

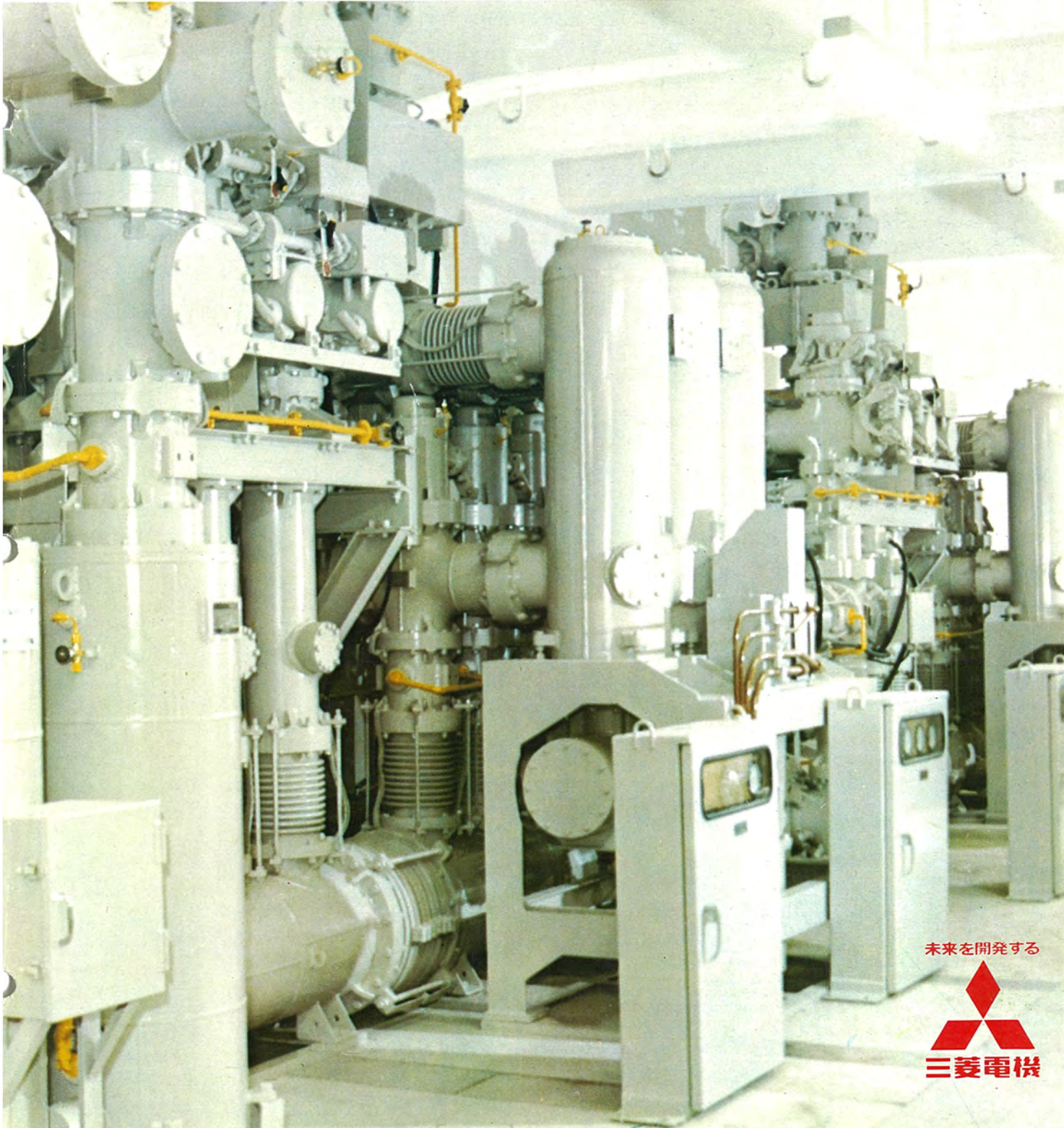
# MITSUBISHI DENKI GIHO 三菱電機技報

Vol.44 September 1970

ガス絶縁変電所特集

9

関西電力泉大津変電所納め 77kVガス絶縁開閉装置



未来を開発する





## ガス絶縁変電所特集

### 目次

#### 《特集論文》

縮小形ガス絶縁変電所 (GIS) の開発と製品化	潮 恒 郎	1113
関西電力(株)姫路・新生駒変電所におけるガス絶縁変電所の実用化試験	山本 健・音瀬 勲・森井清二・春本容正・潮 恒郎・林 幸平	1119
ガス絶縁変電所用避雷器	鎌田隆好・永井信夫・但田昭司	1127
SF <sub>6</sub> ガスの絶縁特性	新田東平・山田直也・荒畑吉邦	1133
GIS の管理上の諸問題	小鯛正二郎・高橋宏次・左中英夫・今滝満政	1143
ガス絶縁開閉装置耐震強度に関する研究	金谷正和・高橋康英・篠原資直・奥津尚宏	1152
ガス絶縁開閉用 SF <sub>6</sub> ガスシャ断器	稲村彰一・松田節之	1156
77/66kV, 110kV ガス絶縁開閉装置	森岡昭二・吉田頼弘・林 幸平	1164
ガス絶縁変電所用変成器	長野光佑・塩見 実	1171
SF <sub>6</sub> ガスの化学的特性	広岡 紘一・土橋 勝・平林庄司・玉越泰彦	1175
ガス絶縁変電所用絶縁物の製造技術	高橋康英・小鯛正二郎・太田照雄・坂井竜吉・長野光佑	1183

#### 《普通論文》

ポリビニルホルマールの分子運動	飯阪捷義・柴山恭一	1195
三菱-BBC 低周波炉による銻鉄溶解	田中 敬一・外山 隆・干場俊昌	1200
H形鋼切断・せん孔プラント用数値装置	中野宜政・石川嘉夫	1208
大阪府立放射線中央研究所納め電子線表面処理装置 (600keV 電子線照射装置)	吉田 俊夫・北川通治・宮下恭一・永井昭夫・上田和宏・広 三寿	1215
試作電子交換機—共通制御方式—	前田良雄・石坂充弘・杉山康夫・酒井勝也	1220
試作電子交換機—システムと通話路—	前田良雄・平沢茂一・石坂充弘・杉山康夫・酒井勝也・後藤正彦・甲波賢吉	1230

#### 《技術解説》

固体表面の研究とその応用	西嶋光昭・小宮啓義・伊吹順章	1237
--------------	----------------	------

#### 《新製品紹介》

日よけカバー付き屋外形三相誘導電動機シリーズ完成・三菱ソリッドステートカラーテレビ〈高雄〉2機種・ヒステリシスクラッチブレーキ新発売	1249
--	------

#### 《ニュースフラッシュ》

火力および原子用大容量タービン発電機あいついで完成・TAWG 地絡表示線継電器・LAWS 形短絡表示線継電器完成・国鉄通勤車用冷房装置	1253
---	------

#### 《特許と新案》

積算量記録装置・パルス発生装置・積算量記録装置・電動ポンプ装置	1193
---------------------------------	------

#### 《ハイライト》 “各一般紙に大きな反響の経済性” 三菱全電式ヒートポンプ冷暖房・給湯システム

表 1 関西電力 泉大津変電所納め 77 kV ガス絶縁開閉装置

当社は過密化の進展しつつある大都市内および塩塵汚損のいちじるしい臨海地帯・重工業地帯における高電圧変電所建設の問題を解決するため、かねてから超小形ガス絶縁変電所の開発を進めてきたが、昭和44年11月関西電力泉大津変電所向けとして77kV ガス絶縁開閉装置を完成し、現在順調に運転されている。この装置は、シャ断器・断路器などの開閉装置および母線を閉鎖密封して絶縁耐力の高い六弗化硫黄(SF<sub>6</sub>) ガスを充てんすることにより、絶縁に要する距離を縮小して変電所の大幅な小形化をはかり、あわせて装置の信頼度・安全性・経済性を高めるもので、当社では500kV の装置についても基本的開発を完了している。

表 2 三菱クリーンクラッド開閉装置

表 3 三菱 VKG 形真空シャ断器

表 4 三菱サイリスタレクチフォーマ





## SPECIAL EDITION FOR GAS INSULATED SUBSTATION

### CONTENTS

#### SPECIALLY COLLECTED PAPERS

Development of Compact Gas Insulated Substation.....	T. Ushio...1113
Field Operation Tests on Gas Insulated Substations in the Kansai Electric Power Co .....T. Yamamoto • I. Ootse • S. Morii • Y. Harumoto • T. Ushio • K. Hayashi...1119	
MITSUBISHI Autovalve Lightning Arrester for Gas Insulated Substation.....	T. Kamada • N. Nagai • S. Tada...1127
Characteristics of Sulphur Hexafluoride as an Insulating Medium.....	T. Nitta • N. Yamada • Y. Arahata...1133
Practical Performance for Gas Insulated Substation.....	S. Kodai • K. Takahashi • H. Sanaka • M. Imataki...1143
Study on Earthquake Resisting Strength of Gas Insulated Switchgear .....M. Kanatani • Y. Takahashi • Y. Shinohara • N. Okutsu...1152	
SF <sub>6</sub> Gas Circuit Breakers for Gas Insulated Switchgear.....	S. Inamura • S. Matsuda...1156
77/66 kV, 110 kV Gas Insulated Switchgear.....	S. Morioka • Y. Yoshida • K. Hayashi...1164
Instrument Transformers for Gas Insulated Substations.....	K. Nagano • M. Shiomi...1171
Chemical Properties of SF <sub>6</sub> Gas.....	K. Hirooka • M. Tsuchihashi • S. Hirabayashi • Y. Tamakoshi...1175
Manufacturing Technique of Insulations for Gas Insulated Substations .....Y. Takahashi • S. Kodai • T. Ota • R. Sakai • K. Nagano...1183	

#### TECHNICAL PAPERS

Molecular Motion in Polyvinylformal.....	K. Iisaka • Ki Shibayama...1195
Melting of Cast Iron with Mitsubishi-BBC Crucible Type Low Frequency Induction Furnace .....K. Tanka • T. Toyama • T. Hoshiba...1200	
Numerical Control Apparatus for Structure Steel Cutting and Drilling Plant.....	N. Nakano • Y. Ishikawa...1208
Cockcroft-Walton Electron Accelerator for Radiation Center of Osaka Prefecture .....T. Yoshida • M. Kitagawa • K. Miyashita • A. Nagai • K. Ueda • S. Hiro...1215	
Experimental Model of Electronic Switching System—Common Control— .....Y. Maeda • M. Ishizaka • Y. Sugiyama • K. Sakai...1220	
Experimental Model of Electronic Switching System—System and Speech Path— .....Y. Maeda • S. Hirasawa • M. Ishizaka • Y. Sugiyama • K. Sakai • M. Goto • K. Kouha...1230	

#### TECHNICAL LECTURE

Study of Solid Surfaces and its Application.....	M. Nishiyama • H. Komiya • S. Ibuki...1237
--	--

NEW PRODUCTS.....	1249
-------------------	------

NEWS FLASH.....	1253
-----------------	------

PATENT AND UTILITY MODEL.....	1193
-------------------------------	------

HIGH LIGHT.....	All electric-system, high performance Combined heating and Cooling unit
-----------------	---

#### COVER :

##### 1. 77 Gas Insulated Switchgear delivered to Izumi-Otsu Substation

Mitsubishi has been developing super-compact gas insulated substations to settle the troubles in constructing high voltage substations in large cities under the pressure of overcrowded population and in heavy industry zones along the seashore menaced by salt contamination on the installations, completing 77 kV switchgear of this type to deliver it to Izumi-Otsu Substation of the Kansai Electric Power Co. last November. The equipment is now operating satisfactorily.

The switchgear including circuit breakers, line switches and buses are sealed off with SF<sub>6</sub> gas having high dielectric strength, so that the distances required for insulation are reduced and the installation are made into the possible minimum. In addition, the reliability and economy are greatly heightened. The Company has completed the fundamental development on 500 kV facilities.

2. Mitsubishi "Clean Clad" switchgear
3. Mitsubishi type VKG vacuum breaker
4. Mitsubishi thyristor Rectifier

# HIGH-LIGHT

## “各一般紙に大きな反響の経済性”

### 三菱全電式ヒートポンプ冷暖房・給湯システム

さる7月23日大阪で記者発表を行なった、深夜電力利用の三菱全電式ヒートポンプ冷暖房・給湯システムは、前向きの住宅産業ブームに直結する大きな経済性をもつものとして、朝日・読売・日経などの一流紙に掲載され大きな反響を呼んでいる。

このシステムは、当和歌山製作所で開発したES形冷暖房ユニット(Electric Energy Storage System)によるもので、住宅用として8畳間2～3ベヤの冷暖房が行なえる能力をもっている。

#### ●ES形冷暖房ユニットの概要

電熱器による暖房方式は、安全・衛生・取扱いの面に他の熱源に比較して大きなメリットを持ちながら、維持費が高くなる欠点のため、住宅用としては普及率が低くなっていた。

ES形は、エネルギーの利用効率のよいヒートポンプ方式と、電力単価の安い深夜電力利用による蓄熱方式を組合わせて、他熱源とも十分対抗しうる性能を備えた、すなわち昼間電力利用の“空気熱源ヒートポンプ式冷温水機”と、深夜電力による“蓄熱ヒータ付き蓄熱槽および蓄冷用冷体機”を機能的に組合わせ、深夜電力を優先使用し、維持費の安い住宅用セントラル冷暖房システムを行なうものである。

この方式によれば、維持費を電熱器・ルームエアコンと比較して非常に安くでき、また、この種ヒートポンプ方式の欠点であった低温時の能力低下・降雪時の除霜運転などの問題点が完全に解決され、さらに550ℓ容量の槽に多量に蓄熱し、負荷変動の激しい住宅用として最適のメリットを発揮できる。

構造的には、(1)ヒートポンプ部(循環ポンプ内蔵)、(2)ヒータ付き蓄熱槽、(3)蓄冷ユニットの3部分から成り、この3部分を適当に選択、組合わせることにより、ES-32S(蓄冷熱併用形)、ES-21S(蓄熱併用形)、ES-10S(蓄冷熱専用形)の3方式が可能で、住宅の規模に応じ選択できる。

#### ●特 長

##### (1) 熱媒体として水を使用

室内側の放熱器(リビングマスター)を操作することにより、多数のへやの切り換えが容易であり、容量制御も簡単。

##### (2) 維持費が安い

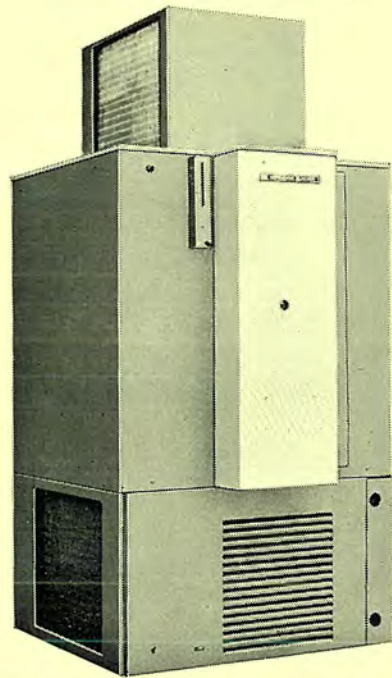
冷房はルームクーラの70%、暖房はガスストーブの80%の維持費で冷暖房できる。

##### (3) 設備が簡単

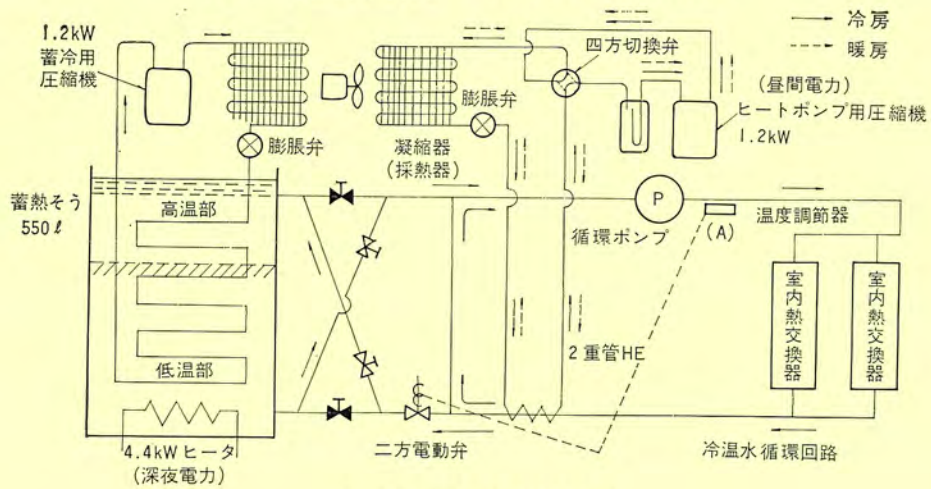
1台のES形冷暖房機を設置すればよい、したがって従来の石油温水機とチリングユニットの組合わせのごとく、別個に2台の機械を設置する必要もなく、付帯工事も少なく工事期間も短い。

##### (4) 安全、衛生、取り扱い容易

エネルギーの供給はすべて電気によるため、安全でありかつ衛生的で、操作は室内からリモートコントロールできる。



ES-32 S 形深夜電力利用ヒートポンプ式蓄冷熱冷暖房機



ES-32 S 形冷暖房サイクル図

UDC 621.316:621.315.618

## 縮小形ガス絶縁変電所 (GIS) の開発と製品化

潮 恒郎

三菱電機技報 Vol. 44, No. 9・P 1113~1118

SF<sub>6</sub>ガスの応用技術として、電力輸送における革新技術となりつつあるのが、Compact Gas Insulated Substation (GIS) である。当社は、豊富なガスしゃ断器についての実績と経験にもとづいて、かねてよりこの新技術の開発に力を入れ、都市過密化対策としての66kVより154kVに至る変電設備の縮小化に対してはすでに実用化段階に入り、また、その効果のとくに顕著な550kV GISの実用化を旨として努力をつづけており、ほゞその開発を完了した段階である。

当社における開発製品化の概要とその技術的意義について述べる。



UDC 621.315.618

## GISの管理上の諸問題

小鯛正二郎・高橋宏次・左中英夫・今瀧満政

三菱電機技報 Vol. 44, No. 9・P 1143~1151

SF<sub>6</sub>ガスを使用したガス絶縁開閉装置 (Gas Insulated Substation GIS) における管理上の諸問題としては、比較的特殊なガスを絶縁および消弧媒体としていることから、ガスの密封技術、ガス漏れの測定技術に関する管理上の諸問題と、SF<sub>6</sub>ガスと分解ガス、水分との混合、およびそれらを除去する吸着剤の問題があげられる。

この論文では、それらについて種々の理論的、実験的な考察をするともに、昭和40年来の数百台にのぼるガスしゃ断器などの製作実績、フィールドの運転実績より、各種の実測デー



UDC 621.316:621.315.618

## 関西電力姫路・新生駒変電所におけるガス絶縁変電所実用化試験

山本 健・音瀬 勲・森井清二・春本容正・潮 恒郎・林 幸平

三菱電機技報 Vol. 44, No. 9・P 1119~1126

関西電力と三菱電機とは共同でガス絶縁変電所 Gas Insulated Substation (GIS) の実用性を確認するために長期運転試験を実施している。77kVは昭和43年4月から姫路変電所において約2年間の試験を完了し、154kVは昭和44年10月から新生駒変電所において試験をつづけている。いずれもガス絶縁変電所の主要部となる開閉装置を、屋外で多ひん度負荷開閉を行なう回路に使用し、長時間にわたりガスの状況、各機器の動作特性の記録を求めるものである。試験の結果は満足すべ



UDC 621.316.5-752

## ガス絶縁開閉装置の耐震強度に関する研究

金谷正和・高橋康英・篠原資直・奥津尚宏

三菱電機技報 Vol. 44, No. 9・P 1152~1155

最近、送電設備の高压化、変電設備のコンパクト化により非常に複雑な構造をもった電力機器が出現した。ガス絶縁開閉装置 Gas Insulated Switchgear (GIS) もこの一種であり、これらの構造物の耐震検討は重要さを増すと同時に、困難さを増している。当社でもこの問題を鋭意研究中であるが、GISについても理論的、実験的のあらゆる角度からその耐震性を検討し、その優秀さを立証したので、ここに検討法と検討結果を報告する。



UDC 621.316.933.048:621.315.618

## ガス絶縁変電所用避雷器

鎌田隆好・永井信夫・但田昭司

三菱電機技報 Vol. 44, No. 9・P 1127~1132

変電所の縮小化、保守の省力化等のためにガス絶縁変電所 Gas Insulated Substation (GIS) が実用化されているが、この変電所に使用する接地容器に収納された66~525kV系統用の避雷器の開発を行ない、一部を実系統に設置した。従来、避雷器使用上の問題として汚損や外界の影響による特性変化があったが、本避雷器はこれらを完全に解決した。雷電圧保護上もBILに十分裕度があるばかりでなく、被保護機器に密接して取付けられるので効果が大きい利点がある。なお、この避雷器に使用されているSF<sub>6</sub>ガス消弧式のギャップは初めてのものであり、すぐれた



UDC 621.316.57.064.242

## ガス絶縁開閉装置用SF<sub>6</sub>ガスしゃ断器

・稲村彰一・松田節之

三菱電機技報 Vol. 44, No. 9・P 1156~1163

昭和40年、わが国ではじめてSF<sub>6</sub>ガスを使用した二重圧力式の大容量SF<sub>6</sub>ガスしゃ断器が納入されて以来、5年余り経過した。この間、パツプア式中容量ガスしゃ断器、さらに二重圧力式の大容量ガスしゃ断器の新シリーズも完成され、これらのがいし形SF<sub>6</sub>ガスしゃ断器の納入実績は、昭和45年6月末現在750台にもなっている。

これらの豊富なフィールド実績をもとに開発されたガス絶縁開閉装置用SF<sub>6</sub>ガスしゃ断器は、その基本原理をがいし形のそれをそのまま受けついでいるので、十分な信頼性を有する



UDC 621.315.618

## SF<sub>6</sub>ガスの絶縁特性

新田東平・山田直也・荒畑吉邦

三菱電機技報 Vol. 44, No. 9・P 1133~1142

SF<sub>6</sub>中における長ギャップの絶縁破壊現象について、電離係数 $\alpha$ および電子付着係数 $\eta$ の電界依存性に注目した理論的な取扱いを空気と比較しながら行なった。この結果、SF<sub>6</sub>中の長ギャップの放電開始電圧に対する有用な理論式を誘導した。数種類の電極構成に対して、各種の電圧波形に対するSF<sub>6</sub>ガスの絶縁破壊の特性が実験的に求められ、理論と比較された。その結果、測定された放電開始電圧は、球および棒ギャップでは4気圧以下の比較的低い気圧領域では理論値に一致し、4気圧以上の高気圧領域では理論値よりも低下することが明らかにされた。さら



UDC 621.315.5.048:621.311.4

## 77/66kV, 110kVガス絶縁開閉装置

森岡昭二・吉田頼弘・林 幸平

三菱電機技報 Vol. 44, No. 9・P 1164~1170

ガス絶縁開閉装置 Gas Insulated Switchgear (GIS) はすでに実用段階にあり、当社では関西電力および中国電力に納入、いずれも順調に運転されている。本文では現在製作中のものも含めて、この装置の概要と構成および各要素、構造について記している。



UDC 621.314.21.048

## ガス絶縁変電所用変成器

長野光佑・塩見 実

三菱電機技報 Vol. 44. No. 9・P 1171~1174

ガス絶縁変電所 Gas Insulated Substation (GIS) のもついろいろの特長を効果的に発揮させるためには、計器用変成器も従来形のを単に接地ガス容器に収納するだけでは不十分で、おのおの従来形式から脱皮した新しい構造のものを開発する必要がある。本文では、今回GIS用に開発した計器用変成器について、110~500kVコンデンサ形計器用変圧器、66~110kVエポキシ樹脂モールド計器用変圧器および樹脂モールド変流器について詳述した。



UDC 621.74:621.368

## 三菱-BBC低周波炉による鑄鉄溶解

田中敬一・外山 隆・干場俊昌

三菱電機技報 Vol. 44. No. 9・P 1200~1207

鑄鉄溶解にはこれまで主としてキューボラが使用されてきたが、近年低周波誘導炉の発達につれてこれを採用する工場がふえてきた。当所鑄造工場でも、三菱-BBC低周波炉を設置して溶解を行なっているが、経済的にも、公害防止上でも良好な結果を得ている。とくに当所の場合、比較的例の少ない薄肉鋳物を対象としたF C15、20等普通鑄鉄の溶解に適用しているが、こゝでは低周波炉を使用した結果判明した低周波炉の効果と、実際の操業について述べ、今後低周波炉の設置を計画される場合の参考に供したいと考える。



UDC 621.315.618:543.27

## SF<sub>6</sub>ガスの化学的特性

広岡紘一・土橋 勝・平林庄司・玉越泰彦

三菱電機技報 Vol. 44. No. 9・P 1175~1182

アーク、コロナ、熱に対するSF<sub>6</sub>ガスの化学的特性に関して、われわれが新たに得た知見を述べる。アークに関しては、実験およびモデルによるガス成分の分析、絶縁材料選別のためのふい気の検討、コロナに関しては各種注形材料のコロナ劣化について、これまでにあまり知られていない熱に関しては、その化学変化過程と各種材料に与える影響について述べる。



UDC 621.9-5

## H形鋼切断 せん孔プラント用数値制御装置

中野宜政・石川嘉夫

三菱電機技報 Vol. 44. No. 9・P 1208~1214

わが国の建設部門は、目ざましい発展を続けており、その技術開発も一段と進歩してきた。特に建設用鋼材については、厚板・形鋼の一部にかわって、H形鋼の需要が年々飛躍的に増大してきている。

しかし、加工面において専用機に乏しく、その省力化による生産価格の低減と高精度化が、強くさばれてきている。そこで一連の加工工程を、合理的かつ能率的におこなわしめる当社のMELDAS-3200を使用したH形鋼切断装置と、MELDAS-4300を使用したH形鋼せん孔機により、H形鋼の送り込み・切断・フランジとウェブの穴あけ、および送り出しを一貫しておこなう専用プラントを、(株)大同機械製作所にて開発され、当社はその電機品を製作納入した。



UDC 621.315.61

## ガス絶縁変電所用絶縁物の製造技術

高橋康英・小鯛正二郎・太田照雄・坂井龍吉・長野光祐

三菱電機技報 Vol. 44. No. 9・P 1183~1192

電気機器には近年エポキシ注型樹脂を主体とする製品および部品が数多く使用されつつある。ガス絶縁変電所、Gas Insulated Substation (GIS) 用機器の絶縁物もそのおもなものとえよう。この場合、とくに高電圧であることやArceed SF<sub>6</sub>ガスが絶縁物に対して特異な挙動を示すことなどから、注型材料は非常に重要なものとなる。本報告ではGIS用絶縁物の製造技術に関する概要と、この絶縁物の製造過程および使用条件下における内部応力あるいは熱応力の定量的解析について、実測および計算機等種々の方法で研究した成果とをあわせて報告する。



UDC 621.384.65

## 大阪府立放射線中央研究所納め電子線表面処理装置 (600keV電子線照射装置)

吉田俊夫・北川通治・宮下恭一・永井昭夫・上田和宏・広 三寿

三菱電機技報 Vol. 44. No. 9・P 1215~1219

大阪府立放射線中央研究所納めの“電子線表面処理装置”が完成した。本装置は、600keV、3mAの全密閉形電子線照射装置で、SF<sub>6</sub>ガス絶縁により非常に小形であること、600kVの高電圧を発生する高電圧発生器と電子線照射器が分離されて両者を超高電圧ケーブルで接続されていること、電子銃の交換がきわめて簡単であることなど著しい特長を有している。本文ではその特長とする構成と得られた性能の概要について報告する。



UDC 678.713:530.827

## ポリビニルホルマールの分子運動

飯阪捷義・柴山恭一

三菱電機技報 Vol. 44. No. 9・P 1195~1199

ポリビニルホルマールは、ガラス転移温度以下で耐衝撃性および耐摩耗性の良い高分子として知られている。この報文の目的は、ポリビニルホルマールについて、ガラス状態での高分子の強じんさと関係のある低温分子運動を明らかにすることである。ホルマール化度の異なる部分酢化ポリビニルホルマール、および各種重量のフェノール樹脂を添加した市販のポリビニルホルマールについて、動力学的およびNMR測定を行なった。ホルマール結合は低温での分子運動を複雑にし、この運動は橋かけによって影響されないことを知った。低温での分子運動は、局所平衡配位の近傍での主鎖の振動によるものであり、ポリビニルホルマールの強じんさと関係があるものと考えられる。



UDC 621.395.345:654.152

## 試作電子交換機——共通制御方式——

前田良雄・石坂充弘・杉山康夫・酒井勝也

三菱電機技報 Vol. 44. No. 9・P 1220~1229

近年、電子部品・システム技術等のめざましい発展により、電子交換機が実現可能となった。筆者等は電子交換機の問題点の探求および関連技術の研究開発を行なうために、研究試作を行なった。本文では、まず中小容量交換におけるSPC方式の問題点・時分割交換におけるSPC方式の問題点を述べ、次に試作機のパラメータと特長、ハードウェア・ソフトウェアについて述べる。この研究試作により

- (1) 交換処理のハード・ソフトへの配分が明確となった。
- (2) 交換機の機能の融通性はソフトウェアのBuilding Block化で可能である。という結論が得られた。



UDC 621.395.345:654.152

試作電子交換機——システムと通話路——

前田良雄・平沢茂一・石坂充弘・杉山康夫・酒井勝也・後藤正彦  
甲破賢吉

三菱電機技報 Vol.44. No.9・P 1230~1236

最近の情報技術の発達が目ざましい。筆者等はこのような時代の背景の中で、足がかりをつかむ一つの手段として電子交換機に着目し、関連技術の研究開発も含めて試作を行なった。本文ではその概要を述べ、通話路の特性、磁わい遅延線メモリーなどについて述べた。試作機の性能は、一部を除きほぼ満足すべき結果が得られ、有効なデータの蓄積ができ研究開発の指針を与えるのに役立っている。なお本試作交換機は4線式PAM方式。サンプル周波数20KHzの蓄積プログラム制御によるもので、特殊な回路を除いてほとんどをIC化しており、隣接漏話、雑音とレベルとも-6.4dBm以下の値が得られている。

UDC 621.382.3:538.54.001.1

固体表面の研究とその応用

西嶋光昭・小宮啓義・伊吹順章

三菱電機技報 Vol.44. No.9・P 1238~1248

近代的技術の進歩に伴ない固体表面の研究は固体電子素子、薄膜気相成長、触媒技術、材料使用技術、超高真空技術、宇宙関連技術等の工業面での実的な応用という点からも、基礎科学という点からも非常に重要な分野となってきた。

最近の表面科学の研究の進歩は目ざましく、筆者らは目下開拓されつつある表面物性観測技術である低速電子線回折、低速電子線散乱、オージェ電子分光、低速電子線によるイオン放出、光電子放出効果、電子磁気共鳴、トンネル分光、表面2次元伝導について各分野での代表的な研究とその応用について述べ、表面研究に関する現状の解説とする。

## 縮小形ガス絶縁変電所 (GIS) の開発と製品化

潮 恒 郎\*

## Development of Compact Gas Insulated Substations

Itami Works Tsunero USHIO

Innovated technique in the power transmission as application of  $\text{SF}_6$  gas is the construction of compact Gas Insulated Substations (GIS). Based on a good number of practical results and rich experience on gas circuit breakers, Mitsubishi has made strenuous efforts in the development of this new engineering. As a countermeasure to tide over the hazzard arising from the overpopulated cities, the company has been successful in reducing the size of substations ranging from at 66 kV to 154 kV and bringing the new installations into practical use. Also a new goal is aimed at to realize 550 kV GIS, which is the most effective to renovate the utility undertaking, and the development is nearing the completion. This article outlines the achievements and mentions the technological significance of them.

## 1. まえがき—電力輸送における技術革新, GIS—

大気の絶縁に依存する架空送電線にかわってケーブルがあるのと同様に、いっさいの電力輸送機器の空気絶縁部分を空気よりも高性能な絶縁物に置き換えて空間の縮小化をはかるということは、当然、昔からいろいろと考えられたことである。古くは絶縁空間を固体絶縁物をもって充てん(填)し、あるいは、液体(絶縁油)を充満して機器導体の露出部分を排するという試みも、かなり高電圧まで行なわれたことがあるが、経済性・作業性・信頼性などに難点のあるまま、その適用範囲がきわめて限られていた。

近年における社会情勢の急速な変貌は、あらためて電力機器の大気絶縁への依存の困難さを認識させ、新技術導入の必要性が急に高まってきた。

まさに、この時期において、 $\text{SF}_6$ ガスの適用技術、特にしゃ断器への適用が急速かつ広範に普及しつつあったことはまことに大きな福音であった。 $\text{SF}_6$ ガスは、数あるハロゲン系負性ガスとともに電気絶縁気体として登場したのはきわめて古い話である。しかし、たまたま見出されたその格段に卓越したアークしゃ断性能から、このガスの絶縁材料としての性質もさることながら、電流しゃ断アークのプラズマ材料として比肩すべきものを見ない最適なものであることが明らかとなり、しゃ断器への適用が急速に進んだのである。

しゃ断器における実用経験の蓄積のおかげで、その技術の拡張として、その他の機器類も含めて大気絶縁のかわりに $\text{SF}_6$ ガスを適用することは比較的容易であった。とくに、しゃ断器の消弧媒質と共通のガスで絶縁空間を充てんすることができるということは著しいメリットである。その実用性・信頼性・経済性などの点から、 $\text{SF}_6$ ガスの適用において、はじめて大規模な大気絶縁の排除と空間の縮小化という現代の要求に、合理的に答える工業的手段が得られることとなった。

周知のように、当社は早くから $\text{SF}_6$ ガスの開閉機器への適用については、独自の自主技術の確立に努力を傾注し、わが国における唯一の先発メーカーとして、特色あるガスしゃ断器の製品系列を完成したが、昭和40年その第1号機の納入以後、そのすぐれた性能と実用性が漸次立証されるとともに、生産実績も急速に伸び、すでに、超高圧しゃ断器100台を含めて、ガスしゃ断器生産1,000台の記録

にせまりつつある。一方では、上述のようなこの技術の応用拡張については、ガス絶縁変電所 (Gas Insulated Substation, GIS) の名称のもとに、昭和38年ごろより精力的な開発研究をつづけ、その実用化への途を開いたが、この新技術は予想以上に需要家各位の関心と注目を集め、今や電力輸送における大きな技術革新として発展しつつある。

変電所諸設備の大気絶縁を排し、その画期的な縮小化を目ざすこの技術が、現在適用されるのは、変圧器や回転機をのぞいて主として開閉装置類に対してのみであるので、現段階ではGISは、Gas Insulated Switchgear というべきかもしれないが、それは在来のような単独機器の組合せではなく、接地容器で完全におおわれ、総合一体化されたシステム機器すなわち Grounded Integrated System であり、その効果はまさに Giants In Shell (殻に閉じ込めた巨人) とも称すべきものであろう。

## 2. GISの特長とその適用

## 2.1 GISの一般構造

図2.1はGISの一般的な構造を説明している。これは複母線1しゃ断器構造の525 kV GISの一回ユニットの略図で、相分離構造をとっているが、しゃ断器・断路器・母線・接続導体はすべて課電部を中心においた同心円筒としてつくられ、課電部は完全に閉鎖密封

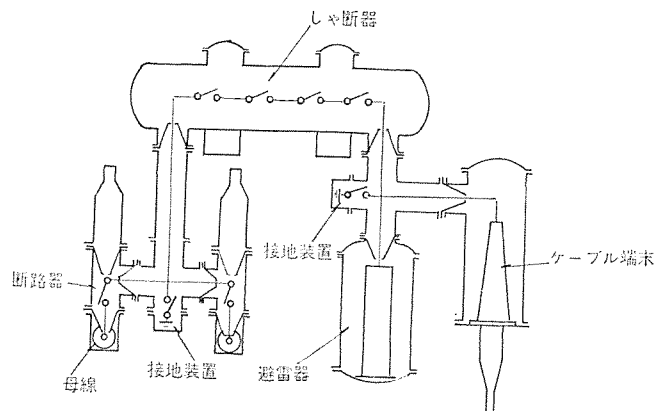


図 2.1 500 kV GIS 断面略図 (二重母線, 相分離形)  
Cross section of 500 kV GIS (Double bus, isolated phase type).

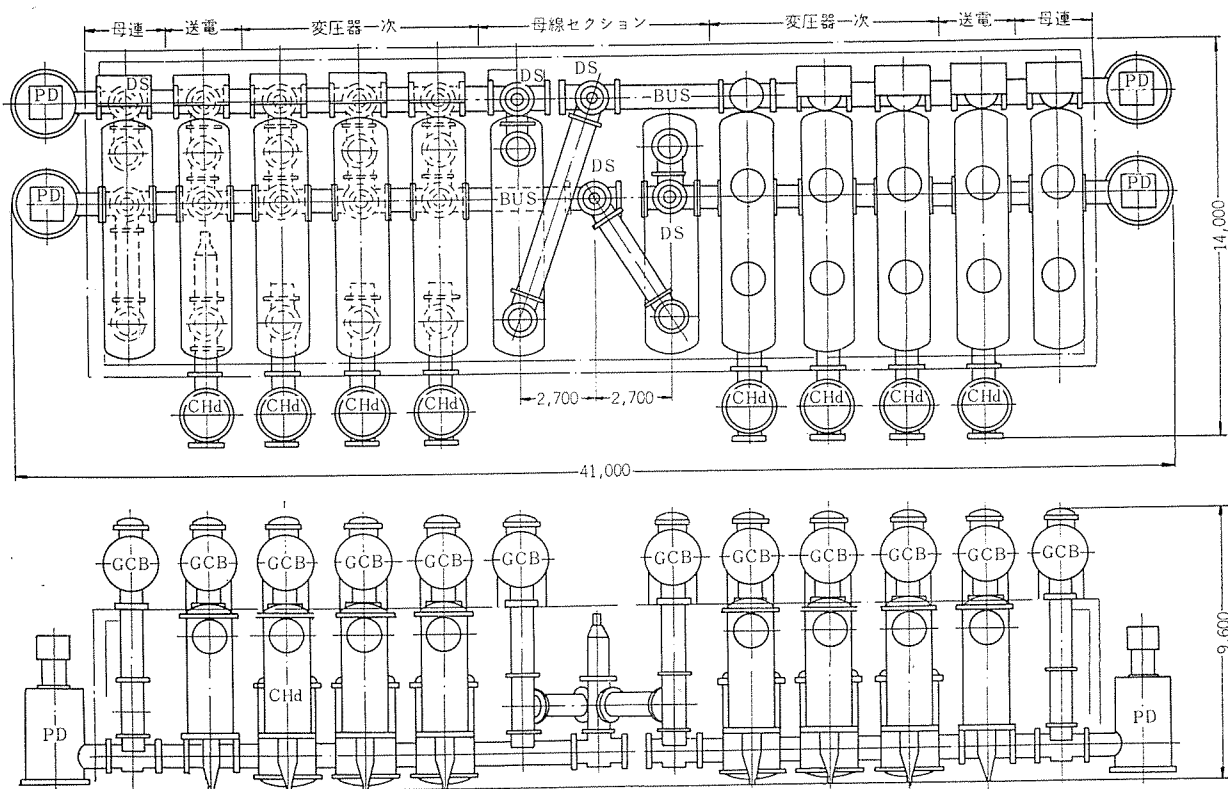


図 2.2(a) 500 kV GIS の一例  
Example of 500 kV GIS.

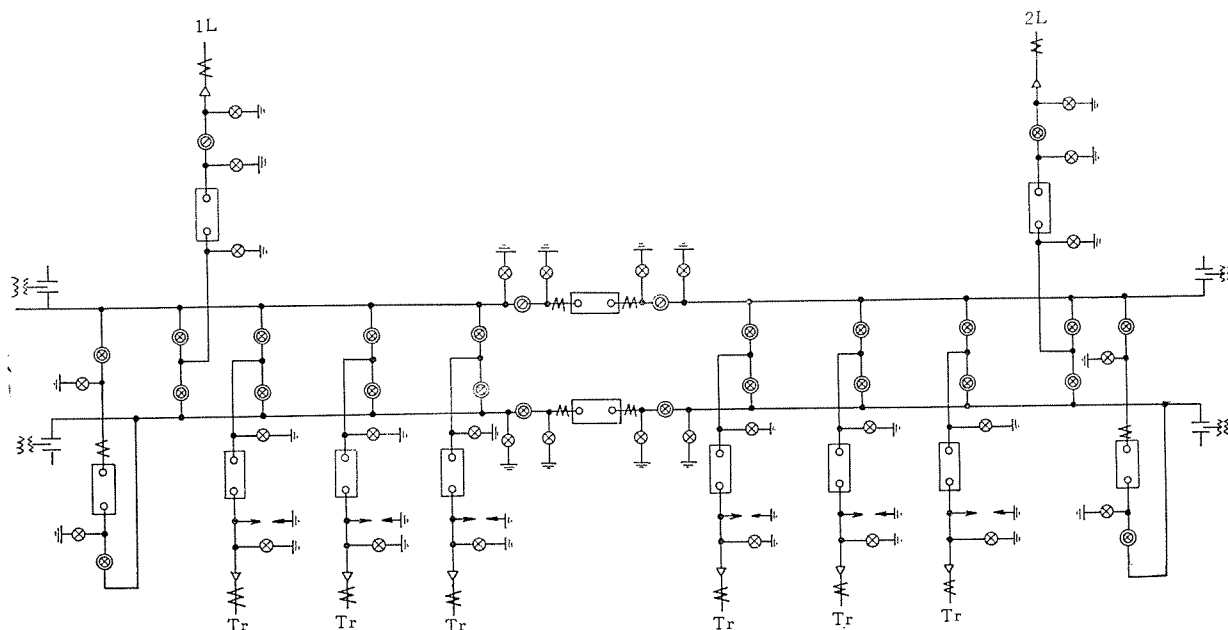


図 2.2(b) 単線図  
Single line diagram of 500 kV GIS.

されている。外部送電線との結合は一般には地中線が用いられ、変圧器とは直接結合または地中線よっての結合が行なわれるが、とくにブッシングを用いて架空線と結合することも可能である。GISを従来の変電所開閉装置とくらべるとつぎのような関係になる。

#### 従来の変電所

- (1) 大地および鉄構
- (2) がいし
- (3) 大気

#### GIS

- 接地されガス容器となる金属外被  
内部の課電部を支持する固体絶縁物  
SF<sub>6</sub>ガス

この方式をとえば、図 2.2(b) に示すような構成の 550 kV 変

電所に適用した場合、その一相分は同図(a)に示すような姿で作られる。したがって在来方式でつくられる場合きわめて広大なひろがりを持つ大規模な変電設備も、極端に縮小された容積の中に、完全なメタルクラッドパイプのシステムとして集約される。

#### 2.2 社会環境の要請と GIS の特長

工業化の進展に伴い、いろいろな社会的要求がきびしくなりつつあることは、電力輸送設備に対しても例外ではない。性能・信頼性・経済性という三原則についての要求がきびしく追求される一方、用地難に伴う設備縮小化、人手不足に伴う設備建設および運転保守

の省力化、無公害設備の要求、高度の安全性の確保といった一連の社会的要請が、今や用益者にとっても製作者にとっても、最大の関心事となりつつある。このような現代的な要求をスマートに解決しうることにおいて、GIS はまさに 70 年代の電力技術における一つの頂点となるであろう。ほとんど説明を要さないであろうが、これらについて簡単に述べればつぎのとおりである。

#### (1) 性能

SF<sub>6</sub>ガスしゃ断器の抜群の優秀な性能は周知のところであるが、SF<sub>6</sub>ガスのすぐれた安定した絶縁特性とともに、しゃ断性能・通電能力・低サージ特性などについてかつてない高性能機器が実現された。とくに、このガスを同時に避雷器の消弧媒体として共用することによって、従来型に見ない高性能の避雷器が組合されることとなったのは、まさに錦上添花をそえるものである。

#### (2) 信頼性

GIS の高い信頼性はまず、完全な密閉システムであるという点に集約されており、機能的に重要な導電部・絶縁部、とくに接触部などがすべてガス中に密閉されて外部ふんい気の影響からしゃ断され、長期にわたり高い信頼度を維持していることは、すでに当社のガスしゃ断器の実用経験によって明らかに実証されている。さらに、GIS の場合、容器がいっさい接地された金属であるため、対地間や極間の暴露絶縁物に対するふんい気汚損の問題がいっさいないので、気象条件にもとづく塩害・霧害・雪害などの諸問題が一挙に解決されている。この密閉システムの高信頼性を実現させているうらには、SF<sub>6</sub>ガスの安定性を長期間にわたって維持しようという重要な技術的裏付けがあるのである。

#### (3) 縮小化

大気絶縁のガス絶縁化は、とくにその同心円筒配置によって著しい占有空間の縮小化をもたらす。ポインティングベクトルの広がりに関しては、理論的にはおそらく数千分の一に局限できることとなるが、現実には、金属部分・付帯設備の構造的制約条件や、作業・保守空間の確保のため、縮小化率は高電圧になるほど著しく、低電圧ではあまり縮小化しにくい。俗に縮小化率としては、

$$\text{空間縮小率} = 10 / (\text{運転電圧 kV 値})$$

すなわち、77 kV ではおよそ 1/7、500 kV では 1/50 になるといわれる。これはもちろん、GIS 化された開閉装置部分のみのことであって、変電所全体としては、変圧器や線路との結合から制約されて、縮小効果はかなりうすめられてしまう。この点の追求が、経済効果ともからんで今後の大きな課題である。

#### (4) 省力化

GIS の大きな効果は、その据付・運転・保守の省力化にある。まず、工場において組み立て、ほぼ完全に試験されたものが現地に分割輸送され、据付の工期、手間は現地の状況にもよるが、著しく短縮省力化できる場合がある。さらに、GIS は既述の密閉システムによる高信頼性によって、運転・保守の無人化、無保守化を目指した機器である。現実には、その方向を指向したガスしゃ断器においてすでに、実績が積みあがっているが、GIS においてその効果はさらに顕著に評価されることとなるであろう。

#### (5) 無公害および安全性

現在関心のまどである公害については、この種の電力用開閉装置では、騒音・排気ガス・コナノイズがある。とくに、騒音については、空気しゃ断器が近年苦汁をなめてきた問題である。密閉システムである GIS が、これらの問題をすべて解決したことはその社会性におい

てきわめて大きな意義がある。さらに、完全に接地金属でおおわれ、導電部の暴露や有害排気のいっさいない構造は、安全上理想的なものとといえるであろう。

#### (6) 経済性

一般的に上述のような社会的効果を考えれば、GIS の経済性は今後次第に高く評価されるようになるであろう。いうまでもなく、機器コストは従来方式に比べればかなり高価につくので、現状では用地費あるいは建物費とのバランスにおいて、総合的経済性を考えた場合、その成立する適用範囲はかなり制約される。将来における標準機器としての製作面でのコスト改善もさることながら、現在実用化の初期において当然、在来方式の延長として考えられている仕様面、システム構成面における過剰や不合理が、GIS 本来の特長を完全に発揮する形に合理化集約されてゆけば、前途は非常に有望である。とくに、現在の「空気はただである」という経済計算が、わが国ではもはや成立しなくなりつつある社会環境に應える GIS の効果は注目される。

### 2.3 GIS 適用の二つの方向

当面、GIS の適用がその効果を大きく発揮すると考えられる方向は大別して二つある。

第一は、都市の過密化対策としての都心ならびに周辺地域における変電設備の縮小化ならびに無公害化である。この場合、系統電圧は 66 kV より 275 kV に至るまで、給電系統の事情によって異なるが、現在緒についた GIS 実用化の例はいずれもこの場合である。過密地域に変電所を新設する場合のメリットはいくまでもないが、とくに電力需要密度の増加に伴い、既設変電所に今までよりもはるかに高い送電電圧の導入をはかる場合、GIS の適用はほとんど決定的な解決策となる。最近、広島市内で 22 kV の既設変電所の建屋に、そのまま 110 kV の GIS を設置したのはまさにその良い例である。

第二は、端末大電力発電所における超高圧・超々高圧への電力吸上げ設備への適用である。火主水従の系統から原子力・揚水の組合せへと基幹系統が大きく変貌しつつある現在、海岸原子力や火力でのとくに超々高圧への結合にあたって、変電所建設の用地問題もさることながら、過酷な塩害問題への対策として GIS の適用は場合により唯一の技術的手段とすら考えられる。一方、揚水発電所において超々高圧開閉装置の地下設置を考える場合、トンネル掘削量の減少は、GIS 適用のメリットを決定的ならしめる。エネルギー供給体制の革新と超々高圧の導入との接点にあって、以上のような GIS の大規模な適用こそ、この技術革新の当面の最大のターゲットといえよう。

### 3. 当社における GIS の研究開発

ガスしゃ断器の実用化にあたっての豊富な経験にもとづいて、当社における GIS の研究開発は昭和 38 年頃より本格的にスタートしたが、その基礎的な諸問題はすでに十分な研究の蓄積があったので、機器としての開発製品化は比較的短時日の間に進展した。しかしながら、システム機器としての実用化への段階において、電力会社各位、とくに関西電力株式会社の卓見とご理解のもとに、絶大なご援助とご協力を賜ったことは、研究開発の促進に非常な力となったことを銘記している。その成果として、昭和 43 年春、姫路変電所において 77 kV の GIS がわが国最初の実系統運転に入ったが、これがまさに GIS 時代の幕明けとなった。

その実績にささえられつつ、当社における GIS の実用化研究は 2.2 節にも述べたすう勢とも関連して、二つの方向を指向しつつ展

開してきた。すなわち、66 kV より 154 kV までの都市過密化対策としての GIS の実用化はすでに完全に実用化段階に入り、一方、超高压超々高压における実用化を旨としての研究開発は、現在鋭意展開中である。以下、当社における製品開発の要点について簡単に述べよう。

### 3. 1 GIS の構成機器

#### (1) シャ断器

GIS においてもその心臓部はシャ断器である。当社は ガス シャ断器として単一圧力方式の SFL 形と二重圧力方式の SFH 形とを標準として持つが、その豊富な経験をそのまま生かして、GIS 用シャ断器にも、これら標準機器の消弧室および操作機構を適用している。ただ、適用定格の実情から必然的に、154 kV 級までは単一圧力方式、220 kV 級以上では二重圧力方式の適用が一般的となる。また、標準シャ断器の場合には耐塩がい管の製作能力の限界から、168 kV シャ断器は 2 点シャ断となるが、154 kV GIS のシャ断器は外部絶縁の制約条件がないため一点シャ断が可能であり、縮小化と経済性に大きなメリットがある。操作機構は二重圧力方式では標準の油圧方式、単一圧力方式では空気方式、油圧方式のいずれも採用できるようになっているが、縮小化に対しては後者のメリットは大きい。550 kV 用の場合には、当然、標準機器とどうよう投入抵抗がとりつけられる。

GIS 用シャ断器における技術的問題は接地容器内の絶縁空間と絶縁物の信頼性の問題に集約されており、これについてはあらゆる方法で試験と評価をくりかえし、550 kV に至るまで十分な自信を得ている。図 3. 1 は 550 kV GIS 用シャ断器 (35,000 MVA 4,000 A, 2 サイクル、投入抵抗付き 4 点シャ断、二重気圧方式) シャ断試験の状況である。

#### (2) 断路器

在来方式の空気絶縁断路器にかわって、金属筒外被中の同心配置の直線運動をする断路器で、基本的には 66 kV より 550 kV に至るまで同一構造である。操作にはその適用状況に応じて、空気・油圧・電動・電動ばねのいずれも適用できるように開発された。もちろん、非常の場合の手動も可能である。在来方式の断路器はその開放空間が遠くから目視できるという点にかなり本質的な特長があり、その点を機能的に犠牲にするため、GIS 用断路器の動作は高度の信頼性を要求される。技術上の重要点は、短い開放空間の絶縁信頼性の確保のための電界制御の設計と、支持絶縁物の信頼性の確認にあった。

なお、断路器には保守点検に必要な接地開閉器が標準的にとりつけられるようになっている。

図 3. 2 は 550 kV GIS 用断路器 (4,000 A) の単体耐電圧試験中の写真である。

#### (3) 避雷器

GIS 化は避雷器自体にとってもかなり本質的な大きな技術革新となった。SF<sub>6</sub> ガス 中で絶縁される必要性から、避雷器 ギャップの消弧媒体として SF<sub>6</sub> ガスを適用することの研究は、独自にかなり以前から行なってきたが、昭和 40 年、超電研武山において開閉サージ試験に SF<sub>6</sub> 避雷器 ユニートを供試して高性能が実証されてより、GIS の発展とともにその実用化開発が結実した。技術的には放電電圧とシャ断能力との調和、ならびに均一な放電特性を得るための設計上のくふう、長期間くりかえしの動作に対する安定性・信頼性をうるための特殊な材料の選択などに多くの研究成果が集約されたが、完全

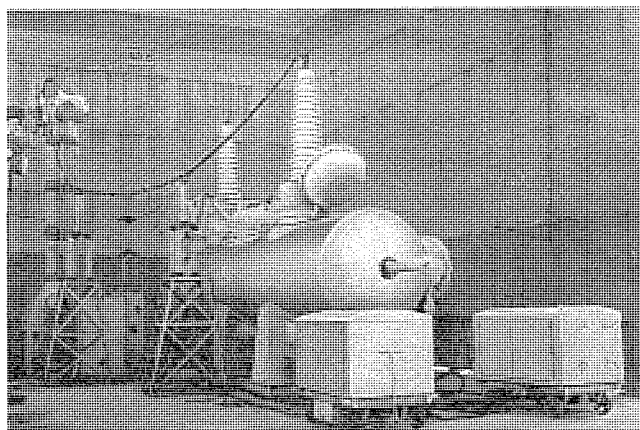


図 3. 1 シャ断試験中の 550 kV GIS 用シャ断器  
550 kV GIS circuit breaker under interrupting tests.

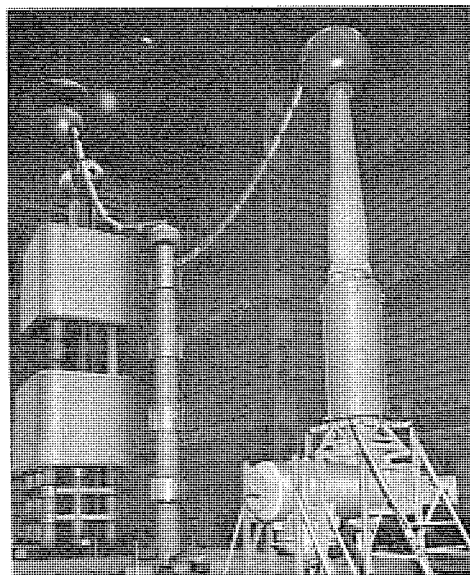


図 3. 2 耐電圧試験中の 550 kV GIS 用断路器  
550 kV GIS disconnecting switch under voltage withstanding tests.

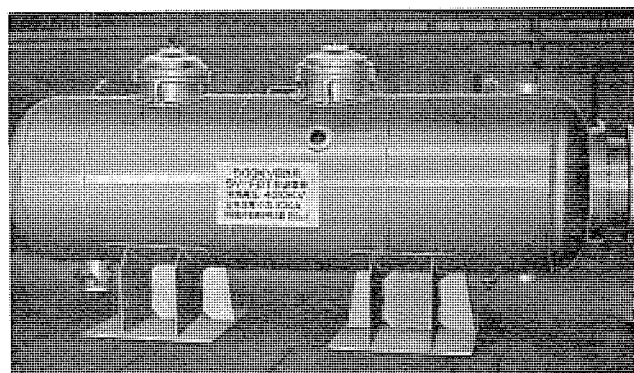


図 3. 3 550 kV GIS 用避雷器  
550 kV GIS arrester.

な接地金属に封入された避雷器は、汚損ならびに外部電界という在来の避雷器のなやみを一掃したばかりでなく、とくに 550 kV 系において要求される著しく過酷な重責務に対して完全な解決を与えることとなった。その接地容器のために、単体の避雷器として見ると寸法的にはかなり大きなものとなる点になおやや不満があるが、設置にあたり相間距離を必要としないために、その縮小率はきわめて大きい。図 3. 3 は 550 kV GIS 用避雷器単体の写真である。

#### (4) 計器用変成器

変流器には長年実用されたブッシング用 CT が使用されるので問題ない。電圧変成器としては、77 kV 用までは、接地金属容器のガス封入乾式絶縁 PT が開発製品化された。154 kV 以上ではコンデンサ形の GIS 用電圧変成器が開発された。これらはいずれも在来技術の応用や延長であるため、とくに技術的困難はなかった。

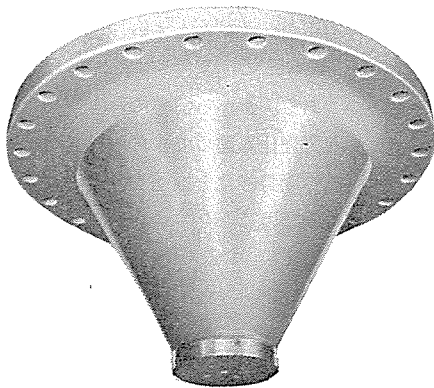


図 3.4 550 kV GIS 用スペーサ  
Cone spacer for 550 kV GIS.

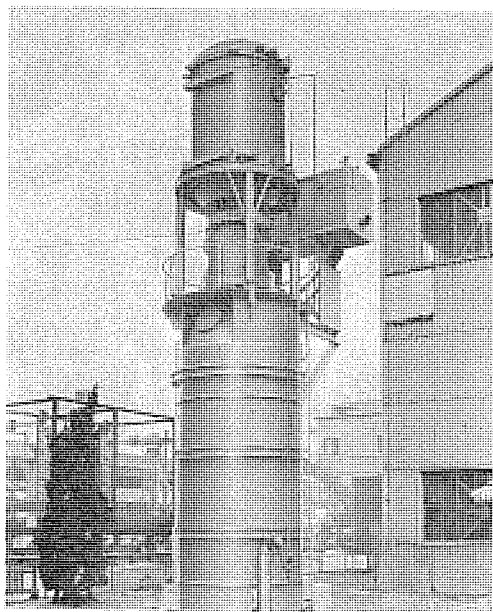


図 3.5 550 kV GIS 用 絶縁物の長期課電試験  
Voltage endurance test of insulators for 550 kV GIS.

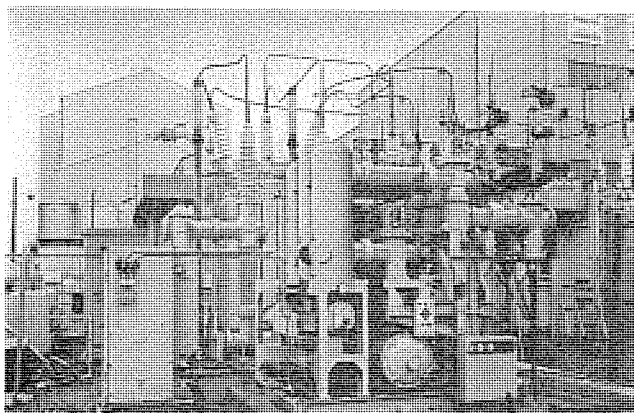


図 3.6 伊丹製作所変電設備用 77 kV GIS  
77 kV GIS in operation at the receiving substation  
of the Itami works

#### (5) GIS の支持絶縁物

GIS では各部導体の支持、単体間のガス空間の仕切りなどに多数の固体絶縁物が使用される。経済性と縮小効果のために、できるだけ短い空間距離で支持するようにした。絶縁物は、高電圧に対しての長期信頼性が非常に重要であり、この絶縁物の開発設計が実に GIS 実用化の技術的かなめであったといっても過言ではない。当社では、この分野の研究にはあらゆる基礎的な研究を含めて全力をあげて取り組み、66 kV 級より 550 kV 級に至るまでの各種の標準化した支持絶縁物の開発を完了した。もちろんこれらの絶縁物の機能的な立証は長年月の実用によって最終的な回答をうるわけであり、とくに最も問題である 550 kV 用 GIS の各種絶縁物については、実際の GIS の内部と同形同寸法のガス充てんされた試験室を、特殊な専用の試験用変圧器に直結して、過電圧による長期課電試験を実施中であり、すでに 1 年有余を経過して、その信頼性を実証しつつある。図 3.4 は、最も多数使用される 550 kV GIS 用の標準コーン形スペーサであり、図 3.5 はそれら絶縁物の長期課電試験の状況である。

#### 3.2 GIS のシステム開発

##### (1) システム構成、母線およびケーブル接続

GIS の効果において、そのシステム構成と単体機器の配置のいかんはきわめて重要であるが、完全に標準的なスケルトンならびに配置をつねに適用することは困難で、むしろ各種多様な構成と配置に適用可能な単体要素や接続ユニットの標準化をはかる方向で製品化がすすめられてきている。当社においては、大体 154 kV まではしゃ断器本体を縦配置とし、回線数に応じて並べ、母線は三相共通外被の縮小構造として横に貫通する方式を取り、220 kV 以上ではしゃ断器は横配置とし、母線は相分離形式をとって、やはり横に四線間にわたって貫通する方式を基本的な形としている。ユニットと母線ならびに母線間の結合には、据付時の調整と、温度による伸縮、振動変位などを吸収するためにベローズを使用している。これによって現在ほとんどあらゆる四路構成に対応できるようになっている。

GIS の本質的な特長を考えれば、在来方式のスケルトンをそのまま適用することは決して有利ではなく、たとえば、保守点検のために多数必要とされた断路器などはかなり省略してシステムを簡略化することが実用上も有効である。今後の適用において経済性も考え、運転条件なども同時に検討し、断路器や接地装置の数をへらすような考慮は、GIS のメリットを最大限に利用するために重要である。

とくに、構成上問題となるのはケーブルとの接続部であって、ケーブルメーカーとの共同開発をかさねて漸次いくつかの標準的な接続方式を確立しつつある。図 3.6 は当社の工場受電変電所に設置実用されている初期の 77 kV GIS であるが、代表的な基本的構成の一例である。

##### (2) ガス区分および保護システム

GIS の保守管理上ガス区分の数をふやすほど「安心できる」ように感じられるが、同時にそれは構造や監視システムを複雑にして経済性からも決して有利ではない。当社の GIS は必要最小のガス区画としてしゃ断器と両側の断路器の間、母線と断路器の間のみに設けることを原則としており、支持絶縁物が気密隔壁をかねている。

GIS の保護警報監視システムは、現状では神経質に考えれば限りなく、複雑高級なものも可能であるが、実用経験の定着とともに、おそらく非常に簡単なもの、在来システムよりもはるかに単純化されたシステムで十分であることが実証されられると思われる。

### (3) システム 機器として信頼性

GISは在来の機器と異なり、単一のシステム機器として、場合により大きな広がり複雑な構成を持つハードウェアとなる。そこでその総合的な信頼性の確保と検証とは、開発の過程における重要な課題であった。その電気的性能に関しては、単体機器の徹底した試験によって理論的には十分であるが、最終的には、その総合信頼性の検証は、結局総合システムの長期課電試験や実用運転試験にたよっている。154 kV GIS まではすでに十分検証済みであり、現在 550 kV GIS について長期課電試験を実施中である。図 3.7 は部分的に長期課電試験に入っている 550 kV GIS で、しゃ断器と避雷器が見えているが、断路器・母線・電圧変成器などが次々に接続され、近く最終的な課電と通電を合せた長期試験に入る予定である。

耐震性などの機械的問題は、部分的には実加振試験などによって十分確認されてきたが、広大なシステムに関しては、従来の電気機器で経験した場合はやや異質であるので、信頼される検討手段の確立を必要とした。従来の研究成果の一部は、別の報告に述べられるはずである。

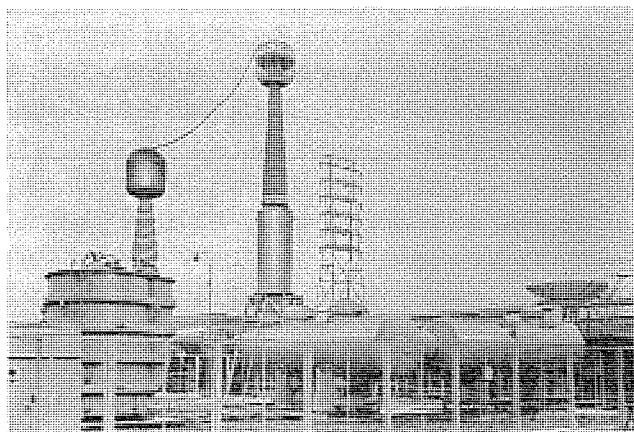


図 3.7 550 kV GIS の長期課電試験  
550 kV GIS under voltage endurance test.

## 4. む す び

新技術としての GIS の特長と展望、ならびに当社における開発、製品化の概要を述べた。実用化導入後の日は浅いが、豊富な SF<sub>6</sub>ガス応用技術の実用経験にささえられて、当社の SIG はすでに本年末までに、66~77 kV 5 地点、110 kV 1 地点、154 kV 1 地点、275 kV 1 地点、約 25 面が実系統で運転にはいる予定であり、さらに来年以降数多くの受注や引合いをひかえている。さらにまた、当面の最大課題である 550 kV GIS の開発段階をほぼ終わって、実用化への途を着々と進めつつある。かかる情勢に対応して、社内における GIS 生産態勢の整備と合理化も進めてきたが、生産技術開発とも相まって、今後さらにその態勢強化を推進し、需要家の要望にこたえ、新しい技術革新の発展と普及に寄与すべく努力をつづけたい所存である。図 4.1 に、活発に実動する GIS 組立工場の状況をご紹介します。てむすびとしたい。

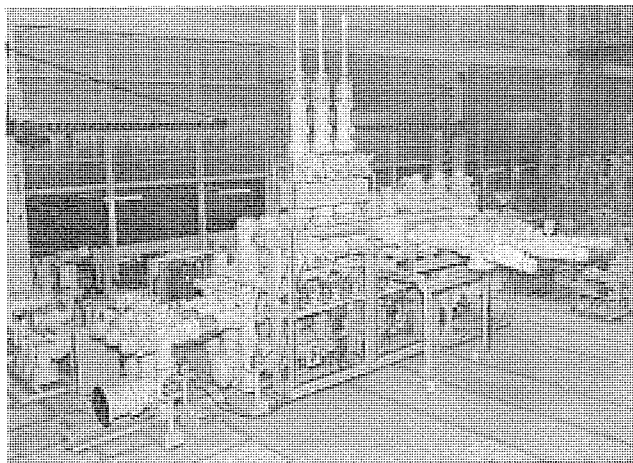


図 4.1 組立中の 77 kV GIS  
77 kV GIS under assembling in the factory.

# 関西電力姫路・新生駒変電所におけるガス絶縁変電所実用化試験

山本 健\*・音瀬 勲\*\*・森井 清二\*\*\*・春本 容正\*\*\*\*  
潮 恒郎+・林 幸平++

## Field Operation Tests on Gas Insulated Substations in Kansai Electric Power Co.

Kansai Electric Power Co. Takeshi YAMAMOTO・Isao OTOSE  
Seiji MORII・Yoshinobu HARUMOTO  
Mitsubishi Electric Corp., Itami works Tsunero USHIO・Kôhei HAYASHI

As a joint project of the Kansai Electric Power Co. and the Mitsubishi Electric Corporation, long range field operation tests have been conducted on Gas Insulated Substations (GIS) to confirm the practicability. As for a substation for 77 kV system at Himeji, the test was kept on for two years from April, 1968 and just completed. At Ikoma substation for 154 kV lines, the test has been carried on since October, 1969. In either cases, the principal apparatus of the gas insulated substation—the switching installations—are used on circuits where load interrupting operation is frequently made. The condition of the gas and operation characteristic of the apparatus have been investigated and recorded for a long hours. The results of the tests are of great satisfaction to prove the practicability and reliability of the gas insulated substation.

### 1. ま え が き

大都市への人口集中，産業活動の拡大発展に伴い，大都市およびその周辺部での電力需要の増加は著しい。このような要求に対処するため，高電圧大容量の変電所を都心部に建設することが必要となってくるが，用地の取得難，土地価格の高騰により，従来方式によって大変電所を都心部に建設することは，きわめて困難になってきている。

従来の大気圧空気にかわって高い絶縁耐力の 6 つ化硫黄ガス (SF<sub>6</sub>) を使用するガス絶縁変電所は，寸法を大きく縮小することができるとともに，外部が完全に接地金属でおおわれるため，信頼性，安全性が増大し，また密閉化されるため外部から保護され，大気汚損による影響をうけることがなく，保守の省力化をはかることができるので，都心部変電所のみでなく，塩塵害汚損の悪化しつつある重工業地帯や臨海地帯における変電所建設の問題も解決することができる。

関西電力 (株) と三菱電機 (株) とは，このようなガス絶縁変電所実用化の第一歩として，その中心となるガス絶縁開閉装置について昭和 43 年 4 月から，77 kV でわが国で最初の実系統における長期実用化試験を開始し<sup>(1)(2)</sup>，約 2 年間の研究を行なった。また昭和 44 年 10 月からは，154 kV で同じくわが国最初の実系統運転を開始し，現在まで約 1 年近く順調に運転をつづけ，多くのデータを得てすぐれた実用性と信頼性を確認することができた。

以下にこの実用化試験でえられた成果について報告する。

### 2. 77 kV 試作装置実用化試験

#### 2.1 試作装置の概要

昭和 42 年夏，77 kV 試作ガス絶縁開閉装置を完成し，工場において 3 ヶ月の対地 77 kV 連続課電を含む各種の試験を行なった。この試作装置は，ガス絶縁の基本問題を長期間にわたって研究するこ

表 2.1 77 kV 試作装置の構成機器  
Ratings of components in 77 kV prototype.

しゃ断器	形 式	バフファ形 SF <sub>6</sub> ガスしゃ断器
	定 格 電 圧	84 kV
	定 格 電 流	2,000 A
	定 格 断 断 容 量	3,500 MVA
	定 格 投 入 電 流	65.5 kA
	定 格 短 時 間 電 流	24.1 kA
	定 格 しゃ断時間	5 サイクル
	操 作 方 式	空気操作 15 kg/cm <sup>2</sup> ・g
断 路 器	絶 縁 階 級	70 号
	定 格 ガ ス 圧	4 kg/cm <sup>2</sup> ・g (20°C)
	形 式	直線ブレード式 ガス絶縁断路器
	定 格 電 圧	84 kV
	定 格 電 流	2,000 A
	定 格 短 時 間 電 流	24.1 kA
	操 作 方 式	空気操作 15 kg/cm <sup>2</sup> ・g
	絶 縁 階 級	70 号
母 線	定 格 ガ ス 圧	4 kg/cm <sup>2</sup> ・g (20°C)
	形 式	相分離形 ガス絶縁
	定 格 電 圧	80.5 kV
	定 格 電 流	2,000 A
	定 格 短 時 間 電 流	24.1 kA
	絶 縁 階 級	70 号
	定 格 ガ ス 圧	4 kg/cm <sup>2</sup> ・g (20°C)

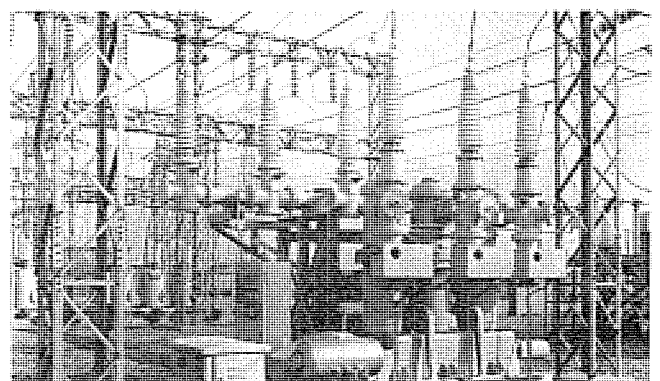


図 2.1 77 kV 試作装置 77 kV prototype.

\* 関西電力総合技術研究所長 \*\* 同総合技術研究所 \*\*\* 同工務部長 \*\*\*\* 同工務部  
+ 三菱電機伊丹製作所 (工博) ++ 三菱電機伊丹製作所

- ①しゃ断器 (CB)
- ②断路器 (DS1)
- ③断路器 (DS2)
- ④母線 (BUS)
- ⑤ブッシング
- ⑥ブッシング
- ⑦制御箱

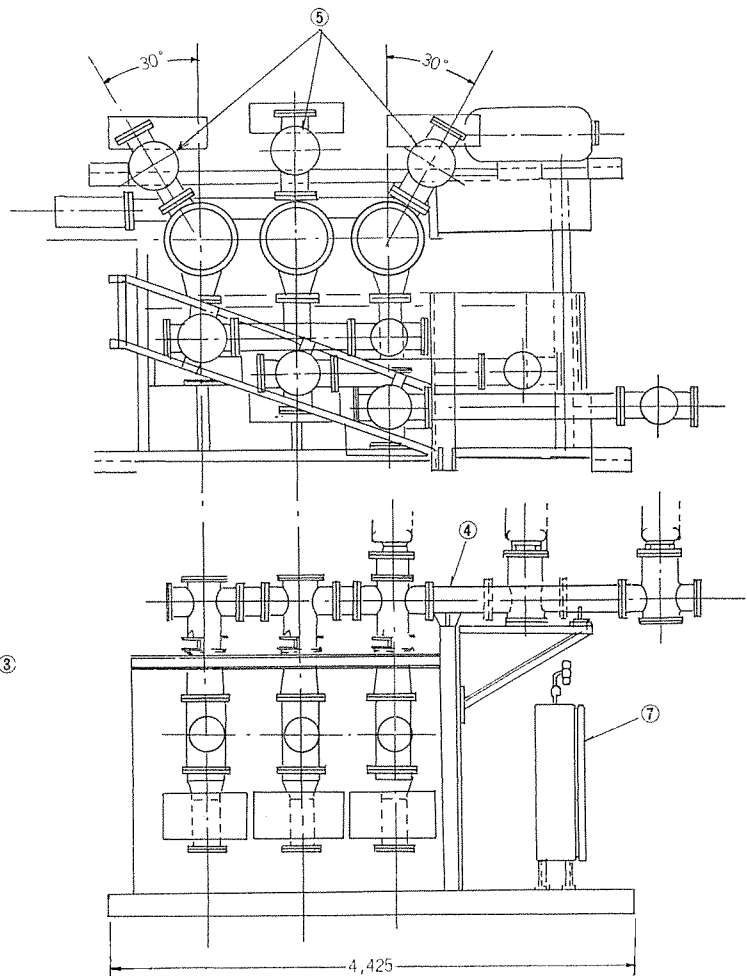
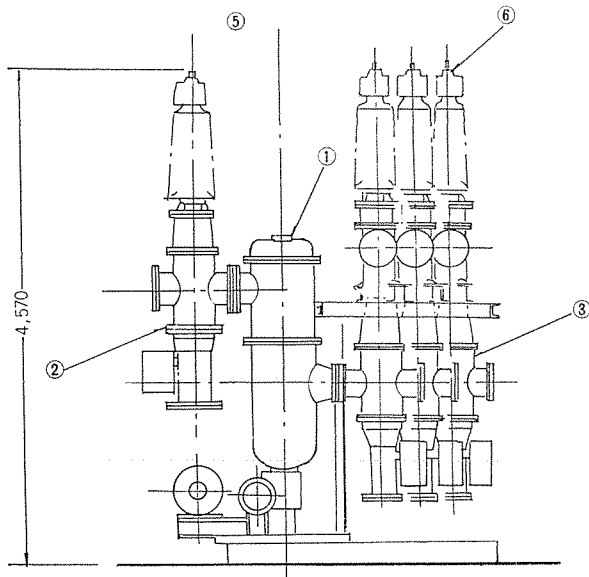


図 2.2 77 kV 試作装置外形  
Outline of 77 kV prototype.

とを目的としたもので、実用変電所の開閉装置とは若干異なる構造である。構成機器の内容は表 2.1 のようになる。

工場試験ののち、この装置は姫路変電所にすえ付けられた。図 2.1 はこの装置の外観、図 2.2 は外形図である。架空線とつなぐため、装置の両端に乾式コンデンサブッシングをつけている。図 2.3 は装置の断面である。ガスしゃ断器はパフファ形で、可動接触子と直結されたパフファシリンダの運動によって、圧縮された  $\text{SF}_6$  ガスが絶縁ノズルを通してアークに吹きつけられ消弧する。しゃ断器の操作は、テフロン V リングのシールを用いた気密回転軸を介して、空気操作機構によって行なわれる。断路器は軸方向に動くいわゆるリニア形で、直線運動がラックと歯車で軸回転に変えられ、しゃ断器と同様な気密軸をへて外部の空気操作装置に連結されている。

母線は相分離形で、内部導体、外被ともアルミニウムである。ガス系統はしゃ断器 (CB) 断路器 ( $\text{DS}_1$ ,  $\text{DS}_2$ ) 母線 (BUS) に 3 区分され、制御箱に各部の圧力計と温度計を集め、配管でつないでいる。ガスはすべて  $4 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{g}$  ( $20^\circ\text{C}$ ) に密封され、各区分ごとに温度補償圧力スイッチをつけ、最低保証値  $3 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{g}$  ( $20^\circ\text{C}$ ) で警報をだすようにしている。

## 2.2 試験回路

装置は、試験の性格上万一の故障による営業系統への影響を防止すること、実用性能の検証を短期間に効率よく実施するため、開閉ひん度が多く、通電電流の変動の多い回路として、姫路変電所の 77 kV 調相設備回路を選んで設置した。図 2.4 はこの試験回路で

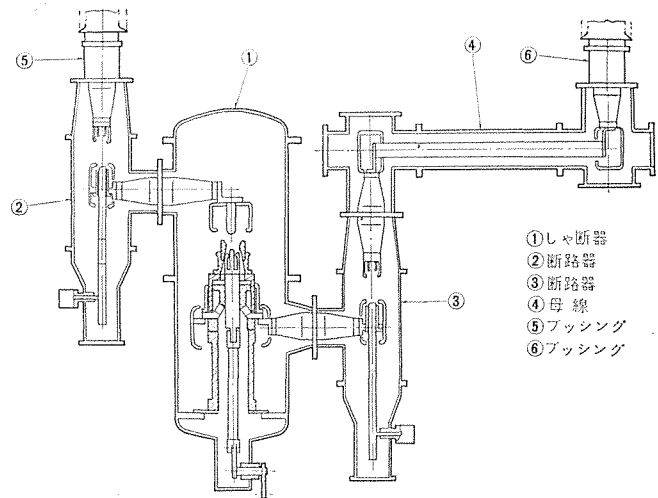


図 2.3 試作装置断面  
Sectional view of prototype.

ある。

## 2.3 試験内容

昭和 43 年 4 月より昭和 45 年 2 月まで約 2 年間にわたり、長期運転試験を行なった。試験内容は表 2.2 のようである。装置のしゃ断器、断路器はリアクトルとコンデンサの切換のため、最大 8 回/日、平均 5 回/日の負荷開閉を行なった。3 カ月、6 カ月、12 カ月目には中間点検を行ない、とくに 3 カ月目にはリアクトル、コンデンサの開閉試験、6 カ月目には内部分解点検を実施し、最後には工場において

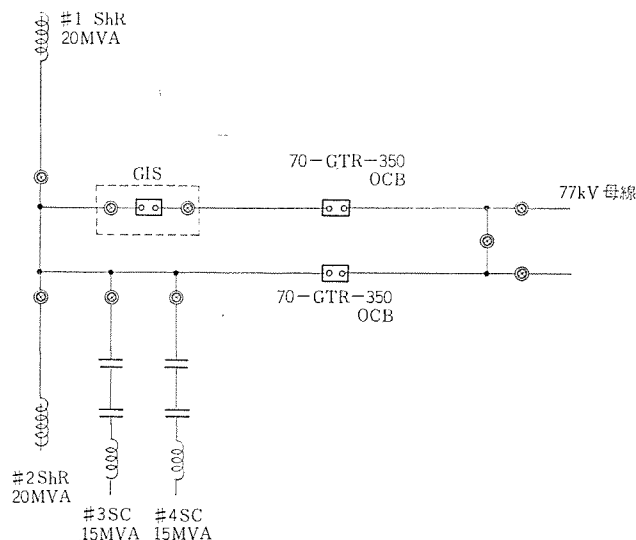


図 2.4 姫路変電所試験回路  
Test circuit diagram in Himeji Substation.

完全に分解して詳細な検討を行なった。23ヵ月間の開閉回数は2,650回であり、短路しゃ断の機会にはなかったが、積算開閉電流は約640kAに達した。

ガスは6ヵ月目に内部分解を行なったほかは、いっさい取扱を行わず、点検のさいも回収したガスを再使用し、回収で失なわれた量を補充したのみであった。また、ガス室内の吸着剤は内部点検で開いた部分のほかは取換を行なわなかった。

## 2.4 試験結果

### 2.4.1 負荷開閉試験

リアクトル20MVAのしゃ断7回、投入4回、40MVAのしゃ断8回、投入7回を実施したが、過渡電圧は2倍以下で、とくにさい断による異常電圧は認められなかった。表2.3はその結果である。コンデンサ15MVAしゃ断6回、投入3回、30MVAしゃ断6回、投入

表 2.2 長期運転試験  
Schedule of field testing.

毎 日	試 験 項 目
3 カ月 (43 年 7 月 9 日)	リアクトル、コンデンサ負荷開閉試験 外観点検 ガス分析 水分測定 振動測定
6 カ月 (43 年 10 月 16 日～18 日)	外観点検 絶縁抵抗測定 接触抵抗測定 操作試験 圧力スイッチ動作特性試験 ガス分析 水分測定 内部分解点検
12 カ月 (44 年 3 月 27 日)	外観点検 絶縁抵抗測定 操作試験 圧力スイッチ動作特性試験 ガス分析 水分測定
23 カ月 (45 年 2 月 24～25 日)	外観点検 絶縁抵抗測定 操作試験 圧力スイッチ動作特性試験 ガス分析 水分測定

3回の結果は表2.4のようで、すべて無再点弧、無再発弧であり、異常電圧は発生しなかった。

### 2.4.2 ガス分析

多数回の開閉にかかわらず、内部のガスの状態はきわめて良好であり、しゃ断器のガスも最初のガスとほとんど変化しなかった。表2.5は点検ごとに採取して質量分析器により分析した結果による不純物の濃度である。N<sub>2</sub>+COはガス採取のさい混入したものであるので、SF<sub>6</sub>の分解による不純物はきわめて微量である。

表 2.3 分路リアクトルの負荷開閉試験結果  
Results of shunt reactor interruption test.

試験番号	分路リアクトル容量 MVA	動作責務	操作気圧 kg/cm <sup>2</sup>	操作電圧 V	しゃ断器ガス圧 kg/cm <sup>2</sup>	母線電圧 kV	しゃ断電流			アーク時間 サイクル			しゃ断時間 サイクル			開閉時の対地過渡電圧 %			投入電流波高値 A		
							A			A			A			A			A		
							Aφ	Bφ	Cφ	Aφ	Bφ	Cφ	Aφ	Bφ	Cφ	A	B	C	Aφ	Bφ	Cφ
20 L-1 2 3 4 5 6 7	20	O	15	110	24°C 4.65	77	144	146	140	0.6 0.3 0.75	0.4 0.55 0.5	0.6 0.55 0.75	2.8 2.5 2.95	2.6 2.75 2.75	2.8 2.75 2.95	104 188 153	190 140 193	118 100 123	—	—	—
20 L-8 9 10 11		C					146	150	142	0.35 0.75 0.6	0.6 0.5 0.75	0.6 0.75 0.6	2.55 2.95 2.7	2.8 2.7 2.95	2.8 2.95 2.8	182 147 197	142 193 116	108 102 99	—	—	—
40 L-1 2 3	40	C	15	110	24°C 4.65	76	—	—	—	—	—	—	—	—	—	約 120			425 383 368 432	250 270 287 342	394 453 465 280
40 L-4 5 6 7 8 9		O					298	289	270	0.6 0.45 0.5	0.4 0.7 0.7	0.6 0.7 0.75	2.8 2.65 2.7	2.6 2.9 2.9	2.8 2.9 2.9	93 192 200	185 116 100	100 108 104	—	—	—
40 L-10 11		C					307	296	280	0.6 0.5 0.5	0.4 0.6 0.7	0.6 0.35 0.75	2.8 2.8 2.7	2.8 2.55 2.95	2.8 2.95 2.9	90 101 187	101 98 93	189 93 97	—	—	—
40 L-12		O					—	—	—	—	—	—	—	—	—	約 120			802	550	825
40 L-13		C					301	292	276	0.6 0.4 0.4	0.4 0.4 0.4	0.4 0.4 0.4	2.8 2.6 2.8	2.6 2.6 2.8	2.8 2.8 2.8	97 169 78	—	—	—	—	—
20 L-12 20 L-13		O					—	—	—	—	—	—	—	—	—	約 120			326	429	303
							144	147	140	0.45 0.7 0.7	0.7 0.7 0.7	0.7 0.7 0.7	2.65 2.9 2.9	2.9 2.9 2.9	2.9 2.9 2.9	168 102 110	—	—	—	—	—

母線電圧：負荷をつないだときの運転電圧で表示

表 2.4 コンデンサバンクの負荷開閉試験結果  
Results of capacitor interruption test.

試験番号	進コンデンサ容 相 量	動作責務	操作気圧 kg/cm <sup>2</sup>	操作電圧 V	しゃ断器 ガス 圧 kg/cm <sup>2</sup>	母線電圧 kV	しゃ断電流			アーク時間			しゃ断時間			開閉時の対地 過 度 電 圧			投入電流波高値						
							A			サイクル			サイクル			%			A						
							Aφ	Bφ	Cφ	Aφ	Bφ	Cφ	Aφ	Bφ	Cφ	Aφ	Bφ	Cφ	Aφ	Bφ	Cφ				
15 C-1	15	O	15	110	24°C 4.65	76	124 ∧ 126	123 ∧ 126	121 ∧ 119	0.45	0.45	0.2	2.65	2.65	2.4	100 以下	100 以下	154	—	—	—				
2										0.45	0.45	0.2	2.65	2.65	2.4	—	—	—							
3										0.45	0.2	0.45	2.65	2.4	2.65	100 以下	155	100 以下							
4										0.3	0.6	0.6	2.5	2.8	2.8	—	—	—							
5										0.2	0.35	0.35	2.4	2.55	2.55	154	100 以下	100 以下							
6										0.4	0.4	0.2	2.6	2.6	2.4	—	—	—							
7		C					15	110	24°C 4.65	76	—	—	—	—	—	—	—	—	100 以下	100 以下	100 以下	603	1,170	910	
8																			100 以下	100 以下	100 以下	860	1,210	625	
9																			100 以下	100 以下	100 以下	1,180	602	890	
30 C-1	30	C	15	110	24°C 4.65	76	—	—	—	—	—	—	—	—	100 以下	100 以下	100 以下	1,040	1,870	1,700					
2															100 以下	100 以下	100 以下	1,520	2,120	1,080					
3															100 以下	100 以下	100 以下	2,040	918	1,420					
4		O					15	110	24°C 4.65	76	260 ∧ 262	252 ∧ 256	242 ∧ 243	0.45	0.45	0.2	2.65	2.65	2.4	100 以下	100 以下	163	—	—	—
5														0.4	0.4	0.2	2.6	2.6	2.4	—	—	—			
6														0.35	0.6	0.6	2.55	2.8	2.8	154	100 以下	100 以下			
7														0.25	0.5	0.5	2.45	2.7	2.7	—	—	—			
8														0.5	0.5	0.25	2.7	2.7	2.45	100 以下	100 以下	155			
9														0.45	0.45	0.2	2.65	2.65	2.4	—	—	—			

表 2.5 ガス中の不純物の濃度  
Concentration of impurities in SF<sub>6</sub> gas.

成 分	おもな不純物の濃度 (モル %)																			
	試 験 前 43 年 3 月 28 日	CB					DS <sub>1</sub>				DS <sub>2</sub>				BUS					
		43 年 7 月 10 日	43 年 10 月 16 日	44 年 3 月 27 日	45 年 2 月 25 日		43 年 7 月 10 日	43 年 10 月 16 日	44 年 3 月 27 日	45 年 2 月 25 日		43 年 7 月 10 日	43 年 10 月 16 日	44 年 3 月 27 日	45 年 2 月 25 日		43 年 7 月 10 日	43 年 10 月 16 日	44 年 3 月 27 日	45 年 2 月 25 日
SOF <sub>2</sub>	0.03	0.09	0.03	0.01	0.02	0.02	0.02	0.04	0.02	0.03	0.00	0.02	0.02	0.03	0.05	0.04	0.04			
SiF <sub>4</sub>	0.02	0.02	0.00	0.01	0.01	0.03	0.02	0.01	0.01	0.03	0.02	0.01	0.00	0.03	0.03	0.02	0.02			
CF <sub>4</sub>	0.02	0.04	0.01	0.02	0.04	0.03	0.01	0.02	0.03	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.03			
CS <sub>2</sub>	0.03	0.04	0.03	0.02	0.02	0.03	0.05	0.01	0.02	0.03	0.09	0.02	0.01	0.04	0.04	0.02	0.03			
CO <sub>2</sub>	0.06	0.05	0.04	0.04	0.05	0.05	0.03	0.04	0.06	0.07	0.03	0.03	0.04	0.06	0.02	0.06	0.04			
N <sub>2</sub> +CO	0.60	0.15	0.28	0.35	0.31	0.35	0.02	0.37	0.28	0.33	0.03	0.35	0.51	0.33	0.03	0.63	0.28			

表 2.6 水分含有量  
Water contents of SF<sub>6</sub> gas.

	測定結果				
	43年3月28日	43年7月10日	43年10月16日	44年3月27日	45年2月25日
DS <sub>1</sub> 露点 °C	-26	-27	-27	-27.5	-28
DS <sub>1</sub> 水分量 ppm	130	120	120	115	110
CB 露点 °C	-27	-26.5	-27.5	-28	-28
CB 水分量 ppm	120	125	115	110	110
DS <sub>2</sub> 露点 °C	-29	-28.5	-29	-28.5	-28.5
DS <sub>2</sub> 水分量 ppm	96	100	96	100	100
BUS 露点 °C	-31	-31	-31	-31	-31
BUS 水分量 ppm	80	80	80	80	80

#### 2.4.3 水分測定

SF<sub>6</sub> 中の水分は絶縁物表面に結露すると絶縁耐力を大きく低下させ、アークコロナによる SF<sub>6</sub> の分解に伴って使用材料に悪影響をおよぼす化合物をつくるので、低い値に保つことが要求されている。

表 2.6 は水分の測定結果であるが、十分低い値に保たれた。当社のガス絶縁機器の管理基準は 150 ppm であるが、これよりも低く、ガスしゃ断器の実績からみても<sup>(4)</sup> 予期どおりの結果である。

#### 2.4.4 ガスもれ測定

とくに条件のきびしい屋外で、日射風雨などにもとづく温度変化が大きかったにもかかわらず、ガスもれは予想以上に少なく、圧力計による測定ではほとんど検出できないほどであった。工場に持ち帰ったのもれ測定器による測定を行なったが、据付前とどうようもれは検出されなかった。少なくとも 10 年間はガス補給を必要しないと判断できる。

#### 2.4.5 内部点検

6 カ月および 23 カ月後に内部点検を行なったが、しゃ断器の接触子の軽微な消耗とタンク内に少量の粉末が付着していたほかは変化は認められなかった。粉末は分析により金属フッ化物ではなく吸着剤の粉末であることが判明し、のちの設計変更によって粉末の発生はなくなった。

#### 2.4.6 その他

開閉特性、接触抵抗、絶縁抵抗、圧力スイッチなどの動作特性も測定されたが、変化は認められなかった。

#### 2.5 最終試験

長期運転試験完了後、試作装置は工場において開閉特性、コロナ測

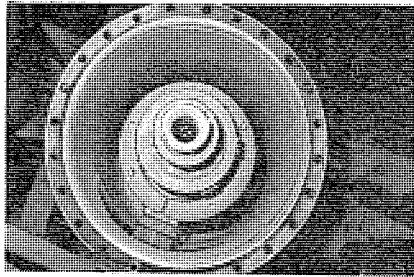


図 2.5 シャ断器内部  
Inside of circuit breaker after field testing.

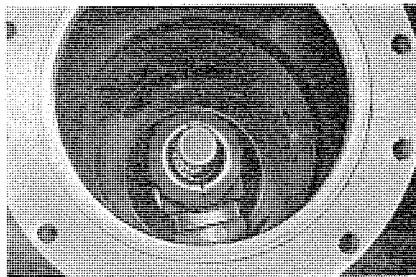


図 2.6 断路器内部  
Inside of disconnecting switch after field testing.

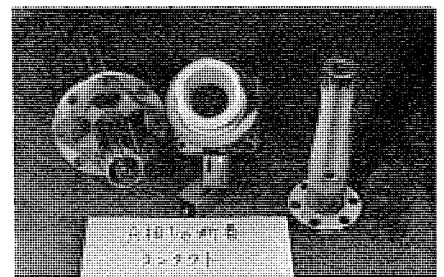


図 2.7 シャ断器接触子  
Contacts of circuit breaker after field testing.

