be applied to selective tripping system. Thus type AB breakers afford more easy supply protective design for generator capacity up to 500 kW.

## 1. まえがき

低圧回路の保護機器として、気中しや断器に要求される性能は多岐多様で、特に船舶用にあっては、大形タンカーから漁船まで、その発電機容量も広範囲にわたる。従来から、これらの発電機保護用しや断器として、低圧気中しや断器が使用されてきたが、中小容量の発電設備にあっては、小形で経済的であり取扱いがより簡単な発電機保護用しや断器が望まれていた。

これにこたえるため、永年のノーヒュースしや断器（以下NFBといふ。）の研究実績を応用して、新しいタイプの低圧気中しや断器を開発したので紹介する。

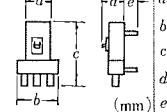
## 2. 定 格

表2.1にAB形気中しや断器のおもな定格事項を、図2.1にAB400形、図2.2にAB600形のそれぞれ外観写真を示す。

## 2.1 定格しや断容量

交流600V以下の回路に適用する低圧気中しや断器の定格しや断電流は、NK<sup>(1)</sup>、JEC<sup>(2)</sup>、NEMA<sup>(3)</sup>の各規格とも、短絡発生後1/2サイクルにおける対称分実効値としており、AB形しや断器もこの表示法によっている。ただし、実際に機器および電路の保護を考察す

表2.1 定格事項 Ratings.

形 名	AB400	AB600	AB800
フレーム	400A	600A	800A
極 效	3板および2板（3板しや断器の中央板を取りはずしたもの）		
定格電圧	AC500V		
定格電流	100A~400A	400A~600A	600A~800A
定格しや断電流 (対称値)	20kA	30kA（瞬時引きはずし装置付き） 20kA（短限時引きはずし装置付き）	
過電流引きはずし 装置	長限時引きはずし + 瞬時引きはずし	長限時引きはずし + 瞬時引きはずしまたは短限時引きはずし	
	a: 210 b: 250 c: 445 d: 144 e: 73	a: 210 b: 282 c: 580 d: 171 e: 80	
製品重量 kg	16	23	25
NK認定番号	NKE-4583	NKE-4586	NKE-4591

る場合には、同時に、最大相の非対称せん（尖）頭値についても考慮しなければならない。また、動作責務は、O-1分-CO-3分-COである。

直列過電流引きはずし装置を有するAB形しや断器においては、

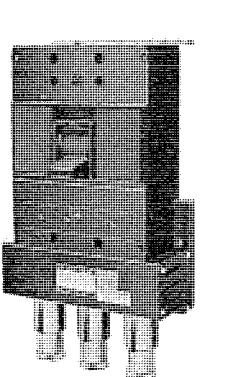


図2.1 AB 400形しや断器  
Type AB 400 air circuit breaker

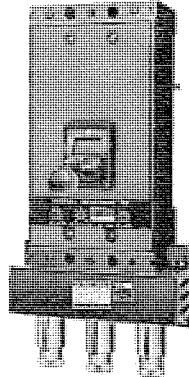


図2.2 AB 600形しや断器  
Type AB 600 air circuit breaker

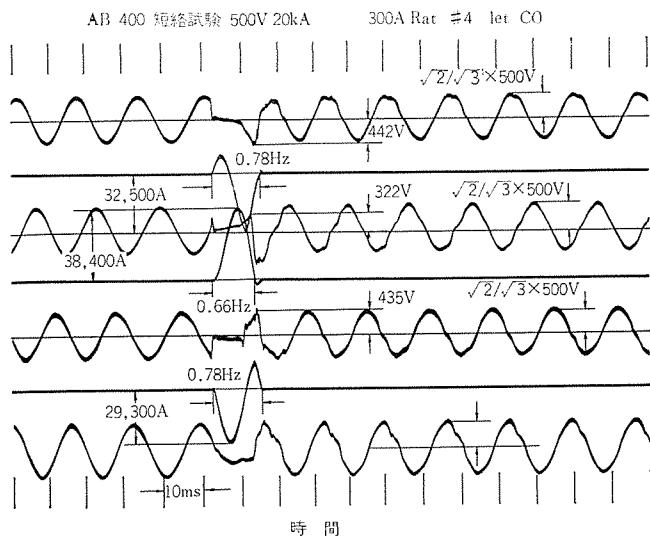


図2.3 AB 400 しや断試験 オシログラム  
Oscillogram.

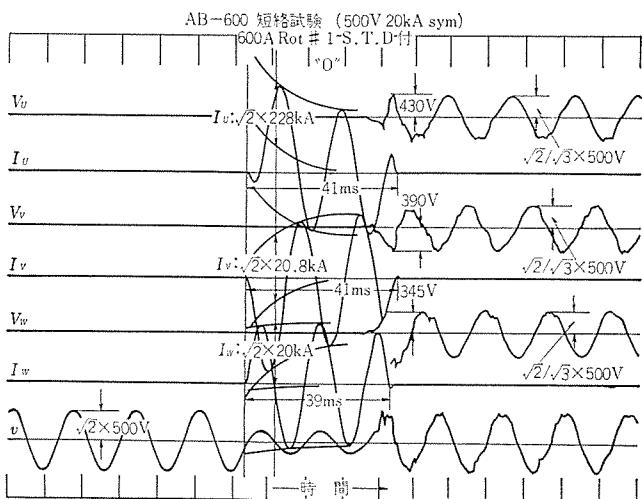


図 2.4 AB 600 しゃ断試験 オシログラム  
Oscillogram

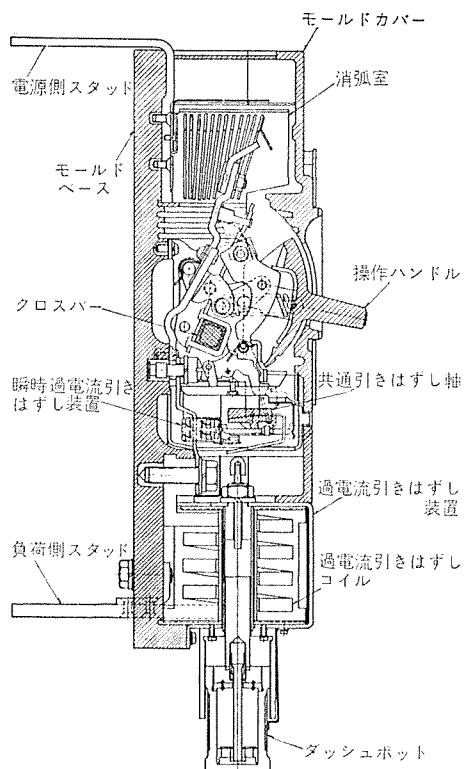


図 2.5 AB 400 形 断面構造図  
Cross-sectional view of type AB 400 circuit breaker.

短時間過電流強度は、定格しゃ断容量に等しい電流値で、その時間は、引きはずし装置により定まる最長時間を考えればよい。図 2.3 に AB 400 形の定格しゃ断試験におけるオシログラムの一例を示す。従来の気中しゃ断器に比較して、しゃ断時間が短く、機器および電路を余裕をもって保護することができる。図 2.4 には、AB 600 形の短限時しゃ断のオシログラムの一例を示す。

## 2.2 引きはずし特性

図 2.5 に、AB 400 形の断面構造図を、図 2.6 に、AB 400 形の引きはずし特性曲線の一例を示す。

長限時引きはずし装置は、各極に、シリコンオイルによるオイルダッシュボットを装備し、安定した信頼性のある特性を得ている。ピックアップ電流目盛は、しゃ断器定格電流の 80 % から 160 % まで刻印可能で、引きはずし時間は、設定値の 120 % 電流を通電して 20 秒でトリップ

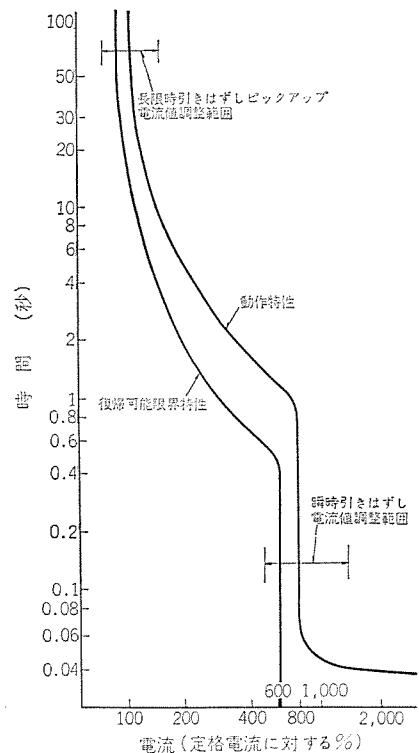


図 2.6 動作特性曲線の一例  
Typical time current characteristic curves.

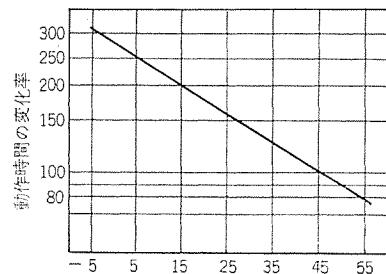


図 2.7 温度補正曲線  
Ambient temperature compensating curve.

するのが標準である。この時間は、鉄心吸引力、ダッシュボットの形状およびオイル粘度により定まる。シリコンオイルの温度による粘度の変化は、他のオイルに比較すれば、その変化率は小さいが、長限時引きはずし時間に影響を与える。AB 形しゃ断器の基準周囲温度は、45°C であり、使用される場所の周囲温度が 45°C と大幅に異なる場合には、温度補正曲線により引きはずし時間を補正しなくてはならない。図 2.7 にその補正曲線を示す。

長限時引きはずし特性の復帰可能時間は、ピックアップ電流値の 80 % に過電流が減衰したときに、引きはずし装置がトリップに至らないで、復帰しうる過電流時間の最大値であり、図 2.6 にはこの 80 % 復帰可能限界曲線を示す。この復帰可能限界曲線は、下位のしゃ断器との協調を考慮するうえで、できるだけ動作曲線に接近していることが好ましい。

瞬時引きはずし装置は、各極に独立した電磁石により、共通引きはずし軸を回転させ瞬時にしゃ断器を動作させる。瞬時引きはずし電流値は、そのしゃ断器を発電機保護用しゃ断器として使用し、その持続短絡電流値以下に設定するときには、しゃ断器定格電流の数倍となり、電動機負荷への給電しゃ断器として使用する場合には、しゃ断器定格電流の十数倍が必要である。AB 形しゃ断器の瞬時引きはずし電流値は、AB 400 形にあっては、定格電流の 500 % から

表 3.1 発電機容量と AB 形しや断器の選定 Selection of type AB circuit breaker.

発電機容量		定格電圧 450 V			定格電圧 225 V		
		定格電流 A	AB 形気中しや断器		定格電流 A	AB 形気中しや断器	
kVA	kW		形名(コイル定格 A)	長限時ピックアップ電流値 A		形名(コイル定格 A)	長限時ピックアップ電流値 A
50	40	64	—	—	128	AB 400 (175)	147
62.5	50	80	—	—	160	AB 400 (175)	187
94	75	120	AB 400 (125)	138	241	AB 400 (250)	277
125	100	160	AB 400 (175)	184	321	AB 400 (350)	369
156	125	200	AB 400 (250)	230	401	AB 600 (600)	461
187.5	150	241	AB 400 (250)	277	481	AB 600 (600)	553
219	175	281	AB 400 (350)	323	561	AB 600 (600)	645
250	200	321	AB 400 (350)	369	642	AB 800 (800)	738
281	225	361	AB 400 (400)	415	722	AB 800 (800)	830
312.5	250	401	AB 600 (500)	461	802	—	—
344	275	441	AB 600 (500)	507	882	—	—
375	300	481	AB 600 (500)	553	962	—	—
406	325	521	AB 600 (600)	599	1042	—	—
437.5	350	561	AB 600 (600)	645	1122	—	—
469	375	601	AB 800 (800)	691	1202	—	—
500	400	642	AB 800 (800)	738	1284	—	—
531	425	682	AB 800 (800)	784	1364	—	—
562.5	450	722	AB 800 (800)	830	1444	—	—
594	475	762	AB 800 (800)	876	1524	—	—

注) (1) 発電機力率は 0.8<sup>~</sup>とする

(2) 長限時ピックアップ整定値=発電機定格電流×1.15とした値を示す。

1,400 %, AB 600 形および AB 800 形にあっては、400 %から 1,000 %まで簡単に調整でき、これらの用途に対応できる。

AB 600 形および AB 800 形に装備できる短限時引きはずし装置は、瞬時引きはずし装置の可動鉄心を、歯車とアンクルとにより制動し確実な動作を得ている。引きはずし時間は、固定式で調整することはできないが、図 2.4 に示すように、約 40 ms である。一般的な気中しや断器の短限時時間に比較すれば、この時間は短いが、NFB とは完全な選択しや断が可能である。

### 3. 適用

最近の船舶における電源設備は、特別なものを除き、交流であり、発電機は、電動機の始動電流などによる瞬時電圧降下が小さく、その応答性がすぐれていること、および保守点検が不要なことなどが要求され、そのほとんどが自励式またはブラシレス方式である。電圧は 445 V, 60 Hz がほとんどで、小容量のものについては、225 V も使用される。発電機容量は、単機容量数十 kW から 1,000 kW を越えるものまで、広範囲にわたる。このような交流発電機の過電流強度は、NK, IEC<sup>(4)</sup>とも、電圧および周波数をできるだけ定格に近く保ち、50 % の過電流で 2 分間耐えうることを要求している。

このような発電機の保護しや断器として、従来から低圧気中しや断器が使用されてきた。しかし従来の ACB は重責務には耐えうるがはん用性に乏しいため、NK 規格でも 50 kW 未満の並列運転を行なわない発電機の保護に NFB の使用を認めていた。しかるに船舶の建造数が増加して中形船舶まで標準化されるようになると、50 kW を越えるものにも簡易な ACB の要求が高まり、小形軽量な NFB を母体とした AB 形気中しや断器が開発された。表 3.1 は発電機容量と対応する AB 形気中しや断器の選定の例を示す。

### 4. 特長

AB 形しや断器の特長を列記すると下記のとおりである。

(1) 端子以外の充電部は、安全に絶縁物のモールドケースにおおわれておれ、各相の導体部分もこのモールドケースで隔離されているので、従来の気中しや断器に比較して小形であり、またしや断時のアーキもモールドケース内の消弧室内で消弧され、イオン化したガスの噴出がなく、アーカススペースが少なくてすみ、経済的な盤設計が可能である。

(2) 操作は絶縁物ハンドルの簡単な操作により開閉でき、取扱いに特別な注意を要せず安全である。

(3) 短限時引きはずし装置が装備でき、NFB との選択しや断が可能であり、給電の連続性・信頼性がより向上できる。

(4) 電動機による遠隔操作が可能であり、また不足電圧引きはずし装置、電圧引きはずし装置および補助スイッチが、外形寸法を変えることなく内蔵でき、各種の自動制御・遠隔制御が適用できる。

(5) 消耗した接点は、予備部品と容易に取換えが可能である。

### 5. むすび

以上、AB 形しや断器について、その概要を紹介したが、最近の船舶における機関の無人化に見られるように、電源設備における自動同期投入、自動負荷分担、非重要負荷の自動的分離など、各種の自動制御・遠隔制御が広く用いられてきている<sup>(5)</sup>。したがって、AB 形しや断器も、これらに対応するための機能をさらに充実させるつもりである。また、小容量発電機用として、フレームサイズの小さい AB 200 形の開発を検討している。

### 参考文献

- 日本海事協会、鋼船規則電気設備編（昭45）
- 電気学会、気中しや断器、電気規格調査会標準規格 JEC-190（昭39）
- NEMA SG 3, Low voltage power circuit breaker (1965)
- IEC, publication No. 92 (1964)
- 日本海事協会、船舶の自動制御・遠隔制御に関する指針

# 高速高感度形漏電しゃ断器の実用上の 2, 3 の問題点

松浦 清\*・山本 清美\*・中山 豊\*

## A Few Discussions on Application of High-Speed and High-Sensitivity Earth-Leakage Circuit Breakers

Fukuyama Works

Kiyoshi MATSUURA・Kiyomi YAMAMOTO・Yutaka NAKAYAMA

High-speed and high-sensitivity earth-leakage circuit breakers of current operated type have come in the limelight as an ace of electric shock preventing devices. From the viewpoint of the protection of lives, high reliability is a requisite of the device unparalleled by anything.

On the other hand a physiological phenomenon of humanbeing for electricity demands high sensibility to the extent of 30 mA with the rated sensibility current of the earth-leakage circuit breaker.

Problems apt to encounter when the circuit breakers referred to are operated in the field in practice are made clear and discussed.

### 1. まえがき

低圧電路の地絡保護の方法として、従来は過電流しゃ断方式が採用され、一方漏電による感電事故防止には特定な場合を除き保護接地方式が一般的な方法として実施されていた。しかしながら現実には感電災害の件数は減少せず、ここ数年間の死傷者数は毎年 1,500 人<sup>(1)</sup>近い数字を示している。このような実情にかんがみて、より確実で信頼性のある感電災害防止機器として漏電しゃ断器の開発が急務であった。このような情勢のもとで昭和 43 年 6 月に電気設備の技術基準、昭和 44 年 1 月に労働安全衛生規則の一部改正があり、特定の個所における漏電しゃ断器の使用が規定され、需要が急速に増大した。当社はこの用途に適する NV 形漏電しゃ断器を開発し、各方面で多数採用いただいている。

ここではこの NV 形漏電しゃ断器の概要と、高感度であるために発生する実用上の問題点を検討したので報告する。

### 2. 感電災害の防止

感電事故防止対策として次の方法があげられる。

#### (1) 低電圧回路とする方法

導電性の液体で湿潤している場所や可搬形電動工具を使用する場所の電気設備の回路電圧を 50 V～25 V 以下とすることによって、充電部へ接触した際にも人体へ流れる電流を小さくし、感電の危険から守る方法である。

#### (2) 保護接地方式

電気機器のフレームを大地に接地することにより漏電が発生し、地絡電流が流れても機器への接触電圧を一定値以下に抑え、感電事故の危険から守るという方法で古くから行なわれている。しかしながらこの方法は、変圧器の二次側の第 2 種接地抵抗値と機器フレームの第 3 種接地抵抗値の関係により接触電圧が変化するので、保護接地抵抗値（第 3 種接地抵抗値）の安全限界が不明確である。一方接地抵抗は一般にはあまり小さく施設することは困難である。このようない点から感電事故防止対策としては完全であるとは言いがたい。

#### (3) 過電流しゃ断方式

接地専用線や金属体を利用し、機器のフレームをこれらに接続し、地絡を生じたときには短絡回路を形成させ、ノーヒューズしゃ断器など

を瞬時に動作させて回路を開放する方法である。この場合接地専用線や金属体のインピーダンスが大きくならないように注意しなければならない。

#### (4) 非接地方式

電路に地絡を生じることによって発生する危険を防ぐために、変圧器の二次側を接地しない方式である。この場合には、一線に人間が触れても電流が人体を通して流れることはないので安全であると考えられる。しかし実際には電路と大地間に静電容量があり、この静電容量を介して若干の電流が流れるので使用電圧は高くないことが望ましい。また変圧器等の機器の絶縁については経年的にも完全でなければならない。

#### (5) 漏電しゃ断方式

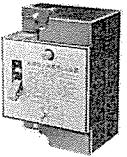
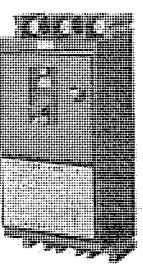
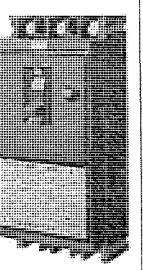
電気機器への漏電が起こりフレームに施した第 3 種接地を通じて地絡電流が流れたとき、この地絡電流を検知し、あるいは機器フレームの対地電圧を検出して回路を瞬時にしゃ断する方式である。この場合、高速高感度形（定格感度電流 30 mA 以下、動作時間 0.1 秒以内）の電流動作形の漏電しゃ断器を使用した場合には、保護接地を省略することも考えられるが、原則として保護接地方式と併用しなければならない。検出方法により電圧動作形と電流動作形のものがあるが、電圧動作形に比べ電流動作形のものが多数の利点を有しております、わが国では電流動作形が主流を占めている。

以上の各方式についてはメリット、デメリットがあるが、電流動作形の漏電しゃ断器を使用する方式が保護範囲が最も広く、感電事故防止の効果が大きい。高速高感度形のものにおいては、機器の接地抵抗線が断線していたような場合においても、致命的な感電事故からはほとんど保護することができ、また保護接地抵抗値も漏電しゃ断器の定格感度電流に応じて、緩和することができるなど多大な利点があげられる。

### 3. 種類・定格

NV 形漏電しゃ断器は電流動作形で、定格感度電流 30 mA、動作時間 50 ms 以内の高速高感度形で種類と定格は表 3.1 のとおりである。

表 3.1 NV 形漏電しゃ断器一覧表  
Specification of type NV earth-leakage circuit breakers.