定、耐電圧試験、せん(閃)絡試験、温度上昇試験を行なったのち、分解して各部の詳細点検を行なった。試験の結果は据付前の値とほとんど同じで、約2年間の使用による変化は認められなかった。内部分解点検の結果も異常は発見されなかった。分解後の主要部の写真を図 2.5、2.6、2.7 に示す。

そのほか各部品の変化についても詳細に調査を行なった。おもなものをあげれば、各部の吸着剤の水分吸収量は2～3%で、このまま長期にわたってガス中の水分を低く保ちうる値であり、各部のパッキンの変形変質も少なく、放圧板の動作圧力の変化も認められなかった。

これらの結果から、この装置は無保守で長期間運転できる状態にあったことが確認された。

### 3. 154 kV 開閉装置実用化試験

#### 3.1 装置の概要

77 kV 試作装置の実用化試験が順調に進んだことにより、より高い電圧のガス絶縁変電所の実用性についても見とおしがたてられたので、表 3.1 の 154 kV ガス絶縁変電所用開閉装置の開発が着手された。工場において各機器の単独および組合せ試験を行なったのち、単母線1回路部に相当する開閉装置に、避雷器3相と計器用変圧器1相を結合し、新生駒変電所に据付けた。図 3.1 は変電所に据付けたこの装置の外観、図 3.2 は外形図、図 3.3 はこの装置の中心である1回路分の断面である。

ガスシャ断器は1点切パッファ形で、可動接触子と直結されたパッファシリンダの運動によって、圧縮された SF<sub>6</sub> ガスが絶縁ノズルを通してアークに吹き付けられ消弧する。シャ断器のシャ断操作はばねであり、投入は油圧操作である。ガス圧力は 5 kg/cm<sup>2</sup>・g(20°C)、構造の詳細は別論文にゆずる。

断路器は軸方向に動くいわゆるリニヤ形で、直線運動はラックと歯車によって軸回転に変えられ、気密操作軸によって外部の操作装置と連結されている。

母線は相分離形で、内部導体、外被ともアルミニウムであり、温度変化による寸法変化を吸収するため、内部導体はたわみ導体、外被はステンレスベローズを途中にしている。

各課電部は SF<sub>6</sub> ガス中で使用するに適した特殊のエポキシ樹脂注形絶縁体によって支持され、とくに各機器の間の絶縁体は気密隔壁ともなっており、各機器のガス系統を分離している。この装置では、シャ断器、断路器、母線、ケーブル端末、避雷器のガス系統がそれぞれ独立しており、各区分ごとに圧力計、温度補償圧力スイッチをつけ、内部事故に対する容器保護のための放圧板を設けている。

各機器のガス圧力は、その使用目的のため異なる値となっている

が、断路器、母線などの絶縁用ガス圧力は 4 kg/cm<sup>2</sup>・g(20°C) に密封され、万一ガスもれのあったさいには性能保証圧力の 3 kg/cm<sup>2</sup>・g

表 3.1 154 kV ガス絶縁変電所の構成機器  
Ratings of components in 154 kV gas insulated substation.

シャ断器	形 式 定 格 電 圧 定 格 電 流 定 格 シャ断容量 定 格 シャ断時間 操 作 方 式 定 格 ガ ス 圧	パッファ形 SF <sub>6</sub> ガスシャ断器 168 kV 2,000 A 7,500 MVA 3 サイクル 油 圧 5 kg/cm <sup>2</sup> ・g(20°C)
断 路 器	形 式 定 格 電 圧 定 格 電 流 定 格 短 時 間 電 流 操 作 方 式 定 格 ガ ス 圧	直線ブレード式ガス絶縁断路器 168 kV 2,000 A 27 kA 油 圧 4 kg/cm <sup>2</sup> ・g(20°C)
接 地 開 閉 器	形 式 定 格 電 圧 定 格 短 時 間 電 流 操 作 方 式 定 格 ガ ス 圧	直線ブレード式ガス絶縁開閉器 168 kV 27 kA 手動(投入容量必要のばあい油圧) 4 kg/cm <sup>2</sup> ・g(20°C)
母 線	形 式 定 格 電 圧 定 格 電 流 定 格 短 時 間 電 流 定 格 ガ ス 圧	相分離ガス絶縁母線 161 kV 2,000 A 25.8 kA 4 kg/cm <sup>2</sup> ・g(20°C)
避 雷 器	形 式 定 格 電 圧 公 称 放 電 電 流 特 別 動 作 責 務 静 電 容 量 定 格 ガ ス 圧	SF <sub>6</sub> ガス避雷器 196 kV 10 kA 50 μF 0.9 kg/cm <sup>2</sup> ・g(20°C)
コンデンサ形計器用変圧器	形 式 変 圧 比 定 格 負 担 階 級	油入コンデンサ形計器用変圧器 154/√3 kV/110/√3 V/110/3 V 200/200 VA 1.0/3 G 級
ケーブル端末	住友電工(株)と共同研究 <sup>(2)</sup>	

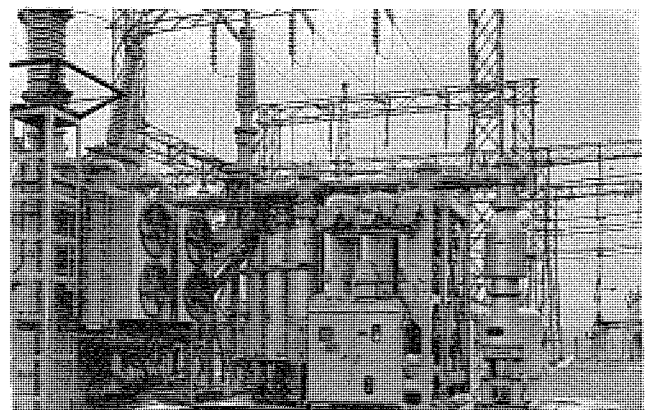


図 3.1 154 kV 開閉装置  
154 kV switchgear.

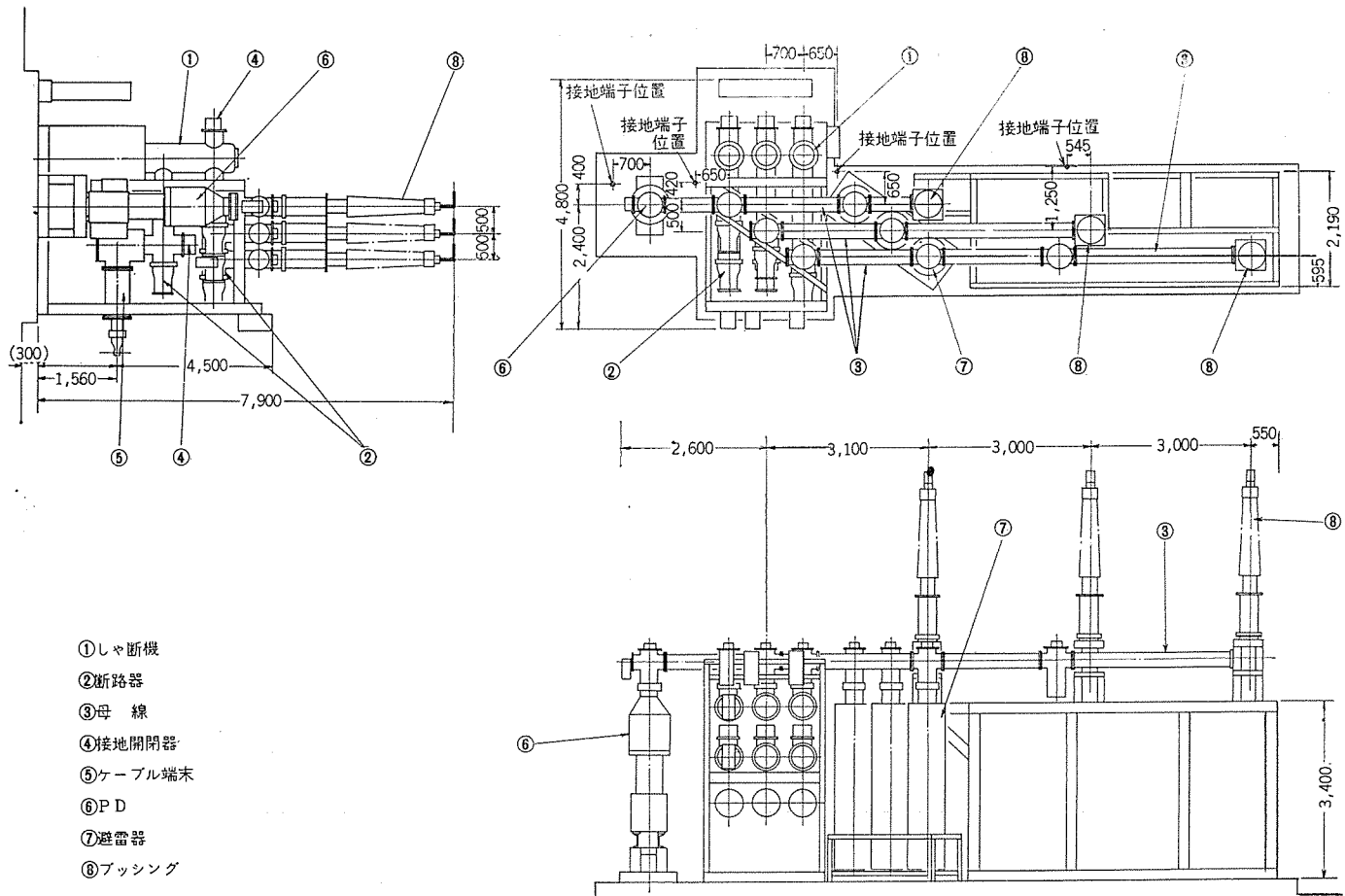


図 3.2 154 kV 開閉装置外形  
Outline of 154 kV switchgear.

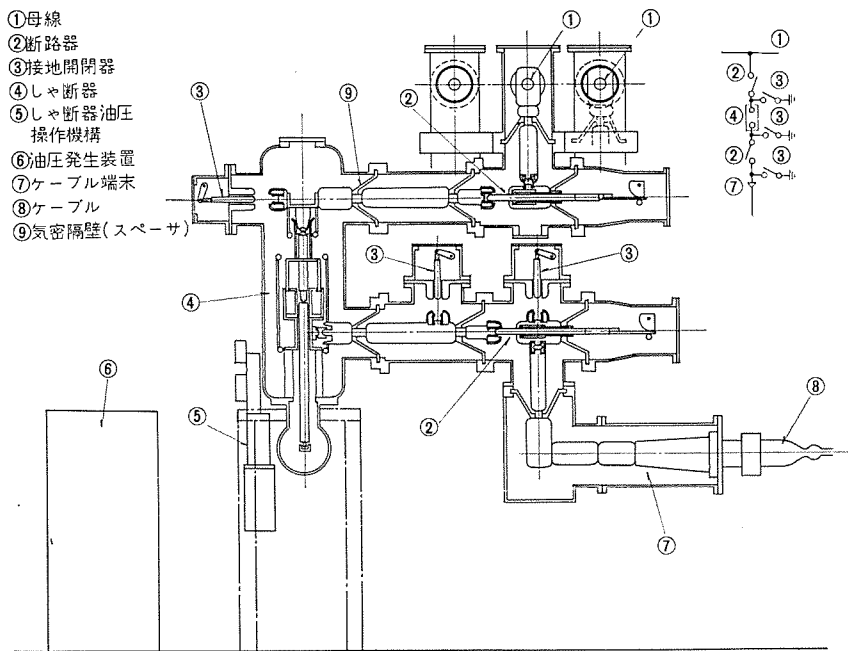


図 3.3 開閉装置断面  
Sectional view of switchgear.

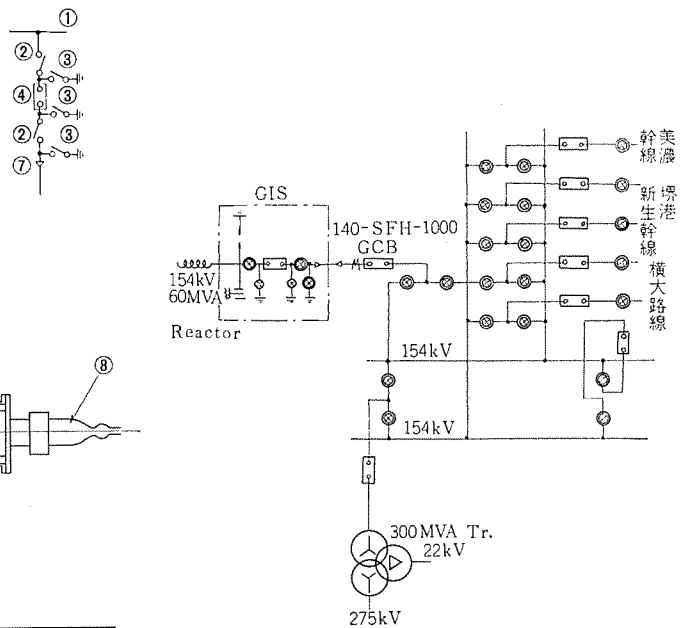


図 3.4 新生駒変電所試験回路  
Test circuit diagram in Shin-Ikoma Substation.

(20°C) でガス 補給指令を出す。屋外使用であるが、ガス 圧力が低い  
ため ガス 保温装置は必要でない。各 ガス 室は ガス 中水分を低く保ち、  
しゃ断器などで発生する分解生成物を吸収するため吸着剤を適量  
入れている。

### 3.2 試験回路

77 kV のばあいと同じ理由から、試験回路は 新生駒変電所の リア

クトル 回路が選ばれた。回路は図 3.4 のようである。装置は昭和 44  
年 10 月から運転を開始した。

### 3.3 試験内容

試験内容は表 3.2 のように定められている。6 カ月目の点検は  
運転上の都合から 8 カ月目に実施された。開閉ひん度は 1 ~ 2 回/  
日で、昭和 45 年 5 月末まで 8 カ月で、約 250 回の負荷開閉を行な

表 3.2 長期運転試験  
Schedule of field testing.

	調 査 項 目
毎 日	操作回数 温度・圧力 その他一般外観調査
3 カ月 (45 年 1 月 12 日実施)	外観点検 絶縁抵抗測定 開閉試験 ガス分析 水分測定
6 カ月 (8 カ月) (45 年 6 月 2 ~ 4 日実施)	リアクトル負荷開閉試験 絶縁抵抗測定 接続抵抗測定 開閉試験 ガス分析 水分測定 内部分解点検
9 カ月	3 カ月と同様
1 年	現地で 3 カ月と同様に実施し、工場に持帰り 内部点検を実施する。 詳細は共同研究会において決定する。

っている。装置はなおひきつづき運転されているが、8カ月の点検までにえられた結果をまとめると、つぎのとおりである。

### 3.4 試験結果

#### 3.4.1 負荷開閉試験

60 MVA リアクトルのしゃ断 6 回、投入 6 回、投入直後のしゃ断 6 回を実施した。結果は表 3.3 のようである。過渡電圧の最大値は 1.85 倍であり、さい断は認められない。

#### 3.4.2 ガス分析

8 カ月までのガス分析結果は表 3.4 のようである。77 kV のばあいとどのように、しゃ断器のガスもほとんど変化を示していない。今後もこのような状態がつづくと予想される。

#### 3.4.3 水分測定

8 カ月までの水分測定結果は表 3.5 のようである。ほとんど変化がなく、管理基準値以下にとどまっている。

#### 3.4.4 ガスもれ測定

圧力計による測定では、ガスもれは検出できない程度である。

#### 3.4.5 内部点検

8 カ月目に行なった内部点検では、接触子の消耗のほかは変化が認められなかった。77 kV のさいあつた粉末はまったく発見されなかった。点検のさいの代表的な写真を図 3.5, 3.6, 3.7 に示す。

表 3.3 分路リアクトルの負荷開閉試験結果  
Results of shunt reactor interruption test.

試験番号	動作責務	操作電圧 V	操作油圧 kg/cm <sup>2</sup> ・g	しゃ断器 ガス圧 kg/cm <sup>2</sup> ・g	母線対地電圧		しゃ断電流			アーク時間			しゃ断時間			しゃ断時の過渡電圧			投入時の過渡電圧		
					リアクトル 投入前 kV	リアクトル 投入後 kV	A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相	A 相 -E 間 %	B 相 -E 間 %	C 相 -E 間 %	A 相 -E 間 %	B 相 -E 間 %	C 相 -E 間 %
G0101																					
001	C																		103	100 以下	100 以下
2	O																				
3	C																		100 以下	100 以下	100 以下
4	O																				
5	C																		100 以下	100 以下	103
6	O																				
7	C																		101	100 以下	100 以下
8	O																				
9	C																		100 以下	100 以下	105
10	O	109		5.6	A 82.9 B 85.3 C 86.8	A 79.8 B 82.7 C 82.7	214	216	218												
11	C																		101	100 以下	100 以下
12	O																				
13	CO																		101	100 以下	100 以下
14	CO																				
15	CO																				
16	CO																				
17	CO																				
18	CO																				

表 3.4 ガス中の不純物の濃度 (モル%)  
Concentration of impurities in SF<sub>6</sub> gas.

成 分	試 験 前	CB		DS <sub>1</sub>		DS <sub>2</sub>		BUS		CHd		LA	
		45 年 1 月 12 日	45 年 6 月 2 日	45 年 1 月 12 日	45 年 6 月 2 日	45 年 1 月 12 日	45 年 6 月 2 日	45 年 1 月 12 日	45 年 6 月 2 日	45 年 1 月 12 日	45 年 6 月 2 日	45 年 1 月 12 日	45 年 6 月 2 日
SOF <sub>2</sub>	0.04	0.03	0.04	0.03	0.03	0.05	0.04	0.06	0.04	0.03	0.03	0.05	0.05
SiF <sub>4</sub>	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	0.03	0.03	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02
CF <sub>4</sub>	0.02	0.05	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03
CS <sub>2</sub>	0.04	0.03	0.02	0.04	0.03	0.04	0.04	0.01	0.03	0.01	0.02	0.02	0.02
CO <sub>2</sub>	0.05	0.05	0.06	0.07	0.07	0.04	0.06	0.05	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05
Na+CO	0.28	0.32	0.15	0.12	0.21	0.06	0.15	0.07	0.09	0.39	0.12	0.07	0.10

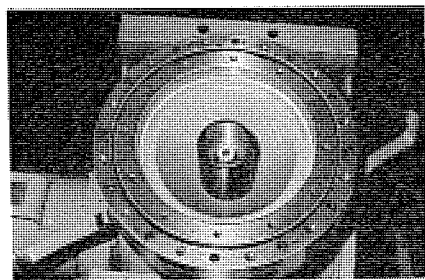


図 3.5 絶縁スペーサ  
Insulating support after 8 months  
field operation.

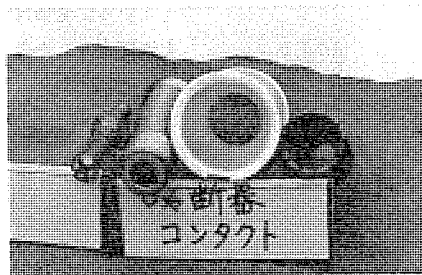


図 3.6 しや断器接触子  
Contacts of circuit breaker after 8 months  
field operation.

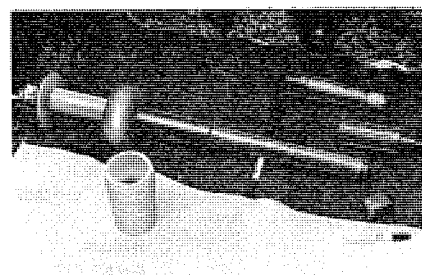


図 3.7 断路器接触子  
Contact of disconnecting switch after  
8 months field operation.

表 3.5 水分含有量  
Water contents of  $\text{SF}_6$  gas.

機 器	水 分 量 ppm		
	試 験 前	45年1月12日	45年6月2日
CB	65	70	70
DS <sub>1</sub>	60	60	65
DS <sub>2</sub>	70	55	60
BUS	75	65	70
CHd	60	65	65
LA	110	105	110

#### 4. む す び

77 kV および 154 kV における ガス 絶縁変電所の実用化試験は、十分所期の要求を満足することを示した。すなわち密閉された容器内の ガス の変質はきわめて少なく、各構成材料は長期にわたってガ

スをこのように保つに十分な特性をもっていることが実証された。

この結果にもとづいて、別論文に述べるように 110 kV までの全開閉装置を ガス 絶縁した変電所がすでに実用されており、550 kV ガス 絶縁変電所の研究がすすめられている。154 kV において、なお残っている実用化試験をつづけるとともに、さらに高い電圧においても実用化試験によって、信頼性・安全性の検証を行なうことが今後とも計画されている。

終わりに、この実用化試験において、種々ご指導ご協力いただいた関西電力の各位に謝意を表するしだいである。

#### 参 考 文 献

- (1) 吉田・本田・春本：電気評論，53，12月，1,496（昭43）
- (2) 鷲見・春本：OHM，56，8月，31（昭44）
- (3) 栗原・満井：電気協会49回通常総会研究会
- (4) 富永・左中：OHM，57，1月，106（昭45）

# ガス絶縁変電所用避雷器

鎌田 隆好\*・永井 信夫\*・但田 昭司\*

## Mitsubishi Autovalve Lightning Arresters for Gas Insulated Substation

Itami Works Takayoshi KAMADA・Nobuo NAGAI・Shoji TADA

With the object of reducing the size of substation and saving the labor of maintenance, Gas Insulated Substation (GIS) have come into practical use. Lightning arresters to be contained in dead tank and to be used for 66~525 kV system have been developed and a part of them have been already in service. Problems occurring with the conventional arresters were changes of their characteristics due to the contamination or influence exerted by the outside. They have been completely settled with these new arresters. Not only having enough margine on BIL from the viewpoint of lightning voltage protection, but being installed close to the protected apparatus, they are featured by great effectiveness in protection. As  $\text{SF}_6$  gas has an excellent arc quenching capability, it helps cut down the number of gaps per unit. Besides, the arrester makes use of  $\text{SF}_6$  gas in common electrical insulation medium. So the construction of the arresters have been largely simplified.  $\text{SF}_6$  gas lightning arresters are of unprecedented design.

### 1. ま え が き

当社では昭和40年に $\text{SF}_6$ ガスを消弧媒体として使用するSV-F形オートバルブ 避雷器を開発して以来、改良を重ね、ガス絶縁変電所用SV-FT形およびSV-FBT形オートバルブ 避雷器として66kV~525kVの各電圧階級のものへ応用することに成功している。この避雷器は従来の避雷器と異なり、外部が接地容器でおおわれているので、据付空間を縮小するばかりでなく、避雷器の使用で一番問題となる汚損による特性の変化を完全に防止するのみならず、万一シャ断不能になった場合でも、金属容器のために破壊せずに安全であり、さらに異常電圧に対する保護についても被保護機器に近接して取付けられるので裕度が大きく確実である利点を有する。

しかしながら、このような避雷器では避雷器素子が接地容器に対して過大な静電容量を有するため、通常の分圧では十分な特性を発揮できないという欠点があり、分圧には特殊な方式を採用しなければならない。このため、設計に際しては模擬回路を使用して分圧定数の設定を行ない、その高信頼性を検証するため、高定格避雷器で動作責務を実施する等JEC-156はもちろん、これに規定されていない種々の試験を実施して開発を行なった。つぎに、その詳細について記す。

### 2. ガス絶縁変電所用避雷器の概要

#### 2.1 ガス絶縁変電所用避雷器の構造と外形

図2.1は定格98kV SV-FT形 避雷器を示す。内部は図2.2のように直列ギャップ部と特性要素部とで構成された避雷器要素が、 $\text{SF}_6$ ガスで絶縁されて金属容器の中央部に収納されている。直列ギャップ部には $\text{SF}_6$ ギャップを採用する場合と $\text{N}_2$ ギャップを採用する場合の2方式が考えられるが、図2.3に示すように $\text{N}_2$ ガス中に $\text{SF}_6$ ガスが混入した場合、わずか10%程度でも放電電圧が純 $\text{SF}_6$ ガスのそれに近くなるという危険があり、また $\text{SF}_6$ ガス中で $\text{N}_2$ ガスを完全シールする技術がむずかしいこと等から、絶縁として用いる0.9kg/cm<sup>2</sup>の $\text{SF}_6$ ガスそのものを消弧に共用する単一圧力方式とし、構造の簡略化を図った。特性要素部は高さの低減のために物理的には3個並列

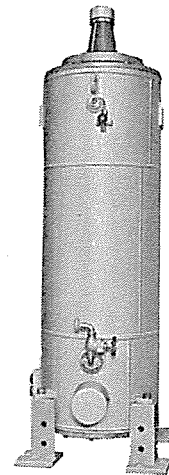


図 2.1 98 kV SV-FT 形 避雷器  
98 kV type SV-FT arrester.

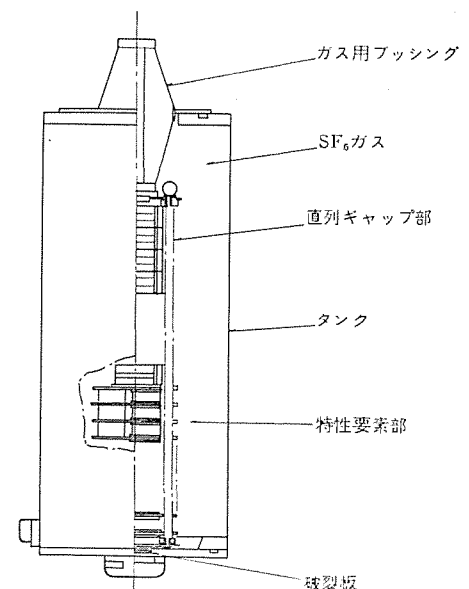


図 2.2 98 kV SV-FT 形 避雷器の内部構造  
Inner construction of 98 kV type SV-FT arrester.

\* 伊丹製作所

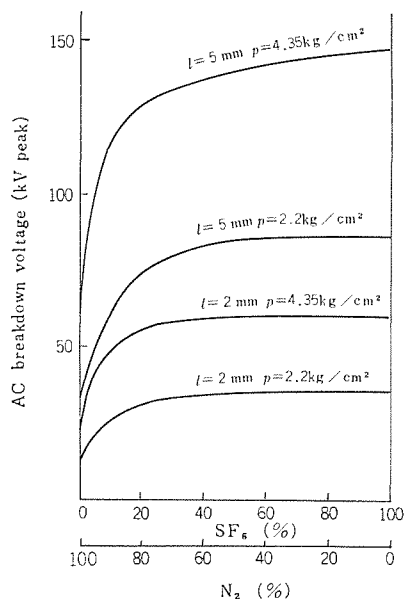


図 2.3 SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub> 混合気体の AC 破壊特性  
AC breakdown characteristics of SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub> mixture.

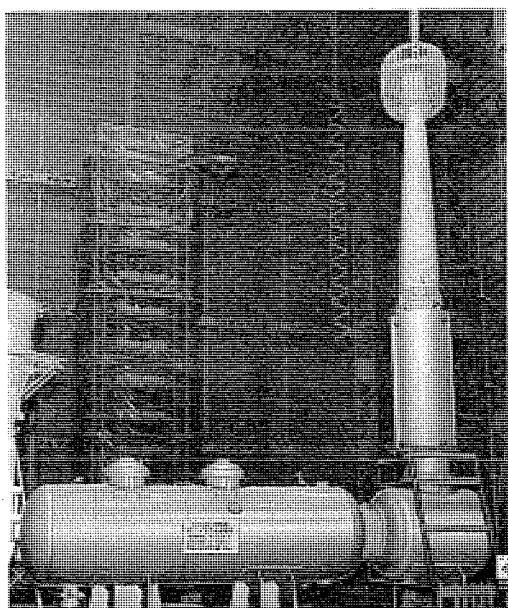


図 2.4 420 kV SV-FBT 形 避雷器  
420 kV type SV-FBT arrester.

に配置し、電気的には直列に接続している。

つぎに、図 2.4 は定格 420 kV の SV-FBT 形 避雷器を示す。この場合も SV-FT 形 避雷器と同様に、SF<sub>6</sub> ギャップを使用する直列ギャップ部と特性要素部を直列にしたものからなるが、エネルギー処理能力に一段とすぐれ、ガス圧は 3 kg/cm<sup>2</sup> と高圧化して絶縁距離を縮め、さらにギャップ部はブロック部とどのようにジグザグに配置しているので、高定格ながら小形で被保護機器と十分に協調のとれた大きさとなっている。

これらの避雷器ではギャップを接地容器の中に入れるので、がいし形 避雷器が重汚損時に放電特性に影響を受けるとどうように、ギャップ部の電位分布が悪くなり、強制分圧を施さなければ放電圧が著しく低下する。

図 2.5 は電位分布を改善する前と改善した後の各ギャップの電位分布を示すものであるが、分圧をとくに考慮しない場合は課電側の

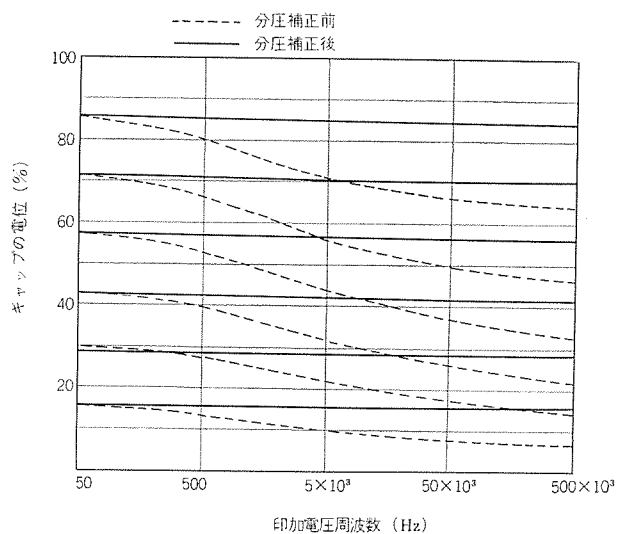


図 2.5 ギャップ部の電位分布  
Potential distribution of gap section.

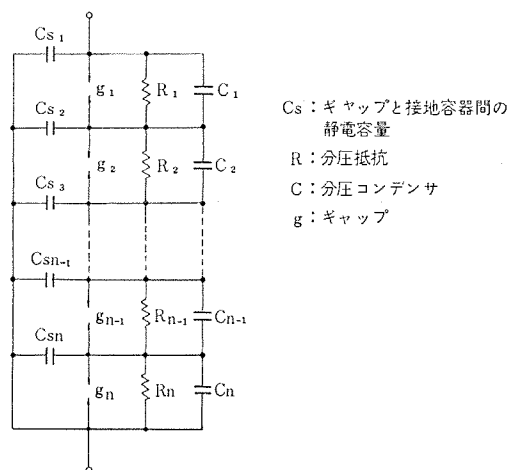


図 2.6 避雷器の等価回路  
Equivalent circuit of arrester.

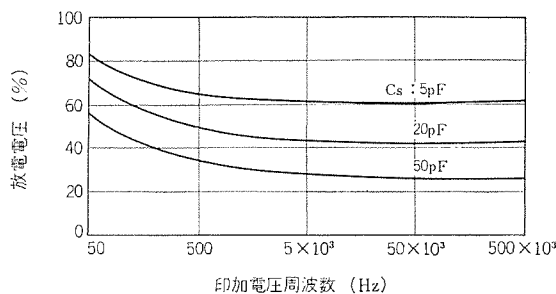


図 2.7 静電容量 Cs と放電電圧特性  
Stray capacity-sparkover characteristics.

ギャップほど電圧分担が大きくなり、この傾向はインパルス電圧ほど大きいので、課電側ギャップの並列インピーダンスをコンデンサと抵抗を組合せて低くするように、等価回路図 2.6 に基づいて電子計算機を使用して電位分布を均一にする分圧素子の定数を決定している。この回路で分圧定数 R, C を決定する場合には、直列ギャップのシャ断点数が N<sub>2</sub> ギャップのように 14 kV 定格あたり 10 点近くもあると計算が複雑となり、不正確になるばかりでなく、計算どおりの分圧素子を取付けることが困難になるので、ギャップのシャ断点数の少ないことが望ましい。

SF<sub>6</sub> ギャップは絶縁性能が良いこと、消弧性にすぐれること等からユニットあたりのシャ断点数を少なくでき、分圧にくふうをこらして

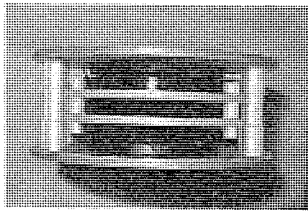


図 2.8 SF<sub>6</sub> ガス 消弧式 ギャップ  
SF<sub>6</sub> gap.

放電特性の制御を行ないやすい長所を有する。この等価回路図 2.6 による分圧抵抗とコンデンサを一定にして静電容量  $C_s$  を変化させた場合、分担電圧は大きく変化し、図 2.7 のようにインパルス放電値は  $C_s=5\text{pF}$  のときを 100% とすると、静電容量  $C_s$  を 2 倍、10 倍と変化させることにより 70%、50% ときわめて大きく変わることがわかる。

したがって接地容器形の避雷器では、図 2.6 の静電容量容器  $C_s$  をできるだけ小さくして分圧容量が過大にならないようにすることが必要で、このために充電部を極力減らすように直列ギャップ部と特性要素部を分離し、ギャップも小形なものを採用することが望ましい。SF<sub>6</sub> ギャップは絶縁のガスを共通にして構造も単純であるところから、このような用途に最適である。

しかしながら、電圧分担を改善するために分圧素子をつけただけでは接地容器が背後電極として影響をおよぼして電界を集中させ、耐電圧の低下をもたらしたりコロナを発生しやすくなるので、長期間の使用に耐えない。図中のシールドリングは、このような接地容器の背後電極の避雷器素子への影響を除去するために役立つもので、この方式によれば各ギャップの電界強度は十分に緩和され、かつどのギャップもまったく等しくなるので、どのような高定格の避雷器も製作することが可能である。

課電側への引出しは、コーン形の絶縁スペーサまたはガス用ブッシングを介して外部母線に接続される。接地側は絶縁端子を通じて引出されるので、がいし形避雷器と同様に放電度数計や記録器を取付け雷放電記録を得ることができる。内部の避雷器素子は高定格のものでは重量も長さもかなり大きくなり、接地容器もそれにつれて大きくなるが、がいし形の避雷器と違って各ユニットがいしに分割して輸送することはむずかしいので、垂直にして使用する場合でも 500 kV 系統用の大形の避雷器では水平にして輸送しなければならず、輸送時の振動と耐震強度にはとくに考慮しなければならない。このような高定格の避雷器では中間部に 1 個以上の絶縁支持部を設け、どのような方向の据付運搬状態においても内部構造が耐えられるようにしている。

接地容器には SF<sub>6</sub> ガス配管用のバルブが設けられ、通常 3 相とも共通のガス圧に保たれる。密封容器内のガス圧は温度によって変化するが、圧力とガス温度を検出する圧力スイッチでガス密度が常に一定に保たれるように管理できる。避雷器が万一規定外の責務でシャ断不能におちいった場合に容器が破壊するのを防止するため、 $8 \pm 1 \text{ kg/cm}^2$  で破壊する破裂板を取付けて周辺機器に被害をおよぼさないようにしてある。

## 2.2 SF<sub>6</sub> 消弧式ギャップ

図 2.8 は SF<sub>6</sub> 消弧式ギャップの外観である。SV-FT 形 避雷器に

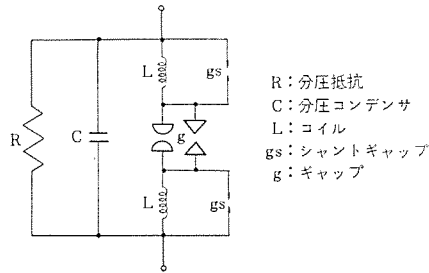


図 2.9 SV-F 形 ユニットギャップの構造  
Construction of type SV-F unit gap.

R: 分圧抵抗  
C: 分圧コンデンサ  
L: コイル  
gs: シャントギャップ  
g: ギャップ

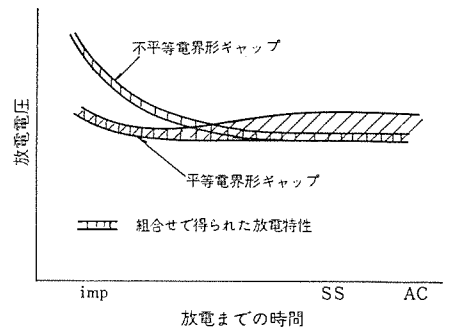


図 2.10 ユニットギャップの放電特性  
Sparkover characteristics of series gap.

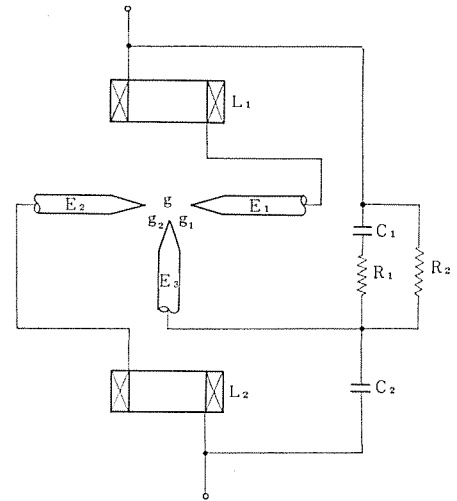


図 2.11 SV-FB 形 ユニットギャップの構造  
Construction of type SV-FB unit gap.

は SF<sub>6</sub> ガス  $0.9 \text{ kg/cm}^2$  の SV-F 形 ギャップが、SV-FBT 形 避雷器には SF<sub>6</sub> ガス  $3 \text{ kg/cm}^2$  の SV-FB 形 ギャップが使用される。SF<sub>6</sub> ガスは大気圧で空気の約 2.5~3 倍の絶縁耐力に対し、約 100~200 倍の消弧性能を有するところから、断路器サージや開閉サージ処理等の過酷な責務を果すうえで、きわめて好都合な消弧媒体であるが、強い電子親和力のために SF<sub>6</sub> ガス中での放電特性を安定化させることが非常にむずかしいという欠点もあり、SF<sub>6</sub> 消弧式ギャップの実用化のためには、まずこの点を検討する必要がある。

図 2.9 は SV-F 形 ギャップの結線と構造を示すが、放電のばらつきを小さくし安定化するため、SF<sub>6</sub> ガス中の放電のばらつきが、電界強度が大きくなるとともに放電のばらつきは減少するという電界強度に依存することを応用し、きわめて高電界な不平等電界ギャップとインパルス比を改善する平等電界形ギャップを並用している。図 2.10 はユニットギャップの放電特性を示すが、平らでばらつきの少ない特性が得られることがわかる。

ギャップにはグラファイト製の電極と消弧性にすぐれるアセタル系の材料を使用し、磁気駆動コイルを備えているので、放電によるアークは速やかに駆動伸長消弧され、ガス中での絶縁回復特性がすぐれているところから、断路器サージによる多数回連続の動作や超々高圧系統の再閉路サージのような重責務に耐える。14 kV ユニットあたりのシャ断点数は 1 点と少なく、これが定格電圧に比例して使用される。図 2.11 は SV-FB 形 ギャップの結線と構造を示す。

このギャップでは平らな V-t 特性を得るため、第 3 電極 E<sub>3</sub> すなわちトリガ電極を配して放電の制御と安定を図っている。g<sub>1</sub> はトリガギャップで、避雷器に襲雷があった場合にまず g<sub>1</sub> が放電し、つぎに

全電圧が  $g_2$  に印加され、 $g_1$  のトリガ作用により  $g_2$  は時間遅れなく放電し、ギャップ  $g$  の全放電に速やかに進展する。

2.3 SF<sub>6</sub> ガス中の水分量

SF<sub>6</sub> ガス中の水分が放電特性に影響を及ぼすことはほとんどないが、万一水分が内部で結露した場合には絶縁耐力の低下をもたらすこと、多量に存在する場合には、動作時に分解生成物を発生するという障害を生ずるため、SF<sub>6</sub> ガス中の水分量は一定レベル以下に管理する必要がある。

- SF<sub>6</sub> ガス中の水分としては
- (1) 使用絶縁材料が放出する分
  - (2) Oリングを通じて侵入する分
  - (3) SF<sub>6</sub> ガスに最初から混入している分

等が考えられるが、このうち(2)、(3)の水分については微量であるので、接地容量内の吸着剤で十分に吸着される。(1)の使用絶縁材料については吸蔵水分の多い材料を使用しないようにする等、使用材料そのものの水分量を少なくするようにし、しかも乾燥によって組立前の水分量が平均で絶縁物重量の0.1%以下になるようにしており、接地容器中の吸着材の量はこれらの水分をすべて吸着するものとして決定している。

実際には、絶縁物中の水分が皆無になることはないで、ガス中の水分は一定レベル以下で管理することができる。

2.4 SF<sub>6</sub> ガスの分解生成物と使用材料の問題

SF<sub>6</sub> ガス中で放電が行なわれると分解ガスを生ずるが、大部分はきわめて短時間のうちに再結合し、再結合しないものも吸着剤によって除去することができるので、分解ガスが各種使用材料と反応して劣化を生ずることはない。避雷器では動作時の95%以上のエネルギーが特性要素中で熱的に消費され、ギャップで消費されるエネルギーがきわめてわずかなものであること、しかも動作時の通電時間が5ms前後と短いことから、1回動作あたりのアークエネルギーは非常に小さいことが理解できる。実際には動作責務による14kVユニットギャップあたりのアークエネルギーは、絶縁協調部会推奨の500kV系統用避雷器の仕様を参考にすると表2.1のとおりで、これが実系統では動作時のエネルギーとして最大であることが考えられる。

避雷器に使用する材料は、これらのエネルギーによる分解SF<sub>6</sub> ガスに耐えるものでなければならず、使用材料の選定にあたっては、50年以上の責務に相当すると思われる普通動作責務100回と開閉サージ動作責務50回分のエネルギーを実モデル避雷器に注入し、長時間の変異を外観、絶縁抵抗、沿面耐圧、引張り強度、抵抗値およびガス分析から調べている。

この結果では吸着剤をまったく使用しなかったにもかかわらず、材料には変化が認められなかった。とくに特性要素(セラミック)についてはX線回折も実施しているが、化学的にも変異はまったく認められない。表2.2は試験前後のガス分析結果を示すが、分解ガスの生成が微量であり、材料が分解ガスによって侵されていないことがわかる。

2.5 特性と適用

SV-FT形とSV-FBT形避雷器は表2.3に示すように、標準特性はJEC-156を十分に満足し、定格420kV SV-FBT形避雷器は、絶縁専門委絶縁協調部会による500kV系避雷器仕様推奨値表2.4により設計されている。DLRはいずれも10kAで、2.8~2.9とJECに比べて10~15%程度低く、BILに対して非常に大きな裕度を有する。放電特性についても実際の製作値は、インパルス100%放電々

表 2.1 SV-FBT 形 避雷器 14kV ユニット 動作時の アークエネルギー  
Arc energy of type SV-FBT arrester.

条件	試験	普通動作責務試験	開閉サージ動作責務試験	断路器サージ動作責務試験
シャ断電流平均回	数	500~700 A 1 回	2,000~3,000 A 1 回	100~130 A 40 回
アークエネルギー		1.6~2.5 kW <sub>s</sub>	8~11 kW <sub>s</sub>	8~12 kW <sub>s</sub>

表 2.2 通電試験前後の ガス 分析結果  
Analysis of SF<sub>6</sub> gas after discharge tests.

生成量 (セル%)	成分	SOF <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	CF <sub>4</sub>	SiF <sub>4</sub>	CS <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>
試 験 前		0.03	0.01	0.02	0.02	0.03	0.06
試 験 後		0.06	0.03	0.04	0.03	0.02	0.09

表 2.3 SV-FT, SV-FBT 形 避雷器の標準特性  
Standard characteristics of SV-FT and SV-FBT arresters.

系統の中性点接地方式				非 有 効 接 地						有 効 接 地		
系 統 最 高 使 用 電 圧    kV				69	80.5	92	103.5	115	161	195.5	230	287.5
B	I	L	kV	300	350	400	450	550	750	750	900	1,050
避雷器公称放電電流    A				10 kA								
避雷器特別動作責務静電容量    μF				50 μF (25 μF, 80 μF)								
避雷器定格電圧 kV(許容端子電圧)				84	98	112	126	140	196	182	224	266
放電開始電 圧	衝撃波 crest 以下	100 %	216	252	296	333	370	510	473	585	696	
		0.5 μs	270	315	370	416	463	638	591	732	870	
	緩波頭衝撃波 crest		240	281	320	361	401	561	522	641	762	
	商用周波 rms 以上		126	147	168	189	210	294	273	336	399	
制限電圧 kV crest 以下	5 kA		214	248	285	321	357	500	464	572	680	
	10 kA		235	274	313	353	392	548	510	627	745	
放電耐量	衝 撃 波		4×10 μs    100 kA    2 回									
	く      形 波		2 ms            600 A    20 回									

表 2.4 420 kV SV-FBT 形 避雷器標準特性  
(500 kV 系避雷器仕様推奨値(絶縁協調部会))  
Standard characteristics of 420 kV SV-FBT arresters.

定 格 電 圧	420 kV	
放電開始電圧	衝 撃 電 圧	上限: 0.5 μs で 1,340 kV 100 % で 1,220 kV 下限: 850 kV
	開 閉 サ ー ジ	波形: 緩波頭衝撃電圧を用い 10~1,000 μs の V-t 曲線を求める。この範囲において 上限: 1,090 kV 下限: 850 kV
	交 流	50 または 60 Hz で 630 kV rms 以上
制 限 電 圧	公称放電電流	10 kA
	制 限 電 圧	公称放電電流 (10 kA) に対し 1,220 kV 以下 なお 15 kA に対し 1,290 kV 以下 20 kA に対し 1,350 kV 以下を目標にする
動作責務試験	雷 サ ー ジ	始動放電電流: 10 kA 電源短絡電流: 30 kA 相当および 3 kA 相当
	開 閉 サ ー ジ	線 路 長: 200 km (14 kV 定格換算約 78 μF) 電源短絡電流: 電源側において 3 kA および 30 kA 試 験 条 件: 避雷器設置位置は送受端側の双方について別試料を用いて実施する 試験および合否判定: (a) 定格電圧では再点弧を1回許容する (b) 常時電圧 (定格 420 kV 避雷器に対し $525 \times \frac{1}{\sqrt{3}} \times 1.1 = 334$ kV の割合) で再点弧なし
	断 路 器 サ ー ジ	1/2 サイクルごとに交流電圧波高値付近で連続 40 回放電し、絶流しゃ断を確認する。 交流試験電圧: 定格 420 kV 避雷器に対し 525 kV / $\sqrt{3} \times 1.05 = 320$ kV の割合

表 2.5 ガス 絶縁変電所用避雷器の適用  
Application guide of SV-FT and SV-FBT lightning  
arresters for GIS.

避雷器定格電圧 系統電圧 kV	84	98	112	126	140	196	182	224	266	420
特別動作 責務静電容量 kV	66	77	88	99	110	154	187	220	275	525
80 $\mu$ F							SV-FBT形	SV-FBT形		
50 $\mu$ F					SV-FT形				SV-FBT形	
25 $\mu$ F				SV-FT形						

: 標準適用     
 : 適用可能     
 : 特殊適用

圧で JEC-156 の緩波頭放電開始電圧以下であるので、制限電圧とどうように大きな裕度を有する。なお、いずれの形でも万一 ガス 圧が大気圧まで低下しても、常規対地電圧に耐えられるように十分な安全が施されている。

避雷器内の ガス 圧は母線側から侵入してきたり、外部へもれることを考慮して図 4. 1 の管理範囲内で管理されるが、低圧警報 ガス 圧は定格電圧をしゃ断する限界で、また高圧警報 ガス 圧は放電特性が仕様値を越えない範囲で決定されている。したがって、ガス 絶縁変電所用避雷器も適用上はがいし形避雷器とまったくどうように扱うことができ、また被保護機器に近接して据付けられるので、被保護機器と避雷器間の距離の影響による電圧上昇はほとんどなく、従来のものより急しゅん波に対する保護効果が増す。

また、連接々地されるので避雷器で制限される電圧が被保護機器に印加され、しかも避雷器の特性が非常に低いので保護効果がきわめて大きい。表 2. 5 は ガス 絶縁変電所用避雷器の適用を示すものであるが、いずれも公称放電々流は 10 kA で、ケーブル系に使用されることが多いので重責務用として設計される。

66~220 kV 系統には 特別動作責務静電容量 50  $\mu$ F の SV-FT 形 避雷器を、275 kV 系統用には 50  $\mu$ F の SV-FBT 形 避雷器を、525 kV 系統には再閉路 サージ 動作責務を考慮して 80  $\mu$ F の SV-FBT 形 避雷器を適用するが、SV-FT 形 避雷器はギャップ部をそのままにして特性要素を考えることにより、25  $\mu$ F 避雷器として小形化をはかることができる。

275 kV 系統用の避雷器は 500 kV 系統用の避雷器と ユニットギャップは同一なので、特性要素部のみ強化して 80  $\mu$ F 重責務用とすることができる。避雷器の据付については、外部の接地容器の効果により外界の影響をまったく受けないので、従来適用不可能であった狭い空間を利用して据付けができる。

### 3. 試験 結果

接地容器構造の避雷器を使用するのが初めてであること、強制分圧を実施していること、接地容器が被保護機器と完全に接続され、万一の場合にも避雷器が容易に取りはずすことができないこと、および常に高気圧 SF<sub>6</sub> ガス で絶縁されていること等から、JEC-156 に規定以外の特殊な試験も実施したので、これらの試験も含めて代表的な試験につき要点を報告する。

#### 3. 1 高定格避雷器の動作責務試験

接地容器に避雷器を入れて使用するのが初めてであり、高定格避雷器においてしゃ断性能が、放電々圧に比例してユニットギャップの整数倍になっていることを検証するため、定格電圧 98 kV SV-FT 形 避雷器について普通動作責務試験を図 3. 1 の設備で実施して、し

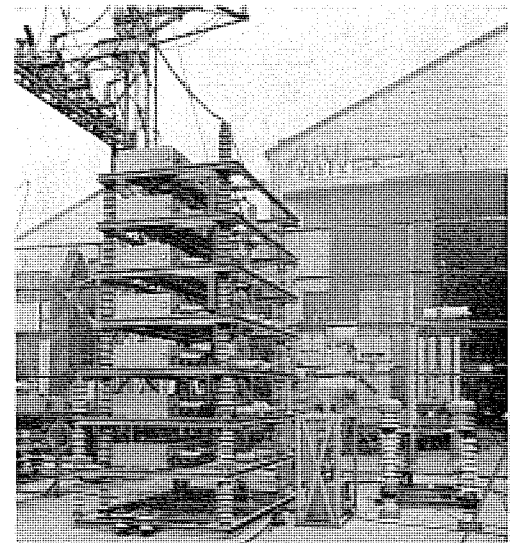


図 3. 1 高定格避雷器動作責務試験用衝撃電流発生装置  
Impulse current generator for duty cycle test.

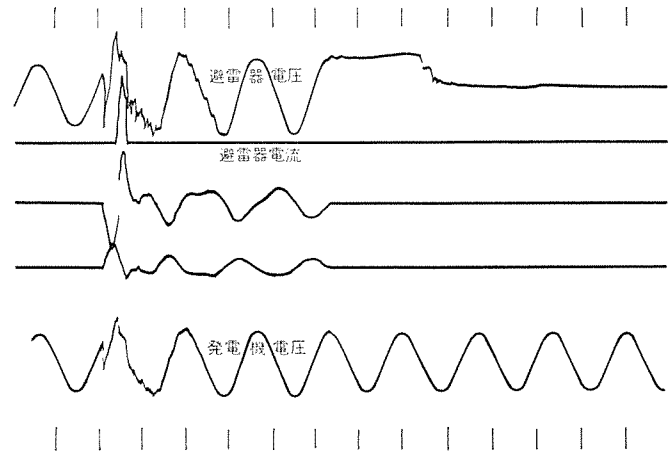


図 3. 2 開閉 サージ 動作責務試験 オシログラム  
Typical oscillogram of switching surge duty cycle tests.

ゃ断性能がユニットギャップの整数倍になっていることを確認し、計算機による分圧定数の設定の正しいことを立証した。

#### 3. 2 低圧警報ガス圧での動作責務試験

万一、避雷器が標準 ガス 圧から低圧警報 ガス 圧に低下した場合でも、定格電圧しゃ断ができることを検証するために、標準 ガス 圧ばかりでなく低圧警報 ガス 圧にした 14 kV ユニットギャップで、JEC-156 による普通動作責務試験を実施し、規定回数のしゃ断を確認している。

#### 3. 3 80 $\mu$ F 再閉路サージ動作責務試験

500 kV 系統用避雷器では、高速度を模擬した開閉 サージ 動作責務試験を実施することが推奨されているが、SV-FBT 形 避雷器 ユニットはこの試験でしゃ断できることを確認した。図 3. 2 は静電容量 90  $\mu$ F (線路長 230 km に相当)、電源短絡容量 3 kA での試験の代表的 オシログラム を示す。

#### 3. 4 放電特性試験

標準 ガス 圧での放電特性試験のほかに、低圧警報 ガス 圧で放電特性が低下しすぎないことを、高圧警報 ガス 圧では放電特性が高くなりすぎて仕様を越えないことを検証するために、3 種類の ガス 圧で試験を行ない、おのおのの ガス 圧で図 3. 3 のように満足すべき特性を確認している。しゃ断性能は放電々圧にほぼ比例しているので、製作時に放電々圧を検証しておくことが重要である。

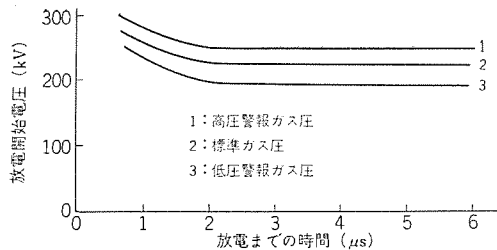


図 3.3 放電開始電圧—時間特性曲線 (98 kV 避雷器)  
Sparkover volt-time characteristics of 98 kV arrester.

### 3.5 コロナ試験

接地容器内に避雷器素子が封入されているので、内部の電界は接地容器の背後電極の影響で局部的に集中し、したがってコロナが出やすくなると考えられるが、SF<sub>6</sub>ギャップを使用する接地容器形の避雷器では、ギャップ充電部が絶縁性の良い SF<sub>6</sub> ガスでつまれるのでコロナ発生の危険は少ない。しかしながら、N<sub>2</sub> ガスを使用するものでは、SF<sub>6</sub> ガスの場合よりコロナが発生しやすいわけで、このため十分な電界緩和の対策をしておくことが必要である。196 kV SV-FT 形 避雷器で試験をした結果では、系統の対地の最高電圧 93 kV に対して有害なコロナの発生がなく、SF<sub>6</sub> ギャップ採用の長所と、シールドリングでユニットギャップをシールドする構造の利点を立証した。

### 3.6 出荷前の試験

JEC-156 による受入試験としては、点検、商用周波放電開始電圧試験、衝撃放電開始電圧試験、絶縁抵抗試験および漏れ電流試験があるが、ガス絶縁変電所用避雷器では従来の避雷器と構造が異なるため、出荷前にさらに気密試験と水分量測定も行なって安全性を確認し、長期間の使用に万全を期している。

## 4. 据付・点検と保守

ガス絶縁変電所用避雷器はいし形避雷器と外観は違うが、内部の避雷器素子は大体同じ構造であり、従来とどのような点検と保守を行なえばほぼ十分であるが、がいしは使用していないので汚損に対しては考慮する必要がなく、新たに点検と保守を行なう事項としてはガス圧の管理がある。しかし、がいし形避雷器と異なり、変電所と一体化されているので、他機器と共通に扱わねばならない事項もあり、点検と保守は変電所の構成機器と協調をとって実施することが望ましい。

### 4.1 据付時の注意

避雷器は工場において組立てられており、現地では調整等の必要がなく運搬の金具等を取りはずし、母線に接続した後 3 相連結の配管を行なえば、直ちに運転を始めることができる。一般に、避雷器の接地抵抗を低い値に保つことはきわめて重要であるが、ガス絶縁変電所では構成機器が連接々地されているので、この点では保護上都合がよく、接地抵抗を低くとることが困難なところでも十分な保護特性を期待できる。

### 4.2 据付後の点検と保守

使用に入った後、特別の保守は必要でないが、点検の方法としては漏れ電流の測定とガス密度の管理等があり、変電所の定期点検を利用して実施する。ガス密度の管理は避雷器に取付けられた圧力スイッチが、図 4.1 の管理基準からガス密度がはずれた場合に警報回

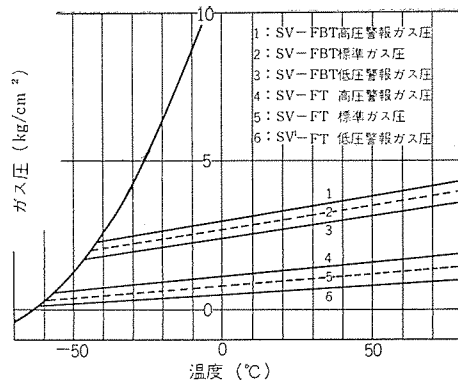


図 4.1 ガス密度管理範囲  
Control diagram of gas density.

路を作動させるようになっている。ガス密度が管理基準をはずれた場合には、SF<sub>6</sub> ガスを補給または放出し、常に管理範囲内にあるようにする。避雷器が動作した場合に生ずる SF<sub>6</sub> ガスの分解物は急速に再結合し、再結合しないものも接地容器中の吸着剤で処理されるので、内部の SF<sub>6</sub> ガスは誤操作等で水分を入れたり、ガスの成分を変えてしまうようなことがないかぎり取換は不要である。

## 5. む す び

ガス絶縁変電所用避雷器は 98 kV と 196 kV 定格の SV-FT 形 避雷器がそれぞれ関西電力泉大津変電所と新生駒交変電所に納入され、変電所の縮小に役立っているばかりでなく、汚損や外界の影響を受けない、被保護機器に密接して据付けられるので保護裕度が大きい副次的効果も発揮している。近年電力需要がますます多くなり、工業地帯や海岸のばいじんや塩害の激しい地区で多くの発変電所の建設が行なわれているが、このような用途には最適であり、ケーブルによる送電の多い都心部の変電所の異常電圧保護には福音をもたらすものである。

従来より避雷器は軸方向の耐圧が必要であるため、接地容器に封入することは困難であったが、大容量分圧素子の出現、SF<sub>6</sub> ギャップの開発および計算機利用技術の進歩発達によって、接地容器型避雷器の実用化に成功したといえよう。なお、末筆ながらこの避雷器の開発にとくにご尽力を賜った関係各位に心から謝意を表するしだいである。

## 参 考 文 献

- (1) 新田ほか：「三菱電機技報」39, 941 (昭 40)
- (2) P. R. Howard : Proc. of IEE 104, Pt. A, 123 (1957)
- (3) 川根ほか：電連大, 515 (昭 41)
- (4) 新田ほか：電連大, 104 (昭 42)
- (5) 新田ほか：電連大, 667 (昭 42)
- (6) 新田ほか：電連大, 関支 4-29 (昭 43)
- (7) 岡田ほか：電連大, 関支 4-28 (昭 43)
- (8) 潮：電連大, 386 (昭 44)
- (9) 鎌田ほか：電連大, 686 (昭 45)
- (10) 電中研：500 kV 送電に関する研究報告その 5 (昭 43)
- (11) 和田：「オーム」56, No. 10, 20 (昭 44)

SF<sub>6</sub> ガスの絶縁特性

新田 東平\*・山田 直也\*・荒畑 吉邦\*\*

## Characteristics of Sulphur Hexafluoride as an Insulating Medium

Central Research Laboratory Tōhei NITTA・Naoya YAMADA  
Itami Works Yoshikuni ARAHATA

The electrical discharge characteristics of SF<sub>6</sub> are discussed theoretically in relation to the field dependence of the ionization coefficient  $\alpha$  and the electron attachment coefficient  $\eta$ . The results are compared with those of air. A simple theoretical formulation is derived for breakdown or corona inception voltages of gaps in SF<sub>6</sub> and examined by experiments on several electrode configurations. At lower pressure than 4 atm, fairly good agreements is available between the theoretical and the experimental results with sphere and rod gaps. The actual breakdown voltage is found lower than theoretical one at higher pressure. Experimental formula for breakdown voltage is determined in the case of the higher pressure region including that of practical electrode configuration.

## 1. ま え が き

高気圧 SF<sub>6</sub> ガスは電気機器の絶縁媒体として積極的に採用されているが、電気機器の設計を超高電圧に対してより合理的ならしめるため、とくに長ギャップに対する絶縁破壊特性が重要となる。

SF<sub>6</sub> ガスはその大きな電子親和力のため、空気や窒素などのガスに比較して、すぐれた絶縁破壊特性を示すが、反面その特異な性質のために、注意すべき多くの点があり、その概要についてはすでに報告した<sup>(1)</sup>。

一般に、高気圧中の長ギャップの絶縁破壊は、1個の電子がストリーマに成長するときを開始するが、この電子がストリーマへの転移の条件は、電子の先端部の電子の数が臨界的な値に達したときに満足されると考えられる<sup>(2)</sup>。

この条件は空気の絶縁破壊電圧に対して研究され、絶縁破壊の条件として十分に認めうることがわかっているが<sup>(3)</sup>、電子の先端部の電子数と電界分布の間の相互関係が複雑であるため、これを実用的な絶縁破壊の条件として実際に応用することは困難である。

しかしながら、SF<sub>6</sub> の場合、強い電子親和力のためにこの絶縁破壊の条件はきわめて単純化される。この報告の目的は、SF<sub>6</sub> の火花破壊電圧あるいはコロナ開始電圧に対する理論式を前述の条件から求めることと、この式により求められた理論的な値を各種のギャップについて測定された実験値と比較して検討することにある。

2. SF<sub>6</sub> の放電開始電圧に対する理論式2.1 SF<sub>6</sub> 中の電子なだれ

ハロゲン原子を含む気体分子は、一般に自由電子を付着して負イオンを形成するので、空気や窒素などの気体と異なる絶縁破壊特性を示す。気体の絶縁破壊は1個の電子が電子増倍の過程は電離係数  $\alpha$  が電子付着係数  $\eta$  を越える領域における衝突電離によりもたらされる。1個の初期電子による電子なだれの中の全電子数の平均値  $N$  は次式のように表わされる。

$$\ln N = \int_0^{x_c} (\alpha - \eta) dx \quad (2.1)$$

ここで、 $x$  は最大電界を与える電極表面からの距離であって、 $x_c$  は  $\alpha = \eta$  となる  $x$  である。このとき、ギャップのいたる所で  $\alpha > \eta$  で

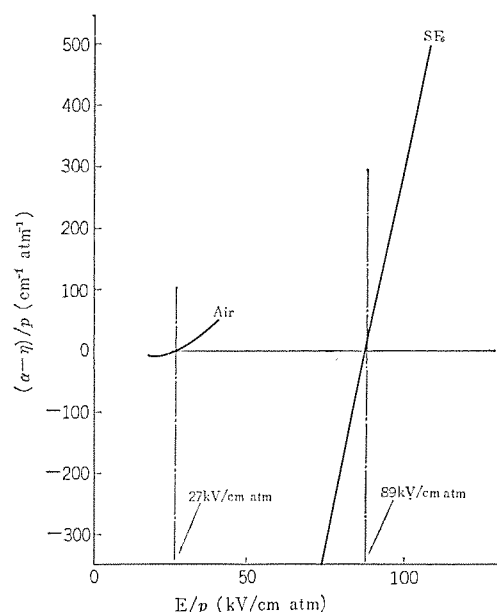


図 2.1 SF<sub>6</sub> および 空気の  $(\alpha - \eta)/p$  と  $E/p$  の関係  
( $\alpha - \eta)/p$  vs.  $E/p$  characteristics of SF<sub>6</sub> and air.

ある場合には、 $x_c$  としてギャップの長さを取ることになる。

$\alpha$  および  $\eta$  は電界  $E$  と気圧  $p$  の関数で気体により異なる。図 2.1 は  $(\alpha - \eta)/p$  と  $E/p$  の関係を SF<sub>6</sub> と空気に対して示したものである<sup>(4)</sup>。この場合、 $\alpha = \eta$  となる  $E/p$  の値は空気の約 3 倍であるが、これは  $\alpha$  が両気体ともにあまり差がないにもかかわらず、SF<sub>6</sub> の  $\eta$  が空気よりもきわめて大きいことによっている。電子が起るためには少なくともギャップの一部が  $\alpha > \eta$  である必要があるので、前述のことから SF<sub>6</sub> が高い放電開始電圧をもつことが容易に理解される。

図 2.1 からわかるもう一つの重要なことは、SF<sub>6</sub> では  $\alpha = \eta$  となる点におけるこの曲線の勾配  $K$  が空気と比べて 1 けた以上大きいことである。SF<sub>6</sub> のこの特性は  $\alpha = \eta$  となる  $E/p$  の値  $(E/p)_{crit}$  よりも  $E/p$  がわずかに大きくなれば式 (2.1) の  $N$  が急激に増加することを示しており、このため SF<sub>6</sub> の絶縁破壊において  $(E/p)_{crit}$  がきわめて重要な意味をもつことになる。

図 2.1 から、 $\alpha = \eta$  の近くで SF<sub>6</sub> の  $(\alpha - \eta)/p$  と  $E/p$  の関係は

次式のように直線的に近似できる。

$$\frac{\alpha - \eta}{p} = K \left\{ \frac{E}{p} - \left( \frac{E}{p} \right)_{\text{crit}} \right\} \quad (2.2)$$

ここで、定数  $K$  および  $(E/p)_{\text{crit}}$  は次式で与えられる。

$$K = 27 \text{ kV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \quad (2.3)$$

$$\left( \frac{E}{p} \right)_{\text{crit}} = 89 \text{ kV/cm} \cdot \text{atm}$$

したがって、式 (2.1) および (2.2) から次式が得られる。

$$\ln N = K \left[ \int_0^{x_c} E(x) dx - \left( \frac{E}{p} \right)_{\text{crit}} \cdot p \cdot x_c \right] \quad (2.4)$$

電子がどれからストリーマへの転移はなだれ中の電子数が臨界的な値 ( $N_{\text{crit}}$ ) に達したときに起こると考えられるが、Raether<sup>(2)</sup> によればこの  $N_{\text{crit}}$  の値は気体の種類によってあまり変わらず、 $10^8$  程度である。

## 2.2 平等電界中の放電開始電圧

平等電界あるいは平等に近い電界に対してはストリーマの発生そのものが火花破壊に至るので、 $N = N_{\text{crit}}$  が火花破壊の条件となる。すなわち、式 (2.4) において  $N = N_{\text{crit}}$  および  $x_c = l$  において求められる放電開始電界  $E_{br}$  および放電開始電圧  $V_{br}$  はそれぞれ次のようになる。

$$\frac{E_{br}}{p} = \frac{\ln N_{\text{crit}}}{K \cdot p \cdot l} + \left( \frac{E}{p} \right)_{\text{crit}} \quad (2.5)$$

$$V_{br} = \frac{\ln N_{\text{crit}}}{K} + \left( \frac{E}{p} \right)_{\text{crit}} \cdot p \cdot l \quad (2.6)$$

図 2.2 は放電開始時の  $E_{br}/p$  と  $pl$  の関係を  $\text{SF}_6$  と空気について比較したものである<sup>(5)</sup>。 $\text{SF}_6$  については式 (2.5) から得られる理論値を鎖線で示している。 $\text{SF}_6$  では  $pl$  が  $0.2 \text{ atm} \cdot \text{cm}$  以上で  $E_{br}/p$  が  $(E/p)_{\text{crit}}$  の一定値となるのに対し、空気では  $pl$  がこれよりも2けた近く大きくならないと一定値にならない。これは前述のように  $\text{SF}_6$  が空気よりも著しく大きな  $K$  の値をもつためである。

## 2.3 不平等電界中の放電開始電圧

2.1 節で述べたように  $\text{SF}_6$  の  $K$  が大きいので不平等電界中では最大電界  $E_{\text{max}}$  が  $(E/p)_{\text{crit}} \cdot p$  の値をわずかに越えるだけで、式 (2.1) の  $N$  がストリーマへの転移に必要な臨界値に達することが予想される。このため、 $\text{SF}_6$  中では破壊が  $E_{\text{max}}$  により支配される要素が非常に大きい。たとえば、図 2.3 は  $\text{SF}_6$  および空気中で  $p=1 \text{ atm}$ ,  $l=1 \text{ cm}$  の球-球ギャップの球半径と破壊電圧の関係を比較したものである<sup>(6)(7)</sup>。この図から空気の破壊電圧は電界の不平等性によりあまり影響されず一定値を示すのに対し、 $\text{SF}_6$  中では電界のわずかな不平等性により著しい破壊電圧の低下が見られることがわかる。実線は以下に述べる理論から計算されたものである。

電界の不平等性が強く、比較的低い気圧ではストリーマの発生は必ずしも火花破壊に至らず、安定なコロナ放電となることがある。このような場合にはコロナによる電界緩和作用が起こってコロナ開始電圧よりも著しく高い火花破壊電圧が観測されることになる<sup>(1)(8)</sup>。したがって、ストリーマの発生の条件から導出される理論的な放電開始電圧は安定なコロナが存在するときにはコロナ開始電圧を与え、無コロナのときには火花破壊電圧を与えることになる。

さて、 $\text{SF}_6$  中の電極系に放電開始電圧を印加した場合の電極先端近傍の軸上電界を後述のことから図 2.4 のように考える。この図において、 $\text{SF}_6$  中の  $E_{\text{max}}$  と  $(E/p)_{\text{crit}} \cdot p$  の差  $\Delta E$  が小さくても式 (2.1) の  $N$  が  $N_{\text{crit}}$  に達するので、極端に尖鋭な電極でないかぎり

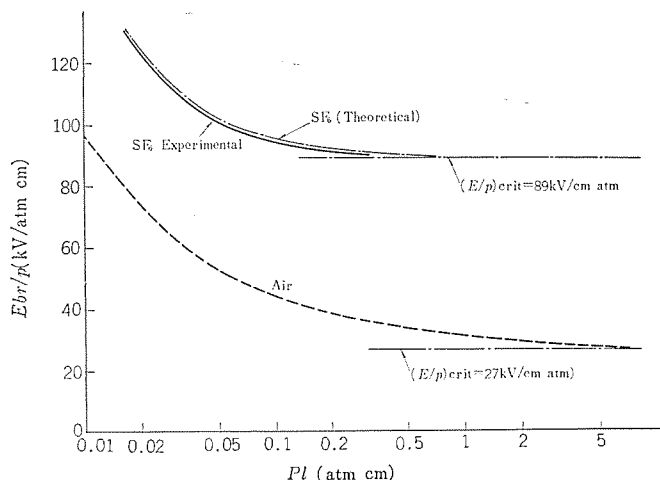


図 2.2  $\text{SF}_6$  および空気の平等電界中の絶縁破壊電界強度  
Breakdown field strength of uniform gap in  $\text{SF}_6$  and air.

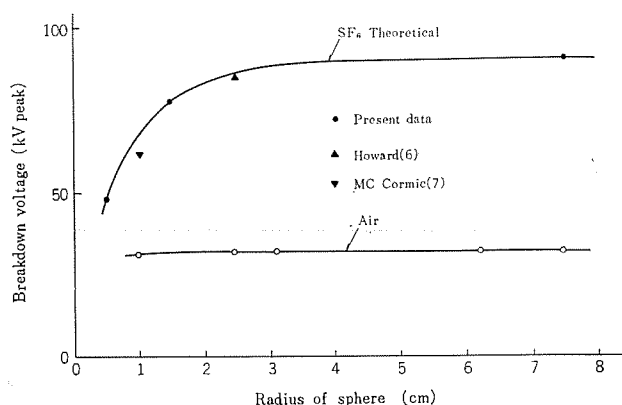


図 2.3 球-球ギャップの AC 絶縁破壊電圧  
AC breakdown voltage of sphere-sphere gap as a function of sphere radius.

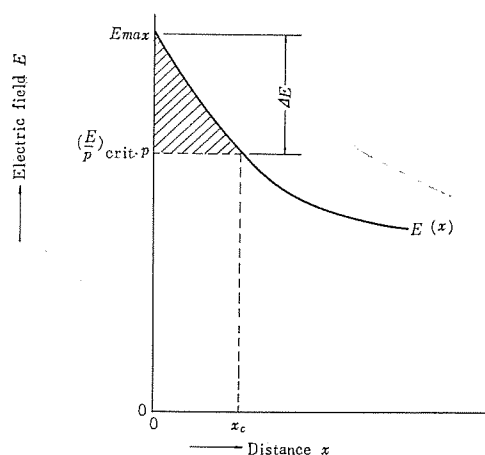


図 2.4  $E_{\text{max}}$  近傍の電界分布  
Electric field distribution in the vicinity of  $E_{\text{max}}$ .

電極表面から  $E(x_c) = (E/p)_{\text{crit}} \cdot p$  となる点までの距離  $x_c$  は非常に小さいのが特長である。

このように、 $\text{SF}_6$  中では放電開始が最大電界とその近傍  $x_c$  の電界のみによって決まることから、近似的に放電開始電圧を求めることができる。最大電界を与える電極先端はなめらかで、互いに直交する方向の曲率半径が  $R_1$  および  $R_2$  であるとする。電極近傍で電束はこれらの半径方向に向うので、電極面から  $x$  だけはなれた点の電界は次式で与えられる。

$$E(x) = \frac{E_{\max}}{\left(1 + \frac{x}{R_1}\right) \cdot \left(1 + \frac{x}{R_2}\right)} \quad \dots\dots\dots (2.7)$$

前述のように、SF<sub>6</sub>では  $x_c$  が非常に小さいので、 $x < x_c$  の範囲で  $x \ll R_1, R_2$  とすれば式 (2.7) はつぎのように近似される。

$$E(x) = \frac{E_{\max}}{\left(1 + \frac{x}{R}\right)^2} \quad \dots\dots\dots (2.8)$$

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

電極先端が球状の場合、式 (2.8) は正確に成立する。円筒状の場合は  $R=2R_1$  ( $R_1$  は円筒の半径、 $R_2=\infty$ ) となつて、式 (2.8) は

$$E = E_{\max} / \left(1 + \frac{x}{R_1}\right)$$

の一次近似となっている。

したがって、図 2.4 よりつぎの式で  $E_{\max}$  と  $x_c$  の関係が求められる。

$$\left(\frac{E}{p}\right)_{\text{crit}} \cdot p = \frac{E_{\max}}{\left(1 + \frac{x_c}{R}\right)^2} \quad \dots\dots\dots (2.9)$$

一方、式 (2.4) によってストリーマの発生の条件として放電開始時の最大電界は式 (2.9) を用いることによって次式で与えられる。

$$\frac{(E_{\max})_{br}}{p} = \left(\frac{E}{p}\right)_{\text{crit}} \cdot \left(1 + \frac{k}{\sqrt{p \cdot R}}\right) \quad \dots\dots\dots (2.10)$$

$$k = 2 \left( \frac{\ln N_{\text{crit}}}{K \cdot (E/p)_{\text{crit}}} \right)^{1/2} = 0.175 \text{ atm}^{1/2} \cdot \text{cm}^{1/2}$$

このように、 $(E_{\max})_{br}/p$  は気圧  $p$  および電極先端の曲率半径  $R$  が大きいほど、低い値となり、 $(E/p)_{\text{crit}}$  に漸近することがわかる。

式 (2.10) から、この電極系の放電開始電圧  $V_{br}$  を求める場合、放電開始時のギャップの平均電界を  $(E_{av})_{br}$  とすれば次式が成立する。

$$(E_{av})_{br} = V_{br}/l = (E_{\max})_{br} \cdot u \quad \dots\dots\dots (2.11)$$

$$u = E_{av}/E_{\max}$$

ここで、 $u$  は電極系の電界分布を計算して得られる定数である。

式 (2.10) および (2.11) より  $V_{br}$  を求めれば次式のようになる。

$$V_{br} = (E/p)_{\text{crit}} \cdot u \cdot p \cdot l \cdot \left(1 + k/\sqrt{p \cdot R}\right) \quad \dots\dots\dots (2.12)$$

$(E/p)_{\text{crit}}$  と  $k$  はすでに与えられた定数であるから、電極系によって決まる  $u, l, R$  が与えられると、気圧  $p$  における放電開始電圧  $V_{br}$  が式 (2.12) で計算できる。

### 3. 実験結果

2章で述べた放電開始電圧に対する理論を検証し、また安定なコロナ放電が発生した場合の火花破壊電圧の特性を調べるために、DC 電圧、AC 電圧、緩波頭波電圧および衝撃波電圧を用いて実験した。

電極系として、(a) 15 cmφ 球-球ギャップ、(b) 先端を半球状とした 3 cmφ 棒-棒ギャップおよび (c) どうようの 1 cmφ 棒-棒ギャップの 3 種類を使用した。(a) は比較的平等に近い電界、(c) はきわめて不平等な電界、(b) はこれらの中間の電界をもつ。

#### 3.1 DC および AC 放電特性

図 3.1 から図 3.3 はそれぞれ (a), (b), (c) の電極系について AC 電圧を用いて測定した放電特性を示す。これらの電極系の電界分布を計算機を用いて計算し、式 (2.12) を用いて得た放電開始電圧の理論値を実線で示した。また、電界が非常に不平等となって安

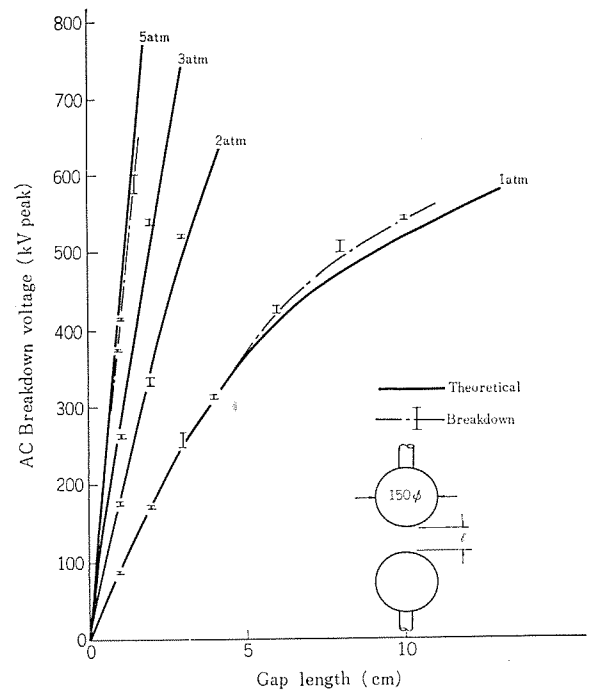


図 3.1 Gap(a) の AC 絶縁破壊電圧  
AC breakdown voltage for gap(a).

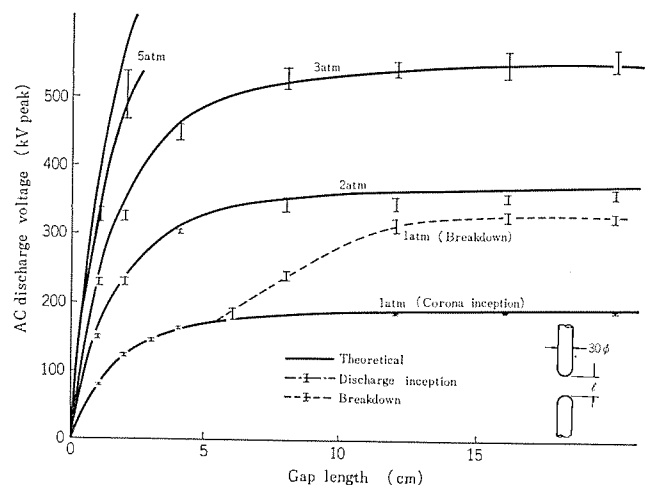


図 3.2 Gap(b) の AC 絶縁破壊電圧およびコロナ開始電圧  
AC breakdown or corona inception voltage for gap(b).

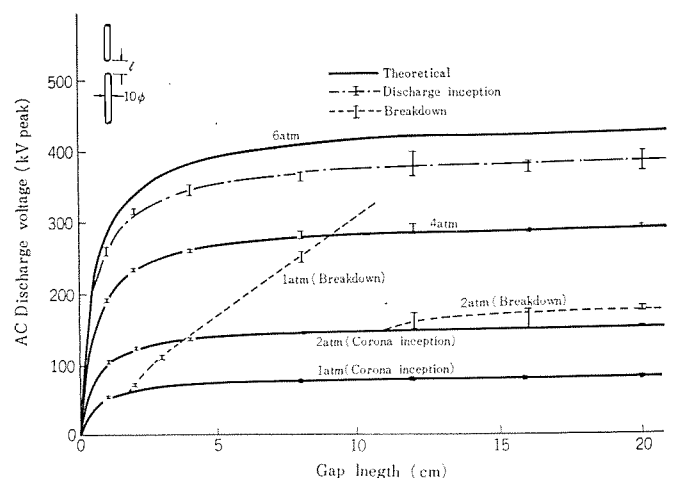


図 3.3 Gap(c) の AC 絶縁破壊電圧およびコロナ開始電圧  
AC breakdown or corona inception voltage for gap(c).

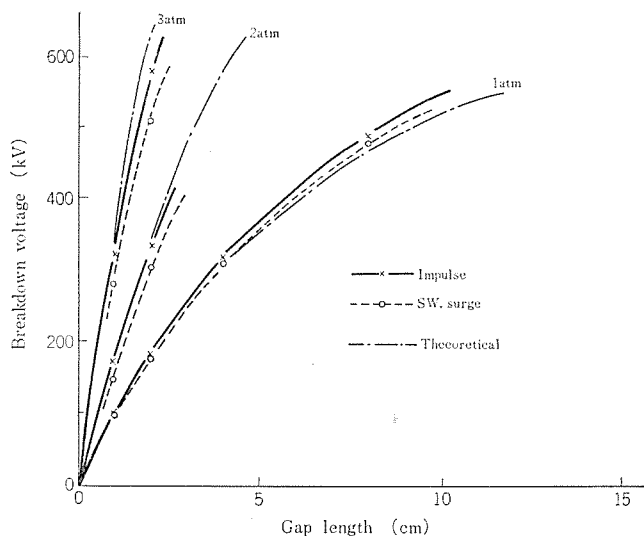


図 3.4 Gap(a) の衝撃および緩波頭波破壊電圧  
Impulse and switching surge breakdown voltage for gap(a).

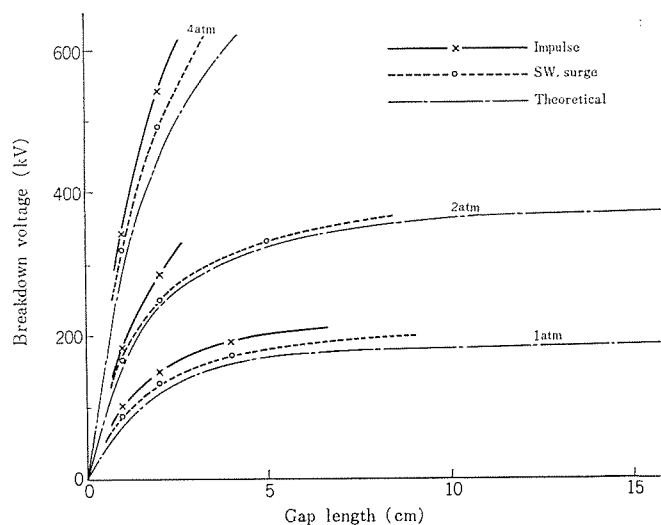


図 3.5 Gap(b) の衝撃および緩波頭波破壊電圧  
Impulse and switching surge breakdown voltage for gap(b).

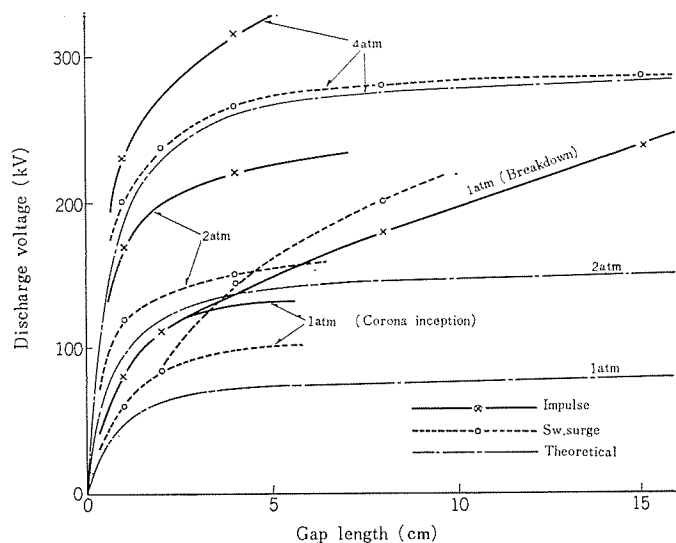


図 3.6 Gap(c) の衝撃および緩波頭波破壊電圧  
Impulse and switching surge breakdown voltage for gap(c).

定な コナ 放電が存在する場合の火花破壊電圧を破線で示した。

4 atm 以下の比較的低い気圧領域で、放電開始電圧に対する実験値は非常によく理論値と一致していることがわかる。気圧がさらに高くなると、実験値は理論値よりも幾分低い値を示すようになるが、この高気圧における放電開始電界の低下については電極表面の影響と関連させて後述する。

比較的低い気圧における、極端な不平等電界中では コナ 放電を生じて、この空間電荷による電界緩和作用で火花破壊電圧が著しく上昇している。このような電界緩和作用は非常に不安定で、かつ電荷の拡散係数が小さくなる高気圧になると消滅して コナ 開始が火花破壊と一致する。

DC 放電特性は AC 放電特性とほぼどうようであるが、正負の特性間に多少の極性効果が見られた。すなわち、放電開始電圧に関してはギャップの電界分布が対称に近いときは気圧にかかわらず極性効果はほとんどないが、電界分布の非対称性が強いときは気圧が増すにつれて負が正よりも低い放電開始電圧を示すようになる。また、コナ 放電に基づく電界緩和効果に関しては気圧を増加させたとき、正極性では急速に消滅するが、負極性では徐々に消滅する。

### 3.2 衝撃および緩波頭放電特性

同じ電極系について  $1.7 \times 40 \mu\text{s}$  の衝撃波電圧および  $170 \times 3,200 \mu\text{s}$  の緩波頭波電圧を印加して実験を行なった。

図 3.4 から図 3.6 に各気圧における実験値のうち、正極性の最低破壊電圧の結果を前述の理論値と比較して示した。

緩波頭波電圧に対する破壊電圧はコナ 放電による電界緩和作用のない領域ではほとんど AC 破壊電圧に等しい。すなわち、4 気圧以下の比較的低い気圧領域では 2 章に述べた理論値とよく一致し、4 気圧以上の高気圧になると理論値よりも低下するようになる。

衝撃破壊電圧と AC 破壊電圧の比は (a) の平等電界に近い場合には、ほとんど 1 に近いが、 $R$  が小さい (c) の場合には 1 よりかなり大きい。この衝撃比は電界の不平等性やギャップの長さより、電極先端の曲率半径  $R$  によって決まるようである。これは  $R$  が小さいほど、電極表面で破壊に寄与する部分が小さいことによるものと思われる。気圧が増すと、(a) についても衝撃破壊電圧が AC や緩波頭波破壊電圧に比べてかなり高くなる。これは高気圧では、後述する電極表面の影響を受けて AC や緩波頭波破壊電圧が低下するが、この場合の破壊時間遅れが著しく大きいためである。したがって、衝

表 3.1 Gap(c) の V-t 曲線の極性効果  
Polarity effect of V-t curves for gap(c).

$\ell$ p	1 (atm)	2 (atm)	4 (atm)	6 (atm)
1 (cm) $u=0.481$				
4 (cm) $u=0.161$				
16 (cm) $u=0.045$				

撃破壊電圧は高気圧下においては理論的な値にほぼ近くなる。

(c)でギャップの長さが2cmを越えてコロナ放電を生ずると、火花破壊電圧はAC・緩波頭波・衝撃波電圧の順に低くなる領域が現われているが、この傾向はコロナ放電による電界緩和作用の非常に特異な性質である。

負極性の破壊電圧は電界緩和作用のない領域では、正極性よりも低い値となっているが、電界緩和領域では著しく高い値となる。

表3.1は $V-t$ 曲線により正負の放電特性を比較したものである。理論値との比較をするために、放電電圧は理論値で正規化して示した。ギャップの長さが短い比較的平等に近い場合には、 $V-t$ 曲線は平坦で、常に負が正よりも低く、気圧の上昇につれてこの差が大きくなる。

ギャップの長さが長くなって、電界の不等性が非常に強い場合にはインパルスコロナが発生し、この電界緩和作用により火花破壊電圧が著しく上昇する。低気圧では理論的な放電開始電圧の数倍の火花破壊電圧を示す場合もある。この不平等電界における $V-t$ 曲線で常に負が正よりも上回っている点から、コロナによる電界緩和作用が負極性において顕著であることがわかる。

ギャップの長さが上記した二つの場合の中間で、 $u=0.1\sim0.2$ 程度のときには、気圧が高くなったときに正コロナのみが消滅してしまう領域が現われる。このような領域では、負のコロナによる電界緩和作用もあまり強くないので、正負の $V-t$ 曲線が交差する現象が見られる。この現象は後に検討するストリーマの進展におよぼす気圧の効果が、正と負において異なるためと考えられる。

#### 4. SF<sub>6</sub> ガスの放電の諸特性

##### 4.1 放電開始電圧の飽和特性

(a), (b)および(c)のいずれの電極系についてもギャップの長さ $l$ と電極先端の半径 $R$ との比 $l/R$ が大きくなると、放電開始電圧は強い飽和特性を示す。この特性は $l/R$ が増加するにつれて式(2.12)における $u \cdot l$ が一定値に近づくためである。

この傾向を球ギャップについて考えて見る。 $l$ が十分に大きいときには、電極表面の電界強度は対向電極に関係なく、無限空間内に置かれた電位 $V$ の導体球の表面電界として次式で近似される。

$$E_{\max} \simeq V/R \quad \dots\dots\dots (4.1)$$

一方、平均電界は $E_{av}=V/l$ であるから

$$u \cdot l = (E_{av}/E_{\max}) \cdot l \simeq R \quad \dots\dots\dots (4.2)$$

が成立する。ゆえに、ギャップの長さが十分に長い場合の球ギャップの放電開始電圧は式(2.12)から $l$ に関係なく次式で表わされる。

$$V_{br} \simeq (E/p)_{\text{crit}} \cdot R \cdot p(1+k/\sqrt{p \cdot R}) \equiv V_{\infty, \text{sphere}} \quad \dots\dots\dots (4.3)$$

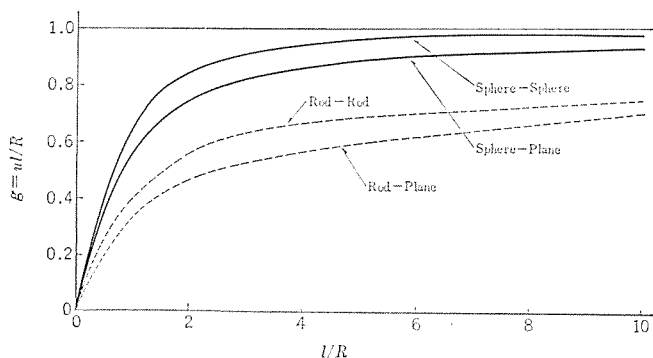


図 4.1 球および棒ギャップの $g$ の $l/R$ に対する依存性  
 $l/R$  dependence of  $g$  for sphere and rod gaps.