形名	NV-1	NV-3	NV-5
外観			
フレームの大きさ	30	30	50
相線式	単相2線式	三相3線式	三相3線式
極数	2	3	3
定格電圧 V	AC 110	AC 220 AC 460	AC 220
定格電流 A	5, 10, 15, 20, 30	5, 10, 15, 20, 30	5, 10, 15, 20, 30
定格感度電流 mA	30	30	30
定格不動作電流 mA	15	15	15
動作時間 ms	30 以内	30 以内	50 以内
漏電検出方式	電流動作形	電流動作形	電流動作形
定格しゃ断容量	AC 110V 1,500	—	—
	AC 220V —	2,500	2,500
	AC 460V —	2,500	—

#### 4. 構造

NV 形漏電しゃ断器は次の部分から構成されている。すなわち、1) モールドケース、2) 端子、3) 開閉機構、4) 過電流リレー、5) 消弧装置、6) 零相変流器、7) 高感度リレー、8) テスト装置で、このうち 1)～5) はノーヒューズしゃ断器の構造を応用しており、したがって過電流および短絡保護機能も兼ね備えている。(図 4.1 および 図 4.2)。この兼用形では、数十ミリアンペアの微少電流に感応する高感度リレーが、数千アンペアの大電流をしゃ断する際に悪影響を受けない堅牢さが必要であるが、NV 形はこの点十分安定に作られており信頼性が高い。

高感度リレーには、電磁装置のみを用いる純電磁式と微少電流を増幅した後、機械力に変換する半導体式がある。純電磁式のものは、正常時には釣放ばねによる釣放力に永久磁石の吸引力が打勝って、可動片を吸引状態に保ち磁気回路は閉じている。漏電が発生し零相電流が流れると、零相変流器の二次巻線に誘起される電流による磁束が永久磁石の磁束と重畠して、1 サイクル以内に釣放ばねの力と永久磁石による吸引力とのバランスが逆転し、可動片は継鉄から離れ、開閉機構のメカニズムの遅れ時間が加わって回路を開放する(図 4.3)。

半導体式は零相変流器の二次出力をサイリスタのゲート回路の信号として与え、トリップコイルを作動させてしゃ断する方式である。

制御電源は変圧器を使用せず、三相の各相よりもってあり、そのうちの一相が欠相して单相になってしまふ漏電しゃ断器の動作には支障のない設計になっている(図 4.4)。また電源からのサージ電圧やノイズ等の影響により誤動作のないように対策している。動作時間は、零相変流器からの信号がサイリスタのゲートへ達するまでの時定数を種々の条件のもとに検討し、50 ms 以内になるような値に定めてある。

上記の両方式にはおのおの次のような特長がある。

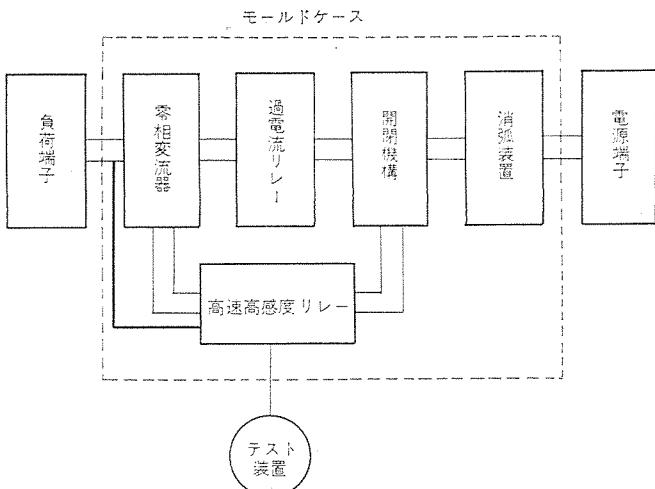


図 4.1 漏電しゃ断器の構成  
Diagram of current operated earth-leakage circuit breaker.

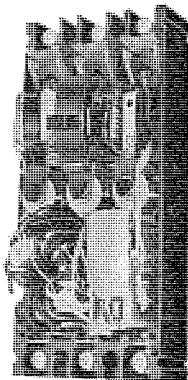


図 4.2 NV-3 形漏電しゃ断器内部  
Interior photograph of type NV-3 earth-leakage circuit breaker.

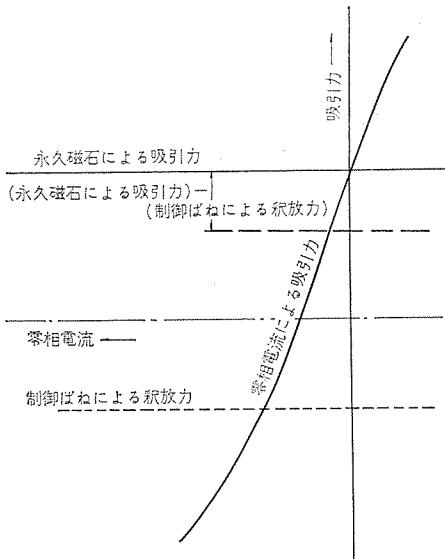


図 4.3 純電磁式の動作原理  
Operating principle of earth-leakage circuit breaker with release type magnet.

##### (1) 純電磁式

(a) 制御電源を必要としないので、欠相時(三相回路における 1 相および 2 相、单相回路における 1 線断線)でも漏電動作には異常なく、確実に動作する。

(b) 電源回路の電圧変動の影響、サージやノイズによる誤動作が

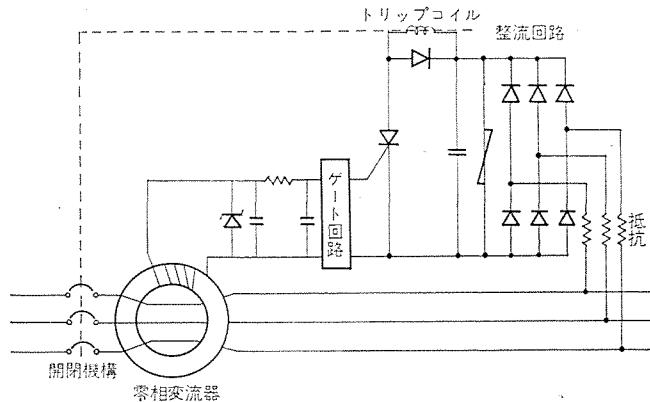


図 4.4 半導体式漏電しゃ断器の構成  
Internal connection of solid state type earth-leakage circuit breaker.

ほとんどない。

#### (2) 半導体式

- (a) 定格電流の大きい高感度漏電しゃ断器の製作が容易
- (b) 高感度のものの製作が容易

### 5. 特性・性能と問題点

電流動作形の漏電しゃ断器の特性は、零相変流器の特性と高感度リレーの特性の組み合わされたものになる。漏電しゃ断器の特性としては、一般に温度特性（周囲温度に対する特性変化）、周波数特性、電圧特性、経年的感度変動、過渡特性（負荷電流開閉時の誤動作など）動作時間が問題となるが、ここでは主として実用面に関連の深い過渡特性、ならびに漏電しゃ断器の機能で信頼度が要求される諸点について述べる。

#### 5.1 過渡特性

漏電しゃ断器の負荷回路に通常発生して影響する過渡電流、または電圧としては、1) 白熱電球の点燈時の越流、2) 変圧器の突入電流、3) 電動機の起動停止時の過渡電流および電圧、4) 対地容量による充電電流、5) 負荷電流開閉時のサージ電圧などのノイズなどがあげられる。

#### (1) 白熱電球および変圧器の越流、突入電流

越流は定格電流の10~20倍の高調波成分の多い電流であって、零相変流器の二次巻線にパルス状の電圧を誘起する。この現象は次のように考えられる。すなわち零相変流器の一次巻線は残留電流が小さくなるように配置されているが、高調波に対してはアンバランスが生じやすい。一方零相変流器の鉄心には通常残留磁束があるので越流の位相によっては、上記アンバランスが鉄心を残留磁束と逆方向に励磁して、急速な磁束変化を生じ二次巻線に高いパルス電圧を誘起する。白熱電球の越流と変圧器の突入電流を図5.1および図5.2に示す。

#### (2) 対地容量による充電電流

分歧回路では電線やケーブル等が $0.3\mu F$ 程度の対地容量をもつ場合がある。このような回路では、200Vの定常状態で約10mAの零相電流が流れる。また比較的短い普通の電路においても $0.01\mu F$ 程度の対地容量を有していることが多い。定常状態においては各相の対地容量はほぼバランスしているが、回路を開閉するときの電圧位相のずれ、接点のチャタリング等により過渡的な異常過電圧や電流が発生することが多く、このときのパルス幅は小さく、対地容量を通して瞬時に地絡電流が流れ、零相変流器の平衡がくずれやすい。

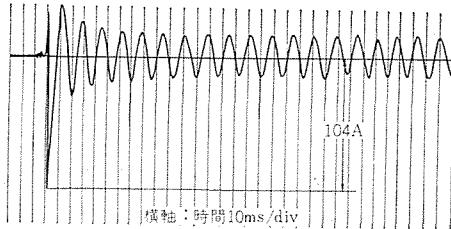


図 5.1 白熱電球の越流の例 (100 W×10)  
Example of overflow current of tungsten-filament lamp.

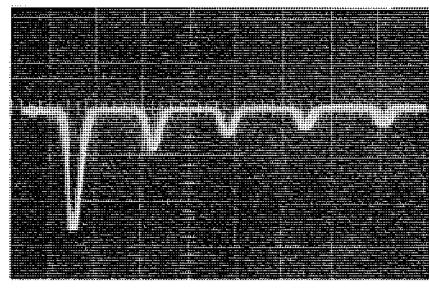


図 5.2 變圧器の突入電流の例  
Example of rush current of transformer.

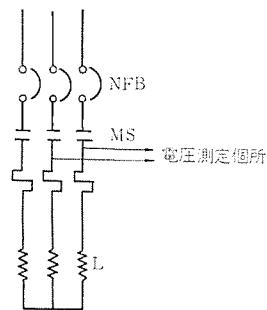


図 5.3 サージ電圧測定回路  
Test circuit of surge voltage.

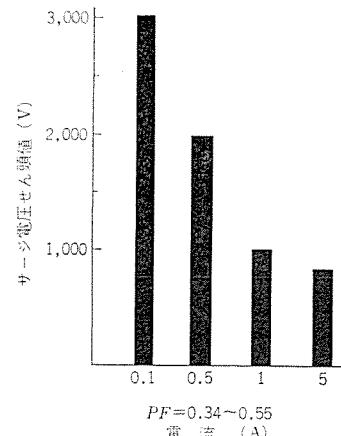


図 5.4 しゃ断電流と開閉サージ電圧との関係  
Relation of switching surge voltage with load current.

#### (3) 開閉サージ電圧

漏電しゃ断器の負荷は多種多様にわたっているので、サージ電圧やノイズの侵入する確率がきわめて高い。特に誘導性の負荷を開閉すると、 $e=L\frac{di}{dt}$ なるサージ電圧が誘起し漏電検出回路に悪影響を与える結果となる。発生サージ電圧の大きさは回路の電圧、電流、インダクタンス、投入位相、ならびにしゃ断機構により大きく異なる。図5.3の回路で測定した場合の発生サージ電圧は、図5.4のごとく分布した。このときラウン管オシログラムで撮影した電圧波形の1例を図5.5に示す。

## 5.2 過渡特性に対する検討

### (1) 越流とサージ電圧

半導体式のもののミストリップは、電源より侵入するサージ電圧がサイリスタ等のブレーカー電圧を越えて起る場合と、零相分が流れ零相変流器の二次側にパルス状の電圧が発生し、これによってミストリップする場合がある。前者に対しては交流側電源と整流器を抵抗、またはインダクタンスを介して接続することにより、電源側から侵入するサージ電圧を大幅に減衰することができ、きわめて大きな効果を示す。

通常のRCフィルタでは吸収できない程度の大きなサージ電圧に対しても有効で、サイリスタのブレーカー電圧のみでなくダイオードの過電圧保護にも有効であり、電源回路の信頼性を高めることができる。この抵抗（またはインダクタンス）は各相にそう入するのがよく、その値は大きいほどエネルギー分担率は大きくなるが、トリップコイルの消費電力との関係から制限を受ける。この点純電磁式のものは制御電源を必要としないのでこのような問題はない。

越流により零相変流器の平衡がくずれ、二次巻線に誘起される電圧または電流は零相変流器の二次負担の大きさにより大きく変化するが、二次負担はあまり自由度のない場合が多く、したがって誘起エネルギーの吸収をはからなくてはならない。サージ電圧を吸収する方法としてはRCフィルタ、ゼナダイオード、バリスタ等を使用するのがよいが、いずれも単独では決定的な効果は認められず、それらを併用することにより性能の安定が得られた。

また漏電しゃ断器はきわめて高感度なので、二次負担の変化がそのまま感度電流の変化に影響するので、コンデンサ等経時的に変化を生ずるものは極力容量を小さくして使用している。NV形はいずれも対地容量  $0.03 \mu F$  を有する回路に使用しても誤動作しない性能を

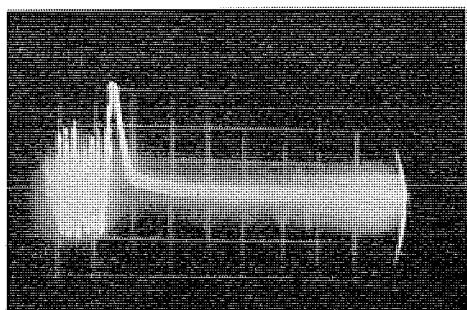


図 5.5 サージ電圧波形の一例  
Example of surge voltage wave.

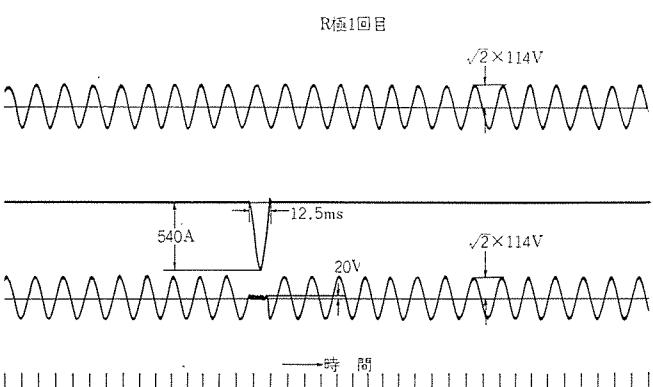


図 5.6 NV-3 地絡しゃ断試験のオシログラム  
Oscillogram of earth fault current test on NV-3.

有している。衝撃波電圧に対しては通常の開閉サージよりエネルギーが大きいので、電源側にそう入した抵抗と、さらに整流回路直後にバリスタ等の素子を用いて、5kV以上の衝撃波電圧に耐える性能を有する。

### (2) 残留電流の影響

電動機の起動時などには、全負荷電流の5~6倍の起動電流が流れるので、この領域での零相変流器の平衡特性が重要な要因となる。

平衡特性は各相から鉄心に供給する励磁電流のベクトル和によって定まるが、これらを計算によって求めることは困難である。なぜならば、励磁インピーダンスは計算では求めがたい要因、すなわち一次導体の位置、形状、二次巻線の配置、巻数や巻線方法、鉄心材料の均一性、二次負担および負担功率、一次導体を流れる電流の大きさ等により影響を受けるからである。

NV形は鉄心材料として79%Niの高級パーマロイを使用し、鉄心材料の均一性をはかるとともに一次導体は各相を密着させて分布巻きとし、二次巻線は鉄心全体にバランスさせて巻回し、残留電流の影

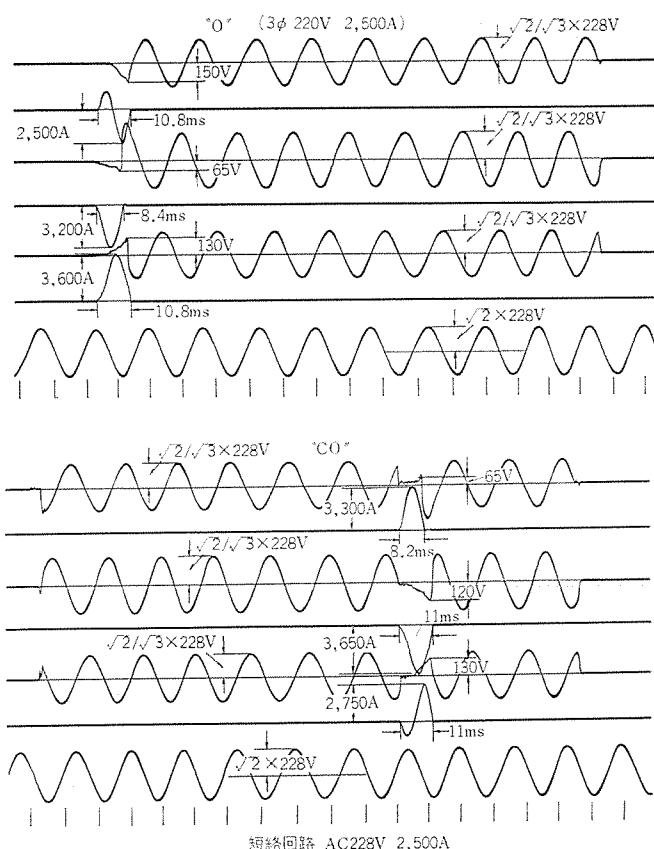


図 5.7 NV-3 短絡試験のオシログラム  
Oscillogram of short-circuit test on NV-3.

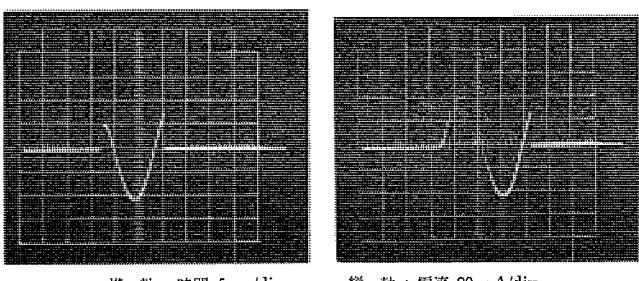


図 5.8 地絡電流 30 mA のときの動作時間  
Operating time when earth-leakage current 30 mA flows.

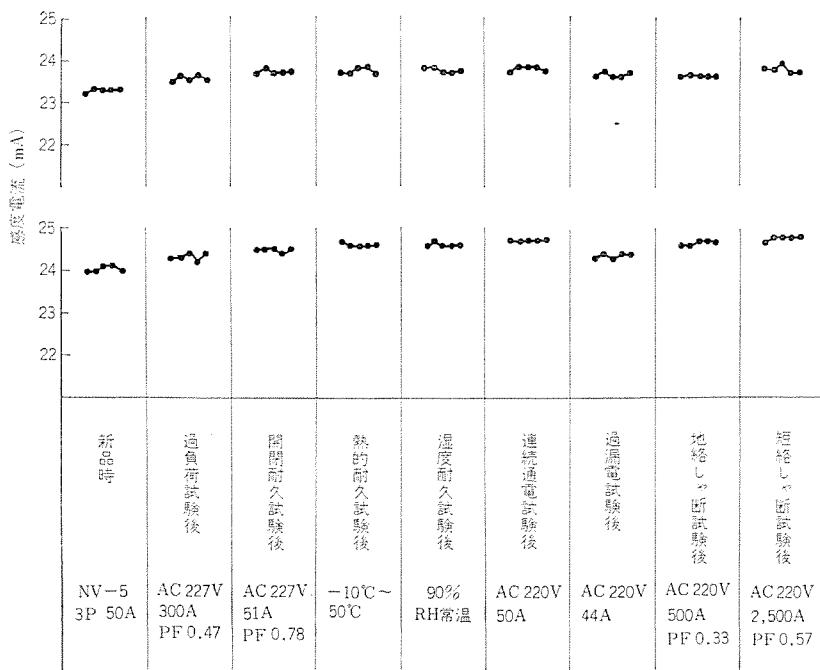


図 5.9 NV-5 形漏電しゃ断器の感度電流の変化

Change of sensitive current during test on NV-5.

響を軽減しているので電動機起動時等に誤動作することはない。

### 5.3 地絡・短絡試験

地絡時や短絡時のとき大きな不平衡電流が流れ、零相変流器の二次側に大きいパワーのあらわれるときには、純電磁式のものについては二次負担であるリレー巻線がこれに十分耐えるような設計としてある。半導体式のものについては、エネルギーの吸収のために零相変流器二次側において、過電圧吸収素子とRCフィルタ等によりこのエネルギーを吸収し、サイリスタ等へ過大な電圧が加わるのを防止している。

また地絡や短絡時には高感度リレーの信頼性と同様にしゃ断機構の信頼性が重要で、万一接点の溶着などを起こし回路が開放できない場合には重大事故にもつながるおそれがある。このような観点からNV形では高速しゃ断機構を取り入れ、接点材料も耐溶着性の高いものを使用して、しゃ断性能の向上をはかっている。図5.6は地絡電流しゃ断時のオシログラム、図5.7は三相短絡試験のオシログラムである。

### 5.4 動作時間

漏電しゃ断器の重要な機能の一つに、漏電発生時の動作時間（しゃ断時間）があげられる。電気が人体に及ぼす影響はケッペン氏（独）によれば人体を通過する電流・時間積の要因によるとしており、人間の心室細動の限界として  $50 \text{ mA} \cdot \text{s}^{(2)}$ （ただし1秒以内の領域）を提唱している。しかしドイツはじめ西欧では安全に対する裕度をとって  $30 \text{ mA} \cdot \text{s}$  を基準に保護対策が講じられ、すでに実績をもっているので、わが国においてもこの値が権威化されつつある。

かかる定格感度電流  $30 \text{ mA}$  のものであれば動作時間は1秒以内でよいことになるが、万一電圧線に直接人間が接触したときのことを考慮して検討すると、たとえば対地電圧  $300 \text{ V}$  の電路においては、 $300 \text{ V}/500 \Omega = 600 \text{ mA}$ （ここで人体抵抗は  $500 \Omega$  とした）の電流が人体を通して通れることになる。この場合の動作時間は  $30 \text{ mA} \cdot \text{s}/600 \text{ mA} = 50 \text{ ms}$  以内でなければならない。NV形漏電しゃ断器は、

この点も十分考慮して動作時間は 50 ms 以内の性能を持たせてある。

（図5.6、図5.8）

### 5.5 その他

信頼度の高い品質を保証するには、過酷な条件のもとに使用されても性能の低下のないことが必要である。周囲温度の変化、熱的耐久性（-10°C～50°C）や、湿度（RH 90%）に対する耐久性についても十分な確認を行ない、感度電流の変動の小さいものの製作が可能となった。図5.9に各試験後における一連の感度電流の変化を示す。

## 6. む す び

漏電しゃ断器は低圧回路の感電事故防止のエース的な存在となりつつあるが、その性能は画一的な特性を満足するだけでなく実際のフィールドで発生する問題を十分検討し、不必要的ミストリップを防ぐことが肝要である。NV形漏電しゃ断器はミストリップを生じやすい過渡特性に対し安定した性能を有しており、感電災害や漏電火災の防止のみでなく過負荷保護・短絡保護の機能も備えているので、これを設備することにより電気設備の信頼性・安全性が大幅に改善されるものと考える。最後に開発にあたってご尽力を賜わった関係各位に深謝する次第である。

## 参 考 文 献

- (1) 労働災害での感電死傷事故状況：電気と工事（昭45）
- (2) S. Koeppen, Wolfsburg, H. Tolazzi : ETZ-B, Bd 18, H 6 (1966)
- (3) J. A. Robbins : Electrical times 7 Sep. (1967)
- (4) Wilhelm Holzer : Siemens Review XXXV, No. 11, (1968)
- (5) 坪内：電試研究報告 644 号（昭45）
- (6) 市川：電気と工事（昭45）
- (7) Joachim Zöhnle Eriangen : ETZ-B, Bd 19, H 11 (1967)

==== 最近登録された当社の実用新案 =====

名 称	登録日	登録番号	発明者	関係場所
ハンガーバンド 取付金具	44- 9-29	884581	小川 昇・川合輝一	群馬製作所
ハンガーバンド 取付装置	44- 9-29	884582	小川 昇・川合輝一	群馬製作所
パイロットランプ 取付け装置	44- 9-29	884583	{市岡 洋・天野 勉 今井 一征	中津川製作所
電気 カミソリ	44- 9-29	884585	小川 昇	群馬製作所
電気 カミソリ	44- 9-29	884586	小川 昇	群馬製作所
水供給器	44- 9-29	884564	大畠晃一	和歌山製作所
シュー 形 ブレーキ	44- 9-29	884565	今堀信彦	名古屋製作所
刃形開閉器	44- 9-29	884569	立石俊夫	神戸製作所
遠隔計量装置	44- 9-29	884576	林 正之	福山製作所
渦巻 ポンプ	44- 9-29	884580	井上誠治	福岡製作所
取付装置	44- 9-29	884584	{太刀掛 譲・米崎 増雄 中島義信	長崎製作所
洗濯機	44- 9-29	884593	榎沢重介	日建(単)
保護装置を有する装置	44-10- 1	884827	横畠洋志	伊丹製作所
直流結合論理計数回路	44-10- 1	884828	茂木 充	北伊丹製作所
炉体傾動装置	44-10- 1	884829	田口 堅	伊丹製作所
無安定 マルチバイブレータ	44-10- 1	884833	壱井芳明・松原 要	中央研究所
温水器	44-10- 1	884834	岩崎善彦・飛田徹二	和歌山製作所
焼肉等の抜き取り具	44-10- 1	884830	鶴谷嘉正	群馬製作所
煮炊具	44-10- 1	884831	鶴谷嘉正	群馬製作所
電気鍋	44-10- 1	884832	鶴谷嘉正	群馬製作所
タイムスイッチ	44-10- 1	884835	神本明輝	群馬製作所
冷暖房装置の外筐	44-10- 1	884836	三浦 隆・大谷泰昭	静岡製作所
磁気録音機	44-10- 1	884837	高橋広光・大塚洋俟	商品研究所
警報付回路遮断装置	44-10- 8	885379	武田克巳・松尾昭二	福山製作所
浸漬形 ポンプ	44-10- 8	885380	小島敏男・奥田安男	名古屋製作所
音声同波呼出装置	44-10- 8	885381	前田良雄・平沢茂一	中央研究所
液面検出装置	44-10- 8	885382	吉山裕二・近藤博通	中央研究所
シェルボンド 型 ブラウン 管の樹脂充填装置	44-10-15	885548	上野昭一・小川 弘	京都製作所
放圧板	44-10-15	885549	高橋康英・小飼正二郎	伊丹製作所
空気清浄装置	44-10-17	887430	平塚 篤・片桐幸彦	商品研究所
空気スイッチ 等の シリンダ 用 ピストン 装置	44-10-17	887431	杉田 潔・野間良員	伊丹製作所
立形回転電機	44-10-25	888091	奥 勝・藤山辰之	長崎製作所
誘導電動機の スリッピング 短絡装置	44-10-25	888095	八木敏之・山川文雄	長崎製作所
フライホールマグネット の ボス	44-10-25	888098	森本 晃	姫路製作所
自動制御装置	44-10-25	888100	佐野善之助	伊丹製作所
回転電機の集電環短絡装置	44-10-25	888101	大庭純治・吉川俊幸	長崎製作所
負イオン 発生装置	44-11-25	888092	杉本 賢	商品研究所
熱電子素子装置の接続端子	44-11-25	888093	大場健司・笠置 紘	商品研究所
自動開閉扉	44-11-25	888094	高橋広光・浜野 修	商品研究所
イオン 発生器	44-11-25	888096	長瀬卯三郎	中津川製作所
負イオン 発生装置	44-11-25	888097	杉本 賢・馬込一男	商品研究所
圧力媒体の制御装置	44-11-25	888099	若杉 登	鎌倉製作所
送風機	44-11-26	888103	上野敏雄・品川博昭	長崎製作所
送風機	44-11-26	888104	上野敏雄・品川博昭	長崎製作所
負イオン 発生装置	44-11-26	888102	高橋広光・馬込一男	商品製作所
パット 清掃用具付電気黒板拭	44-11-26	888108	加藤 悟・飯塚 保	群馬製作所
メタルクラッド 開閉装置	44-11-26	888105	清水正巳	神戸製作所
連絡装置	44-11-26	888106	渡辺睦夫	神戸製作所
電子機器などの機筐	44-11-26	888107	江上 譲・野中大蔵	通信機製作所
発電機の模擬装置	44-11-26	888109	石橋賢悟	神戸製作所
分岐用端子	44-11-26	888110	中島義信	長崎製作所
機器の収納箱	44-11-26	888111	中島義信	長崎製作所
遠心式点火時期調整装置	44-11-26	888113	大西正義	姫路製作所
空間分割形全電子電話変換機通話路の スイッチ 回路	44-11-26	888114	前田良雄・石坂充弘	中央研究所



# 特許と新案

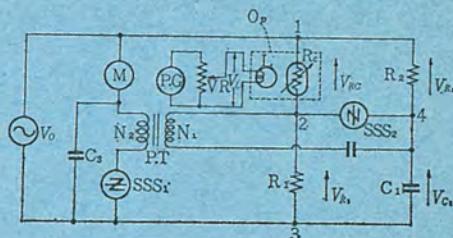
## 交流電動機の速度制御装置

発明者 小野健一・大田誠

この発明は、交流電動機を負荷や電源電圧の変動にかかわらず、任意の速度で定速回転させうるようにした交流電動機の速度制御装置に関するもので、図に示すように、被制御用電動機Mには、パルストラ ns PT の二次巻線 N<sub>2</sub> を介してバイスイッチ SSS<sub>1</sub> が接続され、上記パルストラ ns の一次巻線 N<sub>1</sub> に加えられる制御信号によって、バイスイッチ SSS<sub>1</sub> の点弧位相が制御され、電動機 M の速度が制御されるよう構成されているのであるが、特に、上記一次巻線に加えられる制御信号の抽出手段にくふうがなされている。すなわち、この一次巻線 N<sub>1</sub> には、四つのインピーダンス素子 R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub>, C<sub>1</sub> および R<sub>C</sub> からなるブリッジ形移相回路の出力端に接続された点弧素子 SSS<sub>2</sub> が接続されており、さらにインピーダンス素子の一つである R<sub>C</sub> は光導電セルからなり、この光導電セルは、上記電動機 M と機械的に連結された速度発電機 PG の出力電圧によって点灯されるランプ L に対向設置されている。なお、上記速度発電機の出力側には、ランプ L の発光量を可変できるような可変抵抗器 VR が接続されている。したがって、電

動機の出力は速度発電機、可変抵抗器、ランプと光導電セル R<sub>C</sub> とかなるオプカルリンク、およびバイスイッチよりなる帰還系を介して電動機の主回路へ帰還されることになり、しかもその帰還系の中に可変素子をそう入しているから、電動機の回転数を自在に、なめらかに変えることができ、可変素子をある値にセットしておけば、電動機はその起動トルクを低下させることなく、所定のトルクをもって定速度で回転することになる。

(特許 第 567367 号) (大島記)



## 磁気録音機

考案者 高橋広光・大塚洋俟

この考案は、増幅回路を録音用と再生用とに兼用させた磁気録音機において、録音・再生の回路切換に必要な接点数が少なくて済むよう改良したものである。

この考案の一実施例を示す図 1 により説明すると、この考案は、前置段増幅回路を録音専用 2 と再生専用 3, 4 と別々に設け、この録音専用増幅回路の入力側には録音信号入力端子 1 を接続し、上記各増幅回路および 4 の各出力側を録音再生共用主増幅回路 6, 7 に相互干渉防止用抵抗 8, 9 を介して接続し、上記各前置段増幅回路の各電源回路(図中、破線で示してある)を電源切換用接点 18 を介して電源端子 19 に接続し、録音再生磁気ヘッド 11 の出力端子 12 を上記再生専用増幅回路の入力側に、また入力端子 13 を主増幅回路の出力側にそれぞれ接続するとともに、これら両端子 12, 13 のいずれか一方を磁気ヘッド切換用接点 17 により選択的に接地するよう構成し、上記電源および磁気ヘッドの各切換用接点 18 および 17 を録音・再生の切換操作により切り換えるよう構成したものである。

なお図中、5 は再生特性補償回路、10 は録音専用終段増幅回路、14 は録音レベル表示用メータ回路、15 はバイアス発振回路、16 は再生

出力引出端子である。

以上のような構成によれば、録音・再生の回路切換に要する接点は、磁気ヘッド切換用 17 と電源切換用 18 のみで済み、接点数を少なくできるからコスト、スペースの面が改善され、さらに接点部分に集まる配線も少なくなるから、種々の配線が集中することによる騒音発生の問題もおこりにくくなるものである。また、増幅回路の前置段部分が録音専用と再生専用とに分れているから、録音・再生時の特性補償、利得の調整を独自に容易に行なえるものである。

なお、参考までに従来のものの構成を図 2 に示す。図中、20~23 は録音再生兼用増幅回路、24 および 25 は録音および再生特性補償用回路、26 は増幅回路の入力切換接点、27 は特性補償回路切換接点で、このような従来のものでは接点 26, 27 を余分に必要としていた。

(実用新案 第 884837 号) (伊藤記)

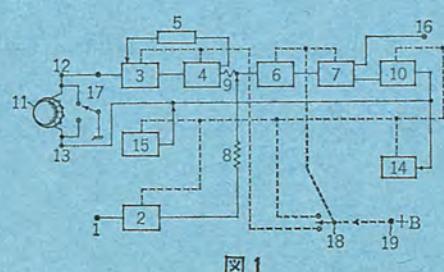


図 1

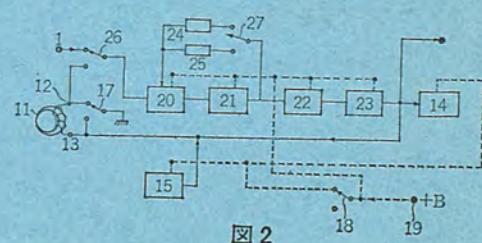


図 2

# 特許と新案

## 電気冷蔵庫

考案者 荒野 誠也・吉田 匡一

この考案は、冷蔵庫の霜取装置の改良に関するものである。

従来のものは、霜取り完了とほぼ同時に圧縮機が冷却運転を開始するように構成されていたが、一般に霜取完了直後は冷却器があたためられているので低圧側の圧力が高く、圧縮機の始動に害を及ぼすこととなり、このため圧縮機は霜取時をカバーするように冷却運転時の出力よりも大きな出力を必要とし、経済的でない面があった。

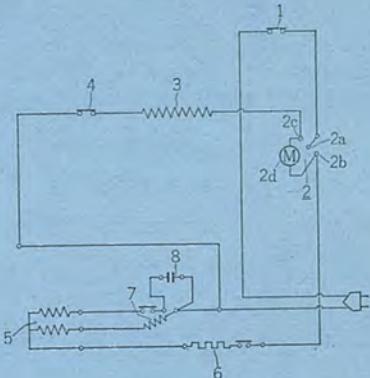
この考案はかかる欠点を除去するためになされたもので、図に示すように、除霜用ヒータ3と除霜終了用温度調節器4とに直列接続された固定接点2cと、圧縮機5に直列接続された固定接点2bと、両固定接点2b, 2c間に接続された時間設定用モータ2dと、庫内温度調節器1に直列接続されるとともに最大着霜量を溶かす時間をもって接点2cから接点2b反転する可動接点2aとよりなるタイムスイッチ2を備えたものにおいて、霜取時に接点2aを接点2cに接続して除霜ヒータ回路を形成するとともにモータ2dの運転回路を維持し、さらに霜取完了による温度調節器4の開放時に、所定の遅れ

時間をおいて接点2aを接点2cから2bへ反転させることにより圧縮機を始動させるようにしたものである。

したがってこの考案によれば、霜取完了後の圧縮機が作動するまでにある程度の時間が確保されるため、その間に低圧側の圧力を下げることができ、圧縮機の始動を楽にできるとともに、霜取完了直後にヒータへの通電が断たれるため、むだに冷却器をあたためることもない利点を有するものである。

(実用新案第908198号)

(足立記)



## 空気調和機の制御装置

考案者 大畑 晃一

この考案は、数台の圧縮機を用いて所要の冷房または暖房能力をうるようとした空気調和機の制御装置の改良に関するものである。

従来のこの種の制御装置は、図1のように構成されており、これについてまず説明すれば、いま第1の圧縮機2が異常を起こし、その保護開閉器13または15が開くと、開閉器線輪4aは消勢され、接点4は開き送風機1は運転を停止する。同時に接点4bも開くので開閉器線輪5a, 6aへの通電は断たれ、接点5, 6は開放し、第1, 第2の圧縮機2, 3も運転を停止する。このことは第2の圧縮機3または送風機1に異常が起きたときでも、それぞれの保護開閉器12, 14, 16が開放するので同じである。

このように従来の制御装置は、送風機が運転されないかぎり数台の圧縮機すべてが運転しないようになされているが、いずれか1台の圧縮機の故障によりその保護開閉器が作動すると、正常な圧縮機の運転をも停止させてしまう欠点があった。

この考案はかかる欠点を除去するために図2のように構成したもので、いまスイッチ10を閉じると開閉器線輪4aが作動し接点4を閉じるので送風機1は運転する。つぎにスイッチ18を閉じるとその補助スイッチ18aは開放されるが、線輪4aの作動で接点4dがすでに閉じておらず、またインピーダンスの大きい線輪23a, 24aには電流が流れず、接点23, 23b, 24, 24bはいずれも閉じているので新たに線輪5a, 6aが励磁され接点5, 6が閉じ、第1, 第2の圧縮機は運転する。この運転中において第1の圧縮機2が異常を起こし、その保護開閉器13または15が開くと、線輪5aへの電流は線輪23

aを通して流れるので微少電流となり、接点5が開くため異常を生じた圧縮機2は停止する。一方接点23, 23bは線輪23aの印加電圧によって開放され、この接点23の開放で保護開閉器が自動復帰しても圧縮機2は再始動されない。また接点23bの開放により線輪4aは接点24bを通して励磁され続ける。したがって残りの正常な機器は運転を続ける。この状態においてさらに第2の圧縮機3が異常を起こしたときは上述の場合と同様にその運転が停止され、かつこの際には単独運転しても無意味な送風機1の運転も接点24bの開放によって同時に停止される。また送風機1が先に異常を起こした場合には、その保護開閉器12が開くため線輪4aは消勢され接点4, 4bが開放し送風機1の運転を不能の状態にするとともに、圧縮機のむだな運転も起こらないようにしてある。

(実用新案第900687号) (足立記)

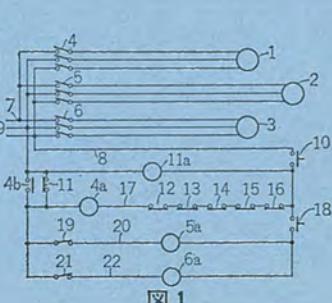


図1

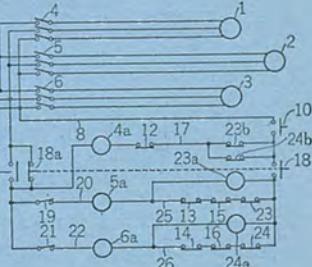


図2

# 特殊連系装置の方式開発

平山 尚\*

馬場 準一\*\*

山田 郁夫\*\*\*・木下 裕道\*\*\*

## Development and Analysis of System Interconnector

Tokyo Electric Power Co. Takashi HIRAYAMA

Mitsubishi Electric Corp., Central Research Laboratory Jun-ichi BABA

Mitsubishi Electric Corp., Head Office Ikuo YAMADA・Hiromichi KINOSHITA

Though operating the bulk electric power systems as a fully integrated one offers various scale merits, it involves the need of sufficient countermeasures to suppress short circuit capacity and prevent an extensive blackout caused by cascade trip, thus cancelling the features. To cope with it, a radical solution has been worked out that the system is split into several blocks of a moderate size and tied one another with an AC type system interconnector having a special function. The concept has been embodied by the development of a coupling transformer type system interconnector, a model of which has been built for trial and tested to prove its function. Also a system analysis has been made on a model system with a digital computer to look into effects working on the system.