すなわち、半径 $R$ の球ギャップの放電開始電圧はギャップの長さを増加していくと、 $R \cdot p$ のみによって決まる電圧 $V_{\infty, \text{sphere}}$ に漸近することになる。

$l$ が十分に大きくない場合には放電開始電圧 $V_{br}$ として

$$V_{br} = g \cdot V_{\infty, \text{sphere}} \quad \dots\dots\dots (4.4)$$

のように置くことができる。ここで、 $g(=ul/R)$ は $u$ もまた $l/R$ で決まるので、 $l$ と $R$ の比のみで決定される。

Ryan および Walley<sup>(9)</sup>が示した球ギャップの電界計算結果を用いて $g$ の $l/R$ 依存性を示すと図4.1のようになる。この図から $g$ の $l/R$ 依存性が放電開始電圧の飽和特性を示していることがわかる。

まったく同様な取り扱いは棒ギャップの場合についても成立する。しかし、 $g$ および $V_{\infty}$ の値は解析的に得られないので、棒—平板ギャップについてのAbou-Seada および Nasser<sup>(10)</sup>の電界計算結果を用いる。

すなわち、放電開始電圧の漸近値 $V_{\infty, \text{rod}}$ は

$$V_{\infty, \text{rod}} = 1.7(E/p)_{\text{crit}} \cdot R \cdot p(1+k/\sqrt{p \cdot R}) \quad \dots\dots\dots (4.5)$$

となる。また、 $g$ の計算結果を図4.1に破線で示した。

球ギャップに比べ、棒ギャップのほうが飽和の傾向はゆるやかである。また、球—球あるいは棒—棒ギャップのほうが球—平板あるいは棒—平板ギャップよりも強い飽和特性を示すことがわかる。すなわち、電界集中の大きいもののほど飽和の傾向も強いといえる。

##### 4.2 放電開始と火花破壊の関係

電子なだれからストリーマへの転移を定式化して放電開始条件を求めたが、この放電開始が全路火花破壊となるか局部コロナ放電となるかは非常に重要な点である。以下に、この点をストリーマの進展に関連させて定性的に述べる。

電極先端の高電界部で生じたストリーマが、ギャップ中の低電界部を進展して対向電極まで達する条件として、ストリーマ先端の電界が十分高く、たとえば新たにこの先端に向って生ずる1個の電子なだれが、ストリーマに転移するに十分な値を持つ必要があると考える。簡単のため、図4.2に示すように長さ $x$ のストリーマ先端を半径 $r$ の導体球で模擬し、その導体球の電位を $V_s$ とする。 $V_s$ の値はストリーマのステムの導電度が十分高い場合には、電極の電位(放電開始

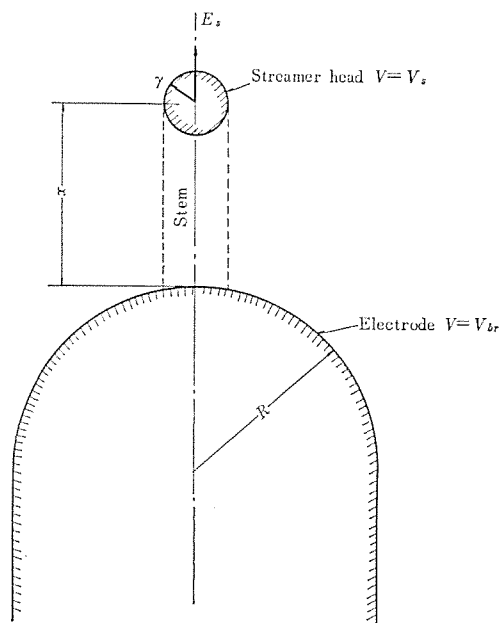


図 4.2 ストリーマモデル  
Streamer model.

電圧  $V_{br}$ ) に等しく、またステムの抵抗が十分高ければ放電開始前におけるその点の電位  $V(x)$  に等しいはずである。実際には  $V_s$  はこの中間の値を取るものと考えられる。

$$V(x) < V_s < V_{br} \dots\dots\dots (4.6)$$

今、ストリーマ先端の大きさはあまり大きくなく、 $x \pm r$  の範囲でもとの静電界は一樣で  $E(x)$  に等しいとすれば、ストリーマ先端の電界  $E_s$  は次式で表わされる<sup>(11)</sup>。

$$E_s = 3E(x) + \frac{V_s - V(x)}{r} \dots\dots\dots (4.7)$$

$E(x)$  が平等に近い場合には  $V_s \simeq V(x)$  であっても、 $E_s$  が大きいのでストリーマは進展するが、不平等電界でギャップ中に  $E(x)$  の小さい領域があれば、 $V_s > V(x)$  でなければ進展は止まる。 $V_s = V_{br}$  であれば  $E(x)$  にかかわらずストリーマは進展して対向電極に達する。 $V_{br}$  と  $V_s$  の差は放電の進展に伴ってストリーマのステムに流れる電流の電圧降下によって生じ、おもにストリーマのステムの導電性により支配されると考えられる。

以上のことからストリーマの進展に関してつぎのような定性的な結論が得られる。

- (1) 気圧が高いほどストリーマ内の電荷密度が高く、 $V_s$  は  $V_{br}$  に近くなるので、ストリーマは進展して火花破壊に至りやすい。
- (2) 電界の不平等性が強い場合には、ストリーマの進展にともない式 (4.7) の第2項が十分に大きくなる前に、第1項が減少するので、コロナ放電となりやすい。
- (3) 負ストリーマでは陽極向けのストリーマの出発点が電極からはなれた点にあり、 $V_s$  は本質的に  $V(x)$  近い値を取るなので火花破壊に至りにくい。

これらの結論は実験結果が示す傾向とよく一致する。したがって、おそらくストリーマが対向電極に達したときに火花破壊に至ると考えてよいものと思われる。

4.3 高気圧における放電開始電界の低下

3章で述べたように、球ギャップおよび棒ギャップの  $SF_6$  中における放電開始電圧の値は、気圧が高くなると理論的に推定される値よりも低くなる。DC の実験結果から、この高気圧における放電開始電界の低下は、陰極面の影響であることが容易にわかる。すなわち電界がほぼ対称で、印加電圧の極性によって、陰極となる電極の電界があまり変らない電極(a)の場合には、極性効果は見られない。このとき、高気圧において陰極となるほうの電極の表面電界がある値に達すると、正負の放電開始電圧はともに理論値より低下する。一方、電界の非対称性の強い電極(c)においては、電界集中のより

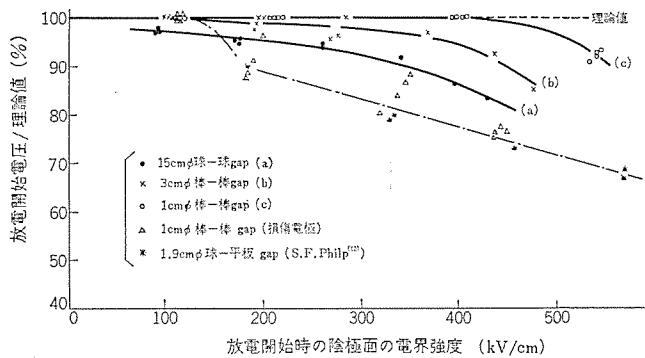


図 4.3 球および棒ギャップの放電開始電圧の理論値からの低下

Reduction of breakdown voltage from theoretical value for sphere and rod gaps.

強い側の電極の極性が負の場合のほうが正よりも、放電開始電圧が理論値から低下しはじめる気圧が低く、また同一気圧では正の印加電圧の場合よりもはるかに大きな低下率を示す。

図 4.3 は正負の極性にかかわらず、放電開始電圧の理論値に対する比を放電開始時の陰極面の電界強度に対してプロットしたものである(実線)。この図から、電極(a)では陰極電界が小さい領域でも5%以下の低下があり、電界が増加するにつれて低下の割合が他の電極よりも強いこと、電極(b)および(c)ではそれぞれ陰極電界が100 kV/cm および 400 kV/cm 以下では低下はなく、電界がこれよりも高くなるにつれて低下が始まることわかる。

すなわち、高気圧における放電開始電界の理論値からの低下は、陰極面の電界が電極によって決まる臨界的な値を越えたときに起こり、また陰極先端の曲率半径が大きいほどこの臨界的な陰極電界は低く、そのうえ放電開始電界の低下は同一陰極電界ではより大きくなる。

陰極面が多数回の放電で損傷したり、表面精度が悪い場合には上記した放電開始電界の低下の始まる陰極電界は低くなり、そのうえ低下率も著しく大きくなる。図 4.3 で△印のプロットは電極(c)が損傷した場合に対するもので、これらを結ぶ一点鎖線がこの効果をよく表わしている。1.9 cmφ 棒—平板ギャップについて S. F. Philp<sup>(12)</sup>の結果を\*印で同図にプロットしたが、損傷した電極(c)の示す傾向とまったく同じであった。

図 4.4 は実用的な電極配置である同軸円筒ギャップについて、どのような整理をして得たものである<sup>(13)(14)(15)</sup>。図 4.3 の場合と異なり、放電開始電圧の理論値からの低下は100 kV/cm 以下の陰極電界に対しても非常に大きく、数百 kV/cm の電界では理論値の1/2の放電開始電圧を得ることすら困難であることがわかる。各実験者により電極の寸法、表面精度などの因子が異なっているが、総括して内径および外径が大きいものほど低下率が大きいといえる。

このように球ギャップや棒ギャップにおいて電極先端の曲率半径が

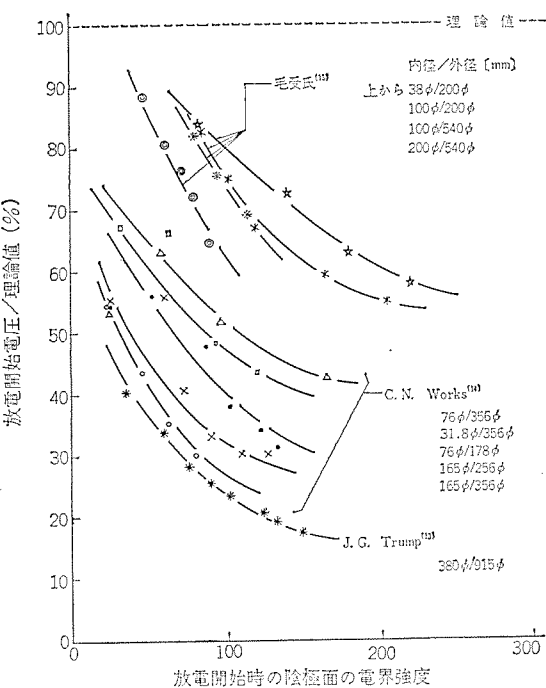


図 4.4 同軸円筒ギャップの放電開始電圧の理論値からの低下

Reduction of breakdown voltage from theoretical value for coaxial cylindrical gaps.

増加したり、また同軸円筒ギャップにおいて直径が増加した場合に、放電開始電界が理論値を大きく下回る点について筆者らは $R$ が大きくなると、陰極上の部分的な点から発生した電子による負イオン空間電荷が全体の電界を変え(歪)ませやすいことによると考えている。

以上に述べたように、高気圧において放電開始時の陰極面の電界が十分に高くなると、静電界の $E/p$ をもとにして得られる $\alpha$ および $\eta$ で考えると、ギャップ空間の至るところで $\alpha < \eta$ であるにもかかわらず放電が起こる場合がある。このことは電離増倍によらない電荷の蓄積で静電界の変わが生じていることを示している。この電荷は前述のように陰極から電界放出された電子が負イオンとなって形成されるものと考えられる。

## 5. ガス絶縁機器に対する耐電圧の推定

4. 3節で明らかにしたように、 $\text{SF}_6$ ガスの放電開始電圧は球ギャップおよび棒ギャップでは、4気圧以上の高気圧になると理論的な値以下となり、一方、実用的な同軸円筒ギャップでは大気圧においてすら理論的な値を確保することは困難である。したがって、数気圧の $\text{SF}_6$ ガスを利用する同軸円筒ギャップ構造が主体となるガス絶縁機器においては、その耐電圧の推定を理論的に精度よく行なうことは現段階では不可能である。しかしながら、筆者らはこのような場合に対する耐電圧の推定法を、2章で述べた理論と豊富なデータを基礎として確立した。

### 5.1 耐電圧の推定

気体の放電開始電圧を支配する基本的な因子は、2章で述べたように電界分布、ギャップの長さおよび気圧である。筆者らはこれらの因子により実用的な電極配置の実用的な気圧領域における $\text{SF}_6$ ガスのACまたはDCの最低放電開始電圧の推定式を式(2.12)に類似したつぎのように樹立した。

$$V_{br} = K' \cdot p^n \cdot u \cdot l \cdot \delta(l) \cdot \gamma(R) \quad \dots\dots\dots (5.1)$$

ここで、 $K'$  および  $n$  は定数であり、 $\delta(l)$  および  $\gamma(R)$  はギャップの長さ  $l$  および最大電界を示す電極先端の曲率半径  $R$  により決まる係数であるが、これらは実験的に求められるものである。

図5.1は数種類の電極配置に対する放電開始電圧の気圧依存性の例で、これから  $n$  は約0.8の値をもつことがわかる。この値はAC

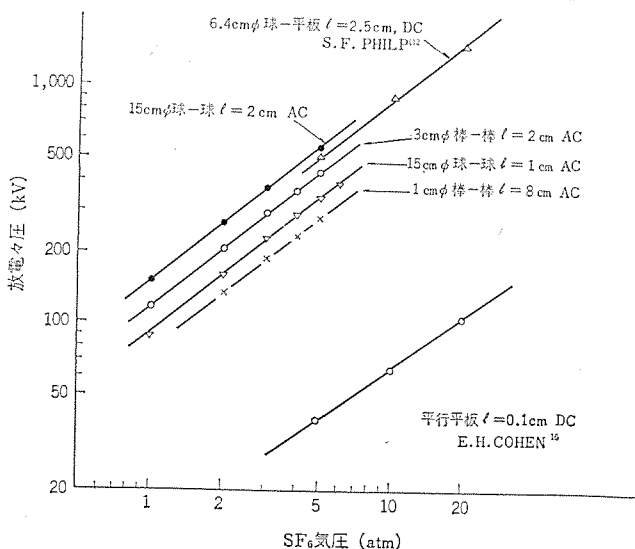


図 5.1 各種電極の放電電圧の気圧依存性  
Pressure dependence of the breakdown voltages for various electrode configurations.

およびDC電圧に対する放電特性に限らず、衝撃波電圧および緩波頭波電圧に対する放電特性についても同じである。ただし、衝撃および緩波頭波放電開始電圧はAC放電開始電圧よりも高く、その値は式(5.1)から推定される値にそれぞれの衝撃比を乗じたものとなる。この衝撃比は実用的な電界分布および気圧の領域において $u$ の値により、ほぼ一義的に決まった値を取る。

$K'$  は式(2.12)における  $(E/p)_{crit}$  に対応するものであるが、その値は電極表面のあらさにより変化する。 $\delta(l)$  および  $\gamma(R)$  は  $l$  が小さく  $R$  の大きい平等に近い電界において、 $(E_{max})_{br}/p$  がほぼ一定となるので、両者とも1に近い値となる。しかし、 $(E_{max})_{br}/p$  はギャップの長さが長くなるにつれて減少し、また電極先端の曲率半径が小さくなるにつれて増加する。したがって、 $\delta(l)$  は  $l$  の増加に対して減少する関数となり、 $\gamma(R)$  は  $R$  の減少に対して増加する関数となる。

### 5.2 電界の計算

ガス絶縁機器におけるAC・DC・衝撃波電圧・緩波頭波電圧に対する耐電圧の推定は、式(5.1)の $u$ 値を計算することにより可能である。

電界を求める手法は種々あるが、大きく分類すると、

- (a) グラフ算出法
- (b) アナログ方式による計算
- (c) 数値計算

となる。単純な電極形状に対しては、電界強度に対する理論式を導いて正確に $u$ の値を計算できる。複雑な形状に対しては、電界の計算は一般にきわめて煩雑で非効率である。したがって、アナログ方式による計算が行なわれ、古くからラバーシート法・液流体法・抵抗網法・電界液法・抵抗紙法などの方法を用いてきた。さらに、最近では大型電子計算機の出現により、電界を直接数値計算する手法をとっている。

これらの各手法は一長一短があるので、筆者等は問題に応じ各手法を駆使しているが、そのおもな手法を以下に示す。

#### 5.2.1 グラフ算出法

この方法は設計時にしばしば使用される単純な電極形状に対するもので、 $u$ 対 $l/R$ の関係が一義的に決まるので、グラフ化しておく非常に便利である。この場合、理論式から直ちに求められるものと、複雑な境界値問題で計算が煩雑なものがあるが、後者についてはデジタル計算機を使って算出した。

#### 5.2.2 アナログ方式による計算

この方式には前述のように各種の方法があるが、以下に抵抗紙模写法について述べる。

実機は複雑な電極形状の部分が多く存在するので、単純な電極形状に対する $u$ のグラフだけでは実機の電界強度を精度よく推定することは困難である。抵抗紙模写法は複雑な電極形状に対して特別大がかりな装置を必要とせずに、とくに二次元平面に対して短時間で精度よく $u$ を推定することができる。

この方法は二次元のPoisson方程式を直接解く方法で、実場を抵抗紙上の電流場に変換して解析することができる<sup>(17)</sup>。すなわち、実場と模擬場におけるPoisson方程式を直角座標で表現すると式(5.2)および式(5.3)のようになり、これら是对応関係にあることがわかる。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \epsilon \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \epsilon \frac{\partial V}{\partial y} \right) = -q \quad \dots\dots\dots (5.2)$$

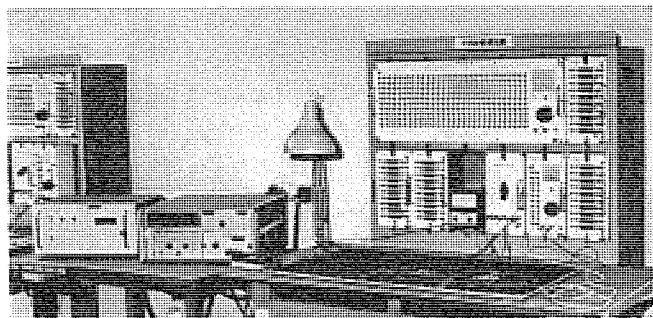


図 5.2 抵抗紙模写装置  
Field mapping apparatus by conducting paper

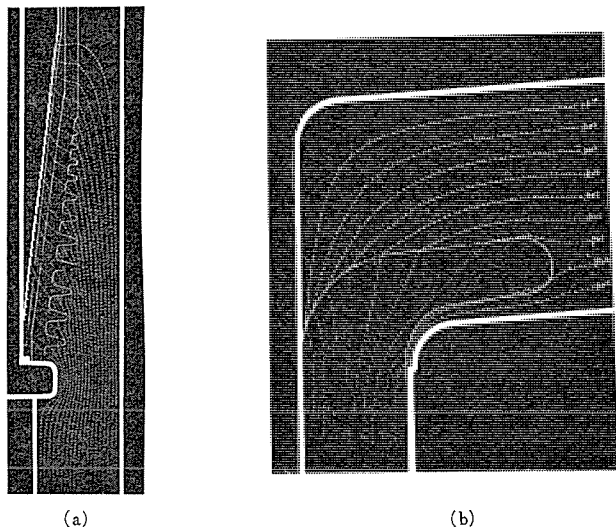


図 5.3 抵抗紙模写による電界分布例  
Potential distributions obtained from conducting paper

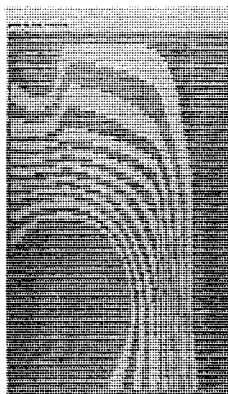


図 5.4 計算機による電界分布例  
Potential distribution obtained from computer.

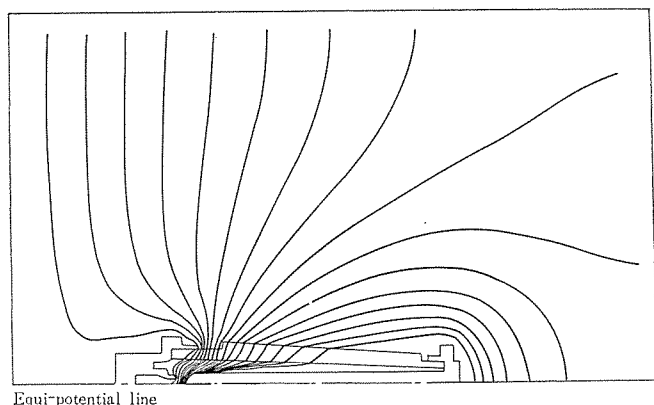


図 5.5 作図器による電界分布例  
Potential distribution drawn by the graphic plotter

表 5.1 各種の電界推定法の比較  
Comparison between some methodes for field mapping.

手 法	グラフ算出法	抵抗紙模写法	数値計算法
項 目	二 次 元 軸 対 称	主として二次元	二次元・軸対称
比 誘 電 率	一 定	1~7 (段階状)	∞
電位不明の浮いた電極	不 可 能	可 能	可 能
境 界	∞	抵抗紙の大きさ	∞
形 状 の 難 易	単純形状	任意形状	あまり複雑な形状 は誤差が大きい
精 度	正 解	5% 以 下	境界条件により異 なる
時 間	5 分	1/2 日	境界条件により異 なる
費 用	1	10	30

ここで、 $\varepsilon$  : 誘電率、 $V$  : 静電界電位、 $q$  : 電荷密度

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{\rho} \frac{\partial V^*}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{1}{\rho} \frac{\partial V^*}{\partial y} \right) = -j \dots\dots\dots (5.3)$$

ここで、 $\rho$  : 固有抵抗、 $V^*$  : 電位、 $j$  : 電流密度

また、抵抗紙模写法は比誘電率の異なる物体が共存する静電場においても、抵抗分布を制御することにより<sup>(18)</sup>、さらに二次元平面に比較してやや時間を要するが、軸対称の場合も模擬が可能である。

現在使用している抵抗紙模写装置、およびフィールドマップの代表例を図 5. 2、5. 3 に示す。

### 5. 2. 3 数値計算法

最近の電子計算機の著しい発達にともない、比較的複雑な電極形状に対する電界の計算が精度よくできるようになってきた。5. 2. 2 項に述べた抵抗紙模写法が主として二次元場に有効であるのに対し、数値計算法は比誘電率の異なる物体が共存する二次元場、および軸対称場の解析を短時間にすることができる。したがって、ガス絶縁機器は軸対称のものが多く、この方法は今後ともかなり有力な手法である。

現在使用しているプログラムは、計算する領域を網目でおおい、偏微分方程式を差分方程式で近似し、網目の交点上の電位を反復代入法で求めるものである。作図器を併用すれば、電極近傍の電界分布、および等電位線を描き出せることができるので、当社ではこの方法を多くの問題に適用している。しかし、この方法には、複雑な電極形状および境界条件による収束の問題、ならびに計算時間および計算費用等に検討の余地がある。

計算機によるフィールドマップ例を図 5. 4 に、作図器を使用した例を図 5. 5 に示す。

### 5. 2. 4 電界の計算手法の比較

現在実機に対しておもに使用している電界の計算法について概要を前述したが、各計算法を比較すると表 5. 1 のようになる。

実機における電界強度の推定は、要求する精度・時間・費用等により各方法を単独に使用するだけでなく、おのおのの長所を組み合わせても実施している。なお、前述の方法で推定不可能な場合には、静電探針法<sup>(19)(20)</sup>による実測も併用している。さらに、 $u$  の精度を高めるために一般三次元電界の大形電子計算機用プログラムを開発中

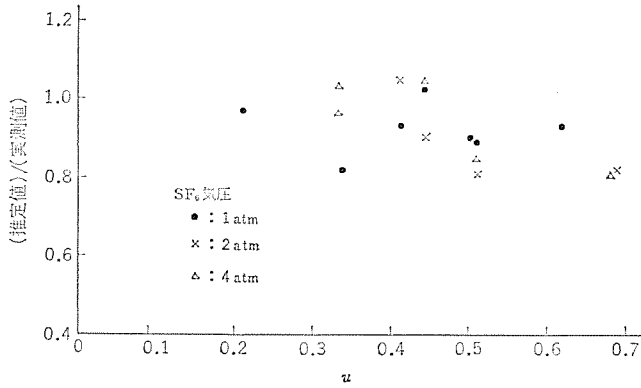


図 5.6 ガス絶縁機器の耐電圧の推定と実測の比較例  
Comparison between the estimated and experimental withstand voltages for gas insulated apparatus.

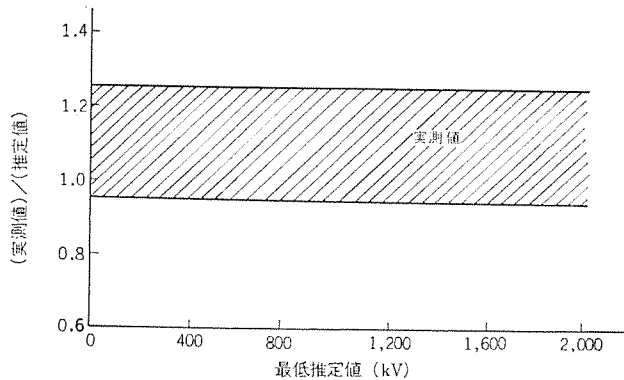


図 5.7 設計されたガス絶縁機器のBILと耐電圧  
BIL and withstand voltage in gas insulated apparatus.

である。

### 5.3 耐電圧の推定と実測の比較

5.2節で述べた電界の計算法により、 $u$ を算出できるので、式(5.1)からAC電圧に対する耐電圧を求めることができる。この値に衝撃比を乗じたインパルスに対する耐電圧の推定値と、実機の最低の放電電圧を数十ケースについて比較した結果、良い一致が見られた。

図5.6はインパルスに対する耐電圧の推定値と実測した最低の衝撃放電電圧の比を $u$ に対してプロットした例であるが、この比が $u$ および $p$ に関係なく0.80~1.05の値を取ることが示されている。この比は、また $l$ にも無関係であることが示されたので、式(5.1)は実機で使用されるような $u$ 、 $l$ および $p$ に対して安全側の絶縁設計を精度よく行なうのに適していると言える。

現在までのところ、0.2~1.0の $u$ 、50 cm以下の $l$ および15気圧以下の $p$ に対して式(5.1)が実用的に有効な推定式であることを確認している。

図5.7はガス絶縁機器において、この推定法を評価するために、推定値を基準として実測値を図示したものである。この図から、広い電圧範囲にわたって実機の耐電圧は推定値の0.95~1.25の範囲に入っていることがわかる。なお、この推定法は最低の放電電圧を与えるものであるため、実設備に対しては安全率を加味しなければならない。

以上述べたことから、理論的な考え方と多くの実験データより樹立した耐電圧の推定法は、電界計算における誤差、電極表面のあらさ、および工作精度等を考えると現段階では実機の絶縁設計にきわめて有用である。

SF<sub>6</sub>中における長ギャップの火花破壊電圧あるいはコロナ開始電圧を、つぎの性質に注目して理論的に導出できることを示した。

(1) SF<sub>6</sub>の放電は1個の電子なだれ中の電子数が臨界値 $10^8$ に達したときに開始する。

(2) SF<sub>6</sub>の $(\alpha-\eta)/p$ と $E/p$ の関係は $\alpha=\eta$ の近くで直線的に近似できる。

(3)  $\alpha=\eta$ での(2)のこう配は普通の気体よりも数十倍大きい。このために、最大電界を与える電極近傍のみがギャップの放電開始を支配する。

球ギャップおよび棒ギャップによる筆者らの実験結果、および実用的な同軸筒ギャップについて公表されたデータを、本論文の理論から求められるものと比較検討した結果、下記の諸点が明白となった。

(1) 与えられた電極系において、ギャップの長さを増加すると、放電開始電圧は飽和の傾向を示し、その電極に固有な一定値に収れん(斂)する。この飽和の傾向は電界集中の強い電極系において顕著である。この点については、この報告で取り扱った理論からも定量化できる。

(2) 球ギャップおよび棒ギャップのDCおよびAC放電開始電圧は、4 atm程度以下の気圧では正確に理論的な値と一致する。緩波頭波放電開始電圧もほぼ理論的な放電開始電圧に等しいが、衝撃放電開始電圧は、これらよりも高い値となり、この傾向は電極先端の曲率半径が小さいほど顕著である。

(3) 放電開始が火花破壊に至るか否かは、ストリーマの進展におよぼす気圧、電界分布および極性の効果を考慮して定性的な説明が可能である。

(4) 高気圧となって放電開始時の陰極面の電界が高くなると、放電開始電圧は理論的な値よりも低下するようになる。この臨界的な陰極面電界は陰極の面積が大きいほど、また表面精度が悪くなるほど低い値となる。したがって、この放電開始電圧の低下は、陰極面からの電界放出により形成される負イオンが静電界をひずめるために起こると思われる。

(5) 実用的な電極配置の実用的な気圧領域における耐電圧の推定式を、筆者らの理論式と多くの実験データを基礎に樹立し、これにより推定した値が実際のガス絶縁機器の設計にきわめて有用であることを示した。

### 参 考 文 献

- (1) 新田, 川根, 山田: SF<sub>6</sub>ガスの絶縁破壊特性, 三菱電機技報 39, No. 8, 7-12 (昭40)
- (2) H. Raether: Electron Avalanches and Breakdown in Gases, London, Butterworths, 124-148 (1964)
- (3) A. Pedersen, et al.: Analysis of Spark Breakdown Characteristics of Sphere Gaps, IEEE Trans., PAS-86, No. 8, 975-978 (1967)
- (4) M. S. Bhalla, J. D. Craggs: Measurement of Ionization and Attachment Coefficients in Sulphur Hexafluoride in Uniform Fields, Proc. Phys. Soc., 80, 151-160 (1961)
- (5) P. Narbut et al.: Factors Controlling Electric Strength of Gaseous Insulation, AIEE Trans., PA&S, 78, P. III, 545-550 (Aug. 1959)

- (6) P. R. Howard : Insulation Properties of Compressed Electronegative Gases, Proc. IEE, 104, Pt. A, 123-138(1957)
- (7) N. R. Mc Cormick, J. D. Craggs : Some Measurement of the Relative Dielectric Strength of Gases, British J. App. Phys., 5, 171-173 (1954)
- (8) 鳥山 : 負性気体の絶縁特性, 電学誌, 87-9, No. 948, 13-20 (昭 42-9)
- (9) H. McL. Ryan, C. A. Walley : Field Auxiliary Factors for Simple Electrode Geometries, Proc. IEE, 114, No. 10, 1,529-1,536 (Oct. 1967)
- (10) M. S. Abou-Seada, E. Nasser : Digital Computer Calculation of the Electric Potential and Field of a Rod Gap, Proc. IEEE, 56, No. 5, 813-820 (May 1968)
- (11) J. A. Stratton : Electromagnetic Theory, p. 205
- (12) S. F. Philp : Compressed Gas Insulation in the Million-Volt Range ; A Comparison of SF<sub>6</sub> with N<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub>, IEEE Trans, No. 63-27, 356-359 (June 1963)
- (13) J. G. Trump : Compressed Gas Insulation and Electric Power System, Ibid (1962)
- (14) C. N. Works : The Electric Breakdown Voltage of SF<sub>6</sub> for Coaxial Electrode, W 社 Research Report.
- (15) 川口, 毛受 : 同軸円筒配置における SF<sub>6</sub> の絶縁破壊特性, 放専委, #80-9, (昭 44)
- (16) E. H. Cohen : The Electric Strength of highly Compressed Gases, Proc. IEE, 103, Pt. A, 57 (1957)
- (17) 河合, 岩本 : 電気機器における磁界の模擬解析法, 三菱電機技報, 37, No. 8, 72-78 (昭 38)
- (18) 大谷, 渡辺 : 抵抗紙模写装置における比抵抗可変の実験, 電気学会 関西支部, 13-14 (昭 40)
- (19) 御所 : 静電探針の特性, 電学誌, 87-6, 187-196 (昭 42)
- (20) 御所 : 静電探針法による放電ギャップの電位分布測定, 電学誌, 87-6, 197-204 (昭 42)

## GIS の管理上の諸問題

小鯛正二郎\*・高橋 宏次\*・左中 英夫\*・今瀧 満政\*

## Practical Performance with Gas Insulated Substations

Itami Works Shôjirô KODAI・Kôji TAKAHASHI・Hideo SANAKA・Mitsumasa IMATAKI

Of various problems with SF<sub>6</sub> gas insulated substations, those arising from gas seal technique, the cares in the measurement of gas leakage and the absorbent to eliminate trouble to be caused by the mixture of SF<sub>6</sub> gas, decomposed gas and moisture are to be quoted from the viewpoint that relatively special gas is used for insulation and are interrupting mediums.

This article elucidates theoretical and experimental consideration in regard to the above problems. Also introducing the actual results of manufacture and operation in the field of gas insulated circuit breakers, of which the number of installation since 1965 reached several hundreds, the paper makes clear the various points to be taken into account on these new devices.

## 1. ま え が き

SF<sub>6</sub> ガスを使用したガス絶縁開閉装置 (GIS) における管理上の諸問題としては、比較的特殊なガスを絶縁および消弧媒体としていることから、ガスの密封技術、ガス漏れの測定技術に関する管理上の諸問題と、SF<sub>6</sub> ガスと分解ガス、水分との混合、およびそれらを除去する吸着剤の問題などがあげられる。

これらの課題は当社における、多岐にわたる基礎的な研究、実機器での実験のもとに解決され、その結果が実用機器に適用されている。

昭和40年以来約600台のガスシャ断器納入実績や、関西電力との共同研究で実変電所において長期運転されたGISの実測データによって、SF<sub>6</sub> ガスを使用した機器の品質管理技術が確立され、長期間の実用性能保証の裏付けがなされた。

ここでは主として、現地試験での実用機器の資料を中心にGISの管理上の諸問題について紹介する。

2. SF<sub>6</sub> ガスの密封

## 2.1 Oリングの材料

Oリングの材料については、耐候性・高低温特性・耐分解ガス性能がすぐれ、水分透過率が小さいという条件をかね備えたものを選

定する必要がある。選定にあたって検討した事項の代表的なものについて述べる。

## (1) ゴムの耐分解ガス性能

シャ断器においては、アークにより分解ガスが発生するが、大部分の分解ガスは再結合しSF<sub>6</sub> ガスに戻る。しかし、ごく微量の分解ガスが不純物として残るので、これを吸着するために活性吸着剤が使用されている。ガスケットに使用されるゴムはこのことを考慮し、分解ガスに対する耐力についても十分検討されていることがのぞましい。

一例として、単一ガス圧力シャ断器の消弧室の分解ガスが直撃するところに各種のOリングをおいて20kA、40回の短絡シャ断をおこなった。その代表的なものを図2.1に示す。この結果よりシリコンゴムが直撃分解ガスに侵されたことをのぞいて、他のゴムには劣化の傾向は見られないことがわかる。

## (2) Oリングの温度特性

Oリングの温度特性は、ガスシールの性能に直接影響を与えるが、とくに低温時の特性は実用性能上重要である。

われわれは試験片での物理・化学的な試験、たとえば図2.1のようなゲーマンのねじり試験やTR試験をおこない、その結果-20°C~-30°Cの使用温度範囲ではネオプレン系Oリングが使用できることを確認している。

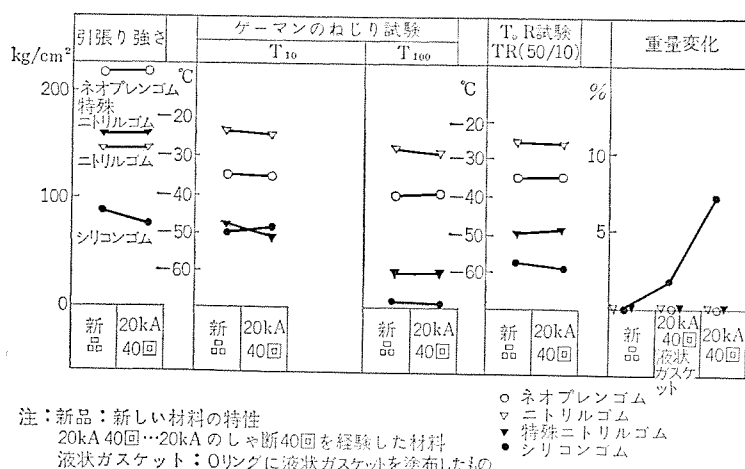


図 2.1 ゴム材料の耐分解ガス性能  
Characteristics of rubber after exposed to arced SF<sub>6</sub> gas.

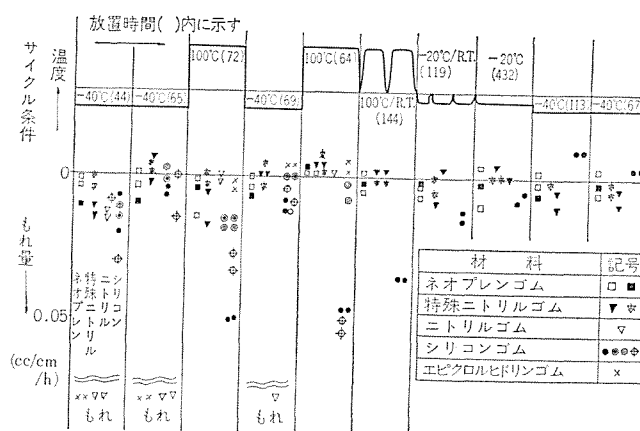


図 2.2 Oリングのヒートサイクル試験  
Leakage from O-ring under heat cycle test.

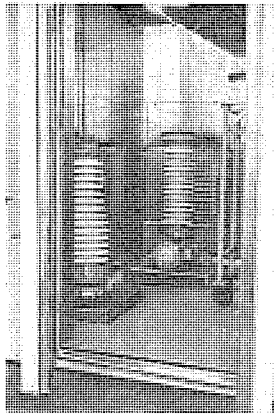


図 2.3 実機器の低温漏れ試験状況  
View of full scale model leak test in the extremely low-temperature room.

ゴム材料	条 件		放置時間 (時間)					
	荷重条件	リングみぞあり	液体ガスケット併用	1	5	10	50	100 200
ニトリルゴム (一般用)	20%引張り	—	—					
	30%圧縮	—	—					
	30%圧縮	○	—					
	30%圧縮	—	○					
	30%圧縮	○	○					
ネオプレン系ゴム	30%圧縮	—	—					
	30%圧縮	○	○					

注：オゾン濃度50pphm中に放置

□ 変化なし    ▨ 微少クラック発生    ▩ 浸される    ■ 使用不能

図 2.4 ゴムの使用方法と耐オゾン性能  
Accelerated deterioration test results of rubber exposed to ozone.

表 2.1 長期間使用後の O リングの試験結果の判定  
Test results of gaskets after long service.

試験項目	試験内容	250-SF 2500 形 GCB 4 年後	W社接地タンク 形 GCB 8 年後	備 考
引 張 試 験	O リングを引張試験機で引張り、破断時の荷重および伸びを求める	正 常	正 常	引張強さ 40 kg 以上、伸びは 600~800 % でばらつき内の値で新品と差なし
引張時の表面状態	O リングに 200 % 以上の伸びを与え表面のクラックの有無を調べる	正 常	正 常	オゾンクラックなどの異常はまったく認められない
残留ひずみ測定	O リングみぞより O リングをとり出し、厚さを測定する	正 常	正 常	残留ひずみは締付解放 17 日後 5 % 程度で新品と変わりない
粘 弾 性 試 験	O リングより試料を採取し、その一端より振動を与え、他端へ伝わるエネルギーとゴムで吸収されるエネルギーを各温度において測定する	正 常	正 常	特に新品との差がない
膨 潤 試 験	メチルエチルケトンを用いてゴムを膨潤させ、膨潤量を測定する	正 常	正 常	30 h で膨潤が止まり、重量増加が 55 % 近傍で特に変質の傾向なし

さらに、実機器に用いられる スケールの O リングを試料とし、分解ガス・低温 (−20°C) ・極低温 (−40°C) ・高温 (100°C) を考慮したヒートサイクルでガス漏れ試験をおこなった。図 2.2 はモデル試験の一例で、O リングを体積の小さな容器にセットし、圧力降下法によって漏れ量を測定した。

また、20 kA、40 回の短絡シャ断時の分解ガスの直撃を受けた試料を 100°C~−40°C までの条件で漏れ試験をしたが、漏れは発生していない。

一般のニトリルゴムやある種のゴムは低温ではシールの能力を失うが、われわれの用いるゴムは十分低温・高温でシール能力をもっていることがわかる。

実機器では、77 kV GIS の構成区分や、ガスシャ断器一相分を含む機器のシール能力を検証するため、低温恒温室で長期間の漏れ試験をおこなった。図 2.3 はその状況を示す。

## 2.2 シールの耐久性

O リングの耐候性・耐分解ガス性についての性能を確認する方法は、サンプルによる基礎的な実験が一般的であるが、ガスシャ断器などの実機器で長期間使用された O リングを検計することが、実用性能を確認する意味で有効である。

300 kV 定格のガスシャ断器 (250-SF-2500 形 GCB、関西電力湖南変電所に昭 41.7 掘付) の移設工事 (昭 45.7) を機会に、約 4 年間使用に供せられた O リングを採取して、各種の試験をした。

同時に、ガスシャ断器の開発品として製作され、後に当所短絡試験所において、等価試験の補助シャ断点として、昭 37 年以来 8 年間使用されてきたシャ断器<sup>(1)</sup>の O リングも試験した。これらの O リングの試験結果を表 2.1 に示す。

図 2.4 はオゾン試験結果の一例である。一般に耐オゾン試験としては、50 pphm (10<sup>-8</sup>) のオゾンの濃度で 48 時間放置してクラックの発生をみる方法が用いられている。このオゾン濃度では、天然ゴムは 2~3 時間、耐候性のすぐれたネオプレン合成ゴムでも 200 時間でクラックが発生するほどの過酷な試験条件であり、100 時間でクラックが発生しなければ、長期間使用できるといわれている。

ニトリルゴムの耐候性の悪いものでは、O リングみぞに入れなければ 10~50 時間で微少なクラックが発生するが、O リングみぞに入れると 150 時間以上までクラックが発生しない。また、O リングに液状ガスケットを併用したときは、200 時間以上耐えることができる。

他方、オゾン以外に O リング当たり面の金属部分の防しろう (錆) についても対策が必要であるが、O リングと液状ガスケットを併用することによって、発しろうを完全に防げることが塩水噴霧試験などによって確認されている。

当社の SF<sub>6</sub> 機器のガスケットは、これらの試験結果を総合的に吟味したうえでゴム材質が決められており、液状ガスケットと併用しているが、実用機器での O リング試験結果はわれわれのシール方式の妥当性を十分証明している。

しゃ断器や断路器の接触子駆動伝達軸で、大気と SF<sub>6</sub> ガスの隔壁を構成する回転シャフトシールについては、すでに、1,000 組以上の製品が全国の発電所で使用されており、使用状態の過酷な、たとえば北海道の -36°C での使用、リアクトル 開閉所の開閉多ひん (頻) 度の変電所での使用においても、ガス漏れを発生したものは 1 件もなく、われわれの開発試験が必要十分であったことを示している。

### 3. ガス漏れの管理

GIS のガス漏れの管理のためには、O リングの材質、O リングのつぶし代、金属フランジの当たり面の面精度などの慎重な選定と品質管理が重要なことはもちろんのこと、GIS 製造にたずさわる作業の技術教育、製作後のリークテストによる品質管理の徹底が必要である。

GIS のガス漏れの検査方法は、すでにガスしゃ断器で実施しているテスト方法と同じである<sup>(2)</sup>。

GIS や GCB (ガスしゃ断器) の部品は、ハロゲンリークテストや体積倍率圧力降下法、真空リークテストなどを製作段階で必要に応じて適用している。ここでは、最終的な組立状態での漏れ試験の方法として用いる SF<sub>6</sub> リークテストについて述べる。

#### 3.1 SF<sub>6</sub> リークテスト

ガスしゃ断器生産初期に、ハロゲンリークテストとして開発した蓄積法による定量的な漏れの測定と管理方法は、現在 SF<sub>6</sub> リークディテクターを使用して、GIS の漏れの管理に用いている。

ハロゲンリークディテクターの感度は 10<sup>-7</sup> (体積濃度)、SF<sub>6</sub> リークディテクターの感度は 10<sup>-9</sup> といわれており、後者のほうがすぐれているが、現実にはこれらの感度は実用上十分すぎる値であり、77 kV GIS などガス量の少ないものについて、漏れ量の初期状態がそのまま保持されたと仮定すれば、リークディテクターの実用感度で測定すれば、全シール箇所から漏れが生じた場合でも、ガス無補給運転時間は数百年となり、さらに数箇所からの漏れがある場合でも数千年のガス無補給運転時間となる。

蓄積法による漏れ試験は図 3.1 に示すように、シール箇所をビニールなどで密封し、漏れ出た SF<sub>6</sub> ガスをこの中に蓄積し、SF<sub>6</sub> ガスの濃度を測定するもので、次式を用いて漏れ量を測定する。

$$V_L = MC/T = MKR/T \quad (3.1)$$

ただし、 $V_L$ : 漏れ量 (l・atm/h)

$R$ : 漏れ検出器の読み

$K$ : 漏れ検出器の感度係数

$M$ : 蓄積部体積 (l)

$C$ : 蓄積部の SF<sub>6</sub> ガス濃度  $C = KR$

$T$ : 蓄積時間 (h)

1 年間の漏れ量  $V_y$ 、および GIS において封入ガス圧からガス補給指令が働くまでの期間 (ガス無補給運転時間)  $Y$  は

$$V_y = (MKR_0/T_0) \times n \times 24 \times 365 \text{ (l・atm/year)} \quad (3.2)$$

$$Y = A \Delta p / V_y \text{ (year)} \quad (3.3)$$

ただし、 $n$ : ガス区分の蓄積部の数

$A$ : ガス区分の体積 (l)

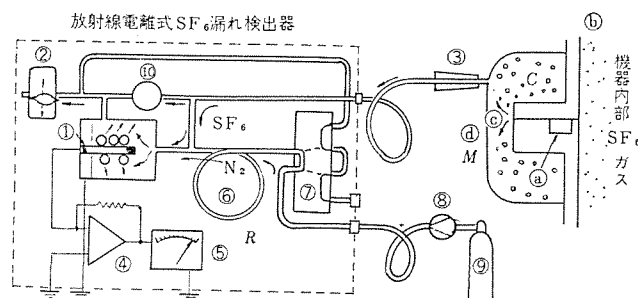
$\Delta p$ : 封入圧力と補給指令ガス圧の差

$R_0$ : リークディテクターによる管理限界の読み

$T_0$ : リークテストにおける最少蓄積時間 (h)

となる。

われわれが管理限界としている  $R_0$ 、 $T_0$  によって、ガス無補給運転時間を求めると数百年となるが、漏れが後述のように微少漏れと



(注) ①: トリチウム電極, ②: 吸込用ポンプ, ③: 吸込口, ④: 増幅器, ⑤: メータ, ⑥: 分離塔, ⑦: 瞬時弁, ⑧: 減圧弁, ⑨: 窒素ガス, ⑩: 調整弁, ⑪: O リング, ⑫: 電力機器内部, ⑬: 漏れた SF<sub>6</sub> ガス (濃度 C), ⑭: 漏れたガス貯蔵部 (体積 M)

図 3.1 リークテスト  
Measurement of SF<sub>6</sub> leakage.

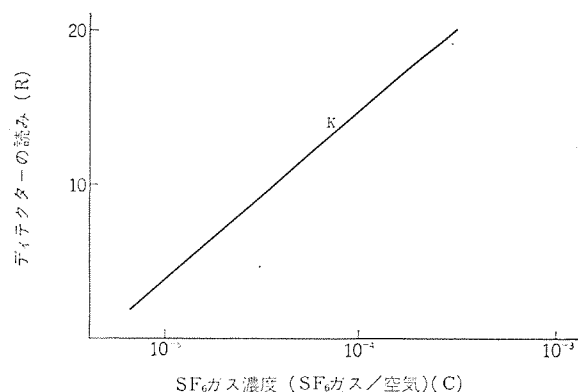


図 3.2 SF<sub>6</sub> リークディテクターの感度の一例  
Example of sensitivity of SF<sub>6</sub> gas leak detector.

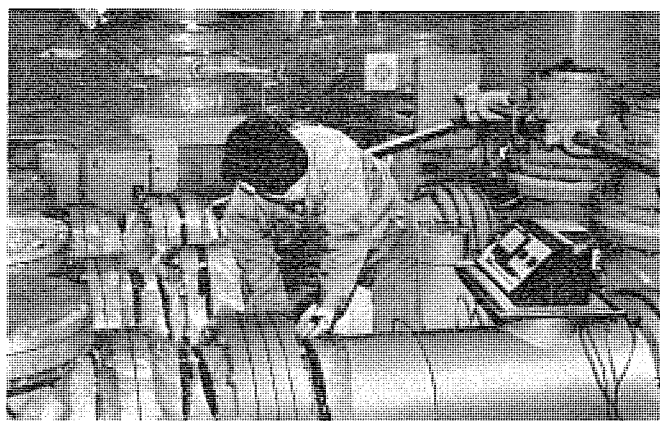


図 3.3 110 kV GIS のリークテスト状況  
Leak test on 110 kV GIS.

して安定する要素をもっていること、およびガスしゃ断器での経験による漏れ試験の現場作業性から見た実用性などを考慮して  $R_0$  を決めている。

図 3.2 は SF<sub>6</sub> リークディテクターの感度曲線の一例で、式 (3.1) の  $C = KR$  の関係を示す。この感度曲線のほかに、さらに高いレンジの測定も可能である。

図 3.3 は 110 kV GIS の最終組立状態でのリークテストの実施状況である。

(SF<sub>6</sub> リークディテクターの原理)

SF<sub>6</sub> ガスのイオン補獲性を応用したもので、図 3.1 に示すとおりトリチウムからの放出電子は、電極間に SF<sub>6</sub> ガスがあると補獲され、電極間を流れる電流が減少する。この電流を増幅して、ガス濃度を

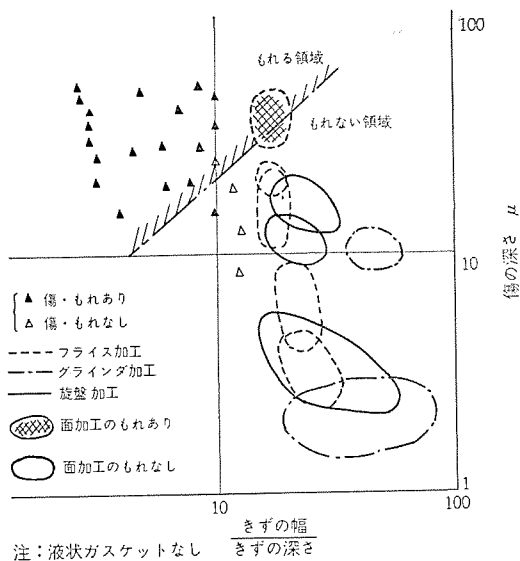


図 3.4 Oリングあたり面の傷と漏れ  
Leakage vs. roughness of flange surface.

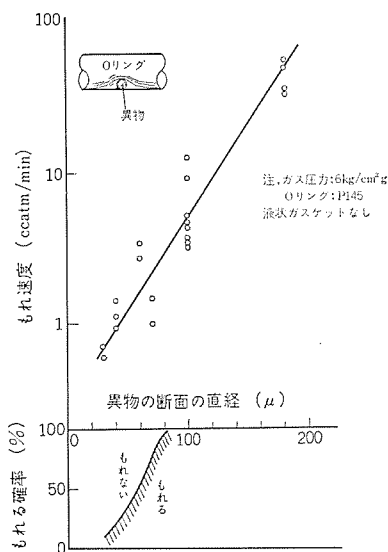


図 3.5 異物のかみ込みと漏れ  
Probability of leak and leak rate when dust is inserted in the sealing part.

表 3.1 各変電所における開閉機器のガス圧力測定結果  
Measured pressure of switchgears in the fields.

設置場所	機器形名	20°C換算のガス圧力 (kg/cm <sup>2</sup> ・g)			
		測定日	ガス圧	測定日	ガス圧
関西電力 長曾根 S/S	70-SFL-350 単一 圧力式	昭 43.3	4.45	昭 44.12	4.5
		昭 43.10	4.5	昭 45.1	4.5
		昭 43.4	4.55	昭 45.3	4.55
関西電力 湖南 S/S	250-SF-2500 #2 二重 圧力式	昭 41.8	高圧 ; 14.4 低圧 ; 2.0	昭 45.5	高圧 ; 14.3 低圧 ; 2.2
		昭 44.4	高圧 ; 14.5 低圧 ; 2.0	昭 45.6	高圧 ; 14.5 低圧 ; 2.0
九州電力 人吉 S/S	200-SF-1000	昭 44.4	高圧 ; 14.5 低圧 ; 2.0	昭 45.6	高圧 ; 14.5 低圧 ; 2.0

測定する。

### 3.2 シール面精度と漏れ

漏れ現象を究明しておくことは、シール面の面精度や、組立作業環境の管理、漏れ試験法を決めるうえで重要な意義がある。

図 3.4 は Oリング面の加工精度を故意に悪くした場合や、故意にフランジシール面に傷をつけた場合の漏れを示している。加工精度については 30 S 程度から漏れの兆候が現われる。同じ深さのへこみであっても、その鋭さによって漏れの有無が決まり、円滑なへこみでは漏れはおこらず、鋭いへこみで漏れが発生する。旋盤加工などは比較的なめらかなへこみと考えられるので漏れにくく、図の一点鎖線の臨界線が推定される。

図 3.5 は Oリングに故意に異物をかみ込ませた場合の実験結果で、図の下方に示すように漏れが発生するときとしないときがあり、漏れの発生する場合の漏れ量を図の上方に示す。

漏れる場合は、一度漏れが発生するとガスの圧力が漏れの経路を局所的に広げるように作用するため、超微少の漏れは、微少な漏れに発展して安定する。

また、漏れと圧力との関係については、漏れ経路が不安定性をもつために断定はできないが、実用上、漏れ量と圧力がほぼ比例していると考えてよく、リークテストは封入圧力以上でおこなうのがぞましい。

以上のように漏れは、

(1) Oリング面の面精度は微視的に見れば、ねりごであるため、Oリングがおうとつ(凹凸)に十分なじみやすいので固定用ガスケットでは 6 S 程度以下の面精度であればよいが、面精度が悪いと傷やごみ混入の発見がむずかしくなる。

(2) Oリング面の傷やごみは、面精度以上に漏れの原因となるので、GISの組立作業環境に十分注意をはらう必要がある。

(3) Oリング面からの漏れは、漏れの経路が形成されると微少な漏れとなって安定する性質がある。

われわれはこのような観点より、各部品の機械加工精度の決定と品質管理、Oリングの品質管理をおこない、かつ現地機器据付後漏れ試験を実施して、漏れ管理に万全を期しており、約 600 台の納入実績のあるしゃ断器の例を見ても上述のような管理を行えば、少なくとも数年以上はガスの補給をする必要がないことを確認している。表 3.1 に納入後のガス開閉機器の圧力測定値を一例として示すが、このことを物語っている。

## 4. 水分の管理

SF<sub>6</sub> 中に水分が混入した場合の問題として、次の二つが考えられる。

### 4.1 耐電圧の低下

SF<sub>6</sub> 中に多量の水分が存在すると絶縁破壊電圧が低下する<sup>(2)</sup>。図 4.1 に示すように、SF<sub>6</sub> に水分が混入して絶縁物表面に水滴(露)が付着すると、耐電圧は低下するが、混入量が少なくて結露がなければ耐電圧は低下しない。

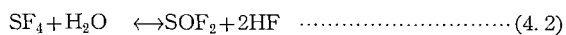
また、図 4.2 に示すように、水分が多量に含まれている場合は、絶縁物の表面に氷(霜)として付着しておれば、絶縁性能は低下しないが、水分が結露するような温度領域で低下し、さらに、温度が上昇して水蒸気となるとふたたび回復する。

これらの試験結果より耐電圧性能を維持させるためには、SF<sub>6</sub> 中の水分は、0°C の飽和水蒸気圧以下におさえ、低温で飽和蒸気と

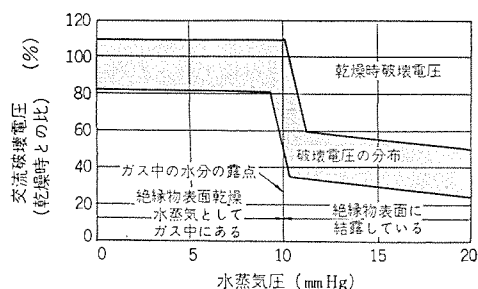
なっても霜となるようにしなければならない。ガス圧力と0°Cの飽和水蒸気圧との関係より水分量(体積比)は表4.1のようになる。

#### 4.2 分解ガスの生成

分解ガスの生成過程で水分は、たとえば次式のように関与する。

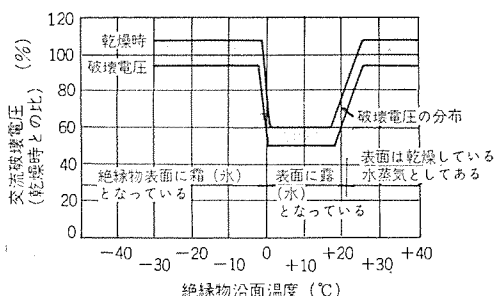


これらについて数万ppmまでの試験を実施し、さらに図4.3の結果に示すように、70-SFL-350パッファ形しゃ断器や70-SFLT-350GIS用しゃ断器を用い、水分量を変化させて分解ガスの発生や材料



(注) ガス温度一定、水分量変化  
SF<sub>6</sub>ガス圧: 3.0kg/cm<sup>2</sup>g 温度: 11°C

図4.1 水分量による破壊電圧の変化  
AC dielectric strength vs. moisture content.



(注) 水分量一定、ガス温度変化  
SF<sub>6</sub>ガス圧: 1.5kg/cm<sup>2</sup>g, 水分圧: 11.8mmHg(5,700ppm)

図4.2 水分多量の場合の温度と破壊電圧  
AC dielectric strength vs. temperature of insulator surface.

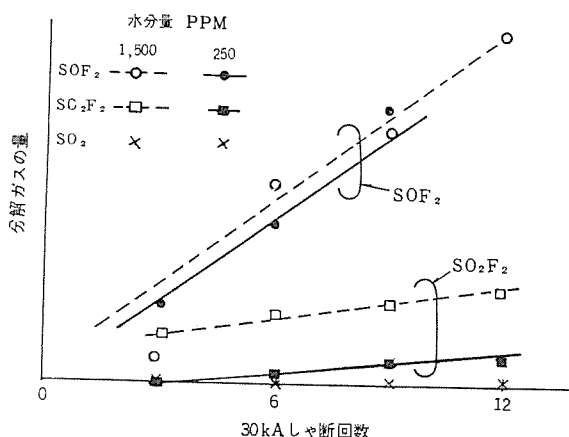


図4.3 水分量と分解ガス  
Decomposition of SF<sub>6</sub> gas at different moisture content.

表4.1 SF<sub>6</sub>ガス圧と許容水分量  
Allowable moisture content vs. SF<sub>6</sub> gas pressure.

気圧 kg/cm <sup>2</sup> ・g	15	7	5	3	1
水分量 ppm (約)	400	750	1,000	1,500	3,000

におよぼす影響を試験している。

これらの問題と、組立作業性を考慮して十分な安全性を見込み、水分量150ppmの管理をおこなっている。

#### 5 SF<sub>6</sub>中の水分

水分管理限界を維持するためには、次のような事項をは(把)握する必要がある。

(1) Oリングを通過して侵入する水分、絶縁物より放出される水分について

(2) 吸着剤の水分単独吸着能、水分、分解ガスとが共存する場合の複合吸着能

(3) 水分の拡散

当社の水分管理技術は、モデル試験、実用機器の水分測定を基盤とし、長期間運転実績のある実用機器の定期的な水分測定結果を裏付けとして確立されているが、これらについて述べる。

##### 5.1 水分透過量

(1) Oリングからの貫通水分量

実用機器での水分測定結果からは定量的な水分透過量をつかめないで、ゴム単体、およびOリングの水分透過率を求めた。

図5.1は試験結果の一例で、Oリングを多数金属フランジに組込み、Oリングを通して侵入する水蒸気を吸着剤に吸着させ、水分量を測定した。水分量は次式で与えられる。

$$q = (Dlh/b)t\Delta p = D't\Delta p(g) \quad \dots\dots\dots (5.1)$$

ただし、D: 水分透過率 grcm/cm<sup>2</sup>・cmHg・sec

l: ゴムの長さ cm

h: ゴムの厚さ cm

b: ゴムの幅 cm

t: 時間 sec

Δp: 水蒸気圧の差 cmHg

D': Oリング単位長さ当たりの水分透過量

q: 水分の侵入量 g

水分透過率はシリコンゴムが大きく、ニトリル、ネオプレンゴムは小さい。

(2) 固体絶縁物と水分

ここではエポキシ樹脂の水分の吸着・拡散についての一例を紹介する。

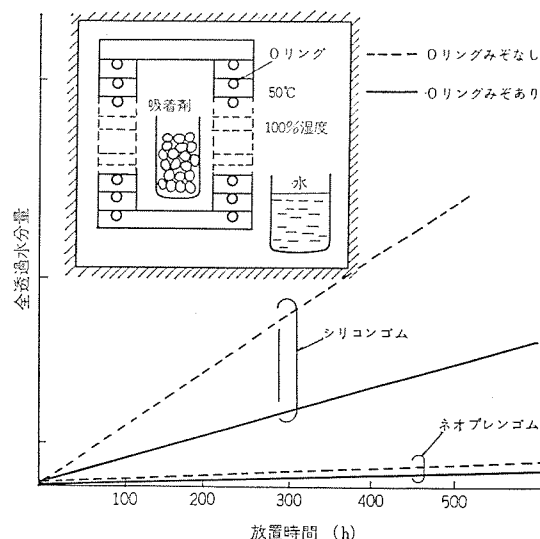


図5.1 ゴムの水分透過性  
Moisture permeability through gaskets.

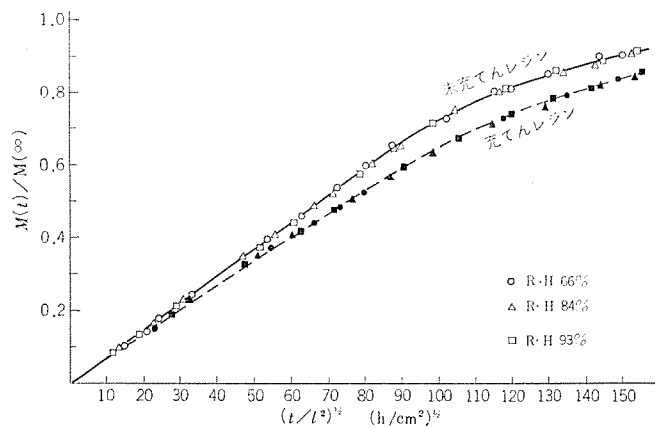


図 5.2 室温における注形樹脂の吸湿  
Water penetration into casting resins.

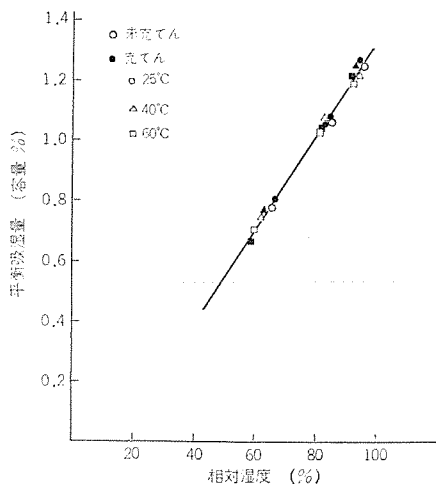


図 5.3 各温度における平衡吸湿量と相対湿度  
Hygroscopic degree vs. relative humidity.

図 5.2 より水分の吸着・拡散は Fick 形である。水分の拡散係数は平板状試料の吸湿・脱湿より、Fick の拡散法則から次式によって求められる。

$$\begin{aligned} \frac{m}{m_s} &= 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left\{ -\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D t}{l^2} \right\} \\ &\approx \frac{4}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{D t}{l^2}} < 0.55 \left( \text{ただし } \frac{D t}{l^2} < 0.06 \right) \\ &\approx 1 - \frac{8}{\pi^2} \exp \left( -\frac{\pi^2 D t}{l^2} \right) > 0.55 \left( \text{ただし } \frac{D t}{l^2} > 0.06 \right) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (5.2)$$

ただし、 $m_s$  : 平衡吸湿量

$m$  : 時間  $t$  における吸湿量

$l$  : 試料厚さ

$D$  : 拡散係数

また、水蒸気の拡散係数は水分の透過速度を求める透過時間からも求められる。

$$D = l^2 / 6 t_e \quad \dots\dots\dots (5.3)$$

ただし、 $t_e$  : 透過のおくれ時間

一方、拡散係数  $D$  と透湿係数  $P$ 、溶解係数  $S$  との関係は、

$$P = S \cdot D \quad \dots\dots\dots (5.4)$$

で表わされる。

平板状試料の吸着・脱着より水分の拡散係数を求め、カップ法による透湿量から水分の透過係数を求めた。

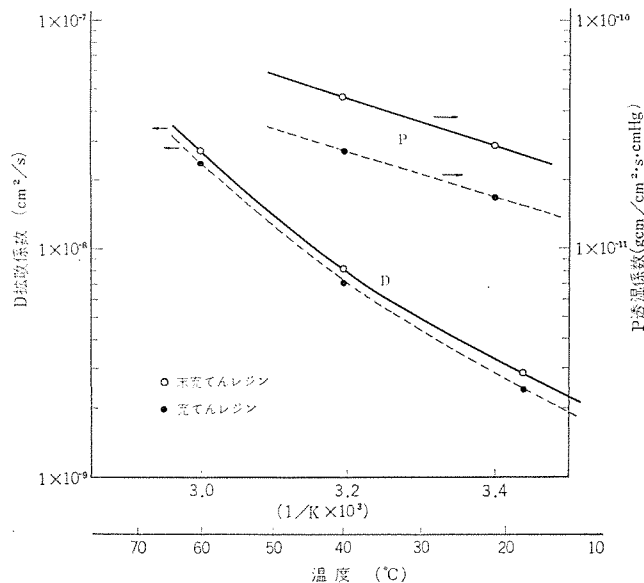


図 5.4 拡散係数、透湿係数の温度依存性  
Diffusion and permeability coefficient vs. temperature.

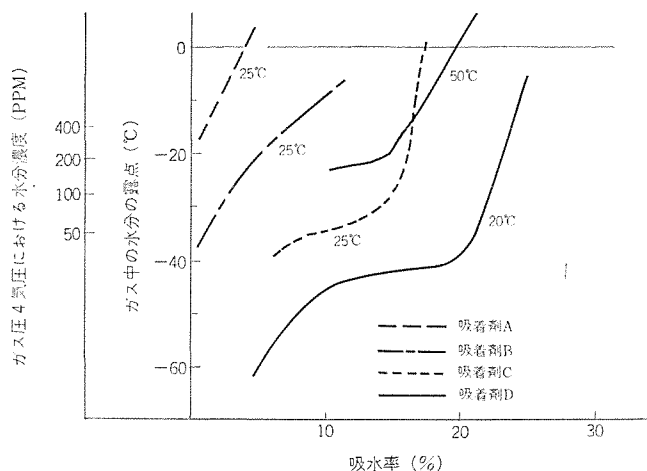


図 5.5 各種吸着剤の吸水能力  
Water vapor adsorption at various temperature.

図 5.3 は平衡吸湿量と相対湿度の関係を示しており、吸湿量は樹脂に対する容量 % でプロットしている。図より硬化物の吸湿は充てん材にはほとんど関係なく、樹脂でおこなわれることがわかる。

拡散係数は図 5.4 に示す。温度依存性がほぼ指数的であるが、完全な直線性は示さなかった。また、相対湿度による差はなく、フイラーを充てんする場合、水分の拡散の経路を長くする効果もっている。水分透過係数は図のように、温度依存性は拡散係数より小さい。

## 5.2 吸着剤

### (1) 吸湿能力

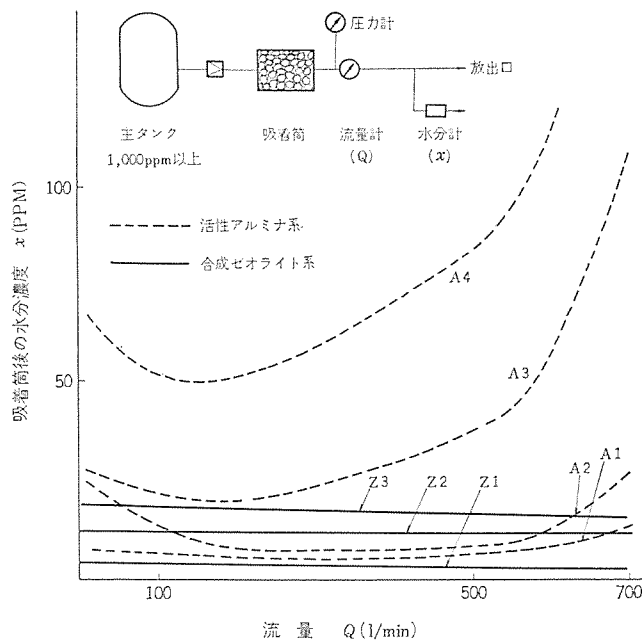
図 5.5 は各種吸着剤の吸湿特性で、合成ゼオライト系 C、D のものが、活性アルミナ系の B より、その特性がすぐれている。

吸着剤の吸水速度は非常に速く、図 5.6 に示すように、数百ミリ秒以下で完全に吸着される。

吸水能力は温度に依存するが、水分が問題となるのは低温時であるためにさほど問題とならない。

### (2) 分解ガス吸着能

表 5.1 は吸ガスの能力を示したもので、分解ガスを吸着剤の重量の 30 % 吸収した場合でも吸着剤の性能はほとんど変わらない。



注 1) 活性アルミナ系は連続してくり返し測定する。(A1→A2→A3→A4)  
 注 2) 合成ゼオライト系は1回測定 (Z1)→大気中で16時間吸水後 (Z2)→大気中で21時間吸水後 (Z3) したものである。

図 5.6 強制流動における吸着剤の吸着能  
 Water vapor adsorption in the flowing gas.

表 5.1 吸着剤の分解ガス吸着能  
 Adsorptive power for decomposition products of SF<sub>6</sub> gas.

分解ガス	吸着剤	活性アルミナ	合成ゼオライトⅠ	合成ゼオライトⅡ
SO <sub>2</sub>		2.04 %	0.37	0.03
SOF <sub>2</sub>		0.07 %	0.13	0.04

注 1) SF<sub>6</sub> ガス中の分解ガスの濃度 (体積) %を示す。  
 2) 使用ガスは SF<sub>6</sub> ガス 80 %, 分解ガス 20 %である。  
 3) 吸着剤重量の 30 %の分解ガスを吸着させた後の値である。

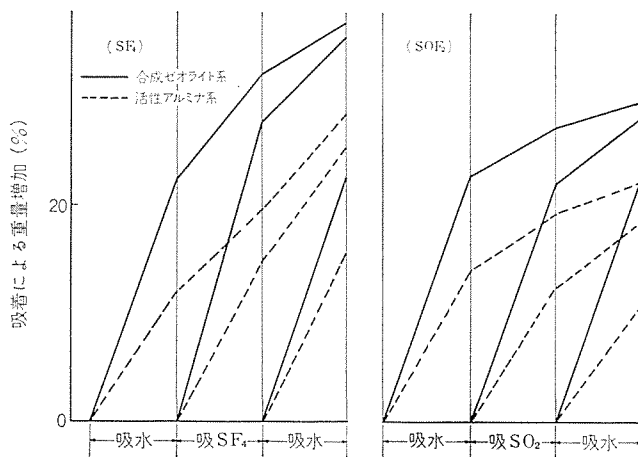


図 5.7 吸着剤の吸水・吸分解ガスの複合吸着能  
 Adsorptive power for moisture and decomposition products of SF<sub>6</sub> gas.

表 5.2 現地機器のガス分析例  
 Gas components of breakers in the fields.

(単位 %)			
変電所名	関電・豊崎 S/S		北電・七飯 S/S
形 名	70-SFL-350		70-SFL-350
据 付 後	1 年 目	2 年 目	2 年 目
SOF <sub>2</sub>	0.02	0.03	0.03
SiF <sub>4</sub>	0.01	0.02	0.01
CF <sub>4</sub>	0.04	0.03	0.04
CS <sub>2</sub>	0.03	0.01	0.02
CO <sub>2</sub>	0.04	0.06	0.02
リアクトル開閉用で1日1回以上開閉している。			

### (3) 複合吸着能

吸水と分解ガス吸着の共存を考えた複合吸着能を図 5.7 に示す。合成ゼオライト系と活性アルミナ系吸着剤を同一条件のもとに放置し、吸水と分解ガス吸着をさせたもので、両者とも使用限界をこえる吸水をさせた後でも、なお分解ガス吸着の能力をもっている。もちろん、吸水していないものよりはガス吸着能力が低下しているが、合成ゼオライト系のほうが分解ガス吸着能がよく、活性アルミナ系の新品と合成ゼオライト系の吸水後の分解ガス吸着能力が同程度である。

以上のようなモデル試験と、機械的な特性試験の結果、合成ゼオライト系のある種のものが吸水、分解ガス吸着性能などすべての面でわれわれの要求を満足している。

### (4) 吸着剤の量

GIS の吸着剤封入量は次式で決めることができる。

$$W = Sw_{in}/\alpha \dots \dots \dots (5.5)$$

$$w_{in} = qT + A + B + C \dots \dots \dots (5.6)$$

ただし、 $W$  : 吸着剤の量 g

$w_{in}$  : 吸着すべき水分の量 g

$S$  : 分解ガス吸着のための余裕

$q$  : O リングより入る水分量 g/year

$T$  : 無取換時間

$A$  : 作業中に吸水する水分量 g

$B$  : GIS 内部の初期水分量 g

$C$  : 絶縁物より出てくる水分量 g

$\alpha$  : 許容吸水率 %

たとえば、 $-20^{\circ}\text{C}$  の露点を保つためには図 5.6 より許容吸水率は約 23 % となる。われわれは式 (5.5) より吸着剤無取換期間を約 50 年と考へて吸着剤の量を決めている。

組立作業中の吸水に対しては、真空引きまでの時間で管理している。また、機器内部点検は、ガス回収後、内部に乾燥窒素などを入れておこない、点検個所の吸着剤は取換えるのを原則としている。

### (5) 分解ガスの量

分解ガスがしゃ断時のアークによって発生することはすでに述べたが、その値は表 5.2 に示すように、現地における実用機器の分解ガス発生量は無視できるほど僅少である。

また、関西電力姫路変電所での長期実用試験でも、約 500 kA/年の累積しゃ断電流後に分解ガスを測定したが、同等の値であった<sup>(3)</sup>。

これらの機器の吸着剤に吸収された分解ガスはフッソイオンの重量で  $10^{-2}$  程度で問題にならない。

### 5.3 水分の拡散

SF<sub>6</sub> 中の水分の拡散について、つぎのような計算を試みた結果、同一ガス区分でもガスの流通路が小さい場合は別の室を考へて、吸着剤の設置に考慮をはらう必要があることが判明した。

#### (1) スロートのある場合

図 5.8 のように二つの室が狭い通路で連結されている場合、B 室の水分濃度は次式で示される。

$$N = N_A + (N_1 - N_A) \exp \left( -\frac{DS}{Vl} t \right) \dots \dots \dots (5.7)$$

ただし、 $D$  : 純拡散係数 cm<sup>2</sup>/sec

$V$  : B 室の体積 cm<sup>3</sup>

$l$  : 通路の長さ cm

$S$  : 通路の断面積 cm<sup>2</sup>

$N$  : B 室の  $t$  時間後の水分量 (ppm, mmHg etc)  
 $N_1$  : B 室の初期水分量 (ppm, mmHg etc)  
 $N_A$  : A 室の水分量 (ppm, mmHg etc)

試験結果は比較的理論式と一致しており、せまい断面積でも数日のうちに低水分量となっている。

## (2) 長い管のある場合

図 5.9 に示すような円筒の片側に吸着剤がある長い同一直径の場合は次式で示される。

$$\frac{\partial N}{\partial t} = D \frac{\partial^2 N}{\partial x^2} \dots\dots\dots (5.8)$$

初期条件として、 $t=0$  において円筒内の水分は  $N_1$  一定であり、境界条件として吸着剤表面は常に  $N_0$  の水分とすると、結果は図 5.9 のようになり比較的速く拡散がおこなわれる。

このような計算により、

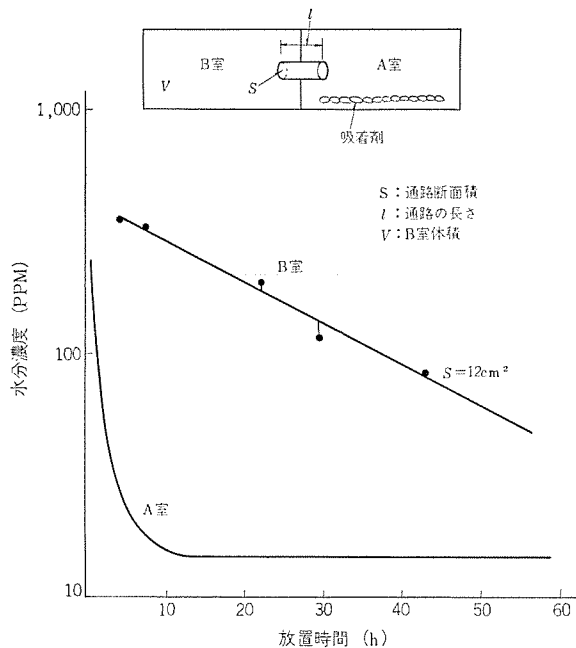


図 5.8 スロットのある場合の水分の拡散  
Diffusion of moisture in SF<sub>6</sub> gas.

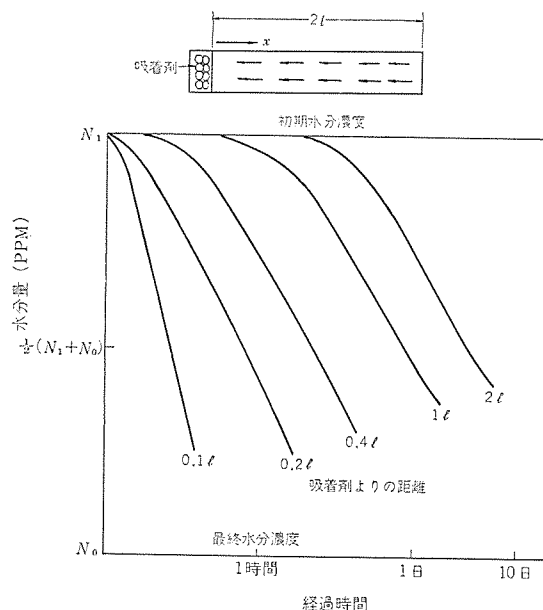


図 5.9 円筒管内での水分の拡散速度  
Diffusion of moisture in SF<sub>6</sub> gas in pipe.

○ リングからの水分侵入速度や絶縁物の水分放出速度 < ガス中での水分拡散速度 < 吸着剤での吸着速度

の関係が明らかとなる。たとえば、水分の侵入は年のオーダーで、一方、吸収は秒以下のオーダーである。このため、とくに重要なのは 1 日の単位で問題となる拡散である。

実際は対流の影響で、密閉容器内の拡散速度は速くなることを実験で確認しているが、スロットのある場合や、長い管の場合は同一ガス区分に複数個の吸着剤を設置しなければならない。

## 5.4 機器据付現地における水分測定

図 5.10 は現地における水分測定状況である。

表 5.3 は 70-SFL-350 パツファ形ガスシャ断器のデータで、水分量が低水準にあること、吸着剤の吸水率が初期吸水率として考えられる管理範囲内にあることを示している。

表 5.4 は各種シャ断器の水分量測定結果の例で、水分の経年的増加の傾向がなく、シャ断器の形式に関係なく水分の管理がなされているといえる。さらに、関西電力との共同研究による 77 kV GIS の実変電所の 2 年間にわたる水分量も十分余裕のある値であった<sup>(3)</sup>。

## 5.5 工場における実機器の水分測定

### (1) 組立後の真空乾燥

GIS に水分を故意に注入して 2 日間放置し、真空引きの後にガスを封入した。図 5.11 に示すように、真空引きが不十分であれば水分は高い値を示すが、吸着剤があれば低い水準に保つことができる。

### (2) 1 日の水分量の変化

ガス中の水分量は温度と関係があるが、図 5.12 に示すように、GIS のプロトタイプの実験では、吸着剤がないと水分量の変動が大きく、吸着剤のある場合は比較的変動が少ないという結果がでている。

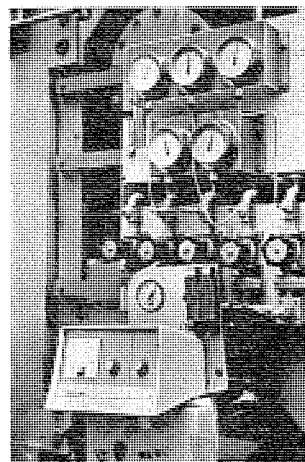


図 5.10 現地における SF<sub>6</sub> 中の水分測定状況  
Measurement of moisture of gas in operation.

表 5.3 各変電所におけるガスシャ断器中の水分濃度と吸着剤の吸水率  
Measured moisture content in SF<sub>6</sub> gas and absorbent of GCB after service.

	据付時	測定時	水分濃度	吸着剤の吸水率
A 変電所	昭 44.2	10 ヶ月後	34 ppm	0.8 % wt
B 変電所	昭 44.2	6 ヶ月後	30 ppm	1.4 % wt
C 変電所	昭 43.5	19 ヶ月後	20 ppm	0.5 % wt
D 変電所	昭 42.10	21 ヶ月後	100 ppm	2.6 % wt
E 変電所	昭 43.4	16 ヶ月後	80 ppm	1.8 % wt
F 変電所	昭 43.8	12 ヶ月後	110 ppm	2.8 % wt
G 変電所	昭 43.8	17 ヶ月後	110 ppm	2.4 % wt

表 5.4 各種ガスしゃ断器の水分量測定結果  
Measured moisture content of various circuit breakers.

設置場所	機 器 形 名		据 付 時	調 定 日	水分量 ppm
北海道電力 室 蘭 S/S	単 一 圧 力 式	70-SFL-350	昭 43.5	昭 43.5	80
				44.2	40
				44.8	45
関西電力 豊 崎 S/S		70-SFL-350	昭 42.10	昭 42.10	60
				43.10	63
				44.8	54
北海道電力 名 寄 S/S		70-SFL-350	昭 43.10	昭 43.10	45
				44.8	34
関西電力 湖 南 S/S	二 重 圧 力 式	250-SF-2500 # 1	昭 41.7	昭 41.7	85
				42.2	80
				42.11	80
四国電力 新徳島 P/S		170-SF-1000 # 1	昭 43.5	昭 43.5	50
中部電力 岩 塚 S/S		70-SF-500	昭 40.7	昭 40.7	70
				42.4	85
超電研実用 性能検証試 験供試器	500-SF-4000	昭 43.6	昭 43.6	46	
			43.10	48	
			44.8	42	
関西電力 泉大津 S/S	G I S	70-SFLT-350	昭 44.10	50	
			44.10	45	
中国電力 中広島 S/S		100-SFLT-500	昭 45.5	54	

### (3) 水分の偏在

水分の偏在の実情を調べるために 6 m の長い管で水分の偏在や、実機器のスロートのある場合について水分量を測定したが、理論計算ほど水分の偏在は見られず、このことから SF<sub>6</sub> ガスが対流などでかなり拡散されていると推定される。したがって、吸着剤の設置位置さえ十分に検討すれば、単一圧力非循環方式の機器で水分を低水準に保つことができる。

## 6. む す び

ここでは GIS の管理上問題となる重要な問題について、実用性・性能面に着眼して、種々の検討を加えるとともに、現在のわれわれの考え方を述べてきた。

GIS はその本来の特長を生かすために 10 年以上の無点検期間が要求されるので、機器の管理は必然的に、従来になかったような技術が必要である。しかし、いたずらに必要以上の管理により過剰品質に陥ったり、必要以上に保守点検に神経質になることなく、実用に即応した必要十分な管理をせねばならない。

SF<sub>6</sub> ガスを使用した機器は、ここ数年来全国の需要家に使われ、もはや特殊な機器というイメージはなくなっており、日本の国情に合致した GIS も盛んに使われはじめられている。

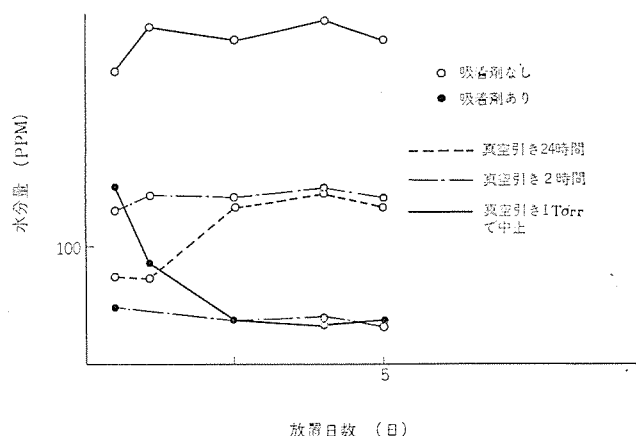


図 5.11 GIS による水分の実験例  
Moisture content in GIS.

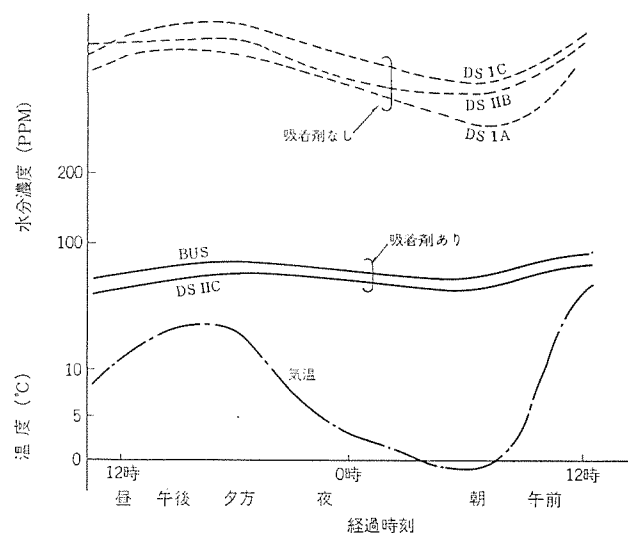


図 5.12 GIS の 1 日の水分量の変化  
Behavior of moisture content in a day.

われわれはガスしゃ断器の製作実績でも裏付けされているように、その製作技術・品質管理技術が、各電力会社・一般需要家の要求に合致したものであったと自負しているが、さらにいっそうの努力をしてゆく所存である。

## 参 考 文 献

- (1) 富永, ほか: 三菱電機技報, 39, 971 (昭 40)
- (2) 瀬渡, ほか: 三菱電機技報, 43, 376 (昭 44)
- (3) 鷲見, ほか: オーム, 31 (昭 44, 8)

# ガス絶縁開閉装置の耐震強度に関する研究

金谷 正和\*・高橋 康英\*・篠原 資直\*・奥津 尚宏\*

## Study on Earthquake Resisting Strength of Gas Insulated Switchgear

Itami Works Masakazu KANATANI・Yasuhide TAKAHASHI・Yorinao SHINOHARA・Naohiro OKUTSU

The latest electric power machines have come to possess very complicated structure because they are changed to operate at very high transmission voltage and in compactly built substation arrangement. Gas insulated switchgear (GIS) is one example to be cited. To cope with the trend the strength of the structure to resist earthquake is becoming very important and the problem is confronted with increasing difficulty.

Mitsubishi has made extensive study on this subject and gone through various experiments from the viewpoints of theoretical and practical aspects. Now the Company is successful in proving that the gas insulated switchgear produced is excellent to withstand the earthquake. The report is made herein on the study and the results.

### 1. ま え が き

昭和39年の新潟地震以来、電力機器の耐震性が大きくクローズアップされており、各方面で研究がなされている。当社でもこの問題をいち早く取りあげ、電子計算機による理論的検討、油圧サーボを用いた耐震用大形加振機の設置による実験的検討など、あらゆる角度からの検討法の研究を行ない、この結果の一部はすでに報告<sup>(1)</sup>済みである。

最近、送電系統の超々高圧化と変電設備のコンパクト化により、従来比較的簡単な構造であったしゃ断器などはステイ構造が多用され、非常に複雑な構造をしたガス絶縁開閉装置 (GIS) が出現した。これらの複雑な構造物の耐震検討は、理論的にも実験的にも困難さを増しており、同時に検討すべき項目も増加している。

このGISは電気絶縁特性をあげるために加圧されたガスを絶縁体として用いる構造をとっており、しゃ断器、断路器などの各機器が圧力タンクやベローズにより連結された、非常にコンパクトであるが、三次元的に入りこんだ構造である。これらの三次元構造物の耐震検討法のいくつかを紹介し、これらの手法にしたがって検討を行なった66 kV～154 kVのGIS耐震特性について報告する。

### 2. 理論的検討

GISに屋外設置形と屋内設置形がある。耐震検討を行なう場合、後者のほうが前者よりも取り扱いが困難であるので、屋内用のみについて論ずる。この場合、その耐震性の検討に際しては、建屋や基礎の耐震応答を考慮する必要がある。また、階上の機器との接続部の検討、GIS本体の集中定数系振動モデルへの変換時の各部の定数の決定などもむずかしい問題である。

現在、当社で行なっているGIS耐震計算のフローチャートを図2.1に示す。このフローにしたがってその内容、結果の一例をつぎに述べる。

#### 2.1 建屋の地震波応答

建屋の機械的定数はユーザーの仕様により決定されるが、この機械的特性、および設置個所が本体の耐震性に与える影響は大きい。GISが建屋内に設置されたとき、地盤に発生した地震波は建屋という振動系を通り本体に外力として加わる。それゆえ、この外力を求めることはGISに限らず、構築物に設置される機器の耐震検討には

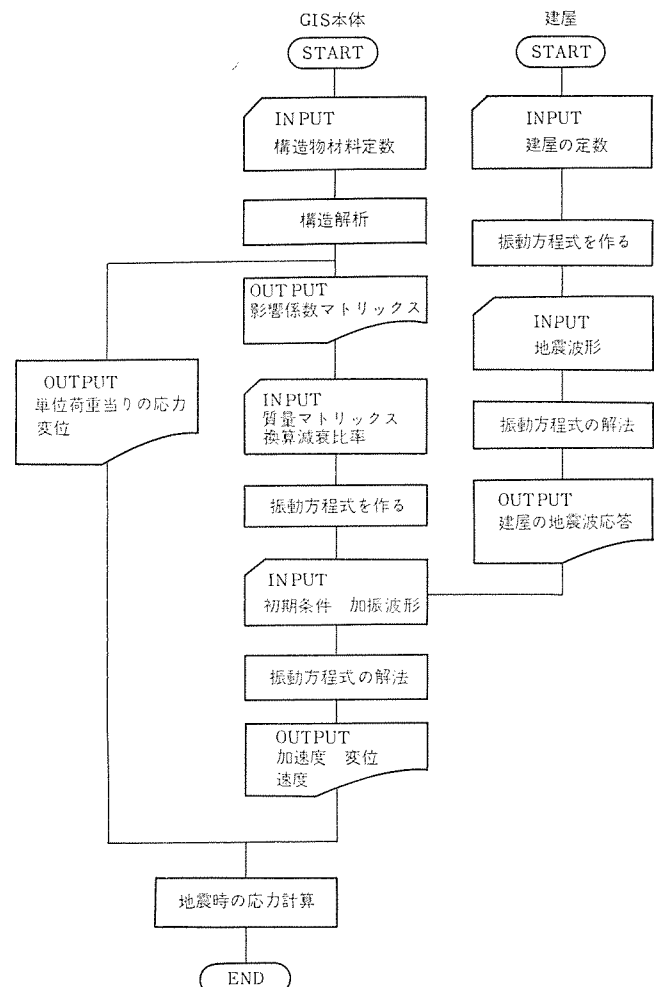


図 2.1 GIS耐震計算のフローチャート

Flowchart for strength analysis of GIS against earthquakes.

必要条件となる。当社では可能なかぎり建屋など構築物のデータを含めた耐震性を検討するよう努力をはらっている。

建屋に設置された状態を図2.2に示す。このせん断構造模型の運動方程式に関する詳細は周知のとおりであるからここでは省略するが、この運動方程式の外力にEL CENTRO地震波を加えたときの各階の応答を加速度、変位について計算した。この結果の一例として、EL CENTRO地震波を図2.3に、1階の加速度応答波

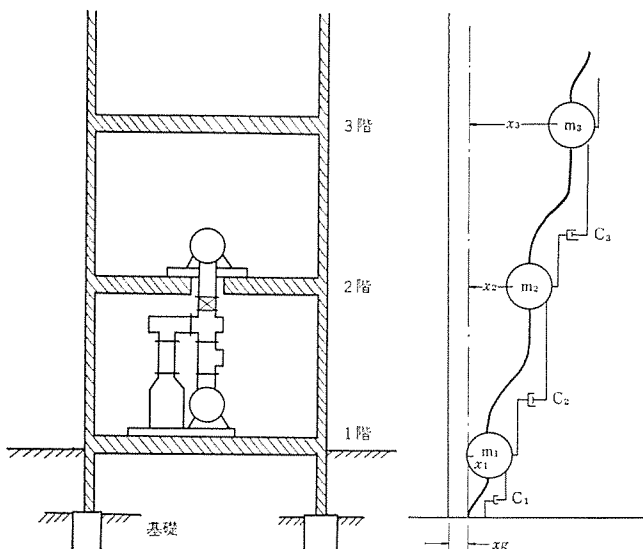


図 2.2 建屋のせん断構造モデル  
Shear type multi-degree-of-freedom system of building.