### 1. まえがき

東京電力の電力系統は現在1,500万kWを越える規模であり、275kV外輪線を基幹として全系を並列運転している。このように巨大化した電力系統においては、供給予備力の節減、負荷と電源の不等性の利用、大容量発電ユニットの建設、経済運用などのスケールメリットが大きい。しかし、昭和60年ころには系統容量が約6,000万kWに達し、これが東京を環状にとりまく500kV外輪系に集中すると予想されている。このとき現在のような全系並列をつづけることは、

- (1) 短絡事故電流が過大となり、そのしゃ断が困難となること。
- (2) 短絡容量の増大とともに、通信線への電磁誘導障害対策がいっそう必要となること。
- (3) 系統規模の拡大とともに、事故波及による大停電事故が発生する可能性がますこと。

などの点から、安定供給を行なうことが困難になると考えられる。この対策として、

- (1) 750kVないし1,000kVの新設、超々高圧送電線による連系
- (2) 直流を介しての連系

が考えられるが、両者とも現在のところ技術的または経済的に難点があり、近い将来の採用はむずかしい。このような技術的課題を打破し、将来にわたって系統全体に安定供給を確保しながら、しかも大電力系統としてのスケールメリットを保持するため、次の構想が打ち出された。

- (1) 東京電力の全系統を適正規模の数ブロック系統に区分する。
- (2) これらブロック系統相互間を特殊な機能をもつ交流式の連系

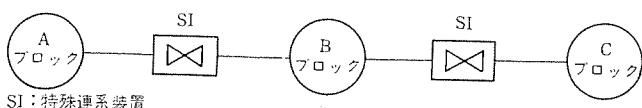


図1.1 特殊連系装置によるブロック系統間の連系  
Interconnection of block sub systems by system interconnectors (SI).

装置で連系する(図1.1)。

この構想にもとづき、特殊連系装置の具体的な方式開発を目的として、昭和42年12月から東京電力と三菱電機とは共同研究をおこない、約2年にわたり、

- (1) 基礎的検討による特殊連系装置方式案の考案と選定
- (2) 選定した方式案について、3.3kV級モデル装置の試作
- (3) 模擬電力系統と組み合せて、モデル装置による諸機能の検証
- (4) デジタル計算機による特殊連系装置の効果の検討(系統解析計算)

- (5) 500kV実規模装置の概念設計
- 等を精力的にすすめた。その結果有望な方式として
- (1) LCの共振を利用する直並列共振方式(ICA方式)
  - (2) 非同期時に転相により一定電力応援を行なう方式(サイクロオーマ方式)
  - (3) 直列変圧器の二次側にLC共振回路をおく方式(コンデンサ回路方式)
  - (4) 直列変圧器の二次側に整流回路をおく方式(コネクトフォーマ方式)

などを開発したが、技術的性能および経済性を比較検討した結果、最終的に後記の結合変圧器式特殊連系装置を選定した。

### 2. 特殊連系装置の機能

#### 2.1 基本機能

特殊連系装置として要求される基本的機能は次の三つである。

- (1) 自由連系機能
- (2) 限流機能(事故電流抑制機能)
- (3) 応援機能(緊急応援機能および応援抑制機能)

#### 2.1.1 自由連系機能

常時は各ブロック系統間の電力授受を自由に行ないうること。これは常時は強い連系を行なうということであり、このためには特殊連系装置のインピーダンスは十分小さい値でなければならない。これは装置両端の位相差および電位差が十分小さく、装置内部での有効電力

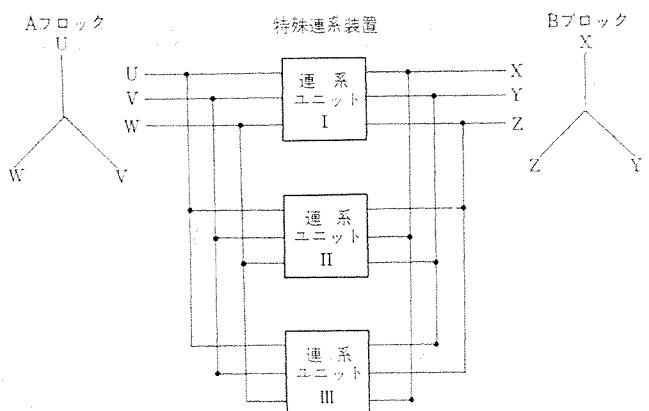


図 2.1 非同期時転相方式  
Asynchronous interconnection by cyclo-converter type system interconnector.

損失と無効電力損失が十分小さくなければならぬことを意味している。

## 2.1.2 限流機能

一方のブロック系統に短絡などの事故が発生したときは、健全ブロック系統からの事故時流入電流を瞬時に抑制すること。これは短絡容量を所定の値以下に抑制することを意味している。

## 2.1.3 応援機能

一方のブロック系統に電源脱落による供給力不足を生じた場合、そのブロックへ健全ブロックから適正な応援電力を送りうること。これは次の二つに分類される。

### (1) 緊急応援機能

電源脱落の発生したブロック系統の周波数低下をくいとめるため、特殊連系装置を介して応援電力を送ること。したがって、特殊連系装置は常時の定格容量以上の電力潮流を短時間の間だけ通過させる能力を具備している必要がある。

### (2) 応援抑制機能

前項の応援電力が過大になると、健全ブロック側にも需給不均衡が波及し、最悪の場合には健全ブロックも事故ブロックとともに共倒れる。したがって、適正量以上の応援電力は通過させないで、応援電力過大のときには通過潮流を抑制する。

## 2.2 付加機能

### 2.2.1 非同期連系機能

応援抑制によって供給力不足ブロックは周波数がさらに低下して遂には二つのブロックが脱調し非同期となることがある。非同期時の連系方式としては次の四つがある。

### (1) シャ断方式（系統分離方式）

二つのブロック系統をシャ断分離して電力潮流を全く通過させない方式であり、応援電力は0となる。

### (2) スイング方式

特殊連系装置のインピーダンスを高くして、系統に悪影響を与えない範囲内で潮流を往復通過させる方法であって、この場合正味の応援電力は送ることができない。

### (3) かんけつ応援方式

両ブロック間の位相差が適当な範囲内のときにのみ、かんけつ的に応援電力を通過させる方式である。

### (4) 一定応援方式

通常の連系ユニット(U-X, V-Y, W-Z)のほかに、二つの連系ユニット(U-Z, V-X, W-Y)と(U-Y, V-Z, W-X)とを設置し、こ

れら三つのユニット間を転相することによって非同期時も一定の応援電力を送る方式である(図2.1)。

以上四つの方程式のうち、非同期時の連系方式としては一定応援方式がもっともすぐれているが、前の三方式に比してコストが約3倍となる。したがって非同期連系の方式としては、正味の応援電力を妥当なコストで送りうる間けつ応援方式を採用した。

## 2.2.2 再連系機能

供給力不足ブロックが負荷制限によって周波数が回復してきたときに、二つのブロックの位相差が十分小さくなつたところで、自動的にすみやかに再連系させ常時の状態に復帰させることが有効である。

## 3. 結合変圧器式特殊連系装置

### 3.1 回路方式

開発した特殊連系装置の回路方式を図3.1に示す。2台の結合変圧器(1号および2号)は一次側が相互に直列に接続され、二次側は相互に並列に接続されている。調整変圧器は特殊連系装置両端の電位差が大きくなつたとき、これを補償してブロック系統間の位相差を十分小さい値とするためのものである。また、サイリスタはこの方式においては逆並列に接続され、高速スイッチング素子(サイリスタスイッチ)として用いられる。

### 3.2 動作の説明

#### 3.2.1 常時連系

常時は図3.1に示すしゃ断器CB1, CB2を閉じ、サイリスタスイッチSCRを開放する。また調整変圧器は潮流が大きくなきりタップ位置中央(無補償)としている。このとき結合変圧器2号はその一次、二次がともに短絡されるので、特殊連系装置のインピーダンス $X_A$ は、結合変圧器1号の漏れインピーダンス $X_1$ に等しくなる( $X_A=X_1$ )。

#### 3.2.2 位相調整

特殊連系装置を通過する潮流が増加して両端の位相差が大きくなつた場合には、調整変圧器のタップが移動して位相調整をおこなう。このとき連系装置端子間電圧は図3.2に示すように $V_C=I(X_1+X_{ph})-E_{ph}$ となる。ここで、 $I$ : 特殊連系装置通過電流、 $X_{ph}$ : 調整変圧器のインピーダンス、 $E_{ph}$ : 位相調整電圧。

#### 3.2.3 限流(事故電流抑制)

系統に短絡事故が発生したとき、連系装置の回路は常時と全く同一であり、インピーダンス $X_A=X_1$ によって短絡電流の通過を抑制する。

#### 3.2.4 応援抑制

一方のブロック系統に電源脱落により需給不均衡を生じたとき、緊急応援は常時と同一の回路のままでおこなう。この応援電力が過大となると、図3.1に示すしゃ断器CB1, CB2を開放する。このと

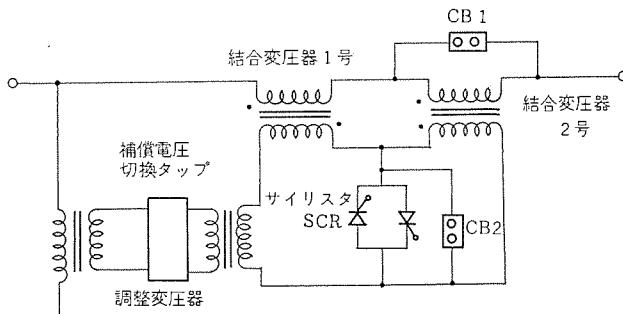
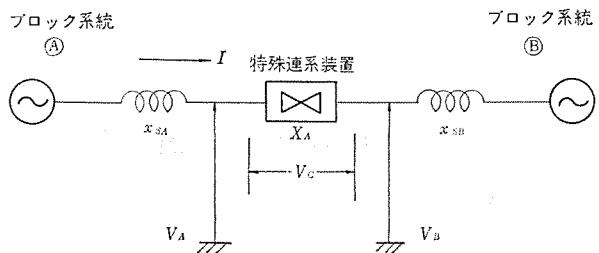


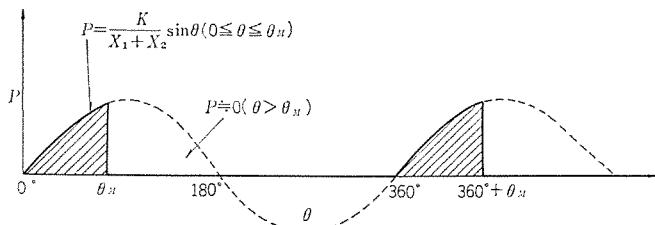
図 3.1 結合変圧器式特殊連系装置回路方式  
Circuit diagram of coupling transformer type system interconnector.



(1) 常時連系時

(2) 位相調整時

I : 連系装置通過潮流  
 $V_A$  : A 系統側相電圧  
 $V_B$  : B 系統側相電圧  
 $V_C$  : 連系装置端子間電圧  
 $\theta$  : 連系装置端子間位相差

図 3.2 電圧ベクトル図  
Voltage phasor diagram.図 3.3 間けつ応援時の応援電力  
Intermittently transmitted emergency assistance power during asynchronous interconnection.

き、結合変圧器1号および2号はともに二次側が開放されて励磁インピーダンスとなり、通過電力はほとんど0となる。

### 3.2.5 間けつ応援

応援抑制によって二つのブロック系統が脱調した場合には、両ブロック間の位相差θが小( $\theta=0$ )となったときにサイリスタスイッチSCRを投入する。このとき結合変圧器1号・2号の二次側は短絡されて、特殊連系装置のインピーダンスは $X_A=X_1+X_2$ となる。 $(X_2:$ 結合変圧器2号の漏れインピーダンス)。このとき

$$P=\frac{K}{X_1+X_2} \sin \theta \quad (K:\text{定数})$$

で表わされる応援電力が送られる。位相差θがある値 $\theta_M$ となったところで( $\theta=\theta_M$ )サイリスタスイッチSCRを開放して応援を打切る。特殊連系装置のインピーダンスは再び励磁インピーダンスとなる。以下両ブロックのスリップに伴い間けつ応援をくりかえす(図3.3)。

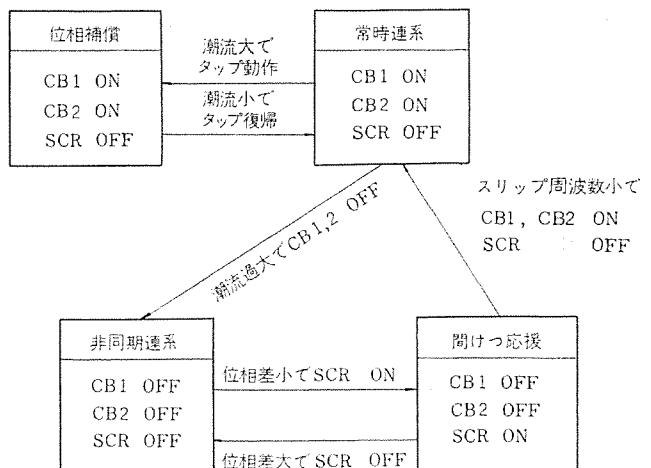
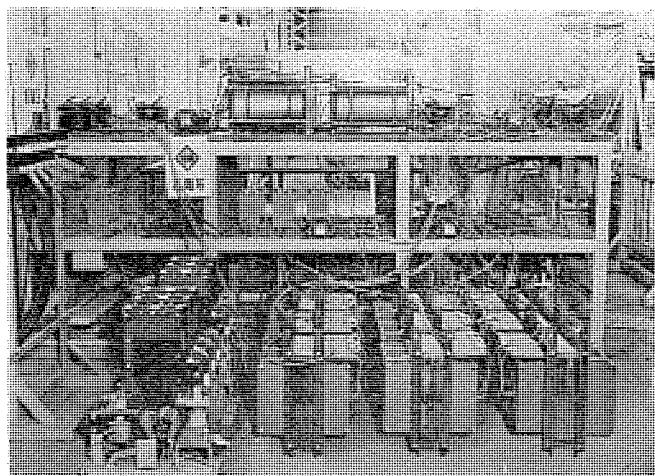
### 3.2.6 再連系

事故系統の需給バランスが回復し、両ブロックのスリップ周波数が小さくなったとき、両ブロックの位相差 $\theta=0$ のところでしゃ断器CB1,CB2を投入して再び常時インピーダンス $X_A=X_1$ に復帰する。

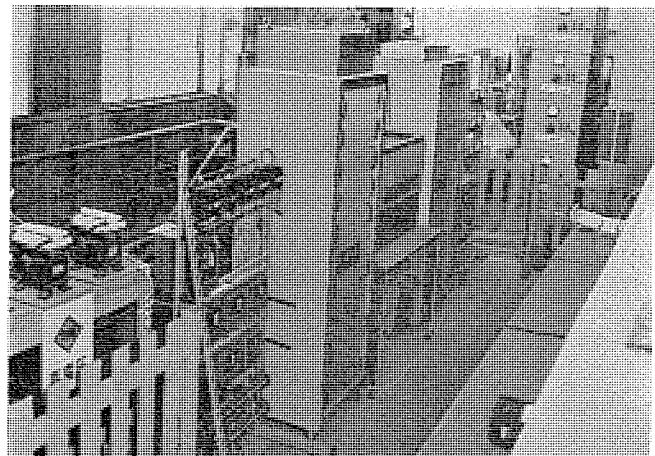
以上の制御方式のパターンを図3.4に示す。

### 3.3 モデル装置による機能の検証

結合変圧器式特殊連系装置の小形モデル装置を試作し、模擬送電線を用いて試験した。なお制御装置については実用規模と同等のも

図 3.4 制御方式  
Control pattern of system interconnector.

(a) 主回路部



(b) 制御回路部

図 3.5 モデル装置  
Model set of system interconnector.

のを試作して、試験を行なった。図3.5に試作したモデル装置を、図3.6に試験に用いた模擬電力系統の構成を示す。試験の結果実証した主要な点は下記のとおりである。

#### (1) 基本構成回路の検証

インピーダンスが計算値とよく一致すること、およびしゃ断器やサイリスタスイッチの開閉時に異常現象が発生しないことを確認した。

#### (2) 定常特性

定常時の運転特性（電圧・電流・電力・無効電力・位相差の関係など）は計算値とよく一致し、所期の特性を有し、自由な電力融通ができる。また調整変圧器による位相調整の効果も計算値と一致することが確認された。

### (3) 限流（事故電流抑制）

各種短絡事故時の事故電流は目標値以下に抑制できることを検証した。図3.7は図3.6に示すF点における三相地絡事故時の各部の電圧電流を示すオシログラフである。

### (4) 事故波及防止

応援電力の抑制によってブロック系統間が脱調しても、健全側系統に大きい電圧変動・周波数変動を生じることなく位相差が適切な範囲内のときに間けつ応援を行なうことができ、また、事故ブロック系統の周波数が回復してきたときに自動的に再連系できることを確認した。図3.8は実験結果の一例であって、図3.6のしゃ断器CBaを開閉することによりブロック系統Bに40%の電源脱落を発生させ、

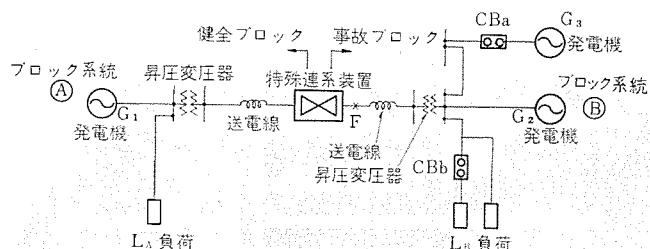


図3.6 模擬電力系統の構成  
Connection diagram of system interconnector with artificial transmission line.

応援抑制後非同期連系状態となった後に40%の負荷制限を実施した場合である。間けつ応援および再連系が所期のシーケンスで行なわれている。

## 4. 系統解析計算と概念設計

### 4.1 系統解析計算

特殊連系装置の系統に及ぼす影響と効果を明らかにするため、昭和50~60年頃の東京電力の500kV基幹系統の特長を考慮したモデル系統を設定して、デジタル計算機による解析をおこなった。主として用いたモデル系統は図4.1に示すような系統容量1,500万kWの二つのブロック系統から成る12機系モデルである。

#### 4.1.1 短絡容量

特殊連系装置の種々のインピーダンス値  $X_A$  に対して系統の短絡容量を計算した結果を図4.2に示す。直接連系時 ( $X_A=0$  のとき) 約4,400万kVAであった最大短絡容量が10% (100万kVAベース) のインピーダンスをもつ特殊連系装置で連系した場合には2,900万kVA以下となり、特殊連系装置の短絡容量抑制効果を示している。なお、図4.2から明らかなように、特殊連系装置のインピーダンス値を20%以上の範囲で増加しても、短絡容量抑制効果はほとんど変化しない。

#### 4.1.2 過渡安定度

特殊連系装置の系統過渡安定度に対する効果を解析するため

(1) 山側500kV送電線、送電端(図4.1に示すF1点)における1回線、三相短絡事故、4サイクル後事故除去、30サイクル無電圧ののち再閉路成功の場合の安定限界(山側発電機GA1の出力限界)および

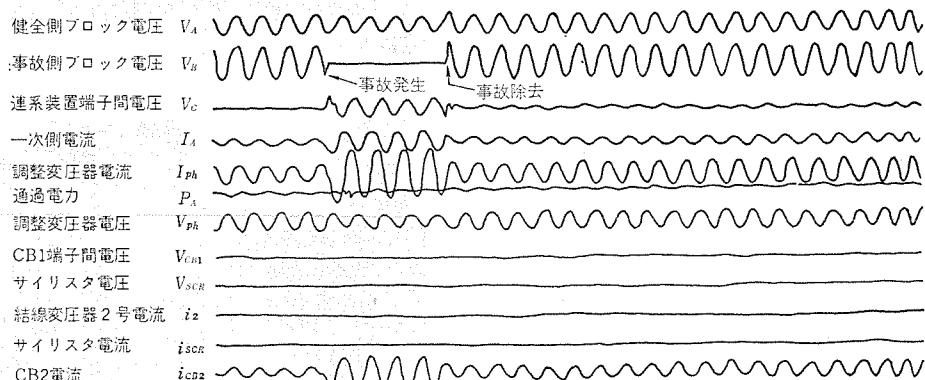


図3.7 限流試験結果  
Test result of short circuit current suppression.

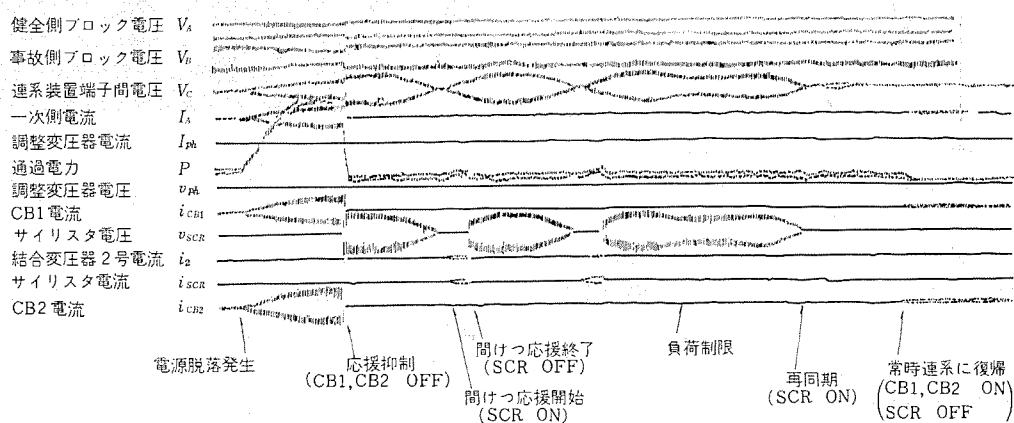


図3.8 非同期連系試験結果  
Test result of asynchronous interconnection.

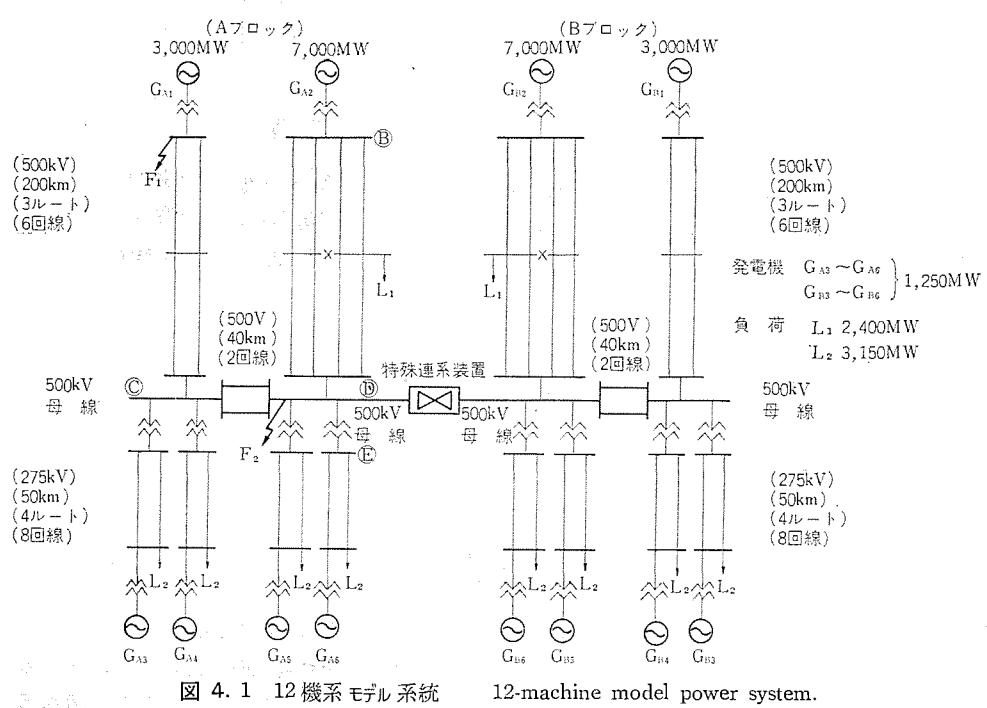


図 4.1 12 機系 モデル 系統

12-machine model power system.

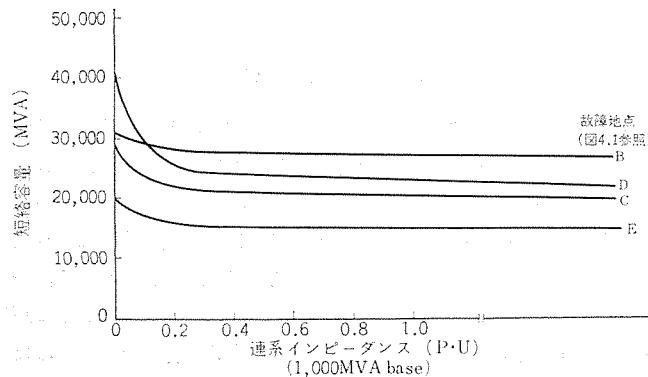


図 4.2 短絡容量計算結果  
Calculated short circuit capacity.

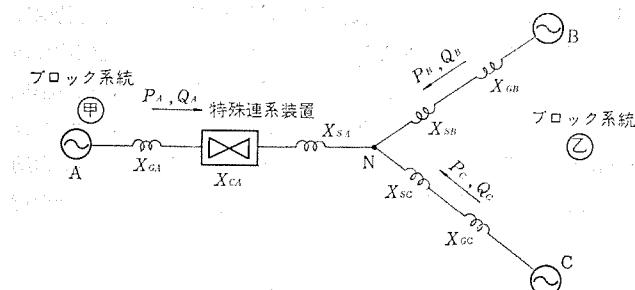


図 4.3 3 機系 モデル 系統  
3-machine model power system.

(2) 里側 500 kV 変電所母線 (図 4.1 に示す F2 点) 三相短絡事故に対する安定限界 (事故の除去時間) について検討した。計算の結果、山側事故の場合は最大送電電力は約 3,800 MW であり、里側事故の場合には許容事故継続時間は約 0.4 秒である。

#### 4.1.3 非同期時電力応援

特殊連系装置による非同期時の電力応援の効果を 2.2 節で述べた各種応援方式について検討した。対象としたモデル系統は図 4.3 に示す 3 機系 モデル である。事故としては一方のブロック 系統の山側系統 B において、300 万 kW の電源脱落を想定した。計算の結果、得られた結論は下記のとおりである。

(1) 間けつ応援時の特殊連系装置のインピーダンス  $X_A$  が小さいほど

事故ブロック系統における必要な負荷制限量を小とすることができ、たとえば、 $X_A=200\%$  (100 万 kVA ベース) のとき、200 万 kW である制限量は  $X_A=50\%$  のとき 150 万 kW になる。また再連系に至るまでの時間も  $X_A$  が小さいほど短くなることがわかった。

(2) しかし、間けつ応援時のインピーダンス  $X_A$  があまりに小さくなると、事故ブロック 系統内の部分系統 B、C 間の安定度が低下し、また、系統の電圧変動が大きくなるなどの悪影響がでてくる。

(3) 間けつ応援の打切り角  $\theta_M$  を大きくすることは間けつ応援時のインピーダンス  $X_A$  を小さくすることと同様の影響を系統に与える。

以上のことから、間けつ応援の効果を最大ならしめるためには、インピーダンス  $X_A$  および打切り角  $\theta_M$  の値は、相互に関係するある領域内になければならない。これは  $X_A=50\%$ 、 $\theta=90^\circ$ を中心とする領域であって、その概略の形を図 4.4 に示す、なおスイング方式の場合には、インピーダンスを約 100 % 以上 (100 万 kVA ベース) としないと系統の安定度が阻害される。図 4.5 は非同期時の応援電力および事故ブロック 系統の周波数の変動を示す計算結果の一例である。

#### 4.2 実規模装置の概念設計

500 kV 実規模装置の定格事項は表 4.1 に示すとおりである。機器構成は表 4.1 の定格の 50 % の容量をもつ機器を 2 組全く独立に設置する 2 バンク構成とした。これは、定期点検時および万一の支障

表 4.1 500 kV 特殊連系装置仕様  
Specification of 500 kV system interconnector.

公称電圧	500 kV
定格周波数	50 Hz
常時通過容量	750 MW (連続定格)
緊急応援容量	2,000 MW (15 分間定格)
通過短絡容量抑制値	8,000 MVA 以下 (2 秒以内)
常時インピーダンス	10 % 以下
両端相差角	7.5 度以内 (2,000 MW 通過時)
非同期連系許容継続時間	1 分以内

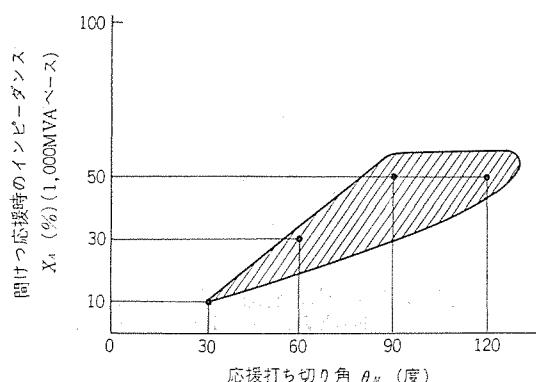


図 4.4 間けつ応援時のインピーダンスと応援打切り角の最適領域  
Optimum relation between interconnector impedance and maximum phase angle difference during intermittent assistance.

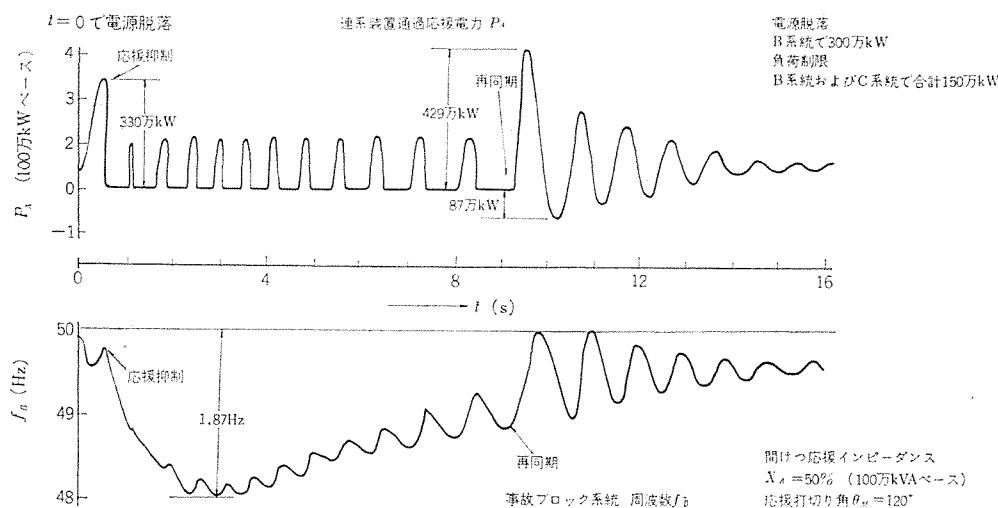


図 4.5 非同期連系(間けつ応援方式)計算結果  
Calculated frequency and power during asynchronous interconnection.

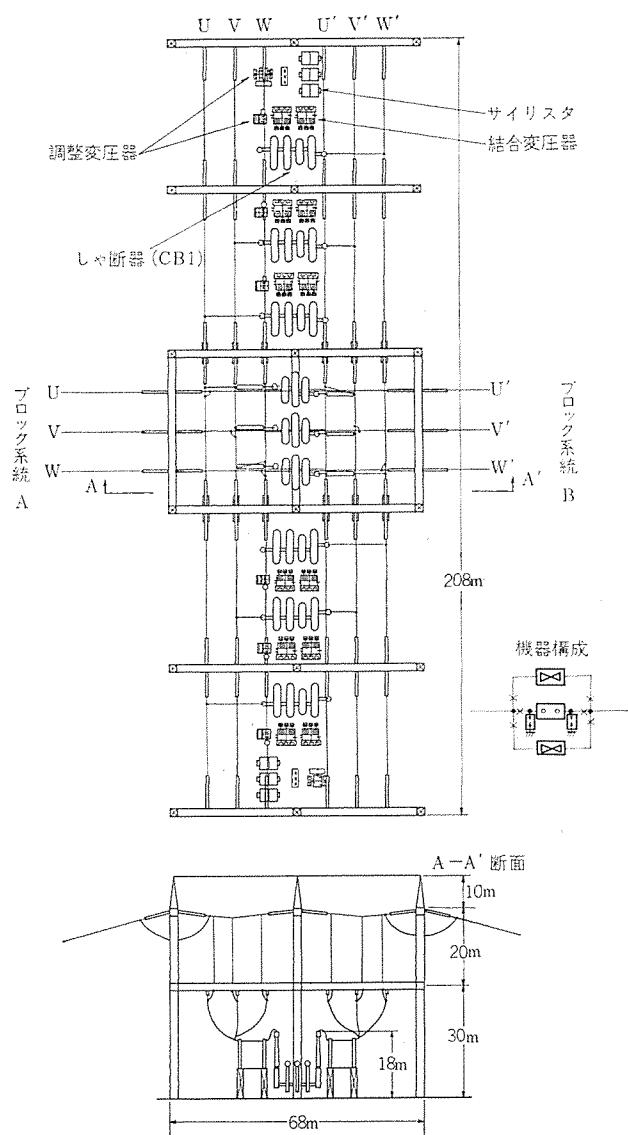


図 4.6 500 kV 特殊連系装置配置図  
Layout of 500 kV system interconnector.

発生時においても 50 % 運転を可能にすることと 設置時に 2 段階計画を可能とし、また ユニット化によって将来の増設を容易にするためである。なお、主要機器はすべて単相器として設計した。図 4.6 に主要機器配置を示す。

## 5. む す び

特殊連系装置は、短絡容量の抑制と事故波及による大停電事故の防止を目的とし、巨大化した電力系統を分割しブロック化したとき、各ブロック系統間を連系する装置として考案されたものである。現在まで開発された特殊連系装置は、本質的には系統間に直列にそう入された変圧器のインピーダンスを、その二次側からコントロールする、一種の可変インピーダンス装置である。その系統運用上の効果は、系統解析により明らかにされているが、現在 500 kV 基幹系統のみではなく、275 kV・154 kV などの下位の高圧系統にも特殊連系装置を適用し、供給の信頼度を高めることも考えられている。また、昭和 45 年 12 月には、東京電力駿河変電所に 66 kV の結合変圧器式特殊連系装置が、パイロットプラントとして設置され、現在順調に運転中である。特殊連系装置は従来の電力系統構成機器とは異なり、系統構成の思想、系統運用の基本方針と根本的に相関関係にあり、システム技術を要する「系統機器」である。本方式開発にあたり多大のご援助をいただいた東京電力ならびに三菱電機の関係各位に深く感謝の意を表する。

## 参 考 文 献

- (1) 高木、三井、平山：電力系統の巨大集中化に挑戦する特殊連系装置の開発、電気雑誌 OHM 57-4, 81 (昭 45)
- (2) 平山、桜井：特殊連系装置の開発、電気協会雑誌 560, 75 (昭 45)

# 東京電力 駿河変電所向け 66kV 特殊連系装置

鈴木 賢三\*・荒井曾二郎\*・平山 尚\*  
 迎 久雄\*\*・山田 郁夫\*\*・木下 裕道\*\*  
 塚本 昭三\*・三浦 良和\*  
 仁科 重雄\*\*

## 66kV System Interconnector Installed in Suruga Substation of Tokyo Electric Power Co.

Tokyo Electric Power Co. Kenzô SUZUKI・Sozirô ARAI・Takashi HIRAYAMA  
 Mitsubishi Electric Corp., Head Office Hisao MUKAE・Ikuo YAMADA・Hiromichi KINOSHITA  
 Mitsubishi Electric Corp., Itami Works Shôzô TSUKAMOTO・Yoshikazu MIURA  
 Mitsubishi Electric Corp., Kobe Works Shigeo NISHINA

Tokyo Electric Power Co. and Mitsubishi Electric Corp. have been making the cooperative development of a System Interconnector with the object of reliable supply of electric power due to the suppression of short-circuit current and the prevention of large-scale black-out. Success has been now made in working out the 66 kV interconnector, as a first step to 500 kV installations, set up in Suruga substation in December, 1970. The apparatus is called a coupling transformer type System Interconnector and consists of two coupling transformers, No. 1 and No. 2, a regulating transformer and thyristor switches, being capable of making intermittent assistance of power during asynchronous interconnection. As a result of factory and field tests, it has been confirmed that the apparatus satisfies such functional requirements as free power exchange in normal conditions, suppression of short-circuit current and asynchronous interconnection. The apparatus is expected further to undergo long-time field operating tests.

### 1. まえがき

巨大集中化する東京電力の将来系統を適正規模のブロックに分割して、これらの間を特殊な機能をもつ交流の連系装置によって連系することにより、

- (1) 供給予備力の節減
  - (2) 負荷および電源の不等性の利用
  - (3) 大連系系統の経済運用
  - (4) 大容量ユニットの採用など経済的電源開発
  - (5) 電源脱落事故時の緊急相互応援
- などのスケールメリットを保持しつつ、短絡容量の抑制、電磁誘導障害の軽減、事故波及による大停電の防止など連系に伴う問題の解決を図ることが考えられている。この構想にもとづき、東京電力(株)と

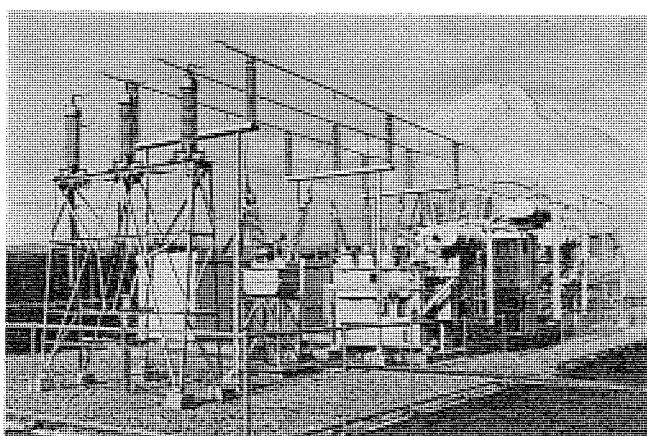


図 1.1 66 kV 結合変圧器式特殊連系装置  
66 kV coupling transformer type system interconnector.