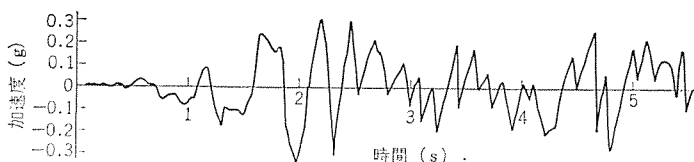


図 2.3 EL CENTRO 地震波形  
Acceleration wave form of EL CENTRO earthquake.

形の一部を図 2.4 に示す。

この結果からして、建屋という振動系をとおり GIS 本体に与えられる外力は、加振波形とはかなり形態が異なっていることがわかる。

## 2.2 GIS の振動系の決定

三次元的に入りこんだ複雑な構造物の耐震性が重要となるものに、原子力発電所<sup>(2)(3)</sup>や化学プラント<sup>(4)</sup>などがある。これらの各種の耐震検討法はすでに報告されている。GIS もこのような機器とどうようの扱いをすべきであり、多自由度の集中定数系におきかえるとき、単純に質点とコイルばねの組み合わせであるせん断構造模型におきかえるのは、精度的に問題がある。そこで、一般には影響係数法が用いられる。

今、 $n$  個の自由度を持つ集中定数系を考えると、 $j$  点に単位荷重を加えた場合の  $i$  点のたわみを  $\alpha_{ij}$  とすると、 $\alpha_{ij}$  が影響係数と呼ばれるものである。外力を  $F$ 、たわみを  $x$  とすると一般的には式 (2.1) で表わされる。

$$\{x\}[\alpha] = \{F\} \quad (2.1)$$

ここで、 $\{ \}$  は列ベクトルを、 $[ \ ]$  は正方行列を表わすものとする。ばね定数を  $k$  とすると、

$$[k]\{x\} = \{F\} \quad (2.2)$$

ゆえに、

$$[k] = [\alpha]^{-1} \quad (2.3)$$

となり、影響係数を求めるとばね定数が決定される。

ここで影響係数を求める方法として、マトリックス構造物解析法<sup>(5)</sup>を用いる。この解析により影響係数と各質点に荷重、モーメントが加わった場合の各質点の変位、各部材の応力などが計算されるので、地震波応答が求められた後に各部材に発生する応力が求められ、耐震強度が計算できる。骨組構造モデルの一例を図 2.6 に示す。

質点の分割は形状によりある程度経験的に定められる。減衰項は

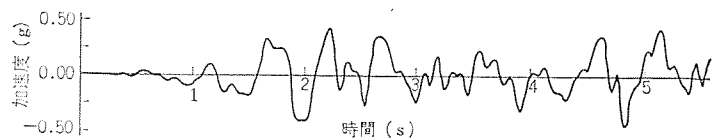


図 2.4 建屋の EL CENTRO 地震加速度応答波形  
Example of calculated acceleration wave form of building in response to EL CENTRO earthquake.

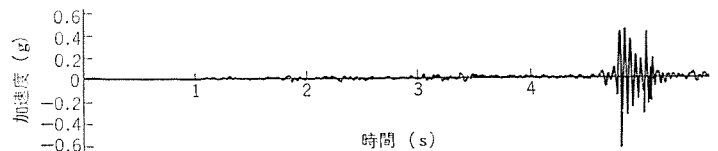


図 2.5 図 2.4 の波形で加振された GIS の加速度応答波形  
Example of calculated acceleration wave form of GIS in response to the response curve of building.

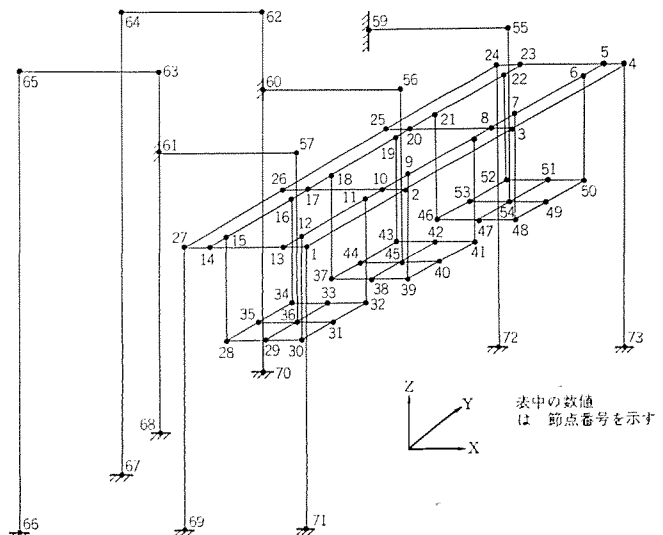


図 2.6 GIS の骨組構造モデル  
Structure model of GIS.

ばね項と相似であるという仮定の等価減衰比率を与える。この等価減衰比率は加振結果から 2.5%～5% として計算を行なっている。

## 2.3 耐震応答の計算<sup>(6)</sup>

以上のようにして振動系の定数が求められると、運動方程式は次式で表わされる。

$$[m]\{\ddot{x}\} + [c]\{\dot{x}\} + [k]\{x\} = \{F\} \quad (2.4)$$

ここで、

$m$  : 質量の対角マトリックス

$c$  : 減衰項の正方マトリックス

$k$  : ばね項の正方マトリックス

$x$  : 変位の列ベクトル

$\ddot{x}$  :  $x$  の時間に対する 2 回微分

$\dot{x}$  :  $x$  の時間に対する 1 回微分

この式 (2.4) を直接オイラー法とカルンガッター法で解くのは、オーソドックスな手法であり、精度も高い。しかし自由度が大きくなり、固有振動数が高くなると積分間隔をきわめて小さくする必要があり、能率が悪くなる。このため、各種の近似計算法が報告されているが、ここでは固有値、固有ベクトルを求め、運動方程式を 1 質点系の式に変換して行なうモード法の概略を述べる。

式 (2.4) を書きなおすと

$$[m]\{\ddot{x}\} + [c]\{\dot{x}\} + [k]\{x\} = -\ddot{y}[I] \quad (2.5)$$

ベクトル  $\{x\}$ 、 $[I]$  は独立な振動形  $\{X_j\}$  に分解されるので

$$\left. \begin{aligned} \{x\} &= \sum_{j=1}^n q_j \{X_j\} \\ \{I\} &= \sum_{j=1}^n \beta_j \{X_j\} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2.6)$$

ここで、

$$\beta_j = \frac{\sum_{r=1}^n m_r X_{rj}}{\sum_{r=1}^n m_r X_{rj}^2} \dots\dots\dots (2.7)$$

の形で表わされ、これを振動の刺激係数と呼ぶ。式(2.7)を式(2.5)に代入すると

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^n [m] \{X_j\} \ddot{q}_j + \sum_{j=1}^n [c] \{X_j\} \dot{q}_j + \sum_{j=1}^n [k] \{X_j\} q_j \\ = -\ddot{y} \sum_{j=1}^n [m] \{X_j\} \beta_j \dots\dots\dots (2.8) \end{aligned}$$

式(2.8)の各項に  $\{X_j\}^T$  をかけると直交条件により式(2.8)は、

$$M_j \ddot{q}_j + C_j \dot{q}_j + K_j q_j = -\ddot{y} M_j \beta_j \dots\dots\dots (2.9)$$

となる。ここで、

$$\left. \begin{aligned} M_j &= \{X_j\}^T [m] \{X_j\} = \sum_{r=1}^n m_r X_{rj}^2 \\ C_j &= \{X_j\}^T [c] \{X_j\} = \sum_{r=1}^n \sum_{s=1}^n c_{rs} X_{rj} X_{sj} \\ K_j &= \{X_j\}^T [k] \{X_j\} = \sum_{r=1}^n \sum_{s=1}^n k_{rs} X_{rj} X_{sj} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2.10)$$

で表わされ、 $M_j$ 、 $C_j$ 、 $K_j$ をそれぞれ換算質量、換算減衰定数、換算ばね定数と呼ぶ。

式(2.10)で

$$\omega_j^2 = \frac{k_j}{M_j}, \quad h_j = \frac{C_j}{2M_j \omega_j} \dots\dots\dots (2.11)$$

とおくと、 $\omega_j$ はj次のモードの固有振動数を示し、 $h_j$ は減衰定数を示す。式(2.9)に式(2.11)を代入すると

$$\ddot{q}_j + 2h_j \omega_j \dot{q}_j + \omega_j^2 q_j = -\ddot{y} \beta_j \dots\dots\dots (2.12)$$

となり、この解は

$$\begin{aligned} q_j &= \beta_j q_{j0} \\ q_{j0} &= -\frac{1}{\sqrt{1-h_j^2} \omega_j} \int_0^t \ddot{y}(\tau) e^{-h_j \omega_j (t-\tau)} \sin \{\sqrt{1-h_j^2} \omega_j (t-\tau)\} d\tau \end{aligned} \dots\dots\dots (2.13)$$

で表わされる。ゆえに、変位応答は

$$\{x\} = \sum_{j=1}^n \{X_j\} \beta_j q_{j0} \dots\dots\dots (2.14)$$

加速度応答は最終的に

$$\{\ddot{x} + \ddot{y}\} = -\sum_{j=1}^n \{X_j\} \beta_j (2h_j \dot{q}_{j0} + \omega_j^2 q_{j0}) \dots\dots\dots (2.15)$$

となり、外力に対する応答が求められる。

以上のような理論により、図2.4の建屋の地震応答波形を外力として求めたGISの応答を図2.5に示す。

### 3. 加振試験

理論的検討では建屋を含めた全体の耐震強度の検討を行なった。しかし、これだけでは十分とはいえない。GISのような構造物ではチェックする項目も増加するし、予想し得ぬ現象が生ずる可能性もある。たとえば、ガスシール機構のリークの問題、締結部のゆりみ、接続導体の安全性などは実験的に検討を行なわねばならない。当社ではすでに耐震用大形加振機を設置しており、電力機器の耐震性の検証

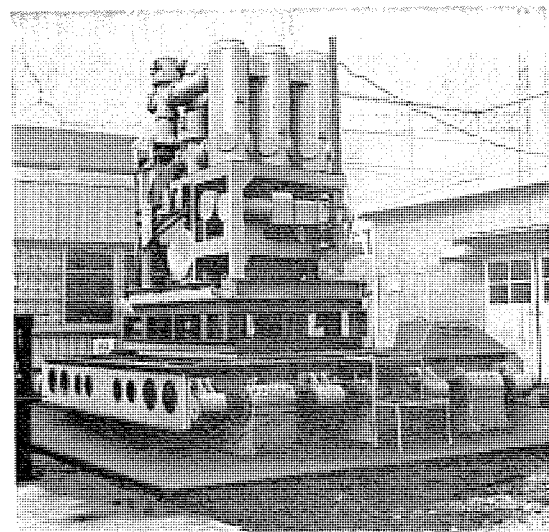


図 3.1 GISの加振状況  
Under shaking test of GIS.

に威力を発揮している。この装置により各種のGIS加振試験を実施した。

#### 3.1 加振波形

当社で用いている加振波形はつぎのとおりである。

- (1) 正弦波形
- (2) 設置される個所の実地震応答波形
- (3) 実地震波形

正弦波加振ではGIS本体の振動特性が明らかにされる。設置個所の実地震応答波形はアナログ的に、またはデジタル的にこれを求め、データレコーダーに記録して加振を行なう。入力とする実地震波は新潟地震などの国内地震波、EL CENTRO、TAFT地震などの国外の地震波を用いる。建屋の振動系の定数が不明な場合は、直接前記の実地震波を用い加振を行なっている。

#### 3.2 加振状況および測定項目

GISはしゃ断器、断路器、母線などの機器が接続されているため、全体を同時に加振することは加振機的能力により不可能である。そこで、各セクションを切りはなし加振試験を実施した。加振状況を図3.1に示す。測定項目は

- (1) 正弦波加振
  - (a) 固有振動数
  - (b) 減衰比率
  - (c) 各部の発生ひずみ、加速度
- (2) ランダム波加振
  - (a) 各部の発生ひずみ、応答加速度
  - (b) 締結部のゆりみ
  - (c) ガスシール部のリーク

加振後のリークはフ里昂ガスを封入し、各部をビニールシートでおおひ、ガスリークディテクタによりチェックした。測定状況を図3.2に示す。

#### 3.3 接続導体の強度試験

各セクションはベローズで接続されている。しかし、前述の理由でベローズを含め加振を行なうのは困難である。そこでベローズのみを別個に試験し安全性の確認を行なった。試験状況を図3.3に示す。

試験は予想される変位を計算によって求め、油圧シリンダーで繰り返し荷重を加え、クラックおよびリークの有無を確認した。繰り返し回数は安全率を考慮し2万回以上とした。



図 3.2 加振後のリークテスト  
Leak detecting test after the shaking test.

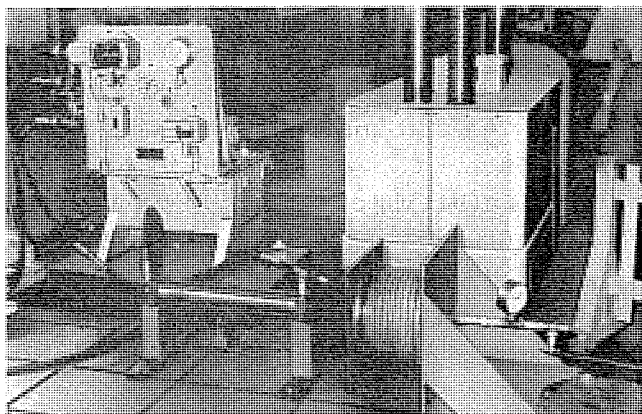


図 3.3 ベローズの強度試験  
Fatigue test of bellows with GIS.

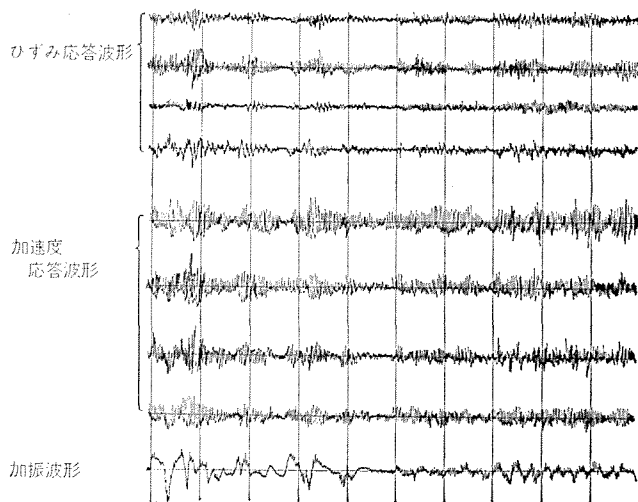


図 3.4 GIS の実地震波加振試験のオシロの一例  
Example of response oscillogram of GIS to earthquake acceleration wave.

### 3.4 試験結果

#### (1) 共振試験

しゃ断器、断路器などの各機器ともお互いに影響をおよぼしあい、いくつかの周波数で共振する。この周波数は 10~30 Hz で GIS 本

体としては地震波の優勢周波数領域からはずれている。また、共振点での応答倍率は 10~20 倍である。

#### (2) ランダム 波加振

共振点が 10 Hz 以上にあるため、地震波に対する応答は非常に小さい。発生ひずみも許容限界を下まわっており、十分の耐震性が立証された。加振後の締結部のゆりみもなく、リークもまったく認められなかった。ベローズは建屋の相対変位量が極端に大きくなければクラックもリークも発生しないことが確認された。加振試験の一例を図 3.4 に示す。

## 4. む す び

以上、66 kV~154 kV の GIS の耐震性について、理論的、実験的の両方から検討を加えて、その方法と結果の一例を述べたが、ここで要約すると、

(1) GIS 本体の剛性は高く、共振周波数は 10~30 Hz である。共振時の応答倍率は機器によっても異なるが、10~20 倍であった。

(2) 地震波に対する応答も共振周波数が高いため小さく、発生応力は許容限をかなり下まわっており、強度的にも十分安全である。

(3) ボルトのゆりみやガスリークについては何ら異常は認められず、この面からも耐震性が良いことが立証された。

(4) GIS の地震波応答は設置される建屋の影響が大きい、各機器は強度的に余裕があるので建屋の共振点が本体の共振点とある程度近接しても心配はない。しかし、建屋の剛性が極端に小さいと、GIS の各階を接続する個所に問題を生じるので、建屋を含め耐震性を同時に検討することが望ましい。

(5) ベローズの強度は建屋に普通以上の剛性があれば、十分の強度を有している。

以上のように、GIS の耐震性についてあらゆる角度から検討を加え、その優秀さを立証した。しかし、まだ問題点が多い。たとえば、建屋の振動系の定数をどのようにとるかとか、加振時に分割されたセクションの接続部の検討をどうするかなどがある。さらに、超々高圧機器を直接加振するのは不可能となる場合もあり、理論計算とモデル実験がおもな検討法となってくるであろう。送配電施設の規模が大きくなると、地盤自体の動きが部分的に異なってくる可能性もあり、この場合は地盤を含めた検討が非常に重要となるだろう。これらの問題に対して、当社はすでに研究に着手しており、今後も引続き努力を重ねていく所存である。

最後に本試験にご尽力くださった関係者各位に紙上にて深く感謝する。

## 参 考 文 献

- (1) 志村、高橋ほか：三菱電機技報 43, 12 (昭 44)
- (2) 田淵：AGR 炉心の耐震解析および実験、富士時報 41, 10 (昭 43)
- (3) 一木、北川：BWR 原子力発電所の耐震設計、東芝レビュー 24, 1 (昭 44)
- (4) 柴田、佐藤：機械系の耐震設計、高圧力 5, 4 (昭 42)
- (5) O. C. Zunkiewicz : Stress Analysis, John Wiley and Sons
- (6) 田治見：建築振動学、コロナ社

ガス絶縁開閉装置用SF<sub>6</sub>ガスしゃ断器

稲村 彰一\*・松田 節之\*

SF<sub>6</sub> Gas Circuit Breakers for Gas Insulated Switchgear

Itami Works Shoichi INAMURA・Setsuyuki MATSUDA

It is more than five years since the double pressure type large capacity SF<sub>6</sub> gas circuit breakers were built in this country for the first time in 1965. During this period the development has been made one after another and puffer type medium capacity units and further a new series of double pressure type one sent to the market. Actual installations of conventional type gas circuit breakers brought about until the end of July 1960 amounted to 750 units. All the experience in the field is taken into the design of a new series and the apparatus are constructed on the same principle of the conventional type breakers, thus possessing very high reliability. This article describes the outlines of the SF<sub>6</sub> gas circuit breakers used for the gas insulated switchgear.

## 1. ま え が き

昭和40年にわが国ではじめてSF<sub>6</sub>ガスを使用した84kV 5,000MVAの二重圧力式SF形ガスしゃ断器が納入されてから5年あまりが経過した。この間に大容量SF<sub>6</sub>ガスしゃ断器は、SF形の形名のもとに72kVから550kVまでの全電圧階級にわたって多数納入され<sup>(1)</sup>、これらのフィールド実績と社内における研究開発をもとに、昭和44年には、性能を一段と向上させた新形大容量SF<sub>6</sub>ガスしゃ断器SFHシリーズを完成している<sup>(2)</sup>。

一方、中容量SF<sub>6</sub>ガスしゃ断器として、昭和42年に84kV 3,500MVAの単一圧力パツファ式SFL形ガスしゃ断器が納入され、翌年には、72kV以上の全電圧階級にわたるシリーズを完成している<sup>(3)</sup>。

多くのすぐれた特長と性能を合わせ持った当社のガスしゃ断器は、時代の要求によくマッチしたこともあって、発売以来短期間のうち

に急速に普及し、45年6月末現在で受注納入実績はすでに750台を越えるにいたっている。

ガス絶縁開閉装置(Gas Insulated Switchgear, GIS)用ガスしゃ断器を開発するにあたっては、われわれは特に高い信頼性を要求されるGISの中心機器として、フィールドでの実績が十分にあり、その間に得られた貴重な経験を活用できるSFL, SFH形の構想を、できるだけそのままGIS用ガスしゃ断器に踏襲することを基本方針とした。

すなわち、定格電圧204kV以下のしゃ断器は、SFL形ガスしゃ断器のしゃ断部を、定格電圧240kV以上のしゃ断器は、SFH形ガスしゃ断器のしゃ断部をそれぞれSF<sub>6</sub>ガスで満たされた接地金属容器内に収容し、対地間、極間の絶縁距離の縮小を行なっている。ただ、SFL形ガスしゃ断器は、外部が大気絶縁であるために必要な気中せん(閃)絡距離をとる必要と、がい管製作上の制約により168kV・204kV定格のものは1相2しゃ断点を使用せざるをえなかつ

表 2.1 定格表 Ratings.

形 式 記 号	70-SFLT-350	100-SFLT-500	140-SFLT-750	170-SFLT-1000	200-SFHT-2000	250-SFHT-2500	500-SFHT-4500
定 格 電 圧 kV	72/84	120	168	204	240	300	550
定 格 電 流 kA	2,000/3,000	2,000/3,000	2,000/3,000	2,000/3,000	2,000/4,000	2,000/4,000	2,000/4,000
定格しゃ断容量 MVA	3,500	5,000	7,500	10,000	20,000	25,000	45,000
定格しゃ断電流 kA	28.1/24.1	24.1	25.8	28.3	48.1	48.1	50
定 格 周 波 数 Hz	50/60	50/60	50/60	50/60	50/60	50/60	50/60
定 格 再 起 電 圧 kHz	4.5/4	3	2.5	2.2	2.0	1.8	60%しゃ断電流 100%しゃ断電流 上昇率 3kV/μs 1.8kV/μs
定 格 投 入 電 流 kA	76.5/65.6	65.6	70.3	78.3	131.3	131.3	125
定 格 短 時 間 電 流 kA	28.1/24.1	24.1	25.8	28.3	48.1	48.1	50
定格しゃ断時間 サイクル	5	3/5	3	3	3	2/3	2
無負荷投入時間 s	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
絶 縁 階 級 号	60/70	100	140	140	170	200	対地間 極 間 商用周波 kV 840 840 衝 撃 波 kV 1,800 1,800+ $\frac{550}{\sqrt{3}}\sqrt{2}$ 開閉インパルス kV 1,200 1,200
定 格 ガ ス 圧 kg/cm <sup>2</sup> g	高 圧 低 圧	4.0	5.0	5.0	5.0	15 3	15 3
定 格 操 作 油 圧 kg/cm <sup>2</sup> g	320	320	320	320	320	320	320
標 準 動 作 責 務	甲 号	甲号・高速度再閉路	同 左	同 左	同 左	同 左	同 左
しゃ断点数	1	1	1	1	2	2	4

たのに対し、GIS用のSFLT形ガスしゃ断器は、大気のかわりに絶縁耐力の高いSF<sub>6</sub>ガスを使用しているため、上記定格のものはいずれも1相1しゃ断点で十分なことである。

別稿で述べられているように、各定格電圧のSFLT形ガスしゃ断器は、すでに実系統で稼働中のGISとともに運転を続けており、SFHT形のガスしゃ断器は、550kV定格のものが伊丹製作所内で長期課電試験を実施中であり、300kV定格のものは、本年末より実系統で運転に入ることになっている。

以下に、これらGIS用ガスしゃ断器の構造動作・各種試験結果などを、単一圧力パッファ式SFLT形と二重圧力排気式SFHT形とにわけて説明する。

## 2. 定格・仕様

表2.1にGIS用ガスしゃ断器の定格・仕様の一覧表を示す。550kVしゃ断器に対する定格は、“500kVしゃ断器の標準仕様”<sup>(6)</sup>に準じている。

### 3. 単一圧力式ガスしゃ断器 (SFLT形<sup>(4)</sup>)

#### 3.1 構造および動作

図3.1にしゃ断試験中の写真を示す。鉄構架台の下に各相のガスを流通させるとともに水平操作棒を収容している下タンクが水平に取り付けられており、この上に各相のしゃ断部を収納する金属製のタンクが3本垂直に立っている。前面には操作シリンダと引きはずしばねが取り付けられており、気密軸を介して水平操作棒に駆動力を伝達する。架台の前には操作機構がある。

図3.2は内部構造を示している。電流は上側の中央導体から接触子ささえ、固定接触子・可動接触子・パッファシリンダ・しゅう動接触子・接続導体を経由して下側の中央導体にいたる。上下の中央導体を支持する絶縁支持物はしゃ断器と隣接器との間のガスを分離するための気密隔壁となっている。シールドが適当に配置されて電界分布を改善している。可動接触子は絶縁操作棒・レバー・水平操作棒・気密軸を介して操作シリンダと引きはずしばねによって操作される。

図3.3はしゃ断部の動作原理図である。(a)の開路状態において

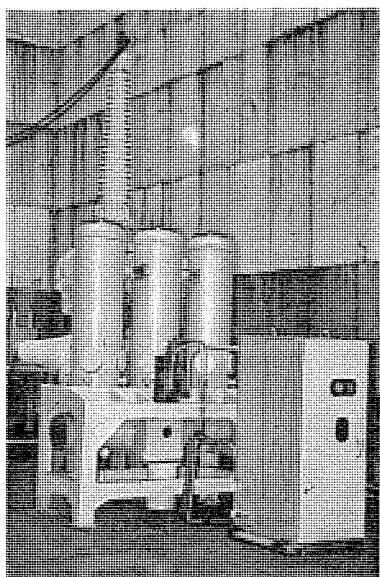


図 3.1 100-SFLT-500 しゃ断試験状況  
100-SFLT-500 under interruption tests.

引きはずし指令によって引きはずしばねのエネルギーが開放されると、絶縁操作棒を介して可動接触子と一体になったパッファシリンダが下方に動き、(b)に示されるようにパッファシリンダ内で圧縮されたSF<sub>6</sub>ガスをノズル部分でアークに吹き付けて消弧し、(c)の開路状態になる。(d)は投入動作中の状況であって、操作シリンダに圧油あるいは圧縮空気を送ると可動接触子が上方に動いて投入位置に達するが、この際にパッファシリンダ内にSF<sub>6</sub>ガスを吸い込んでつぎのしゃ断状態に備える。

SFLT形ガスしゃ断器の操作機構は、機構箱の配置を自由に選び

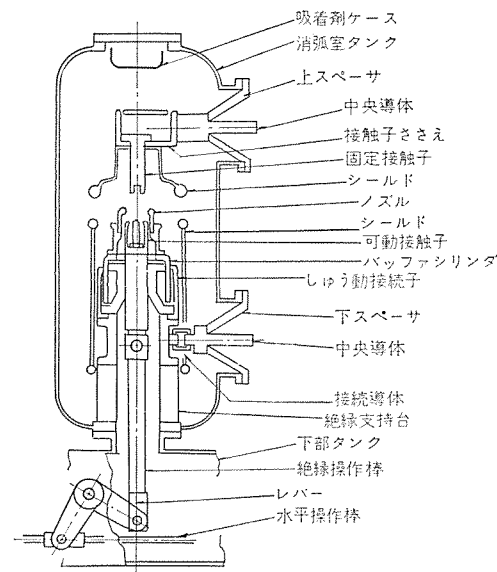


図 3.2 内部構造説明図  
Cross section of circuit breaker.

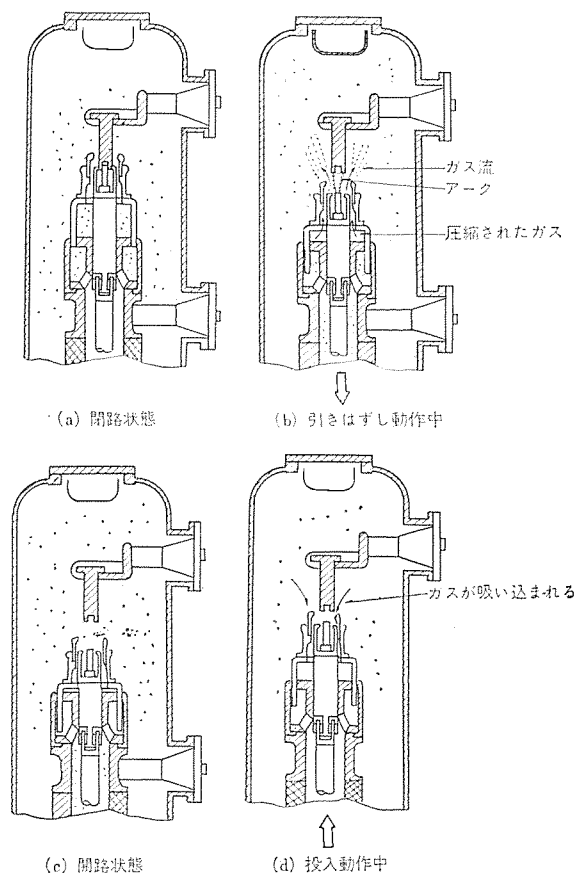


図 3.3 動作原理図  
Operating diagram of interrupter.

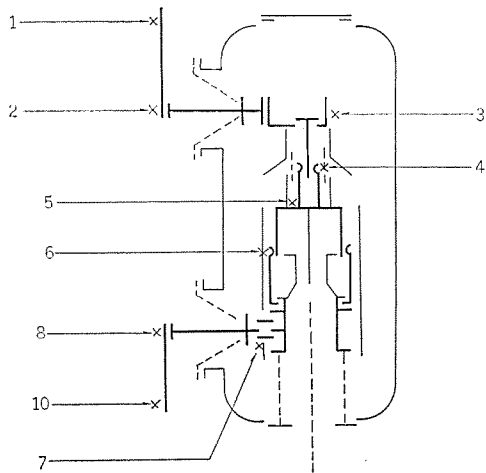


図 3.4 温度測定箇所  
Temperature-rise measurement points.

表 3.1 温度上昇試験結果  
Test results of temperature rise.

測定箇所	70-SFLT-350		140-SFLT-750		温度上昇 規格値 deg
	測定値 ℃	上昇値 deg	測定値 ℃	上昇値 deg	
1: 端子から1mの試験用導体	68	43	64	41	30以上
2: 上部端子接続部	67	42	63	40	55
3: 固定接触子接続部	49	24	40	17	55
4: 主接触部	49	24	40	17	55
5: 可動接触子接続部	45	20	40	17	55
6: しゅう動接触部	44	19	36	13	55
7: 接触部	44	19	36	13	55
8: 下部端子接続部	57	32	63	40	55
9: 端子から1mの試験用導体	67	42	65	42	30以上
10: タンク外壁	35	10	30	7	70
11: 周囲温度	25	—	23	—	—

通電電流: 2,000 A, 60 Hz  
ガス圧: 定格圧力相当

測定器: 熱電対自動記録温度計  
通電時間: 10 時間

たい場合には油圧操作方式を採用するが、この油圧操作機構は大容量ガスしゃ断器 SF 形・SFH 形に多数使用されてきたものと同一のものである。また、圧縮空気発生装置の有無あるいは配置の関係等を考慮して、SFL 形ガスしゃ断器に使用されている圧縮空気操作機構も使用できる。

### 3.2 試験結果

前述したように、SFL T 形ガスしゃ断器は SFL 形しゃ断器のしゃ断部を接地タンクに入れたものであるから、操作試験・短絡試験などは SFL 形で十分検討済みであるといえるものが多いが、ひととおり再確認の意味も含めて JEC-145、電力用品規格 B-112 に規定された各種試験ならびに部品単体試験、GIS 用しゃ断器として必要な特殊試験をおこなったので、そのうちのおもなものについて述べる。

#### 3.2.1 温度上昇試験

温度上昇試験として 2,000 A 通電時の温度測定点を図 3.4 に、代表的な試験結果として 70-SFLT-350、140-SFLT-750 について表 3.1 に示す。いずれも規格値に対して十分余裕のある結果が得られている。SFL 形に比べて温度上昇値が低いこと、また定格電圧が高く消弧室タンクが大きいほど温度上昇値が低いのは SF<sub>6</sub> ガスの対流による熱伝達が大きいため、内部に発生した熱量がタンクへよく運ばれ、表面積の大きなタンクほど放熱しやすいことによるものである。なお、定格しゃ断電流を 10 回しゃ断した後の温度上昇試験も実施しているが、主接触子部分で 4～5 度高くなる程度で問題はない。

3,000 A 定格のものは SFL 形とどうよう、固定接触子等一部の材質を変えるのみで形状、寸法の変更はない。

#### 3.2.2 耐電圧試験

GIS 用しゃ断器は接地金属容器と課電圧部の距離が非常に縮小されているので、とくに耐電圧試験は入念に実施された。

試験はしゃ断器組立後と、連続開閉試験後、短絡しゃ断試験後に、それぞれ表 2.1 の定格表に示された耐電圧値に対し鎖錠ガス圧において実施し、十分耐えることを検証した。極間の耐電圧について

表 3.2 短絡しゃ断試験 Short circuit interruption test.

形式記号	試験動作責務	しゃ断電流		回復電圧 %	給与電圧 kV	固有再起電圧		投入電流 kA	アーク時間 サイクル	しゃ断時間 サイクル	備考
		対称分 kA	直流分 %			周波数 kHz	振幅率				
70 SFLT 350	O-1'-CO-3'-CO	30.6~33.3	0~60	92~95	62	4	1.6	107~110	1.0~1.3	2.75~3.15	単相実負荷, JEC II, 110 %
	O-1'-O-3'-O	24.1	0	97	75	4	1.8	—	0.8~0.95	2.55~2.7	単相実負荷, JEC II, 110 %
	O, O, O	6.5	0	95	122	2.8	1.3	—	0.7~0.9	2.45~2.65	単相実負荷, 脱調, 2.5 E, 0.25 I
	O, O, O	20.8	0	95	33	H: 95 L: 3.2	H: 1.7 L: 1.7	—	1.2~1.4	2.95~3.15	単相実負荷, 近距離, 86 %相当
	O, O, O	16.3	0	96	36.5	H: 34 L: 3.2	H: 1.9 L: 1.7	—	1.1~1.3	2.85~3.05	単相実負荷, 近距離, 68 %相当
100 SFLT 500	O-θ-CO-1'-CO	26.8~27.6	0~65	93~95	53	2.5	1.6	88~92	0.95~1.2	2.55~2.8	単相実負荷, JEC II, 110 %電流
	O, O, O	26.8	0	98	173	3	1.4	—	1.0~1.2	2.6~2.8	単相等価, 110 %電流, 異相定格電圧
	O, O, O	20.6	0	96	36	H: 68 L: 2.5	H: 1.7 L: 1.7	—	1.1~1.3	2.7~2.9	単相実負荷, 近距離, 85 %相当
	O-θ-CO-1'-CO	5.1~5.2	0~62	98	146	2.5	1.6	11.7~13.6	0.6~0.8	2.25~2.45	単相実負荷, JEC II, 電圧のみ
140 SFLT 750	O-θ-CO-1'-CO	28.2~29.8	0~60	95~97	25	2.5	1.6	57~86	1.1~1.2	2.75~2.85	単相実負荷, JEC II, 110 %電流
	O, O, O	28.1	0	97	146	2.6	1.65	—	0.9~1.1	2.55~2.75	単相等価, JEC II, 110 %
	O, O, O	1.8	0	98	242	2.5	1.25	—	0.7~0.9	2.35~2.55	単相実負荷, 脱調, 2.5 E
	O, O, O	22.9	0	96	40	H: 67.5 L: 2.5	H: 1.7 L: 1.7	—	1.1~1.3	2.75~2.95	単相実負荷, 近距離, 89 %相当
	O, O, O	21.0	0	97	44	H: 34 L: 2.5	H: 1.7 L: 1.7	—	1.1~1.3	2.75~2.95	単相実負荷, 近距離, 81 %相当
	O, O, O	31.5	0	97	173	2.5	1.5	—	0.9~1.15	2.55~2.8	単相等価, JEC II, 110 %
170 SFLT 1000	O, O, O	26.6	0	97	40	H: 95 L: 2.5	H: 1.7 L: 1.7	—	1.1~1.3	2.75~2.95	単相実負荷近距離, 94 %相当

注) 60 Hz, 鎖錠ガス圧力で実施

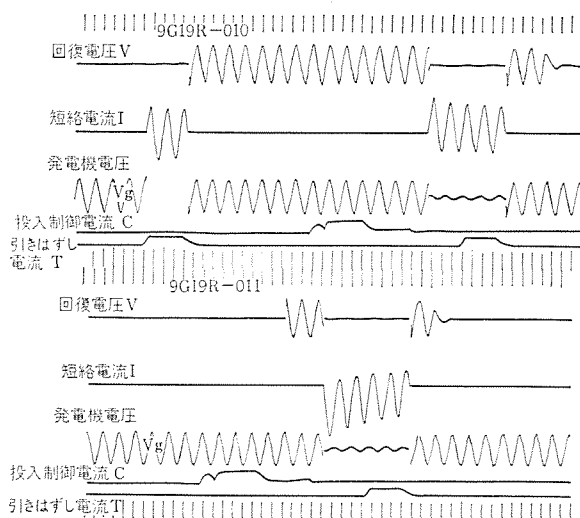


図 3.5 140-SFLT-750 短絡しゃ断試験 オシログラムの例  
(O-θ-CO-1分-CO動作)  
Typical oscillogram of short circuit interruption test.

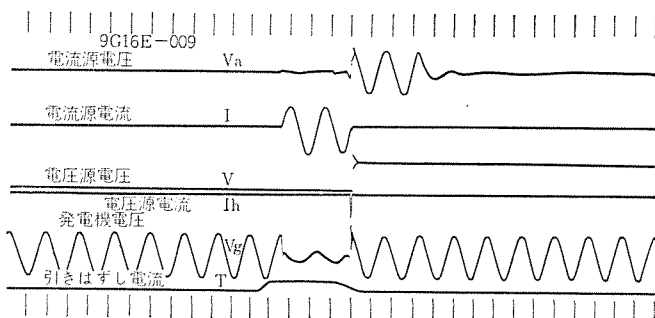


図 3.6 短絡しゃ断試験 オシログラムの一例  
Typical oscillogram of short circuit interruption test.

は、商用周波の重畳した場合の衝撃波試験も参考として行なっている。また、SF<sub>6</sub>ガスが万一外部へもれてガス圧が大気圧まで下った最悪の場合でも暫時運転が可能のように、商用周波耐電圧として対地間には非有効接地系に対して、線間電圧を、有効接地系に対しては常規対地電圧の1.3倍を印加し、極間には両極に、位相の180°ずれた常規対地電圧をそれぞれ印加し（極間には2Eの電圧が印加されたことになる）、これに耐えることを確認している。

一方、コナ試験としては常規対地電圧の1.3倍を印加し、ERA3形コナ試験器により、しゃ断器内部のコナを測定したが、何ら有害なコナの発生は認められなかった。

### 3.2.3 短絡しゃ断試験

各定格のしゃ断器に対して実施した短絡しゃ断試験のうち、代表的な例を表3.2に、短絡試験オシログラムの一例を図3.5に示す。JEC-145Ⅱ号相当の端子短絡しゃ断はもちろんのこと、近距離線路故障・脱調・異相地絡時等、過酷な条件のもとでもすぐれたしゃ断性能が検証されることは、SFL形のしゃ断部をそのまま使用しているので容易に想像されるところであるが、ただSFL形と異なる点は、しゃ断時にイオン化されたガスによって接地金属容器との間にせん絡が生じないことを確認することと、前にも触れたように、168kV・204kV定格のしゃ断器は1しゃ断点に減少されたために、しゃ断責務がいつそうきびくなったことに対する十分な性能の確認試験を実施したことである。

1しゃ断点あたりのしゃ断能力が高いため、しゃ断性能の確認に

表 3.3 進み小電流しゃ断試験  
Leading current interruption test.

形式記号	給与電圧 kV	しゃ断電流 A	再点弧回数 回	再発弧回数 回	試験回数 回	しゃ断時の過電圧 倍数
70-SFLT-350	84	12	0	0	12	1以下
	84	140	0	0	12	1以下
100-SFLT-500	120	7.5	0	0	12	1以下
	120	30	0	0	12	1以下
	120	90	0	0	12	1以下
140-SFLT-750 170-SFLT-1000	168	65	0	0	12	1以下

注) 60 Hz, 鎖錠ガス圧力で実施

表 3.4 無負荷変圧器励磁電流しゃ断試験  
No-load transformer exciting current interruption test.

形式記号	試験動作 責務	給与電圧 kV	しゃ断電流 A	試験回数 回	しゃ断時の過電圧 倍数
70-SFLT-350	O	60	4	12	1以下～1.35
	O	75	14	12	1以下～1.35
	CO	73	450～600	6	1.1～1.35
100-SFLT-500	O	104	1.3	12	1以下～1.2

注 1) 60 Hz, 最高ガス圧力で実施

2) しゃ断時の過電圧倍数は、試験電圧波高値に対する倍数で表示

は Weil 回路による等価試験を実施しているが、イオン化されたガスによって接地金属容器との間にせん絡が生じないことを確認するためには最大しゃ断電流でアーク時間の一番長い開極位相を選び、Weilの電圧源回路（充電されたコンデンサ側）の残留電圧が実しゃ断試験の回復電圧波高値以上に数秒維持できるようにして検証している。当然のことながら、極性の効果を確かめるためには、しゃ断器の端子双方についてそれぞれ電圧・電流を印加する試験を行なっている。オシログラムの一例を図3.6に示す。短絡しゃ断試験を実施した後の主接点およびノズルの損耗については、SFL形のしゃ断器とどうようすぐれたものであった。

### 3.2.4 小電流しゃ断試験

表3.3に進み小電流しゃ断試験結果を、表3.4に無負荷変圧器励磁電流しゃ断試験結果を示す。進み小電流試験については、JEC-145改訂案によれば非有効接地系に対しては1.25E（Eは対地電圧）、有効接地系については1.1Eの単相試験を行なえばよいことになっているが、試験は位相制御を行ないながら非有効接地系に対しては線間電圧を印加して試験を行なっている。

励磁電流のしゃ断試験では、電流さい断レベルが高いと考えられる最高ガス圧で実施しているが、1.35倍以下の過電圧倍数におさまっている。

### 3.2.5 その他の試験

以上に述べた試験のほかに、10<sup>4</sup>回連続開閉試験、騒音測定、GISに組込まれた状態での震動試験、短時間電流試験、あるいはせん絡試験、部品単体の試験を行なって実用性能を検証しているが、紙面の都合で省略する。

## 4. 二重圧力式ガスしゃ断器 (SFHT形<sup>(5)</sup>)

### 4.1 構造および動作

図4.1、4.2に550kV・300kVしゃ断器1相分の外観写真を、図4.3、4.4にそれぞれの構造図を、図4.5に構造説明図を、図4.6に消弧動作説明図を示す。240kV用のしゃ断器は外観・構造

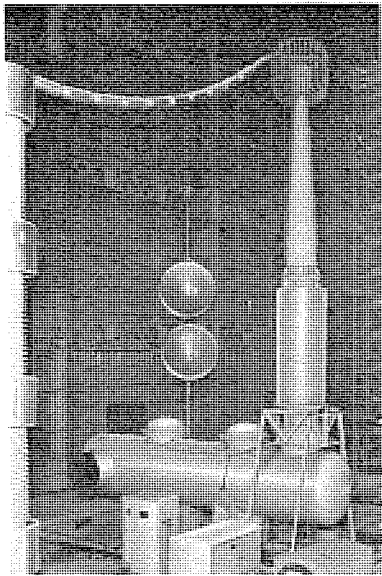


図 4.1 耐電圧試験中の 500-SFHT-4500 形 ガス シャ断器 (一相分)  
500-SFHT-4500 gas circuit breaker under voltage withstanding test.

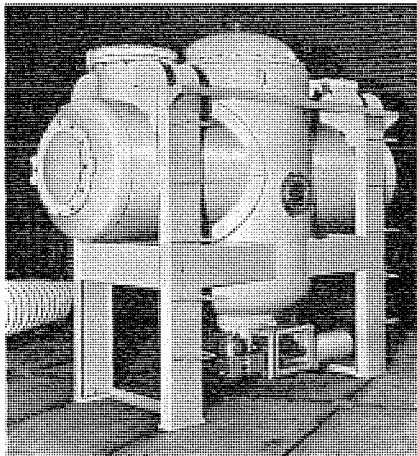


図 4.2 300-SFHT-2500 形 ガス シャ断器 (一相分)  
300-SFHT-2500 gas circuit breaker (one phase).

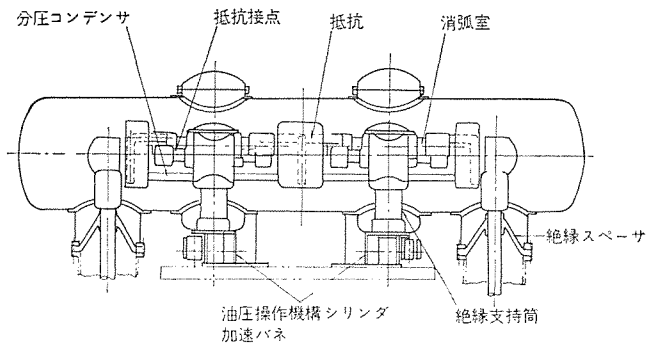


図 4.3 500 kV ガス シャ断器 構造図  
Cross section of 500 kV gas circuit breaker.

とも 300 kV とどうようである。

このシャ断器はユニット形の長所をできるだけとり入れて設計されたもので、240 kV・300 kV 定格のものは消弧室 2 個を直列にしたユニットから構成されており、550 kV 定格のものはこのユニットを 2 個接地金属容器に入れ、これに投入時の異常電圧を抑制する投入抵抗を追加した構造になっている。操作シリンダは各ユニットにそれぞれ

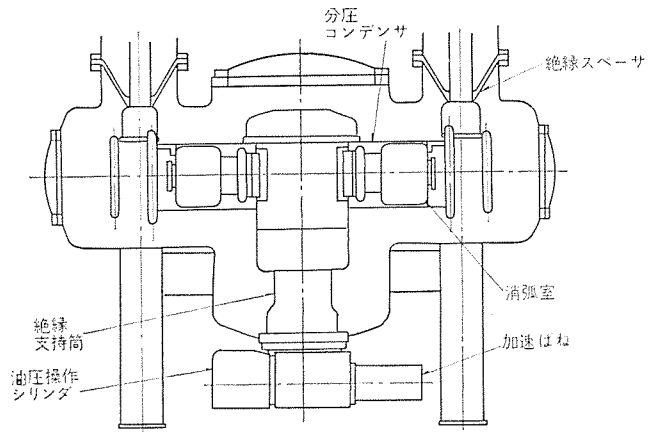


図 4.4 300 kV ガス シャ断器 構造図  
Cross section of 300 kV gas circuit breaker.

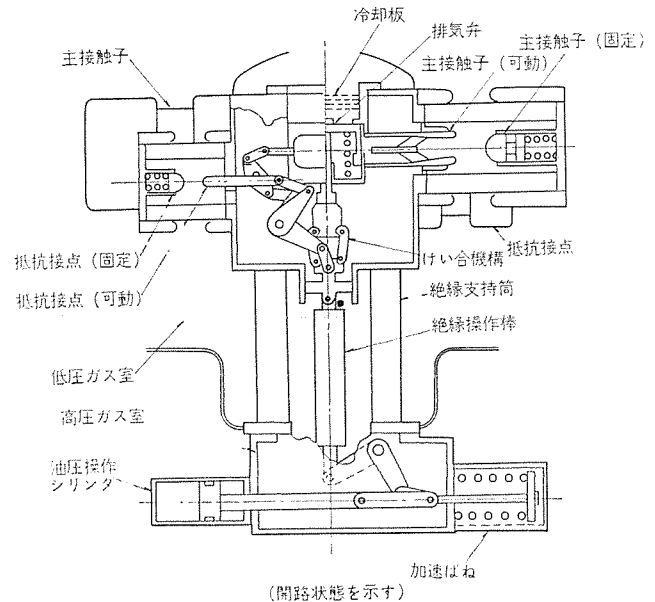


図 4.5 消弧室ユニット構造説明図  
Cross section of interrupter unit.

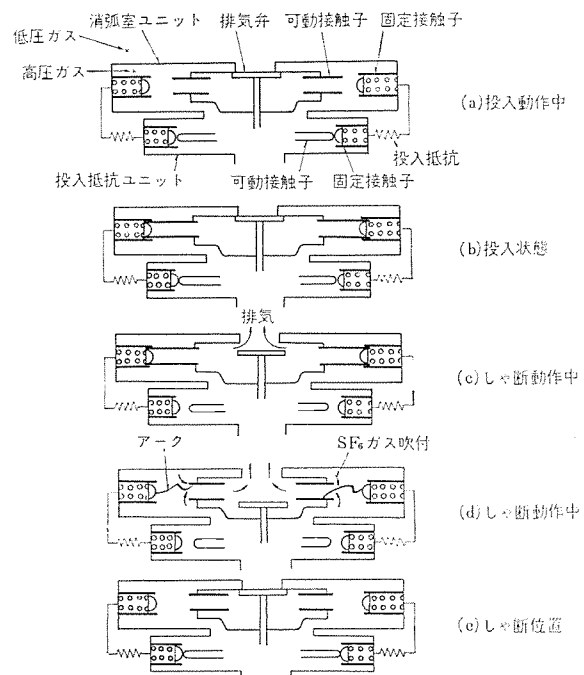


図 4.6 消弧室動作説明図  
Operation diagram of interrupter.

れ1個ずつとりつけられており、油圧によって操作される方式をとっている。すなわち操作・しゃ断性能もまったく独立なユニットの組み合わせで各電圧階級に対処することにより、共通部品の量産にもとづく品質の安定化と、ユニットによる性能確認の妥当性がえられることになる。

つぎに、構造、動作を投入抵抗のついた 550 kV のしゃ断器について説明する。300 kV・240 kV 用のものは投入抵抗がないだけで、その他の動作には変りはない。

しゃ断部は常時充気排気弁方式で、そのユニットは図 4.5 に示されている。ユニットは2個の消弧室、および2個の投入抵抗部が排気弁をはさんで両側に配置され、これらが絶縁支持筒により接地金属容器内に支持されている。この絶縁支持筒内には、主接触子、抵抗接点および排気弁駆動用の絶縁操作棒があり、大地電位部におかれた油圧操作シリンダに連結され、これより配管で油圧操作機構と結ばれている。

消弧室および絶縁支持筒内部には約  $15 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{g}$  の高圧  $\text{SF}_6$  ガスが充てんされ、それらの外側には、接地金属容器との絶縁をつかさどる  $3 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{g}$  の低圧  $\text{SF}_6$  ガスが充てんされている。また、しゃ断器の端子をささえるとともに他の機器との間のガス区分をするため、注型樹脂製絶縁スパーサが両端に設けられている。しゃ断器の高低ガスは、ガス圧縮機吸着剤入りフィルタ、圧力・温度監視装置などを含むガスハウジングならびに寒冷時に使用するガスヒータ、フロアと結ばれ、圧力温度制御、ガスの循環、水分吸着などがおこなわれるが、これらは SFH 形と同じ方式が採られている<sup>(2)</sup>。

投入操作は油圧操作シリンダへ  $320 \text{ kg/cm}^2$  の油圧を送り、加速ばねを圧縮するとともに絶縁棒を介して可動接触子を駆動しておこなう。主接触子には並列に投入抵抗素子とその接点が設けられ、機械的に主接触子と連結された抵抗接点が主接触子よりも約 10 ms 早く接触する構造になっている。図 4.6 (a) はまず抵抗接点が閉じた状態が、(b) は引き続き動作により主接触子も閉じ投入動作が完了した状態が示されている。

引きはずし操作は油圧シリンダの油を高速に排油し、加速ばねに蓄積されたエネルギーを解放することにより行なう。主接触子が開位置に駆動されるに従い、図 4.6 (c) に示されるようにまず排気弁がけい(紫)合機構により開かれ、主接触子ノズル内のガスが排出される。このとき、主接触子の固定側が一定のワイピング距離を可動接触子に追従できるのに対し、抵抗接点固定側は直ちに開き、主接触子が開く(d)の位置ではすでに十分な離間距離を保っており、抵抗は回路にそう(挿)入されることはない。主接触子ノズル内のガスはワイピングの間に十分下がり、開極と同時に生ずるアークは高速ガス流によって良好な消弧が行なわれる。排気弁操作作用けい合装置はしゃ断の行なわれる数サイクル間のみ働き、消弧後排気弁は再び閉じ、図 4.6 (e) のように極間の絶縁は高圧ガス中に開離している接触子間で維持される。

なお、これらの操作機構では、油圧により迅速円滑な速度制御を得ていることは SFH 形の場合と同じである。

## 4.2 試験結果

試験全般に関する考え方は、単一圧力式ガスしゃ断器の場合と同じことがいえるが、おもな試験結果について述べる。

### 4.2.1 温度上昇試験

SFLT 形の場合と異なり、主接触部が注型絶縁物で作られている消弧室内にあり、さらに消弧室の外側は低圧ガスを介して接地金属

表 4.1 温度上昇試験結果  
Test results of temperature rise.

測定箇所	2,000 A		4,000 A		温度上昇 規格値 deg
	測定値 °C	上昇値 deg	測定値 °C	上昇値 deg	
1: 端子より 1 m の試験用導体	63	46	80	65	30以上
2: スパーサの端子	49	32	52	37	55
3: スパーサの端子	51	34	54	39	55
4: 内部導体接続部	37	20	52	37	55
5: 消弧室端子部	38	21	49	44	55
6: 固定接触子接続部	39	22	66	51	55
7: 主接触部	37	20	66	51	55
8: しゅう動接触子接続部	28	21	63	48	55
9: 導体接続部	40	23	59	44	55
10: 導体中央部	29	12	55	40	70
11: 導体接続部	40	23	58	43	55
12: しゅう動接触子接続部	37	20	61	46	55
13: 主接触部	39	22	67	52	55
14: 固定接触子接続部	37	20	66	51	55
15: 導体接続部	36	19	55	40	55
16: 導体中央部	33	16	46	31	70
17: スパーサの端子	40	23	41	26	55
18: 端子より 1 m の試験用	54	37	71	56	30以上

通電電流: 2,000 A, 60 Hz  
ガス圧: 定格圧力

測定器: 熱電対自動記録温度計  
通電時間: 12 時間

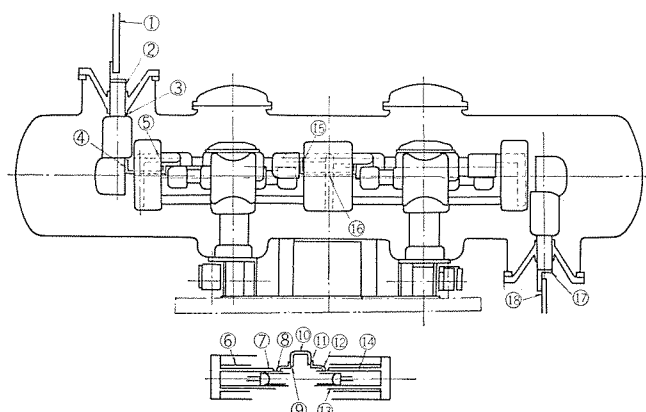


図 4.7 温度上昇試験測定点  
Temperature rise measurement points.

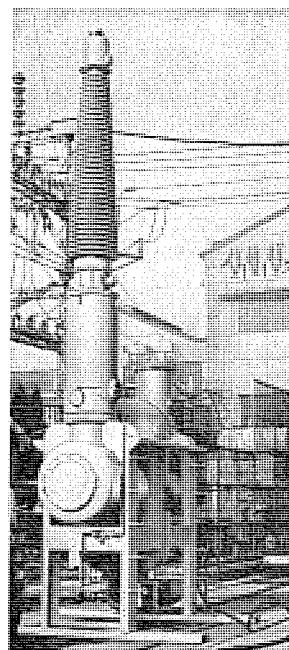


図 4.8 耐電圧試験中の 300-SFHT-2500 形  
ガスしゃ断器 (1 相分)  
300-SFHT-2500 gas circuit breaker under voltage  
withstanding test.

容器で被われているために熱の伝達に関しては従来形の SFH 形よりもやや悪く、温度上昇値については SFLT 形のように外側の接地金属容器の大きさによる違いは顕著でない。したがって代表例として 550 kV 定格のものについて、2,000 A・4,000 A 通電時の結果を表 4.1 に、測定点を図 4.7 に示す。2,000 A と 4,000 A とでは通電部分の材料を一部変更している点 SFLT 形とどうようである。

定格しゃ断電流を 12 回しゃ断した後の温度上昇試験をおこなったが、上昇値は変化がなかった。

#### 4.2.2 耐電圧試験

図 4.1, 4.8 は、500 kV・300 kV 用ガスしゃ断器の耐電圧試験を示す写真である。

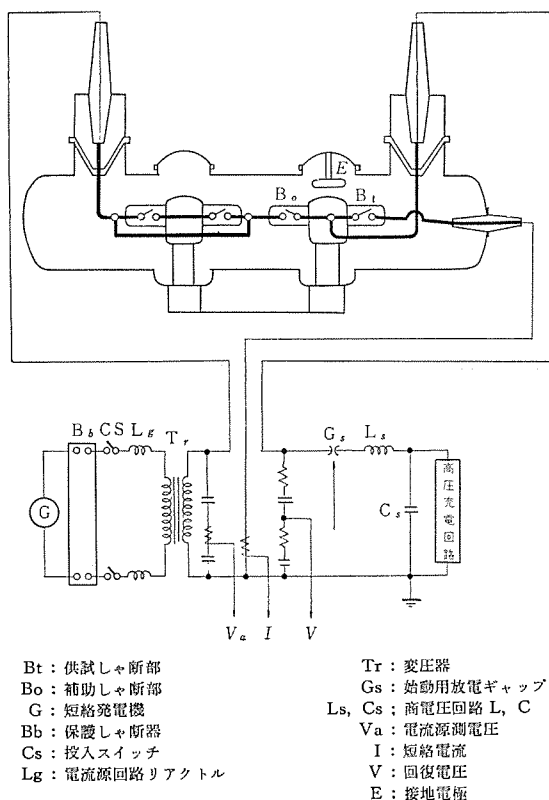


図 4.9 短絡しゃ断試験回路  
Circuit for interruption test.

試験はしゃ断器組立後と、連続閉閉試験・短絡しゃ断試験後にそれぞれ表 2.1 の定格表に示された耐電圧値に対して、高圧・低圧ガス系統とも鎖錠、警報圧力において実施し、十分耐えることを検証した。極間の耐電圧については当然のことながら、商用周波の重畳した場合の衝撃波試験も実施している。

SF<sub>6</sub> ガスが万一もれた場合であるが、高圧・低圧ガス系統とも同時に大気圧に下がることはまずないと考えられるので、低圧側は大気圧に下がる場合が最悪の状態であり、高圧側は高低圧両系統がバランスする圧力、すなわち 3 kg/cm<sup>2</sup>・g が最悪の状態とすればよい。この条件で対地間には常規対地電圧の 1.3 倍を印加し、極間にはいわゆる 2E の耐圧があることを確認している。

コロナ試験についても、SFLT 形と同じように 1.3E の電圧で試験を実施しているのはもちろんである。

#### 4.2.3 短絡しゃ断試験

前に述べたように、しゃ断部は SFH 形の設計をそのまま踏襲しているので、しゃ断試験の意味は、しゃ断性能の検証というよりはむしろ、しゃ断時に発生するイオン化されたガスによる対地間せん絡の有無の検証にある。一方、このように高電圧・大容量のしゃ断器になると、現有の試験設備では、もちろん定格しゃ断容量の実負荷試験は不可能である。そこで、実負荷試験では再閉路引きはなし自由責務のしゃ断試験を行なうことにとどめ、Weil 回路等による等価試験を中心に実施した。さいわいに操作動力源まで独立したユニットシステムを採用しているので、図 4.9 に示されるように 1 ユニットの片側のしゃ断点を供試用に、他のしゃ断点を補助極に使用し、電圧電流源はユニット中央部(排気弁側)から印加する試験が実施できる。ただ、等価試験といえども、電圧源回路から 550 kV 相当の電圧を印加することはできないので、大地電位の金属を極性効果とマージンを考えて排気弁排気側に近接させ、せん絡しないことを確認している。表 4.2 にしゃ断試験結果を、図 4.10 に等価試験のオシログラムを一例として示す。

#### 4.2.4 小電流しゃ断試験

進み電流しゃ断条件は、“500 kV しゃ断器標準仕様<sup>(6)</sup>”に基づく 700 kV を対象としたものが一番過酷なので、この値に対し、鎖錠ガス圧において位相制御を行ないつつ実施した。

無負荷変圧器励磁電流しゃ断試験は過電圧倍数が問題であるので、

表 4.2 短絡しゃ断試験 Short circuit interruption test.

試験の種類	動作責務	しゃ断点数	しゃ断電流		回復電圧 %	給与電圧 kV	固有再起電圧		投入電流 kA	アーク時間 サイクル	しゃ断時間 サイクル	備考
			対称分 kA	直流分 kA			周波数 kHz	振幅率				
単相実負荷	O	1	53.5	0	96	15.5	2.5	1.6	—	0.3	1.6	
	0.35 秒		50.2	40	93				150	0.4	1.7	
	CO		50.2	35	94				145	0.5	1.8	
単相等価	O	1	50	0	97	105	2.5	1.5	—	0.3	1.6	
	O								—	0.4	1.7	
	O								—	0.5	1.8	
単相等価 (脱調条件)	O	1	25	0	97	173	2.4	1.4	—	0.3	1.6	550 kV 2E, 0.5 I に 相当
	O								—	0.4	1.7	
	O								—	0.5	1.8	
単相実負荷 (SLF 条件)	O	1	43	0	96	22	H: 62 L: 2.5	H: 1.7 L: 1.5	—	0.3	1.6	86% 相当
	O								—	0.5	1.8	
	O								—	0.6	1.9	

注) 60 Hz, ロックガス圧力にて実施

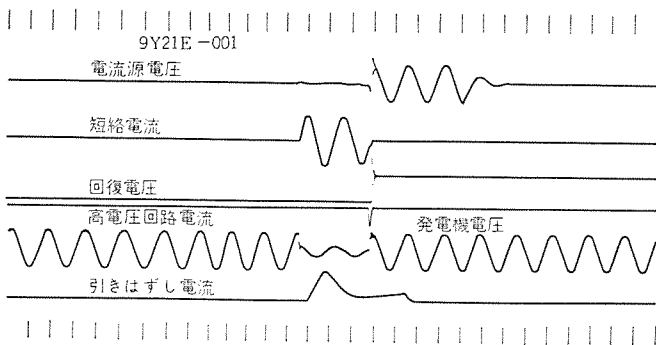


図 4.10 短絡しゃ断試験 オシログラムの一例  
Typical oscillogram of short circuit interrupting test.

表 4.3 進み電流しゃ断試験  
Leading current interruption test.

しゃ断点	試験電圧 kV	しゃ断電流 A	再点 回数	再発 回数	試験回数 回	しゃ断時の 電圧倍数	備 考
1	130	17	0	0	12	1 以下	しゃ断位相は各電流とも $\pi/6$ 間隔で位相制御した
		100	0	0	12	1 以下	

(注) 60 Hz, ロックガス圧にて実施

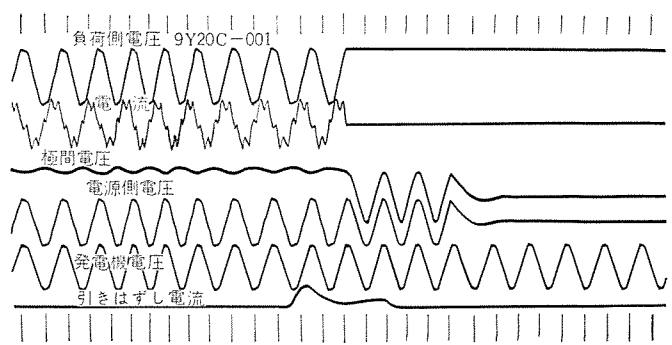


図 4.11 進み電流しゃ断試験のオシログラムの一例  
Typical oscillogram of leading current interrupting test.

表 4.4 無負荷変圧器励磁電流しゃ断試験  
No-load transformer exciting current interruption tests.

しゃ断点	動作責務	試験電圧 kV	しゃ断電流 A	試験回数 回	しゃ断時の 最高過渡電圧 倍数	備 考
1/4	CO	100	10~50	6	1.9	しゃ断位相は各電流とも $\pi/6$ 間隔で位相制御した

(注) 60 Hz, 最高ガス圧で実施

試験電圧は設備の都合で決めた値で実施している。

表 4.3, 4.4 に小電流しゃ断試験の結果を, 図 4.11 に進み電流しゃ断試験のオシログラムを示す。

#### 4.2.5 その他の試験

以上に述べた試験のほかに,  $10^4$  回連続開閉試験・短時間電流試験あるいはせん絡試験を行なっているが, 二重圧力式ガスしゃ断器の特殊性として, 高圧ガスの冬季寒冷時の液化防止対策がとられているので, 寒冷時ガス加温試験を実施している。この点に関しては, SFH 形よりも本質的に有利なことは想像されるが, 実験結果もそれを裏づけた値が得られている。

また, 絶縁物の重要性を考え, 550 kV しゃ断器用絶縁スペーサ・支持筒・操作棒・などによる長期過電圧課電試験を 44 年 6 月から連続して実施中であるし, しゃ断器本体の長期過電圧通電試験も 45 年春からスタートし, いずれも良好な経過を示している。

## 5. む す び

以上, ガス絶縁開閉装置用 SFLT 形および SFHT 形ガスしゃ断器

の概要を述べた。

これらのしゃ断器は従来形のすぐれた実績をもとに, いち早く 550 kV に至る全定格のものが開発され, 信頼性の高い製品がいつでも供給できる態勢が整っている。

終わりに, このガスしゃ断器の開発途上で, 各電力会社はじめ関係先各位よりご指導ご協力賜ったことに心から謝意を表するしだいである。

## 参 考 文 献

- (1) 富永, 森岡: 三菱電機技報, 39, 1 (昭 40)
- (2) 富永, 森岡, 大野, 山内: 三菱電機技報, 44, 644 (昭 45)
- (3) 潮, 田辺: 三菱電機技報, 41, 1,445 (昭 42)
- (4) 稲村, 宮本: 電学連大, 761 (昭 45)
- (5) 森岡, 松田, 門原: 電学連大, 792 (昭 45)
- (6) 送電機能研究委員会: 500 kV しゃ断器の標準仕様(昭 45-3)

## 77/66 kV, 110 kV ガス絶縁開閉装置

森岡 昭二\*・吉田 頼弘\*・林 幸 平\*

## 77/66 kV, 110 kV Gas Insulated Switchgear

Itami Works

Shoji MORIOKA・Yorihiro YOSHIDA・Kohei HAYASHI

In view of excellent insulation resistance of  $\text{SF}_6$  gas much application has been worked out in the field of arc interruption, insulation and cooling medium of the electric apparatus. Of them, Gas Insulated Switchgear has reached the stage of practical operation. Mitsubishi has built a good number of the equipment for the installation in the Kansai Electric Power Company and the Chugoku Electric Power Company, all of them being reported operating with satisfaction. This paper is presented on the outlines of the apparatus including those under construction at the factory, also describing their constitution and the structure of principal elements.

## 1. ま え が き

当社は  $\text{SF}_6$  ガス を利用したしゃ断器の開発に着手するとともに、この ガス のすぐれた絶縁耐力に着目し、これを消弧、絶縁、冷却媒体として使用して、従来の変電所の形態を一変した ガス 絶縁変電所 (Gas Insulated Substation, GIS) の開発をはじめたことは別論文にせしめたとおりである。昭和38年当社がこの研究に着手するとほぼ時を同じくして、この種の変電所が世界的に広く研究され、その出現が強く待望されていることが明らかになった。今日、縮小形変電所の研究はわが国のほか、フランス、西独、スイス、米国、英国、オランダの各製作者によっておこなわれ、ソ連、東独、オーストリア、イタリア、ポーランド、オーストラリア、シンガポール などにおいてもその情勢に注目し、強い関心がもたれるまでに拡大されるにいたった。

当社は、わが国で最初に ガス しゃ断器の製品化に成功し、さらにガス 絶縁開閉装置の電力系統における 運転試験を最初におこなった製作者として、このような世界的傾向に力を得て、わが国の情況にもっとも適した ガス 絶縁変電所の実現に努力を重ねている。

しかし、このような大きな変革にもとづく理想的な変電所の形態を達成するには、なお多くの段階をへなければならぬ。昭和43年からヨーロッパにおいて 110 kV~220 kV の数個所の縮小変電所が運転に入ったが、この縮小開閉設備はいずれも、当社が現在建設を完了し、ないしは建設をすすめているものどのように ガス 絶縁開閉装置 (Gas Insulated Switchgear : GIS) である。

現状における ガス 絶縁開閉装置は、従来の開閉装置とあまりかわらない設計概念にもとづくものであるために、従来のものにくらべて高価となり、したがって土地の入手困難な過密地域や重汚損のため保守費のきわめて高い地点に適するものであると考えられる。しかし、この装置の卓越した特長からその需要はわれわれの想像以上に拡大しており、当社もこれにこたえるべく 550 kV までの GIS の研究開発を進めるとともに、実系統に用いられるものの製作に努力している。

これらの ガス 絶縁開閉装置の経験がつまれることによって、より縮小化され、より簡素化され、より省力化された総合装置としての理想的な ガス 絶縁変電所が生まれ、その運用面はもちろんのこと、経済性においても従来の変電所をしのぐにいたるであろうことは明らかであると信ずる。

以下に当社がこれまで製作した 77 kV~110 kV の ガス 絶縁開閉装置の概要について説明し、この装置に関心を持たれるご使用者各位

の参考としたい。

## 2. 装置の配置および構成

図 2. 1 は関西電力泉大津変電所納め 77 kV GIS、図 2. 2 は中国電力中広島変電所納め 110 kV GIS のそれぞれの外観を示すものである。

前者は昭和44年11月、後者は昭和45年5月に据付を完了し、いず

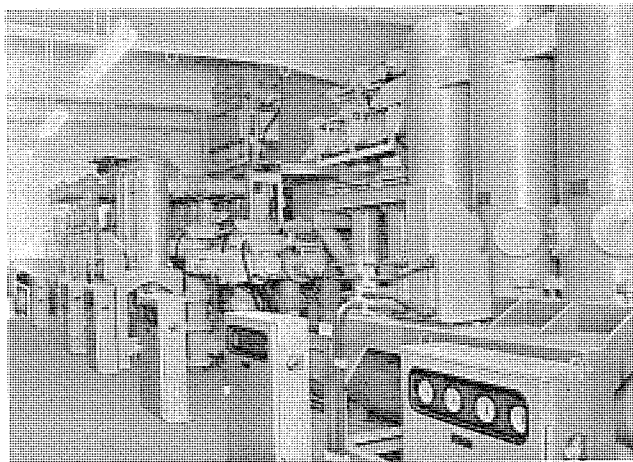


図 2. 1 関西電力泉大津変電所納め 77 kV ガス 絶縁開閉装置  
77 kV gas insulated switchgear for Izumiotsu Substation,  
Kansai Electric Power Company.

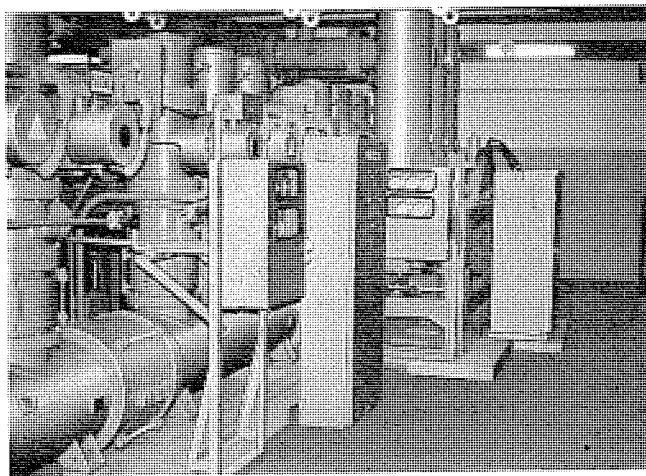


図 2. 2 中国電力中広島変電所納め 110 kV ガス 絶縁開閉装置  
110 kV gas insulated switchgear for Nakahiroshima Substation,  
Chugoku Electric Power Company.

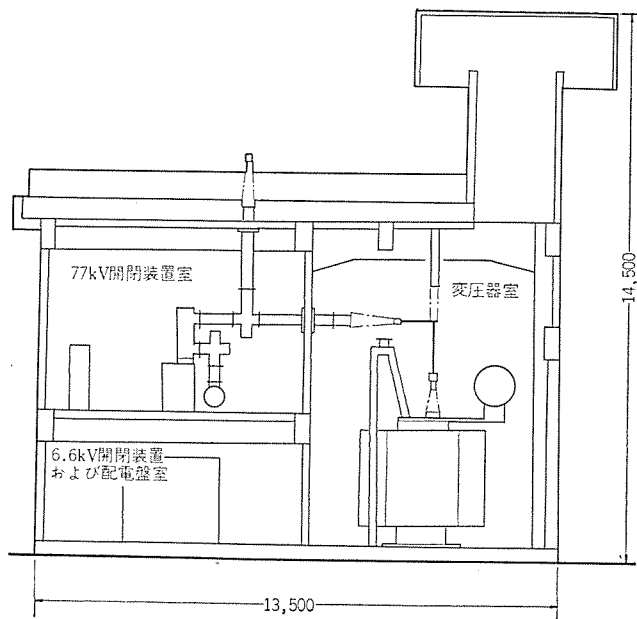


図 2.3 泉大津変電所の構成  
Side view of Izumiotsu Substation.

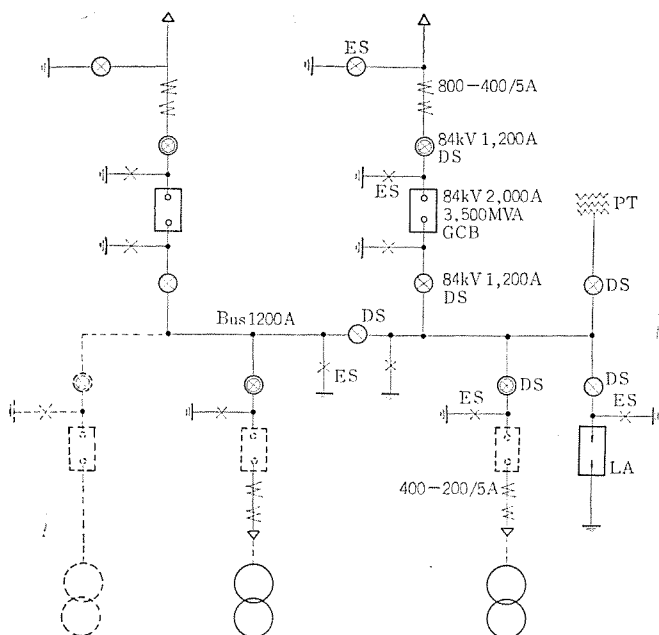


図 2.4 泉大津変電所 77 kV 結線  
77 kV single line diagram of Izumiotsu Substation

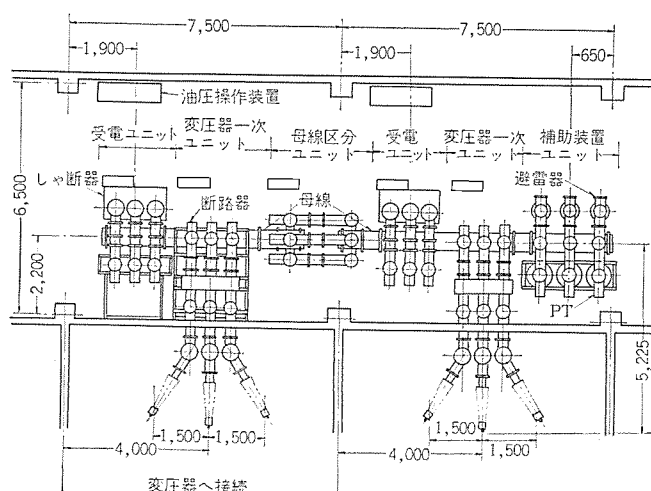


図 2.5 77 kV 開閉装置平面配置図 (泉大津変電所)  
Plan of 77 kV switchgear.

れも現在順調に営業運転が続けられている。以下に現在製作中のものも含めて、各開閉装置の概要について述べる。

## 2.1 関西電力泉大津変電所納め 77 kV GIS

泉大津変電所は 77 kV 受電、6.6 kV 引出の屋内形無人配電用変電所である。図 2.3 に示すように、77 kV 開閉装置は二階に設置され、一階には 6.6 kV 開閉装置および配電盤がおかれている。これらの隣室は変圧器室となり、10 MVA 変圧器 2 台 (将来は 3 台) が設置されている。この変電所の 77 kV 回路を図 2.4 に、77 kV 開閉装置の平面配置図を図 2.5 に示す。図から明らかなように、全体は母線を基準として各種の標準的ユニットにわけられており、きわめてコンパクトな配置となっている。おもなユニットの構成はつぎのとおりである。(図はいずれもユニット側面から見たものである。)

### (1) 受電ユニット 図 2.6

これは各種ユニットの基本的なものとなっている。すなわち、母線として三相を 1 本のシースに収納して下部に配置する。シャ断器は立置きとして下部電極側は断路器をかいして母線に、上部電極側は同じく断路器をかいして上方に導びかれ、二階天井を貫通して屋上でブッシングによって架空線に接続されている。

導電部を内蔵するシースは母線をのぞき、すべてアルミパイプからなり、シース相互間はフランジにより堅固に接続されているが、所要にはステンレスボーズを設けて据付誤差および熱膨張に対処している。内部導体および電極は、要素間のガスの気密をかねた絶縁スペーサまたはブッシングにより支持されており、シース内壁との短い絶縁距離にもかかわらず、良好な絶縁特性を有するよう、その形状には慎重な配慮をはらっている。

シャ断器の両端および送電線側には接地開閉器が設けられており、機器点検の際の安全性の確保をおこなっている。変流器は従来と同じ構造の分割鉄心形として、シースの外側にとりつけたが、シース電流による影響を防ぐため、この部分のシースは絶縁接続方式とした。

### (2) 変圧器一次ユニット 図 2.7

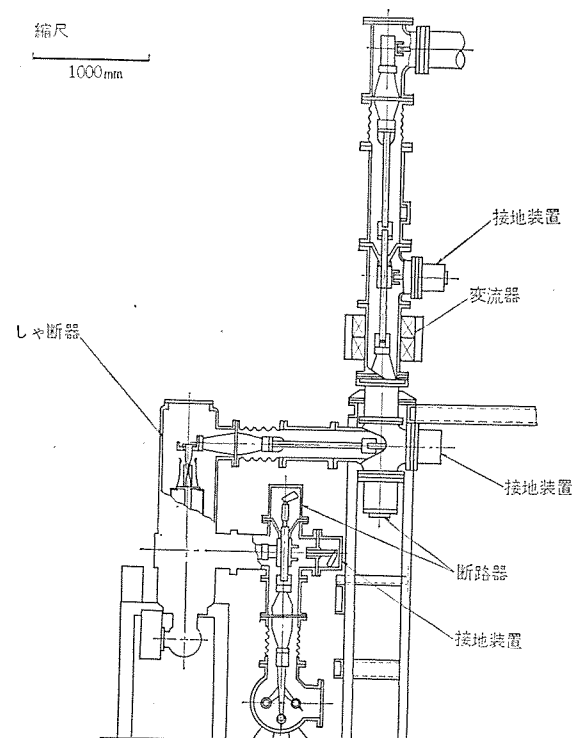


図 2.6 受電ユニット構造 Feeder unit.

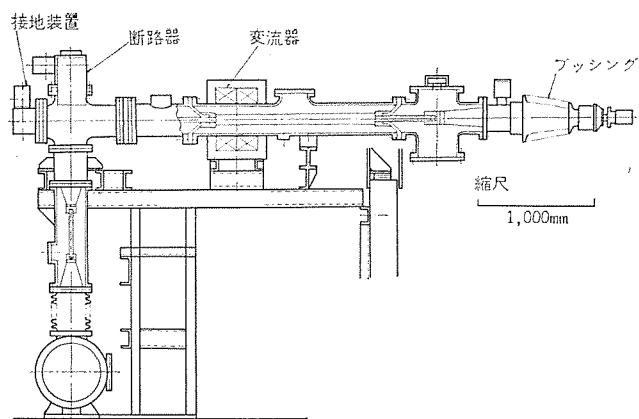


図 2.7 変圧器一次ユニット  
Transformer primary unit.

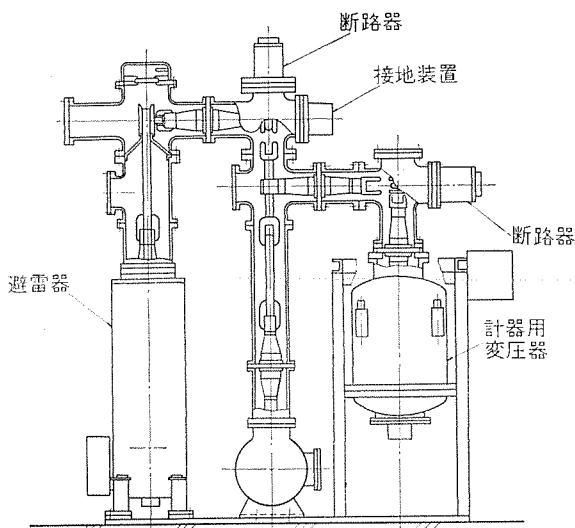


図 2.8 補助装置ユニット PT & LA unit.

SF<sub>6</sub> ガスのすぐれた消弧性能により、変圧器無負荷励磁電流は断路器によって十分しゃ断可能である。したがってこのユニットではしゃ断器を省略することができ、図のように簡素な構成となっている。変圧器との接続は壁を水平に貫通して変圧器室においてブッシングをへて気中接続とした。

### (3) 母線区分ユニット

詳細は図示していないが、この部分で、左右母線のガス区分をおこなない、断路器および両母線の接地開閉器を設けたものである。この区分用断路器は常時投入状態で運転されているが、母線を延長して受電ユニット、または変圧器ユニットを増設する際に片母線回路を運転したままでも工事がおこなえるようにしたものである。

### (4) 補助装置ユニット 図 2.7

母線の両側に避雷器および計器用変圧器を配置した。これらはともに断路器をかいして母線と接続され、母線を運転した状態で点検できるようにした。

## 2.2 中国電力中広島変電所納め 110 kV GIS

中広島変電所は、南・北広島変電所を結ぶ送電線の中間に位する変電所の一つであり、これまで 110 kV ケーブル引込みにより 25 MV A 変圧器が運転されていたが、一次側開閉設備は設置されていなかったものである。しかし、負荷の増加などの点から変圧器の増設および 110 kV 開閉装置を設置する必要が生じ、第 1 段階として図 2.9 に示す回路を設置した。この変電所はビルディングの一部を利用

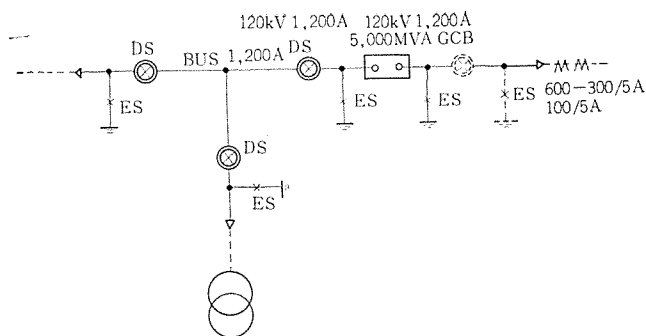


図 2.9 中広島変電所 110 kV 結線図  
110 kV single line diagram of Nakahiroshima Substation.

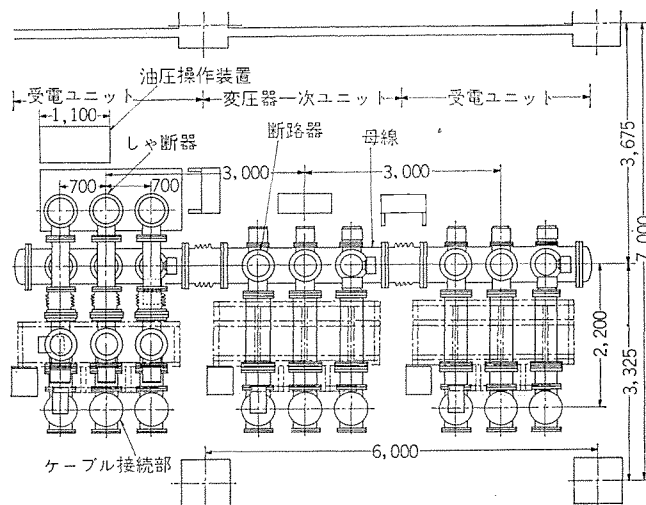


図 2.10 110 kV 開閉装置平面配置図 (中広島変電所)  
Plan of 110 kV switchgear.

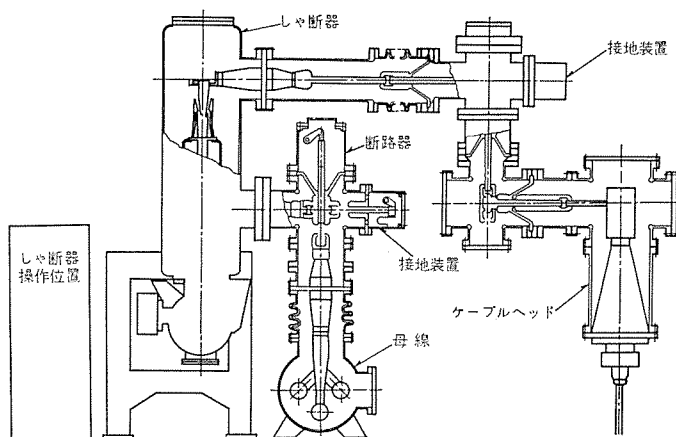


図 2.11 受電ユニット Feeder unit.

しており、110 kV 開閉装置は五階にあるそれまでの 22 kV 開閉装置室に設置するほかなく、床面積、高さ、搬入口等あらゆる面での制約のもとに設計されたものである。

図 2.10 は 110 kV 開閉装置の平面配置図を示すものである。77 kV 開閉装置と同じく、受電ユニットおよび変圧器一次ユニットから構成されているが、いずれも OF ケーブルに接続されている。図 2.11 は受電ユニットのうち、しゃ断器を含むものの側面図である。基本的な配置は 77 kV のものと同一であるが、とくに高さ寸法を減ずるように考慮をはらっている。この結果、従来方式にくらべて床面約 28 %、容積約 23 % に縮小されたが、これまでの 22 kV 開閉装置室に 110 kV 開閉装置を設置することは、ガス絶縁開閉装置ではじめてなし得たことであろう。

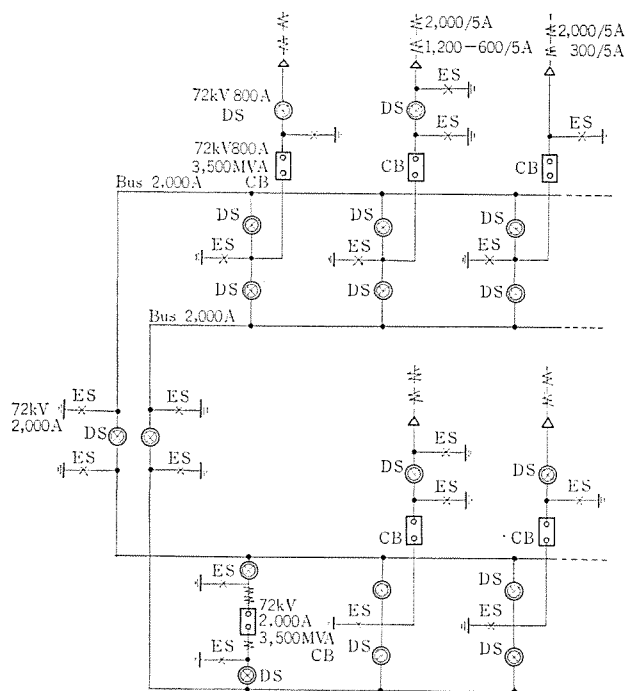


図 2.12 札幌中央変電所 66 kV 結線図  
66 kV single line diagram of Sapporo-chuo Substation.

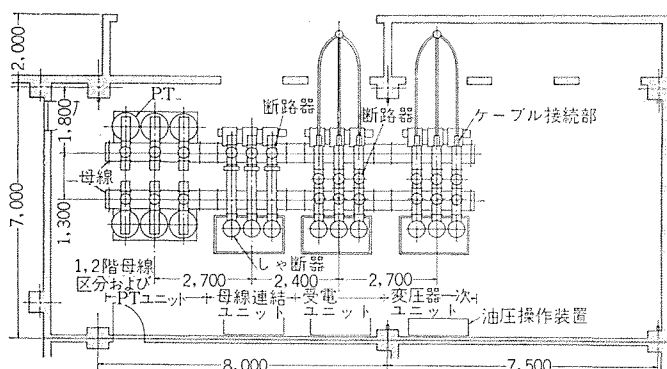


図 2.13 66 kV 開閉装置平面配置図 (札幌中央変電所)  
Plan of 66 kV switchgear.

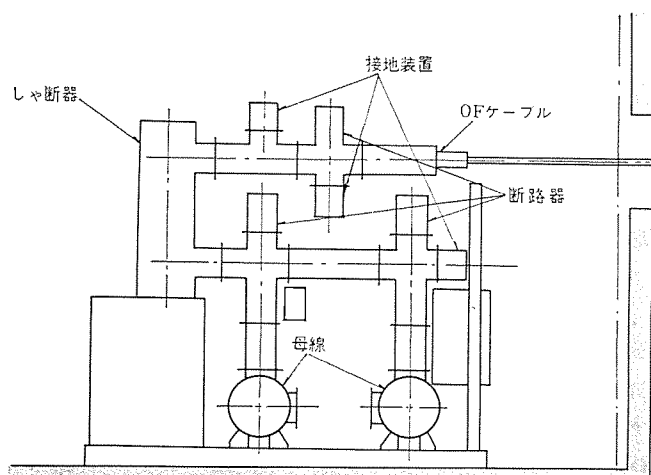


図 2.14 二重母線標準ユニット  
Typical unit of double bus system.

### 2.3 製作中の 66 kV GIS

図 2.12 および図 2.13 は、現在製作中の北海道電力札幌中央変電所向け 66 kV ガス絶縁開閉装置の単線結線図、および平面配置図である。この変電所は既設建物との関係があるために、66kV 開閉装置室としての床面積を十分に確保することが困難であったため、

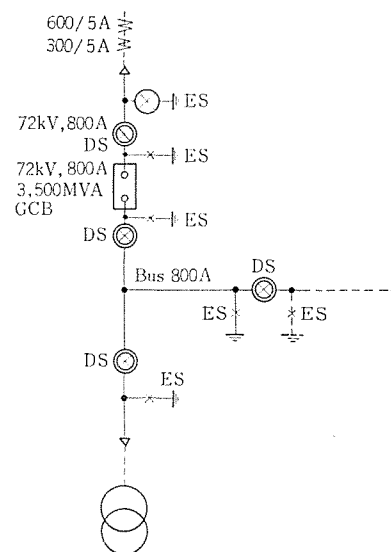


図 2.15 長根変電所 66 kV 結線  
66 kV single line diagram of Nagane Substation.

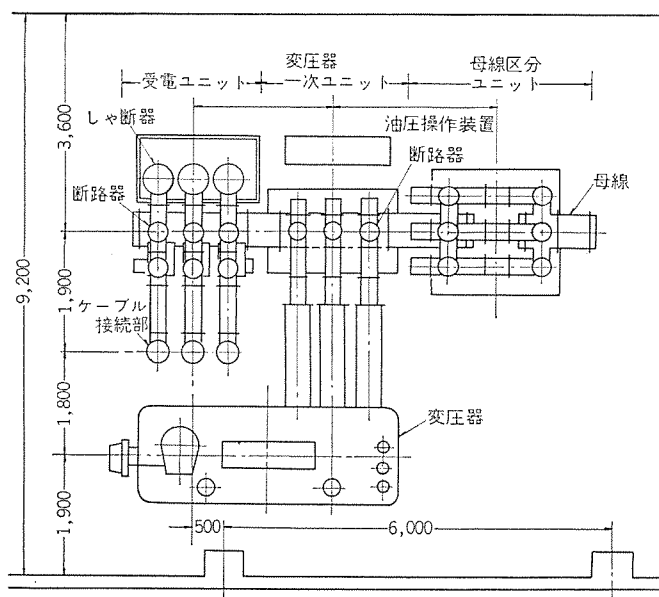


図 2.16 66 kV 開閉装置平面配置 (長根変電所)  
Plan of 66 kV switchgear.

開閉装置を一階および二階に分割して設置し、一階の天井を貫通して一、二階の母線を接続している。図 2.13 はこのうち一階に設置された部分を示すものである。送電線および変圧器との接続はいずれも OF ケーブルによっており、図 2.14 にその側面図を示すように各ユニットはほぼ同じ構成となっている。

図 2.15、図 2.16 は東北電力長根変電所向け 66 kV ガス絶縁開閉装置の単線結線図、および平面配置図である。図から明らかなように、送電線は OF ケーブルであるが、変圧器一次側は直結方式とし、GIS と変圧器をガス～油の気密プッシングをかいして接続したものである。

これまで述べた変電所はいずれも屋内式であるが、GIS の配置、構造は屋外式となってもほとんど変わらなく、現在計画中的のもでは屋外式のものも多い。

### 3. 構成要素の定格と構造

前節で述べたように、66 kV～110 kV 開閉装置の構成は基本的に

表 3.1 構成要素の標準定格  
Standard rating of components.