三菱電機(株)は別掲<sup>(1)</sup>のように特殊連系装置の共同研究・開発をおこなった結果、下記の機能を具備した結合変圧器式特殊連系装置を開発した。

- (1) 常時は系統間の電力を自由に流通させる。(自由連系機能)
- (2) 短絡事故時には事故電流を瞬時に抑制する。(限流機能または事故電流抑制機能)
- (3) 電源脱落事故が発生したときには適正な応援電力を送るが(緊急応援機能)、この応援電力が適正量をこえたときにはこれを抑制する。(応援抑制機能)
- (4) 系統間に同期はずれを生じ両系が脱調したときには、両系の相差角が適当なときにのみ、間接的に応援電力を送る。(間接方式の非同期連系機能)
- (5) 非同期連系中に事故系統の周波数が回復して両系のスリップ周波数が小さくなったときに、適切な位相で円滑に再連系して常時状態に復帰する。(再連系機能)

このような機能をもつ特殊連系装置は、最終的には 500 kV 基幹系統を連系する実規模装置をめざしているが、下位系統の短絡容量抑制などとしても有効であるので、この実用化の第一歩として、昭和 44 年度より 66 kV 結合変圧器式特殊連系装置を設計・製作し、単体試験・総合試験などを行なったのち東京電力駿河変電所に設置し、長期実運用試験を開始した。図 1.1 に本装置を示す。

### 2. 基本設計

#### 2.1 回路方式

本装置の三相結線図を図 2.1 に示す。常時は、一次側しゃ断器 CB 1, 二次側しゃ断器 CB 2 を投入しているので、結合変圧器 2 号は一次側、二次側が共に短絡され、連系装置のインピーダンスはほぼ結

\* 東京電力(株) \*\* 三菱電機(株)本社

+ 三菱電機(株)神戸製作所 ++ 三菱電機(株)伊丹製作所

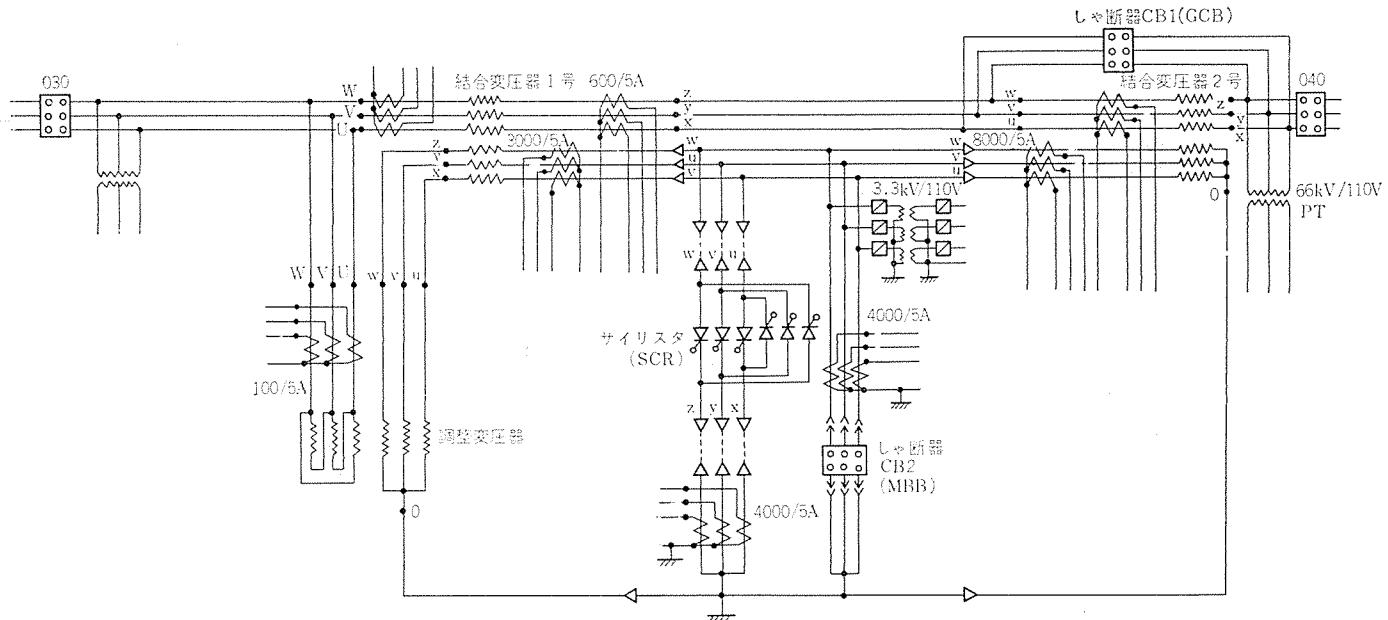


図 2.1 三相結線図 Circuit diagram.

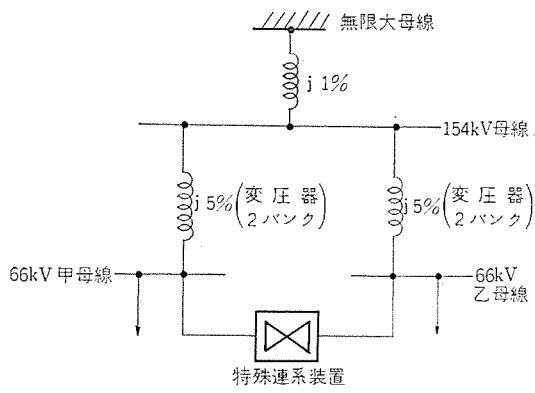


図 2.2 基準系統(同期時)  
(インピーダンスは 100 MVA ベース)

Applied power system during synchronous interconnection.

表 2.1 基本仕様  
Basic specifications.

公称電圧	66 kV
定格周波数	50 Hz
絶縁レベル	
衝撃試験電圧	350 kV
商用周波試験電圧	140 kV (実効値)
常時通過容量	40 MVA (連続)
緊急応援容量	70 MVA (15分間)
通過短絡容量	800 MVA 以下 (2秒以内)
両端相差角	3度以下 (70 MVA 通過時)
非同期連系の許容維持時間	1分
装置構成	1バンク構成

合変圧器 1 号の漏れい(渦)インピーダンス  $X_1$  に等しい。系統に短絡事故が発生したときにはこの回路状態は変化せず、インピーダンス  $X_1$  によって事故電流の通過を抑制する。調整変圧器は連系装置通過電力  $P$  の方向と大きさに応じてタップを切換えることにより、連系装置両端の相差角を補償する。補償電圧  $E_{ph}$  は結合変圧器 1 号の二次側から印加される。次に系統に電源脱落事故が発生したときには、健全系統から事故系統へ緊急応援をおこなうが、これが過度になると健全系統にも悪影響があらわれるので、しゃ断器 CB1, CB2 を開放して応援を抑制する。このとき連系装置インピーダンスは結合変圧器 1 号、2 号の励磁インピーダンスとなる。応援抑制によって連系系統間に同期はずれを生じた場合には非同期連系状態となるが、このとき相差角

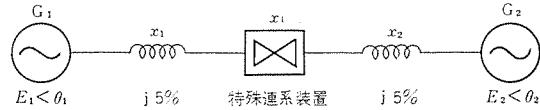


図 2.3 基準系統(非同期時)  
(インピーダンスは 100 MVA ベース)

Applied power system during asynchronous interconnection.

$\theta$  がほぼ  $0(\theta=0)$  のときにサイリスタ(SCR)を点弧して、間けつ応援を開始する。このとき連系装置のインピーダンスは結合変圧器 1 号、2 号の漏れいインピーダンスを  $X_1, X_2$  として、ほぼ  $X_1 + X_2$  であらわされる。相差角  $\theta$  が大きくなり設定値  $\theta_M$  に等しくなると ( $\theta=\theta_M$ )、サイリスタ(SCR)を消弧して、間けつ応援を停止する。以下同様に間けつ的に応援をくりかえすが、事故系統における負荷制限によって事故系統の周波数が回復し、系統間のスリップ周波数  $\Delta f$  が設定値  $\Delta f_s$  以下になると ( $\Delta f < \Delta f_s$ )、適切な位相のときにしゃ断器 CB1, CB2 を投入して再連系し、常時の回路状態に復帰する。

## 2.2 基本仕様

66 kV 特殊連系装置は図 2.2 に示す基準系統に対して適用するものとして設計している。154 kV/66 kV 変電所の 66 kV 側 ブスタイしゃ断器を開閉し、66 kV 系統を甲母線側と乙母線側とに分割して、その間を特殊連系装置により連系する。装置の基本仕様を表 2.1 に示す。常時の通過容量は連続定格で 40 MVA、緊急応援時は 15 分定格で 70 MVA である。短絡事故電流の抑制(限流機能)については、66 kV 系の事故点の最大短絡容量 2,500 MVA 以下、本装置通過分 800 MVA 以下となることを条件とした。

## 2.3 基本設計

### 2.3.1 インピーダンスの決定

#### (1) 常時インピーダンス

上記の短絡容量に対する仕様から、装置の常時インピーダンスを  $3.3 \Omega$  (100 MVA ベースで 7.5 %) に選定した。図 2.3 の系統図から事故点の最大短絡容量は 2,190 MVA、装置通過分は 625 MVA になり、装置を通過する事故電流は 5,500 A 以下に抑制される。

#### (2) 間けつ応援時インピーダンス

非同期連系時の適用系統は図 2.3 のように考えている。このとき間けつ応援時の応援電力は、

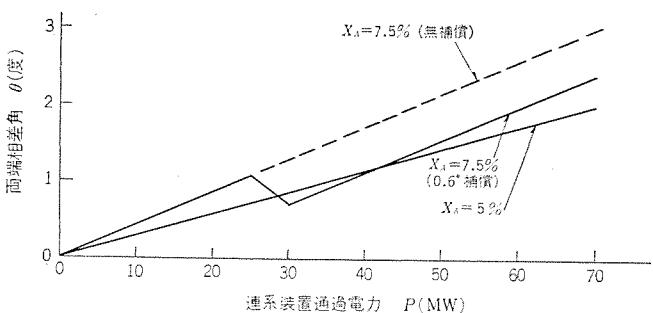


図 2.4 連系装置通過電力  $P$  と両端相差角  $\theta$  との関係  
Angular difference  $\theta$  vs. power  $P$  passing SI.

$$P = \frac{E_1 E_2}{x_1 + x_2 + x_4} \sin \theta = P_0 \sin \theta \dots \dots \dots \quad (2.1)$$

ただし、

$$P_0 = \frac{E_1 E_2}{x_1 + x_2 + x_A}$$

と表わされる。ここで、 $x_A$  は間接応援時の連系装置のインピーダンスであり、 $\theta$  は系統間の相差角である。 $(\theta = \theta_1 - \theta_2)$  また平均応援電力は、

$$\bar{P} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\theta_M} P_0 \sin \theta d\theta = \frac{P_0}{2\pi} (1 - \cos \theta_M) \quad \dots \dots \dots (2.2)$$

となる。ここで、 $\theta_M$  は間接応援の打切り角である。本装置では  $X_A=87\Omega$  (100 MVA ベースで 200 %) である。

間けつ応援の最大応援電力  $P_M$  は式 (2.1) において  $\theta = \theta_M$  とおくことにより得られる。

### 2. 3. 2 装置两端相差角

70 MW 通過時に装置両端相差角を 3 度以下とし、また等価インピーダンスを 100 MVA ベースで約 5 % とすることが条件である。このため、通過電力が設定値  $P_S=25$  MW をこえたときに調整変圧器のタップを動作させて補償電圧  $E_{ph}$  を加える(図 2.4)。 $E_{ph}$  の値は相電圧  $66/\sqrt{3}$  kV ベースで 1.0 % (相差角 0.6° に相当) としている。

### 3. 主要構成機器

本装置の主要構成機器は結合変圧器1号、2号、調整変圧器、ガスしゃ断器、サイリスタ装置およびメタルクラッドである。ガスしゃ断器は2.1節で前記したしゃ断器CB1に相当し、結合変圧器2号の一次端子間を短絡する。本装置では単一ガス圧力形の70-SFL-350形ガスしゃ断器を用いている。メタルクラッドは前記しゃ断器CB2に相当する磁気しゃ断器(6-DHM-30形)などを収納しており、変圧器、サイリスタ装置とケーブルにより接続される。機器配置図を図3.1に示す。変圧器はすべて三相器であるが、サイリスタ装置は1相分を一つのキューピクルに収納し、3台のキューピクルから構成される。図3.1に示されるように制御・保護・監視装置はまとめて一つの屋外キューピクルに収納している。主要機器の仕様を表3.1に示す。

### 3. 1 变压器

### 3. 1. 1 結合変圧器 1 号 (図 3. 2)

屋外用三相油入自冷式外鉄形変圧器であり、一次、二次の巻線比は 5 : 1、インピーダンスは高圧側からみて  $3.0\Omega$  (100 MVA ベースで 6.9 %) とした。この値は 2. 3. 1 項に前記した装置の當時 インピーダンスの値  $3.3\Omega$  よりも低い値となっているが、これは二次側に接続されるケーブル等のインピーダンスによるインピーダンスの増加分を考慮したためである。この変圧器は通常の変圧器と異なり系統に対して直

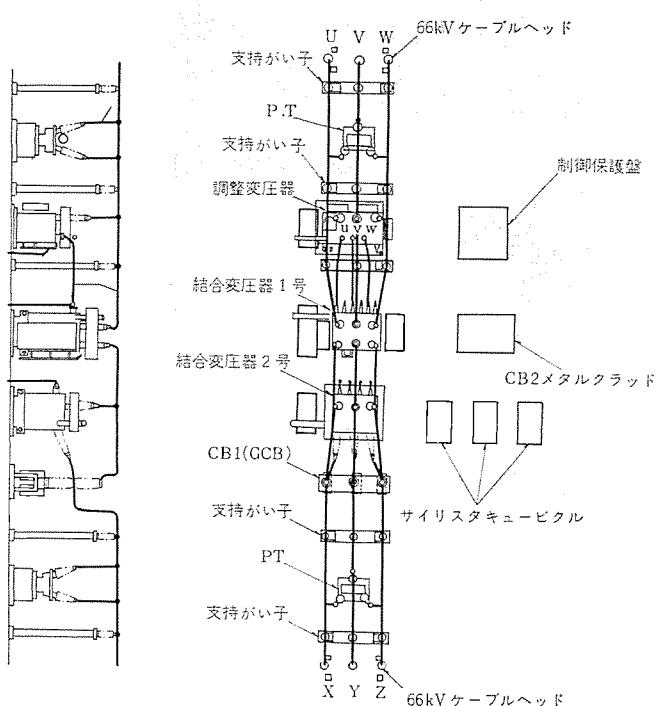


図 3.1 機器配置図  
Layout diagram.

表 3.1 主要構成機器仕様  
Specification of main machines.

機 器		結合変圧器 1号	結合変圧器 2号	調整変圧器	サイ リス タ
項目					
対 地 電 壓	一次 二 次	66/ $\sqrt{3}$ kV 3,050 V	66/ $\sqrt{3}$ kV 3,050 V	66/ $\sqrt{3}$ kV 3,050 V	3,050 V
端子間 最 大 電 壓	一次 二 次	22.8 kV 3,050 V	61.0 kV 3,050 V	66 kV 76/ $\sqrt{3}$ V	3,050 V
常 時 電 流 (連 続)	一 次 二 次	350 A 1,750 A	0 0	3.5 A 1,750 A	0
緊急応援時電流 (15分間)	一 次 二 次	612 A 3,060 A	0 0	6.1 A 3,060 A	0
瞬 時 最 大 電 流 (2秒以下)	一 次 二 次	7,000 A 35,000 A	0 0	70 A 35,000 A	0
間けつ応援時電流 (1分間)	一 次 二 次	416 A 2,080 A	416 A 8,320 A	4.2 A 2,080 A	10,400 A
イ ン ピ ー ダ ン ス(一次側にて)		3.0 Ω	82.9 Ω	—	—
巻 数 比		5 : 1	20 : 1	500 : 1	—
総 重 量		49 t	26 t	18 t	3.2 t×3

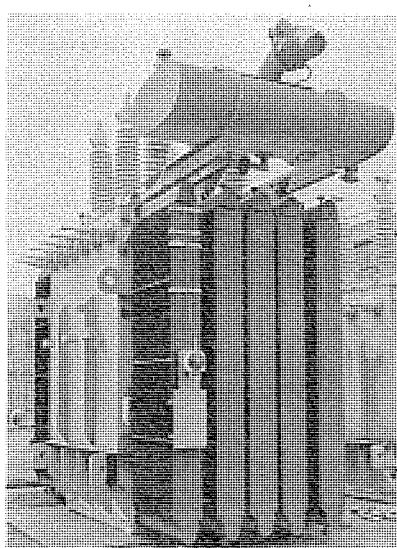


図 3.2 結合変圧器 1 号  
Coupling transformer No. 1.

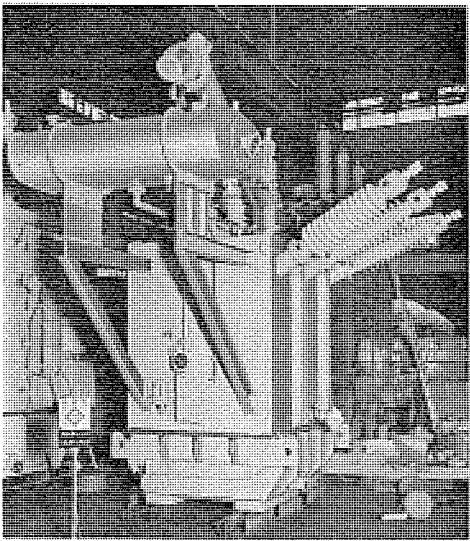


図 3.3 結合変圧器 2 号  
Coupling transformer No. 2.

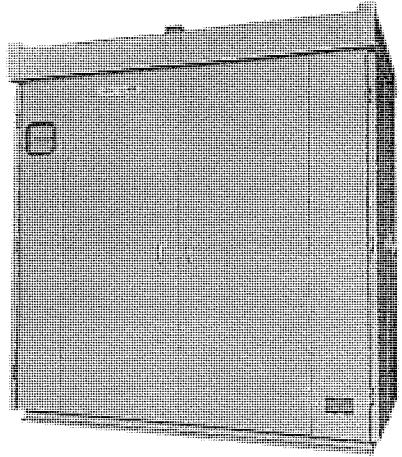


図 3.4 サイリスタ キューピクル（外観）  
Thyristor cubicle.

列に入っており、常時二次側が短絡されているが、系統短絡事故時の事故電流については一次側電流 7,000 A（通過容量 800 MVA に相当）に対しても機械的強度は十分に余裕のあるように設計した。

### 3.1.2 結合変圧器 2 号（図 3.3）

屋外用三相油入自冷式外鉄形変圧器で一次、二次の巻数比は 20 : 1、インピーダンスは高圧側からみて  $82.9\Omega$  (100 MVA ベースで 190 %) である。この変圧器は前記のように、常時は一次、二次ともに短絡されているので巻線には電流が流れない。非同期連系時に連系装置に印加される電圧は相差角  $\theta=180^\circ$  のとき最大値  $2E=2 \times \frac{66}{\sqrt{3}} \text{ kV}$  となるが、このとき結合変圧器 2 号の一次巻線には 61.0 kV の電圧が印加される。また、間けつ応援時の電流は最大値 416 A (等価 1 分間連続電流 140 A) を考えているが、これは相差角  $\theta=60^\circ$  のときの電流に相当する。

### 3.1.3 調整変圧器

屋外用三相油入自冷式内鉄形変圧器で、励磁側電圧 66 kV、調整側電圧 76 V である。2 鉄心 4 卷線で構成されており、励磁側は  $\Delta$ -Y 結線、調整側は Y-Y 結線となっている。タップ切換は MRD 形タップ切換器によって励磁側二次巻線 (open Y 結線) の電圧を切換えている。補償電圧は結合変圧器 1 号の二次側で 76 V であるので一次側においては  $76 \times 5 = 380 \text{ V}$  ( $66/\sqrt{3} \text{ kV}$  ベースで 1.0 %) となる。連系装置通過電力を甲母線側から乙母線側へ向う方向を正とし

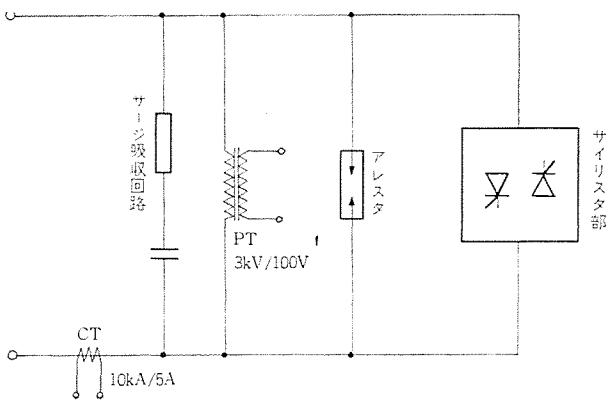


図 3.5 サイリスタの主回路構成  
Circuit diagram of thyristor unit.

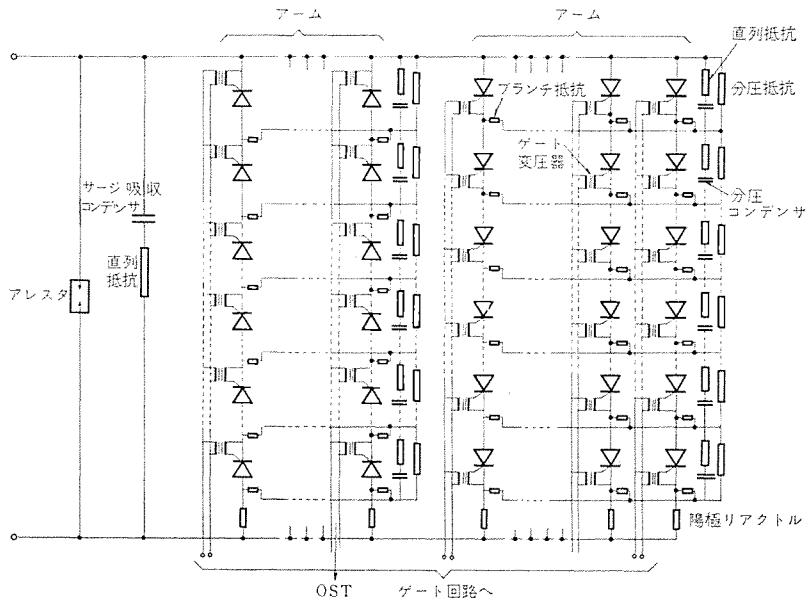


図 3.6 サイリスタのアーム構成  
Configuration of thyristor switch.