GIS 定格電圧	kV	77/66	110
しゃ断器			
形 式		パフファ形 SF <sub>6</sub> ガスしゃ断器	パフファ形 SF <sub>6</sub> ガスしゃ断器
定 格 電 圧	kV	84/72	120
定 格 電 流	A	800 (2,000)	800 (2,000)
定 格 し ゃ 断 容 量	MVA	3,500	5,000
定 格 し ゃ 断 時 間	サイクル	5	5
操 作 方 式		油 圧	油 圧
絶 縁 階 級	号	70	100
断 路 器			
形 式		直線ブレード式ガス断路器	直線ブレード式ガス断路器
定 格 電 圧	kV	84/72	120
定 格 電 流	A	800 (2,000)	800 (2,000)
定 格 短 時 間 電 流	kA	27/32	27
絶 縁 階 級	号	70	100
接 地 開 閉 器			
形 式		直線ブレード式ガス開閉器	直線ブレード式ガス開閉器
定 格 電 圧	kV	84/72	120
定 格 短 時 間 電 流	kA	27/32	27
	kA	65.5/76.5	65.5
母 線			
形 式		三相共通ガス絶縁	三相共通ガス絶縁
定 格 電 圧	kV	80.5	115
定 格 電 流	A	800, 1,200 (2,000)	800, 1,200 (2,000)
定 格 短 時 間 電 流	kA	24.1/28.1	24.1
絶 縁 階 級	号	70	100
避 雷 器			
形 式		SF <sub>6</sub> 消 弧 式	SF <sub>6</sub> 消 弧 式
定 格 電 圧	kV	98	140
公 称 放 電 電 流	kA	10	10
特 別 動 作 責 務 静 電 容 量	μF	50	50
計 器 用 変 圧 器 (母 線 用)			
形 式		エポキシモールド巻線形	油入コンデンサ形
変 圧 比	kV/V/V	77-66/√3/110/√3/110/3	110/√3/110/√3/110/3
定 格 負 担	VA	500/200	200/200
階 級	級	1.0/3 G	1.0/3 G
絶 縁 階 級	号	70	100

表 3.2 断路器の小電流しゃ断試験結果  
Leading & exciting current interruption test of  
disconnecting switch.

#### 充 電 電 流

断路器形式	定 格	試験電圧 (kV)	しゃ断 電 (A)	回 数	開 離 度 (%)	結 果
70-GR	84 kV 2,000 A	84	0.6	10	50~60	良
100-GR	120 kV 2,000 A	90	0.8	12	45~55	良

#### 勵 磁 電 流

断路器形式	定 格	試験電圧 (kV)	しゃ断 電 (A)	回 数	開 離 度 (%)	結 果
70-GR	84 kV 2,000 A	73	0.6	10	40~45	良
		73	8	10	45~55	良
100-GR	120 kV 2,000 A	104	4.8	12	38~45	良

同一であり、各要素の構造、寸法も相似的関係にあるので、以下ではこれらを総括してのべる。(66 kV および 77 kV 開閉装置はまったく同一設計としている)

#### 3.1 標準定格

各構成要素の標準定格を表 3.1 に示す。

#### 3.2 しゃ断器

しゃ断器に単一圧力式のいわゆるパフファ形ガスしゃ断器を接地タンク形としたもので、その性能は当社 SFL 形しゃ断器の実績によって十分確認されているものである。各相のシースは共通の下部タンクによって固定され、この内部で機械的に連結されて1本の気密軸によって操作機構と連結されている。操作機構としては、とくに容積を縮小し、相対的配置の自由度を得るために、当社 SFH 形ガ

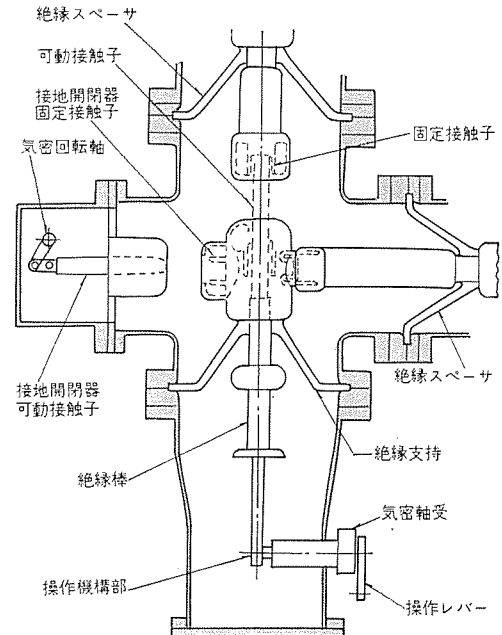


図 3.1 断路器断面  
Crosssection of disconnecting switch.

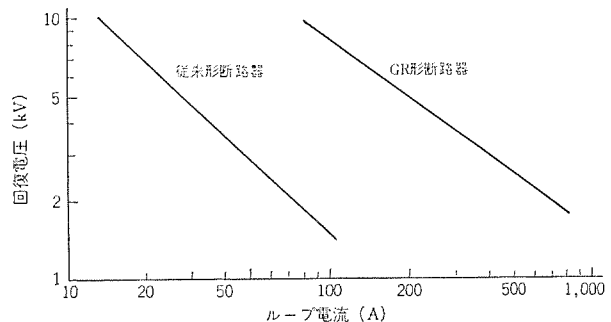


図 3.2 断路器のループ電流開閉能力  
Interrupting ability of disconnecting switch for loop current.

スしゃ断器に使用され、多くの現地経験をもつ油圧操作機構を用いた。詳細は本誌別論文に報告されているのでここでは省略する。

#### 3.3 断路器

ガス絶縁開閉装置用断路器は従来のものと異なり、接触部を外部から見る事ができず、また無保守無点検を原則とするため、十分信頼度のある構造が要求される。図 3.1 はこの断路器の構造を示すもので、可動接触子はいわゆる直線ブレード式であり、軸方向に移動する。接触子はすべてシールドによって電界を緩和し、高い絶縁耐力に適する小形の構造とした。操作はすべてしゃ断器と同じ構造の密封回転軸をかいしておこなわれる。この断路器は通常の断路器とどのように、三極単投で手動操作のほか、空気、電動ばねなどの遠隔操作が可能である。断路器の端子は気密隔壁となった絶縁スペーサまたはブッシングにより支持されている。

表 3.2 および図 3.2 は、この断路器の小電流しゃ断試験およびループ電流しゃ断試験の結果を示すもので、母線の充電電流、無負荷

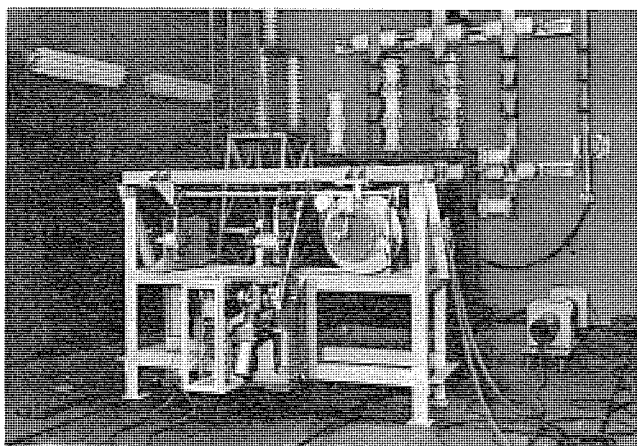


図 3.3 投入試験中の GIS 用接地開閉器  
Grounding switch under closing test.

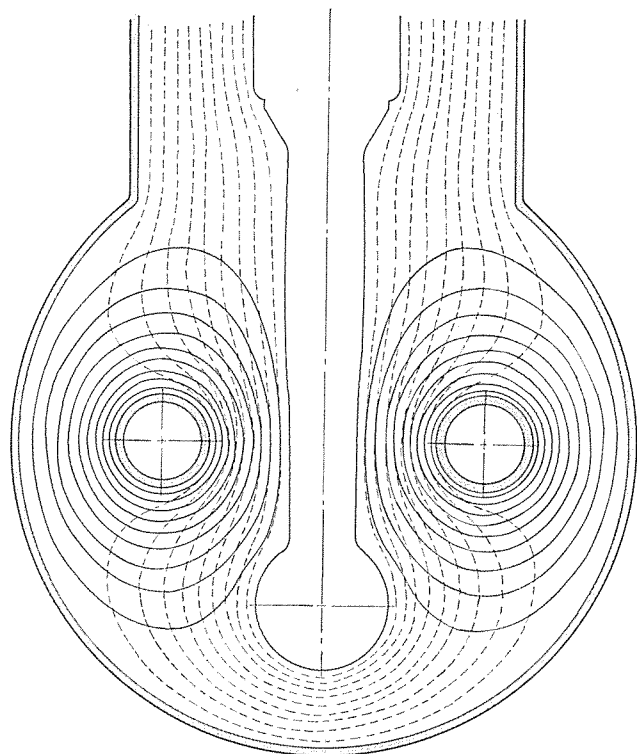


図 3.4 三相母線電界分布図  
Electrical field map of 3 phase buses.

変圧器の励磁電流開閉に十分能力のあることが確められ、また従来の断路器にくらべてループ電流開閉能力も大幅にすぐれていることが認められた。

### 3.4 接地開閉器

すべての接地開閉器は、関係する断路器またはしゃ断器とインターロックを組合わせた状態で操作をおこなえるようにした。構造は図 3.1 に示すように、通常、断路器と組合わせて使用される。操作は手動を標準とするが、投入容量を必要とする場合は同一の構造で高速投入装置による操作とすることで、回路の故障電流を完全に投入できることを確認した。図 3.3 はこの装置の投入試験状況を示すものである。

### 3.5 母線

母線は三相一括して一つのシースに収納した。この方式は相分離式にくらべてより大きな縮小率が得られ、また三相の磁束がバランスすることによってシース材料として鋼材を使用することができる長

所がある。導体はアルミパイプを使用し、接続部は熱膨張に対処できる構造とした。各相の導体はそれぞれ単独に絶縁物により支持されており、相間には絶縁物をいっさい使用していない。さらに、対地にくらべて相間の電位傾度を十分低くし、相間短絡事故の発生する心配をなくした。図 3.4 はこの母線の軸方向から見た電界のようすを示すものである。

### 3.6 計器用変圧器

66 kV, 77 kV 計器用変圧器は、エポキシモールド絶縁のものを SF<sub>6</sub> ガス中に封入したものである。これはかなりの大形モールドとなったため、特殊のエポキシ樹脂配合を採用し、ヒートサイクルなど過酷な試験をくりかえしてその信頼性を十分確認したものである。110 kV は母線に計器用変圧器を使用しなかったため、GIS 中に含まれていない。詳細については別論文で報告している。

### 3.7 変流器

変流器は、もっとも構造の簡単なダイレクションモールド分割鉄心形を使用した。GIS が OF ケーブルに接続される場合にはケーブル取付構造とし、ブッシング接続の場合や母線連絡ユニットなどの場合にはシース外周に取付け、シースの接続部を絶縁構造とした。この配置のため、変流器自体は何ら特殊のものとはなっていない。

### 3.8 避雷器

避雷器はとくに SF<sub>6</sub> ガスを消弧媒体に使用したギャップを用いて特性容素とともに金属容器内におさめたもので、すぐれた放電特性、および続流しゃ断特性を得ることができた。これについては別稿で詳述されている。

### 3.9 外部との接続

コンパクトで安全性の高いガス絶縁開閉装置の特長を十分に発揮するためには、送電線との接続は地中ケーブルによることが最も望ましい。しかし、前節の例でも述べたように、変電所の立地条件、送電ルート、建築物などの制約があり、ブッシングを設けて架空線接続としたケースもある。OF ケーブルとの接続は、従来のがい管にかわってエポキシモールドカプセルをケーブル端末処理後にかぶせ、油～ガスの気密をほどこしたものをシースに収納した。OF ケーブルのほか、プラスチックケーブルと接続することも可能であり、この場合は現地作業はより簡単となり、加圧装置などの付属品も不要となる。

変圧器との接続についても前述のように機器の互換性、相互の配置関係から種々の方式を採用したが、今後も変電所全体の配置、形式によって最も適切な方法を選ぶべきであろう。

### 3.10 ガス系統

#### (1) ガス区分

ガス絶縁開閉装置の定格ガス圧力は、120 kV シャ断器および避雷器をのぞいて 4.0 kg/cm<sup>2</sup>. g (20°C) である。120 kV シャ断器の定格圧力は 5.0 kg/cm<sup>2</sup>. g (20°C) とし、避雷器は 0.9 kg/cm<sup>2</sup>. g (20°C) とした。各構成要素のガスは、運転保守上の便宜性および万一内部事故が発生した場合の波及防止を考慮して、それぞれ絶縁スペーサなどによって区分して密封し、吸着剤を入れてガス中水分量を低い値におさえているが、今後の運転実績が確立されればガスの区分は少なくなるものと考えられる。

#### (2) 保護

各区分にはそれぞれ圧力スイッチを設け、圧力が低下して 3.0 kg/cm<sup>2</sup>. g (20°C) になった場合、警報を発するものとした。この圧力スイッチは、ガスの等密度曲線にそった動作特性をもつように温度補償されたものである。シャ断器の場合は定格圧力より 0.5 kg/cm<sup>2</sup> 低

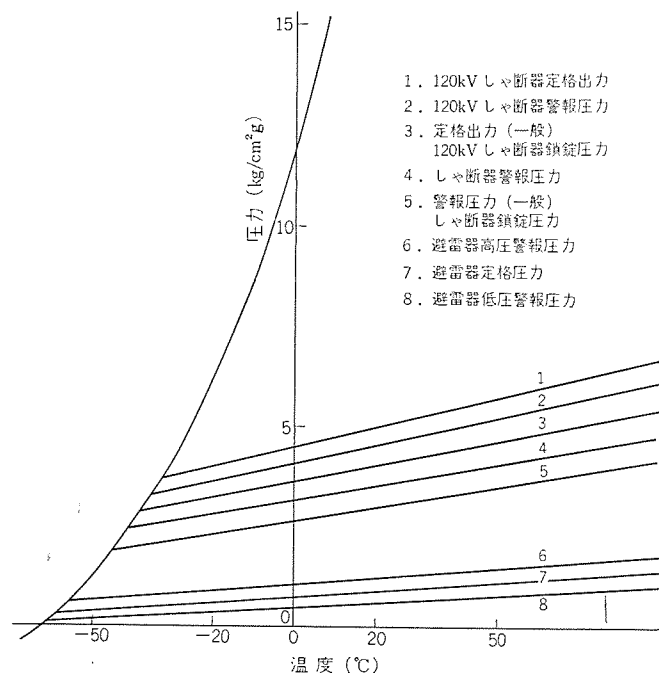


図 3.5 ガス圧力とスイッチの動作特性  
Characteristics of pressure switch.

下した点で警報を発し、さらに  $0.5 \text{ kg/cm}^2$  低下した際にはしゃ断器の操作回路を電氣的に鎖錠するものとした。避雷器はその放電特性の制約から、定格圧力の  $\pm 0.3 \text{ kg/cm}^2$  の上下限で警報を発するものとした。

図 3.5 は圧力スイッチの動作特性を示すものである。

さらに、ガス圧力が低下して大気圧と等しくなった場合でも、線間電圧に耐えるようにしている。また、内部事故によりガス圧力が異常に上昇した場合には放圧装置によりガスを放出して、シースの変形、破壊を防ぐ構造とした。

#### 4. 試験

各構成要素単体については、それぞれの規格に準じて形式試験を厳密におこない、さらにこれらを組合わせた状態で長期課電、温度上昇、短時間電流、加振試験などを実施して、基本的な性能を検証した。製品については部品段階ですべて厳密な管理検査（気密試験、寸法検査、シール面の仕上げなど）をおこない、固体絶縁物については製造過程での管理のほか、コロナ測定、耐電圧試験などによって全数異常のないことを確認したうえで使用した。

出荷前の試験としては、2、3のユニットを組合わせた状態で総合的に耐電圧試験、各種操作試験、気密試験、付属品試験などを実施した。図 4.1 は工場における組合わせ試験の状態を示すものである。

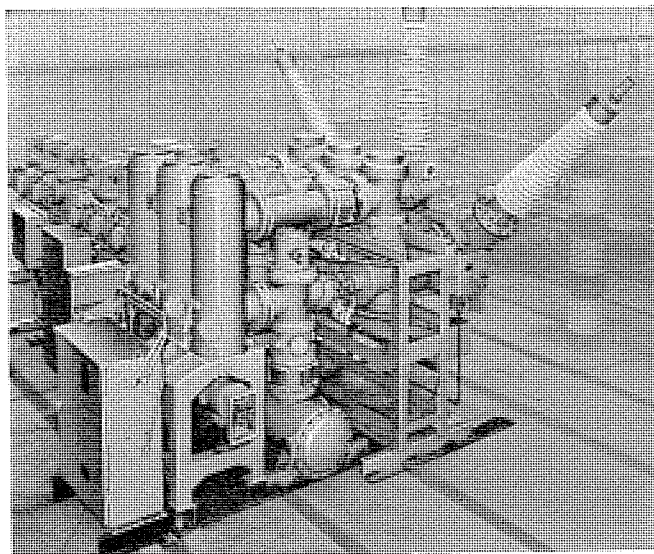


図 4.1 工場試験中の 110 kV 開閉装置  
110 kV switchgear under factory test.

#### 5. 据付

これまで据付けたものはいずれも屋内式であり、しかも機器搬入口の制限があったため、一度工場で組立試験したものを分解、運搬して現地で再組立をおこなった。このため、現地環境の清浄化にはとくに留意し、湿気、ほこり等の侵入を極力ふせいだ。

しかし、装置の信頼性を高め、据付工期の短縮をはかるためには、現地における作業を極力少なくすることが必要である。この観点から前述したように、この電圧階級の開閉装置は各ユニットを輸送運搬の単位とし、現地作業としてはおもに母線の接続、ケーブル接続および制御配線のみとすることを原則として設計したものであり、現在製作中のものはすべて、この方針で据付をおこなうように進められている。

据付後の試験としては、現地接続部を中心とした接触抵抗測定、気密試験、操作試験、インタロック試験、耐電圧試験などを実施した。

#### 6. むすび

以上、運転中および工場製作段階にある 66 kV～110 kV ガス絶縁開閉装置の概要について報告した。今や、ガス絶縁開閉装置は完全に実用段階として軌道にのっており、より高い電圧を含み多くの変電所が計画段階にあり、今後大容量変電所、配電用変電所、一般工業受電設備としてますます普及してゆくものと考えられる。これからの課題として、まえがきに述べたように理想的なガス絶縁変電所としての形態をめざして、配置構成および機器の標準化、合理化に努力するつもりである。おわりにあたり、この装置の開発設計に種々のご指導をいただいた各電力会社関係者のかたがたに深く謝意を表するしだいである。

## ガス絶縁変電所用変成器

長野 光佑\*・塩見 実\*

## Instrument Transformers for Gas Insulated Substations

Itami Works Kosuke NAGANO・Minoru SHIOMI

In order to display effectively the various features of Gas Insulated Substations (GIS), it is not sufficient to install the conventional type instrument transformers in the grounded gas filled vessels with no special contrivance. Consequently it is required to develop the equipment of entirely new design emerging from the old concept. This article describes 110~500 kV capacitive voltage transformers, 66~110 kV epoxy resin molded inductive voltage transformers and also epoxy molded current transformers newly developed for use with the GIS.

## 1. ま え が き

従来の変電所に比べ、非常に小さな縮小形変電所として、ガス絶縁変電所の開発されているが、それに内蔵する計器用変成器もそれに適した構造のものが多く、われわれは多くの研究、試験をかさねてここに 154 kV 以下の製品化を完了し、さらに高電圧のものの開発をすすめている。電圧変成部分は、SF<sub>6</sub>ガス絶縁を利用したコンデンサ形計器用変圧器とエポキシ樹脂モールド形計器用変圧器、電流変成部分は、樹脂モールドした分割形もしくは貫通形変流器で、いずれも画期的な製品である。縮小といった面からすれば、計器用変成器は内部絶縁が SF<sub>6</sub>ガスによる恩恵を受けることが比較的少ないので、大きな効果を発揮しにくい製品であるが、多くの新しい技術によりガス絶縁変電所の構造に適し、信頼度が高く、全体として変電所の縮小に役立つものとするに成功した。詳細については以下に述べるとおりである。

## 2. コンデンサ形計器用変圧器

現在、わが国の大気中で使用されている一般の計器用変圧器は、154 kV 以上の高電圧系統ではほとんどすべてにコンデンサ形計器用変圧器 (PD) が使用されている。

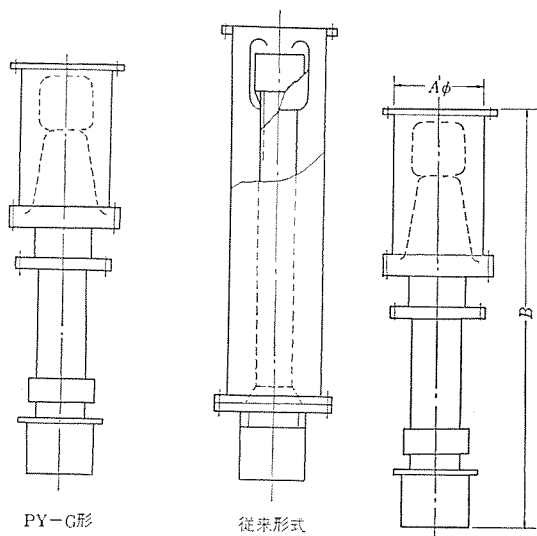


図 2.1 GIS 用 PD の比較  
Comparison of GIS capacitive voltage transformers.

形名	BIL kV	負担 VA	A mm	B mm
PY-G-14S	900	200	600	2,600
	900	500	600	3,600
	900	500	700	2,800
PY-G-17S	900	200	600	2,600
	900	500	600	3,600
	900	500	700	2,800
PY-G-20S	1,090	200	700	2,550
	1,090	500	700	3,300
PY-G-25S	1,260	200	750	2,650
		500	750	3,500
PY-G-50	1,800	200	950	3,450
		500	950	4,550

図 2.2 PY-G 形 PD 外形寸法  
Outline dimensions of type PY-G capacitive voltage transformer.

ガス絶縁変電所 (GIS) においても、154 kV 以上では PD を使用することが望ましいが、従来形の単位コンデンサを積重ねてがい(碍)管に収納した形式のものをそのまま採用したのでは、接地容器内へ収納した場合にスペースファクタが悪く大形化するうえ、構造的に取付方向が垂直に限定されるので、縮小形変電所設計の自由度を阻害することが多い。

当社で今回開発した GIS 専用の PY-G 形 PD は、すぐれた絶縁性能、その他の特性は従来形 PD とどのように保ちつつ GIS の縮小化・安全性等の特長を十分に発揮できる構成としたものであり、110 kV~500 kV 級までのシリーズについて適用できるものである。(図 2.1 参照)。

## 2.1 定 格

表 2.1 に 110 kV~500 kV シリーズの定格および主要性能を、図 2.2 にシリーズの外形寸法を示す。図 2.3 は試験用ガスタンク、ブッシングを取付けて単体試験中の PY-G-14 形 PD である。

## 2.2 構 造

GIS 専用 PY-G 形 PD の従来形と異なる最大の特長はコンデンサの構造にあり、図 2.4 にそれを示す。図 2.4 は PY-G 形 PD コンデンサの原形をなすもので、高電圧線路と同電位の巻心を中心として油入同軸コンデンサが形成され、外周電極が大地電位となるために接地

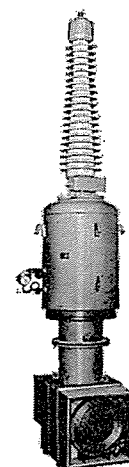


図 2.3 PY-G-14 形 PD (試験用ブッシング取付状態)  
154/√3 kV PY-G-14 capacitive voltage transformer with test bushings.

表 2.1 PY-G 形 PD 定格  
Rating of type PY-G capacitive voltage transformer.

形 名	定 格 電 圧			定 格 負 担			誤差階級	BIL kV
	一 次 kV	二 次 V	三 次 V	二 次 VA	三 次 VA	誤差階級		
PY-G-10(S)	110/√3	110/√3	110/3	200, 500	200	1.0/3 G		550 (660)
PY-G-14(S)	154/√3	110/√3	110/3	200, 500	200	1.0/3 G		750 (900)
PY-G-17(S)	154/√3	110/√3	110	200, 500	200	1.0/3 G		750 (900)
PY-G-20(S)	220/√3	110/√3	110	200, 500	200	1.0/3 G		900 (1,080)
PY-G-25(S)	275/√3	110/√3	110	200, 500	200	1.0/3 G		1,050 (1,260)
PY-G-50	525/√3	110/√3	110	200, 500	200	1.0/3 G		1,550 (1,800)

※ ( )内は 120% BIL の場合

容器への取付が容易となり、さらにコンデンサの内部電極が主絶縁の絶縁カバーの沿面電界分布を平等にするイコライザともなり、SF<sub>6</sub>ガスの高い絶縁性とあいまって PD の GIS への取付部を小形にできる等、GISPD として最適の構造となっている。

絶縁油と SF<sub>6</sub>ガスとのしきりはエポキシ注形の絶縁カバーで行ない、絶縁油はカバー頭部に設けた油量調整装置（ベローズ）を介して SF<sub>6</sub>ガス圧力と常時同一圧力になっているため、SF<sub>6</sub>ガスのコンデンサ側への漏えい（洩）を考える必要がなく、保守点検が容易である。

変圧器・リアクトル等よりなる変成装置部については従来品と特に変わるところはないが、保守および絶縁性の向上をはかって、油量調整装置を取付け、油入完全密閉形とした。

### 2.3 原理、特性

同軸巻コンデンサについては各種の文献に記載されているが、本コンデンサについてここで簡単に説明しておく。

同心円筒電極間の静電容量  $C$  は

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_s l}{\log \frac{d_1}{d_0}} \dots \dots \dots (2.1)$$

ただし、 $\epsilon_s$  = 比誘電率       $d_1$  = 外側電極の直径  
 $l$  = 電極の長さ       $d_0$  = 内側電極の直径

で表わされるが、コンデンサの絶縁材内部にそう入する電界調整用電極の数は使用電圧により異なり、数十層となる。また、本コンデンサにおいては構造上各電極の長さを一定とするが、各電極間の分担電圧を等しくするために、各静電容量を等しくしなければならない。

したがって、各電極の直径を  $d_0, d_1, \dots, d_{n-1}, d_n$  とすれば、各静電容量  $C$  は

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_s l}{\log \frac{d_1}{d_0}} = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_s l}{\log \frac{d_2}{d_1}} = \dots = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_s l}{\log \frac{d_n}{d_{n-1}}} \dots \dots \dots (2.2)$$

ゆえに、

$$\frac{d_1}{d_0} = \frac{d_2}{d_1} = \dots = \frac{d_n}{d_{n-1}} \dots \dots \dots (2.3)$$

ここで、 $d_1 - d_0 = t$  とおけば

$$d_n = \frac{(d_0 + t)^n}{d_0^{n-1}} \dots \dots \dots (2.4)$$

したがって、静電容量  $C$ 、巻径直径  $d_0$ 、絶縁厚さ  $t$ 、層数  $n$  が定まれば、式 (2.1)、(2.4) により電極長さ  $l$ 、コンデンサ直径  $d_n$  が計算される。

このようにして設計された同軸コンデンサは、根本的にはコンデンサ

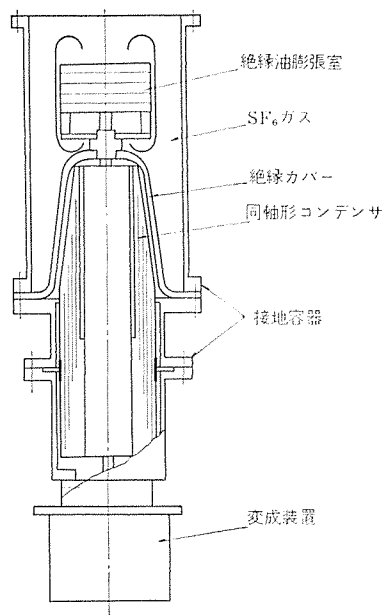


図 2.4 PY-G 形 PD の構造  
Cross section of type PY-G capacitive voltage transformer.

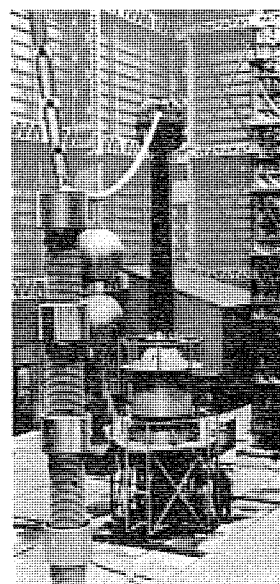


図 2.5 試験中の PY-G-50 形 500 kV PD  
PY-G-50 capacitive voltage transformer under test.

プッシングの絶縁設計を踏襲して片側のみ逆テーパーとしたものであり、その絶縁信頼度の高さは当社の OT 形油入コンデンサプッシングの実績が示しているとおりである。

また、PD 特性上からみたコンデンサとしての性能も、油入紙絶縁方式であるために従来形と同等であり、レジン処理紙等の材料で SF<sub>6</sub>ガス絶縁による乾式コンデンサを製作した場合に比べると、誘電率が大きく、かつ使用電位傾度が高く採れるために、コンデンサの体積が (誘電率) × (電位傾度)<sup>2</sup> に反比例して小形になり、静電容量の温度特性がレジン含浸形に比べて小さいため、PD 誤差の温度変化が小さくなる等の特長があり、本油入同軸コンデンサは PD 特性上にもすぐれたものであるといえる。

その他、PD としての誤差特性・温度上昇・鉄共振現象・過渡現象・二次側短絡保護特性等は従来どおりで何ら変わる点はなく、SF<sub>6</sub>ガスに関する零気圧耐圧・ガス漏れ・コロナ・開閉サージ等についても十分な性能が確認されている。図 2.5 はコンデンサ部分の試験を実施中の 500 kV GIS 用 PD である。

### 2.4 まとめ

以上述べたように、今回 GIS 専用開発した PY-G 形シリーズ PD は油入同軸コンデンサ形とした点が最大の特長であるが、そのメリットをまとめると次のようになる。

- (1) 絶縁の信頼度が高い
- (2) コンデンサの体積が小さい
- (3) GIS 本体への取付部が小形化できる
- (4) 接地容器内に密閉された構造となる

すなわち、従来形 PD の長所をそのまま生かしつつ GIS の長所を最大限に活用した PD といえる。

## 3. 計器用変圧器

当社は、ガス絶縁変電所用として、66 kV~110 kV ガス絶縁エポキシモールド形計器用変圧器 (PT) を開発した。外部絶縁を SF<sub>6</sub>ガスで行ない、内部絶縁をエポキシ樹脂でモールドしたことを特長としている。現在まで、わが国では、乾式絶縁として 33 kV 以上の実用器は

なく、それを越えた電圧の高いものの開発に多くの基礎研究を要した。以下、この計器用変圧器の概略構造、およびその性能について 77 kV 用を例にとり説明する。

### 3. 1 製品の仕様、および外観

77 kV SF<sub>6</sub> ガス 絶縁計器用変圧器

形 式	屋外用乾式 SF <sub>6</sub> ガス 絶縁 エポキシモールド
形 名	EV-7 X
階 級	1.0 級 (二次側), 3 G 級 (三次側)
定格一次電圧	77,000/√3 V
定格二次電圧	110/√3 V
定格三次電圧	110/3 V
絶縁階級	70 号
定格負担	200 VA (二次側), 100 VA (三次側)
定格周波数	60 Hz
相 数	単 相

図 3. 1 は外観、図 3. 2 は内部の モールド 部分を示す。

### 3. 2 構 造

図 3. 3 に示すように、高圧コイル・低圧コイルはそれぞれ別個にモールドし、鉄心とともにあとで一体に組み合わせる。また、エポキシモールドした高圧コイルの表面は SF<sub>6</sub> ガスでおおっているため、気中より小さい絶縁距離でよく、内部はエポキシ、外部は SF<sub>6</sub> ガスといった SF<sub>6</sub> ガス 絶縁変電所用に適した構造となっている。計器用変圧器のタンクは圧力容器で、母線と計器用変圧器は乾式 プッシング または 絶縁 スペース ー で仕切られ、内圧約 4 kg/cm<sup>2</sup> (20°C) に ガス を封入している。計器用変圧器の付属品としては、内圧の異常を知らせる圧力スイッチ、内圧が異常に大きくなったときに動作する破裂板、ガス封入、排出に必要な吸気用バルブ、気密の低圧端子箱などを設けている。

### 3. 3 性 能

#### 3. 3. 1 機械的性能

内部がエポキシモールド品であるだけでなく、使用電圧からいってもわが国はじめての実用器で、従来の PT より格段に大きい注型品であることから、その内部応力の分布について十分に検討する必要があった。エポキシ 硬化時における内部応力の変化、硬化し終わったあとの残留応力の分布、ヒートサイクル 時の内部応力の状態、それらを詳細に調査することが必要で、われわれはコンピュータ・光弾性・ストレインゲージなどを用いて十分に調査し、実用器のヒートサイクルを行なうことにより、内部応力が十分小さいことを検証した。ヒートサイクル時の応力状態はストレインゲージ法で行なった。それらの詳細は別稿にゆずる。

#### 3. 3. 2 電気的性能

エポキシモールド PT に要求される電気的性能の第 1 は、いままでわが国でこのような電圧の高い実用器がないことから、その電圧に対する信頼性である。これの実証はむずかしく、一般にコロナ試験・ヒートサイクル・商用周波耐圧・衝撃波耐圧などいろいろあるが、いまだこれといった確実なものがない。したがって、もっとも確実な方法は長期間の課電試験であり、われわれはこれに主体をおいて電気的性能の検証をすすめた。計器用変圧器の寿命は、回路電圧によって発生する商用周波電圧のコロナ劣化、衝撃波電圧により発生するサージコロナ劣化、使用時に繰り返される温度変化による残留応力の疲労劣化などで、これらの劣化現象を調査するために以下の試験を昭和 42 年 11 月よりはじめ、現在も続行中である。すなわち、一般試

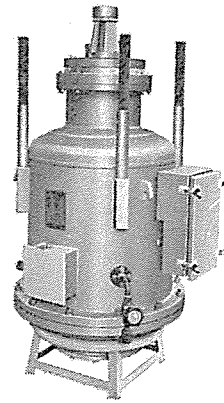


図 3. 1 77 kV ガス 絶縁 エポキシモールド計器用変圧器  
77 kV gas-insulated epoxy molded inductive voltage transformer.

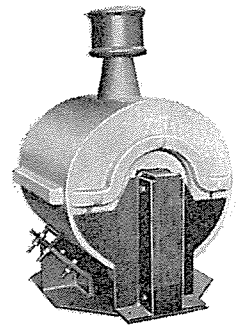
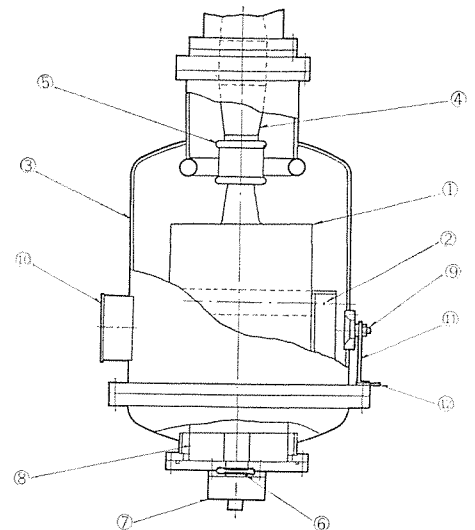


図 3. 2 77 kV ガス 絶縁 エポキシモールド PT の中身  
Inner part of 77 kV gas-insulated epoxy molded PT.



品 番	品 名	品 番	品 名
1	高 圧 コ イ ル	7	保 護 カ バ ー
2	鉄 心	8	乾 燥 剤
3	タ ン ク	9	接 地 側 端 子
4	プ ッ シ ン グ	10	低 圧 側 端 子
5	頭 部 シ ー ル ド	11	接 地 端 子 接 続 片
6	破 裂 板	12	接 地 端 子

図 3. 3 計器用変圧器構造図  
Construction of gas insulated inductive voltage transformer.

験 (JEC-143 に準拠) を行なったもの、ヒートサイクルを行なったもの、繰返しサージ試験を行なったものをそれぞれ長期課電試験に入れ、定期的にコロナ量を測定することにより劣化の度合を調査したが、現在のところコロナ量の変化は認められていない。印加している電圧は、常規対地電圧の 1.2 倍、常規対地電圧の 1.5 倍、線間電圧と 3 段階にあげて、現在では線間電圧で行なっている。以上のことから、期間はまだ短い、現段階でもこの種の乾式計器用変圧器は実用上の信頼性が高いことが示されている。さらに、長期課電試験を続けることにより以上のことをさらに確実に実証する予定である。

製品の管理は、従来の一般試験に加えて、商用周波のコロナ試験、衝撃波のサージコロナ試験を行ない、一般試験の商用周波耐電圧や衝撃波耐電圧によって、製品がいためられていないことを確認している<sup>(1)</sup>。

ここでは、サージコロナを観測するために用いた差動法の電流波形と、従来のサージ試験による電流波形とを図 3. 4 に示す。

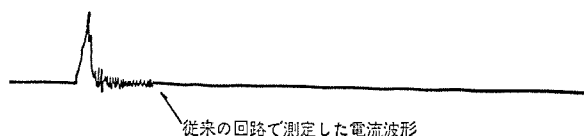
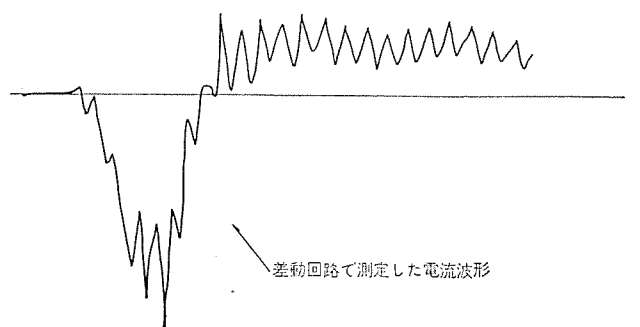


図 3.4 インパルス 100 % 印加したときの電流波形  
Current wave at 100 % impulse.

### 3.4 まとめ

以上述べたように、GIS 専用に開発したこの計器用変圧器は SF<sub>6</sub> ガスを有効に利用し、従来の乾式では 22 kV までといった常識を破った画期的な製品である。また、この種の計器用変圧器には、確立された信頼度の検証法がないので、必要以上きびしい試験と十分な基礎研究を必要としたが、これらの結果は今後のエポキシ樹脂モールド品の開発に役立つものと思う。

## 4. 変 流 器

ガス絶縁変電所用変流器は、一般には母線外被の内部にとりつける貫通形構造と、母線外被の外部にとりつける分割形構造と、ケーブルにとりつける分割形構造のいずれかが用いられており、それぞれ一長一短がある。すなわち、母線外被の外部に分割形変流器をとりつけると変電所の拡張などによるあとからの取り付け、取りはずしは容易であるが、外被に接地電流が流れないように絶縁する必要がある、その構造が若干複雑となる。母線外被の内部に取りつけるとその絶縁の必要はないが、あとからの取りはずし、取り付けが容易にできない欠点がある。ケーブルに取りつける場合は変流器自体も小さくなり、構造上有利な点も多いが、ガス絶縁変電所全体の保護の点からケーブル変流器のみでは不十分なことがあり、上記との併用が必要である。したがって当社ではその変電所の構造から必要とされ

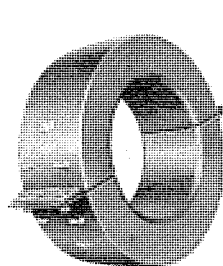


図 4.1 77 kV 用分割形変流器  
77 kV split-type current transformer.

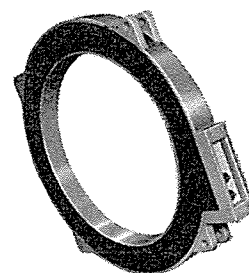


図 4.2 500 kV 用貫通形変流器  
500 kV through-type current transformer.

る変流器を製作しうる態勢をとっている。変流器自体は従来のプッシング変流器や分割形変流器と変わることはない。図 4.1 は 77 kV GIS 用の分割形変流器、図 4.2 は 500 kV 用貫通形変流器である。

## 5. む す び

ガス絶縁変電所用に開発した計器用変成器は、現在、関西電力新生駒変電所 (154 kV)、関西電力泉大津変電所 (77 kV)、中国電力中広島変電所のガス絶縁開閉装置 (GIS) で順調に運転をつづけており、いままです研究、開発してきた実績を遺憾なく発揮している。

このようにガス絶縁開閉装置の全体の寸法と協調した変成器が開発されたが、ばあいによってはこの寸法で不十分なこともある。たとえば線路側に小容量の計器用変圧器が必要とされるばあいがこれであり、開閉装置の保守・点検などを考慮すると、ケーブルを利用した計器用変圧器のほうが適しており、これを実用した例もある。

計器用変成器は、本体から保護継電器への媒介であり、ガス絶縁変電所の保護方式と開閉装置の構造の協調をとることによって、変成装置の位置や種類を定め、全体として合目的な縮小が達成される。また、保護継電器の進歩によっては、必要な負担をへらしさらに小形でガス絶縁変電所に適した変成装置が活用できるようになる可能性も存する。たとえば、母線そのものを利用したガスコンデンサ分圧器などがこの一つである。当社は保護方式の研究とともに、このような新しい変成装置についても研究をすすめてつづける。

終わりに、この開発・基礎研究にご協力いただいた社内各氏に対し謝意を表するしだいである。

## 参 考 文 献

- (1) 長野：三菱電機技報，42，No. 6 (昭 43)

SF<sub>6</sub> ガスの化学的特性

広岡 紘一\*・土橋 勝\*・平林 庄司\*\*・玉越 泰彦\*\*

## Chemical Properties of Sulfurhexafluoride Gas

Itami Works Kôichi HIROOKA・Masaru TSUCHIHASHI  
Central Research Laboratory Shôji HIRABAYASHI・Yasuhiko TAMAKOSHI

In reference to chemical properties of SF<sub>6</sub> gas under the influence of arc, corona and heat, information made available in our research institute is given herein. As for the effect of arcing, analysis has been made on the gas ingredient and investigation of atmosphere has been performed for the selection of insulating materials. In the case of corona, the deterioration worked on the various casting materials in the theme of the discussion. Under the subject of heat the process of chemical changes occurring in them and its effect on a variety of materials is stated.

## 1. ま え が き

SF<sub>6</sub> ガスは、そのすぐれた消弧性のゆえに電力用遮断器に应用され、また高い絶縁耐力を利用して種々の高電圧機器の絶縁媒体として広く利用されるようになってきた。

SF<sub>6</sub> ガスはすでによく知られているように、高い化学安定性を持っており、普通の状態ではまったく化学変化を生ずることはなく、また、毒性もない。しかし、ある種の高いエネルギー状態に置かれた場合、化学変化を生ずる可能性があり、いったん化学変化を生ずると、イオウやフッ素を含む活性な物質が生成し、各種使用材料と反応して、これを劣化させる心配がある。電気機器における SF<sub>6</sub> ガスの化学変化のエネルギー源としては、1) アーク、2) コロナ、3) 熱の 3 ケースが考えられる。SF<sub>6</sub> ガスを応用した多数の機器が開発製造されるようになった現在では、SF<sub>6</sub> ガスの諸性質について、できるだけ詳細なデータが要求され、上記 3 ケースの化学変化についても十分に調べておく必要がある。

われわれは、このような考えにもとづいて、SF<sub>6</sub> ガスの化学特性を述べる。アークに関しては、実機ならびにモデルを使用した、アーク後の放電分解ガスの知見、および絶縁材料の各種分解ガスふんい気における特性、それより、絶縁材料の選定には、実機を使用していることを述べ、コロナに関しては各種絶縁材料のコロナ劣化分解ガス成分より、アークとコロナの現象的な差を推定し、これまであまり知られていない熱に関しては、その化学変化過程と各種材料に与える影響について述べる。

## 2. アーク

2. 1 アークによる SF<sub>6</sub> ガスの分解

アーク放電による SF<sub>6</sub> ガスの分解過程については多数の研究者<sup>(1)~(3)</sup>によって検討され、生成するイオウフッ化物としては種々の物質が想定されてきたが、放電分解 SF<sub>6</sub> ガス中から実際に分離確認されている物質は、SF<sub>4</sub><sup>(2)</sup>、S<sub>2</sub>F<sub>2</sub><sup>(2)</sup>、SOF<sub>2</sub><sup>(2)</sup>、SOF<sub>4</sub><sup>(4)</sup>、SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub><sup>(4)</sup>であり、S<sub>2</sub>F<sub>10</sub>、SF<sub>2</sub>などは分離されていない。S<sub>2</sub>F<sub>2</sub>の物性については近年、F. Seel<sup>(5)</sup>らおよび R. L. Kuzkowski<sup>(6)</sup>によって詳しく研究され、その分子構造・質量スペクトルなどが明らかにされている。その質量スペクトルを表 2. 1 に示す。一方、SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>は S<sub>2</sub>F<sub>2</sub>とほとんど同じ質量数のイオンを生成するので質量分析計では大変紛らわしい物質であるが、SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>についてわれわれの測定した質量スペクトルを表 2. 2

表 2. 1 S<sub>2</sub>F<sub>2</sub> の質量スペクトル  
Mass spectrum of S<sub>2</sub>F<sub>2</sub>.

(イオン化電圧 70 V, イオン電流 10 μA)

M/e	イオン	FSSF	S=S <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	FSSF・S=S <sub>2</sub> F <sub>2</sub>
102	S <sub>2</sub> F <sub>2</sub> <sup>+</sup>	100(100)	100(100)	100
83	S <sub>2</sub> F <sup>+</sup>	39.5(61)	21(30.2)	15
70	SF <sub>2</sub> <sup>+</sup>	0(0)	4(7.4)	0
64	S <sub>2</sub> <sup>+</sup>	16.5(30)	16(23.2)	18
51	SF <sup>+</sup> , S <sub>2</sub> F <sub>2</sub> <sup>++</sup>	10.5(19)	4(6.6)	
41.5	S <sub>2</sub> F <sup>++</sup>		(0.6)	
35	SF <sub>2</sub> <sup>++</sup>		(0.1)	
32	S <sup>+</sup> , S <sub>2</sub> <sup>++</sup>	8	16(26.6)	11.5
19	F <sup>+</sup>		1(2.6)	

( ) 内は R. L. Kuczowski<sup>(6)</sup> の測定値表 2. 2 SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub> の質量スペクトル  
Mass spectrum of SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>.

(イオン化電圧 75 V, イオン化電流 150 μA)

M/e	イオン	SO <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	小電流アークにより生成した物質の M/e 102, 83 の比率
102	SO <sub>2</sub> F <sub>2</sub> <sup>+</sup>	80.4	80
85	SOF <sub>2</sub> <sup>+</sup>	1.9	
83	SO <sub>2</sub> F <sup>+</sup>	100	100
70	SF <sub>2</sub> <sup>+</sup>	1.4	
67	SOF <sup>+</sup>	23.2	
64	SO <sub>2</sub> <sup>+</sup>	1.9	
48	SO <sup>+</sup>	3.8	
32	S <sup>+</sup> , O <sub>2</sub> <sup>+</sup>	4.6	

注) 1 おもなピークのみを抜粋して掲載した。

に示し、また同表に小電流アークにより得られた分解ガスの質量スペクトルの質量数 102 と 83 のピーク高さの比率を示す。これによれば、小電流アークによって生成する質量数 102 の成分は、SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>であると考えられ、J. P. Manion<sup>(2)</sup>らの小電流アーク放電における S<sub>2</sub>F<sub>2</sub>の生成は、あるいは SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>ではなかったかとの疑問が持たれる。S<sub>2</sub>F<sub>2</sub>は活性な物質であり、ガラス管中に封じてある間に、SF<sub>4</sub>、SOF<sub>2</sub>、SiF<sub>4</sub>を生成したとの報告<sup>(5)</sup>がある。また、SF<sub>2</sub>なる物質については、ほとんど知られていない。この物質の分離・精製に関しては、二、三の報告があり、最近の報告では、O. Glemser ら<sup>(22)</sup>によるものがあるが、満足な分離や物性値測定は行なわれていない。現時点では、その存在はかなり疑わしく、たとえ存在するとしても非常に不安定であろうと予想される。SF<sub>6</sub>のアークによる化学変化過程については、これまで上述のすべてのイオウフッ化物が反応に関与するものとして、多くの人々により種々の反応式が予想されてきたが、実際には意味のない反応もあり、今後は主反応過程、すなわち工学的見地

表 2.3 各種しゃ断条件におけるガス分析例  
Results of gas analysis.

		(Vol. %)					
試料番号	試料条件	1	2	3	4	5	6
		しゃ断器 40kA 15回 50kA 9回 35kA 4回	しゃ断器 5kA 100回	しゃ断器 実動2年	しゃ断器 実動3.5年	モデル試験 A	モデル試験 B
成分							
SO <sub>2</sub>		0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.03
SOF <sub>2</sub>		0.13	0.05	0.02	0.01	0.33	0.65
SO <sub>2</sub> F <sub>2</sub>		0.00	0.00	0.00	0.00	0.08	0.02
CF <sub>4</sub>		0.10	0.13	0.04	0.04	0.05	0.28
SiF <sub>4</sub>		0.00	0.00	0.01	0.00	0.04	0.03
CO <sub>2</sub>		0.05	0.04	0.05	0.03	0.08	0.06
N <sub>2</sub>		0.18	0.17	0.31	0.14	0.08	0.39

表 2.4 実機中 SF<sub>6</sub> ガスの酸価測定例  
Acidity of SF<sub>6</sub> in circuit breaker in the field.

測定項目	SF <sub>6</sub> ガス通過量 (L)	変色の有無	酸 (ppm) 価
試料			
しゃ断器 注)1 実動2年	45.9	なし	<0.13
しゃ断器 注)2 実動3.5年	26.8	なし	<0.23

注)1 表 2.3・試料番号3の試料

注)2 表 2.3・試料番号4の試料

から、材料等に影響を与える範囲の反応過程をさらに詳細に調べる必要がある。

つぎに、実機およびモデル内で各種しゃ断条件において生成したガス成分の分析例を表 2.3 に示す。分析法は質量分析法である。試料番号1は実機を用いて、吸着剤なしで 40 kA 15 回、50 kA 9 回、35 kA 4 回、計 28 回のきわめて過酷なしゃ断試験を行なったものであるが、分解生成ガス量は少ない。試料番号2はガス絶縁開閉装置 (GIS) 用ガスしゃ断器を用いて、おなじく吸着剤なしで 5 kA 100 回のしゃ断を行なったものであるが、有害な分解ガスはほとんど生成していない。CF<sub>4</sub> は無害なガスであり、またスベーサなどの絶縁物との反応により生成したものではないことは明らかとなっている。このように 5 kA 程度のしゃ断では分解ガス量が少ないことは、後に示す図 2.1 から明らかである。試料番号3、4 は実系統でそれぞれ2年間および3.5年間(稼動したしゃ断器について測定したものを参考として示すが、分解ガスはまったく生成していないといえる。この試料番号3、4のガスについて IEC 案<sup>(7)</sup>の方法による酸価測定を行ない、結果を表 2.4 に示すが酸価はいずれも 0.23 ppm よりも小さく、まったく分解生成ガスが存在しないという状態であった。質量分析計では、イオン源の汚染や再配列イオンの出現により、分解ガスが実際の量よりもやや多く検出される傾向があり、ppm オーダーの分解ガス量を定量することはできないが、ガスしゃ断器内で実際に問題となる程度の分解ガス量は十分に定量することができ、かつ少量の試料ガスをステンレス容器に採取して持帰り分析できる点、迅速に分析できる点などの利点があり、ガス絶縁機器内の分解ガス量を管理する手段としては適当である。試料番号5は、モデルを用いて小電流くりかえし放電を行なったものであり、試料番号6は、また別のモデルを用いて大電流多数回しゃ断を行なったものである。分解ガス中の活性ガスに直接関連する物質と考えられる SOF<sub>2</sub> の生成量は、実機にくらべて多い。モデルや純粋な SF<sub>6</sub> 等を用いてさらに過酷なふんい気を作ることでもでき、すなわち、任意の過酷度のふんい気を作ることができるわけであるが、材料の選定など

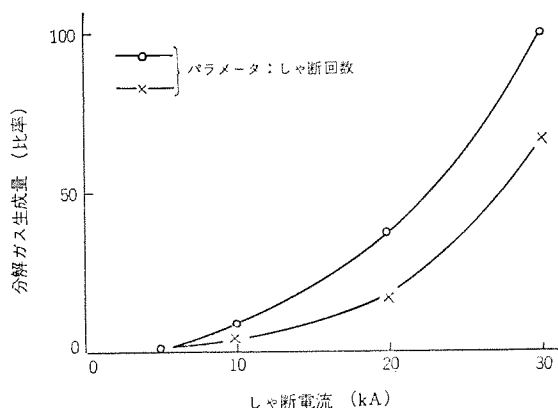


図 2.1 分解ガス生成量としゃ断電流との関係  
Relation between amounts of decomposition products and arc current.

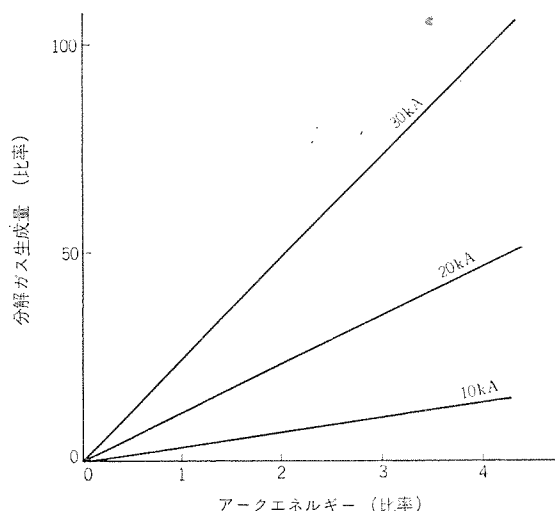


図 2.2 分解ガス生成量とアークエネルギーとの関係  
Relation between amounts of decomposition products and arc energy.

のふんい気試験にあたっては、各種条件における実機内の分解ガス量を考慮して、ふんい気を選ばなければならない。

つぎに、GIS 用ガスしゃ断器におけるしゃ断条件と分解ガス生成量との関係を示す。図 2.1 は分解ガス生成量としゃ断電流との関係であり、しゃ断電流の効果が大きいことがわかる。図 2.2 は分解ガス生成量とアークエネルギーとの関係であるが、測定値は良好な直線関係を示し、そのこう配はしゃ断電流値により明らかに異なってくるという興味ある結果が得られた。

## 2.2 絶縁材料におよぼす影響

ガスしゃ断器用絶縁物または GIS 用絶縁物が、放電分解ガス中でのどのような影響を受けるかを調べるため、またそのようなふんい気に耐える材料を選定するために、表 2.3 の試料番号1、5、6に相当するふんい気および SF<sub>4</sub> 3%、30% の計5種類のふんい気を用いた。ここでは方向性 FRP および各種注形材料をこのようなふんい気に置いた場合の特性変化を掲げる。表 2.5 は方向性 FRP を表 2.3 の試料番号1および5のふんい気に置いた場合であるが、曲げ強度、AC 破壊電圧 (沿層)、絶縁抵抗の変化は認められない。この測定は試験片を供試器内から大気中にとり出して行なったものである。

注形材料は、充てん剤として、シリカ、混成シリカ、フッ化カルシウム、マグネシア、各種アルミナなどを用い、エポキシ樹脂も数種のものについ

表 2.5 各種ふんい気における方向性 FRP の特性  
Characteristics of FRP in various atmospheres.

試料条件 試験項目	表 2.3 の試料番号 1 のふんい気				表 2.3 の試料番号 5 のふんい気			
	無 処 理		保 護 処 理		無 処 理		保 護 処 理	
	初 期 値	実 機 試 験	初 期 値	実 機 試 験	初 期 値	モ デ ル 試 験	初 期 値	モ デ ル 試 験
曲 げ 強 度 (kg/mm <sup>2</sup> ) <sup>注1)</sup>	84.3	84.4	86.0	85.5	85.1	85.0	83.3	84.5
A C 破 壊 電 圧 (kV/mm) <sup>注2)</sup>	11.3	10.6	10.5	10.5	10.9	9.9	11.1	10.8
絶 縁 抵 抗 (Ω) <sup>注3)</sup>	$1.7 \times 10^{13}$	$1.2 \times 10^{13}$	$4.4 \times 10^{13}$	$4.1 \times 10^{13}$	$2.2 \times 10^{13}$	$1.1 \times 10^{13}$	$8.1 \times 10^{13}$	$6.5 \times 10^{13}$

(注 1) 6t-10×120, 支点間距離 96mm, ひずみ速度 3mm/min

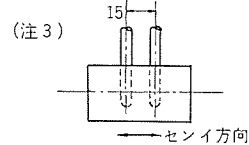
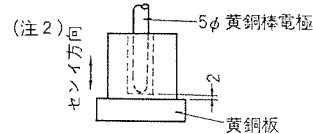


表 2.6 各種ふんい気における注形材料の特性  
Characteristics of casting materials in various atmospheres.

試料条件 試験項目	表 2.3 の試料番号 1 のふんい気				表 2.3 の試料番号 5 のふんい気			
	シリカ充てんエポキシ樹脂		アルミナ充てんエポキシ樹脂		シリカ充てんエポキシ樹脂		アルミナ充てんエポキシ樹脂	
	初 期 値	実 機 試 験	初 期 値	実 機 試 験	初 期 値	モ デ ル 試 験	初 期 値	モ デ ル 試 験
曲 げ 強 度 (kg/mm <sup>2</sup> )	14.7	15.0	12.8	12.6	13.3	12.9	12.5	12.8
体 積 抵 抗 率 (Ω-cm)	$1.5 \times 10^{15}$	$1.6 \times 10^{15}$	$4.2 \times 10^{14}$	$2.1 \times 10^{14}$	$6.7 \times 10^{15}$	$5.5 \times 10^{15}$	$3.1 \times 10^{15}$	$2.7 \times 10^{15}$
表 面 抵 抗 率 (Ω)	$2.2 \times 10^{15}$	$2.1 \times 10^{15}$	$2.0 \times 10^{15}$	$4.5 \times 10^{14}$	$4.1 \times 10^{15}$	$5.2 \times 10^{15}$	$4.1 \times 10^{15}$	$5.7 \times 10^{15}$

表 2.7 モデル試験における注形材料の特性  
Characteristics of casting materials in model circuit breaker.

試料条件 試験項目	シリカ充てんエポキシ樹脂		アルミナ充てんエポキシ樹脂	
	初 期 値	モ デ ル 試 験	初 期 値	モ デ ル 試 験
	初 期 値	モ デ ル 試 験	初 期 値	モ デ ル 試 験
乾 燥 時 表 面 抵 抗 率 (Ω)	$4.94 \times 10^{15}$	$4.50 \times 10^{15}$	$5.18 \times 10^{15}$	$2.55 \times 10^{15}$
乾 燥 時 体 積 抵 抗 率 (Ω-cm)	$3.70 \times 10^{15}$	$1.36 \times 10^{15}$	$3.76 \times 10^{15}$	$2.54 \times 10^{15}$
吸 湿 時 表 面 抵 抗 率 (Ω)	$3.24 \times 10^{15}$	$4.91 \times 10^8$	$3.77 \times 10^{15}$	$1.58 \times 10^{15}$
吸 湿 時 体 積 抵 抗 率 (Ω-cm)	$1.81 \times 10^{15}$	$3.12 \times 10^{13}$	$3.16 \times 10^{15}$	$8.54 \times 10^{14}$

表 2.8 SF<sub>4</sub> ふんい気における注形材料の表面抵抗率  
Surface resistance of casting materials in SF<sub>4</sub> atmospheres.

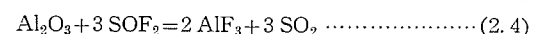
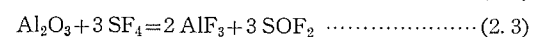
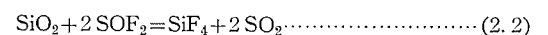
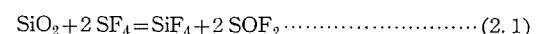
ふ ん い 気		SF <sub>0</sub>	SF <sub>4</sub> 3%	SF <sub>4</sub> 30%
試 料	シリカ充てんエポキシ樹脂	$9.85 \times 10^{15}$	$5.31 \times 10^{15}$	$4.90 \times 10^{15}$
	アルミナ充てんエポキシ樹脂	$1.08 \times 10^{16}$	$6.34 \times 10^{15}$	$3.13 \times 10^{15}$
吸 湿 時	シリカ充てんエポキシ樹脂	$1.68 \times 10^{15}$	$3.54 \times 10^{10}$	$1.04 \times 10^5$
	アルミナ充てんエポキシ樹脂	$6.82 \times 10^{15}$	$7.79 \times 10^8$	$1.26 \times 10^7$

表 2.9 SF<sub>4</sub> ふんい気における注形材料の重量変化  
Changes of weight with casting materials in SF<sub>4</sub> atmospheres.

ふ ん い 気		SF <sub>0</sub>	SF <sub>4</sub> 3%	SF <sub>4</sub> 30%
試 料	シリカ充てんエポキシ樹脂	-0.02	-0.11	-0.32
	アルミナ充てんエポキシ樹脂	0.00	-0.05	+0.02

て試作し、各種ふんい気にはしたが、ここではシリカ充てんエポキシ樹脂、アルミナ充てんエポキシ樹脂の2種について、上記の五つのふんい気にはした結果を示す。表 2.6 は表 2.3 の試料番号 1 および 5 のふんい気にはし、大気中にとり出して測定した結果であるが、特性変化はまったく認められない。表 2.7 は表 2.3 の試料番号 6 のふんい気には放置した後、乾燥デシケータ中で測定し、つぎに大気中で吸湿させて測定したものであるが、シリカエポキシは吸湿時に表面抵抗率が低下するのに対して、アルミナエポキシは変化が認められない。ただし、吸湿時に表面抵抗率が低下したものも、これを乾燥ふんい気には置くことにより表面抵抗率は  $10^{15} \Omega$  のオーダーに回復した。つぎに SF<sub>4</sub> 3% および SF<sub>4</sub> 30% (SF<sub>6</sub> ガス中に混合) のふんい気にはした結果を表 2.8 に示すが、ふんい気としては非常にきびしいものと考えられる。乾燥状態ではいずれも表面抵抗率の変化がないが、吸湿状態ではシリカ、アルミナの両者とも表面抵抗率が低下している。このふんい気における試験片の重量変化を表 2.9 に示すが、シリカエポキシは重量が減少し、アルミナエポキシは重量が増加する傾向が見られ、ふんい気の温度をあげるとこの傾向はさらに明りょうとなる。また、シリカエポキシの重量減少とともにガス中の SiF<sub>4</sub> が増加す

る現象も認められており、シリカおよびアルミナはつぎの化学変化を生ずるものと考えられる。



ただし、これらの反応において、水分の介在、すなわち、SF<sub>4</sub> や SOF<sub>2</sub> が加水分解して生成した HF が SiO<sub>2</sub> や Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> と反応する過程も十分に予想される。また、SOF<sub>2</sub> を用いてどのような試験を行なった結果では、シリカエポキシ、アルミナエポキシともほとんど劣化は認められていないことから、式 (2.1)、式 (2.3) が主反応であり、式

(2.2), 式(2.4)の反応はほとんど進行しないものと考えられる。

以上の例に示すように、当社では穏やかなものからきびしいものまで各種水準のふんい気に材料を置き、その特性変化および劣化機構を調査しているが、材料選定の基準となるふんい気としては実しや断器を採用している。すなわち、実しや断器内(この場合は吸着剤を入れない)に試験物体を入れ、最大電流多数回しや断を行なった後、特性値を測定し、信頼度の高い材料を選定している。

### 3. コ ロ ナ

ガス絶縁機器においては、部分放電を起こさないよう、設計上の配慮がなされているので、絶縁材料が、SF<sub>6</sub>ガスふんい気のコロナにさらされることはないものと考えられる。

しかし、SF<sub>6</sub>ガス中における絶縁材料のコロナ劣化は、空気中のコロナ劣化に比べて、その様相が異なり、劣化機構も異なったものであることが予想される。したがって、部分放電が発生した場合を想定して、SF<sub>6</sub>中の絶縁材料のコロナ劣化現象を明かにしておくことも重要であろう。

空気中での絶縁材料のコロナ劣化については、コロナ放電によって生成される活性酸素等による酸化が大きな役割を果していることが知られている<sup>(8)</sup>。これに対し、SF<sub>6</sub>ガス中では、酸素が存在せず、空気中に比べて、コロナ劣化の少ないことが予想されるが、一方においては、コロナの発生により、SF<sub>6</sub>ガスが、直接絶縁材料と反応して劣化が進行し、複雑なガスが発生することも予想される。

そこで、ここでは、はじめにポリエチレンを試料として、SF<sub>6</sub>ガス中と空気中とのコロナ劣化について述べ、ついで、SF<sub>6</sub>ガス中における各種エポキシの耐コロナ性試験結果、およびコロナ放電による生成ガスの分析結果について述べる。

#### 3.1 SF<sub>6</sub>ガス中と空気中におけるコロナ劣化の比較

図3.1に示す針対平板の電極配置で、ポリエチレンを試料としてコロナ放電特性および耐コロナ寿命時間を測定した。測定回路を図3.2に示す。試料の厚さは0.2mmで、SF<sub>6</sub>ガス中は活性アルミナ、空気中では五酸化リンを入れた内容積約10lのデシケータに12時間以上放置後の乾燥ふんい気中を標準とした。ここで、SF<sub>6</sub>ガス中は、実際の機器の使用状態を模擬するため、実機で使用している、活性アルミナ封入の乾燥ふんい気中を標準とした<sup>(10)</sup>。また、気体の圧力は大気圧で行なった。

まず、コロナ開始電圧を測定したところ、SF<sub>6</sub>ガス中では約6kV、空気中では約3kVとSF<sub>6</sub>ガス中では、空気中の約2倍であった。これはSF<sub>6</sub>ガスと空気との絶縁耐力の差によるものであろう。これをもとに、寿命試験電圧をSF<sub>6</sub>ガス中は6, 8, 10kV、空気中は4, 5, 6kVとして、各電圧におけるコロナパルス累積ひん度分布および耐コロナ寿命時間を測定した。

累積ひん度分布の電圧特性を図3.3に示す。コロナパルス1個あたりの放電電荷はSF<sub>6</sub>中では空気中に比べて小さく、約1/10であった。また、1秒間あたりのコロナパルス発生数に放電電荷をかけた値(平均コロナ電流)もSF<sub>6</sub>ガス中で0.5~1.0×10<sup>-7</sup>、空気中で0.5~2.0×10<sup>-6</sup>(クーロン×個/秒)とSF<sub>6</sub>ガス中では空気中の約1/10であった。このように、SF<sub>6</sub>ガス中でのコロナ放電は空気中に比べて弱いことがわかる。

つづいて、SF<sub>6</sub>ガス中と空気中との耐コロナ性を比較するために、印加電圧-耐コロナ寿命時間特性を求めた。その結果を図3.4に示す。ここで、SF<sub>6</sub>ガス中での試験は600Hzの高周波電源を使用して

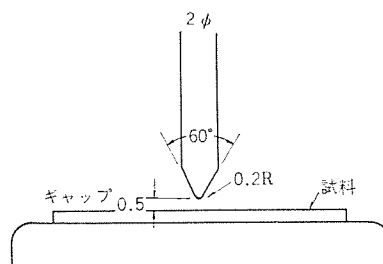


図 3.1 電極配置  
Electrode arrangement.

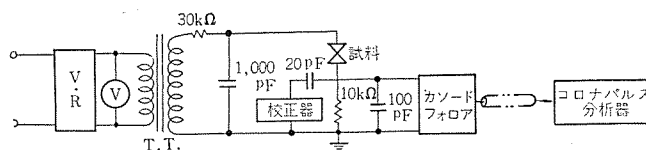


図 3.2 コロナパルス測定回路  
Corona pulse measuring circuit.

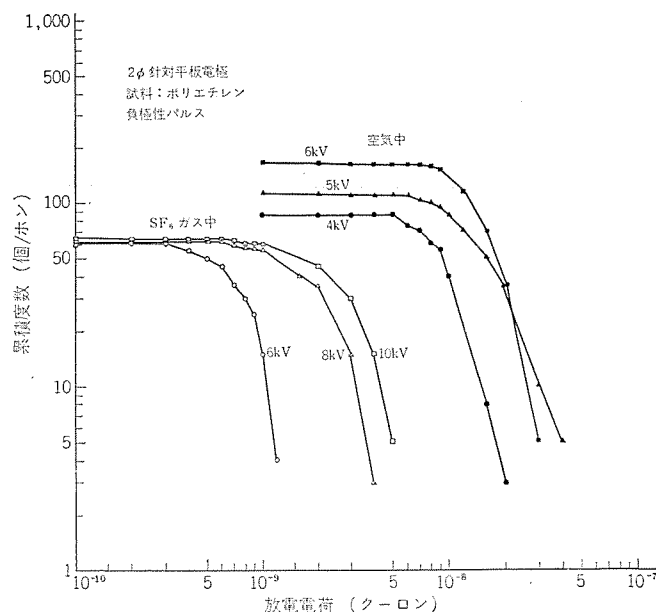


図 3.3 コロナパルス累積ひん度分布特性  
Comparison of discharge-amplitude in air and SF<sub>6</sub>.

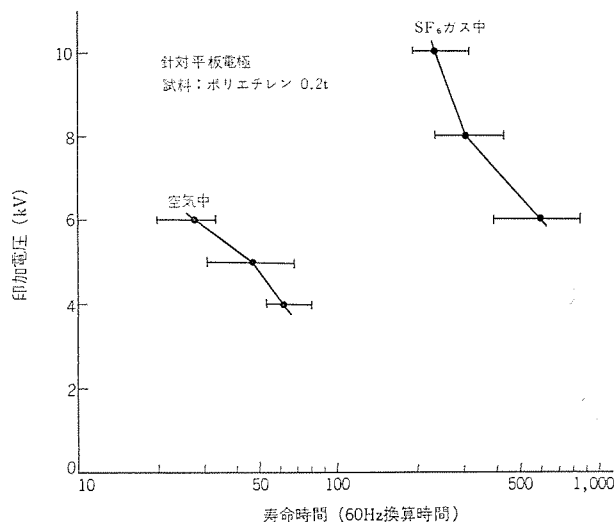


図 3.4 空気中とSF<sub>6</sub>ガス中における耐コロナ寿命の比較  
Comparison of corona resistances of polyethylene in air and SF<sub>6</sub>.

加速劣化試験を行ない、600 Hz での寿命時間を 10 倍して 60 Hz での寿命時間とした。同一電圧 6 kV で寿命時間を比較すると、SF<sub>6</sub> ガス中では空気中の約 20 倍と非常に長くなっている。これは、前述のように SF<sub>6</sub> ガス中でのコロナ放電が弱く、放電電荷および平均コロナ電流が空気中の約 1/10 であることが影響しているものと思われる。また、空気中においては寿命時間 ( $t$ ) と平均コロナ電流 ( $nQ_a$ ) との間には

$$t = k(nQ_a)^{-\gamma} \quad (\gamma \approx 0.7)$$

なる関係式が成立し<sup>(11)</sup>、この関係式を用いて平均コロナ電流に対する寿命時間を比較すると、空気中に比べて SF<sub>6</sub> ガス中のほうが長くなる。これらのことから、SF<sub>6</sub> ガス中での寿命時間が空気中に比べて長いのは、SF<sub>6</sub> ガス中でのコロナ電流が小さなだけでなく、SF<sub>6</sub> ガス中でのコロナ劣化が本質的に少ないためと考えられる。その原因は、SF<sub>6</sub> ガスは組成中に酸素を含まないので、コロナ劣化の主要因の一つであるコロナ放電によって生成されるオゾン等の活性酸素による劣化が少ないためであろう。

### 3.2 各種エポキシおよびガラスエポキシの耐コロナ性試験

つづいて、SF<sub>6</sub> ガスシャ断器の消弧室あるいは絶縁ロッド等、SF<sub>6</sub> ガス中での絶縁材料として多く使用されているエポキシ樹脂について耐コロナ性試験を実施し、ビスフェノール系エポキシ（ビス系）とシクロアリファティック系エポキシ（シクロ系）との比較、充てん剤の種類による影響、ガラスエポキシ等の補強材の効果について検討した<sup>(12)</sup>。試験方法は前述の方法と同じで、試料の厚さは 1 mm、印加電圧 10 kV で 600 Hz の加速劣化試験を実施した。試験結果を図 3.5 に示す。まず、ベースのエポキシ樹脂による差をみるために、充てん剤をシリカ、混成シリカと変えて寿命時間を比較するとシリカ、混成シリカの場合とも寿命時間に大差はないが、ビス系のほうがやや長いようである。つぎに、ベースをシクロ系に固定して、充てん剤をシリカ、アルミナ、フッ化カルシウム、マグネシア、混成シリカと変えて比較してみると、試料間のばらつきが大きく、はっきりした比較はできないが、充てん剤による差はあまりないようである。ここで、フッ化水素等の分解生成物による劣化が予想される充てん剤がシリカの場合も、他とほとんど変わらなかった。

つづいて、ガラスクロスおよびビニロン交織ガラスクロスを補強材としたガラスエポキシの耐コロナ性を調べた。その結果によれば、ガラスエポキシの寿命時間は補強材なしの場合より短く、機械強度を増すために入れた補強材は耐コロナ性の向上には役立たず、耐コロナ性はかえって

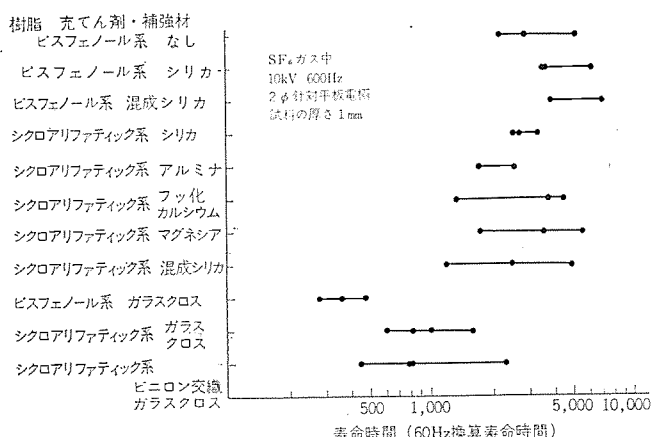


図 3.5 各種エポキシおよびガラスエポキシの耐コロナ性  
Corona resistance of various epoxy resins and glass-laminated epoxy resins.

表 3.1 エポキシ樹脂上コロナ放電による生成ガス  
Decomposed gas due to corona discharge on epoxy resins.

(単位：モル%)

試料成分	シリカエポキシ	混成シリカエポキシ	アルミナエポキシ(1)	アルミナエポキシ(2)
SO <sub>2</sub>	0.07	0.06	0.04	0.13
SOF <sub>2</sub>	1.31	0.76	1.09	1.30
SOF <sub>4</sub>	0.06	0.03	0.12	0.07
SO <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	1.08	0.33	0.84	1.04
SiF <sub>4</sub>	0.24	0.17	0.14	0.17
CF <sub>4</sub>	0.06	0.01	0.09	0.01
CS <sub>2</sub>	0.02	0.08	0.00	0.12
CO <sub>2</sub>	0.35	0.10	0.19	0.24

悪くなっている。これは、ガラスエポキシの耐コロナ性が SF<sub>6</sub> ガス中で特別に悪いというよりも、補強材とエポキシの界面が弱く、界面に沿って劣化が進展することによって、エポキシのみの場合に比べて本質的に耐コロナ性が悪くなっているのではないかとと思われる。実際、空気中でもどのような結果が得られている。

### 3.3 コロナ放電による生成ガス

コロナ放電による生成ガスを調べるために、内容積 36 l のアルミおよびアクリル板からなる容器内に、図 3.1 の電極を 4 組入れ、大気圧の SF<sub>6</sub> ガスを封入した。この場合は、分解生成ガス採取するのが目的であるから、吸着剤は入れず、試験開始前の水分量を約 0.1 Vol % に調節した。電極にそり入した試料を表 3.1 に示す。

加電条件は、10 kV 600 Hz とし、分析を容易にするため、4 試料とも貫通破壊した後の過酷な条件におけるガスをサンプリングし、質量分析計を用いて分析した。ガス分析結果の一例を表 3.1 に示す。単位はモル%であり、各成分の SF<sub>6</sub> に対する比感度を用いて算出したものであるが、SOF<sub>4</sub> だけは、比感度が 1 であるものとして算出した。表に示した 4 試料については、コロナ放電時間が異なるため、生成ガス量を直接比較することはできないが、各試料とも、ほぼどのような組成をもっている。SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub> が非常に多い点は、SF<sub>6</sub> ガス中アーク放電による分解ガスと異なっているが(表 2.6 参照)、これは、エポキシ樹脂中の酸素と SF<sub>6</sub> とが反応して生成したものと考えられる。SOF<sub>2</sub> もかなり大量に生成しているが、これは、SF<sub>6</sub> が加水分解したものとエポキシ樹脂の酸素と反応したものとの両者を含むものと想定される。また、SF<sub>6</sub> ガス中アーク放電ではほとんど検出されない SOF<sub>4</sub> がこの試験では明らかに認められたが、これもエポキシ樹脂中の酸素の豊富な存在によって生成したものと考えられる。以上の結果は、坂本氏<sup>(4)</sup>の結果と傾向が一致している。

以上の結果より、コロナ放電による SF<sub>6</sub> ガス分解物と絶縁材料の作用は、アーク放電による SF<sub>6</sub> ガス分解物と絶縁材料の作用と異なり、電気的な放電エネルギー(コロナ放電)の下で、SF<sub>6</sub> ガスと絶縁材料が、直接反応するものと考えられる。したがって、3.2 節の結果より、絶縁材料に直接作用しないような場所におけるコロナ放電は、そのエネルギーが小さいことから、絶縁材料には、ほとんど影響をあたえないものと考えられる。

## 4. 熱

熱による SF<sub>6</sub> ガスの化学変化については、1900 年に Moisson & Lebeau<sup>(13)</sup> は SF<sub>6</sub> ガスをボヘミアガラスの中でその軟化温度まで加熱しても変化しないことを報告している。つぎに、Anderson ら<sup>(14)</sup> は導波管に SF<sub>6</sub> ガスを封入して使用する場合の問題として熱安定性を

あげ、SF<sub>6</sub>ガスがある種の金属と接触した状態で225℃に加熱されると化学変化を生ずることを報告している。また、Artur<sup>(15)</sup>もSF<sub>6</sub>ガスの性質に関する総説の中で、ある種の金属により分解が生ずることを記している。

しかし、これらの文献はいずれもこの化学変化がどのようなものであるかについては記していない。われわれは、SF<sub>6</sub>ガスを加熱した場合のガス中成分の変化、ガス中水分との関係、金属表面の変化、絶縁物の変化などについて若干の検討を試み、その結果からSF<sub>6</sub>ガスの熱分解反応を推定したので以下に述べる。

#### 4.1 各種金属と生成ガス<sup>(19)</sup>

まず、熱分解生成ガスの測定を行なった。試料ガスはステンレス製気密容器の中にけい素鋼板と水分880 Vol. ppm、室温、大気圧のSF<sub>6</sub>ガスとを封入し、250℃96時間加熱した後採取した。この加熱前後のSF<sub>6</sub>ガスおよびSO<sub>2</sub>ガスの質量スペクトルを表4.1に示す。加

表 4.1 質量スペクトル 注)1  
Mass spectra.

質量数 M/e	イオン	加SF <sub>6</sub> 熱前	加SF <sub>6</sub> 熱後	SO <sub>2</sub> ガス
19	F <sup>+</sup>	0.95	0.99	
32	S <sup>+</sup>	4.05	3.97	5.25
35	SF <sub>3</sub> <sup>++</sup>	2.79	2.74	
48	SO <sup>+</sup>		0.26	42.0
51	SF <sup>+</sup>	4.97	5.01	
54	SF <sub>4</sub> <sup>++</sup>	5.90	5.78	
64	SO <sub>2</sub> <sup>+</sup>		0.57	100
66	SO <sub>2</sub> <sup>+</sup>		0.03	4.85
70	SF <sub>2</sub> <sup>+</sup>	3.71	3.75	
89	SF <sub>3</sub> <sup>+</sup>	24.12	23.89	
108	SF <sub>4</sub> <sup>+</sup>	9.90	9.78	
127	SF <sub>5</sub> <sup>+</sup>	100	100	

注)1 おもなピークのみを抜粋した。

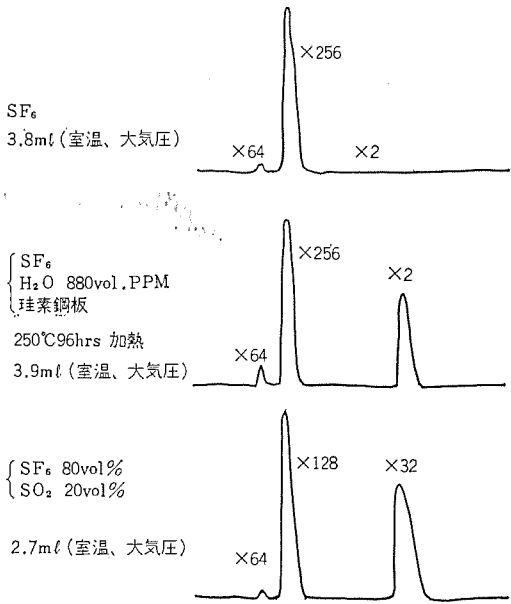


図 4.1 ガスクロマトグラム  
Gaschromatogram.

表 4.2 金属の種類と SO<sub>2</sub> 生成量との関係  
Amounts of SO<sub>2</sub> produced on various metals.

(単位: Vol. %)

SUS 27	けい素鋼板	銅	アルミ	銅板 (SPC-1)	黄銅	亜鉛メッキ
0.00	0.47	0.17	0.00	0.10	0.12	0.00

温度 250℃ 加熱時間 96 h

熱後SF<sub>6</sub>ガスのスペクトルの中にはSO<sub>2</sub>ガスのスペクトルが認められ、質量数48と64のピーク強度の比率もよく一致していることから、SO<sub>2</sub>ガスの存在を予想することができる。つぎに、おなじくこの加熱前後のSF<sub>6</sub>ガスおよびSF<sub>6</sub>・SO<sub>2</sub>混合ガスのガスクロマトグラムを図4.1に示す。質量スペクトルの場合とどうよう、SO<sub>2</sub>の生成が確認される。

つぎに、SF<sub>6</sub>ガスが各種金属と接触した状態で加熱された場合の熱分解生成ガスを表4.2に示す。SF<sub>6</sub>ガス中成分の定量は質量分析法によったが、熱分解生成ガスとして検出されたのはSO<sub>2</sub>のみであった。けい素鋼板が最もSO<sub>2</sub>を生成させやすく、銅・鉄・黄銅もどのような傾向があるのに対して、SUS27・アルミ・亜鉛メッキはこのような傾向がないことがわかる。

#### 4.2 水分量と SO<sub>2</sub> 生成量との関係<sup>(20)</sup>

内容積2.7lのSUS27製気密容器に表面積約110cm<sup>2</sup>のけい素鋼板および水分量を調節したSF<sub>6</sub>ガス(室温、大気圧)を封入し、150、200、250℃の各温度で96時間加熱した。SF<sub>6</sub>ガス中水分量の調節は、飽和水蒸気圧を含むSF<sub>6</sub>ガスの一定量をあらかじめ排気してある内容積40lのタンクに入れ、つぎにSF<sub>6</sub>ガスを導入して全圧が2kg/cm<sup>2</sup>・Gとなるようにした。ガス中水分量の測定は水分量が1,000ppm.vol.以下の場合は電解セル形水分計を用い、それ以上の場合は露点計を用いた。

結果は図4.2に示すとおりであり、SO<sub>2</sub>生成量は水分量の影響が大きいがわかる。図中にBlankとして示したのは、容器中のガスと接触させるための金属試料を入れずに加熱したものであり、SUS27はSO<sub>2</sub>を生成させず、銅はSO<sub>2</sub>を生成させることが表4.2より明らかであるので、Blankにおいて生成しているSO<sub>2</sub>は、容器に使用されている銅ガasketなどにより生成したものと考えられる。けい素鋼板との接触の場合、150℃ではSO<sub>2</sub>の生成はまったく認められず、200℃ではわずかにSO<sub>2</sub>の生成が認められ、したがってこの場合の熱分解開始温度は、150℃と200℃の間であることがわかる。

#### 4.3 金属表面生成物<sup>(20)(21)</sup>

各種金属の加熱試験における表面の外観変化は、SUS27は変化なし、けい素鋼板は変化なし、アルミは変化なし、銅板(SPC1)は

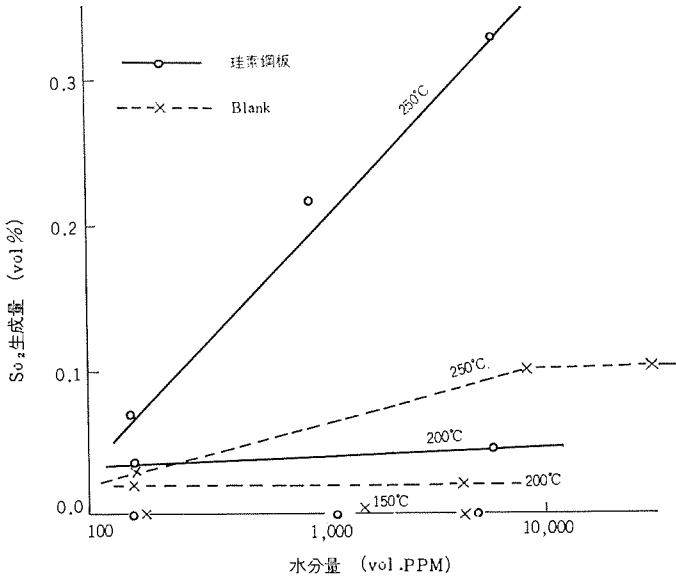


図 4.2 水分量と SO<sub>2</sub> 生成量との関係  
Relation between moisture and amounts of SO<sub>2</sub> produced.

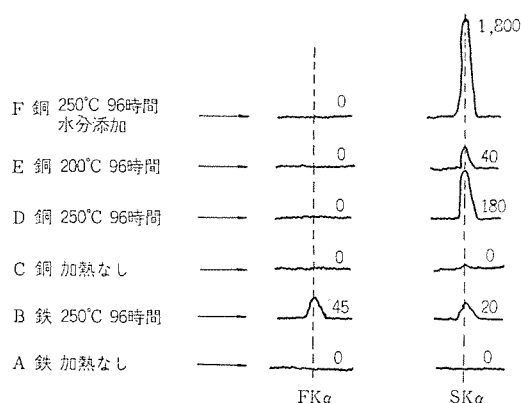


図 4.3 鉄および銅の EMX チャート  
(ピークプロファイル法, 数字は CPS)

EMX charts of steel and copper surfaces by the peak profile method.

表 4.3 SF<sub>6</sub> の熱分解により生成したフッ素イオン  
Amounts of fluoride ion produced by the thermal decomposition.

温 度	加 熱 前 水 分 量 Vol. %	容 器 内 壁 付 着 F μg	けい素鋼板付着 F μg
250°C	0.52	734	112
200°C	0.52	108	25
150°C	0.64	0	4

表 4.4 積層板の特性変化  
Characteristics of laminates exposed to SF<sub>6</sub> at high temperature.

積層板の種類	加 熱 条 件	曲 げ 強 さ* (kg/mm <sup>2</sup> )	貫層破壊電圧 (kV/mm)**
シリコン樹脂積層板	加 熱 な し	21.0	17.2
	250°C 96h	8.9	13.7
ジフェニルオキシサイド樹脂 (ドリル樹脂) 積層板	加 熱 な し	47.7	28.0
	250°C 96h	48.0	25.7
エポキシ樹脂積層板	加 熱 な し	44.2	31.4
	200°C 96h	46.4	30.6

\* 試験片 6t-10×120, 支点間距離 96mm, ひずみ速度 3 mm/min

\*\* 試験片 1t-100×100, 電極 20φ 黄銅球対 25φ 黄銅平板昇圧速度 1 kV/s

黒色に変色, 黄銅はやや青味を帯びた。亜鉛メッキは有色クロメートの色がやや退色する程度であった。銅は試験条件により褐色から黒色まで種々のものが認められた。

これらの表面生成物のうち, 銅板と銅板について EMX 分析装置 (Electron Microprobe X-ray Analyser 島津製作所製) を用いて, フッ素およびイオウの元素分析を行なった。ピークプロファイル法による結果を図 4.3 に示す。銅板にはフッ素およびイオウが認められ, 銅板にはイオウのみが認められた。また, 銅板では SF<sub>6</sub> ガス中加熱温度によりイオウの量が異なること, SF<sub>6</sub> ガス中水分量によりイオウの量が異なることがわかった。

つぎに, SF<sub>6</sub> ガスが加熱された場合に生成するフッ素イオン量を測定した。表 4.3 に結果を示すが, 250°C, 200°C では明らかにフッ素イオンが検出され, 150°C ではほとんど検出されなかった。この結果は図 4.2 において SO<sub>2</sub> 生成開始温度が 150°C と 200°C との間であった結果とよく一致している。

#### 4.4 絶縁物の変化<sup>(19)(21)</sup>

シリコン樹脂積層板, ジフェニルオキシサイド樹脂 (ドリル樹脂) 積層板, エポキシ樹脂積層板 (いずれもガラス布基材) などが SF<sub>6</sub> ガス中で加熱された場合にどのような変化を示すかを調べるため, SUS 27 容器中に 1 種類の試料を入れ, 96 時間加熱を行なった。SF<sub>6</sub> ガス圧は室

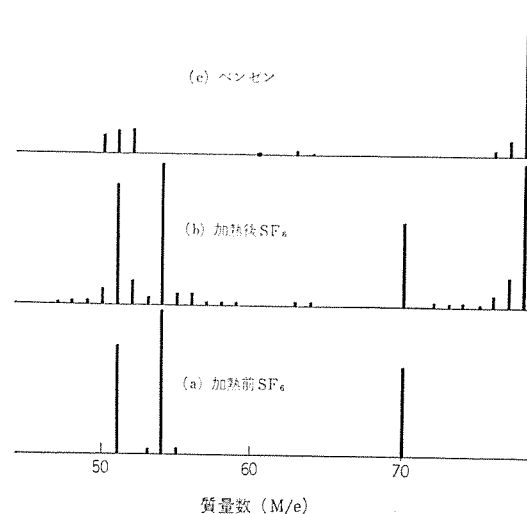


図 4.4 質量スペクトル  
Mass spectra.

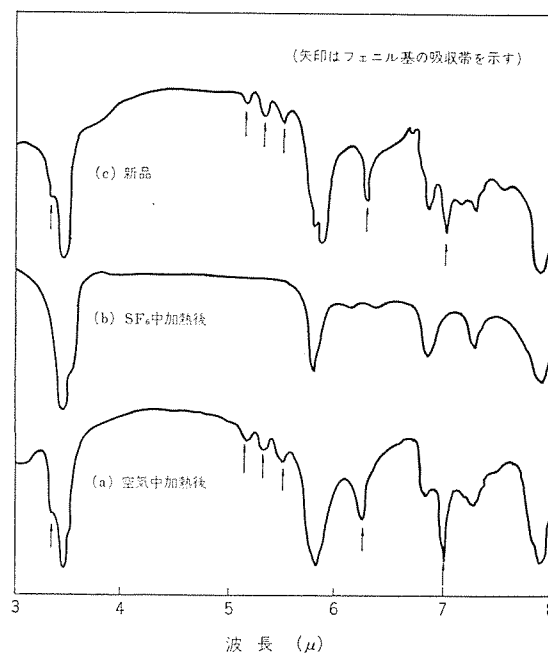


図 4.5 シリコン積層板のアセトン抽出物の赤外線吸収スペクトル

Infrared spectra of acetone-extract of silicone laminates.

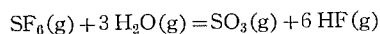
温, 大気圧, 加熱温度はシリコン 250°C, ドリル 250°C, エポキシ 200°C であった。曲げ強さ, 貫層破壊電圧, 絶縁抵抗を測定した結果を表 4.4 に示す。曲げ強さは 10 試料, 破壊電圧は 5 試料の平均値であり, これらの差の検定を行なった結果, シリコンでは曲げ強さ, 貫層破壊電圧ともに有意差があり, ドリルおよびエポキシは有意差が認められなかった。絶縁抵抗はいずれの積層板においても変化はなかった。

シリコン積層板は SF<sub>6</sub> ガス中で加熱後, やや灰色に変色し, 気孔率が増大したような外観を示した。何らかの化学変化を受けたものと考えられる。シリコン積層板とともに, 250°C 96 時間加熱した SF<sub>6</sub> ガスの質量スペクトルの一部を図 4.4 に示すが, 加熱後 SF<sub>6</sub> ガス中にはベンゼンが生成していることがわかる。つぎに, この積層板を細断して, ソックスレー抽出法により, アセトン抽出 8 時間を行なって抽出された物質の赤外線吸収スペクトルを図 4.5 に示す。新品および空気中 250°C 96 時間加熱の試料についてどのようにして得られたスペクトルには, フェニル基の吸収帯が明らかに認められるが, SF<sub>6</sub> 中の加熱後では明らかに消失している。すなわち, シリコン樹脂のポリフェ

ニルシロキサンからフェニル基がベンゼンとして遊離したものと考えられる。Gilman & Marshall<sup>(16)</sup>によれば、triphenylsilanolやtrimethylphenylsilaneに塩化水素ガスを反応させると、高収率でベンゼンが遊離することを示しているが、フッ化水素ガスによってもどのような反応が進行することが予想され、今回のシリコン樹脂の化学変化もそのような過程によるものと考えられる。したがってSF<sub>6</sub>ガスの熱分解反応においてはフッ化水素の存在が示唆される。

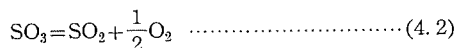
#### 4.5 SF<sub>6</sub>ガスの熱分解反応<sup>(21)</sup>

Heslop & Robinson<sup>(17)</sup>によれば、自由エネルギーの変化から考えて次の反応が起こる可能性があることを示している。



$$\Delta G^0 = -72 \text{ kcal} \dots\dots\dots (4.1)$$

普通の条件において加水分解の徴候が認められないのは、活性化エネルギーが大きいと考えられる。これはイオウ原子の周囲を密にとり囲んでいる6個のフッ素原子により、H<sub>2</sub>O分子の攻撃からイオウ-フッ素結合が保護されているためである。六フッ化物においては中心原子の大きさが増加するにつれて、耐加水分解性が低下する傾向があり、六フッ化ウランは簡単に加水分解する。さて、SO<sub>3</sub>は高温において

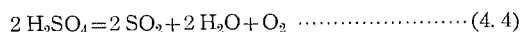


のように熱分解してSO<sub>2</sub>を生成することが考えられる。

また、J. H. Simons<sup>(18)</sup>によれば、SF<sub>6</sub>は高温で加水分解を受けて、

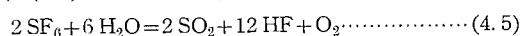


なる反応が進むとされている。硫酸は比較的高い温度では酸化剤として働らくことが知られているので、150~200°Cで



の反応が進むことは十分考えられる。

式(4.1)、(4.2)または式(4.3)、(4.4)を組み合わせると、



となり、SF<sub>6</sub>ガスの熱分解反応としては、この式(4.5)が得られる。この式はこれまでに得られた結果、すなわち、加熱時にSO<sub>2</sub>が生成し、その生成量は水分量に関係があること、フッ素イオンが生成すること、フッ化水素が生成していると予想されることが、などをよく説明している。また、この反応においては金属触媒の効果が大きいことも実験結果より明らかである。

## 5. む す び

SF<sub>6</sub>ガスが電気機器に大量に用いられるようになってきた昨今では、SF<sub>6</sub>ガスの種々の性質に関してかなり詳細なデータが要求されるようになってきている。ここでは、アーク、コロナ、熱によるSF<sub>6</sub>ガスの化学変化に関して、われわれが新たに得た知見を述べた。これらの研究結果は当社において製造されたガスシャ断器、ガス絶縁変電装置に応用され、その信頼性向上に寄与している。

本研究を行なうにあたり、ご指導ご助力をいただいた当社中央研究所ならびに伊丹製作所の関係各位に心から謝意を表する。

## 参 考 文 献

- (1) W. C. Schump, J. G. Trump, G. L. Priest : Ind. Eng. Chem., 41, No. 7, 1,348 (1949)
- (2) J. P. Manion, J. A. Philosophos, M. B. Robinson : IEEE Transaction on Insulation, No. EI-2 (No. 1), 1 (1967)
- (3) 潮, 宮本, 鎌谷 : 三菱電機技報 36, 1,360 (昭37)
- (4) 坂本, 金指, 愛谷 : 電気学会連合大会, 昭43-227
- (5) F. Seel, R. Budenz : Ber., 98, 251 (1965)
- (6) R. L. Kuczkowski : J. Am. Chem., 86, 3,617 (1964)
- (7) I. E. C., 10C (Sec.) 4 (1969)
- (8) 電気学会技術報告 (I 部) 第74号
- (9) 宅間 : 電学誌 88, 10, 1,903 (昭44)
- (10) 鳥山ほか : 電学誌 87, 9, 1,625 (昭42)
- (11) 平林 : 三菱電機技報 38, 12, 97 (昭39)
- (12) 平林, 玉越 : 昭44, 電気学会関西支部大会, S2-10
- (13) Moissan, Lebeau : Compt. rend., 130, 865, 984 (1900)
- (14) T. Anderson ほか : AIEE, Conf. Paper, No. 57-82 (1957)
- (15) M. A. Artur : Bulletin de la SFE, Oct., 514 (1962)
- (16) H. Gilman, F. Marshall : J. Am. Chem., 71, 2,066 (1949)
- (17) R. B. Heslop, P. L. Robinson : Inorganic Chemistry
- (18) J. H. Simons : Fluorine Chemistry V, 30, Academic Press Inc. Pub.
- (19) 広岡, 白井 : 電気学会連合大会, 昭43-230
- (20) 広岡, 白井 : 電気学会連合大会, 昭44-262
- (21) 広岡, 白井 : 電気学会連合大会, 昭45-293
- (22) O. Glemser ほか : Naturwissenschaften, 50, 402 (1963)

## ガス絶縁変電所用絶縁物の製造技術

高橋 康英\*・小鯛正二郎\*・太田 照雄\*  
坂井 竜吉\*・長野 光祐\*

## Manufacturing Technique of Insulations for Gas Insulated Substations

Itami Works Yasuhide TAKAHASHI・Shojiro KODAI・Teruo OTA  
Ryukichi SAKAI・Kosuke NAGANO

For electric apparatus of late are used products and parts consisting chiefly of epoxy resin casting in many cases. Insulating materials for gas insulated substations are the representative articles. In this case the casting materials play a very vital part because the apparatus are subjected to especially high voltage and also arced  $\text{SF}_6$  gas shows peculiar behavior to the insulation. This report outlines the manufacturing technique of GIS insulations and reports the achievements through the studies of a number of methods such as actual measurement and by using computers in regard to the quantitative analysis of internal stress or thermal stress of the insulations during manufacturing process and under operating conditions.

## 1. ま え が き

空気と比べて数倍の絶縁耐力を持つ  $\text{SF}_6$  ガスを使用した開閉機器を使用すると、この機器を組合わせたガス絶縁変電所 (GIS) は従来のものに対して容積が大きく縮小され、都心の過密化対策や電力機器の大容量化、超高压化にきわめて有利となるが、これと平行してこれら開閉機器に使用される絶縁物にも、非常にすぐれた絶縁耐力と特殊な性能が多々要求されることになる。これらの要求に合致する材料としてはエポキシ樹脂注型品が最適であり、当社でもその材料開発、製造技術、評価法について総合的に検討して満足な結果を得ている。

GIS 用注型絶縁物の場合、全体がかなり高い電界で使用されるとき、ふっ素を含有するきわめて活性な Arced  $\text{SF}_6$  ガスにさらされるおそれのあること、電気絶縁の目的だけでなく構造材料としての役割もきわめて大きく、そのため残留ひずみも非常に少ないものであることなど、解決されなければならない問題点が多い。

本報告ではこのように重要な絶縁物の材料開発、および製造技術に関する概要と、この絶縁物の製造過程および使用条件下における内部応力あるいは熱応力の測定と解析について報告する。

## 2. 注型用絶縁材料の開発

GIS 内の絶縁物としては絶縁スペーサ、操作棒、支持筒 (図 2. 1)、計器用変圧器などがあり、これらのほとんどは導体や埋金類を同時に成形可能な注型技術で作られている。一部の機器の操作棒 (図 2. 2) については、エポキシ樹脂とガラス繊維—特殊合成繊維系を用いた当社独特の製造法によるすぐれた機械強度と電気的性能をもったものも使用されている。

$\text{SF}_6$  ガス自身は通常の常態では、熱的、化学的にきわめて安定な負性ガスであるが、 $150^\circ\text{C}$  以上の高温や、放電エネルギーにより分解し、あるいは微量の含有水分と化合したりして化学的にきわめて活性なふっ素含有生成物を生ずるため、水分管理や生成物の除去対策にも細心の注意を払わなければならないが、使用されるエポキシ樹脂注型品そのものが、この生成物にすぐれた耐力をもつものでなければ

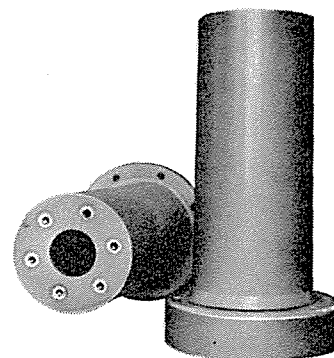


図 2. 1 GIS 用注型絶縁物の例  
Example of epoxy casting insulators.

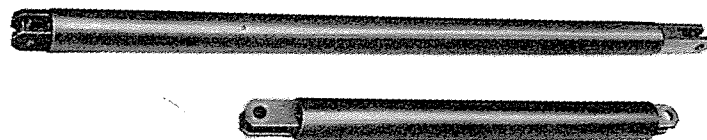


図 2. 2 特殊製造法による GIS 操作ロッド  
GIS operating rod manufactured by special techniques.

ならない。なお、 $\text{SF}_6$  ガスと絶縁物との関係は別報告にゆずる。当社ではつぎのような点を検討して材料開発と平行して製品設計を行なった。

- (1) この材料が Arced  $\text{SF}_6$  ガスに十分耐えるものであること
- (2) 残留ひずみが著しく少なく、ヒートショックや機械的衝撃に対しても十分耐える材質であること
- (3) 耐コロナ特性にすぐれた材料であると同時に絶縁物自身の形状もボイドを含まず、クラック、すきまなどを生じないものであること
- (4) 機械強度、電気特性を含めた耐熱性が少なくとも  $100^\circ\text{C}$  以

上であること  
(5) 高電圧絶縁に適する材質であると同時にボイドのない製品を作ることができること

(6) 作業性がよく、生産管理の十分行なえる材料であること  
以上の点を中心に基本樹脂配合物の開発、製品形状、注型用型、装置を含めた製品技術の開発、評価法の検討を行なって生産段階にはいった。まず第一に配合樹脂について、各種基礎実験の結果、樹脂自身について耐トラッキング特性は芳香族エポキシのほうが脂環族エポキシより悪いが、SF<sub>6</sub>ガス中で使う場合は大きな問題にならないこと、耐クラック特性や機械強度、耐薬品性の面で芳香族エポキシのほうがすぐれていること、Arced SF<sub>6</sub>ガスに対する樹脂特性の影響は樹脂間では著しい差異は認められず、むしろ充てん剤の性質のほうが大きいこと。コロナ劣化については、芳香族エポキシのほうが脂環族エポキシより寿命時間はやや長く、材質自身よりも製品形状のほうが問題で、埋金との間にギャップを生じない製品設計であり、気泡を含まない製造法とすべきであることなどを考慮して、芳香族系のエポキシ樹脂を主成分として使うことに決めた。

芳香族系のエポキシ樹脂も一般用としては多くの樹脂が開発され、市販されているが、とくに500 kV用ともなると製品重量が150～250 kgときわめて大きく、その樹脂自身の機械的、熱衝撃的耐クラック特性が問題となるため、樹脂そのものの可とう性を改良したり、作業時のPot lifeを長くし、硬化時の発熱を低くするようにしたものが要求されてくる。これに対処するように樹脂の検討を進めた。基本樹脂についての比較を表2.1に示す。

つぎに検討した材料は充てん剤であるが、これはGIS用注型絶縁物開発の段階で一番大きな問題となったもので、その材質、粒度分布、配合物のArced SF<sub>6</sub>ガスによる劣化、耐クラック性、作業性への影響、沈降の問題などを総合的に検討して特殊なものを選んだ。詳細に述べると、一般に無機質充てん剤として使用されるものには金属酸化物、炭酸塩、硫酸塩、ふっ化物などがあるが、この中で一番よく使用され、安価で熱的性質や機械特性がすぐれているシリカ粉はArced SF<sub>6</sub>ガスによりおかされる可能性があるため、ガスしゃ断器用材料としては適当でない。粒度分布については、比重の違いによる沈降の問題やそれから派生する不均質による残留ひずみの生成とクラック発生、粒度増加によるボイドの生成、作業性への影響、細密充てんなど重要な事項が多い。このほか、充てん剤の熱伝導性、熱膨張係数を検討して特定なものを選んだ。

硬化剤、硬化促進剤の選択も重要な問題で、長い可使用時間と適当な作業条件となるように配合を決めた。

材料が決められた後には製造技術の項で述べるように、設計段階で検討された製品形状の問題や埋金処理の問題、注型用型のこと、製造装置、作業条件などの検討を行なった。

表 2.1 GIS用注型樹脂としての芳香族エポキシと脂環族エポキシの比較  
Comparison of bisphenol epoxy and cycloaliphatic epoxy resins.

特 性	芳香族エポキシ	脂環族エポキシ
SF <sub>6</sub> ガス中での耐トラッキング特性	◎	◎
SF <sub>6</sub> ガス中でのコロナ劣化(寿命時間)	◎	○
ヒートショックに対する耐クラック特性	◎	×
100℃以上の熱変形温度	○	◎
耐薬品性	◎	○
耐 arced SF <sub>6</sub> ガス特性	◎	◎
作業性	◎	×
価 格	○	×
機械的特性	◎	○

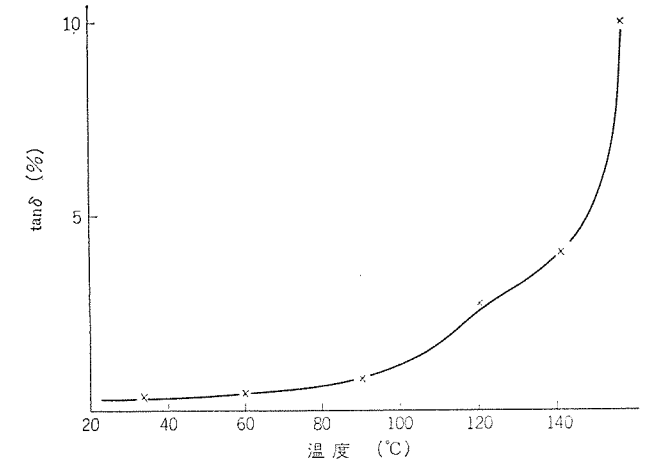


図 2.3 GIS用注型樹脂の誘電体損失(tan δ)温度特性  
Temperature dependence of tan δ with GIS casting resin.

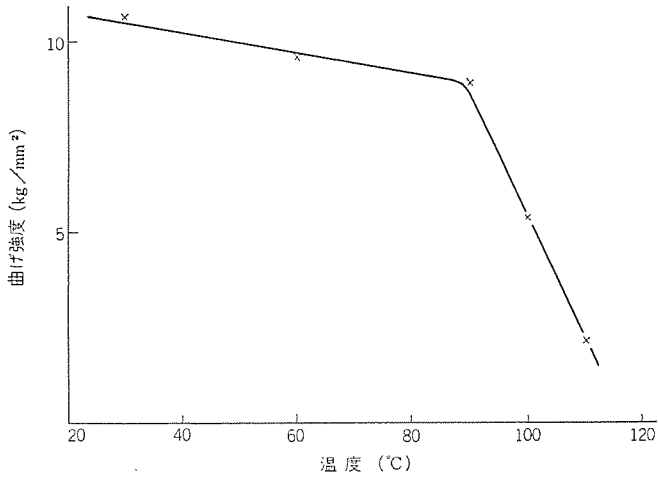


図 2.4 GIS用注型樹脂の曲げ強さ温度特性  
Temperature dependence of flexural strength with GIS casting resin.

表 2.2 GIS用注型樹脂の一般的性能  
General properties of GIS epoxy casting resin.

比 重	単 位	一 般 用	G I S 用
比 重		1.8	2.4
吸 水 率	%	0.02	0.02
熱 伝 導 率	kcal/m/h°C	0.7	0.9
熱 膨 張 係 数	10 <sup>-6</sup> mm/mm°C	31	32
熱 変 形 温 度	°C	105	115
引 張 り 強 さ	kg/mm²	8.5	8.2
圧 縮 強 さ	kg/mm²	18	21
曲 げ 強 さ 常 温	kg/mm²	13.5	12
100°C		4.8	6.8
曲 げ 弾 性 率 常 温	kg/mm²	1,000	1,100
100°C		200	580
衝 撃 強 さ	kg/mm²	3.5	4.5
絶 縁 破 壊 電 圧 常 態	kV/mm	30	27.2
D-24/30		30	27.5
誘 電 率 常 温	—	4.1	6.5
60 Hz 100°C		4.1	6.7
誘 電 体 損 失 60 Hz	%	1.6	0.5
絶 縁 抵 抗 常 温	MΩ	2×10 <sup>7</sup> 以上	2×10 <sup>7</sup> 以上
D-24/30		2×10 <sup>7</sup> 以上	2×10 <sup>7</sup> 以上
体 積 抵 抗 率	Ω-cm	3×10 <sup>13</sup> 以上	3×10 <sup>13</sup> 以上
耐 トラッキング性	V	260	250
耐 ア ー ク 性	sec	187	196

一方では、この材料の一般的性質のは握、疲労試験、耐 Arced  $\text{SF}_6$  ガス試験、熱劣化試験、モデルによる残留ひずみの試験、吸湿劣化試験が行なわれ、試作製品に対しては評価の項で述べるような各種電氣的、機械的試験を実施し、最終的な材料配合と製品形状を決定した。図 2.3 に電氣的性質の一例として誘電体損失の温度特性を、図 2.4 に機械的性質の一例として曲げ強さの温度特性を示した。表 2.2 に GIS 用注型絶縁物の一般的性質を示す。

### 3. GIS 用注型絶縁物の製造技術

GIS 用注型絶縁物の製造上で問題となるのはつぎのような事項である。

- (1) 注型用材料
- (2) 製品形状
- (3) 導体などの埋金の処理
- (4) 注型作業条件
- (5) 注型用型
- (6) 注型装置

以上の事項はそれぞれ互いに関係しあって設計機能を満足する、品質の安定した注型絶縁物となるわけであるが、この各項について少し説明を加えてみる。

(1) については材料開発の項で述べたとおりであるが、生産段階に入って問題となるのは、いかに安定した品質で生産を続けるかということであり、常に樹脂や充てん剤その他の材料の品質に注意を払わねばならない。ここでいう品質とは、これら材料の化学組成や製品製作の段階までの混入水分の除去、異物混入対策が共通問題としてあげられる。樹脂そのものには主としてエポキシ当量が問題になり、充てん剤の場合には粒度分布の管理が問題で、当社の場合には特別な購入方法を行なって管理できるように注意を払っている。

(2) の製品形状については、設計機能上より電氣的、機械的要求を満たすように基本形状が決められてくるが、4 項以下で述べるように熱および機械的衝撃にも強い残留ひずみの少ない注型品を製作するには、製品形状こそ最も重要と考え、当社では残留ひずみの測定や応力解析にはとくに力を入れている。埋金の入ったものも多いが、この場合、埋金の形状、処理、周囲の注型品の肉厚と埋金の直径の比など注意事項が多い。

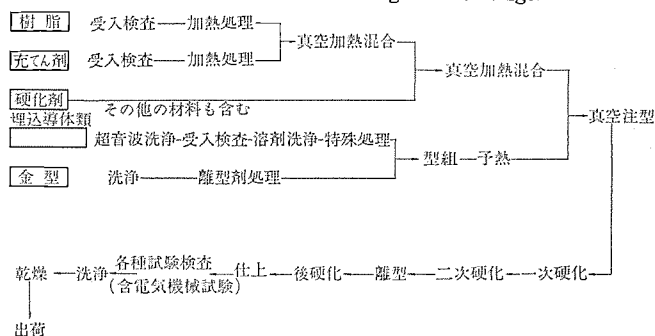
(3) の導体等の埋金の処理については上記(2)項とも関係が深く、まず表面にクッション層をもうけ、過酷な熱衝撃にも耐えうるようにしなければならない。また埋金加工時の金属粉もあらかじめ取り除くよう処置しておく必要がある。金属と樹脂との間にギャップができるとコロナの発生および  $\text{SF}_6$  ガスのリーク原因となるので、埋金周囲の樹脂部肉厚も検討した。

(4) の注型作業条件は生産管理上最も注意すべき点で、樹脂と充てん剤の予備混合から硬化剤を添加した後、注型に至るまでのおのおのについての温度、真空度、時間をうまくコントロールしなければ、ボイドを生成したり材質上ばらつきを生じたりする。注入後製品を硬化する場合、急激に硬化を行なうとゲル化時に内部ひずみを生じることになり、硬化条件に対する発熱、ひずみの生成過程についての検討も行ない、その加熱温度、離型時間を決定した。とくに、500 kV クラスの注型絶縁物の場合には容量効果も著しく、加熱方法まで問題となり、最悪の場合には樹脂の部分的収縮による現象として“ひけ”を生じる。以上の点を総合的に管理するため、注型時の全ロットに対して熱変形温度の測定を行ない、製品の品質をチェックし



図 3.1 大形注型用真空注型タンク  
Vacuum casting tank for large insulators.

表 3.1 GIS 用注型品の製造フローチャート  
Flow chart of manufacturing GIS castings.



ている。

(5) の注型用型については材質、型自身の肉厚、熱伝導性、加熱方式、重量などの問題もあるが、それよりも製品からボイドが簡単に抜けるような形状で、後加工の少ないことが重要であり、その分割方式に注意しなければならない。また注入口の位置、大きさ等も製品の均質性、ひけの点から問題となる。

(6) の注型装置については、できるだけ樹脂や充てん剤などの材料は密閉系で処理されるのが望まれるし、作業性からはその取扱いが簡単であるのがよい。図 3.1 には 500 kV GIS 用注型絶縁物製造のために設置した大形注型タンクを示し、表 3.1 には GIS 用注型品の製造に関する Flow chart を示した。

以上が現在行なっている当社の GIS 用注型品の製造技術に関する簡単な説明であるが、最近では世界的に注型品の製造法として脚光を浴びている“加圧ゲル化法”なる技術についてもおもに生産性の向上と内部に残留ひずみを残さない製品の製造法として研究中で、急激に増加しつつある GIS の生産と品質保証に対処するように努めている。

### 4. GIS 用注型絶縁物の評価

GIS 用絶縁物の評価は、材質自身と製品とした場合の両方について行なわれたが、あくまでもその主眼点は電氣的性質および機械的性質の長期間にわたる保証であり、トラッキングやコロナ、Arced  $\text{SF}_6$  ガス、熱、水分、残留ひずみ、疲労等による劣化についてサンプル形状や製品形状で評価して多くの成果を得てきた。このうち Arced

SF<sub>6</sub> ガスと各材料との問題および製品としての電気的性質の評価については、その詳細を別報告にゆずり、4項以下ではこの注型絶縁物が電気絶縁材料であると同時に、構造材料としても大きな役割をはたしている点を中心に、残留ひずみの生成とクラックの発生および熱応力の問題について検討した結果について報告する。

3項のGIS用注型絶縁物の製造技術でその一部を述べたように、注型品の硬化時における温度の加え方や、硬化後室温までの冷却方法が悪いと多くの残留ひずみを残す結果となり、最悪の場合クラックの生成に至る。この場合、製品形状、樹脂配合物の性質、クッション層の生成も重要な因子であることはいうまでもない。

一方、使用中の温度上昇による熱応力も機械強度上の問題となるわけで、これらの問題に対処するため、注型絶縁物の製造過程から使用に至るまで、一連の過程を追って応力の測定と解析を試みた。できるだけ実体あるいはそれに近い形状寸法のものを対象としてストレーンゲージの埋込みとか、電算機による解析、光弾性実験法など、現在適用可能な手法を駆使して解析を行なった。以上の結果、多くの成果を納め、GIS用注型絶縁物の製造に適用している。

## 5. 円筒の応力

基礎実験として円筒は、比較的アプローチしやすい形状である。試料が製作しやすいように軸対称であり、硬化収縮や熱応力に関する解析解があるし、測定上あるいは計算機による応力解析の上でも扱いやすい。

### 5.1 円筒の硬化収縮時に発生する応力

注型技術のうえで先輩格の鋳造でも、鋳造欠陥は悩みの種であり、最近ようやく鋳造工学として解析、総合されつつある。その研究にエポキシ樹脂を応用<sup>(1)</sup>しているのは面白い。吉川氏は鋳造応力の要因を(1)材料因子(2)形状因子(3)熱因子の三つに分けているが、樹脂の注型もまったくどうようである。円筒の場合は(2)の形状因子として内径部と外径部の拘束が考えられるが、硬化収縮では中子の拘束が強く働いてくる。この応力は厚肉円筒に内圧が作用するときのLaméの解を応用して求めることができる。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_t &= \frac{1}{(m^2+1) + (m^2-1)\mu} \left( 1 + \frac{b^2}{r^2} \right) E\eta \\ \sigma_r &= \frac{1}{(m^2+1) + (m^2-1)\mu} \left( 1 - \frac{b^2}{r^2} \right) E\eta \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5.1)$$

ここに、

$\sigma_t$ : 接線方向応力  $\sigma_r$ : 半径方向応力  $a$ : 内径  $b$ : 外径  
 $m$ : 内外半径比  $= b/a$   $\mu$ : ポアソン比  $r$ : 任意点半径  
 $E$ : ヤング率  $\eta$ : 収縮率  $= 1 - (a'/a)$   $a'$ : 自由収縮時の内径  
 ちなみに、下の数値を用いて応力値を計算してみる。

$a = 33 \phi$   $b = 100 \phi$   $m = 3$   $\mu = 0.4$   $E = 1,000 \text{ kg/mm}^2$   
 $\eta = 0.5\%$  として

$\sigma_t = 3.8 \text{ kg/mm}^2$ ,  $\sigma_r = -3.0 \text{ kg/mm}^2$

$\eta = 0.5\%$  と置くのは問題もあるが、これでみると無視できない応力になることは明らかである。

### 5.2 円筒による基礎実験

硬化収縮時のひずみ測定は実験室的に種々の方法がとられている。A. J. Bush<sup>(2)</sup>は薄肉中空円筒の内壁にストレーンゲージを張付し、これの中子として注型を行ない、収縮時の圧力測定を行なっている。この円筒は外径約30φである。さらに、スケールを大きくした場合、このデータがそのまま適用できるかどうか疑問がある。経験的には

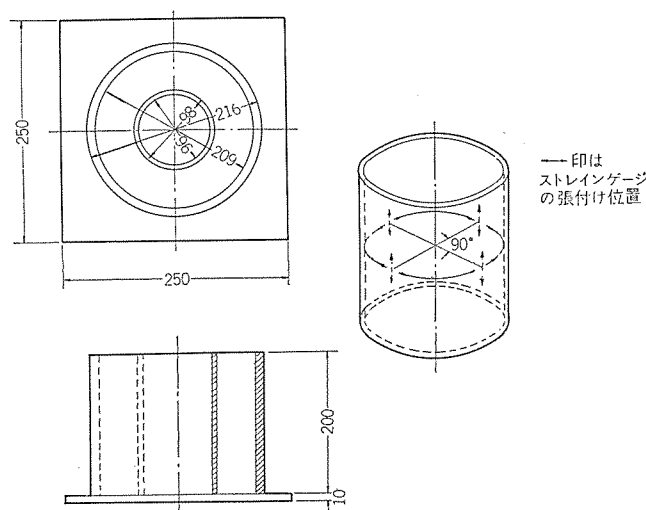


図 5.1 実験用の円筒および型  
Experimental apparatus for resin shrinkage strain measurement.

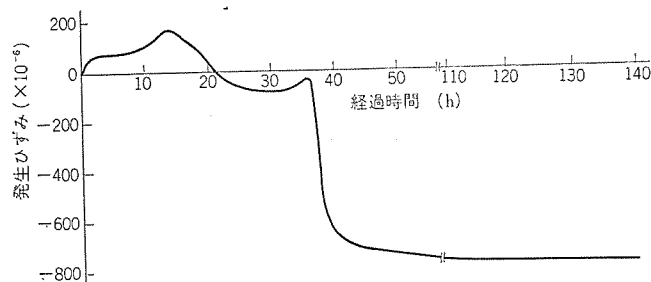


図 5.2 円筒の硬化収縮ひずみ  
Resin shrinkage strain in circular cylinder.

寸法が大きくなるほどクラックの発生確率が高いし、これを理論的に証明した論文<sup>(3)</sup>もある。そこで、Bushの方法で円筒の寸法を大きくとって、図5.1のような型で基礎実験を行なってみた。

### 5.3 硬化収縮時のひずみ測定

中子は内径98φ、肉厚1mm、材質はAlとFeの2種を作成した。使用したゲージは共和電業製のKB-6-Al-23(Al用)、またはKB-6-Al-11(Fe用)であり、接着剤はPC-6を用いた。使用に先立って温度校正を用なった。特性的にはFe用のほうが安定している。測定結果の一例を図5.2に示す。これより、ひずみは二次硬化後、気中放冷してTg点(ガラス転位点)を通過直後から急激に生じており、この傾向は文献<sup>(4)</sup>に報告されているとおりである。

発生ひずみは意外に小さく、これは中子としての薄肉円筒の拘束力が小さいためと考えられるが、かなり大きな物までクラックなしに製作可能なことを示唆している。なお、使用した樹脂はビスフェノールタイプのエポキシ樹脂(アルダイトB)に充てん剤を入れたものである。その他の実験に用いた樹脂もすべて同じものである。

### 5.4 円筒の残留応力測定

円筒の残留応力の測定法としてG. Sachs<sup>(5)</sup>の方法がある。これは円筒の内周または外周に沿って薄層をけずり落し、そのときのひずみ変化を測定して最終的に計算で応力値を求める方法である。ここでは、円筒内周にゲージを張り、外周切削で測定を行なった。計算式を示すと

ここに、

$\sigma_z$ : 軸方向応力  $\sigma_t$ : 接線方向応力  $\sigma_r$ : 半径方向応力

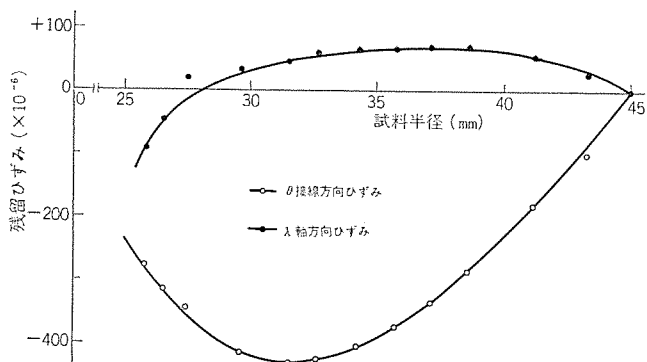


図 5.3 円筒の残留ひずみ分布 (中子を抜いた状態)  
Residual strain distribution in cylindrical resin.

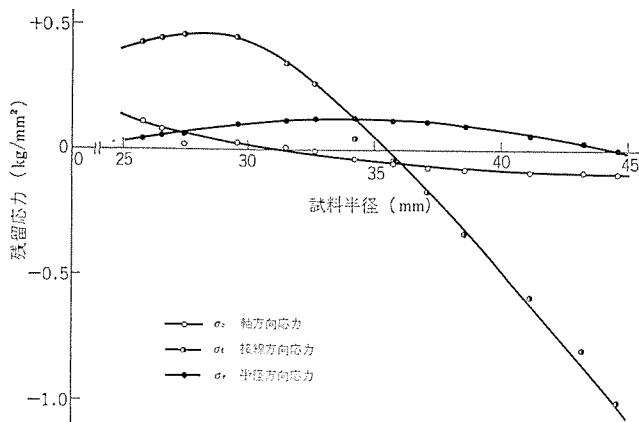


図 5.4 円筒の残留応力 (中子を抜いた状態)  
Residual stress distribution in cylindrical resin

$E$ : ヤング率  $\mu$ : ポアソン比  $f_a$ : 内半径断面積  
 $f$ : 任意半径における断面積  $\lambda$ : 任意半径まで切削したとき  
発生した軸方向ひずみ  $\theta$ : 同じく接線方向ひずみとして

$$\left. \begin{aligned} \sigma_z &= -\frac{E}{1-\mu^2} \left\{ (f-f_a) \frac{dA}{df} + A \right\} \\ \sigma_t &= -\frac{E}{1-\mu^2} \left\{ (f-f_a) \frac{d\Theta}{df} + \frac{(f+f_a)\Theta}{2f} \right\} \\ \sigma_r &= -\frac{E}{1-\mu^2} \frac{(f-f_a)\Theta}{2f} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5.2)$$

$$A = \lambda + \mu\theta, \quad \Theta = \theta + \mu\lambda$$

外径約 90  $\phi$ , 内径約 40  $\phi$  の円筒に関する  $\lambda$  と  $\theta$  の測定値を図 5.3 に, 残留応力の計算値を図 5.4 に示す。最大引張応力は内周寄りにあり, 絶対値は比較的小さい。

## 6. 熱応力の測定

熱応力値を知ることが機械強度上非常に重要であり, 実験的にも理論的にも多くの努力が払われてきている。注型樹脂製品の温度範囲は狭いが, 膨張係数が大きく, 伸びの小さい点から, 条件のいかんでは破壊応力を生ずるに至るので, 熱応力の検討は不可欠である。

### 6.1 熱応力の測定

熱応力の測定は厳密には不可能といわれているが, 実用上の要求から各種の方法が開発されてきている。ひずみ計の普及から考えて, ストレインゲージによる測定が, 過渡現象や連続変化の記録も容易に行なえる利点があり, 最もすぐれた方法になることができると期待される。しかし, 温度が高く変化も大きい場合は零点移動に苦慮しなければならない。幸い樹脂の最高使用温度は比較的低く, 零点移動も無拘束の試験片に張付して温度校正を行えば, 再現性も良くて

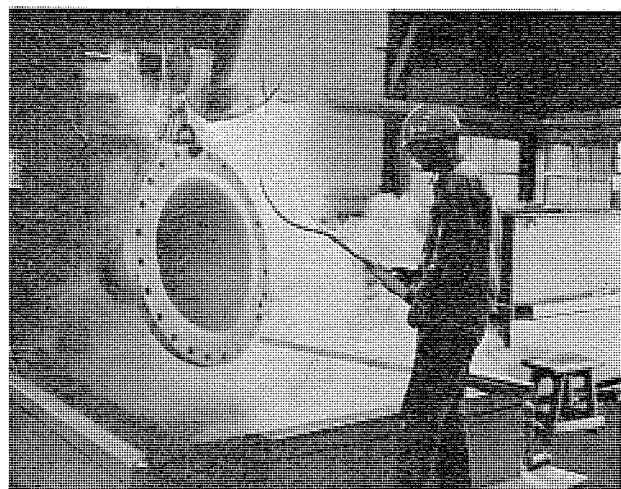


図 6.1 大形スパーサーの熱応力測定  
Thermal stress measurement of large spacer.

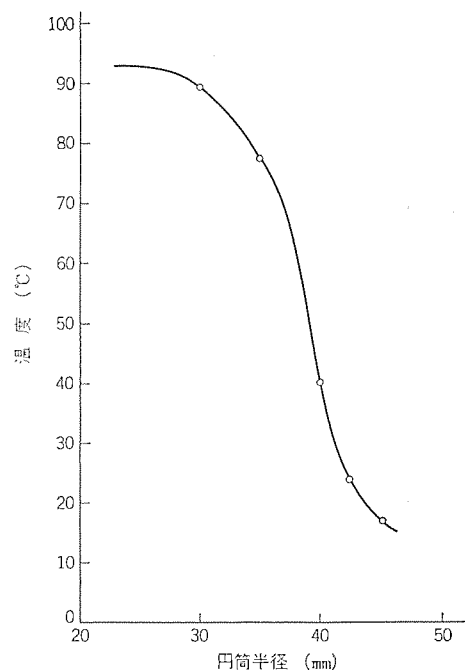


図 6.2 円筒の温度分布  
Temperature distribution in circular cylinder.

補正できるので精度の良い測定ができる。

熱応力測定の対象としては, 外径約 90  $\phi$ , 内径約 40  $\phi$  の円筒を選び, 表面にストレインゲージをはり 3 線結線と動ひずみ計に接続し, 過渡的ひずみ測定を行なった。内部および表面の温度分布を知るために, 熱電対を埋込んで過渡的温度分布も同時に測定した。ゲージは共和製 KF-1-C1-23 を用いた。内外温度差 75°C (内部高温) で, 外表面の最大接線方向応力は約 2 kg/mm<sup>2</sup> であった。図 6.1 に大形スパーサーの熱応力測定状況の一例を示す。

### 6.2 計算機による熱応力解析

計算機による構造物の応力解析はまことにめざましいものがある。とくに複雑な形状の板, あるいは軸対称問題の解析には finite strength method が主流を占めており, 各方面で活用されている。詳細理論は文献<sup>(6)</sup>にゆずるが, 当社は軸対称問題解析用のプログラム CYLAN をもっているのので, これを使用している。応力測定に選んだ円筒について熱応力計算を行なった。

温度分布は実測値を使用した, この分布を図 6.2 に, 計算結果を図 6.3 に示す。これより, 実測応力値と計算値は非常によく

一致することがわかる。したがって製品形状の決定には電算機を駆使し、また、これで十分でないものは実体を製作のうえ、熱応力を測定する方法が考えられる。図 6.4 は 77 kV GIS 用計器用変圧器 (PT) の熱応力計算値をプロッターに描かせた一例である。計算の結果から導体配置、形状などを変えてさらに良い結果を得た。硬化収縮の応力計算も熱応力の応用計算として行なえる。

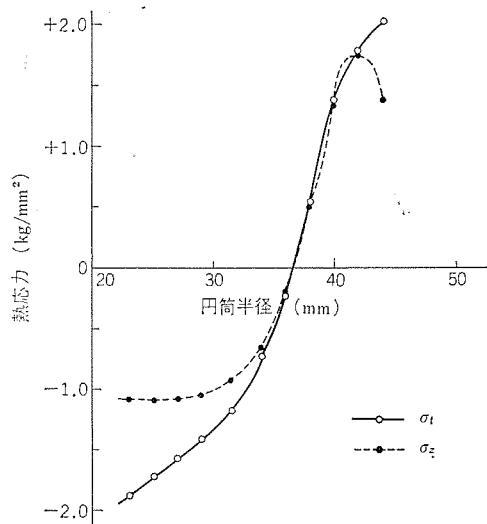


図 6.3 計算機による円筒の熱応力分布の計算値  
Calculated thermal stress distribution in circular cylinder.

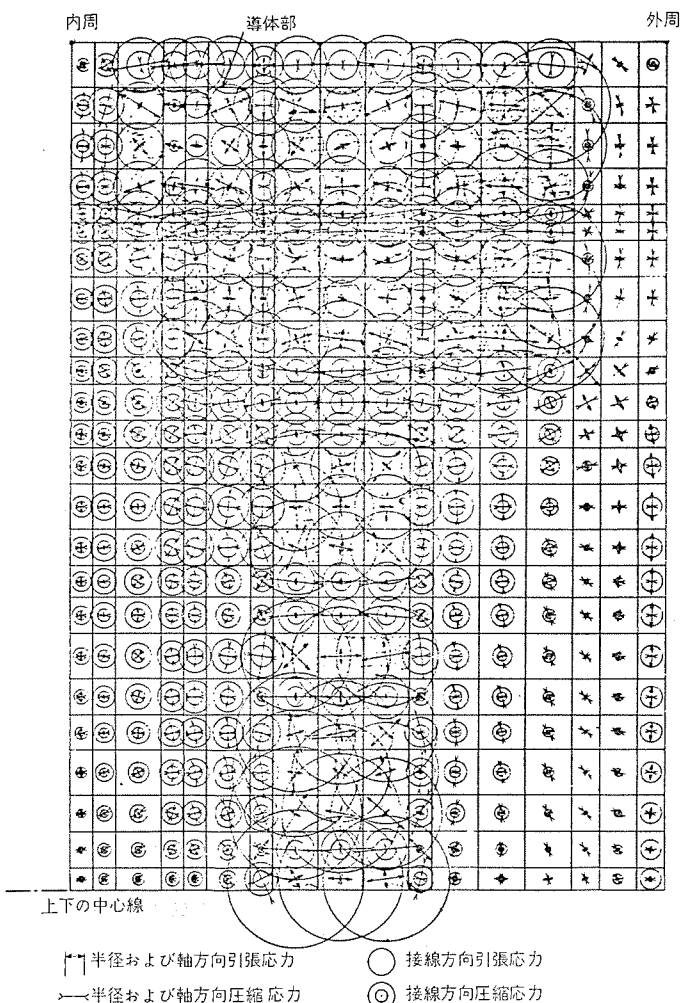


図 6.4 PT の熱応力解析結果  
Plotted chart of calculated thermal stresses in resin PT.

## 7. 内部ひずみ測定素子によるひずみの測定

注型品の製作を手がけると、だれしも実体の局部的応力あるいはひずみを直接測定する方法はないかと考える。その一例が水銀入ガラス球の埋込みであり、ストレインゲージを張付した円筒の埋込みによる測定であるといえよう。しかし、前者は定量的データの読取りに難点があり、後者は寸法の大きすぎる難点がある。そこで、われわれは内部ひずみを測定するための超小型素子を開発し、実体の注型からヒートサイクルに至る一連のひずみ測定を試みた。

### 7.1 内部ひずみ測定素子

内部ひずみの測定は、究極的には微小 2 点間距離の変化を測定することである。その方法は種々考えられるが、過渡あるいは定常的な変化の連続記録を行なうとなれば、やはりストレインゲージの応用が手近かである。ゲージそのままを埋込むには問題があるので、やはりベースになるものにゲージをはりつけて埋込んだほうが安定である。われわれが開発した素子は図 7.1 に示す形である (特許出願中)。

これはつぎの考えに基づいて考案された。

- (1) 膨張係数が樹脂とまったく等しいベースであること。
- (2) 引張りおよび圧縮の両方の測定が可能なこと。
- (3) ベース自体の変形抵抗が非常に小さいこと。
- (4) ゲージ面に大きな圧力が加わらないこと。
- (5) 温度変化に対する零点移動が小さいこと。

などであるが、すべてを満たすことははなはだ困難である。

素子のひずみ変化は

$$\Delta \varepsilon = \left\{ \frac{\alpha_R - \alpha_g}{K_0} + \alpha_m - \alpha_g + \beta - \gamma \right\} \Delta T \quad \dots \dots \dots (7.1)$$

ここに、

$\Delta \varepsilon$ : 素子に生ずる全ひずみ (見かけのひずみも含む)

$\alpha_R$ : ゲージ素線の抵抗温度係数 ( $1/^\circ\text{C}$ )

$\alpha_g$ : ゲージ素線の線膨張係数 ( $1/^\circ\text{C}$ )

$\alpha_m$ : ベースの線膨張係数

$K_0$ : ゲージ率

$\beta$ : 埋込母材の変化によって生ずる真のひずみの温度係数 ( $1/^\circ\text{C}$ )

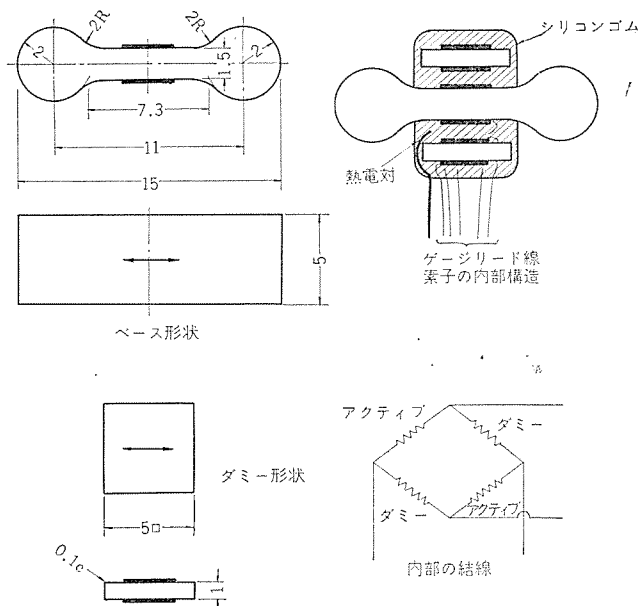


図 7.1 内部ひずみ測定素子  
Schematic diagram of internal strain micro sensor.

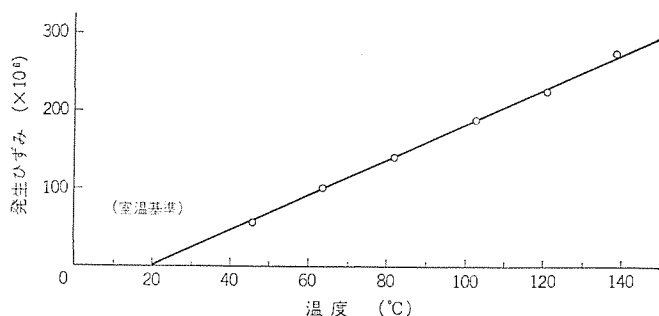


図 7.2 素子の温度特性  
Temperature vs. strain calculation curve of internal strain micro sensor.

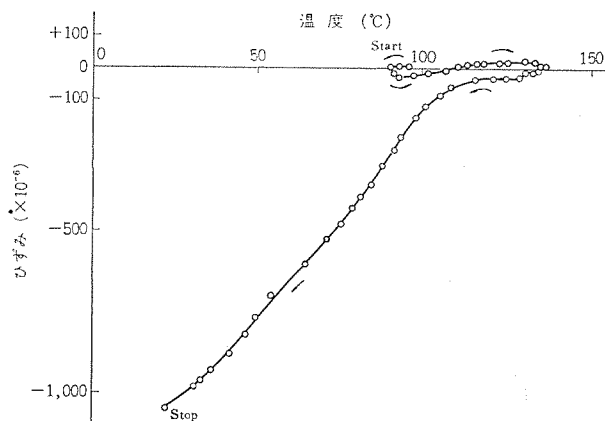


図 7.4 温度対内部ひずみの関係  
Temperature vs. internal strain.

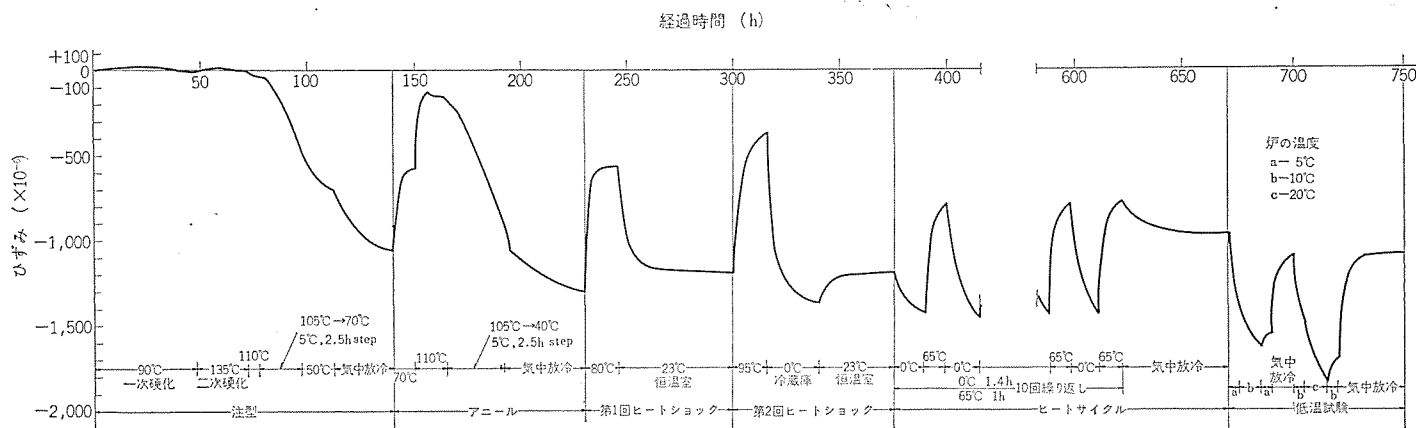


図 7.3 内部ひずみ測定素子によるひずみ測定結果  
Internal strain of cast resin, measured with internal strain micro sensor.

$\gamma$  : ベースの変形抵抗によって生ずる  $\beta$  と逆向きのひずみの温度係数 ( $1/^\circ\text{C}$ )

{ } 内の 1~3 項まではゲージの零点移動になるが、温度補償型ゲージを用い、かつブリッジ結線しても完全にならなから温度校正をして補正を加える。素子に埋込んだ熱電対は、ひずみの補正を行なうとともに温度分布も測定する。 $\gamma=0$  とすることはできないが、 $\beta \gg \gamma$  であれば実用上問題は無い。アレイ型のベースが埋込まれた状態では、 $\beta \gg \gamma$  なる条件はほぼ満足されていると推定される。これは、たとえば断面積の非常に大きなカラーを細いボルトで締付けた場合、ボルトはほとんどカラーの変形抵抗とならずカラーと一身同体の動きをするのに似ている。ベース両端の円筒部の応力集中は大きい、円筒中心の平均ひずみを測定するうでは無視してもよい。

ベースの材質は Al、石英ガラス、アンバーなどを用いて測定したが、特性的に大きな差はないので Al ベースで現在は測定を行なっている。素子の温度特性を図 7.2 に示す。

## 7.2 内部ひずみの測定

外径約 500  $\phi$ 、内径約 100  $\phi$ 、高さ約 500 の円筒について、注型から硬化収縮を経て、ヒートサイクル、低温試験に至る内部ひずみの測定を行なった。測定結果の一例を図 7.3 に示す。これより、内部ひずみは円筒の基礎実験とどうよう、二次硬化後、気中放冷において  $T_g$  点近辺から急激にひずみを生じ、室温に至って生じたひずみはそのまま凍結されることがわかる。ヒートサイクル、低温試験における発生ひずみは、温度変化と軌を一にしていることがわかる。注型絶縁物の形状が大きく複雑になるほど、 $T_g$  点前後の温度制御に細心の注意を必要とする。われわれは、これらの実験データを基に製造

過程の温度のプログラムコントロールを行なっている。

温度対発生ひずみの関係の一例を図 7.4 に示す。実験室的に証明された硬化収縮時の温度対ひずみの関係が、このように大きな注型品の内部でも成立しているのは興味深い。

## 8. 光弾性による内部応力の解析

応力の実験的解析法として光弾性実験法がある。この方法は最近さらに適用分野を拡大しつつある。その理由は種々考えられるが

(1) デジタルコンピュータの出現で応力解析は飛躍的に進んだが、一方、容量、精度、費用、労力、時間などの面で限界もあり、逆に光弾性の有用性を見直す<sup>(7)</sup>結果になった。

(2) エポキシ樹脂の出現で光弾性感度の高いモデル、とくに三次元モデルの製作が容易になった。

(3) 新しい技術の発達、たとえばレーザを用いてスライスなしで 3 次元応力解析を行なう方法とか、高光弾性感度を有するゼラチンを用いて体積力による応力の測定を行なうとか、写真の多重露出によるモアレしまから直接主応力線を描く<sup>(8)</sup>とか、各種の計測器、デジタルコンピュータの応用など多数あげられる。

注型絶縁物は樹脂と充てん剤を混合して硬化させるものであるから、充てん剤を除いたクリアな樹脂のみで注型硬化させ、これを光弾性によって解析すれば、実体に加わる応力も明らかになる。プロトタイプ<sup>(9)</sup>の型を使って、光弾性モデルも充てん剤入りの実体も製作でき、モデルの応力分布から弾性定数と硬化収縮率の関係を用いて実体の応力分布を求めることができ、その点でも注型樹脂製品の応力解析を光弾性実験で行なうのは非常に妙味があるわけである。以下に解

析の一例を示す。対象は同じように GIS 用 PT である。

### 8.1 モデルの作成

製品は中空円筒の絶縁物の内部に同心円状に多くの導体を埋込んだものである。導体周辺の絶縁物の応力分布を調べるのがおもな目的である。モデルは導体を模擬する材料として Al とシリコンゴム の 2 種を選んだ。これは、導体が極度に硬い場合と軟らかい場合を代表させるものである。樹脂はもちろん充てん剤を抜いている。スライス前のモデルを図 8.1 に示す。また、このモデルを図 8.2 に示すように軸と平行にスライスした。スライス後に水をつけて #400 のサンドペーパー

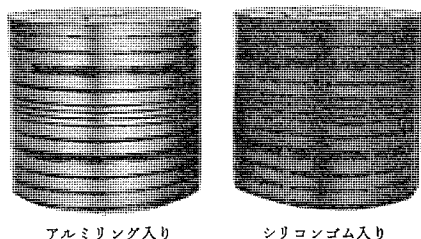


図 8.1 光弾性用モデル  
Photoelastic model.

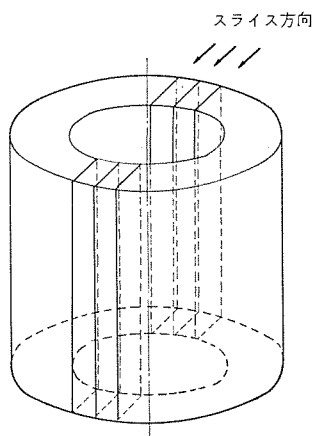


図 8.2 モデルのスライス  
Slice direction of model.

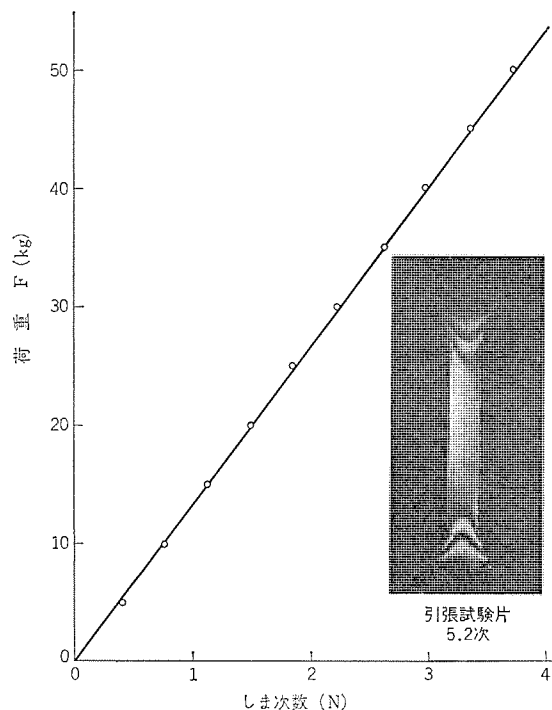


図 8.3 光弾性感度特性  
Photoelastic sensitivity.

で切削面を研磨した。この樹脂の光弾性感度特性を図 8.3 に示す。

### 8.2 測定

スライスした試料は浸漬液 ( $\alpha$ -モノブロムナフタレン 500 : 流動パラフィン 172.3 各重量比) に浸漬し、理研製大口径透過型光弾性実験装置にかけて測定した。測定の手順は

#### (1) 等色線の測定

光弾性実験の実験の基本は等色線の測定である。全体の模様は写真撮影によって得られるが、細部はルーペで正確な次数の読み取りを行なう。等色線の写真を図 8.4 に示す。

#### (2) 等傾線の測定

等傾線の測定は技巧を要する。通常は曇りガラス上に投影して、トレーシングペーパー上に筆写する。図 8.5 に等傾線を示す。

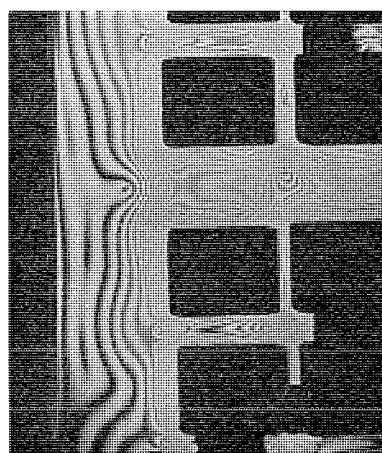


図 8.4 等色線  
Isochromatic lines.

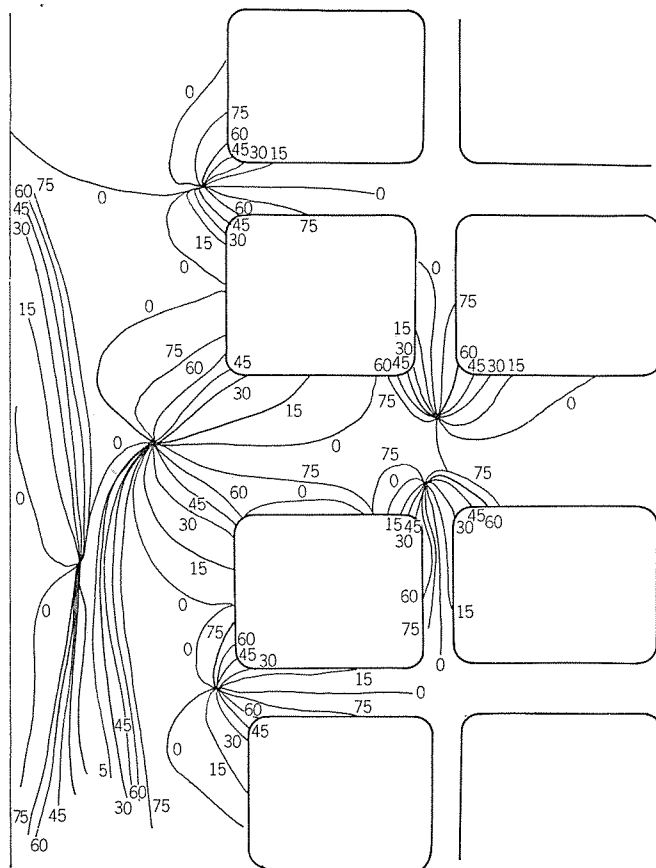


図 8.5 等傾線  
Isoclinic lines.

### (3) 主応力線図の作成

等傾線と等色線から主応力線図を作成する。なお、等色線と等傾線および主応力線図は大きなほうがよく、かつ、諸元はまったく同じに取ると便利である。主応力線図を図 8. 6 に示す。

### 8. 3 計 算

光弾性のデータ解析は種々の方法があるが、いずれもかなりやっかいである。われわれは図式積分法の中でも一般的な shear difference method を採用している。この概略の理論は下記に示す。

二次元平面内（スライス後の薄片は二次元とみなす）の応力の釣合条件式は図 8. 7 の座標における微小要素について式をたてると、

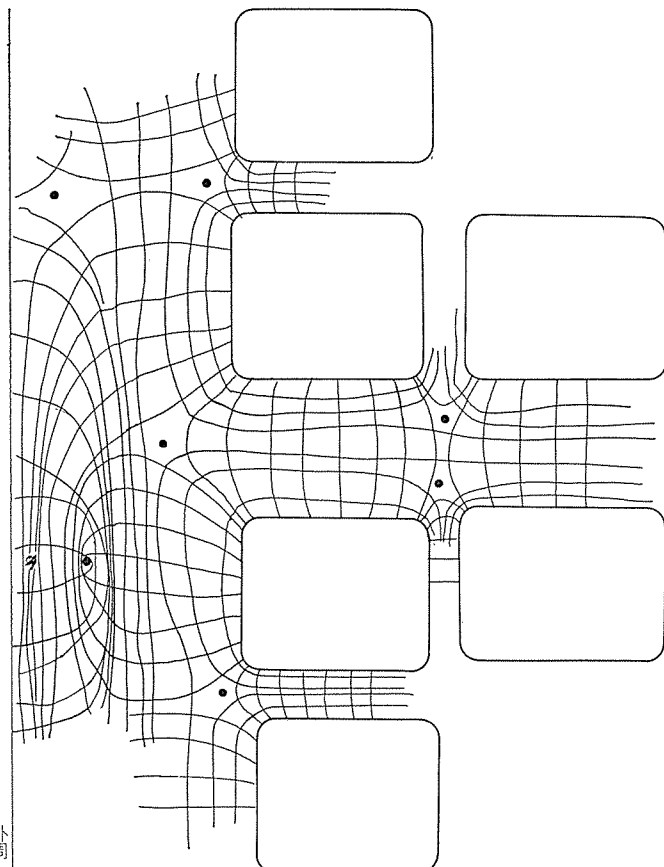


図 8. 6 主応力線図  
Stress trajectories.

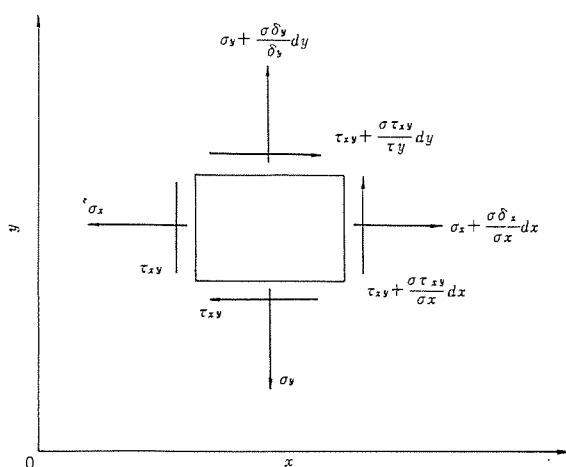


図 8. 7 二次元応力の釣合い  
Stresses equilibrium in two dimensional coordinate.

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} &= 0 \\ \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} &= 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (8.1)$$

ここに、

$\sigma_x$ :  $x$  方向直応力  $\sigma_y$ :  $y$  方向直応力

$\tau_{xy}$ :  $x$  または  $y$  方向せん断応力

式 (5. 4) を積分すれば

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \sigma_{x_0} - \int_{x_0}^x \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} dx \cong \sigma_{x_0} - \sum \frac{\Delta \tau_{xy}}{\Delta y} \Delta x \\ \sigma_y &= \sigma_{y_0} - \int_{y_0}^y \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} dy \cong \sigma_{y_0} - \sum \frac{\Delta \tau_{xy}}{\Delta x} \Delta y \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (8.2)$$

であるから、右边を図式積分すれば  $\Sigma ( )$  の分は直接求められる。 $\sigma_{x_0}$ ,  $\sigma_{y_0}$  は基準点の応力であるが、これは自由境界の値から容易に決定することができる。なお、以下の関係式も重要な式として使われる。

$$\left. \begin{aligned} \tau_{xy} &= \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_2) \sin 2\phi \\ \sigma_y &= \sigma_x - (\sigma_1 - \sigma_2) \cos 2\phi \\ \sigma_1 &= \frac{1}{2} \{ (\sigma_1 + \sigma_2) + (\sigma_1 - \sigma_2) \} \\ \sigma_2 &= \frac{1}{2} \{ (\sigma_1 + \sigma_2) - (\sigma_1 - \sigma_2) \} \\ \sigma_1 + \sigma_2 &= \sigma_x + \sigma_y \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (8.3)$$

ここに、

$\sigma_1, \sigma_2$ : 直交する 2 主応力  $\phi$ : 等傾線から定まる角度

これらの計算は表を作成して計算するのであるが、労力と時間を要するので、あまり多くの個所を微小積分区間で計算することはいきない。そこで、われわれはこれらの計算を行なうための計算機のプログラムを作成して実用している。概略のフローを図 8. 8 に示す。なお、現在ではさらに精度を上げ、応力分布をプロッターで描けるようにプログラムを改良中である。解析結果の一例を図 8. 8<sup>(9)</sup>に示す。

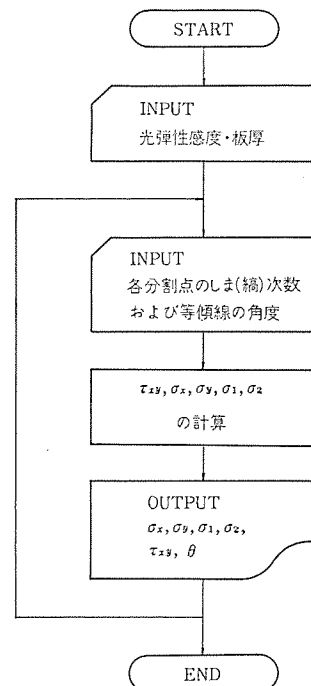


図 8. 8 光弾性応力解析用フローチャート  
Flow chart for data analysis of photoelastic experiment.

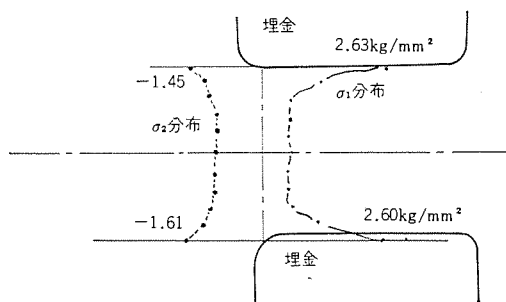


図 8.9 主応力分布の一例  
Example of principal stresses distribution.

この結果をみると、注型樹脂の応力分布がいかに複雑で思いがけない個所に応力集中を生ずるかがよくわかる。シリコンゴム の環は Al 環の応力値の 1/2 以下であった。

## 9. む す び

GIS 用注型絶縁物の製造においてつぎのような点を詳細に検討し、500 kV までの絶縁物の開発・製品化に成功した。

(1) 注型用材料については使用する樹脂の硬化収縮が少ないものであり、Arced SF<sub>6</sub> ガスにより劣化しないものであること。また、作業性がよく、安定した品質となるものであること。

(2) 材料のうち、樹脂については芳香族系のものが総合的にすぐれており充てん剤が最も問題となること。

(3) 製造技術では材料自身のほか、製品形状、注型作業条件、型、装置に至るまで詳細な検討を加えるべきで、中でも注型作業条件がボイドや残留ひずみに影響を与えるのもっとも重要である。

(4) ひずみについては二次硬化後気中放冷して T<sub>g</sub> 点を通過後に急激にあらわれるが、その値は比較的小さい。よってこの時点の温度管理が重要である。

(5) 各種手法でひずみ測定の結果、ストレインゲージによる場合、内部ひずみ測定用素子による場合、光弾性による場合とも計算値によく一致するし、計算機による応力解析も精度がよい。

当社は GIS 用絶縁物の製造技術についてなおいっそう研究を進め、その品質の安定と生産性の向上に努めつつある。終わりにこの研究に参加協力された諸氏に紙上を借りて謝意を表する。

## 参 考 文 献

- (1) 吉川, 石川 : 注型応力に関する研究, 機械学会論文集 34 巻, 265 号
- (2) A. J. Bush : Modern Plastics, Feb. (143) (1958)
- (3) F. L. Wilson : Statistical Analysis of Thermal Shock in Disks, J. of Applied Physics, 39, No. 3
- (4) 島崎 : 有機酸無水物硬化 エポキシ樹脂の硬化収縮, 工業化学雑誌, 64 巻, 7 号 (昭 36)
- (5) 応力測定技術研究会編 : 応力測定法, 朝倉書店
- (6) O. C. Zienkiewicz & G. S. Holister : Stress Analysis, John-Wiley & Sons
- (7) Photoelasticity, Machine Design, Oct. 24, (1968)
- (8) A Procedure for Photographic Visualization of Stress Trajectories in Photoelastic Models, BBR, 6-'69
- (9) 志村, 高橋, 長野, 篠原 : 注型樹脂の内部応力解析, S 45, 電気学会連合大会



# 特許と新案

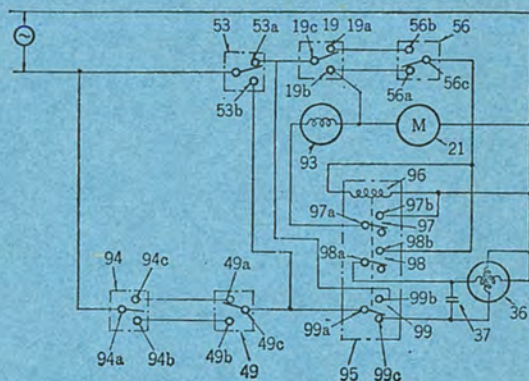
## 積算量記録装置

考案者 林 正之

この考案は、たとえば消費電力量の累積値を一方の数字車で計量して、これをたとえば1時間ごとに印字し、かつ1時間内の積算量を他方の数字車で計量して、これも同時に印字するようにした積算量記録装置の改良に関するものである。図において、(19)は1時間ごとに可動子が端子(19b)に切換わる切換スイッチ、(36)は可逆転電動機で、その正転によって一対の数字車が進められ、逆転によって一方の数字車が零復帰される。(21)は記録紙を移送する電動機、(93)は印字用电磁石コイル、(94)は発信スイッチである。今、発信スイッチ(94)の可動子が端子(94c)に切換わると電動機(36)が正転して一対の数字車を駆動する。電動機(36)の起動直後に切換スイッチ(53)の可動子が端子(53b)に切換えられ、また切換スイッチ(49)の可動子も端子(49b)に切換えられる。電動機(36)が1/2回転すると切換スイッチ(53)の可動子が端子(53a)に切換えられて、電動機(36)は停止し、この間、一対の数字車は1ピッチ進められる。発信スイッチ(94)の可動子が端子(94a)に切換われば、電動機(36)はふたたび正転し、上記と同様に一対の数字車を1ピッチ進める。一方、切換スイッチ(19)の可動子は端子(19b)に切換わるので、そのときには電磁石コイル(96)が励磁されて電磁石コイル(93)が励磁され、か

つ電動機(36)が逆転する。電磁石コイル(93)の励磁によって一対の数字車の値が記録紙に印字され、また電動機(36)の逆転によって一方の数字車は零復帰される。同時に、電動機(21)も回転するので、記録紙が1ピッチ移送される。この考案によれば、数字車が駆動されているときには、印字動作および零復帰動作が行なわれることがなく、これらの動作が動字に行なわれることがない。

(登録実用新案第879668号)(幸島記)



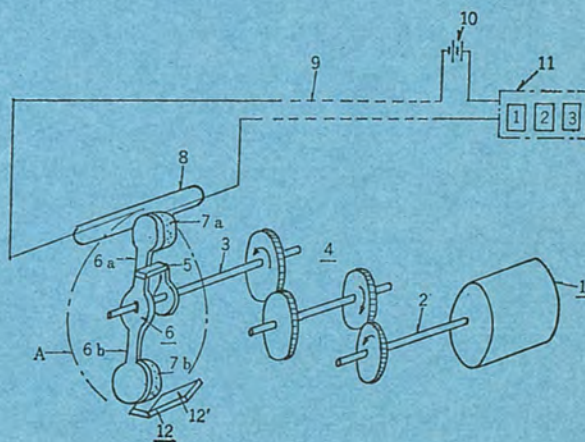
## パルス発生装置

考案者 武田 克巳・佐藤 安俊

この考案は、消費電力量などの負荷量に比例して回転される押し手により永久磁石を駆動して、リードスイッチを制御し、押し手の回転速度に関係なく一定幅のパルスを発生するパルス発生装置を提供するものである。

図において、(5)は負荷量に比例した速度で回転される押し手、(7a)(7b)は腕(6a)(6b)を介して水平軸(3)に回転可能に支承された永久磁石、(8)はリードスイッチ、(12)は鉄片である。今、押し手(5)によって永久磁石(7b)が鉄片(12)の近くまで回されると、永久磁石(7b)は鉄片(12)に吸引される。このとき、他方の永久磁石(7a)がリードスイッチ(8)と対向してこれを制御し、パルスが発生する。このように、一方の永久磁石が鉄片に吸引されるときに、他方の永久磁石によってリードスイッチが制御されるから、押し手(5)の回転速度、すなわち負荷量に関係なく一定幅のパルスを得ることができる。

(実用新案第873090号)(幸島記)



## 積算量記録装置

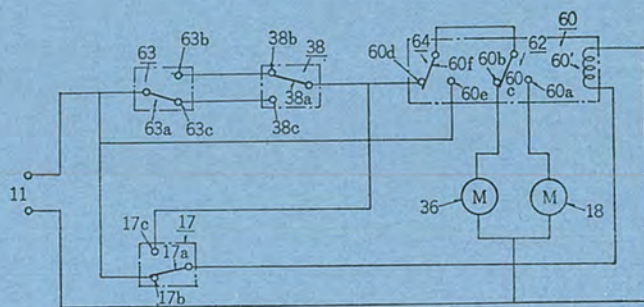
考案者 益田 鑑五

この考案は、負荷量たとえば電力量を積算し、かつこれを所定時間ごとに記録紙に印字するようにした積算量記録装置の改良に関するものである。

図において、(18)は印字用および記録紙送り用ならびにカーボン紙送り用電動機、(36)は積算数字車を駆動する電動機、(17)は所定時間ごと、たとえば24時間ごとに切換え動作を行なう切換えスイッチ、(63)はたとえば電力量に比例した速度で動作する発信スイッチである。今、発信スイッチ(63)の可動子(63a)が接点(63b)に接触すると、電動機が回転して数字車を1ピッチ進める。数字車が1ピッチ進むと、切換スイッチ(38)の可動子(38a)が接点(38c)に接触するから、電動機(36)は停止する。発信スイッチ(63)の可動子(63a)が接点(63c)に切換わると、電動機(36)はふたたび回転し、数字車をさらに1ピッチ進める。このようにして発信スイッチ(63)の動作量、すなわち負荷量は数字車で計量される。次に、所定時刻になると切換スイッチ(17)の可動子(17a)が接点(17c)に切換わり、このときに発信スイッチ(63)の可動子(63a)と切換スイッチ(38)の可動子(38a)が通電状態でなければ、リレー(60)は消勢されて、可動子(60b)

(60f)が接点(60a)(60e)に切換わる。したがって、電動機(18)が回転し、数字車の値は記録紙に印字され、印字後、記録紙は1ピッチ送られる。この考案によれば、電動機(18)の回転による記録紙の移送動作中でも、発信スイッチ(63)が閉合すれば、ただちにこの送り動作は中止されて他方の電動機(36)が起動されるから、そのときの発信量は数字車で計量され、発信スイッチ(63)の発信量は正確に計量される。

(登録実用新案第873085号)(幸島記)



## 電動ポンプ装置

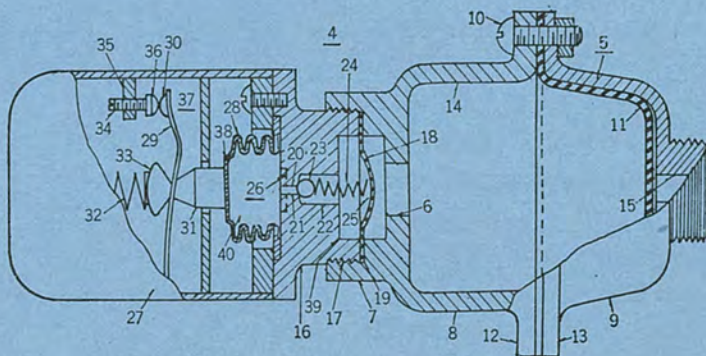
考案者 佐々 静男・早田 作平

この考案は、揚水を貯蔵する圧力タンクをなくし、給水せん(栓)の開閉によって、ポンプの運転を制御するようにした電動ポンプ装置の改良に関するものである。

図において、(5)はダイヤフラム(11)によって、空気室(14)と水圧室(15)に分けられたきょう(筒)体で、水圧室(15)は給水管に連通している。今、給水せんを閉じると、給水管内の圧力が上昇するので、ダイヤフラム(11)が反転して空気室(14)内の空気を圧縮する。したがって、作動子(18)が押圧されて、弁球(23)を穴(20)に押圧するので、室(38)と(39)は小孔(21)を介してのみ連通し、この小孔を通して室(39)の油が室(38)に押し出され、所定時間後にばね(29)が反転して接点(30)(36)が開かれる。これによって、ポンプの運転が停止する。次に、給水せんを開くと、給水管内の水は放出されるから、給水管内の圧力が低下して、ダイヤフラム(11)は図示位置に復帰する。これに伴って作動子(18)も復帰するから、弁球(23)が穴(20)からはなれ、作動子

(29)はばね(32)によって復帰する。したがって、接点が開閉してポンプは起動される。この考案によれば、給水管内の水が弁装置(26)に触れることがないので、さびることがない。

(登録実用新案第855139号)(幸島記)



## ポリビニルホルマールの分子運動

飯坂 捷義\*・柴山 恭一\*\*

## Molecular Motion in Polyvinylformal

Central Research Laboratory Katsuyoshi IISAKA・Kyoichi SHIBAYAMA

Polyvinylformal is high molecular compound well known as having outstanding impact strength and abrasion resistance at a temperature below the glass transition. This article is to make clear of molecular motions in the polyvinylformal at low temperatures relative to the toughness of glassy polymers.

Dynamic, mechanical and NMR measurements have been made with partly acetylated polyvinylformals having different degrees of formylation and commercial polyvinylformals modified with different amounts of phenolic resins. It has been found that the ring structure of the formal group complicates the molecular motion at low temperatures, and the motion is not affected by the network structure. This motion seems to be due to oscillation of the main chain around the local equilibrium configuration and to be correlated with the high toughness of polyvinylformal.

## 1. ま え が き

現在、高分子物質は、電気絶縁材料や構造材料として広く利用されている。それは高分子物質が低分子物質と比べて、特異な熱的・力学的・電気的性質をもっているからである。これらの物理的性質は、高分子の構造と分子運動によって支配され、今日まで各種の高分子物質について多くの物性研究が積み重ねられている。高分子物質は低分子物質にはない著しい時間効果、すなわち緩和現象を示すので、重要な関係にある高分子の分子運動研究はきわめて重要である。分子運動の十分な理解なしには、材料力学や誘電特性を論ずることはできないであろう。

高分子物質の分子運動に関しては、高温側から流動領域での高分子の重心の変位をとまなうマクロブラウン運動、ゴム領域での高分子鎖セグメントのミクロブラウン運動、ガラス領域での側鎖の運動および主鎖の局所的運動に分類される。これらのうち流動領域およびゴム領域の分子運動に関しては、理論的および実験的に多くの研究があり、かなりの理解に達しているが、ガラス領域の分子運動に関して、特にflexibleな側鎖を含まない高分子の分子運動についての知識はきわめて少ない。高分子物質が工業材料として各種の用途に利用されるとき、高分子はガラス状態にあることが多く、ガラス状態での実用的性質、特に機械的性質のいかに高分子物質の価値を決めるものといえよう。

ガラス状態における性質を改良するために、高分子のブレンドや共重合などの手段が行なわれているが、単独重合体においても主鎖に固有の性質からガラス状態ですぐれた性質を示すものがある。ポリビニルホルマールは強じん(靱)で耐摩耗性のすぐれたものとして、電線材料に広く使用されている代表的な高分子である。これは図1.1に示すようにホルマル結合による主鎖の特異性がガラス状態における分子運動を複雑にし、その反映である各種の物理的性質に影響を与えているものと考えられる。

高分子のガラス状態で示す強じんさを分子運動の観点から解明しようとして、ポリカーボネート<sup>(1)</sup>・ポリイミド<sup>(2)</sup>・スチレン共重合体系<sup>(3)</sup>などの各種の主鎖構造をもつ高分子が研究され、低温での分子運動がガラス状態での強じんさと関係があると結論された。ポリビニルホルマール

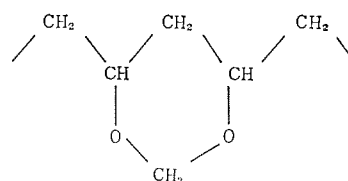


図 1.1 ホルマル結合  
Formyl linkage.

について、環構造をもつ特異な主鎖の化学構造と、ガラス状態での分子運動性との関係を理解することは、強じんな高分子を開発する指針を得るために有益である。

ポリビニルホルマールの力学的性質は、河合ら<sup>(4)</sup>によって主分散域に関し部分ホルマル化による結晶化度の影響を知ることを目的として詳しく調べられている。ここではガラスに近い状態での実用性質を理解するために、室温以下の挙動を主な対象として動力学的方法と広幅NMRによって調べた。部分結晶性の影響を受けないようにくふうした各種ホルマル化度をもつ線状高分子系についてホルマル結合が低温分子運動に及ぼす影響を、またポリビニルホルマールに各種重量%のフェノール樹脂を添加させた試料系について、網目構造がホルマル結合を含む主鎖の低温分子運動に及ぼす影響を知ることを主な目的として研究を行なった。

## 2. 実 験

## 2.1 試料の調製

各種ホルマル化度をもつ線状高分子系の試料調製を次のようにして行なった。すなわち表2.1に示す条件で平均重合度1,000のポリビニルアルコール(PVA)をホルマル化し、次に各種ホルマル化度をもつ

表 2.1 ポリビニルアルコールのホルマル化条件  
Formylation condition of polyvinylalcohol.

試料記号	試薬* (モル)	媒 体 (モル)	触媒 (モル/l)	温 度 (C°)	時 間 (h)
PVA-F-25	HCHO 0.25	H <sub>2</sub> O 28	HCl 3.0	45	6
PVA-F-50	HCHO 0.50	H <sub>2</sub> O 28	HCl 3.0	45	6
PVA-F-75	HCHO 3.3	$\begin{cases} \text{CH}_3\text{COOH} & 7.7 \\ \text{H}_2\text{O} & 6.0 \end{cases}$	HCl 0.1	60	6

\* PVA 1 モルに対するモル数

表 2.2 ホルマル 化度  
Degree of formylation.

記 号	ホル マ ール 化 度
PVAc	0
PVAc-F-25	31.6
PVAc-F-50	52.6
PVAc-F-75	76.3

表 2.3 フェノール 樹脂添加量  
Additive weight of phenolic resin.

記 号	フェノール樹脂添加量 (wt %)
PVF	0
PVF-P-5	5
PVF-P-20	20

試料 1 部を 10 部の ピリジン-無水酢酸混合物 (2:1 容積比) とともに 100°C で 6 時間加熱して酢化した。また ポリ 酢酸 ビニル (PVAc) は常法により酢酸ビニルの パール 重合にて作製した<sup>(5)</sup>。測定用試片はホルマル 化物については 5% ピリジン 溶液を、また ポリ 酢酸 ビニル については 10% ベンゼン 溶液を プリキ 板上に塗布し、室温で 1 週間自然乾燥した後、80°C で約 2 週間真空乾燥することにより作成した。ホルマル 化度の測定は無水酢酸-ピリジン 法により OH 基による吸収が存在しないことを確かめた。表 2.2 に試料記号とホルマル 化度を示す。

ポリビニルホルマル (PVF) にフェノール 樹脂を添加して熱硬化性にした試料系の調製を次のようにして行なった。すなわち、表 2.3 に示すフェノール 樹脂重量 % を含むポリビニルホルマルの 15% フルフルール 溶液を プリキ 板上に塗布し、120°C、1 時間ついで 170°C、5 時間加熱処理してフィルム を作成した。ポリビニルホルマル は電気化学工業製 #201 (アセテート 分 7.0%, アルコール 分 10.5%) を、また フェノール 樹脂は日本ライヒホルド 製 プライオーヘン 5010 を使用した。

## 2.2 測定

粘弾性に関しては、岩本製粘弾性 スペクトロメータにより周波数 60, 30, 3 Hz にて -150°C から 200°C の温度範囲にわたって複素弾性率  $E'$  (貯蔵弾性率) および  $E''$  (損失弾性率) を測定した。

また NMR 性質に関しては、広幅 NMR 装置により共鳴周波数 17 MHz にて液体窒素温度から 150°C までの温度範囲にわたって吸収線の線幅および形状を測定した。NMR の実験に際しては、試料の乾燥を十分に行ない、また測定中に試料が湿気を含むことのないようにガラスアンクル 中に封入したものを使用した。

## 3. 結 果

図 3.1 および図 3.2 は、PVAc および PVAc-F-50 について各種周波数で測定した複素弾性率  $E'$  および  $E''$  の温度依存性を示す。PVAc 試料では、40°C 近辺の主分散 ( $\alpha$ ) のほかに -110°C 近辺に小さな副分散 ( $\beta$ ) が現われる。これに対してホルマル 化試料では、80°C 近辺の主分散 ( $\alpha$ ) のほかに 20°C ( $\beta$ ) と -90°C ( $\gamma$ ) の近辺に二つの分散が現われる。図 3.3 は同一周波数 3 Hz で比較した PVAc および各種ホルマル 化度をもつ試料についての  $E'$  および  $E''$  の温度依存性を示す。ホルマル 化度の高い試料ほど  $\alpha$  分散は高温側に、また  $\gamma$  分散は分散強度を増しながら高温側に移行する。ホルマル 化試料で見られる  $\beta$  分散は、PVAc の  $\alpha$  分散に相当する温度位置に現

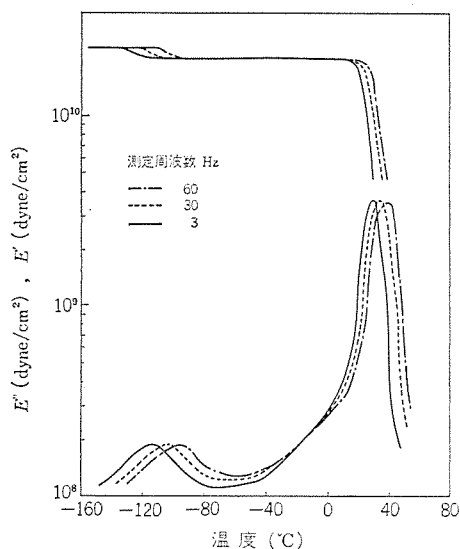


図 3.1 各周波数での試料 PVAc の粘弾性挙動  
Viscoelastic behaviors at each frequency for sample PVAc.

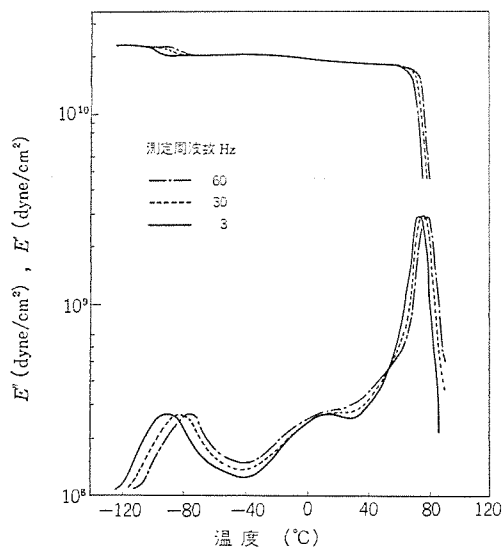


図 3.2 各周波数での試料 PVAc-F-50 の粘弾性挙動  
Viscoelastic behaviors at each frequency for sample PVAc-F-50.

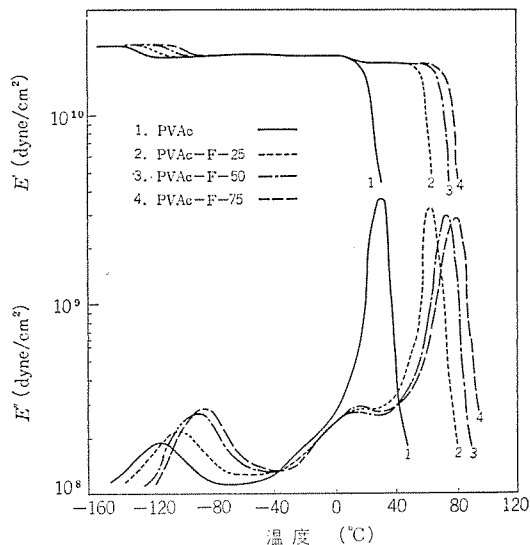


図 3.3 一定周波数 (3 Hz) での試料 PVAc, PVAc-F-25, PVAc-F-50 および PVAc-F-75 の粘弾性挙動  
Viscoelastic behaviors at a constant frequency (3 Hz) for PVAc, PVAc-F-25, PVAc-F-50 and PVAc-F-75.

表 3.1 試料 PVAc, PVAc-F-25, PVAc-F-50 および PVAc-F-75 の活性化エネルギー (kcal/mole).  
Activation energies in PVAc, PVAc-F-25, PVAc-F-50 and PVAc-F-75 (kcal/mole).

試料	$\gamma$	$\beta$	$\alpha$
PVAc	—	10.6	44
PVAc-F-25	10.9	69	91
PVAc-F-50	11.7	69	75
PVAc-F-75	12.5	55	83

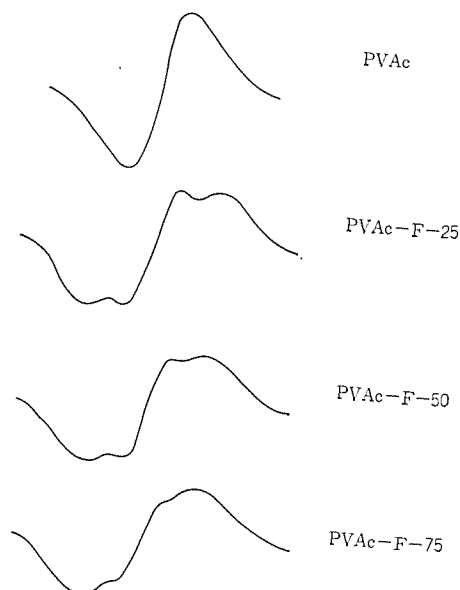


図 3.4 試料 PVAc, PVAc-F-25, PVAc-F-50 および PVAc-F-75 の液体窒素温度における実験微分吸収線  
Observed derivatives of absorption lines at liquid nitrogen temperature for PVAc, PVAc-F-25, PVAc-F-50 and PVAc-F-75.

われるが、この分散にはあまり ホルマル 化度の影響が見られない。

$E''$  極大の温度位置の周波数依存性から極大温度 ( $^{\circ}\text{K}$ ) の逆数  $1/T$  に対して周波数の対数  $\log f_m$  をプロットすると直線が得られる。この直線のこう(勾)配から、式 (3.1) に従って活性化エネルギーを求めることができる。

$$f_m = A \exp \frac{\Delta H}{RT} \quad (3.1)$$

ここに

$A$  : 定数

$\Delta H$  : 見かけの活性化エネルギー

表 3.1 は各分散について求めたそれぞれの活性化エネルギーを示す。 $\gamma$  分散に関して (PVAc では  $\beta$  分散に相当する。) 活性化エネルギーは 10 kcal/mole であり、ホルマル化度の増加とともにわずかながら大きくなっている。ホルマル化試料で観察される  $\beta$  分散の活性化エネルギーは、PVAc とホルマル化試料のそれぞれの主分散における値の間でいどとなっている。

図 3.4 は、PVAc および ホルマル 化度の異なる各試料の液体窒素温度における NMR 微分吸収曲線を示す。ホルマル化試料の吸収線は、液体窒素温度で広幅・狭幅 2 成分系を示し、それぞれ約 14 および 5 ガウスの線幅値をもつ。ホルマル化度の増加とともに広幅成分の割合は、増加するがそれぞれの線幅値に変化はない。PVAc は液体窒素温度で約 5 ガウスの線幅値をもち、ホルマル化試料の狭幅成分の線幅と同程度の値をもつ。

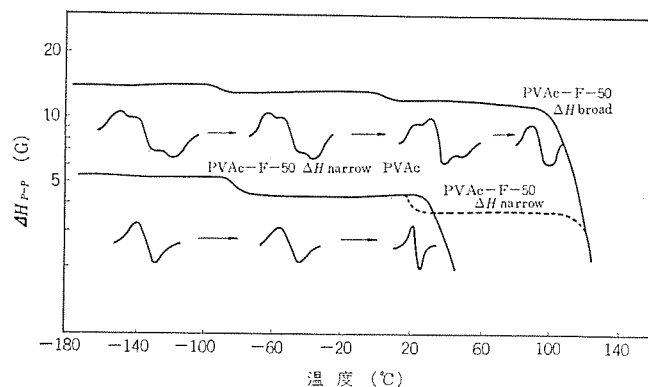


図 3.5 試料 PVAc および PVAc-F-50 の NMR 吸収線の線幅と形状の温度変化  
Temperature variation of NMR line width and shape for sample PVAc and PVAc-F-50.

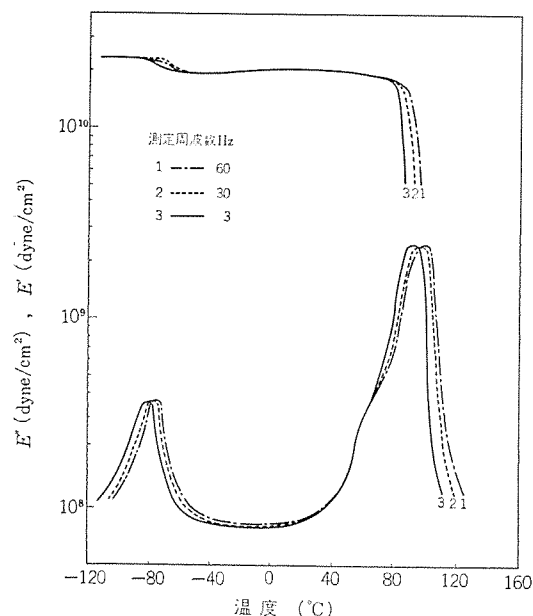


図 3.6 市販 ポリビニルホルマル (PVF) の各周波数での粘弾性挙動  
Viscoelastic behaviors at each frequency for commercial polyvinylformal (PVF).