て  $P$  と表わすとき、 $P$  とタップ位置との関係は下記のとおりである。

$P > 25 \text{ MW}$  のとき タップ位置「3」

$-25 \text{ MW} < P < 25 \text{ MW}$  のとき タップ位置「2」

$P < -25 \text{ MW}$  のとき タップ位置「1」

タップ位置「2」のときは調整変圧器はその二次側が短絡され、補償電圧は 0 となる。

### 3.2 サイリスタ装置（図 3.4）

#### 3.2.1 主回路構成

屋外用単相気中自冷式のユニット（キューピクル）3 台から構成されている。1 相分の主回路構成を図 3.5 に示す。アレスター、サージ吸収回路およびサイリスタ部より構成されている。サージ吸収回路はコンデンサと制限抵抗とから成り、電流オフ時の振動の吸収と、外部より移行していくサージ電圧の立上りしゅん（峻）度を低減する。サイリスタ部の回路構成は図 3.6 に示されるように平形サイリスタ FT 500 A-50 を直列・並列に接続した 1 アームを逆並列に接続した構成となっている。このアーム構成は図 3.6 に示されるように共通の分圧回路をもつセミメッシュ接続となっている。直列接続されたサイリスタの各接続点と分圧回路はサイリスタの逆方向抵抗および阻止中の順方向抵抗より小さく、通電中の順方向抵抗よりは大きい抵抗（ブランチ抵抗）で接続され、分流分圧は良好に保持されるように設計されている。また、アノードリアクトルが設けられ構造上の配置による回路リアクタンスの

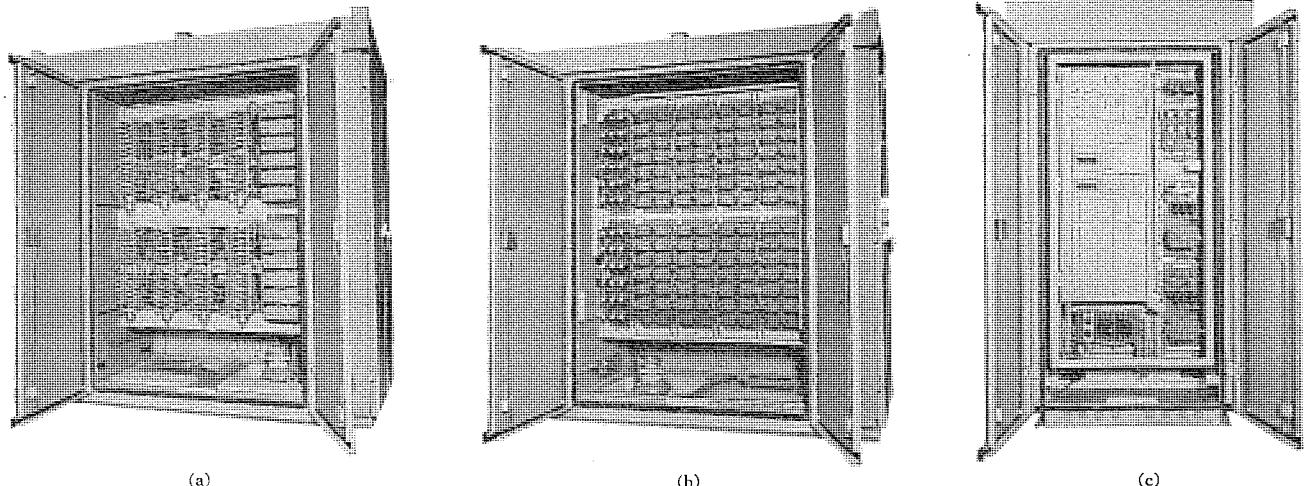


図 3.7 サイリスタ装置の内部構造 Thyristor unit.

不平衡をカバーして電流分担を良好に保っている。高電圧の主回路と低電圧のゲート制御回路とはゲート変圧器で絶縁しており、また、直列接続したサイリスタを1個のゲート回路で同時に点弧している。

### 3.2.2 サイリスタ装置の構造

本サイリスタ装置は1相分ごとに屋外形キュービクルに収納している。図3.7(a)は主回路部の構成を示す。キュービクル正面側にサイリスタスタックが上下2段、左右4列に計8個が配列されている。スタック部の右側に分圧回路用のコンデンサが設けられ、この端子と各スタックのサイリスタの接続点に設けられたブランチ抵抗とが接続されている。キュービクル裏面には主回路と制御回路を絶縁するゲート変圧器と整流回路、コンデンサ、抵抗より成るゲートユニットと発振変圧器が配置されている(図3.7(b))。ゲートユニットの整流回路はゲート信号として発振された交流を直流信号とするものである。

制御部は制御装置からの起動信号伝達部、サイリスタ点弧信号をつくるゲートアンプ部、故障検出部に分類できる。制御部は各回路ごとにユニット化され、ユニットごとに点検やとりかえを容易に行なうことができる。制御部はサイリスタキュービクルの側面に配置されており、これを図3.7(c)に示す。

## 4. 制御装置

連系装置の制御パタン図を図4.1に示す。系統の状態に応じて連系装置にこの制御パタン図に従った動作をさせるわけであるが、その制御対象機器は一次側ガスしゃ断器(CB1)、二次側磁気しゃ断器(CB2)、サイリスタ(SCR)および調整変圧器のタップ切換器である。制御装置の中心となる論理回路部は以下の部分から構成されている。

### (1) 位相調整シーケンス

連系装置通過電力Pを検出し、これを時間積分したのち、設定値と比較し、調整変圧器のタップを所定の位置まで動作させる。これを表4.1に示す。なお、過渡的な電力動揺に対しては時限協調により応答させないようにしている。

### (2) 応援抑制シーケンス

連系装置通過電流Iが設定値よりも大きくなると、系統電圧が健全であることを確認してしゃ断器CB1、CB2を開放する。電流の検出には反限特性能をもたせている。

### (3) 間けつ応援シーケンス

応援抑制ののち、系統間に同期はずれを生じた場合、前記のように両系のスリップ周波数 $\Delta f > \Delta fs$ なる範囲では、両系の相差角 $\theta$ がほぼ0のときにサイリスタを点弧して間けつ応援を開始する。次に

間けつ応援中に $\theta > \theta_M$ となるとサイリスタを消弧して間けつ応援を停止する。以下このシーケンスをくりかえす。

### (4) 再連系シーケンス

非同期連系中に両系のスリップ周波数 $\Delta f < \Delta fs$ となるとしゃ断器CB1、CB2を投入して再連系し、當時の回路に復帰する。本装置では $\Delta fs = 0.3$ サイクルに整定している。なお、しゃ断器CB1(ガスしゃ断器)とCB2(磁気しゃ断器)の投入動作時間の相異を考慮し、両しゃ断器が同時に適切な位相で入るようにしている。

なお制御装置の信頼度向上を図るために、下記の方式が組み込まれている。

(1) 入力信号検出回路および出力リレー回路の異常を検出するため、當時自動監視を行なっている。

(2) 常時監視では発見できない異常(主として論理回路)を発見するため、自動点検方式を採用し、点検ボタンによりシーケンスの模擬動作が行なえる。

(3) 論理回路は独立に同一のものを2系列設け、出力信号を直列にして両者が一致したときのみ動作するようにし、誤動作防止を

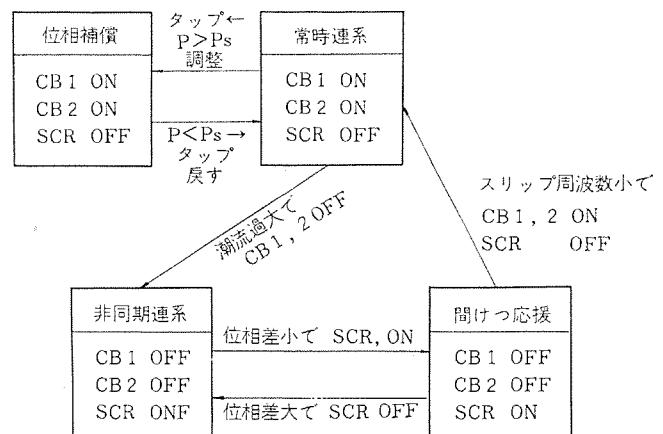


図4.1 制御パタン  
Control pattern.

表4.1 調整変圧器タップ動作  
Control pattern of taps of phase shifting transformer.

タップの初期位置	通過電力P	タップ動作	タップ動作後の位置
1 (最下段)	$-25 \text{ MW} < P < 25 \text{ MW}$ $P > 25 \text{ MW}$	一段上げ 二段上げ	2 3
2 (中央段)	$P < -25 \text{ MW}$ $P > 25 \text{ MW}$	一段下げ 二段上げ	1 3
3 (最上段)	$P < -25 \text{ MW}$ $-25 \text{ MW} < P < 25 \text{ MW}$	一段下げ 二段下げ	1 2

図っている。

## 5. 試験

### 5.1 工場試験

#### 5.1.1 機器単体試験

主要構成機器である結合変圧器1号、2号および調整変圧器、サイリスタ、ガスシャーレンバッファ、制御保護装置などについて工場試験を実施した。とくに、サイリスタについては66kV特殊連系装置用のサイリスタ装置のほかにサージ電圧分布試験のためのユニットと、通電限界試験のためのユニットの二つのモデル装置を試作し、分圧不平衡率、分流不平衡率などを測定し、設計値が十分余裕のある値であることを確認した。また、限界試験により、FT500A-50形サイリスタの本特殊連系装置用としての電流パターン（短時間の断続通電）に対する限界を握り、本設計に反映させ、信頼性の高い装置を製作した。次に制御装置については模擬送電線（Artificial Transmission Line: ATL）と連系装置の小形モデルとを組合せ、系統の動的な特性に応答して所要の機能を十分果すことを検証した。

#### 5.1.2 総合組合せ試験

HPL (High Power Laboratory)において、すべての構成機器を現地と同様に配置し、結線したのち、常時連系・限流・応援抑制・間けつ応援・再連系などの機能試験をおこなった。しゃ断器CB1及びCB2、サイリスタSCRの制御は制御装置前段に接点入力による模擬入力信号を与えて制御した。試験の結果、本装置が所要の機能を備えし、仕様に対して十分な余裕をもつことを検証した。図5.1は連系装置の一端に三相地絡事故を発生させて限流機能の試験をおこなった結果を示す。

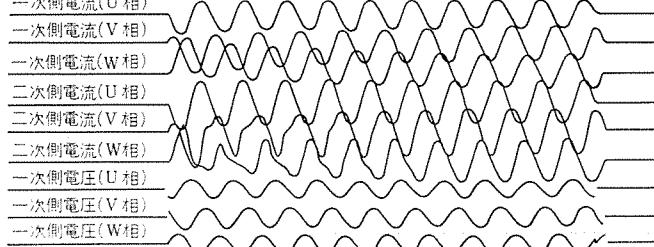


図5.1 限流試験結果(HPL)  
Test result of short circuit current suppression.

こなった結果を示すもので、このとき、通過短絡容量800MVA相当の短絡電流を10サイクル通電している。

### 5.2 現地試験

駿河変電所に機器を搬入し据付完了の後、各機器について所定の単体試験を実施したのち、総合組合せ試験（竣工試験）を実施した。

(1) 接地抵抗測定、絶縁抵抗の測定、交流耐圧試験、シーケンスチェック、インピーダンスの測定を実施した。インピーダンス測定の結果、連系装置の常時インピーダンスは3.37Ω(100MVAベースで7.75%)であった。この値は前記2.2節の基本仕様を満足している。

(2) 初充電印加試験、甲乙母線位相つき合せ試験、相回転確認をおこなったのち、常時連系試験および位相補償試験を実施し、各部の電流・電圧を観測し、また調整変圧器のタップが所定の動作をおこなうことを検証した。図5.2は位相補償試験の結果を示すもので、66kV甲母線から乙母線へP=33MWの電力を通過させ、調整変圧器のタップを、「2」から「3」へ動作させたときの各部の電流・電圧を示す。

(3) 温度上昇試験、騒音測定、サージ移行電圧の測定を実施した。

以上の試験結果はすべて良好であり、本装置が特殊連系装置として所要の機能を具備していることを検証した。

## 6. むすび

東京電力と三菱電機との共同研究により開発した66kV特殊連系装置（結合変圧器式）の概要を記した。本装置は500kV実規模装置開発のための第一歩であって、500kV実規模装置と全く同様な機能をそなえており、短絡容量の抑制、大停電の防止など系統の安定供給に役立つ500kV実規模装置製作のための経験とデータを得るため、今後長期の実運用試験を実施する予定である。本装置は昭和45年12月駿河変電所に設置して以来、順調に運転をつづけており、ここに設計・製作・試験などにご協力、ご援助下さった関係者各位に深くお礼申し上げる。

## 参考文献

- (1) 平山、馬場、山田、木下：特殊連系装置の方式開発、  
三菱電機技報、45, No. 6 (昭46)

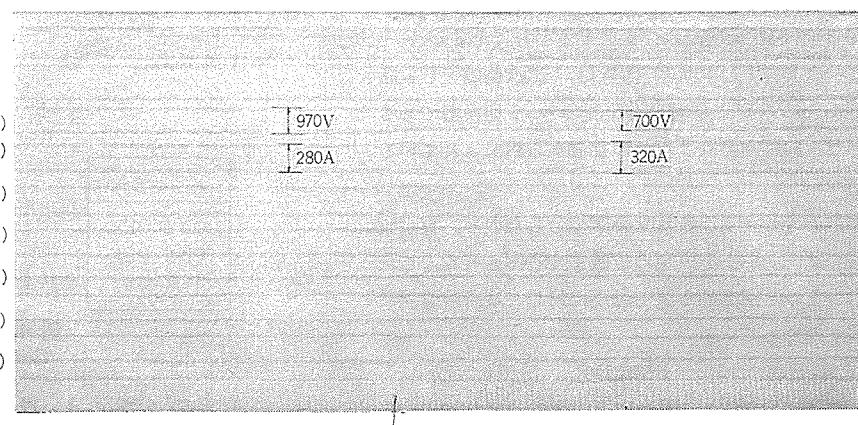
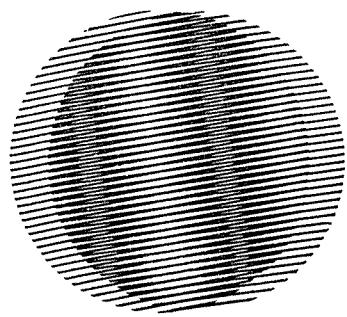


図5.2 位相補償試験結果  
Test result of phase angle difference compensation.



## 新製品紹介

### 400 Hz 単相 115 V 電動送風機

当社では、最近特に小形軽量化が推進されている電子および電気機器の冷却・換気・通風用として、400 Hz 単相 115 V 電動機駆動の送風機を開発した。

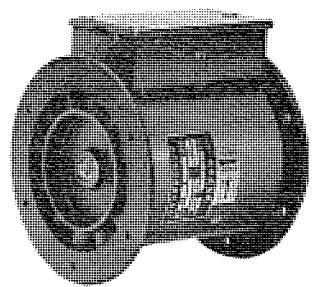
この送風機は軸流タイプであり、吸込および吐出の両側に取付フランジを有する内径 108 mm の風胴内に、この送風機用として特に設計した特殊電動機、アルミ合金製精密鋳造品のファンおよび案内羽根を有機的に配した高性能コンパクトな送風機で、業界の要請に応じた製品である。

#### ■ 特長

- (1) ファンおよび案内羽根は当社独自の設計のアルミ合金製精密鋳造品であり、理想的な送風量が得られ効率が良い。
- (2) 主要構造部品はすべてアルミ合金を使用しており、小形軽量である。
- (3) 吸込・吐出両側に取付フランジを有し、各種の取付けが可能である。
- (4) 振動・湿度などの耐環境性は NDS 規格を適用しており、信頼性が高い。
- (5) かご形誘導電動機を使用しており、通信に悪影響を及ぼす無線障害がない。

#### ■ 主要諸元

形名	TZ-F 11
静圧	30 mmAq
風量	5.2 m <sup>3</sup> /min 以上
電圧	115 V AC 単相
周波数	400 Hz
電流	2 A 以下
回転数	7,000 rpm
重量	2.3 kg
定格	連続
使用周囲温度	-50°～+70°C



400 Hz 単相 115 V 電動送風機

[名古屋製作所]

### 超大形シューブレーキ完成

クレーンの大形化に伴い、電機品についても大容量のものが要求されるようになってきた。当社ではこのたび、450 T ホットメタルクレーン用主巻 750 kW モータ（リクトル制御）の制動用として、超大形の RB-1000 E 形 押上機ブレーキ（制動トルク 1,500 kgm）を完成した。

この RB-1000 E 形ブレーキは、現在押上機ブレーキのシリーズ中最大の RB-700 A 形ブレーキ（制動トルク 700 kgm）をはるかにしのぐ記録的なもので、これによって今後のクレーン大形化に即応できるようになった。

#### ■ 特長

- (1) 構造が簡単であり、保守・点検が容易である。
- (2) ライニングの脱落防止付き。
- (3) 各ピンの連結部分はすべて無給油軸受（DU ドライベアリング）を使用している。（ピンの焼付防止）

# 新製品紹介

## ■仕様

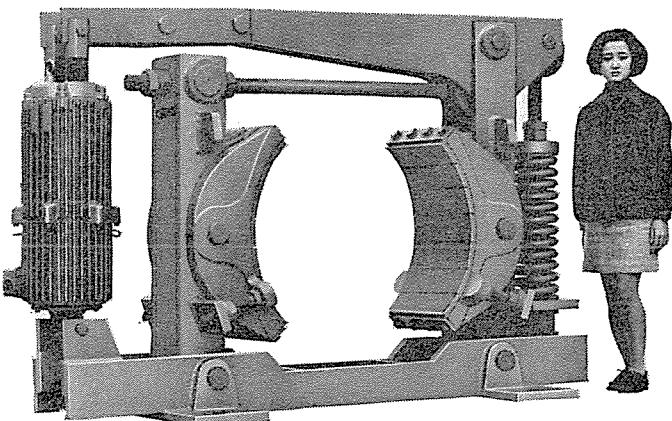
- (1) 最大定格制動トルク 1,500 kgm
- (2) 許容制動エネルギー 50,000 kgm/min
- (3) 電圧・周波数・使用率 3φ 440 V 60 Hz 60% ED
- (4) 動作時間 ブレーキ解放時 0.5 s  
ブレーキ制動時 0.7 s

## (5) 主要寸法

ドラムの寸法(直径×幅)	1,000 φ×400
センターハイト	700
外形寸法(高さ×幅×奥行)	1,740×2,500×840

## (6) 押上機の仕様

形名	NL-400 E 形 スーパリフタ	
押上力×	ストローク	400 kg × 200 mm
使用モード	ル 1 kW 2 P	
防じん	ジャバラ付き	



RB-1000 E 形 押上機 ブレーキ

[名古屋製作所]

## 受電設備の合理化を図る“MISSET システム”

最近、受電設備の合理化に伴い、一般の低圧回路の配電においても、事故時における通電の継続性の維持ならびに事故処理の迅速化・省力化が強く望まれるようになり、各方面で種々の研究が進められているが、当社ではこのたび、これらの要望を満たす装置として“MISSET（ミセッテ）システム”の開発に成功し、7月より受注活動を開始することになった。MISSETとは、Mitsubishi Synthesis Selective Tripping の略で三菱総合選択しゃ断という意味をもつていて。

### MISSET システムの構成

カスケードに組んだ一般低圧回路の主回路には MISSET システムブレーカを、分岐回路には一般的のノーヒューズしゃ断器を用いて、システムを構成している（図1参照）。MISSET システムブレーカは、電動操作式永久ヒューズ付しゃ断器（NFU-M）、漏電検出用リレー（NV-R）、選択制御装置（SO-N）の三つの部分からなっている。

### 本システムの開発により

- (1) 事故時においても、事故回路以外の健全回路には通電できるので通電の継続性を確保できる。
- (2) 事故の種類を選択して自動的に健全回路に通電するので、安全性が高まる。
- (3) 事故の種類、場所の調査および健全回路の投入が自動的に行なわれる所以、事故処理の迅速化と省力化が実現できる。
- (4) 繼続接続（カスケード）の下位にしゃ断容量の小さい安価なしゃ断器を使用することができるので、経済的な設計ができる。

などのメリットが期待され、工場設備およびビルの受電設備などに多くの需要が見込まれている。

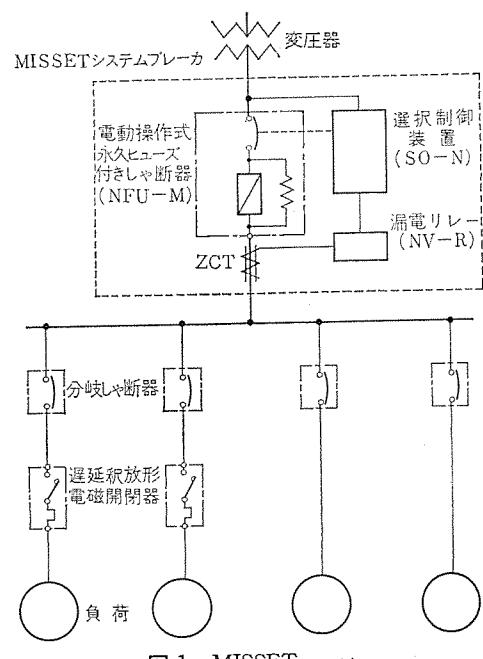


図1 MISSET システム

### ■ 本システム開発成功の要点

- (1) 短絡時の限流が非常に大きく、しかもヒューズが破壊せずに短時間で自動的に復旧し、何回もの短絡電流の通過に耐える永久ヒューズを開発したこと。
- (2) 事故の種類、発生場所を検知表示し、健全回路に再投入を指令する選択制御装置を開発したこと。

### ■ MISSET システムの動作について

図1のような誘導電動機を負荷とするシステムについて、短絡・過負荷・漏電の事故に対しその動作を示すと、

#### (1) 分岐回路短絡事故の場合

(a) 事故電流が、NFU-M の瞬時引きはずし電流未満のときは、分岐しゃ断器で事故電流をしゃ断し、健全回路はそのまま給電は継続される。

(b) 事故電流がNFU-M の瞬時引きはずし電流以上のときは、分岐しゃ断器はもちろんNFU-M もトリップするが、SO-Nにより約0.9秒後再投入され、事故回路以外の健全な回路には給電が再び継続され、分岐回路に事故のあったことを警報および表示する。

(c) この場合短絡電流が、分岐しゃ断器の定格しゃ断容量を超過する場合においては、NFU-M に内蔵された永久ヒューズのナトリウムの気化により、著しく限流された事故電流となるため、分岐しゃ断器は確実に事故回路をしゃ断する。

#### (2) 過負荷事故の場合

主回路がたとえば、臨時負荷増設等で危険な過負荷となった場合 NFU-M はトリップする。SO-N は、これを検知して過負荷事故で危険であることを警報および表示する。

もし過負荷になれば、給電停止可能な分岐回路があれば過電流検出装置を付加し、自動的にこの分岐回路をトリップさせるとともに、警報および表示させ、主回路のトリップによる全面停電を防止することもできる。

#### (3) 主回路短絡の場合

給電の連続性を最も強く希望する回路では、

(a) 短絡事故が瞬間的で直ちに復旧している場合は、給電を継続したい要望が多い。この場合 SO-N により約0.9秒後 NFU-M は再投入され、給電を継続する。

(b) 事故が復旧していない場合は、再投入しないよう阻止し、給電は断たれ主回路の短絡事故であることを警報および表示する。

#### (4) 危険な漏電事故の場合

適度な感度に整定された漏電リレーの動作により、SO-N は事故の発生を警報および表示する。この場合、長時間の漏電ならば主回路をトリップさせ、瞬間的な漏電ならば、短絡事故の場合と同様、主回路を再投入して通電の継続をはかることができるが、実際的でないでの警報および表示としている。

以上のように MISSET システムブレーカを使用することにより、主回路の継続した短絡事故でないかぎり、約0.9秒間の停電で健全回路へ再給電を行なうことが可能である。この場合特にシステム構成上注意を要することは、電動機の制御を行なう電磁開閉器が、自己保持回路で使用されている場合には、0.9秒の停電で電磁石が吸放されないよう、2秒間の遅延吸放形の電磁開閉器を使用する必要があることである。

### ■ MISSET システムブレーカーの種類と定価

種類	構成			定格		
	しゃ断器	漏電リレー	御制装置	電圧	電流	しゃ断容量
MISSET 100	NFU-M 3P 100A	NV-R 100A	SO-N	460V	100A	AC 460V 200kA
MISSET 225	NFU-M 3P 225A	NV-R 225A			225A	

くり返し短絡しゃ断性能は、定格しゃ断器容量で“0”-2分-“CO”的  
負荷を1回として5回以上耐える。

[福山製作所]

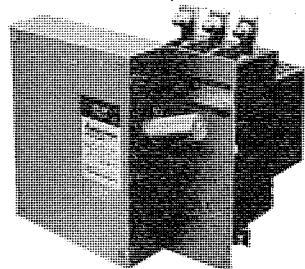


図2 三菱 ミセットシステム  
電動操作式永久ヒューズ付き  
しゃ断器 (NFU-M)

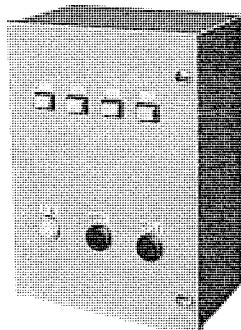


図3 三菱 ミセットシステム  
選択制御装置 (SO-N)

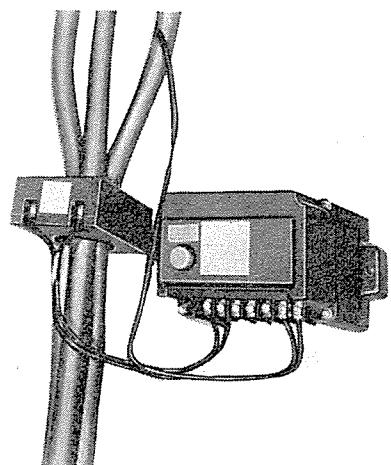
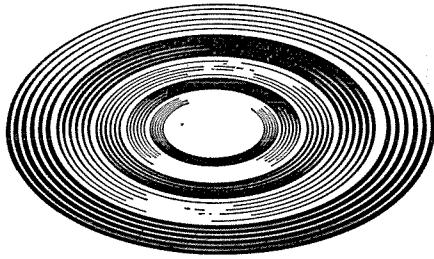


図4 三菱 ミセットシステム 漏電リレー (NV-R)

# NEWS FLASH



## わが国初の西独向けシリコン整流器完成

当社では、すでにインド、タイをはじめとし、オーストラリア、ブラジルなど、合計450MWにのぼる輸出実績を積み重ねてきたが、46年4月西独ダウケミカル社向けソーダ電解用シリコン整流装置、 $2 \times 54,337\text{ kW}$ を完成し出荷した。世界一流メーカーのひしめく西独に、わが国初の整流装置輸出を果した意義は大きく、注目される。

整流装置1台あたりの容量は、811V 33.5kA 27,169kWと記録的なものであり、整流器1キュービクルでこの容量を達成した。これは従来の大電流整流器で用いられた技術が十分に生かされたほか、つぎの特長を有している。

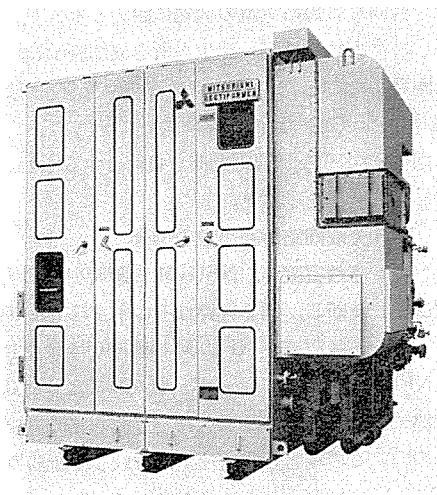
- (1) 油冷アルミニウム導体の全面的採用と、その溶接組立による強固な導体構造
- (2) 不燃油SK-2の採用によるすぐれた冷却と安全性
- (3) 特殊な導体配置によるすぐれた素子電流バランスの達成
- (4) 記録的大容量にもかかわらず、従来とかわらないコンパクトな構成
- (5) 安全に徹した絶縁構造
- (6) 磁界によるわく組の過熱を防止する導体構造とわく組構造

工場試験においても温度上昇・電流バランス・効率ともに満足すべき結果を得た。

おもな仕様はつぎのとおりである。

総容量	$2 \times 54,337\text{ kW}$
電圧	811V DC
電流	$2 \times 67,000\text{ A}$
台数	$2 \times 2$ 台
形式	屋外 レクチホーマ
整流器 結線	三相全波
ダイオード	SR 400C, 400A
冷却	送油水冷、不燃油使用
変圧器 容量	30,400 kVA
電圧	14,400/642V, 負荷時電圧調整器付き
冷却	送油水冷

[伊丹製作所]



レクチフォーマ 正面

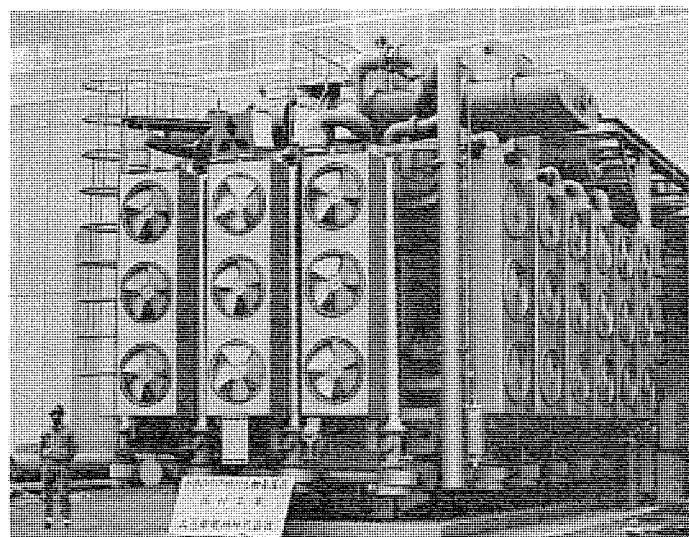
## 東京電力鹿島火力発電所68万kVA主変圧器完成

当社では、このほど、東京電力(株)鹿島火力発電所2号ユニット用680万kVA主変圧器の現地据付を完了した。この変圧器は、600MW発電機の発生電圧を275kVに昇圧するために使用されるもので、その容量680MVAは、わが国での記録品である。

定格事項はつぎのとおりである。

三相	50Hz	680MVA	外鉄形	送油風冷式
一次電圧	18.5kV			
二次電圧	287.5-281.25-275kV			

なお、全く同形の4号ユニット用主変圧器も、まもなく現地据付が完了する。写真は現地で完成した680MVA2号主変圧器の外観である。



[伊丹製作所]

68万kVA特別三相変圧器

## 本社・営業所・研究所・製作所・工場所在地

本 社 東京都千代田区丸の内2丁目2番3号(三菱電機ビル) (西 100) (電) 東京 (03) 218局2111番

大阪 営業所	大阪市北区梅田町8番地(西阪神ビル)(西 530)	(電) 大阪 (06) 343局1231番
名古屋 営業所	名古屋市中村区広井町3丁目88番地(大名古屋ビル)(西 450)	(電) 名古屋 (052) 561局5311番
静岡 出張所	静岡市伝馬町16の3番地(明治生命静岡支社)(西 420)	(電) 静岡 (0542) 54局4681番
福岡 営業所	福岡市天神2丁目12番1号(天神ビル)(西 810)	(電) 福岡 (092) 75局6231番
長崎 出張所	長崎市丸尾町7番8号(長崎底曳会館)(西 852)	(電) 長崎 (0958) 23局6101番
札幌 営業所	札幌市北2条西4丁目1番地(北海道ビル)(西 060-91)	(電) 札幌 (011) 261局9111番
仙台 営業所	仙台市大町1丁目1番30号(新仙台ビル)(西 980)	(電) 仙台 (0222) 21局1211番
富山 営業所	富山市桜木町1番29号	(電) 富山 (0764) 31局8211番
広島 営業所	広島市中町7番32号(日本生命ビル)(西 730)	(電) 広島 (0822) 47局5111番
岡山 出張所	岡山市駅前町1丁目9番地(明治生命館)(西 700)	(電) 岡山 (0862) 25局5171番
高松 営業所	高松市鶴屋町2番1号	(電) 高松 (0878) 51局0001番
新潟 営業所	新潟市東大通1丁目12番地(北陸ビル)(西 950)	(電) 新潟 (0252) 45局2151番
東京商品 営業所	東京都千代田区丸の内2丁目2番3号(三菱電機ビル)(西 100)	(電) 東京 (03) 218局2111番
関東商品 営業所	与野市上落合後原842番地	(電) 与野 (0488) 33局3181番
大阪商品 営業所	大阪市北区堂島北町8番地の1	(電) 大阪 (06) 344局1231番
名古屋商品 営業所	名古屋市中村区広井町3丁目88番地(大名古屋ビル)(西 450)	(電) 名古屋 (052) 561局5311番
福岡商品 営業所	福岡市天神2丁目12番1号(天神ビル)(西 810)	(電) 福岡 (092) 75局6231番
札幌商品 営業所	札幌市北2条西4丁目1番地(北海道ビル)(西 060-91)	(電) 札幌 (011) 261局9111番
仙台商品 営業所	仙台市大町1丁目1番30号(新仙台ビル)(西 980)	(電) 仙台 (0222) 21局1211番
北陸商品 営業所	金沢市小坂町西97番地	(電) 金沢 (0762) 52局1151番
広島商品 営業所	広島市中町7番23号(日本生命ビル)(西 730)	(電) 広島 (0822) 47局5111番
高松商品 営業所	高松市鶴屋町2番1号	(電) 高松 (0878) 51局0001番
東京機器 営業所	東京都千代田区丸の内2丁目2番3号(三菱電機ビル)(西 100)	(電) 東京 (03) 218局2111番
大阪機器 営業所	大阪市北区堂島北町8番地の1	(電) 大阪 (06) 344局1231番
静岡機器 営業所	静岡市小鹿2丁目1番22号	(電) 静岡 (0542) 82局2061番
浜松機器 営業所	浜松市上西町42の5	(電) 浜松 (0534) 63局6121番
中央 研究所	尼崎市南清水字中野80番地	(西 661) (電) 大阪 (06) 491局8021番
生産技術 研究所	尼崎市南清水字中野80番地	(西 661) (電) 大阪 (06) 491局8021番
商品 研究所	鎌倉市大船2丁目14番40号	(西 247) (電) 鎌倉 (0467) 46局6111番
神戸 製作所	神戸市兵庫区和田崎町3丁目10番地の1	(西 652) (電) 神戸 (078) 67局5041番
伊丹 製作所	尼崎市南清水字中野80番地	(西 661) (電) 大阪 (06) 491局8021番
三田 工場	三田市三輪町父々部85番地	(西 669-13) (電) 三田 (07956) 4371番
長崎 製作所	長崎市丸尾町6番14号	(西 850-91) (電) 長崎 (0958) 23局6211番
稲沢 製作所	稲沢市菱町1番地	(西 492) (電) 稲沢 (0587) 32局8111番
和歌山 製作所	和歌山市岡町91番地	(西 640-91) (電) 和歌山 (0734) 23局7231番
鎌倉 製作所	鎌倉市上町屋325番地	(西 247) (電) 鎌倉 (0467) 46局1111番
通信機 製作所	尼崎市南清水字中野80番地	(西 661) (電) 大阪 (06) 491局8021番
北伊丹 製作所	伊丹市瑞原4丁目1番地	(西 664) (電) 伊丹 (0727) 82局5131番
熊本第一工場	熊本市竜田町弓削720番地	(西 862) (電) 熊本 (0963) 62局7211番
熊本第二工場	熊本県菊池郡西合志町御代志997	(西 861-11) (電) 熊本 (0963) 54局0951番
名古屋 製作所	名古屋市東区矢田町18丁目1番地	(西 461) (電) 名古屋 (052) 721局2111番
旭 工場	尾張旭市下井町下井	(西 488) (電) 尾張旭 (05615) 3局5101番
福岡 製作所	福岡市今宿青木690番地	(西 819-01) (電) 福岡今宿(09295) 6局0431番
福山 製作所	福山市緑町1番8号	(西 720) (電) 福山 (0849) 21局3211番
相模 製作所	相模原市宮下1丁目1番57号	(西 229) (電) 相模原 (0427) 72局5131番
姫路 製作所	姫路市千代田町840番地	(西 670) (電) 姫路 (0792) 23局1251番
静岡 製作所	静岡市小鹿3丁目18番1号	(西 420) (電) 静岡 (0542) 85局1111番
中津川 製作所	中津川市駒場町1番3号	(西 508) (電) 中津川 (05736) 6局2111番
大船 製作所	鎌倉市大船5丁目1番1号	(西 247) (電) 鎌倉 (0467) 46局6111番
郡山 製作所	郡山市栄町2番25号	(西 963) (電) 郡山 (0249) 32局1220番
群馬 製作所	群馬県新田郡尾島町大字岩松800番地	(西 370-04) (電) 尾島 (02765) 2局1111番
藤岡 工場	藤岡市本郷字別所1173番地	(西 375) (電) 藤岡 (02742) 2局1185番
京都 製作所	京都府乙訓郡長岡町大字馬場小字園所1番地	(西 617) (電) 京都 (075) 921局4111番
長野 工場	長野市大字南長池字村前	(西 380) (電) 長野 (0262) 27局1101番
ラジオ 工場	尼崎市南清水字中野80番地	(西 661) (電) 大阪 (06) 491局8021番
札幌 営業所	札幌市北2条東12丁目98番地	(西 060) (電) 札幌 (011) 231局5544番

## 次号予定

### 三菱電機技報 Vol. 45 No. 7

#### 電気炉・加熱装置および船用電機品特集

##### 《電気炉・加熱装置特集論文》

- 三菱 UHP アーク炉
- トピー工業(株)向け 大容量アーク炉用変圧器  
—最近の外鉄形炉用変圧器について—
- 三菱—BBC 30 t 8,500 kW 低周波誘導炉
- パッケージ形 低周波誘導炉
- 三菱—BBC 鋳鉄用みぞ形 低周波炉
- 三菱鍛造圧延用 誘導加熱装置
- 三菱高周波熱処理装置
- 三菱サイリスタ式 誘導加熱用高周波電源装置

##### 《船用電機品特集論文》

- 船用交流発電機の最近の動向
- 最近の船用補機電動機
- 原子力船「むつ」の一次系電気設備
- 機関室無人化 高速コンテナ船用電機品
- 機関無人化船用データロガー
- 最近の機関室自動化装置
- タンカーの自動荷役制御装置
- 《普通論文》
- 84 kV プラグイン形 ガスしゃ断器
- 超音波探傷器 FD-210 形
- 電子計算機用カップルド フィルム形 記憶装置
- 60/70 kV 級 全天候形キュービクル

### 三菱電機技報編集委員会

委員長	正木茂雄	常任委員	渕武雄
副委員長	神崎邇	"	武藤正
常任委員	石川理一	"	依田功
"	上田重夫	委員	大西信治
"	宇佐見重夫	"	北垣成一
"	北川和人	"	田附和夫
"	古賀亨	"	南日達郎
"	小堀富次雄	"	秦卓也
"	鈴木正材	"	林昇寿
"	牧野六彦	"	松元雄藏

(以上 50 頁)

昭和 46 年 6 月 22 日印刷 昭和 46 年 6 月 25 日発行 「禁無断転載」定価 1 部 金 100 円(送料別)

#### 編集兼発行人

東京都千代田区丸の内2丁目2番3号

正木茂雄

#### 印刷所

東京都新宿区市谷加賀町1丁目12番地

大日本印刷株式会社

(郵便番号 162)

#### 印刷者

東京都新宿区市谷加賀町1丁目12番地

高橋武夫

#### 発行所

東京都千代田区丸の内2丁目2番3号(郵便番号 100)

三菱電機株式会社内 「三菱電機技報社」

(電) (03) 218 局 2323 番

#### 発売元

東京都千代田区神田錦町3の1 (郵便番号 151) 株式会社 オーム社書店

(電) (03) 291 局 0912 番 振替東京 20018