図 3.5 は、PVAc-F-50 および PVAc の NMR 吸収線の形状と線幅の温度変化を示す。ホルマル化試料は、温度の上昇とともに吸収線の線幅値に大きな変化はないが、 $-80^{\circ}\text{C}$  近辺で狭幅成分の強度が数 % 増加する。一方、PVAc は同じ温度域で線幅が約 1 ガウス減少する。NMR において  $-80^{\circ}\text{C}$  近辺で見られるこのような変化は、粘弾性における  $\gamma$  分散に相当するものと考えられる。さらに高温で PVAc が大きな線幅狭化を示す温度域で、ホルマル化試料は広幅・狭幅成分の線幅がそれぞれ約 12 および 3 ガウス程度まで減少し、また狭幅成分の割合は増加する。大きな線幅転移のおこる直前では、吸収線の形状は一分系となり分解されなくなる。

図 3.6 および図 3.7 は市販のポリビニルホルマル (PVF) および PVF にフェノール樹脂を添加した試料 PVF-P-20 について、各種周波数で測定した  $E'$  および  $E''$  の温度依存性を示す。PVF 試料では  $90^{\circ}\text{C}$  近辺の主分散のほかに  $-80^{\circ}\text{C}$  近辺に小さい副分散が現われる。図 3.8 は、同一周波数 3 Hz で比較した PVF および各種重量 % のフェノール樹脂添加系についての  $E'$  および  $E''$  の温度依存性を示す。低温副分散はどの試料でも観察され、フェノール樹脂添加量の増加とともに分散強度は小さくなっている。また分散温度位置は、添加量

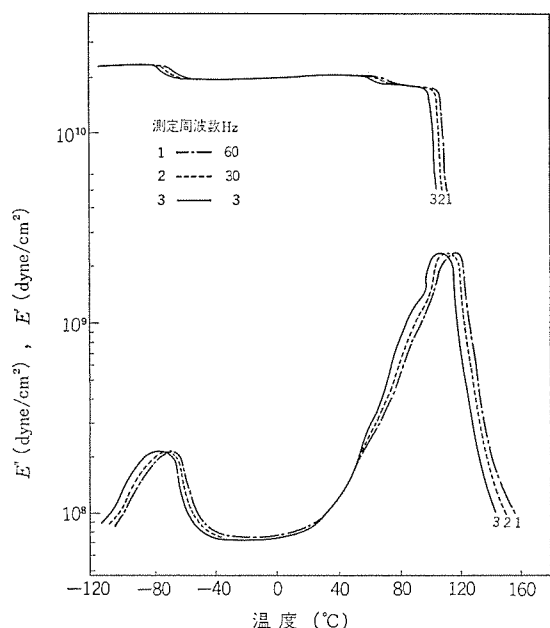


図 3.7 PVF-P-20 の各周波数での粘弾性挙動  
Viscoelastic behaviors at each frequency for PVF-P-20.

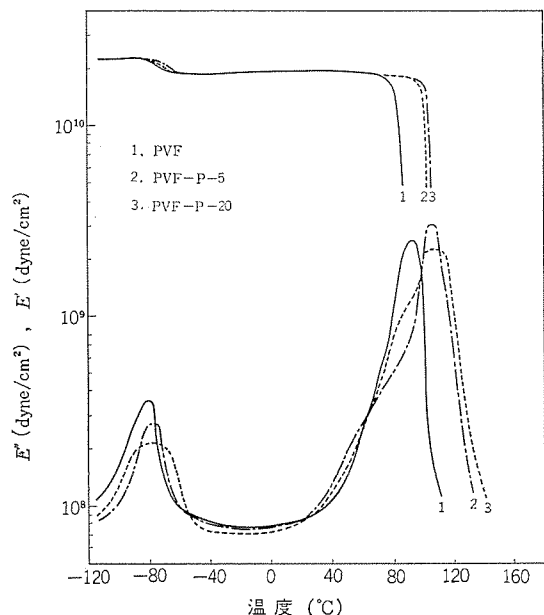


図 3.8 一定周波数 (3 Hz) での試料 PVF, PVF-P-5  
および PVF-P-20 の粘弾性挙動  
Viscoelastic behaviors at a constant frequency (3 Hz)  
for PVF, PVF-P-5 and PVF-P-20.

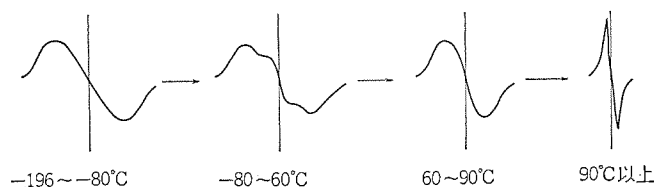


図 3.9 試料 PVF, PVF-P-5 および PVF-P-20 の  
NMR 吸収線の形状の温度変化  
Temperature variation of NMR line shape for sample  
PVF, PVF-P-5 and PVF-P-20.

にあまり依存せずほぼ同じである。主分散に関しては、フェノール樹脂添加量の増加とともに分散は広がりを見すが、温度位置はあまり変化しない。

液体窒素温度における NMR 吸収線の形状は、PVF およびフェノール樹脂添加物系試料ともいずれも約 15 ガウスの線幅をもった一成分

分散を示す。温度の上昇とともに図 3.9 に示すように、粘弾性の副分散に相当する温度域で吸収線の形状はひずんでくる。ひずみの程度は、フェノール樹脂の添加量の増加とともに小さくなっている。この温度域で吸収線の線幅は約 2 ガウスの減少を示す。さらに高温になって大きな線幅転移の起こる直前で、吸収線の形状のひずみはなくなる。

#### 4. 考 察

ホルマル化度の異なる線状高分子系で見られる  $\beta$  分散の位置、活性化エネルギーおよび NMR 狭幅成分の線幅から、PVAc と似かよったところがホルマル化試料に存在すると思われるが、試料の作成法および NMR 狭幅成分の線幅が、PVAc の大きな線幅狭化が起こる温度より高温で狭化することから、試料がポリビニルホルマルと PVAc とのブレンドであったり、また非常に長い酢酸ビニル連鎖を分子中にブロック的に含むとは考えられない。

NMR の結果から、ホルマル化度の異なる試料系において、部分的な運動が液体窒素温度ですでに存在することは明らかで、狭幅成分がホルマル化度とともに減少することから、この低温での部分的な運動は酢酸ビニルの側鎖の運動によるものと考えられる。

-90 °C 近辺に見られる粘弾性の  $\gamma$  分散はどの試料でも観察され (PVAc では  $\beta$  分散に相当する)、その活性化エネルギー値が約 10 kcal/mole であること、およびホルマル化度とともに増加していることから、主鎖自体の局所的平衡配位の近傍での振動によるものと考えられる<sup>(6)</sup>。粘弾性の測定結果から、この運動に関しホルマル化は  $\gamma$  分散を高温側へ移行させ、また鋭くさせる効果をもつといえる。

NMR において吸収線の形状が複雑な構造をもつ場合、試料系の分子運動の程度を観察するために、線幅の代わりに二次モーメントを計算すればよい。図 4.1 は、実験微分吸収曲線  $f'(\Delta H)$  から式 (4.1) に従って計算した PVAc-F-75 についての二次モーメントの温度変化を示したものである。

$$\langle \Delta H^2 \rangle = \frac{1}{3} \int \Delta H^3 \cdot f'(\Delta H) d\Delta H / \int \Delta H \cdot f'(\Delta H) \cdot d\Delta H \quad \dots\dots\dots (4.1)$$

ここに  $\Delta H = H - H_0$ ;  $H_0$  は共鳴中心

図から明らかなように -80 °C 近辺に  $3G^2$  ていどの減少が見られ、これは粘弾性の  $\gamma$  分散に相当するものと考えられる。この値は、ポ

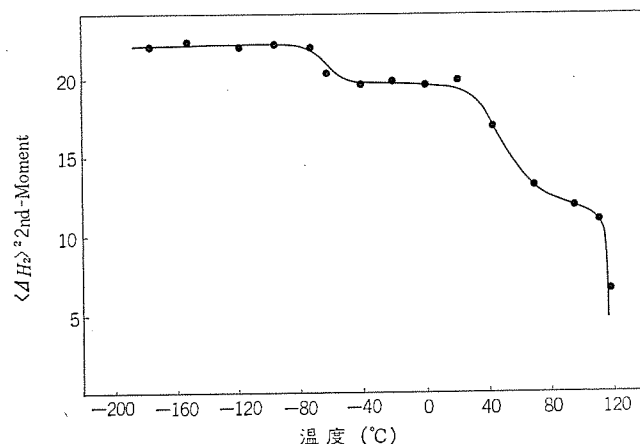


図 4.1 試料 PVAc-F-75 の NMR 二次モーメントの温度変化  
Temperature variation of NMR 2nd-Moment for  
sample PVAc-F-75.

リエチレンに関して  $-70^{\circ}\text{C}$  近辺で観察された局所的緩和モードによる二次モーメントの減少と同程度である<sup>(7)</sup>。

フェノール樹脂添加系で見られる低温の分散挙動は、添加量の増加とともに分散強度が小さくなっており、この分散は上述したものと同じホルマル結合を含む高分子鎖の局所的緩和モードによるものと考えられる。この低温分散に関して、フェノール樹脂添加量とともに分散強度が低下しているのは、ホルマル結合を含む高分子鎖の割合が全体として減少していることによると考えられる。一方、分散温度位置は添加量にあまり依存しないという事実は、この低温分子運動に関して網目構造は影響を与えないことを示している。このような粘弾性の低温分散におけるフェノール樹脂添加量依存性は、NMRにおいて添加量の増加とともに低温における吸収線のひずみの程度が小さくなることに相当し、NMRの結果は、粘弾性からの結論に支持を与えている。

ホルマル化度の異なる試料系で見られる $\beta$ 分散の内容に関しては、現在のデータから分子運動の様式を推論することは困難であるが、PVAcの主分散との類似性や活性化エネルギーがかなり大きな値をもつという事実から、エステル側鎖を含んだかなり大きな振幅の振動で、もしホルマル化によって生じた環構造がなければ、 $360^{\circ}$ 回転に至るようなもので、 $\gamma$ 分散とは質的に異なった内容のものと考えられることができる。 $\beta$ 分散に関してNMR二次モーメントの減少が、 $\gamma$ 分散と比べて約 $8\text{ G}^2$ のかなり大きな値を示す事実も、この分散が主鎖の回転にまでは至らないが、かなり大きな振幅の運動であることを裏づけている。

高温の主分散に関しては、ホルマル化度の異なる試料系において、ホルマル化は主鎖を剛直にすることが示される。またポリビニルホルマルにフェノール樹脂を添加した試料系において、 $E''$ 極大温度はフェノール樹脂添加量の増加とともにあまり上昇を示さないが、分散は広がる傾向にあり、このような挙動はポリビニルホルマル中に存在する橋かけ反応を行なう官能基のOH基量に制限があるため、フェノール樹脂のある添加量までは橋かけがおこるが、それ以上ではポリビニルホル

マルとフェノール樹脂とのブレンドとなっているものと考えられる。そしてこの場合に2種類の高分子は、完全な溶解がおこるほどに分子間吸引力が強くないことを示している<sup>(8)</sup>。

現在の粘弾性およびNMR測定から観察された低温での分子運動は、外部からの衝撃などによる機械的エネルギーを吸収し、緩和させる効果をもち、このためポリビニルホルマルがガラス状態で強じんさを示す原因となっていると考えられる。

## 5. む す び

耐衝撃性・耐摩耗性の良い新種の高分子を設計する指針を得るために、ガラス状態ですぐれた諸性質をもつ代表的高分子であるポリビニルホルマルの動力学およびNMR性質を調べた。各種のホルマル化度をもつ部分酢化ポリビニルホルマル、および市販のポリビニルホルマルに各種重量のフェノール樹脂を添加した試料系についての研究から、ホルマル結合は低温での分子運動を複雑にし、また低温での分子運動は橋かけによって影響されないことを知った。ポリビニルホルマルが、ガラス状態で示す強じんさは低温での複雑な分子運動が関連しているものと考えられる。

## 参 考 文 献

- (1) S. Matsuoka, Y. Ishida : J. Polym. Sci., Part C. 247 (1966)
- (2) 柴山, 田中 : 三菱電機技報 42, No. 12, 1,544 (昭43)
- (3) K. Shibayama, K. Iisaka : Repts. Prog. Phys. Japan, 11, 283 (1968)
- (4) H. Kawai : J. Colloid Sci., 17, 726 (1962)
- (5) 小室, 戸上, 二見 : 高分子化学 9, 1 (昭27)
- (6) 岡野 : 理研報告 40, 273 (昭39)
- (7) Glick, R. E : Polymer, 1, 340 (1960)
- (8) L. Nielsen : Mechanical Properties of Polymers, (1962), Reinhold Publishing Co.

## 三菱-BBC 低周波炉による鑄鉄溶解

田中 敬一・外山 隆・干場 俊昌

## Melting of Cast Iron with Mitsubishi-BBC Crucible Type low Frequency Induction Furnace

Nagoya Works Keiichi TANAKA・Takashi TOYAMA・Toshimasa HOSHIBA

For the melting of cast iron has been in most cases used a cupola. A low frequency furnace, however, has been developed of late so much that it will replace the old practice in a number of foundries. In a casting plant of the Company, Mitsubishi-BBC low frequency furnaces are installed for the melting operation and proved to be very effective in preventing public hazard as well as in economy. Particularly in the case of the Company's job, melting of gray cast iron (JIS FC 15 and 20) used for casting thin plates, work of relatively rare practice, is performed with these furnaces.

This article describes the excellent outcome of the low frequency furnaces through experiences and comments on practical operation of them for the reference to those who employ them in future.

## 1. ま え が き

鑄鉄溶解にはこれまで主としてキューポラが、小さな町工場から月産数千トンの大工場まで広く使用されてきた。キューポラの名は一般の人々にも親しまれ、鑄物工場の象徴の感さえあった。

しかし近年、低周波誘導炉が非常に発達し、鑄鉄溶解の強力な手段として注目されるようになった。当社名古屋製作所鑄造工場においても低周波炉の採用を検討してきたが、将来の鑄鉄溶解炉は低周波炉が主流になるであろうとの予想の下に採用を決定し、その第1号機として5tのつぼ型炉を44年2月に設置した。さらに現在建設中の新工場においては、溶解炉はすべて低周波炉の計画で進行中である。

当所が将来の溶解炉として低周波炉を採用したおもな理由は、

## (1) 材料費が節減できる

キューポラのように材料の大きさ、形状に制限がなく、自家発生のだらい粉やプレスくずが使用でき、melting lossも少なく、材料費が安くなる。

## (2) 公害がない

キューポラやアーク炉と比較して溶解時の煤煙の発生はほとんどなく、騒音も出ないので公害の心配がない。

## (3) 出湯に柔軟性がある

当所のように多材質で重量も非常に異なる製品を自動造型ラインで生産する場合、従来のキューポラやアーク炉では自動化は不可能だったであろう。低周波炉では材質変更が簡単にでき、時間当たりの溶湯所要量変動してもこれに対処することが容易である。造型ラインが故障した場合も、サプラインを持って溶湯を処理せねばならぬ心配が少ない。

## (4) 成分および出湯温度のコントロールが容易である

(5) 複数設置により、1基故障しても造型ラインを止めなくて済み、また交互出湯により連続的に出湯できる。

等であり、これらは広く認められている低周波炉のメリットである。

もちろん低周波炉を採用するに当たって問題も存在した。それはこれまで低周波炉が使われたのは主としてFC 25、30やDCI、合金鑄鉄等の溶解であり、われわれが必要とするFC 15、20の普通

鑄鉄への適用には疑問があったからである。特に薄肉鑄物に対しては、キューポラ溶湯にくらべ、チル、引けが発生しやすいといわれ<sup>(1)</sup>、この点のみきわめが最も頭を痛めた問題である。

名古屋製作所ではよく知られているようにアーク炉による強制脱酸鑄鉄「ダイヤナイト」を製造しており、この鑄鉄はCE値に対する強度が通常の鑄鉄より高く、したがって高炭素、高けい素による良好な鑄造性を有すると同時に必要強度を満足するものである。(キューポラで溶製する場合もアーク炉で強制脱酸精錬した再生鉄を用いるので、上記とほぼ同様な性質を持った湯が得られる)。このアーク炉溶解においても当初は薄肉鑄物においてチルが発生しやすく、このためスクラップ使用による経済性が認められながらも、適用性の面で問題があった。しかしその後の研究の結果、精錬により脱硫脱酸した溶湯に接種処理を行なうことにより解決できた経験がある。

低周波炉ではアーク炉と異なり精錬はできないが、酸素や硫黄の混入は少なく、適正なる化学組成と適切な接種により解決できるものと考え、その採用に踏み切った次第である。

低周波炉設置後は操業法について種々検討を加え、現在では薄肉鑄物のチル、引けはキューポラで溶解した場合とほとんど変わらない結果を得ている。一方経済上・公害防止上のメリットは予定どおり得られており、低周波炉の導入は成功したといえる。

まだ設置後1年経過したのみで、十分なデータはなく、今後検討すべき事項が多いが、低周波炉を用いた普通鑄鉄溶解の一例として第1報を報告する。

## 2. 三菱 BBC 低周波炉の構造と特長

当所で設置した5t炉の仕様を表2.1に、レイアウトを図2.1に示す。図2.2は炉体の構造を示す断面図である。低周波炉では高温の溶湯が100mm前後の耐火物を介して激しいかくはん運動を行っているため、堅固な構造、安全性および保守点検のやりやすさ等が炉の設計上重要な要因となってくるが、三菱BBC炉を使用してみても特に強調したい特長を述べることにする。

## 2.1 構造上の特長

(1) 溶湯の激しい揺動や飛散に対処するため堅固な鉄皮構造となっている。

表 2.1 5t 低周波炉の仕様  
Specifications of 5 ton low frequency induction furnace.

形 式	無鉄心水冷式つば形
用 途	鋳鉄溶解用
容 量	5 t
電 力	1,200 kW, 単相 60 Hz 1,500 V (max. 1,440 kW)
溶 解 能 力	2.0 t/h $\pm 10\%$
消 費 電 力	540 kWh/t $\pm 10\%$
炉 室 構 造	酸性耐火物乾式つき固め式
出 湯 方 式	油圧傾動式
冷 却 水 量	15 m <sup>3</sup> /h, 3 kg/cm <sup>2</sup>

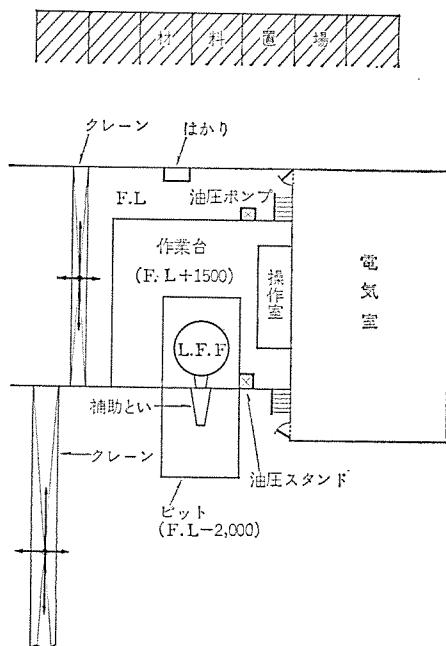


図 2.1 低周波炉配置図  
Layout of low frequency induction furnace equipment.

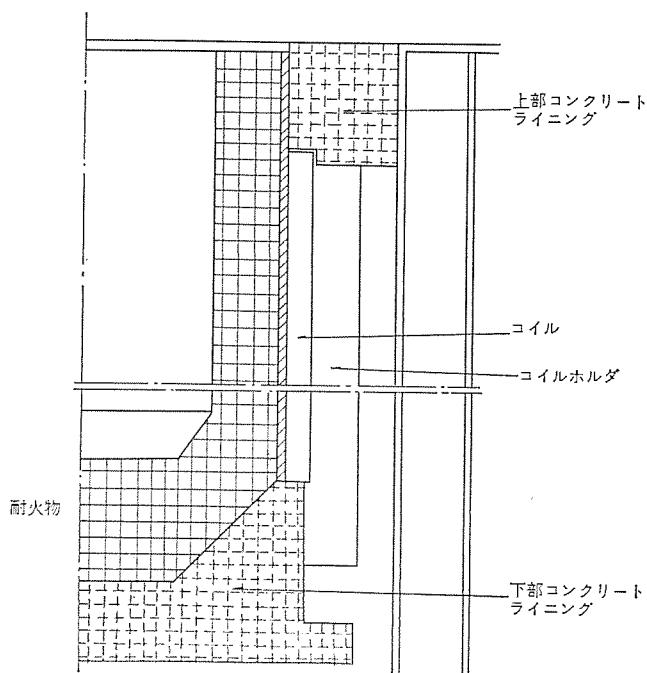


図 2.2 5t るつぼ型低周波炉炉体断面図  
Sectional diagram of a crucible type low frequency induction furnace.

表 2.2 鋳鉄用るつぼ型低周波誘導炉標準表  
List of standard crucible type low frequency induction furnaces for cast iron.

炉 容 量 ton	電 力		溶 解 能 力 (基 準 値)	
	定 格 kW	最 大 kW	出 湯 温 度 1,500°C 溶 解 量 t/h	所要電力量 kW h/t
0.8	320	380	0.48	671
1.5	450	540	0.76	593
2.0	550	660	0.97	569
3.5	800	960	1.44	554
4.5	1,000	1,200	1.87	534
5.0	1,200	1,440	2.26	531
6.0	1,400	1,680	2.68	507
8.0	1,800	2,160	3.55	498
12.0	2,500	3,000	5.02	491
16.0	3,200	3,840	6.52	490
22.5	4,250	5,100	8.67	488
30.0	5,200	6,240	10.72	485

(2) 溶湯の激しい揺動, 電磁振動および経年変化等によりコイル縮付がゆるむことのないよう鉄フレームにしっかり固定されている。

(3) くず物材料が多いので装入時にそれらが落下してコイルに付着せぬよう絶縁物がくふうされており, またコイルに露結せぬように湿気がコイルの外に容易に逃げるように考慮されている。

(4) 溶湯の激しい揺動, 加熱冷却の熱衝撃および侵食作用等により湯漏れが生じた場合, 冷却コイル部とアクティブコイル部の別々に湯漏れ警報が鳴るようになっている。

(5) 万一コイルくず間の絶縁物が焼損しても, コイルを引き出すことなく炉内で簡単に保修復換が可能である。

## 2.2 一般的特長

(1) 故障の場合は故障表示灯が点灯し, 自動的に主回路をシャ断するので安心して故障個所の修理にあたることができる。

(2) 操作方法が非常に簡単でほとんど手に触れなくてもすむことができる。

(a) 力率調整・保温等が自動的に制御される。

(b) 電圧タップ切換えも簡単で, 切換タップ番号がそのつど表示される。

(c) 停電等で電源がシャ断された場合には, 冷却水ポンプは予備電源あるいは非常電源により即座に切換えスイッチで再び始動できる。

(d) 冷却水・トランス・コンデンサー等の温度管理は温度計によって行なわれるが, 万一不具合の場合は警報が出され, 安全のため主回路がシャ断される。

(3) 炉容量に対して電力が大きく, 迅速な溶解が可能である。(表 2.2 参照)。

(4) 独特な築炉方式を採用しているので速く確実に, 少ない人工で行なうことができる。

## 3. 操業の実際

低周波炉はわが国における歴史が浅いので, その操業法はまだ十分確立されたものが少ないのではないと思われる。たとえば築炉ひとつとってみても湿式や乾式があり, (るつぼ型は近頃ほとんど乾式であるが) 乾式でも高純度の天然けい砂にホウ酸を粘結剤とし

て添加したものや、溶融シリカ単味で築炉するものなど各社各様の方法を採用している。また溶製法においても、原材料の種類と配合、加熱昇温速度、接種剤の種類と量、加炭剤の種類と歩とまり、炉前検査方法、溶解より出湯までの手順等が一定していない。

現在われわれの行なっている操業法もその一例にすぎないかと思うが、経験や種々の実験結果より判断してごく標準的操業法と考えられるので以下それらについて詳述する。

### 3.1 築炉法

#### 3.1.1 炉材

低周波炉用炉材に要求される条件は非常にきびしい。すなわち耐火度・軟化温度が高く、高温強度が大きく、耐スポーリング性にすぐれ、膨張係数、熱および電気伝導度が低く、また化学的にも物理的

表 3.1 Svenska silica (HF4) の粒度分布と化学成分  
Grain distribution and chemical analysis of svenska silica.

#### 粒 度 分 布

Mesh	10	14	20	28	35	48	65	100	150	200	270	Pan
%	8~12	9~13	2~5	14~18	4~8	6~10	4~8	3~7	3~7	2~6	8~12	11~15

#### 化 学 分 析

化学成分	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	CaO	MgO	Ig-loss
%	≥95	0.5	1.0	0.0	0.0	0.9

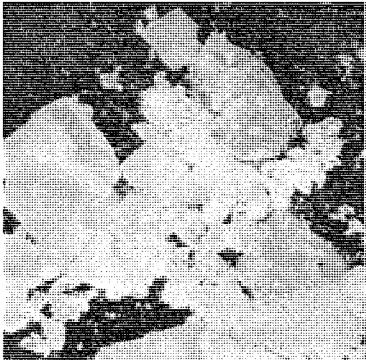


図 3.1 Svenska silica の粒形  
Grain shape of svenska silica.

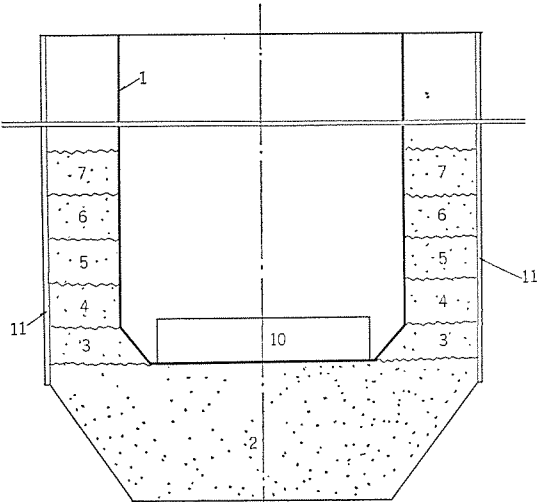


図 3.2 築炉の順序  
Procedure of refractory lining.

にも安定であること等が要求される。当所で使用しているのは、現在最もすぐれた炉材といわれている Svenska silica (HF 4) で、粒度分布・化学成分・粒形等を表 3.1 および図 3.1 に示す。

炉材の焼結剤としてはホウ酸を規定量添加し、小形コンクリートミキサーでいい砂とよく混合してから築炉に供する。

#### 3.1.2 築 炉

図 3.2 に示すように、炉底に必要な量の炉材 2 を投入し、電動バイブレーターによりスタンプを行なう。一度にスタンプする高さは 300 mm までとする。炉底のスタンプが終了すると芯形 1 を装入し、センタを出してから、スターティングブロック 10 を入れ、心形を完全に固定する。以下順次所定の高さまで炉材 3, 4, 5 ……を投入しスタンプしていく。上部は詰りにくいので心形の内側からも振動を与えて固める。築炉の際アスベスト板 11 が消耗している場合は取換える。また湯漏れ検出用ニクロム線 12 も短かければつぎ足し、あるいは取換えを行なう。

#### 3.1.3 大炉修

当所では作業上 1 週間サイクルで炉の湯を空にするので操業再開時には測定治具により炉壁、炉底の侵食状態をチェックし、ライニングの厚さが正規寸法の 2/3 を割った場合炉修を行なうことにしている。また亀裂については、ヘアークラックの場合は、スターティングブロックを装入して加熱すれば、炉材の膨張によりふさがるので問題はないが、ダライ粉のような粉体状の材料が装入されると炉材膨張前にそれがヘアークラックの中へ侵入する危険性があるので、溶解開始時は粉状の原料は使用しないようにする。亀裂で特に危険なのは横割れの場合でこの場合は直ちに炉修に入る。以上のような場合に炉修に入るのであるが、それにはまず旧ライニングの解体作業を行なわねばならない。解体作業はチップングハンマーを使用し、後述の小炉修ならば、ガラス状の焼結部分まで炉壁を落し、大炉修ではライニングを全部落すのであるが、コイルを傷つけないよう特に注意が必要である。

#### 3.1.4 小炉修

前項のように調査した結果、大炉修をするまでではないが、炉修を必要と認めた場合は小炉修を行なう。図 3.3 に示すように最も侵食される箇所は上部と下部 (A および B 部) である。前項の要領で局所的にライニングを落し、a および b の心形を装入し、炉材をスタンプしていく。特に心形 a の下部より炉材が落下せぬようにパ

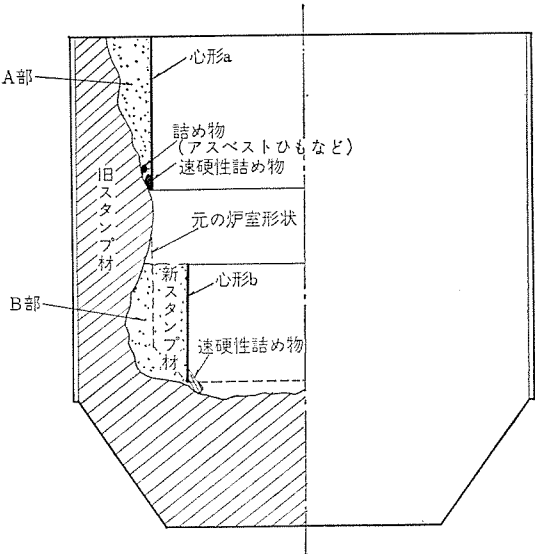


図 3.3 小炉修の方法  
Method of local repair of refractory lining.

表 3.2 炉修に要する時間(例)  
Time required for refractory lining.

	内 容	人 員	時 間 h	延 時 間 h	方 法
大 炉 修	旧 炉 壁 解 体	3	6	18	エアハンマー
	炉床つき固め	3	2	6	エアバイブレーター
	炉壁つき固め	3	3	9	エアバイブレーター エアハンマー
	出湯口つき固め	1	0.5	0.5	手
	計			33.5	
小 炉 修	旧 炉 壁 解 体	3	2	6	エアハンマー
	炉壁つき固め	2	1	2	エアバイブレーター エアハンマー
	計			8	

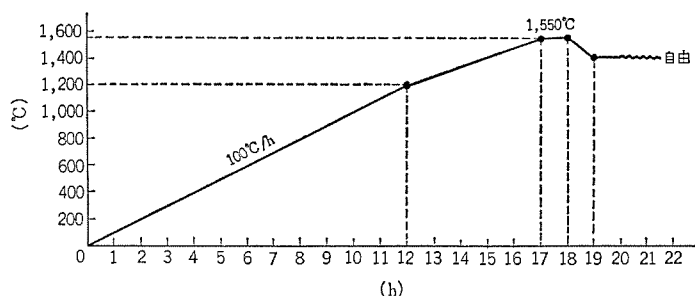


図 3.4 焼結加熱温度  
Time-temperature diagram of heating.

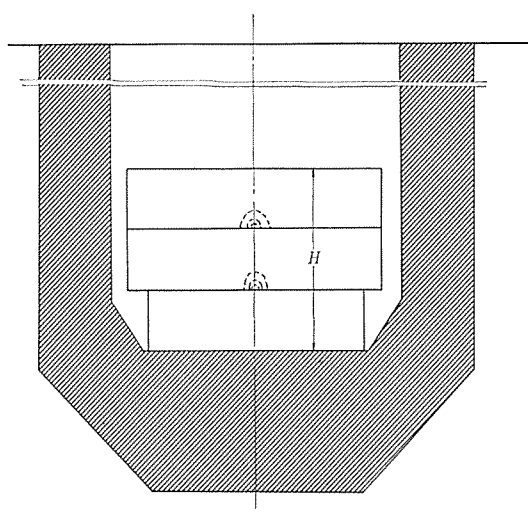


図 3.5 スターティングブロックの置き方  
Setting of starting blocks.

チング材を詰めておくで築炉がやりやすい。

表 3.2 に炉修に要する時間の例を示す。

### 3.1.5 焼 結

炉材をスタンプしたならば焼結溶解を行なってライニングを焼結するが、スターティングブロックを アクティブコイル の上端の高さまで重ねて、図 3.4 に示す順序で加熱していく。この操作には自動温度調節器を使用すると便利である。心形はこのまま溶解する。通常の使用温度より高い温度で 1 h 保持して焼結を行ない、その後出湯する。このあと 4 日間はできるだけ炉を休止させずに操業することが望ましい。

## 3.2 溶解操業法

### 3.2.1 スタート方法

スタート時には図 3.5 のようにスターティングブロック（あまり湯であらかじめ錆込んでおく）を装入し、電力をかける。ブロックの大きさはできるだけ大きくとり、炉内径いっぱいなのが最も効率よく溶解されるが、装入時の問題もあるので普通は内径より 100 mm 位小さめ

表 3.3 地金配合割合  
Charge materials.

電気鋼板くず	返り材	せんドライ粉	加炭剤	Fe-Si
50~60 %	20~30 %	10~20 %	1.3~2.2 %	0.6~1.6 %

表 3.4 1 回装入量と経済性  
Economical quantities of one batch of charge materials.

装 入 量 kg	消 費 電 力 量 kW h/t	溶 解 速 度 t/h
300	563	1.67
500	563	1.72
750	620	1.42

のブロックを使用している。厚みは適当に考えてよいが、あまり薄いと何枚も載せなくてはならないので 200 mm のものを用いている。全高さ  $H$  は炉の条件により若干異なる。炉修後焼結の場合は前述したが、通常の冷材溶解の場合は炉の深さの 1/3 程度の高さが必要である。このブロックの上にはできるだけ大きな材料を載せておくべきで、ドライ粉のように粉状の材料は前述のようにヘアークラックに侵入し、クラックを増大させる危険性がある。

### 3.2.2 材料装入

当所で使用している原材料と配合割合を表 3.4 に示す。モーターのコアの打抜きくずである電気鋼板くずが主体であり、これにドライ粉と返り材を併用し、新せん(銑)はまったく使用していない。加炭剤は電極くずである。

各材料は底開きバケットへバケットリフトトラックにより装入され、台はかりでひょう(秤)量されてからクレーンで炉に投入される。1 回の装入量は表 3.5 の実験結果に基づき、500 kg (炉容量の 1/10) で、数回に分けて行なう。

炉への装入順序としては、1) せんドライ粉、2) 電気鋼板くず、3) 返り材となっている。ドライ粉を最初に装入する理由は、1) 装入時の湯の飛散が少なく安全である。2) 最後に装入すると湯の上に浮き、なかなか溶けこまずにたなつりの原因となる。返り材を最後に装入する理由は、1) 上部より mass の大きいもので押し込み溶解速度を上げる、2) 最初に装入すると湯の飛散が激しく危険である。

追加装入は、冷材からスタートの場合はスターティングブロックが、連続の場合は、前の材料が溶け落ちる直前に行なうのが好ましい。

### 3.2.3 加熱方法

冷材からスタートした場合は、1/3 程度の湯量ができるまではフルタップ(最大電力)の 1/3 の電力で行ない、所定の湯量ができたらフルタップにして操業を行なう。また連続溶解の場合は、前に装入した材料が溶け落ちた時点で次の装入がすばやく行なわれ、昇温は最後の材料が溶け落ちてから行なう。

### 3.2.4 加炭剤、合金鉄の添加

加炭剤はできるだけ最初の装入時に行なうのがよく、炉上面まで湯ができてから表面に散布しても加炭はなかなか進行しない。加炭材としては黒鉛化したものが好ましく、電極くずが現在では最も良好な加炭剤である。しかし電極くずでも一次黒鉛化だけのくずが入っていると歩とまりは劣化する。

合金鉄は最後の材料装入時に行なうが、湯の表面に添加しても歩とまりがよいので最後の微調整に便利である。

表 3.6 は加炭剤、合金鉄の歩とまりの実績を示すが、加炭剤は

表 3.5 加炭剤と合金鉄の歩とまり  
Yields of additives.

材 質	加 炭 材	合 金 鉄
FC 15~20	85~90 %	98 % 以上
FC 25~30	90~95 %	98 % 以上

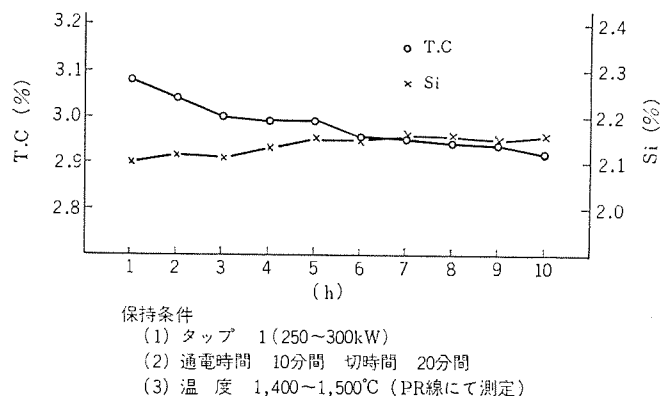


図 3.6 溶湯保持による化学成分の変化  
Changes of chemical analysis of molten metals during holding.

最初の装入時に添加した場合はほとんど 100 % に近いと考えてよく、後からの微調整添加と平均すると表のようになる。

### 3.2.5 炉前検査

炉前検査は、CE メータと Si メータの併用により出湯前に迅速に行なう。もちろん破面テストも行なうが、キューボラにくらべて湯面模様が出にくく、破面もいくらか異なる。

CE メータは過共晶組成では測定困難であるから、成分調整の Fe-Si を添加する以前、すなわち亜共晶組成で CE 値の測定を行なって C 量を求めたあとで Fe-Si を添加する。こうすれば FC 15 でも適用できる。この方法は低周波炉の成分調整が容易という利点を生かしたものである。

### 3.2.6 除 滓

炉前検査および測温の結果良好と判断すると炉の小ぶた(蓋)を開放し除さい(滓)剤を投入して黒鉛のスコップでスラグをすくい上げる。十分除さいしておかないと湯面の耐火物が侵食される率が非常に多くなり、また出湯後スラグが炉壁に付着して次の溶解能率を妨げる。この作業は低周波炉操業における最も高熱下で労力のいる仕事であり、現在除さい装置を伊丹製作所で開発中である。

### 3.2.7 出湯量と残湯量

出湯量は造型場からの所要量およびその時期により変化するが、一般には溶解量の 1/3 出湯するのが連続溶解の場合最も経済的であるといわれている。これは 2/3 残湯に対し、1/9 の地金を装入したとき残湯が凝固せず、パワーがよくかかるので溶解速度を上げることができる。所要量によっては 1/2 あるいは 2/3 出湯することもあるが、少なくとも 1/3 の残湯が必要である。

### 3.2.8 接 種

チル防止、強度向上には接種が効果的である。キューボラとは材質的に多少異なるので接種剤も変え、実験結果より Ca-Si と Fe-Si を 50 : 50 で混合して使用している。また接種時期は湯によくとけ込むよう出湯の際に行なう。

### 3.2.9 保 温

造型ラインの故障、休憩、2 シフトの間等で保温を行なう必要が生じてくる。保温を行なう場合の注意は湯温ができるだけ低いほうが

よいことである。湯温が高いと耐火物の侵食が激しく、炉の寿命が短くなる。しかし出湯直前に造型ラインが故障の場合は、その復旧時間を即座に推定し保温条件を決定してできるだけ低温で保温するよう考慮せねばならない。

保温の際心配なのは長時間保持した場合の溶湯の性質の変化であるが、化学成分について調べた結果を図 3.6 に示す。多少脱炭するとともにけい素が増加するが、実用上問題のない程度である。これも溶湯の C, Si 含有量により異なる。チル化傾向、機械的性質もサンプルのばらつきを越える変化は認められなかった。

### 3.3 故障と対策

前述したように安全上、故障防止上十分考慮した設計になっているので、故障はほとんど起こらないと思うが、標準作業を守らないと故障を誘発する原因となるので十分な注意が必要である。当所もこれまでほとんど故障が発生していないが、ここでは発生しやすい故障と予防方法について説明する。

#### (1) 湯漏れ

湯漏れは重大事故に結びつくので十分な予防対策が必要である。すなわち溶解スタート前に炉径をゲーシによりチェックし、亀裂状態をよく観察し、次の溶解サイクル中十分耐え得るかどうかを判断する。炉壁の厚さは薄くなるとリアクタンスが変わるが、コンデンサ容量がランプで表示されているので、それと炉壁厚さの関係をあらかじめ調査しておき、溶解中はパイロットランプを十分観察することがたいせつである。万一湯漏れが生じた場合は湯漏れ警報が鳴り自動的に主回路がシャ断される。その際出湯をすばやく行なえば事故は未然に防止することができる。いずれにしても炉壁厚さおよび亀裂状態のチェックを怠ったり、必要以上の高温溶解を行なうようなことをすれば湯もれの危険性が出てくる。

#### (2) 冷却水

予備電源は必ず持たねばならない。停電時には迅速に予備電源に切り換え、冷却水用ポンプをまわして水路を確保すると同時に停電時間を判断して必要と認めた場合は出湯を行ない、炉中で湯を凝固させないようにする。また冷却水ポンプは二基設けておくこと故障の場合迅速に切り換えることができる。もし炉中に湯がある場合とか出湯後 4~5 時間は冷却水路を確保してやらないと、コイル間の絶縁物が焼損したり、コイル全体がひずんでしまうので修復するのに非常に時間と費用がかかる。停電の場合、水道水を導くようにしておくこと、水道水でも 30 min は絶縁物を焼かずにすむので便利である。したがって操業中の冷却水の流量、水温等に不具合が生じた場合は警報が鳴ると同時に主回路がシャ断され、安全を期するようになっていく。

このほかにも予想される故障とその予防安全装置があるが、以上の二点が重大な事故に結びつく要因である。いずれにしても事故を未然に防止するには標準作業を守り、日常の保守点検を行なっていれば、前述の安全装置が設けられているので安心して操業を行なうことができる。

## 4. 経 済 性

低周波炉とキューボラで溶解した場合の溶湯コストの比較を表 4.1 に示す。表ではキューボラの場合の総計を 100 として比較しているが、低周波炉の方が約 10 % のコストダウンとなっている。最も大きい割合を占めるのが材料費であるが、低周波炉ではこの材料費を安くできるのが大きな利点である。他の費用はかえって高くなっているが、

表 4.1 溶湯コストの比較 (FC-15)  
Comparison of melting cost.

費 目		低 周 波 炉		キ ュ ボ ラ	
		配 合 %	コスト比率	配 合 %	コスト比率
溶 解 材 料 費	新 鉄	—	—	60	53.6
	銅くず(購入)	—	—	10	10.0
	電気銅板くず	50	28.6	—	—
	せんダライ	20	10.0	—	—
	返 り 材	30	19.3	30	19.3
	加 炭 剤	2.75	3.3	—	—
	Fe-Si	2.5	7.1	0.25	0.7
	Ca-Si	0.13	0.7	0.13	0.7
	石 灰 石	—	—	3.5	0.1
	小 計		69.0		84.4
溶 解 エ ネ ルギ 費	コ ー ク ス	—	—	15.6 %	10.5
	電 力	648 kWh/t	12.6	—	0.2
	小 計	—	12.6	—	10.7
炉 材 費		—	1.7	—	1.4
直 接 労 務 費		—	3.2	—	2.2
償 却 費		—	4.7	—	1.3
合 計			91.2		100.0

注) キュボラ: 3t シャワー水冷却式, 冷風, 1t 前炉付

償却費の比率は比較的小さい。コストの差は設置前予想したより大きくなったが、これは材質上の問題から新せんの使用をある程度必要かと考えていたのが、屑物100%で溶解できるようになったためである。当所の場合、銅屑やダライ粉が所内発生のため安価に手に入るののでいっそう有利であるといえる。

このほか公害防止の有利性、出湯時期の柔軟性よりくる生産性の向上等数字で表わしにくい効果も正しく評価すべきであり、特にこの点を強調しておきたい。

## 5. 溶湯の性質

低周波炉を導入する以前において最も問題としたのは低周波炉の湯がキュボラの湯にくらべてその性質が異なり、不良が多発するのではないかという不安であった。たしかにキュボラで溶解する場合と次の点で条件が異なるので得られる溶湯の性質も異なる。

(1) 銅屑の使用比率が高い

銅屑配合量が多くなると、Nガス含有量が多くなるといわれ<sup>(2)</sup>、また加炭されたCの状態も異なると思われる。

(2) 最高溶解(過熱)温度が低い

キュボラでは約1,700°Cまで過熱されるといわれるが<sup>(3)</sup>、低周波炉では1,550°C程度である。この差は材質に相当影響を与えると想像される。

(3) コークスとの接触がない

SやPの不純物含有量が少ない。

(4) 溶解されるふんい気が異なる

キュボラでベッドコークス高さや送風量が少し変動しただけでも溶湯が変化するが、ふんい気の影響は大きいと思われる。

しかしながら低周波炉においては操業条件のコントロールが容易であり、キュボラほどばらつきがないので、適正な成分と接種により現在では従来とほとんど変わりなく生産を行なっている。

では実際に得られた溶湯の性質について現在まで判明している結果を説明する。

(1) 引張り強さ

図 5.1 に調査結果の1例を示すが、CE 値が低い範囲では低周波炉の方が低く出ている。比較したキュボラの場合、前述の脱炭脱硫

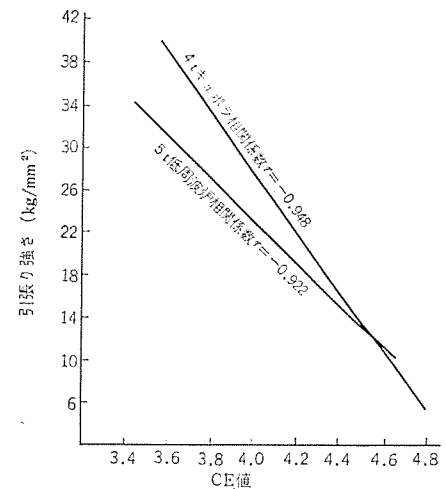


図 5.1 CE 値と引張り強さの関係  
Relation between CE value and tensile strength.

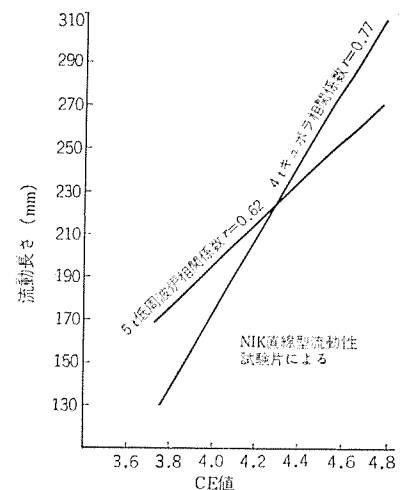


図 5.2 CE 値と流動性の関係  
Relation between CE value and fluidity.

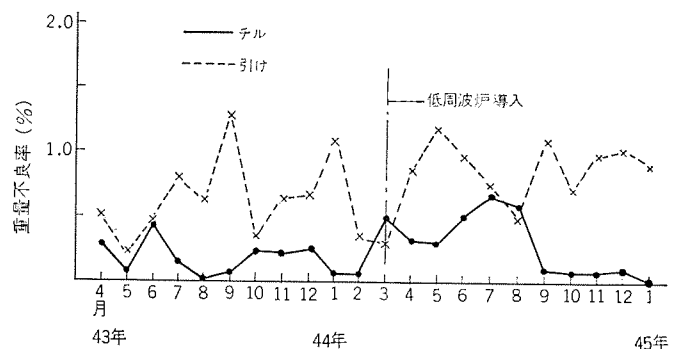


図 5.3 チルおよび引け不良率の推移  
Changes of chill and shrinkage defect rates.

した再生せんを用いているので、銅屑や故せんによる通常のキュボラ操業より強度が高目になっている。キュボラとの引張り強さの比較については種々の発表があるが<sup>(4)(5)</sup>、操業状態によっても異なるので一概には言えない。低周波炉においても後述するように銅屑の使用比率によっても引張り強さに影響するようである。

(2) 流動性

一般に低周波炉の湯は湯ざめが早く、湯流れが悪いといわれるが、日常の生産から調査した結果は図 5.2 のようになった。過共晶では流動性が悪く、亜共晶ではむしろキュボラよりよくなっている。過共晶の場合、キュボラでは新せんを多く配合するのでその影響もある

と思うが、低周波炉では銅屑を多く配合した方がFC 15では流動性がよいという実験結果も得られており、今後研究して行きたいと思う。実際の鑄造においては出湯温度が低くなければ問題はなく、フインのついたモーターフレームの鑄造も支障なく行なっている。

(3) チル、引け

チルや引けのテストは他の要因が多いため誤差が大きく、化学成分が異なれば別であるが、同一成分でキューボラと低周波炉の間に有意差

表 5.1 チル試験の条件  
Conditions of chill test.

テストピース	図 5.4 に示す
鑄込方案および測定箇所	
注湯および接種	20 kg 容量の手ひしゃくで接種、注湯
材 質	FC-15
注湯温度	光高温計読みで 1,250~1,280℃

表 5.2 チル試験の要因と水準  
Factors and their levels.

要 因	水 準		
溶 解 炉	キューボラ	アーク炉	低周波炉
接 種 剤	Ca-Si	50 S (Fe-Si)	
接 種 量	0.1 %	0.3 %	
鑄 物 砂	山 砂	半合成砂	合成砂

注) キューボラ：4 t 冷風キューボラ  
アーク炉：2 t エルース 1,000 kW h  
低周波炉：5 t るつば型 1,200 kW h

配 合 表

	キューボラ	アーク炉	低周波炉
返 り 材	30	20	20
新 せ ん	60	—	—
電気銅板くず	—	55	60
せんドライ	—	25	20
再 生 せ ん	10	—	—

鑄 物 砂

	水 分	抗 圧 力	通 気 度
山 砂	6.5~7.5 %	800~900 g/cm <sup>2</sup>	40~50
半 合 成 砂	4.5~5.5 %	900~1,000 g/cm <sup>2</sup>	80~100
合 成 砂	3.5~4.5 %	1,000~1,200 g/cm <sup>2</sup>	100~140

表 5.3 試験片の化学組成  
Chemical analysis of sample iron pieces.

溶 解 炉	接 種 剤	接 種 量 (%)	化 学 組 成	
			% C	% Si
キューボラ	Ca-Si	0.1	3.74	2.32
		0.3	3.69	2.45
	50 S	0.1	3.79	2.35
		0.3	3.72	2.44
アーク炉	Ca-Si	0.1	3.76	2.71
		0.3	3.62	2.78
	50 S	0.1	3.64	2.71
		0.3	3.65	2.80
低周波炉	Ca-Si	0.1	3.65	2.38
		0.3	3.63	2.46
	50 S	0.1	3.70	2.37
		0.3	3.68	2.47

を見つけることはむずかしい。図 5. 3 は過去 2 年間におけるチルおよび引不良の発生率であるが、低周波炉が設置される以前と設置後の発生率の平均値の間には検定の結果有意差は認められなかった。

1 例としてチルの出やすい小物部品についてテストを行なった結果を表 5. 1~5. 3、図 5. 4~5. 5 に示す。

溶解炉としてキューボラ、アーク炉、低周波炉をとり上げたが、アーク炉が最もチルが少なかった。しかしアーク炉ではたまたま Si 含有量が 0.3 % ほど高く、この影響が大きいのと思われる。したがってこの場合は 3 炉の差はあまりなく、むしろチル防止には Si 含有量が大きく影響すると思いたい。

次に接種の効果は大きく、接種量が多いほどチルは少ない。これは予想通りである。接種剤としては Ca-Si より Fe-Si の方が効果

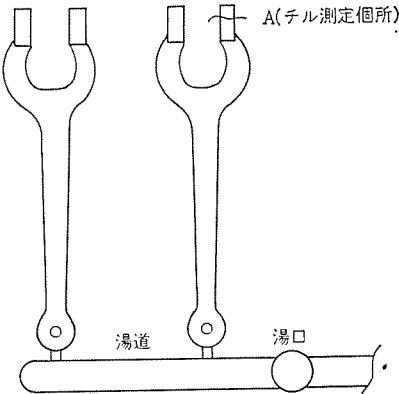


図 5.4 テストピースの方案とチル測定箇所  
Gating system of testpieces.

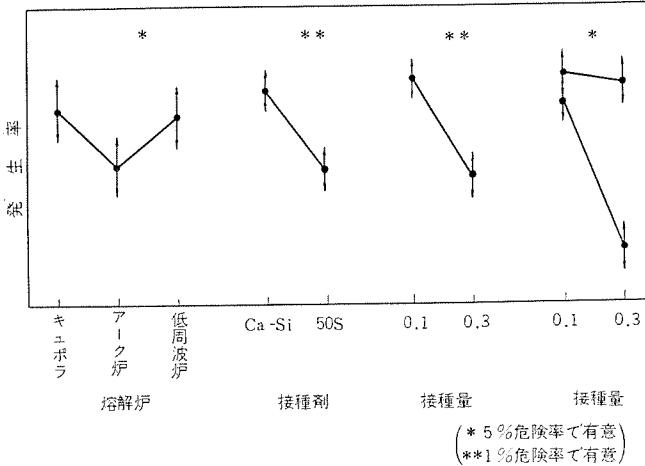


図 5.5 要因効果  
Effects of factors.

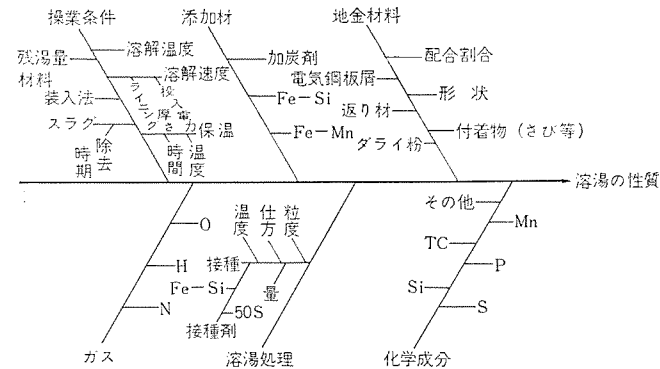


図 5.6 特性要因図  
Cause and effect diagram.

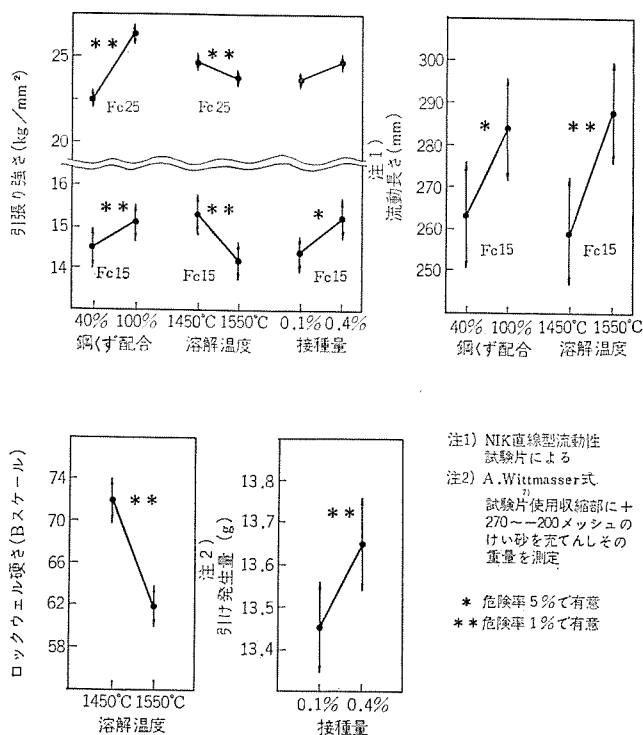


図 5.7 溶湯の性質に及ぼす低周波炉溶解の要因効果  
Effects of operating conditions on the properties of molten metals.

が大きく、特に量を増やした時顕著である。したがって現在では低周波炉においては Ca-Si と Fe-Si を 50% ずつミックスして用いている。

鋳型材の影響も調べたがこれは有意差がなかった。

#### (4) 低周波炉操業条件の影響

低周波炉による溶湯の特性要因図を考えると図 5.6 となる。のうち特に影響の大きいと考えられる要因について実験を行なった結果、有意となった要因の効果を図 5.7 に示す。鋼屑の配合量が多くなると引張り強さが向上する。これは鋼屑中に含まれる N ガスの影響ではないかともいわれている<sup>(6)</sup>。FC 15 では鋼屑配合が多く

なると、また溶解温度が高くなると流動性がよくなる。引張り強さと硬度は溶解温度が上ると低下する傾向がある。接種については前述したが、接種量を増すと引張り強さは向上するが、引けは多くなるので注意を要する。これはキューポラでも同様の傾向を示す。

これらについては条件を決めれば一定にでき、キューポラと異って低周波炉溶解では操業条件のコントロールが容易であるので、要因のうちでは化学組成のパラッキによる影響が大きく、化学成分さえ一定にすれば、一定の湯が得られる。これらの点が低周波炉の大きな特長であり、そのためには炉前試験の確立が必要である。

## 6. 製品例

当所の製品の主力は電動機部品のフレーム、ブラケットであり、このほかエレベータ、エスカレータの歯車類、冷凍機部品、放電電解加工機部品がある。図 6.1 にそのうちの数例を示す。

## 7. むすび

以上最近設置した 5t つぼ型低周波炉による鋳鉄溶解の実際について述べたが、低周波炉は薄肉鋳物を対象とした FC 15、20 の普通鋳鉄の溶解にも十分適用でき、また経済的にも大いにコストダウンの効果を上げることがわかった。

これらの結果に基づき今後の溶解炉はすべて低周波炉で計画中である。炉を数基設置して連続出湯する操業の実際については改めて報告の予定である。

## 参考文献

- (1) N. P. Lillybeck : Foundry, 95, No. 12, 66 (1967)
- (2) 日本鋳物協会編 : キュポラハンドブック (旧版) 丸善
- (3) 岡田ほか : 鋳物, 41, No. 12, 53 (昭 44)
- (4) 堤ほかの座談会 : 工業加熱, 4, No. 2, 19
- (5) 岡田ほか : 鋳物, 41, No. 12, 53 (昭 44)
- (6) F. Mountford : British Foundryman, 59, No. 4, 141 (1966)
- (7) A. Wittmoser ほか : Foundry, 86, No. 11, 74 (1958)

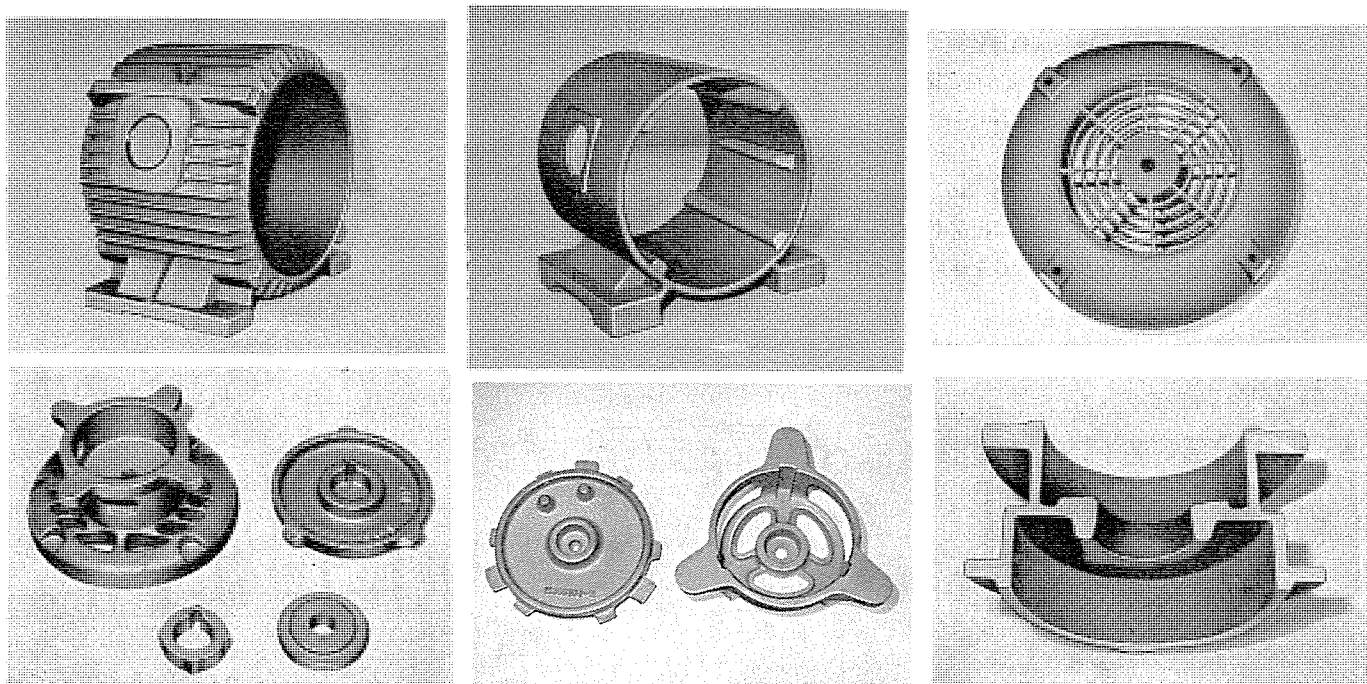


図 6.1 製品例 Examples of castings.

# H 形鋼切断 せん孔プラント用数値制御装置

中野 宜政\*・石川 嘉夫\*

## Numerical Control Apparatus for Structure Steel Cutting and Drilling Plant

Nagoya Works

Norimasa NAKANO・Yoshio ISHIKAWA

Architectural engineering has been making wonderful strides in this country and at its back is a marked technical development. In the category of building materials, H shape structure steel is on the increase for its demand year after year dominating over some of heavy and shape steel members. However, no special machine for exclusive use in processing has not yet been worked out and these has been popular cry for its advent to save the labor and cut down costs. Under the circumstances, Mitsubishi has developed an H shape steel cutting device by the use of MELDAS-3200 and an H shape steel drilling machine with MELDAS-4300. As an outcome, an exclusive plant to execute a series of processing rationally and efficiently has been set up in the Daido Machine Works, where feeding, cutting, drilling of flanges and webs and delivering of H shape structure steel are carried on continuously. All the electric apparatus are those of Mitsubishi make.

### 1. ま え が き

わが国の建設部門は、めざましい発展を続けており、その技術開発も一段と進歩してきた。特に建設用鋼材については、厚板、形鋼の一部にかわって、H形鋼の需要が年々飛躍的に増大してきている。

しかし、加工面において専用機に乏しく、その省力化による生産価格の低減と高精度化が、強くきかれてきている。そこで一連の加工工程を、合理的かつ能率的におこなわしめる当社の MELDAS-3200 を使用した H 形鋼切断装置と、MELDAS-4300 を使用した H 形鋼穿孔機により、H 形鋼の送り込み・切断・フランジとウェブの穴あけ、および送り出しを一貫しておこなう専用プラントを、(株)大同機械製作所に開発され、当社はその電機品を製作納入した。

### 2. 概 要

#### 2.1 H 形鋼切断装置 (前処理装置)

H 形鋼切断装置は、せん孔機の前処理装置で、H 形鋼を所要寸法に高速切断する装置である。機械の全容は、図 2.1 にしめす。まず No. 1 給材コンベア上に H 形鋼が、No. 1 テーブルと平行に置かれる。

この H 形鋼の側面すなわち、フランジを No. 1 給材コンベアのアタッチメントがひっかけて、No. 1 テーブル上に搬送する。つぎに、H 形鋼の端面を仕上げるために、No. 1 テーブルを駆動して、H 形鋼の端部

を図 2.2 の切断機 (コールドソー) 内にそう入し、各クランプにより、H 形鋼を固定した状態で、端面切断をする。ここで切り取られた端材は、テーブルを低速で駆動することにより、切断機手前のピット内に落とされる。

端面仕上を終った H 形鋼を所要寸法に切断するため定寸機は切断機の切断面を基準とした所要長さの位置に、アブソリュート位置決め数値制御装置 MELDAS-3200 によりベッド上を走行して位置決め

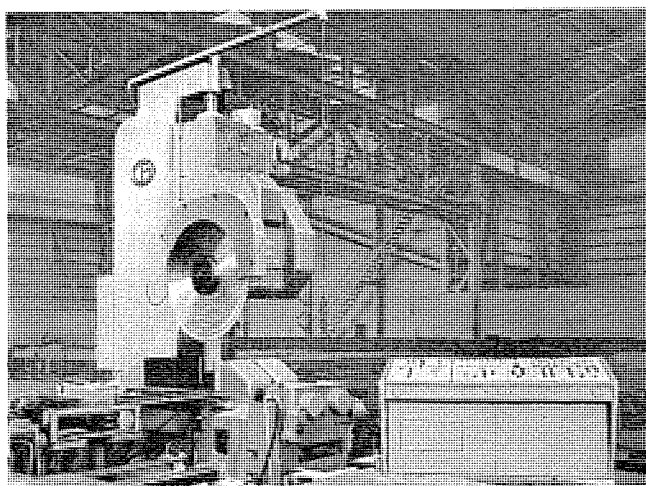


図 2.2 切断機 (コールドソー)  
Cutting machine (cold saw).

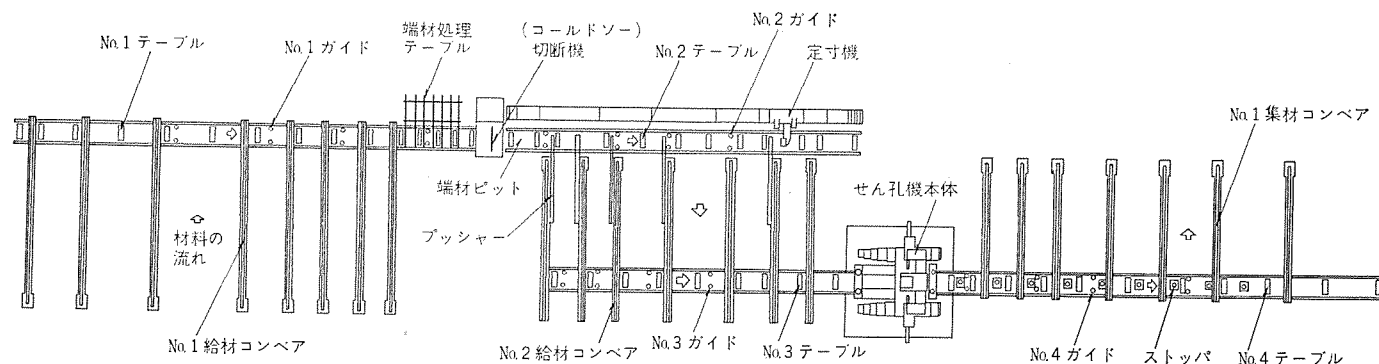


図 2.1 H 形鋼切断・せん孔プラント全容

Full view of structure steel cutting and drilling plant.

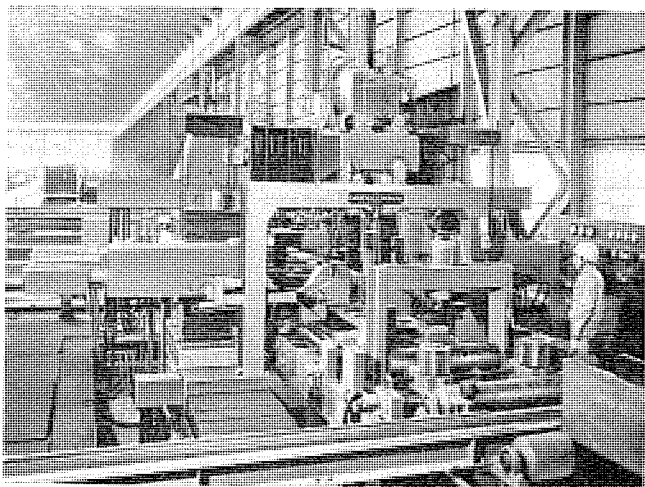


図 2.3 H 形鋼せん孔機本体  
Structure steel drilling machine.

される。

つづいて、No. 1 および No. 2 テーブルローを同時駆動して、H 形鋼を定寸機より テーブル 上に突き出ている定寸アームに押しあてる。この状態で H 形鋼をクランプにより固定し、高精度切断をする。

所要寸法に切断された H 形鋼は、せん孔機で穴あけするために No. 2 テーブルを駆動して搬出位置まで前進し、プッシャーによって、No. 2 給材コンベア上に搬出される。

同一寸法の切断をくりかえす場合は、定寸アームを上昇させて、搬出をおこない、定寸アームを下降させて H 形鋼の位置決めと切断をする。

なお、所要寸法の切断をした残りの端材は、端材処理テーブルによって、No. 1 テーブルから取り出される。

## 2.2 せん孔機

切断機にて切断され、No. 2 給材コンベア上にある H 形鋼は、No. 2 給材コンベアのアタッチメントにより、No. 3 テーブルに搬入される。そこで、インクレメンタル位置決め数値制御装置 MELDAS-4300 により、テープにパンチされたプログラムの内容にしたがって、H 形鋼をせん孔機本体に送り込んで穴あけをする。

せん孔機本体(図 2.4)には、位置決め軸が 6 軸(U 軸, X 軸, Y 軸, V 軸, Z 軸, W 軸)と、加工軸が 3 軸(P 軸, Q 軸, R 軸)がある。

U 軸は、H 形鋼を 1m おきに位置決めする軸で、No. 4 テーブルの中に、せん孔機の基準位置から、1m おきにストップを設けてある。いま、H 形鋼の先端より 2~3m の所に穴あけをしたい場合、せん孔機本体の基準面より 2m の所にあるストップを上昇させ、No. 3 および No. 4 テーブルを駆動して、H 形鋼をストップに押しあてる。その状態で No. 3 および No. 4 ガイドと各種のクランプ装置により固定し、高精度の位置決めをする。

X 軸は、U 軸により 1m おきに位置決めされたその中間に穴あけするため、Y 軸・V 軸・Z 軸・W 軸がとう(塔)載されているガントリーを前後方向すなわち H 形鋼の長手方向に位置決めする軸で移動距離は、1.2m ある。

Y 軸は、H 形鋼の左側 フランジに穴あけする、P 軸ヘッドを上下方向に位置決めする軸である。

V 軸は、H 形鋼の右側 フランジに穴あけする、Q 軸ヘッドの上下方向位置決め軸である。

W 軸は、H 形鋼のウェブに穴あけする R 軸ヘッドを、X 軸と同一

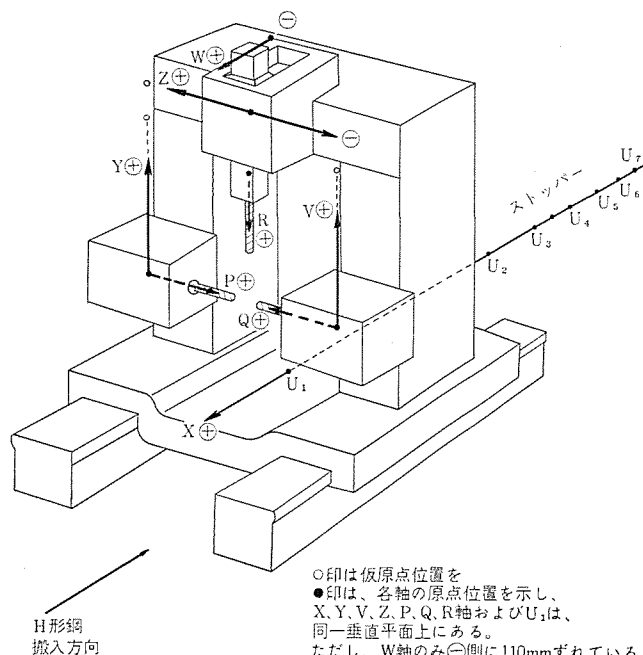


図 2.4 H 形鋼せん孔機本体(軸および方向)  
Structure steel drilling machine (axis and direction).

方向に位置決めする軸であり、この W 軸は、左右方向に位置決めする Z 軸にとう載されている、したがって R 軸ヘッドは、前後左右いずれの方向にも位置決め可能となっている。

Y, V 軸には、ウェブ中心を、Z 軸には、両フランジ間の中心を検出して、すべての誤差を補正する、原点検出機構をそなえている。

P 軸・Q 軸・R 軸の加工軸については、早送り・切削送り・早戻しの一連動作を指令値どおり、3 軸同時に駆動できる。

上記の位置決め軸と加工軸の制御をおこない、すべての穴あけが、完了すると、No. 3, No. 4 テーブルを駆動して、せん孔機本体より H 形鋼を送り出し、No. 2 集材コンベア上に、No. 2 集材コンベアアタッチメントにより自動搬出をする。

一連動作は 5 章プログラミングのフローチャート図 5.2 にしめす。

## 3. 特 長

(1) 位置検出用に光電式パルス発信機を位置レジスタに 10 進リングカウンタを用いた最も簡単な動作原理を採用し、しかも所要の機能を十分に発揮しうる方式となっており、回路構成の簡素化ひいては、装置全体の高信頼性と低価格につながっている。

(2) デジタルフィードバック方式であることにより、電源変動、温度変化および外乱に対して非常に安定である。また、光電式パルス発信機は、減速機構を介せずに、駆動軸ボールねじに直結できるので、機械系の振動に対しても確実に位置の変位を回転角としてとらえ、エラーレジスタと協調して累積誤差は皆無である。

(3) 多種少量生産において製品の種類を変更する場合テープ交換のみですむことから、段取り時間を短縮できる。また、材料のセッティングなど操作が自動化されているため、作業者に熟練を必要とせず、作業員を減らすことができる。したがってコストの低減を計ることができる。

(4) 高精度の再現性により、品質の向上と均一化がなされるため不良品の減少および検査費用の節約ができる。

(5) 工程がプログラムテープにより決まることから、工程の狂いが無い。

(6) 位置決め軸5軸・同時3軸駆動，加工軸3軸・同時3軸駆動となっているため，ウェブとフランジの穴が食い違っている場合でも，同時に加工できる。また，ドリルの送りをNC制御しているのでむだ時間を最少にできる。

(7) H形鋼のウェブ中心を検出する，原点検出機構を備えており材料のロール公差などすべての誤差を補正でき，より高精度が得られる。(特許出願中)

(8) きりにミストカット(油穴付きドリル)方式を採用しているので，高速切削できるとともに，きりの寿命を長くできる。

(9) 主軸に2軸アタッチメントを取付けることができるので，加工時間を短縮できる。

## 4. 動作原理

### 4.1 位置決めの原動作理

図4.1に一軸分の制御ブロック図をしめす。

テープリーダーあるいは，ダイヤルの指令は，入力制御指令回路により位置指令，補助機能指令などに振分けられ，それぞれのレジスタに記憶される。

位置指令レジスタに読み込まれた内容により，判別回路を通して，方向・送り速度(高速・中速・低速)の指令が発生して，親子モータが駆動され，機械が移動する。機械が移動すると送りねじに直結された光電式パルス発信機から0.01mmごとに1パルスがフィードバックされ位置指令レジスタの内容を減じてゆく。レジスタの内容が零になると，送り指令はすべて切れて，つぎの指令の読み取りに移行する。この間の送り速度線図を図4.2にしめす。

光電式パルス発信機は，その内部を図4.3に示すとおり，アクリル円板に，透明，不透明のパターンを同心円上に4相写真焼付けしてあり，このパターンを発光ダイオードと太陽電池とで電気信号に変換するシャフトエンコーダであって，リード6mmのボールねじには，精検出パターンが150対で2相，粗検出パターンが15対で2相ありそれぞれ0.01mm，0.1mm単位の検出を行なう。これより，得られるパルスは，1回転あたり精パルスが150個2相，粗パルスが，15個2相であるが，精パルスゲートおよび粗パルスゲートにより精粗とも4倍のパルス数に交換される。この位相関係を図4.4にしめす。

精パルスは，精パルスゲートにより正方向移動，負方向移動に応じて，自動的に方向弁別された正方向パルスと負方向パルスに，位置応差零で変換される。これは，機械系が振動するような場合，確実に位置の変位をとらえることができる。

粗パルスは，粗パルスゲートの記憶回路を通すことにより正逆転時の位置応差を検出単位分(0.1mm)だけ与えている。すなわち，粗パルス計数時は，検出端の振動が0.1mm分だけ許されている。

このように論理操作された精粗パルスは，つぎの条件で位置指令レジスタの減算パルスとしてゲートされる。起動すると，第1番目の精粗同期点までは，精パルスをゲートして位置レジスタの減算パルスとし，0.01mm単位で計数する。この間は，低速移動し，同期点を通りこすと，減算パルスは粗パルスに切りかわり，高速移動に移る。粗パルスによる計数は，0.1mm単位であって，位置レジスタの10進最下位けたをバイパスして，減算をおこなう。位置レジスタの内容が20パルス未満になると，粗から精パルスへの切換準備信号が判別回路より精粗切換ゲートにおくられる。この指令が与えられてから，第1番目の精粗同期点で，粗から精パルスに切換えられて，起動時と同一状態に戻り，指令レジスタの内容が零になるまで続き，機械は停止

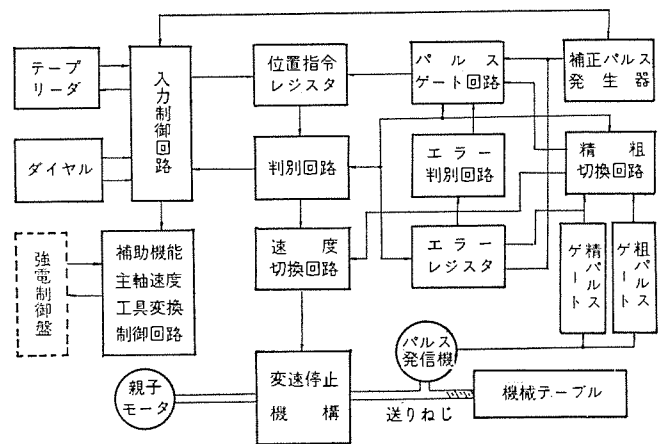


図 4.1 ブロック図  
Block diagram.

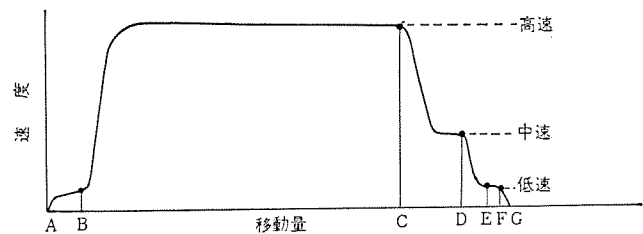


図 4.2 速度線図  
Velocity diagram.

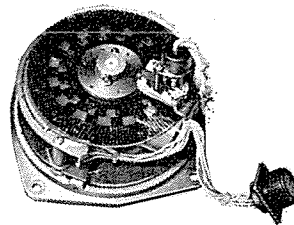


図 4.3 光電式パルス発信機(内部)  
Photo electric pulses encoder  
(interior view).

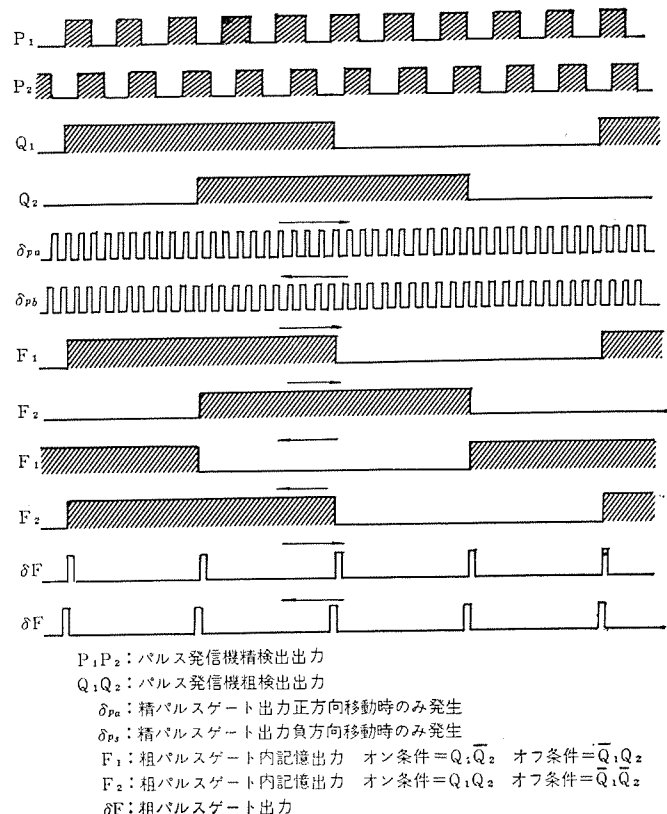


図 4.4 位置検出信号の関係  
Relation among pick-up signals.

する。

このように、起動と停止寸前のみ精パルスで計数し、中間の高・中速移動中は、粗パルスで計数する方式となっている。したがって、位置レジスタの計数能力は、高速送りが6 m/minであっても1 kcあればよく、ノイズに対する安定性を確保している。図4.2において、AB間とEG間が精パルス、BE間が粗パルスゲート期間である。

図4.2に示したように、停止点はG点であるが、停止指令点はF点である。停止指令は、位置レジスタ零のとき発生させる方式で、負荷の慣性、ブレーキの性能、最終送り速度などにより決まる惰行量がある。したがって、この停止指令と同時にエラーレジスタの入力ゲートを開き、この惰行量(ときには、逆戻りすることもある。)をエラーレジスタに計数させて、次回起動時に補正する方式をとっている。

エラーレジスタは、可逆カウンタであって、停止指令後、つぎの指令が与えられて補正が完了するまで、正負両方向の検出パルスが入力となる。補正の方法について例をあげて説明する。今、正方向の指令が与えられ、エラーレジスタの内容が正であったとき、補正パルス発生器から、位置レジスタとエラーレジスタの減算入力端子に補正パルスが同時に与えられて、エラーレジスタの内容が零になると、補正パルスゲートを閉じて、エラーレジスタの内容分だけ減算された指令値で駆動に移る。また、エラーレジスタの内容が負のとき、補正パルスは与えられず、すぐ駆動されるが、検出パルスは、エラーレジスタにのみ与えられ、この内容が零になると位置レジスタ側に与えられる。結果的には、エラーレジスタの内容分だけ、補正加算されたことになる。このようにして、毎回位置決め時の惰行量による誤差の累積を防止している。

エラーレジスタの主機能は、上記のべたが、次の付加機能を有している。第1には精パルスゲート期間中に検出端の振動による誤動作を防止する機能で駆動中に振動などにより指令方向の精パルスだけでなく逆方向のパルスも発生することがある。このとき、1パルス分だけ逆行すると、補正動作を施さなければ、実際の機械移動量よりも1パルス余分に減算されて、指令値より、1パルス手前で停止指令が発生することになる。したがって、エラーレジスタの内容が零でなければ位置レジスタへの減算パルスを与えないようにして、指令が正のときはエラーレジスタの零点より正側の計数を、指令が負のときは、零点より負側の計数をそれぞれのロックすることにより、逆行パルスが到来すると、エラーレジスタの内容が零でなくなり、位置レジスタの計数は、正方向パルスにより、エラーレジスタの内容がふたたび零となるまで停止している。

第2には、停止指令後の惰行量がそのまま毎回の位置決め誤差となる。この量のばらつきは、一般に小さく、あらかじめ見込むことが可能で、この惰行量の見込みをエラーレジスタの零点をシフトすることによりおこなっている。

以上、精粗切換計数方式と、エラーレジスタの3機能が動作原理の骨子である。

#### 4.2 Y・V軸原点検出機構の原理

##### (1) 概要

YV軸原点検出機構の原理図を図4.5にブロック図を図4.6に示す。原理は、原点検出レバーとその軸のスピンドルヘッドを同一水平面上の仮原点へリミットスイッチにより位置決めする。そして、さきに検出レバーを下降させることで、原点すなわち、H形鋼のウェブまでの距離を、レバー送りねじに直結したパルス発信機のパルスをカウントすることにより測定し、つぎにその距離だけヘッドの位置決めをおこなう。

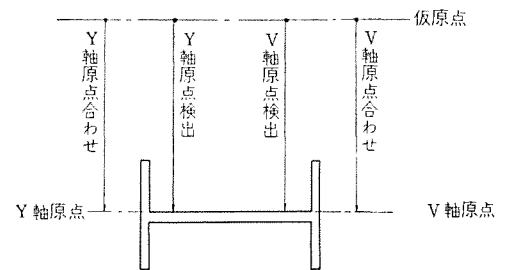


図4.5 原理図  
Theoretic diagram.

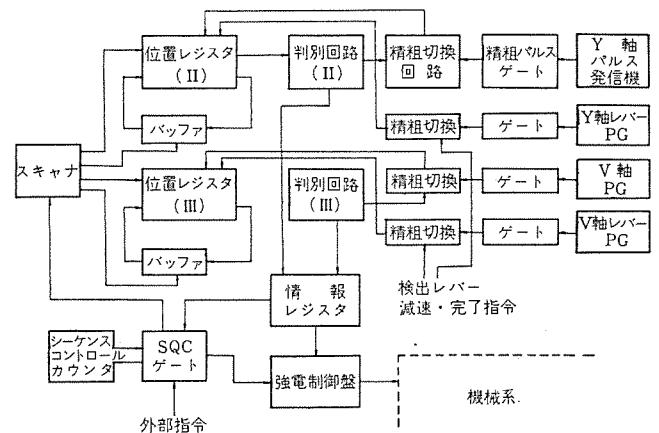


図4.6 ブロック図  
Block diagram.

この装置は、原点検出用レジスタとヘッド位置決め用レジスタを共用している。また、検出シーケンスは、シーケンスカウンタ(10進1けた)にて制御される。

##### (2) 検出レバーによる測定

原点合わせ指令がはいると、各検出レバーが仮原点にあることを確認して、シーケンスカウンタは、 $SQC_1$ となり、位置レジスタをリセットする。つぎに $SQC_2$ となり、Y軸・V軸スピンドルヘッドは、現在位置より上昇端に向かって上昇し、リミットスイッチにより仮原点に位置決めされる。同時に各レバーは、仮原点位置よりウェブ上面にあたって、リミットスイッチをけるまで下降する。このとき、レジスタの内容は、レバーの動きに応じて仮原点から原点までの距離を100,000の補数として記憶する。

##### (3) 読みかえ動作

レバーによる測定が完了すると、シーケンスカウンタが、進んで、 $SQC_3$ となり、バッファレジスタを利用して測定した距離を補数から正規の測定値すなわちヘッド位置決め量に読みかえる。

##### (4) ヘッド位置決め

読みかえが完了したことで、シーケンスカウンタは、 $SQC_4$ となり、各レバーは上昇し、仮原点へ位置決めされる。同時に、各ヘッドは、 $SQC_3$ にて読みかえられた位置レジスタの内容にしたがって、位置決めされる。この数値は、実際移動すべき距離よりも1/100 mm少ないがあらかじめずらしておくことにより解決する。

つぎに、位置決め完了により $SQC_5$ となり原点合せ完了信号を出し、シーケンスカウンタは、 $SQC_0$ にリセットされる。

仮原点と原点の距離が256.78 mmの場合について、動作と、位置レジスタ内容を、表4.1に示す。

#### 4.3 Z軸原点検出機構の原理

##### (1) 概要

Z軸原点検出機構の原理図を図4.7に、ブロック図を図4.8にし

表 4.1 動作と位置レジスタの内容  
Function of position counter in lever positioning sequence.

SQC	動作内容	位置レジスタ内容
SQC <sub>0</sub>	—	00000
SQC <sub>1</sub>	リセット	00000
SQC <sub>2</sub>	測定	00000→74322
SQC <sub>3</sub>	読みかえ	74322→25677
SQC <sub>4</sub>	位置決め レバー仮原点戻し	25677→00000
SQC <sub>5</sub>	リセット	00000

めず。

H 形鋼のウェブ水平面上に A 検出レバーと B 検出レバーを配置し両レバーの戻り端間の距離を  $L$ 、A 検出レバーの検出距離を  $A$ 、B 検出レバーの検出距離を  $B$  とすれば、Z 軸仮原点 (A 検出レバーの戻り端) から原点 (H 形鋼の中心) までの距離  $Z_0$  は、次式で決められる。

$$Z_0 = A + \frac{L}{2} = \frac{L + A - B}{2} = \frac{L - (B - A)}{2}$$

したがって、検出レバーの送りねじに直結したパルス発信機を 0.02 mm にて 1 パルス発生するようにしておけば、一定距離  $L/2$  から検出距離の差を引算することにより求めた距離だけ、ヘッドを仮原点から位置決めすればよい。また、検出、演算などのシーケンスはシーケンスカウンタにより制御される。

## (2) 検出レバーによる測定

原点合わせ指令がはいると、各検出レバーが戻り端にあることを

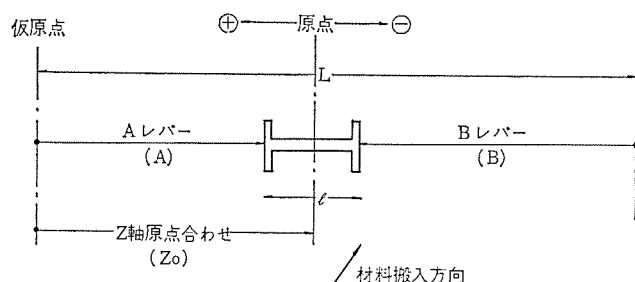


図 4.7 原理図  
Theoretic diagram.

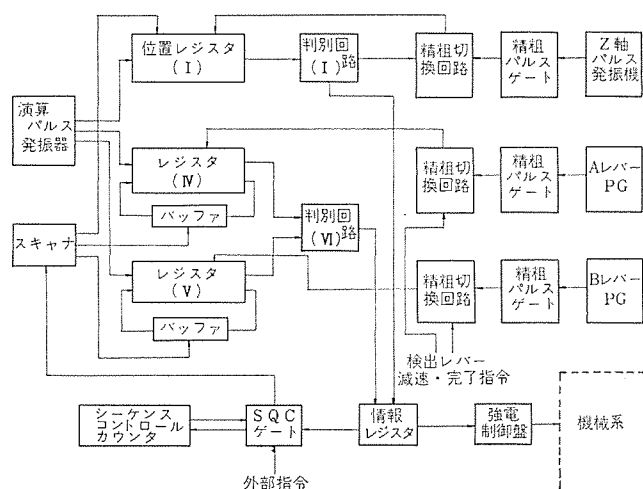


図 4.8 ブロック図  
Block diagram.

表 4.2 動作と位置レジスタの内容  
Function of position counter in lever positioning sequence.

SQC	動作内容	レジスタ I	レジスタ IV	レジスタ V
SQC <sub>0</sub>	—	00000	00000	00000
SQC <sub>1</sub>	リセット	00000	00000	00000
SQC <sub>2</sub>	測定	00000	00000→84614	00000→82886
SQC <sub>3</sub>	読みかえ	00000→40000	84614→15385	82886→17113
SQC <sub>4</sub>	演算	40000→38272	15385→00000	17113→00000
SQC <sub>5</sub>	位置決め レバー戻し	38272→00000	00000	00000
SQC <sub>6</sub>	リセット	00000	00000	00000

確認して、シーケンスカウンタは SQC<sub>1</sub> となりレジスタをリセットする。つぎに、シーケンスカウンタは SQC<sub>2</sub> となり Z 軸主軸ヘッドをリミットスイッチにより仮原点へ、位置決めする。同時に各レバーが、前進してフランジまでの距離を 100,000 の補数として、A 検出レバーは、レジスタ (IV) に、B 検出レバーはレジスタ (V) に記憶する。

## (3) 読みかえ・演算

レバーによる測定が完了したことでシーケンスカウンタは SQC<sub>3</sub> となり、バッファレジスタを利用して、測定した距離を補数から正規の数値に読みかえをする。同時に、位置レジスタ (I) に  $L/2$  を読み取り SQC<sub>4</sub> になると、位置レジスタ (I) の  $L/2$  は、測定した  $(B/2 - A/2)$  を演算パルス発信器により引き去り仮原点からの位置決め量になる。

## (4) ヘッド位置決め

演算を完了すると SQC<sub>5</sub> となり、各検出レバーは後退し、リミットスイッチにより戻り端に位置決めされる。同時に、ヘッドは、位置レジスタ (I) の内容にしたがい位置決めされる。位置決め完了によって SQC<sub>6</sub> となり原点合せ完了信号を発生しシーケンスカウンタを SQC<sub>0</sub> にリセットすることで一連の動作を終わる。

以上の動作とカウンタ内容の例を表 4.2 にしめす。

# 5. プログラミング

## 5.1 プログラミング用語

8 単位 EIA 標準コードで、アルファベット、数字および、± 符号により構成される。

### (1) ブロック

1 ブロックには、一つまたは二、三の指令より構成され、ブロックの最後には、必ず EB マークをつける。

### (2) 座標語 $X(Y \cdot V \cdot Z \cdot W \cdot P \cdot Q \cdot R) \pm dddd(d)$

機械の移動量を与えるもので、数値は、0.01 mm 単位で与える。ただし、 $P \cdot Q \cdot R$  軸は、1 mm 単位である。また、同時 3 軸駆動となっているので下記グループの座標語を 1 ブロックとして与えれば、同時位置決めできる。

$$X \cdot W \cdot V, Z \cdot Y \cdot V, P \cdot Q \cdot R$$

### (3) ストップ番号 Udd

X 軸方向のストップ位置を指定するもので、dd は定められたストップ番号を与える。

### (4) 補助語 $M_0 \sim M_{15}$

位置決めのほかに NC より機械側に出される命令で、つぎの 11 種類がある。



表 5.1 プログラム例  
Example of program.

指 令	EB	摘 要
M <sub>8</sub>	EB	P, Q, R 軸原点合わせ
M <sub>10</sub>	EB	X, W 軸原点合わせ
U <sub>1</sub> S <sub>3</sub>	EB	No. 1 ストップに位置決め, 主軸 375 rpm
M <sub>11</sub> M <sub>12</sub>	EB	Y, V 軸原点合せ
M <sub>9</sub>	EB	P, Q, R 軸オフセット
×4000 W 12000	EB	X, W 軸位置決め
Y-500 V-500 Z-9000	EB	} Y, V, Z 軸位置決め
M <sub>13</sub> M <sub>14</sub> M <sub>15</sub>	EB	
⋮	⋮	⋮
×7500 W 10000	EB	X, W 軸位置決め
M <sub>13</sub> M <sub>14</sub> M <sub>15</sub>	EB	P, Q, R 軸加工
Z-18000	EB	Z 軸位置決め
M <sub>15</sub>	EB	R 軸加工
M <sub>2</sub>	EB	プログラム終了, 材料搬出

たえる製品とするべく種々の面で研究開発を進めていきたい。

表 6.1 仕様一覧表  
Specification of NC.

項 目	前 処 理 装 置	セ ン 孔 機 本 体
入 力 指 令	8 単位紙テープとダイヤル プリセット	同 左
座 標 方 式	絶対座標	相対座標
テープ読み取り速度	25 文字/秒	20 文字/秒
制 御 指 令 軸 数	1 軸	8 軸同時 3 軸
最 小 指 令 単 位	±0.1 mm	±0.01 mm
最 大 指 令 値	99999.9 mm	9999.99 mm
位 置 決 め 速 度	4,000 mm/min	4,000 mm/min
位 置 検 出 方 式	レゾルバによるアナログ フィードバック方式	パルス発信機によるディ ジタルフィードバック方式
再現精度(電気系)	±0.05 mm (同一点におけ る位置決め精度)	±0.01 mm (同左)
原点オフセット	全域可能	同 左
補 助 機 能	プログラム停止他	32 種
主 軸 速 度 指 定	—	最大 8 種まで
演 算 回 路 構 成	集積回路を主体とするプリ ント板	トランジスタ回路を主体と するプリント板
電 源	1 φ 100±15 V 50/60 Hz 500 VA	3 φ 200±20 V 50/60 Hz 1 kVA
周 囲 温 度	-5~45°C	-10~40°C

なお、本装置製作にあたり、(株)大同機械製作所各位に多大なる  
ご援助をいただき、深く感謝いたします。

# 大阪府立放射線中央研究所納め 電子線表面処理装置 (600 keV 電子線照射装置)

吉田 俊夫\*・北川 通治\*

宮下 恭一<sup>+</sup>・永井 昭夫<sup>+</sup>・上田 和宏<sup>+</sup>・広 三 寿<sup>+</sup>

## Cockcroft-Walton Electron Accelerator for Radiation Center of Osaka Prefecture

Radiation Center of Osaka Prefecture Toshio YOSHIDA・Michiharu KITAGAWA  
Mitsubishi Elec. Corp., Central Research Laboratory Kyoichi MIYASHITA・Akio NAGAI  
Kazuhiro UEDA・Sanju HIRO

A Cockcroft-Walton electron accelerator has been built and delivered to the Radiation Center of Osaka Prefecture. This is a totally enclosed electron beam irradiation device rated at 600 keV, 3 mA, being very small sized because of SF<sub>6</sub> gas in use as insulation. In its construction, a high voltage generator producing 600 kV and the electron beam irradiator are arranged separate, but connected with extra high voltage cables. In addition to these features, it has an electron gun very easy to change. This is worthwhile mentioning.

The article describes the constitution of the device with these talking points and outline of its performance.

### 1. ま え が き

放射線の工業利用が叫ばれて久しいが、今までに製法や製品として実現された例はポリエチレンの耐熱化を応用した電線やフィルムなどごく少数であった。しかし最近、塗膜の電子線硬化や放射線による繊維改良などが産業界で脚光をあびるようになって、あらためて電子線照射装置の有用性の認識が高まってきた。これら産業界の新しい潮流は、300～600 keVの高出力で信頼性の高い電子線照射装置を求めている。

ちょうどこれとときを同じくして、大阪府立放射線中央研究所より注文をいただいて製作を進めていた“電子線表面処理装置”が完成した。これは600 keVの電子線照射装置であるが、その用途から電子線表面処理装置と名付けられたものである。この小文では同装置の構成や性能の概要を紹介する。

この電子線表面処理装置は、高電圧発生器・電子線照射器・制御盤の三つで構成されており、次のような著しい特長を有している。

(1) 高電圧発生器と電子線照射器が完全に分離され、かつ両者はそれぞれ別のガス容器に納められてあり、その間が超高電圧ケーブルで接続されている。これは600 keVという高いエネルギーの電子線照射装置としては世界初のものである。

(2) 高電圧発生器も電子線照射器もその主要部は、SF<sub>6</sub>ガス絶縁のガス容器に収納され、従来のものに比べて著しく小形(全高2 m以下)にされている。

(3) 電子銃の交換を加速管中より行なう全く新しい方式が開発された。このため電子銃の交換が短時間で済ませ、作業も容易となった。

(4) 電子線照射器は横形で、直進ビーム用の電子線取出窓と直角偏向ビーム用の電子線取出窓があ

り、後者はスキャナになっている。前者は小電流の実験に、後者は大電流の実験に使い分けられる。

などである。

本機の仕様は、電子線加速電圧600 kV、電子線電流3 mAであるが、高周波コッククロフトワルトン方式とピアス形電子銃によりこの仕様を完全に満たし、600 keVのエネルギーの電子線をスキャナの電子線取出窓より3 mA、水平方向の電子線取出窓より50 μA取り出して使用することができる。

### 2. 構 成

電子線表面処理装置は

- (1) 高電圧発生器
- (2) 電子線照射器

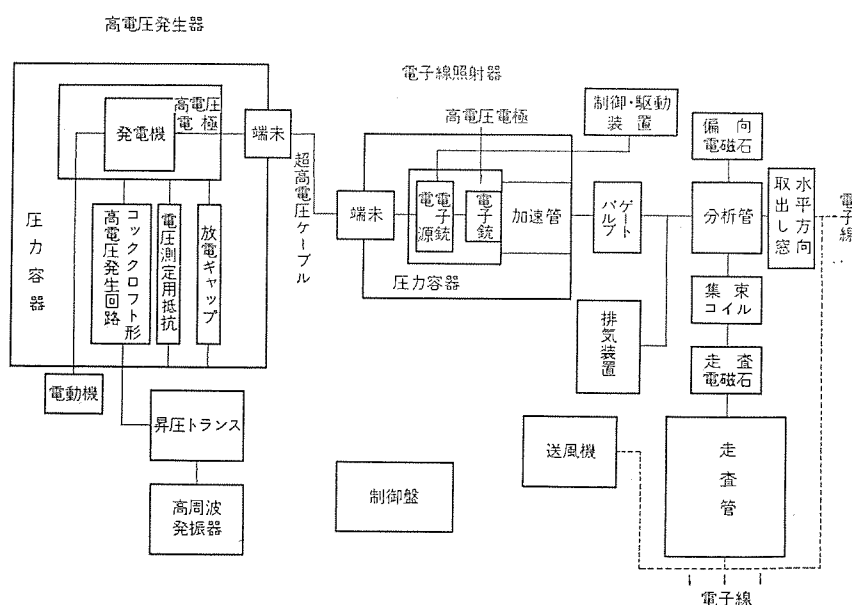


図 2.1 電子線表面処理装置 ブロック図 Block diagram.

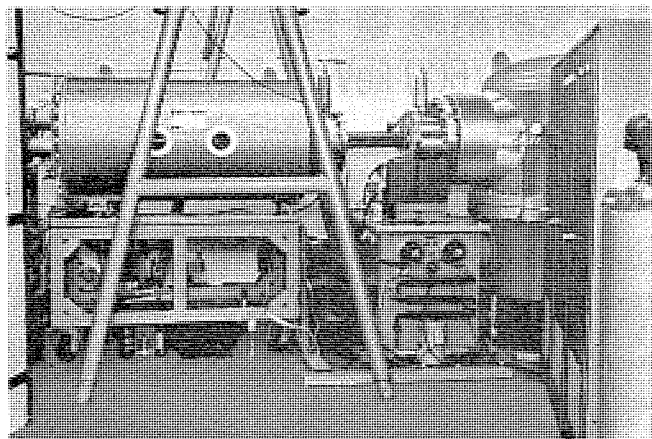


図 2.2 電子線表面処理装置側面  
Side-view of C-W accelerator.

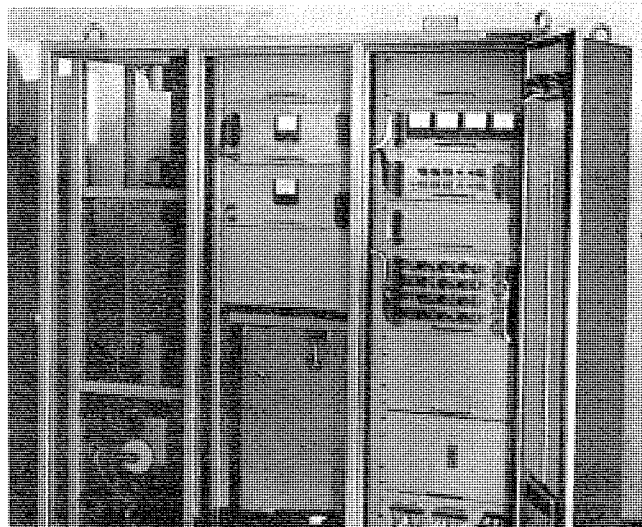


図 2.3 高周波発振器  
High power oscillator.

### (3) 制御盤

から構成され、そのブロック図を図 2.1 に示し、外観を図 2.2 に示す。高電圧発生器および電子線照射器は超高電圧ケーブルで結合され、直流高電圧と電子銃の作動に必要な電力を高電圧発生器から電子線照射器へ供給している。高電圧発生器および電子線照射器は、それぞれ  $\text{SF}_6$  ガス絶縁による完全密閉形であるため、高電圧の露出部がなく、また従来のこの種の機器に比較して著しく小形化されている。すべての制御は制御盤から集中的に遠隔操作で行なわれる。以下各部の詳細を述べる。

#### 2.1 高電圧発生器

電源形式としては、小形化の要請、経済性の面から高周波 コックロフト 形式を採用している。高電圧発生器は、高周波発振器、昇圧トランス および コックロフト 形高電圧発生回路からなっている。

高周波発振器は他励式であり、主発振器、電源部、励振部および電力増幅部からなり、最終段は中級送信管のプッシュプル方式で容量は 5 kW である。周波数は 6 kHz~14 kHz の範囲で選択できるようになっている。高周波発振器の外観を図 2.3 に示す。高周波発振器の出力電圧は昇圧トランスにより最大 85 kV (peak) まで昇圧される。昇圧トランスの鉄心は高周波での鉄損を少なくするため極薄のけい素鋼板を使用した。この昇圧トランスは周波数特性を有し 7 kHz 前後でインピーダンス特性が最良となる。昇圧トランスは高電圧発生器の圧力容器側壁に設けられた絶縁油容器中におさめられており、油中での特性を補償するため、補償コイルを内蔵している。コックロフト形高電圧発生回路は、コンデンサと整流器による 5 段の倍電圧整流回路で、これらの回路部品が大部分のスペースを占めるため、部品の小形化をはかった。すなわち、コンデンサについては 5 個のエレメントを 1 本のエポキシ樹脂製の円筒内に直列に並べることにより、限界までの小形化を達成し、また整流器については、セレン素子の外囲構成材を検討することにより大幅な小形化ができた。このコックロフト形高電圧発生回路の周囲には、電界平たん(担)化用のフープと、放電ギャップがとりつけられている。図 2.4 に高電圧発生器の内部を示す。直流高電圧の出力端は高電圧電極になっており、内部に電子銃用の発電機がある。この発電機は圧力容器の台板側から電動機により絶縁棒で駆動される。電圧の測定は高耐圧の抵抗(5,000MΩ)によって行なわれる。出力電圧および電子銃用電力は圧力容器の上部側壁にとりつけられた端末を経て超高電圧ケーブルにより電子線照射器へ供給される。コックロフト形高電圧発生回路は  $\text{SF}_6$  ガス圧力

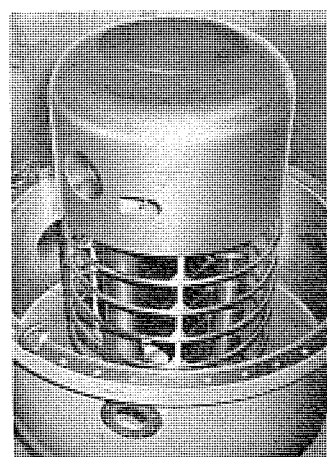


図 2.4 高電圧発生器内部  
Interior view of C. W. generator

容器 ( $4\text{kg}/\text{cm}^2\text{-g}$ ) 中に封入されている。 $\text{SF}_6$  ガスのすぐれた絶縁特性により、容器の寸法は架台を含めてわずか全高 1,960 mm、外径 1,250 mmφ である。なお撤入路が高さ 2,000 mm であるため、超高電圧ケーブルの取出口は横方向になっている。

#### 2.2 電子線照射器

電子線照射器は電子銃、加速管、ビームダクト等で構成されている。電子線の加速方向は水平であり、電子銃、加速管などは  $\text{SF}_6$  ガス圧力容器 ( $4\text{kg}/\text{cm}^2\text{-g}$ ) 中に封入されている。直流高電圧および電子銃用電力は超高電圧ケーブルにより供給される。電子銃電源は高電圧電極の中におかれており、この高電圧電極は、加速管の高電圧側ターミナルを構成するとともに電子銃の陽極ともなっている。

電子銃はピアス形で、フィラメントはヘアピン形タングステン線であり、パーピアスは  $3 \times 10^{-8}$  である。電子線電流はフィラメントの電流を変化させることにより、0~3 mA の範囲で制御することができる。ここで使用した電子銃は、電子銃ソケットと電子銃本体を分離したまったく新しい構造をもつもので、その着脱が圧力容器を開けることなく、加速管内を通して容易に行なえるようになっている。着脱時には加速管内が大気にさらされるが、その後のエージングはほとんど不要である。

加速管は全長 400 mm の多段等電界形で、絶縁リングとさら(皿)

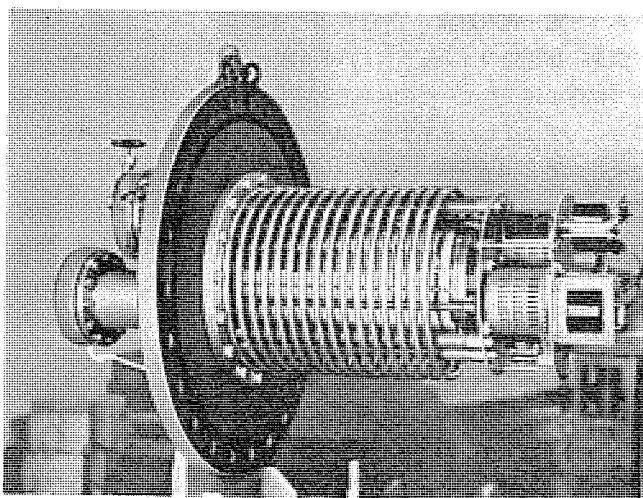


図 2.5 電子線照射器内部  
Interior view of accelerator.

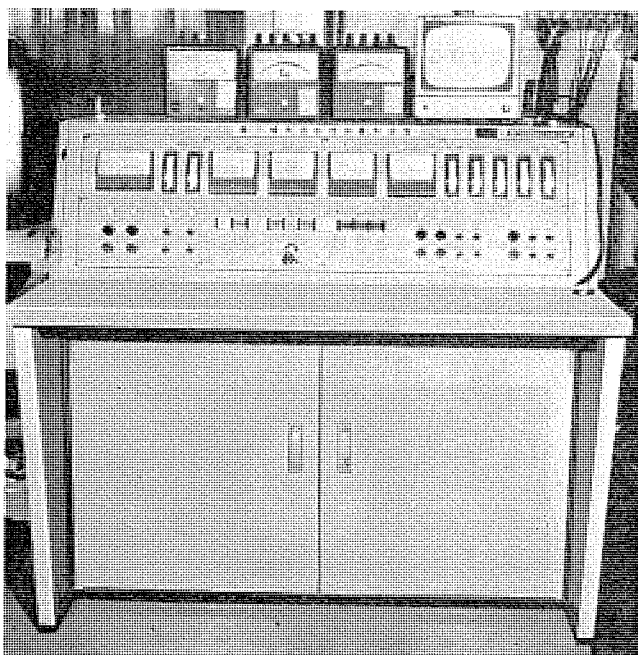


図 2.6 制御盤 Control desk.

形電極とを接着して一体化構造としており、横方向支持にも十分な機械強度をもっている。各段の電位は抵抗により等分に配分されており、各段は電界平坦化用フープに接続されている。図 2.5 に電子線照射器の内部を示す。

次にビームダクトはゲートバルブ・排気装置接続口・分析管・偏向電磁石・集束コイルなどからなり、ビーム直進方向には小電流用として丸窓の電子線取出窓、垂直方向には大電流用としてスクナが接続されている。加速管を出た電子線は分析管に導かれ、直進するかあるいは、偏向電磁石により垂直方向に曲げられる。垂直方向に曲げられた電子線は集束コイルと走査電磁石によってスクナの 20 mm × 350 mm のチタニウム製電子線取出窓を経て大気中にとり出される。この電子線取出窓は、送風機により長軸方向に強制風冷されている。排気装置は 100 mm 口径油拡散ポンプと、300 l/min の油回転ポンプで、真空度は、電子線取出時  $5 \times 10^{-6}$  torr 以下に保たれている。直進丸窓は小電流による物性等の研究に、スクナは大電流による照射実験に使われる。

### 2.3 制御盤

制御盤は本装置を遠隔から運転制御できるようにしてある。図

2.6 に制御盤の外観を示す。電子線取出窓の冷却風、排気装置の冷却水、真空度などのインターロック装置、動作状態を監視するためのメータ群、および操作スイッチが集中的に配列されており、シーケンス制御方式によって、安全かつ容易に運転制御できるようになっている。またビーム加速に先だって直進あるいは偏向、スクナを選択しておけば、ビーム加速中の選択変更は不可能なようにロックされている。

## 3. 性能

### 3.1 高電圧発生器

電子源の加速エネルギーを与える直流高電圧は、高周波発振器の高周波出力を昇圧トランスで昇圧し、これを 5 段の Cockcroft-Walton (C-W) 回路で整流して得られる。よく知られているように C-W 回路の出力は

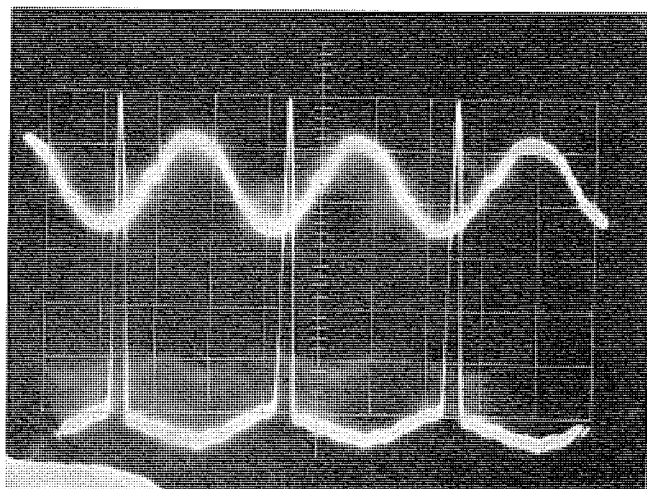
$$\left. \begin{aligned} V &= 2nFv_0 - \Delta V \\ \delta V &= \pm \frac{n(n+1)}{2} \cdot \frac{I}{fC} \\ \Delta V &= \left( \frac{2}{3}n^3 + n^2 + \frac{n}{3} \right) \frac{I}{fC} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3.1)$$

で与えられる。ここで  $V$  は直流出力電圧、 $n$  は倍電圧整流の段数、 $v_0$  は C-W 回路への交流入力電圧のせん(尖)頭値、 $\Delta V$  は負荷電流による直流電圧降下、 $\delta V$  は負荷電流によるリップル電圧、 $f$  は交流電圧の周波数、 $C$  は 1 段あたりのコンデンサ容量、 $I$  は負荷電流、 $F$  は  $F$ -ファクタと呼ばれる交流電圧の利用効率である。この  $F$ -ファクタは整流器のもつ浮遊容量  $C_s$  に関係するが、 $\sqrt{C/C_s}$  が 1 よりずっと大きい場合には

$$\left. \begin{aligned} F &= \frac{b}{2n} \tanh \left( \frac{2n}{b} \right) \\ b &= \sqrt{C/C_s} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3.2)$$

で与えられる。

図 3.1 に示した波形は最下段の整流器に流れる電流波形の一例で、このリップル波形より整流器の浮遊容量をもとめると  $C_s = 1.1$  pf となり、これを式 (3.2) に入れて  $F$  を求めると 0.94 となる。図 3.2 はビーム負荷のない場合の、直流出力電圧と昇圧トランスの出力電圧、それに負荷電流(電圧測定抵抗などの抵抗負荷のみ)の測定値である。昇圧トランスの出力せん頭値は Gennings 社製の高周波電圧計で測定した。図 3.2 より  $F$  を求めると 0.91 となり、これは測定器の



横 50  $\mu$ s/div 縦 10 mA/div

図 3.1 最下段の整流器に流れる電流波形 (600 keV. 3.4 mA の時)  
Wave-form of rectifier current.

誤差を考えるとうえの結果とよく一致しているといえる。

図 3. 3 は電子線 エネルギー 600 keV での負荷電流と 昇圧トランス の出力電圧のせん頭値を示したもので、計算値と実測値はよく一致していることがわかる。

高周波発振器の周波数は 6~14 kHz の間で連続可変である。実際の運転では 昇圧トランス のインピーダンス 特性が最もよくなる点を選んで 7 kHz 前後である。

また高周波発振器の出力は連続可変なので、直流高電圧も 0~600 kV の範囲で連続可変である。この直流高電圧は ケーブル で取出され電子線照射器に 印加されるが、この ケーブル も含めて絶縁は きわめて良好である。図 3. 2 に示した ビーム 負荷のない場合の直流高電圧と負荷電流の関係の直線性の良さもその一つの証明といえよう。

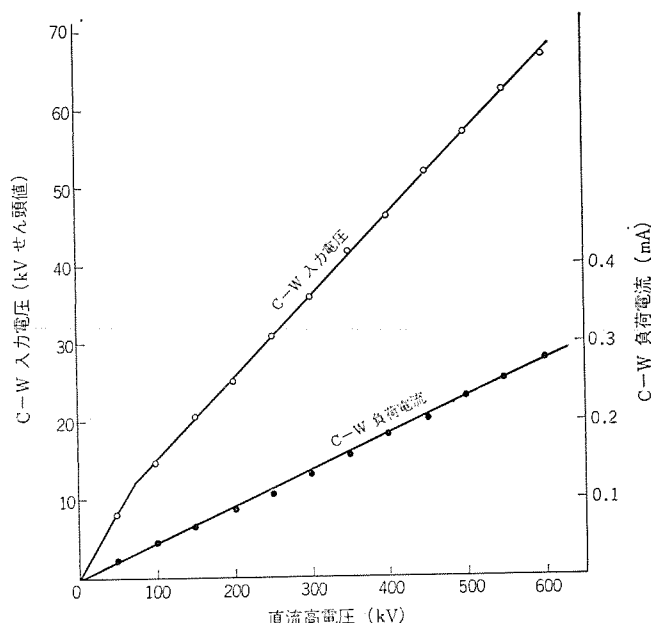


図 3. 2 ビームのないときの直流高電圧と C-W 入力電圧、C-W 負荷電流の関係  
Output voltage vs. C-W input voltage and load current without beam.

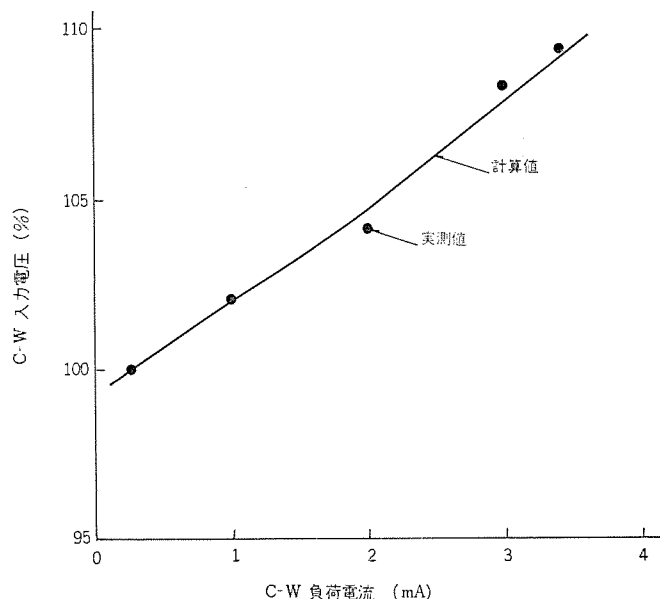


図 3. 3 600 keV での C-W 負荷電流と C-W 入力電圧の関係 (負荷電流 0.3 mA の値を 100 % とした)  
C-W load current vs. C-W input voltage at 600 keV.

### 3. 2 電子線照射器

当初、加速管の エージング に約 100 時間の電圧印加を行なった。現在では電子銃交換で一時的に加速管を大気圧にさらしても、その後の エージング はほとんど不要で、高真空回復後ただちに電子線を加速できる。図 3. 4 は水平方向電子線取出窓における ビーム 像である。

図 3. 5 は スキャナ から取出された 電子線の加速エネルギー と見かけの透過率——空気中においた コレクタ (アルミ 製) で測定される電流  $I_c$  と、スキャナ きょう (筐) 体で測定される電流  $I_s$  より求めたもので、 $I_c/(I_c+I_s)$  である——の関係を示す実測値である。150 keV のエネルギーの電子線は チタニウム 20  $\mu$  厚の取出窓をほとんど通過せず、これが空気中に出る電子線 エネルギー の下限であろう。図 3. 5 にはまた、電子線加速エネルギー と (コレクタ電流/スキャナ電流) の値もプロットしてある。本機のようにビームを直角に偏向して利用する場合、加速電圧をかえたときにビームの位置の確認をしたいことがしばしばあるがこれを直接的に確認しなくても、上記の電流比を測定してビーム位置の良否が判定できる。このため本機ではスキャナ電流を常時監視できるよう スキャナ きょう 体を 架台から絶縁している。

また偏向電磁石のあとに 集束コイル を使用しているので、スキャナの電子線取出窓での ビーム の太さは 濃部約 3 mm、周辺部も含めて 5 mm 程度に集束されている。電子線は約 30 cm の幅で走査されているので、3 mA 加速するとき、電子線取出窓における電子線の電流密度は 200~250  $\mu$ A/cm<sup>2</sup> になっているが、フロアの冷却風で十分冷却されているので、電子線取出窓の劣化は見られない。

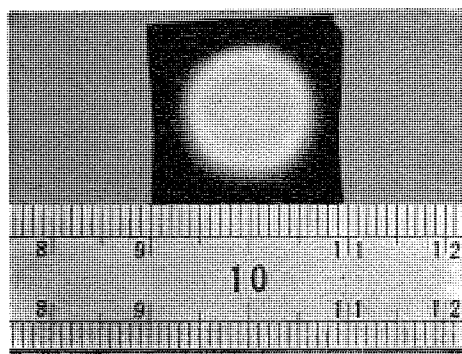


図 3. 4 直進ビームのビーム像 Beam spot.

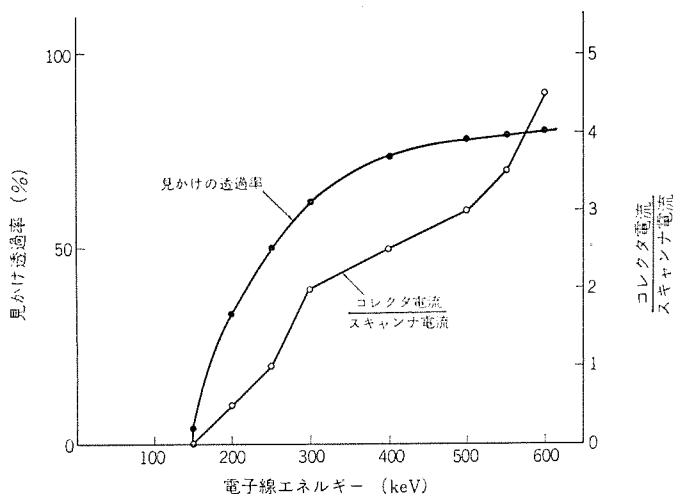


図 3. 5 見かけの透過率と (コレクタ電流/スキャナ電流) の電流比  
Apparent transmission efficiency vs. electron energy.

#### 4. む す び

本機は、電子線の照射利用に使用するとともに、物性面の研究にも使用できるようにした電子線照射装置である。昭和43年に設計検討に着手し、昭和44年に大阪府立放射線中央研究所において完全実動の状態にはいった。現地の据付予定場所の搬入口の高さが2 m しかなかったこと、ホイストの設備がなかったことは、製作者にはかなりの制約であったが、これは高電圧発生器のケーブル取出しを横方向とすることで解決した。

放射線の工業利用の進展とともに、工業用加速器の出現を望む声も日増しに強くなってきた。300~600 keV の電子線照射器を求め、繊維工業や塗装工業にあっては、運転が安定で操作が容易であることはもとより、小形軽量であって、かつできるだけ短時間に保守のできる照射器が望まれている。

本機の完成は、これらの要請をみたすための第一歩であるといえる。すなわち高電圧発生器と電子線照射器は、SF<sub>6</sub> ガスのすぐれた絶縁性により従来のものに比して著しく小形になったこと、また高電圧発生器と電子線照射器が完全に分離され、両者が可とう性ケーブルで接続されていること、電子銃の交換が著しく簡便化されたことにより、工業生産用照射装置が備えるべき特長の一部を実現した

からである。

また本機は、電子線の加速エネルギーを0~600 keV の範囲で連続可変、電流値を0~3 mA の範囲で連続可変としたので、物性面の研究や電子線の照射研究にも便利であると信じる。3 mA という電子線電流値は、このままでは工業用の電子線照射器として十分でないが、電子線取出窓における電流密度は非常に高くとることができ、したがって線量率を非常に高くできるので、大電流の電子線照射器でもできないような実験も可能となった。

最後に、本機の完成にご尽力いただいた大阪府立放射線中央研究所の第一部長東俊雄博士ならびに関係各位に心からの謝意を表する次第である。(昭和45—4—17受付)

#### 参 考 文 献

- (1) Handbuch der Physik XLIV (Springer-Verlag) (1959)
- (2) E. Everhart & P. Lorrain : Rev. Sci. Instr., 24, 221 (1953)
- (3) P. Lorrain et. al : Canadian J. of Phys., 35, 299 (1957)
- (4) J. D. Craggs & J. M. Meek : High Voltage Laboratory Technique, (Butterworths Scientific Publications) (1954)

## 試作電子交換機 —共通制御方式—

前田 良雄\*・石坂 充弘\*・杉山 康夫\*・酒井 勝也\*

## Experimental Model of Electronic Switching System —Common Control—

Central Research Laboratory Yoshio MAEDA・Michihiro ISHIZAKA・Yasuo SUGIYAMA・Katsuya SAKAI

Recent marvellous development of electronic component parts and system technology has made it practicable to realize electronic switching system. For the purpose of making study and development with problems on electronic switching system and related technique on its system, experiments have been made to build trial models. This article, first, discusses the problems on the SPC system in the case of small and medium capacity switching and those on the same system in case of time division switching. Next, description is made on the parameter and advantages of the experimental model, hardware and software. Through the experiments with the model it has been concluded that (1) allotment to hardware and software of switching processing has been made clear, and (2) adaptability of the function of switching system is made feasible by using the software which is a building block construction.

## 1. ま え が き

近年、電子部品の急速な発展に伴い、理論的には従来から考えられていたが実現できなかった方式が実現されつつある。たとえば電子交換・PCM 伝送等である。

機械式交換機を電子交換機にした利点は何といってもその高速性にある。処理が高速化されると 1 台の制御装置で制御しうる加入者数が増加し、さらに種々の付加機能の処理に時間をあてることができる。また、蓄積プログラム方式を採用すれば種々の付加機能の実現を容易にし、かつ 1 台の交換機がもつ機能を変更することも容易である。

一既に電子交換機といっても容量・通話路方式・制御方式・付加機能等により種々のものが考えられるが、筆者らは将来のデジタル統合通信網への適合性・機能の融通性等を考慮して中小容量・PAM・蓄積プログラム方式による電子交換機の研究を行ない、試作を行なった<sup>(1)(2)</sup>。

ここでは電子交換機の蓄積プログラム制御方式 (SPC) とそのハードウェアについて述べる。

2. 中小容量時分割電子交換機の SPC 方式について<sup>(3)</sup>

## 2.1 中小容量電子交換機と SPC 方式について

一般に電子交換機の制御回路の価格は加入者数にはあまり大きな影響を受けず、その交換機がもつ機能によって大きく左右される。いいかえれば加入者あたりの制御回路の価格は加入者数が少なくなるほど高くなる。そこで中小容量交換機においては、制御回路の価格をいかに下げることが一つの大きな問題である。布線論理制御方式 (WLC) を採用すれば確かに価格は下がると考えられるが、機能が限定され、かつ機能の融通性に欠ける。また、中小容量の交換機では使用条件等により顧客の要求する機能がまちまちと考えられ、いっそう WLC 方式は不利と考えられる。

そこで、SPC 方式の中小容量交換機において、(1) 価格の低減、(2) 機能の相違による機種を増加を防ぐことを検討する必要がある。(1) の対策として、ハードウェア処理をできるだけ減らしてソフトウェアで処理すること、また時分割交換機では各加入者ごとの処理をできるだけ時分割多重回路で処理することを考えた。(2) の対策

としては、付加機能をできるだけソフトウェア処理とし、さらにプログラムを機能ごとにブロック化し、付加機能のビルディングブロック方式とした。

## 2.2 時分割電子交換機と SPC 方式について

SPC 方式による時分割電子交換機の制御における問題点として、サイクリック処理 (CLP) とランダム処理 (RDP) との整合をどうするか、データとしてサイクリックメモリー (CLM) とランダムアクセスメモリー (RDM) とをどう使い分けるかがある。

二つの処理 (CLP, RDP) がその処理過程において二つのメモリー (CLM, RDM) を一方だけ使うか両方とも使うかによって次のように分類できる。

- (1-a) CLP が CLM のみを使う場合
- (1-b) CLP が CLM, RDM 両方を使う場合
- (1-c) RDP が RDM のみを使う場合
- (1-d) RDP が RDM, CLM 両方を使う場合

さらに二つの処理をハードでやるか、ソフトでやるかによって 8 とおりが考えられるが、ここでは CLP はハード処理、RDP はソフト処理が適当と考えた。そこで上記の処理形態は次の四系列となる。

- (2-a) CLP—CLM——ハード
- (2-b) CLP—CLM, RDM——ハード
- (2-c) RDP—RDM——ソフト
- (2-d) RDP—RDM, CLM——ソフト

ここで特に問題となるのは (2-b)、(2-d) である。CLP と RDP は並行して行なわれているので、CLP が RDM にアクセスするときおよび RDP が CLM にアクセスするときに問題が起こる。

CLP が RDM にアクセスする時に RDP もアクセスする場合には、CLP を優先して RDP を待ち合わせとした。そこで RDP は CLP が RDM にアクセスする合い間をぬって RDM へアクセスすることになるので、CLP が専有しないようにしなければならない。そこで、CLP の繰返し時間に対する CLP の RDM 使用時間の割合  $R$  が大きい処理は RDM の使用をさけ、CLM のみで処理するようにし、 $R$  の小さい処理については RDM を使用してもよいことにした。

RDP が CLM にアクセスしようとする時、どうしても待ち合わせ処理となる。この待ち合わせ時間を使って RDP に他の処理をさせることが考えられるが、この時間に実行できるステップ数  $S$  を計算

表 2.1 付加機能の分類  
Classified list of new service.

A クラス				B クラス			
会	議	電	話	会	議	電	話
不	在	転	送	近	接	転	送
い	っ	せ	い	夜	間	転	送
短	縮	ダイヤ	指令	指	定	転	送
セ	ク	レ	タ	伝	言	サ	ー
デ	ー	タ	転	緊	急	割	込
ビ	ギ	ャ	送	保	持	機	能
			サービス	繰	り	返	し
				A	級	話	中
				B	級	話	中
				A	級	待	時
				B	級	待	時

表 2.2 話中・無応答に関する付加機能の分類  
Classified list of new service when the called subscriber is busy or makes no response.

TF (別の電話機)				WT (同じ電話機)			
近	接	転	送	A	級	話	中
夜	間	転	送	B	級	話	中
指	定	転	送	A	級	待	時
不	在	転	送	B	級	待	時
				A	級	待	時

してみると

$$S = \frac{\text{平均待ち合わせ時間}}{1 \text{ ステップあたりの平均実行時間}} = \frac{25\mu\text{s}}{14\mu\text{s}} = 1.8$$

$S=1.8$  となり、他の処理をするほど時間的余裕がないので単に待つだけとした。

### 2.3 付加機能について<sup>(4)(5)(6)(7)(8)</sup>

電子交換機の付加機能は種々のものが考えられるが、加入者が要求する時点の違いによって表 2.1 のように分類できる。すなわち A クラスはダイヤルする前からサービスの要求を期待しているものであり、B クラスはダイヤル後に相手の状態によってサービスの要求を行なうものである。会議電話ははじめから会議をするとき、途中で会議の必要性が生じ会議をするときと考えられる。これらの機能の中で特に多いのは、相手が話中のときの処理と相手が不在のときの処理である。この処理としては別の電話機に転送する方法 (TF) と、その電話機で待つ方法が (WT) 考えられる。この関係を表 2.2 に示す。

試作交換機ではオペレータ割込・会議電話・近接転送についてソフトハード両面から検討を行なったが、プログラムメモリの容量の関係から近接転送を実装した。

## 3. 試作交換機の方式概要と特長

### 3.1 方式概要

方式パラメータを次に示す。

- |              |            |
|--------------|------------|
| (1) 回線容量     | 200/800    |
| (2) 通話路方式    | 4 線式発着分離方式 |
| (3) 変調方式     | 単極性 PAM    |
| (4) 標準化周波数   | 20 kHz     |
| (5) クロック周波数  | 2 MHz      |
| (6) 標準化パルス幅  | 150 ns     |
| (7) タイムスロット数 | 100        |
| (8) チャンネル数   | 50         |

- |                 |              |
|-----------------|--------------|
| (9) タイムスロット割当方法 | 逆位相法         |
| (10) 加入者線路      | 4 線式 600Ω    |
| (11) 信号方式       | 2 群多周波       |
| (12) 電話機        | 押しボタン、トーンリング |
| (13) 通話路メモリ     | 磁わい(歪)遅延線メモリ |
| (14) 制御方式       | 蓄積プログラム方式    |
| (15) 一時メモリ      | コアメモリ        |
| (16) 入出力機器      | PTR, PTP, TW |
| (17) 起呼走査方式     | HW ベデスタル検出   |

### 3.2 制御方式の特長

試作交換機の制御方式上の特長を列挙する。通話路方式の特長については別の文献<sup>(1)</sup>を参照されたい。

(1) メモリとしてはサイクリックメモリと、ランダムアクセスメモリが必要であり、どちらか一方に統一する方法も考えられるが、メモリ情報の配分、処理機能との整合を調べる意味および処理速度の向上の意味から両方を使用することとし、磁わい遅延線メモリ、コアメモリを採用した。

(2) 交換機の処理を大きく分けると、処理要求を検出するまでの機能と検出後の処理機能とになる。前者については専用のハードで、後者についてはソフトと CC で行なうことにした。

(3) CC の起動については、ソフトで処理要求を検出したかどうかを調べる方式にせず、処理要求を検出したハードが CC を起動する。

(4) いったん CC が起動してソフト処理を開始すると、その処理が終了しない間に別の処理要求を検出してもソフト処理を中止せず、待ち合わせておいて継続中の処理を完了させておいてから次の待ち合わせ中の処理を行なう。

(5) 処理要求が複数個重なりとあらかじめ定められた優先順位により処理順序が決定される。この優先順位はハードで構成されている。優先順位のつけ方は処理要求のもつ処理速度の必要性から定まる。試作交換機の優先順位は次のとおりである。

- 第1位……ダイヤル信号受信回路からの処理要求
- 第2位……状態変化検出回路からの処理要求
- 第3位……B信号受信回路からの処理要求

(6) 起呼検出回路と通話監視回路の両方の機能をまとめて状態変化検出回路 (CSDC) とした。すなわち電話機の ON-OFF 信号の処理は一括して CSDC で処理し、起呼・応答・終話の検出を行なう。

(7) 電話機の ON-OFF 信号のとりこみはハイウェイ (HW) ベデスタルの時分割走査によって行なう。

(8) CSDC の動作において、加入者ごとに以前の情報の記憶があるが、この記憶はコアメモリを使用する。

(9) CSDC からコアメモリへのアクセスはサイクリックであるので、CC からのアクセスよりも優先し、後者は待ち合わせとする。

(10) 状態変化検出のメモリを各加入者ごとに 2 Bit ずつ与え積分作用を論理でとることにより、チャタリング等による誤動作を防いでいる。

(11) ダイヤル信号受信回路を加入者が捕そくしていないときに、サービス要求を可能とする方法としてスラッシュを用いずに、B 信号の時分割受信方式を採用した。

(12) ダイヤル信号は1けた受信ごとに CC に処理を依頼する。このことによって番号体系の変更に対しては、プログラムの変更だけ

で対処できる。

#### 4 ハードウェア

試作交換機のハードウェアの構成を図 4.1 に示す。以下に、各ブロックの機能について説明する。

##### 4.1 通話路 (SPU)

SPU は音声を入 PAM 変調し多重化し復調する。ある位相で加入者  $L_i$  の音声を変調し、同じ位相で加入者  $L_j$  に復調してやれば  $L_i$  の音声は  $L_j$  に聞こえる。詳細については別の文献<sup>(1)</sup>を参照されたい。

##### 4.2 通話路メモリー (SPM)<sup>(9)</sup>

SPM は SPU の変復調ゲートのための情報を記憶しており、サイクルに読み出され SPU の変復調ゲートを閉鎖する。SPM は 2 MHz (1 MHz, 2 Phase) の磁気遅延線 15 Bits で構成されており、多重度は 100 である。15 Bits の割当は各タイムスロットごとに、加入者番号のメモリー (LNM) 9 Bits、加入者状態のメモリー (LSM) 3 Bits、通話の種類メモリー (LKM) に 3 Bits となっている。なお音声周波ダイヤル信号受信回路 (VFR) は複数個あるので、その区別に LKM を流用している。

##### 4.3 音声周波ダイヤル信号受信回路 (VFR)

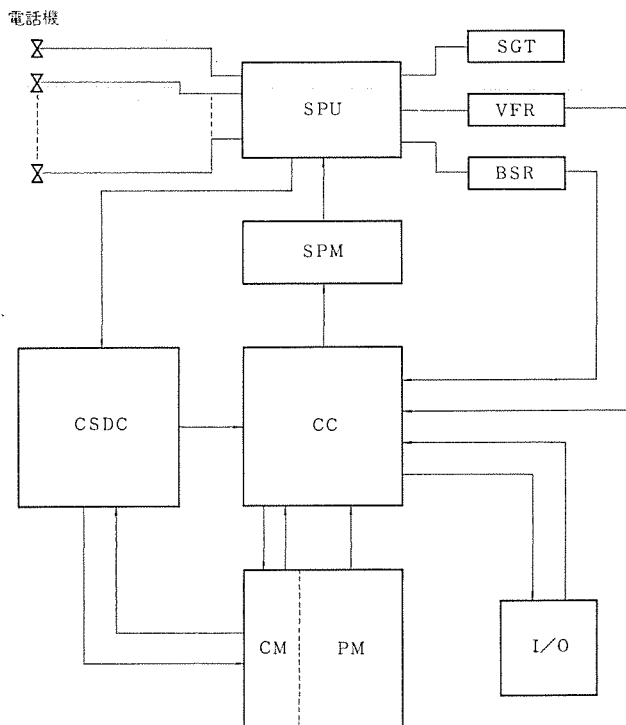


図 4.1 試作電子交換機のブロック図

Block diagram of experimental model of electronic switching system.

表 4.1 2 群多周波の割当周波数と内部コード  
Assigned frequency of 2 group multi-frequency and internal code.

A 群	B 群		
	1,209 Hz	1,336 Hz	1,447 Hz
697 Hz	1 (0100)	2 (0101)	3 (0110)
770 Hz	4 (0111)	5 (1000)	6 (1001)
852 Hz	7 (1010)	8 (1011)	9 (1100)
941 Hz	A (1101)	0 (0011)	B (1110)

VFR は電話機からの 2 群多周波ダイヤル信号の受信回路である。

表 4.1 にその割当周波数を示す。加入者が起呼した後、VFR は加入者と SPU を通じて接続されダイヤル信号を受けつける。ダイヤル信号が受かると VFR は CC に起動を要求する。ダイヤル信号が 1 けた受かると VFR は CC に処理を依頼し、VFR 自身には貯えない。こうすることによって次のような利点が考えられる。

- (1) VFR には 1 けた分 4 Bits だけのメモリーでよく、ハードウェアが減少する。
- (2) 加入者によってけた数が異なってもその処理が容易である。
- (3) 番号体系が変更となっても、それに対して容易に対処できる。

##### 4.4 B 信号受信回路 (BSR)<sup>(10)</sup>

BSR は電話機からの 2 群多周波ダイヤル信号の一つである B 信号の受信回路である。BSR は加入者が VFR を捕まえていないときにでもサービス要求ができるように特別に設けられたものである。BSR は次のようにして加入者が順次 B 信号を発信していないかどうかを調べていく。まずプログラムで通話中または話中音送出中の加入者をつまみ出し、その加入者番号を SPM のある特定のタイムスロットに書き込むことによって、その加入者の BSR を SPU を介して接続する。このとき加入者が B 信号を発信していれば BSR にそれが受信される。そしてある一定時間経過すると別の通話中または話中音送出中の加入者をつまみ出し BSR と接続する。このように BSR を時分割で VFR とはまったく無関係に、通話中または話中音送出中の加入者に割り当てていくことによってサービス要求が検出できる。

##### 4.5 信号音トランク回路 (SGT)

SGT は交換機から加入者へ伝える信号音を発生する回路で次の 4 種類がある。

- (1) ダイヤル音 (DT)  
加入者にダイヤル可能であることを知らせる。
- (2) 呼出音 (RBT)  
起呼加入者に対し相手加入者を呼び出していることを知らせる。
- (3) 呼出信号 (RGT)  
着信加入者に電話がかかっていることを知らせる。ベルではなくトーンリングを使用している。
- (4) 話中音 (BT)  
起呼加入者に対し相手加入者が話中であることを知らせる。

##### 4.6 状態変化検出回路 (CSDC)

CSDC は電話機の ON・OFF 状態の変化を検出し CC を起動するための回路である。従来、区別して考えられていた起呼検出・応答検出・発信者終話検出・着信者終話検出ができる。

次にこの回路の動作について述べる。まず加入者番号を発生し、その番号を SPM の特定のタイムスロットにかきこむ。こうしてその加入者の Hook Sw の ON・OFF 状態が SPU のペデスタルとして得られる。一方、コアメモリーに加入者ごとに貯えられている 2 Bits の過去のペデスタル情報を引き出す。そして SPU から得られた新しいペデスタル情報  $a_t$  とコアメモリーから引き出した過去の 2 Bits の情報  $b_2(t-1)$ ,  $b_1(t-1)$  とから表 4.2 に示すように論理をとり 2 Bits 情報  $b_{2t}$ ,  $b_{1t}$  に直し、コアメモリーの内容を  $b_2(t-1)$ ,  $b_1(t-1)$  から  $b_{2t}$ ,  $b_{1t}$  にかき直す。そのときに、次のような論理が成立すれば起呼検出  $D_1$ 、応答検出  $D_2$ 、発信者終話検出  $D_3$ 、着信者終話検出  $D_4$  となる。

$$D_1 = a_t \cdot b_2(t-1) \cdot b_1(t-1) \cdot \bar{c}_t \cdot \bar{d}_t$$

表 4.2 ペDESTAL 処理論理表  
Logic table of pedestal processing.

$b_2(t-1)$	$b_1(t-1)$	$a_t$	$b_{at}$	$b_{it}$
0	0	0	0	0
0	0	1	0	1
0	1	0	0	0
0	1	1	1	0
1	0	0	0	1
1	0	1	1	1
1	1	0	1	0
1	1	1	1	1

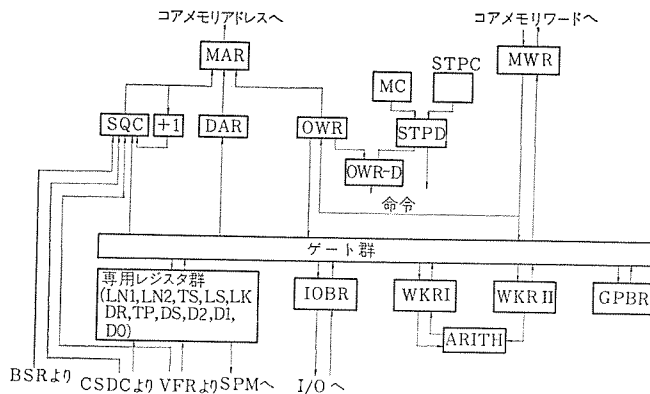


図 4.2 共通制御回路のブロック図  
Block diagram of common control circuit.

$$D_2 = a_t \cdot b_2(t-1) \cdot b_1(t-1) \cdot \bar{c}_t \cdot dt$$

$$D_3 = a_t \cdot \bar{b}_2(t-1) \cdot b_1(t-1) \cdot c_t \cdot \bar{d}_t$$

$$D_4 = a_t \cdot \bar{b}_2(t-1) \cdot \bar{b}_1(t-1) \cdot c_t \cdot dt$$

ただし  $\bar{c}_t$ : Hook・Sw OFF 登録済

$c_t$ : Hook・Sw ON 登録済

$\bar{d}_t$ : 発信者

$dt$ : 着信者

#### 4.7 中央制御回路 (CC)

CC は SPC 方式で処理するために必要なハードウェアである。CC は VFR, CSDC, BSR の処理要求により動作を開始し、以後の動作はプログラムで制御される。

CC の構成を図 4.2 に示す。この構成の特長を以下に列挙する。

(1) レジスタは汎用レジスタを二つとし、専用レジスタを7個設けた。これは交換処理において扱う情報の性質が固定的であるからによる。

(2) レジスタ間の信号の転送は Bus とせず、必要な経路にのみゲートを設けた。

(3) コアメモリ 1 Word に数種類の情報が編集されているので、読み書きのときに分解・編集する必要があるが、これに対してプログラムで処理せず、ハードで処理し、処理速度の向上をはかった。

(4) 演算機能は基本的な機能は加算、一致、大小比較、AND, OR 等にとどめ、処理速度を上げるため必要な機能を若干追加した。この機能はコアメモリ内のデータ配列および交換機内部のコードによって定められている。

#### 4.8 一時記憶装置 (CM)

CM はコアメモリの一部を使い、CC のデータメモリおよび CSRC のデータメモリとして使われている。CM の主たる仕様を次に示す。

- (1) 容量 20 Bits×512 Word
- (2) クロック速度 500 kHz
- (3) 読み出し方式 電流一致
- (4) 駆動電流 280 mA, 450 ns
- (5) コア寸法 30 mil

#### 4.9 プログラム記憶装置 (PM)

PM はコアメモリに CM を割りあてた残りの部分を使ってプログラムを記憶している。コアメモリの容量は 2,048 Word で PM の容量は 1,538 Word である。

#### 4.10 入出力機器 (I/O)

I/O は PTR, PTP, TW から構成されており、プログラムのロードや各種の試験に使用される。

### 5. ソフトウェア

#### 5.1 情報の入出力

交換機の入力は電話機の状態の変化とダイヤル信号を受信したことであり、出力は SPM の内容の設定である。電話機の状態の変化は CSDC によって捕えられ、ダイヤル信号は VFR によって捕えられ、それぞれ所定のフリップフロップ (FF) をセットする。そして CC が空いていると、あらかじめ定められた優先順位にしたがってプログラム制御を開始する。処理の最後に SPM に新しい内容が設定されると SPU に新しい経路が形成される。

#### 5.2 情報処理方式

交換機の処理は前述した入力をもとにして CM にかかれた内容を引き出し必要な判断・演算・設定等を行ない、新しい内容を CM・

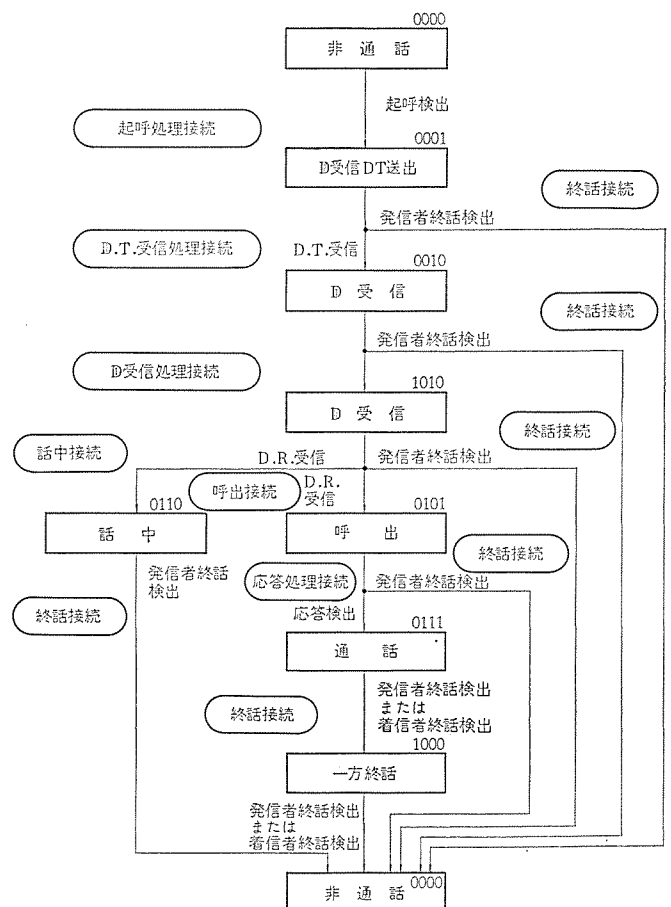


図 5.1 接続状態図  
Representation of switching state

SPM にかきこむ。これによって SP は新しい経路が形成される。

交換機の処理の考え方として、まず加入者の接続状態をすべて考える。次にその接続状態間において考える遷移をすべて調べる。そしてこれらの関係を図で表わしてみると図 5. 1 のようになる。すなわち接続状態と処理の内容と処理の入力との関係を示している。処理の入力があればまず接続状態を調べる。さらにその他の条件を調べることによって処理の内容が決定され、処理が行なわれ別の接続状態へと遷移する。したがってプログラムの基本形態としては次のようになる。

- (1) 処理の入力ごとにプログラムが別個にある。
- (2) 最初に接続状態を調べる。
- (3) 次に他の条件を調べる。
- (4) 最後に新しい接続状態に設定する。

### 5. 3 情報の配列

CM の情報としては加入者番号 (LN), 加入者の状態 (LS), 通話の種類 (LK), ダイヤルレジスタ番号 (DR), タイムスロット (TS) 等がある。

情報の検索を容易にするためには何かをアドレスとすればよい。そこで LN と TS が考えられるが、LN ごとに記憶すると容量が大きくなるし、むだな箇所が多くなるので TS ごとに記憶させることにした。これを TSCM と呼び、発信加入者番号 (LN 1) または着信加入番号 (LN 2) に 9 Bits, LK に 3 Bits, LS に 4 Bits, DR に 2 Bits, 予備 (TP) に 2 Bits を割り当てた。

一応これだけあれば原理的にはこなせるはずであるが、CSDC からの処理要求は LN で、VFR からの処理要求は DR で知らされるので、TSCM を順次走査して該当の LN または DR を調べなければならぬ。そこで LN および DR をそれぞれアドレスとしたメモリーを設けることとし LNCM, DRCM と呼ぶ。LNCM は TS 6 Bits と CSDC のメモリー 4 Bits 計 10 Bits で、1 Word に 2 加入者の情報がはいる。なお、TS は CSDC の発信着信区別の 1 Bit と前述の 6 Bits とを合わせて 7 Bits となっている。DRCM は TS 7 Bits とダイヤル途中の 2 けたの数字の記憶 8 Bits に使われた。

図 5. 2 に TSCM, LNCM, DRCM の割り当てを示す。通話の種類 (LK) と加入者の状態 (LS) のコードの割り当てを表 5. 1, 5. 2 に示す。なお、加入者番号のコードは 2 進化 10 進 Excess-3 コードである。

### 5. 4 プログラム

プログラム体系の構成を図 5. 3 に示す。また、各プログラムのフローチャートを図 5. 4~5. 11 に示す。

起呼処理プログラムは加入者の起呼によりタイムスロットとダイヤルレジ

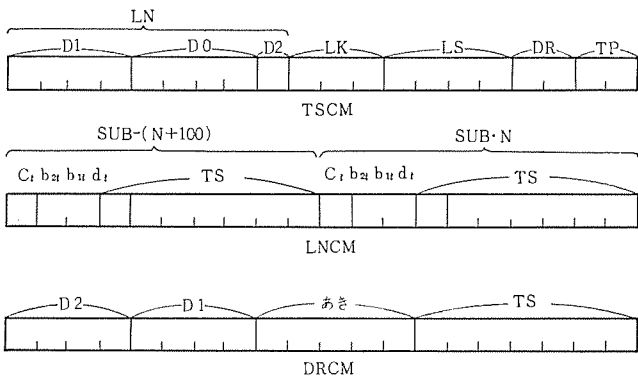


図 5. 2 コアメモリーにおける情報の配列  
Data arrangement on core memory.

表 5. 1 LK のコード割当  
Code assignment of line kind.

コ ー ド	種 別
0 0 0	2 者 間
0 0 1	近 接 転 送
0 1 0	A 級 待 時 話 中 呼 処 理
0 1 1	会 議 電 話
1 0 0	—
1 0 1	指 定 転 送
1 1 0	—
1 1 1	—

表 5. 2 LS のコード割当  
Code assignment of line state.

コ ー ド	状 態
0 0 0 0	非 通 話
0 0 0 1	DT, D 2
0 0 1 0	D 1
0 0 1 1	通 話, D 2
0 1 0 0	BSR, PDSTL
0 1 0 1	RT, RBT
0 1 1 0	BT
0 1 1 1	通 話
1 0 0 0	一 方 終 話
1 0 0 1	DT, D 1
1 0 1 0	D 0
1 0 1 1	—
1 1 0 0	—
1 1 0 1	—
1 1 1 0	—
1 1 1 1	—

注) D 2 : ダイヤル 1 けた目受信  
D 1 : ダイヤル 2 けた目受信  
D 0 : ダイヤル 3 けた目受信  
PDSTL : ベデスタルの取りこみ

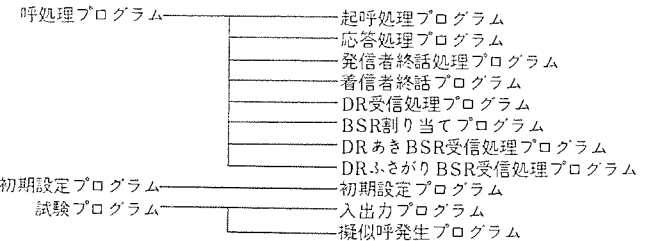


図 5. 3 プログラム体系の構成  
Construction of program system.

タを割り当てダイヤル音を送り返す。もしタイムスロットとダイヤルレジスタのいずれか一方がない場合は待ち合わせとなる。

応答処理プログラムは呼出信号に対し着信加入者が応答したことにより、呼出音、呼出信号の送出をやめ、発信加入者と着信加入者を接続する。

発信者終話処理プログラムおよび着信者終話処理プログラムは終話によりその時までの接続を切断する。なおこのプログラムでは一方がおいでから他方がおくまでに、ふたたび持ち上げると再通話可能とした。一方がおいでから他方がおくまでにさらに別の加入者からおいでたほうの加入者に呼出があればそれは話中となる。

ダイヤルレジスタ受信処理プログラムは加入者のダイヤル信号により、その値を判断し蓄積し全数字がダイヤルされれば相手の状態によって呼

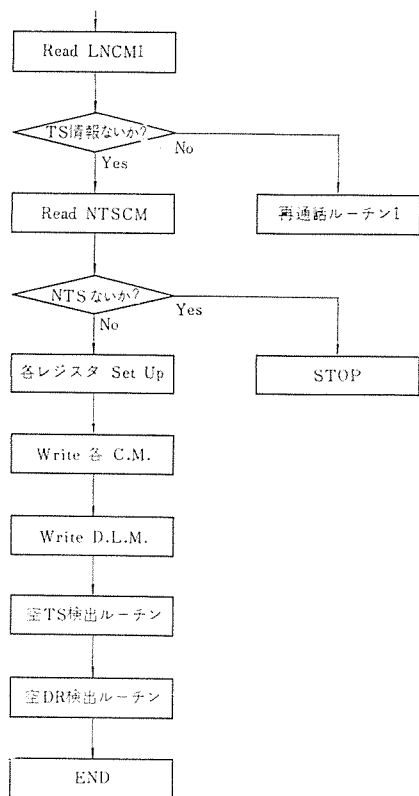


図 5.4 起呼処理プログラムのフローチャート  
Flow chart of call processing program.

出または話中とする。

BSR 割当プログラムは通話中または話中音送出中の加入者を探し出して BSR を割り当てる。割り当て時間は タイマー による。タイマーが

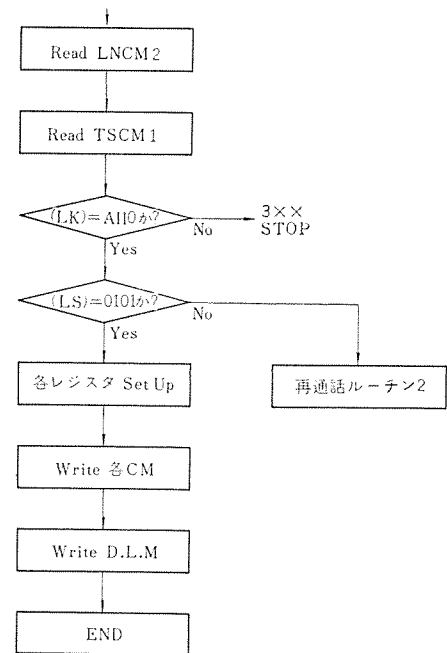


図 5.5 応答処理プログラムのフローチャート  
Flow chart of response processing program.

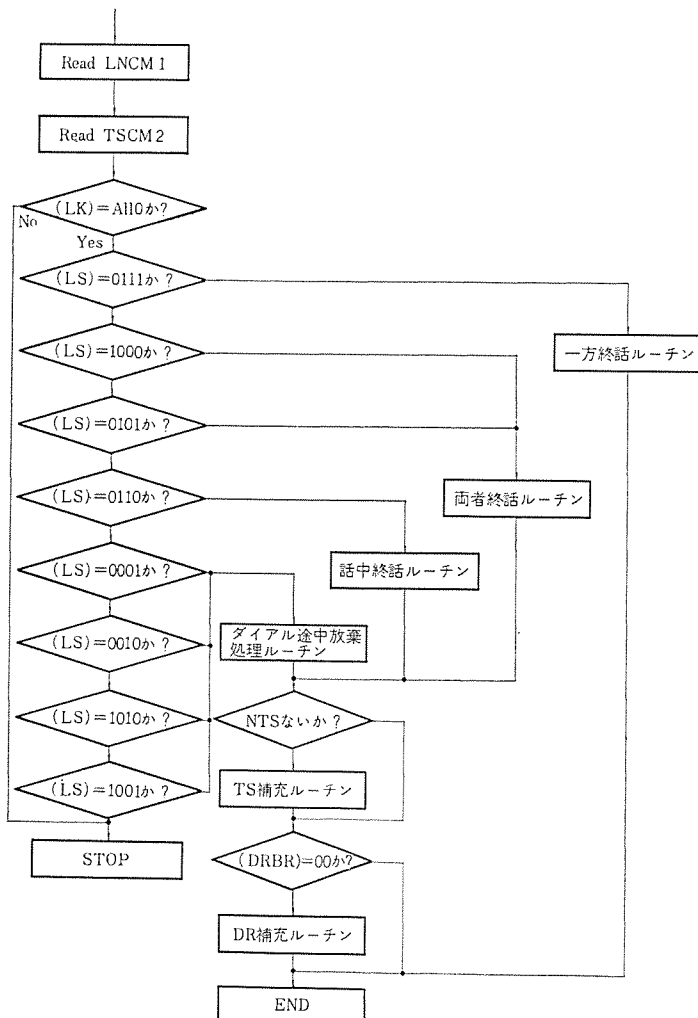


図 5.6 発信者終話処理プログラムのフローチャート  
Flow chart of end processing program of calling subscriber.

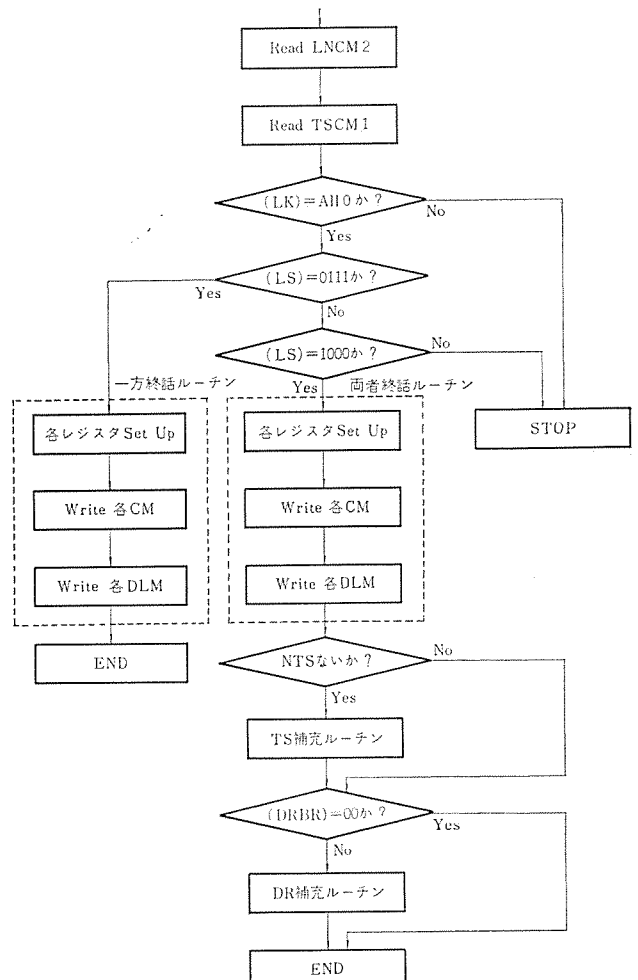


図 5.7 着信加入者終話処理プログラムのフローチャート  
Flow chart of end processing program of called subscriber.

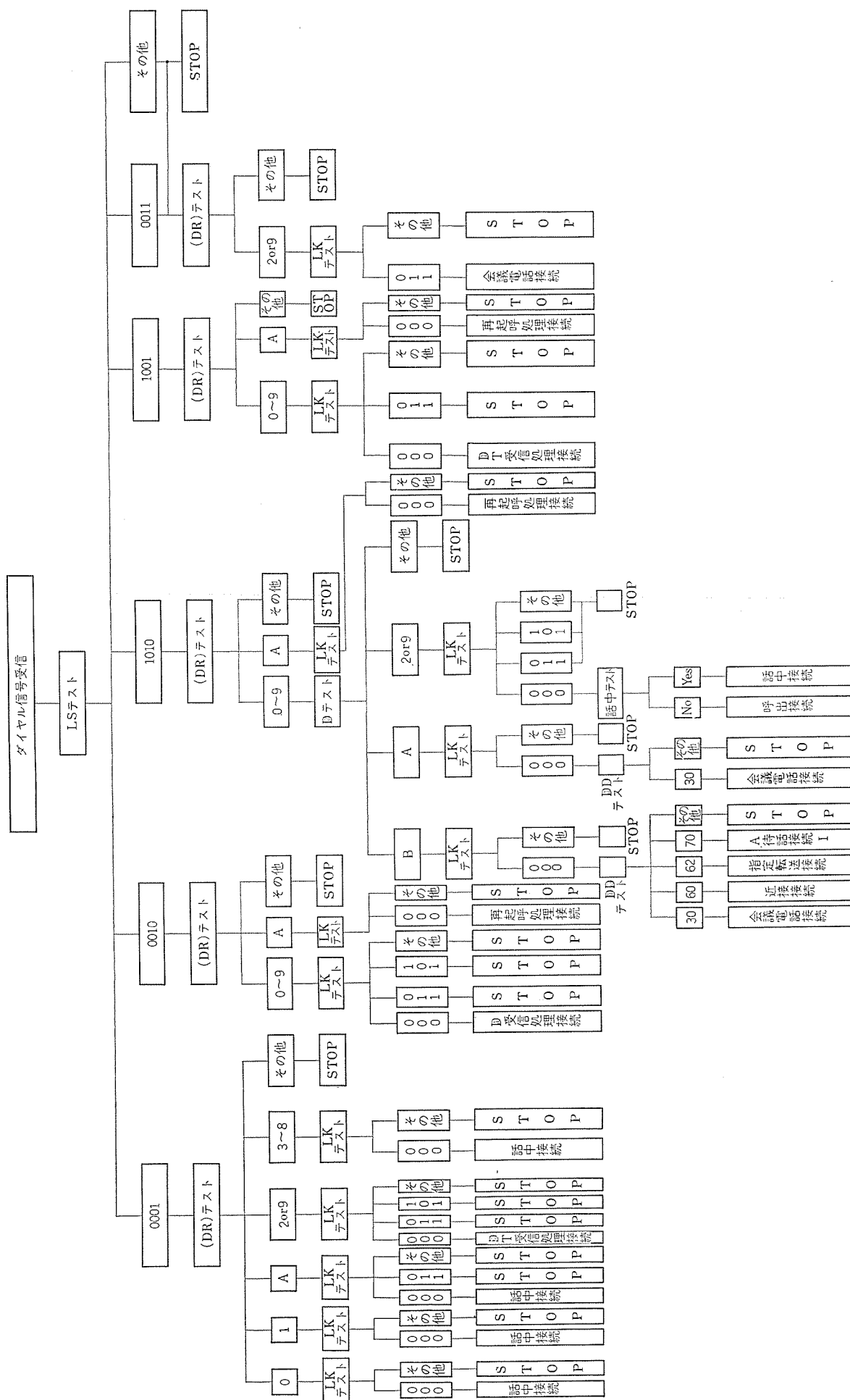


図 5.8 ダイアルレジスタ受信処理プログラムのフローチャート  
Flow chart of receipt processing program of dial register.

DR 空 BSR 受信処理プログラムは、BSR が B 信号を検出したときに DR が空いているとサービス番号受信のためにダイヤルレジスタを割り当て、ダイヤル音を送出する。DR 塞 BSR 受信処理プログラムは、BSR が B 信号を検出した時に DR がふさがっていると話中音を送出する。

## 5.5 命令語

命令は原則として 8 Bits を OP 部, 12 Bits を AD 部とした。命令の種類は 99 である。大きく区別するとシフト命令・R/W 命令・判断命令・演算命令・I/O 命令・制御命令に分かれる。各命令をこのように区別してそれぞれの数値を表 5.3 に示す。一例として判

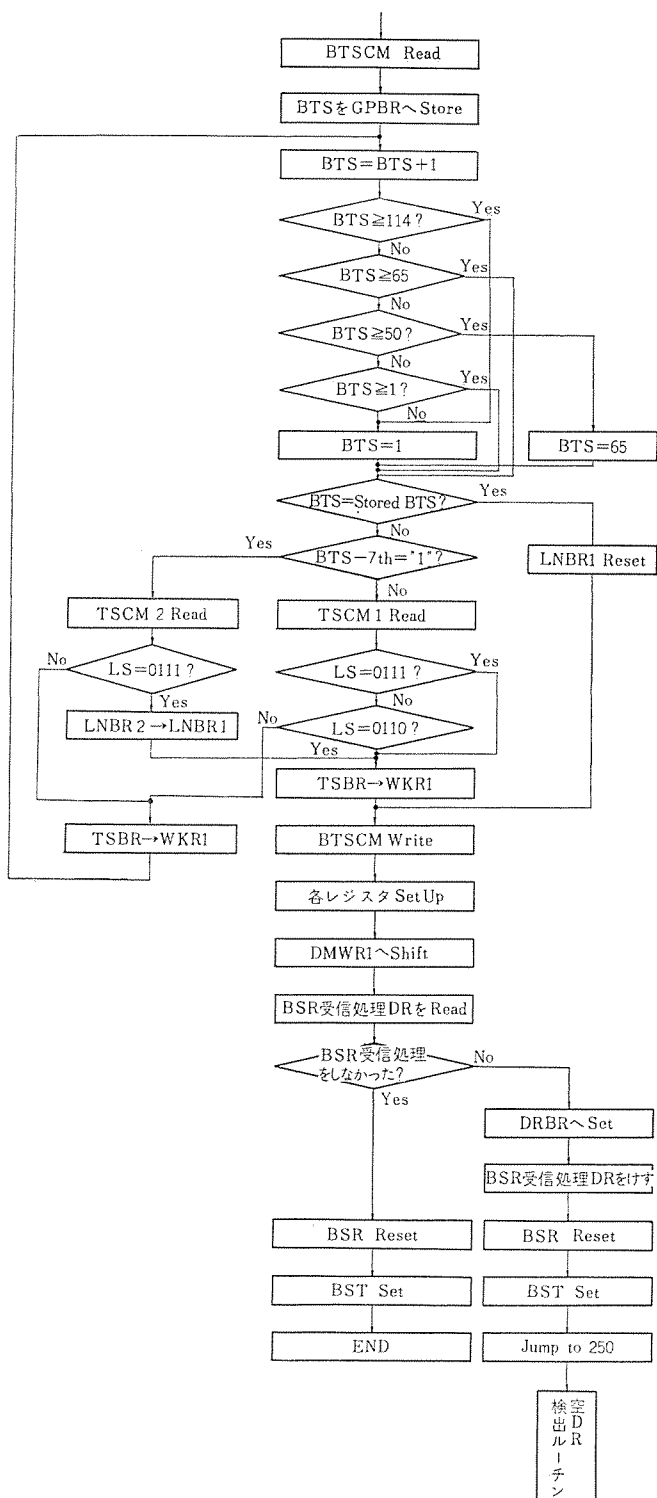


図 5.9 BSR 割当プログラムのフローチャート  
Flow chart of assignment program of B signal receiver.

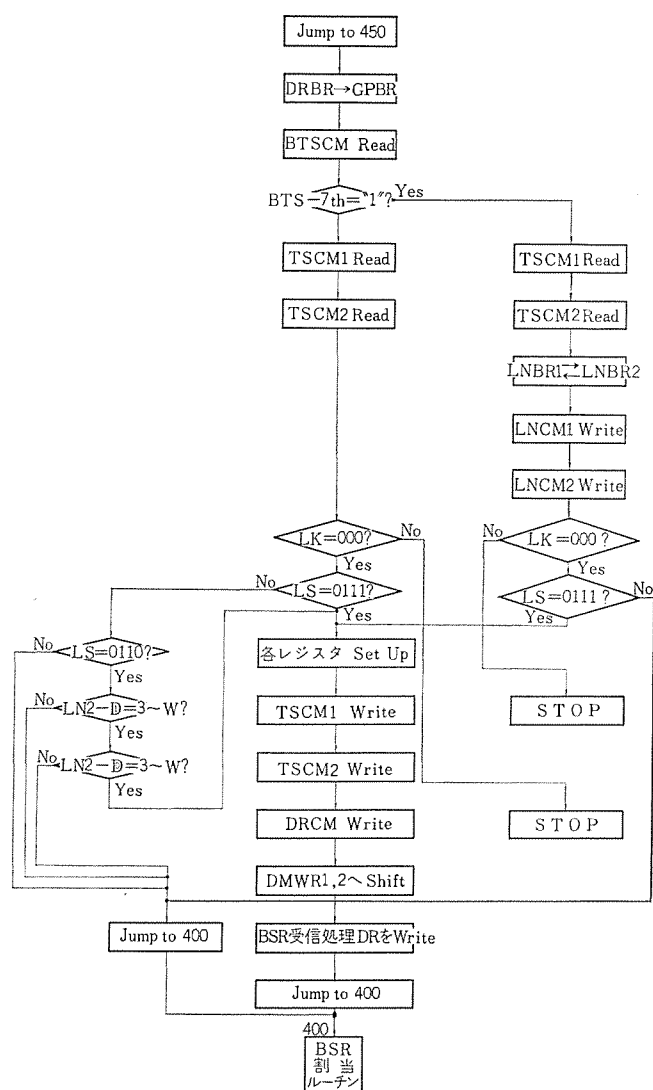


図 5.10 DR 空 BSR 受信処理プログラムのフローチャート  
Flow chart of receipt processing program of B signal receiver with dial register.

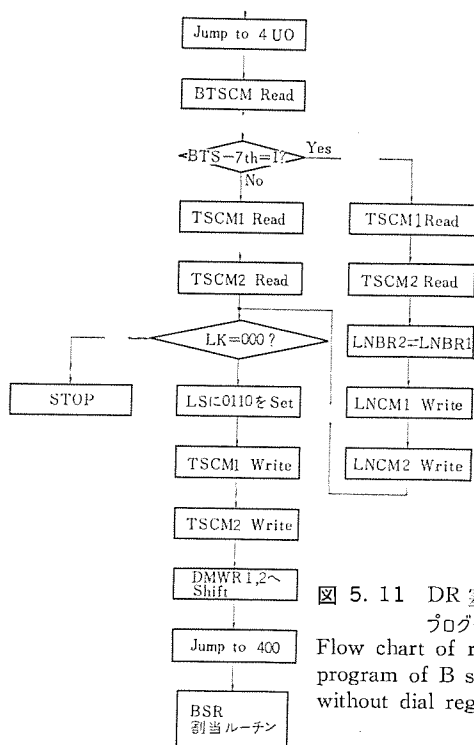


図 5.11 DR 塞 BSR 受信処理  
プログラムのフローチャート  
Flow chart of receipt processing  
program of B signal receiver  
without dial register.

表 5.3 命令の種類と命令数  
Kind and number of order.

命 令	命 令 数
シ フ ト 命 令	40
R/W 命 令	30
判 断 命 令	7
演 算 命 令	5
I/O 命 令	9
制 御 命 令	8
計	99

表 5.4 判断命令表  
Judge order table.

MC	STPC	OWR	CONDITION
Y	1	81	NOTHING
Y	1	87	(WKR 1-7 th)=1
Y	1	8 V	(WKR 1-4 th~1 th)=6~V
Y	1	89	(WKR 1-9 th)=1
Y	1	8 W	(WKR 1-4 th~1 th)=3~W
Y	14	90	(WKR 1-12 th~1 th)=(WKR 2-12 th~1 th)
Y	14	91	(WKR 1-12 th~1 th)≧(WKR 2~12 th~1 th)

表 5.5 演算命令表  
Arithmetic order table.

MC	STP	OWR	Arithmetic
Y	14	92	$(WKR\ 1)_{12\ th \sim 1\ th} = (WKR\ 1)_{12\ th \sim 1\ th} + (WKR\ 2)_{12\ th \sim 1\ th}$
Y	N	9400 N	(WKR 1) N Bit Left Shift
Y	N	9500 N	(WKR 1) N Bit Right Shift
Y	14	96	(WKR 1) AND (WKR 2)
Y	14	97	(WKR 1) OR (WKR 2)

断命令と演算命令の命令表を表 5. 4, 5. 5 に示す。

## 5.6 プログラムの占有領域の命令の使用ひん度

表 5. 6 に各プログラムの占有領域を命令別に分類して示した。各プログラムの占有領域を円グラフで表わすと図 5. 12 のようになる。また命令の使用頻度を円グラフで表わすと図 5. 13 となる。実運用時 Run するものは、主として起呼応答処理・終話処理・DR 受信処理の 3 者で、これらの割合はほぼ等しく 12~15% 程度である。

命令の使用ひん度を科学的技術計算のそれと比較すると次のような特長がある。

- (1) 演算命令の使用ひん度が少ない
- (2) 判断命令の使用ひん度が多い

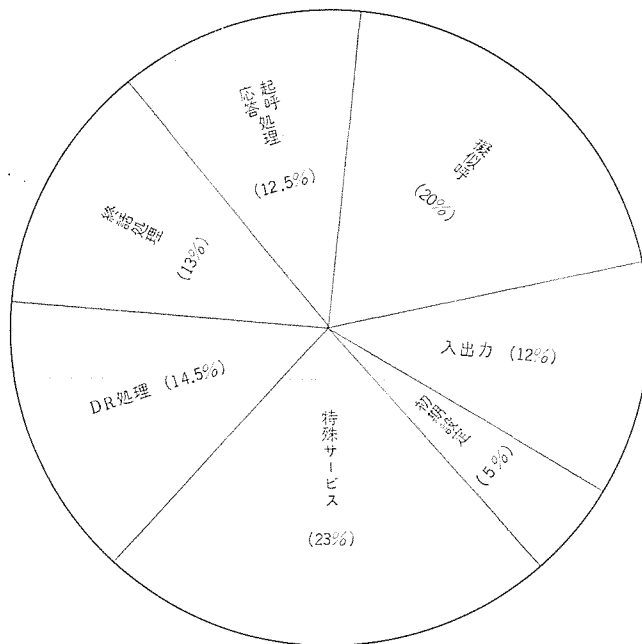


図 5.12 各プログラムの占有領域比  
Area rate occupied by programs.

表 5.6 各処理プログラムのステップ数と命令の使用ひん度  
Area occupied by program against order.

		応 起 答 呼 処 理		終 話 処 理		D R 処 理		特 殊 サ ー ビ ス		初 期 設 定		入 出 力		擬 似 呼		総 計	
S H I F T 命 令		47	(%) 38	51	(%) 40	60	(%) 41.5	94	(%) 4.1	23	(%) 49	22	(%) 18	77	(%) 39	374	(%) 38
		(%)13		14		16		24		6		6		21		100	
判 断 命 令		33	27	33	26	41	28	67	29	9	19	14	12	37	19	234	23.5
		(%)14		14		17.5		29		4		6		15.5		100	
演 算 命 令		4	3	2	1.5	0		9	4	2	4	4	3	7	4	28	3
				7				32		7		14.5		25		100	
R/W	C O R E	19	15	20	15.5	20	14	30	13	3	6	9	7	56	28	159	16
		(%)12		13		13		19		2		6		35		100	
	B P	5	4	5	4	5	4	7	3	6	13	0		0		28	3
		(%)18		18		18		25		21						100	
制 御 命 令		16	13	17	13	18	12.5	22	10	4	9	6	5	18	9	101	10
		(%)16		17		18		22		4		6		18		100	
I/O 命 令		0		0		0		0		0		66	55	2	1	68	6.5
総 計		124	100	128	100	144	100	229	100	47	100	121	100	197	100	992	100
		(%) 12.5		13		14.5		23		5		12		20		100	

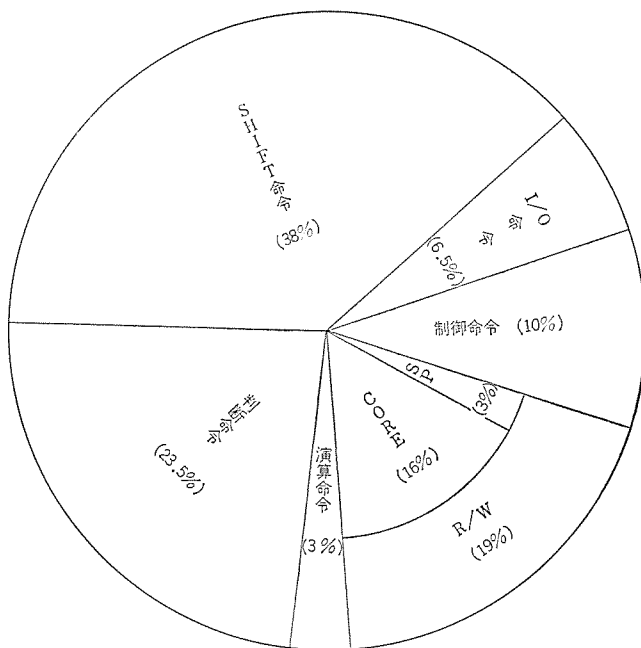


図 5.13 命令の使用ひん度  
Frequency of order used.

このことから交換機の SPC 方式のパフォーマンスの向上のためには演算命令に多少の時間を要しても判断命令が効率よく実行されるような命令体系、ハードウェアが必要であろう。

## 6. む す び

中容量時分割電子交換機における SPC 方式の問題点を調べ検討を行ない、試作することによってさらに詳細な検討を行なった。付加機能をさらに追加させた場合の問題、中継方式の問題等まだ検討の不十分なところも多いが、交換機の基本動作についての問題については一応の解を得ることができた。

この試作研究により得た結論の主たるものを示す。

(1) SPC 方式の採用により機能の Building Block 化が容易である。

(2) サイクリックな処理はサイクリックなメモリーと時分割多重のハー

ドウェアで行ない、ランダムな処理はランダムアクセスメモリーとプログラム制御で行なうようにすれば、機能の分配が明確となりかつ処理速度の向上ともなる。

(3) 命令語の構成は判断命令を能率よく処理できるように配慮すべきである。

最後に本試作研究の推進に努力いただいた小林第二通信技術課長をはじめ、通話路部との接続に関して討論いただいた平沢研究員、設計・製作調整に協力いただいた関係各位に厚く感謝いたします。

なお、この試作研究にあたって前田がシステム設計を、石坂が遅延線メモリーおよび周辺回路、酒井がコアメモリーおよび周辺回路、杉山がプログラム、および制御回路を担当した。

## 参 考 文 献

- (1) 前田，平沢ほか：試作電子交換機——システムと通話路——，三菱電機技報，44，No. 9，(昭 45)
- (2) 前田，平沢，石坂，杉山：4 線式 PAM 交換機，信学会交換研究会資料 SE 67-40 (昭 43-2)
- (3) 中村ほか：蓄積プログラム制御による時分割交換機の一方式，信学誌，48，No. 10，1,699 (昭 40)
- (4) 前田，平沢：話中に発生した呼の処理の一考察，電四連大，1,986 (昭 40)
- (5) 前田，平沢，石坂：全電子私設電話交換機のニューサービスについて，信学全大，871 (昭 40)
- (6) 前田，平沢，石坂，杉山：ニューサービス 全電子私設電話交換機の制御方式，信学全大，915 (昭 41)
- (7) 前田，平沢，石坂，杉山：小容量時分割電子交換機における同時通報について，信学全大，923 (昭 41)
- (8) 前田，平沢，石坂，杉山：ニューサービス 全電子私設電話交換機の制御方式その 2，電四連大，2,168 (昭 42)
- (9) 前田，石坂：DTL-RS フリップフロップを用いた 1 MHz 磁歪遅延線読出方式，電四連大，2,251 (昭 42)
- (10) 前田，平沢，石坂，杉山，酒井：サービス要求制御方式，電四連大，2,169 (昭 42)

# 試作電子交換機 —システムと通話路—

前田 良雄\*・平沢 茂一\*・石坂 充弘\*・杉山 康夫\*  
酒井 勝也\*・後藤 正彦\*・甲破 賢吉\*

## Experimental Model of Electronic Switching System —System and Speech Path—

Central Research Laboratory    Yoshio MAEDA・Shigeichi HIRASAWA・Michihiro ISHIZAKA・Yasuo SUGIYAMA  
Katsuya SAKAI・Masahiko GOTO・Kenkichi KOUHA

To cope with the marked development of information technology and to make footholds under the circumstances for further study, electronic switching system has been brought to the mind and an experimental model has been built.

An aim of studying and working out corelated technique is also taken into the consideration. This article outlines it and describes the characteristics of the speech path and the magnetostrictive delay line memory. The model is proved to have satisfactory performance except on a minor point ; effective data are to be stored with it to give guidance in further study. The experimental model operates by stored program control of four wire PAM system with a sample frequency of 20 kHz. Integrated circuits are used throughout the system except at special points. As for cross talk to an adjacent following channel and noise level, values below -64 dBm have been obtained.

### 1. ま え が き

近年、情報産業の進展はめざましく、情報化社会への第一歩をふみ出したと言われている。われわれの周辺には毎日おびただしい量の情報が発生し、これが伝達され処理されている。

この情報化時代をささえる技術は、何と言っても電子計算機を中心とする情報処理技術と伝送・交換を中心とする電気通信技術である。情報の正確かつ迅速な伝送と、各地に散在する情報の発生地から所要の目的地まで、伝送路を用いて任意のルートを構成する交換の歴史はきわめて古いが、これ等の積み重ねが今日の情報化時代へ導く原動力となっていると言って過言ではなからう。

このような時代の背景の中で、足がかりをつかむ一つの手段として電子交換システムに着目し、試作モデルを完成した。

電子交換システムは従来の電磁機械式に代わるものとして、高速安定化、高信頼化、経済化、機能の向上、小形軽量化等が期待され、電子計算機の関連技術の発達とあいまって最近急速に開発されている。すなわち、交換機において情報を通す通話路部と、これを共通に制御する制御部の各サブシステムに分割し、前者は新しい回路素子ならびに回路技術にささえられ、後者はデジタル計算機の処理技術を利用して、蓄積プログラム制御方式によって代表されるフォン・ノイマン形の制御論理により従来の交換機で得られなかった新しいサービスをも可能にしている。

本試作電子交換機はこれ等の状況を勘案し、通話路方式に時分割形 PAM 方式を採用し、集積回路を図ると同時に、コアメモリを用いた蓄積プログラム制御方式による機能化を主たる目標に開発したものである。なお、本文では、まず電子交換の全体的な概要を述べ、以前に報告<sup>(1)</sup>した PAM 変復調回路の集積回路化を除く周辺回路ならびに総合特性を述べ、さらに時分割形通話路の制御用メモリとして方式的な整合を考慮した磁わい(歪)遅延線メモリにつき述べ、

共通制御部の詳細については別に稿<sup>(2)</sup>を改めることにした。

### 2. 電子交換機の概要

#### 2.1 特 長

##### 2.1.1 通話路部

通話路スイッチも含めた全電子化を図るために、時分割方式を採用し、次のような特長を持っている。

(1) 中小容量に比較的経済的で、PCM 交換への足がかりとなる PAM 方式を採用した。

(2) 制御部のデジタル IC 化と歩調を合わせ全体の小形化、少電力化を図るために極力集積回路化を試みた。

(3) 集積回路による低域ろ波器を単純化するために、サンプリング周波数を 20kHz とした。

(4) 時分割通話路用メモリとして磁わい遅延線メモリを開発した。

などで、このほか加入者線の完全 4 線式、トーンダイヤリング、トーンリフティング電話機を用いている。

##### 2.1.2 共通制御部

新しい時代の交換システムの要求にこたえと同時に、ハードウェアの標準化を図るために蓄積プログラム制御方式を採用し、次のような特長を持っている。

(1) プログラム用メモリを書換え可能なコアメモリにし、各種の機能追加試験を容易にした。

(2) 論理回路はすべてデジタル IC (主として DTL) とした。

(3) シーケンシャルな時分割通話路とのインターフェイスに遅延線メモリを採用し、できるだけランダムアクセス処理とした。

(4) トラフィック条件に比べ、比較的高速の処理が可能であることから、ハードウェアを単純化するために割込み機能を除き、プログラムモジュールの切換えによる多重処理方式を採用した。

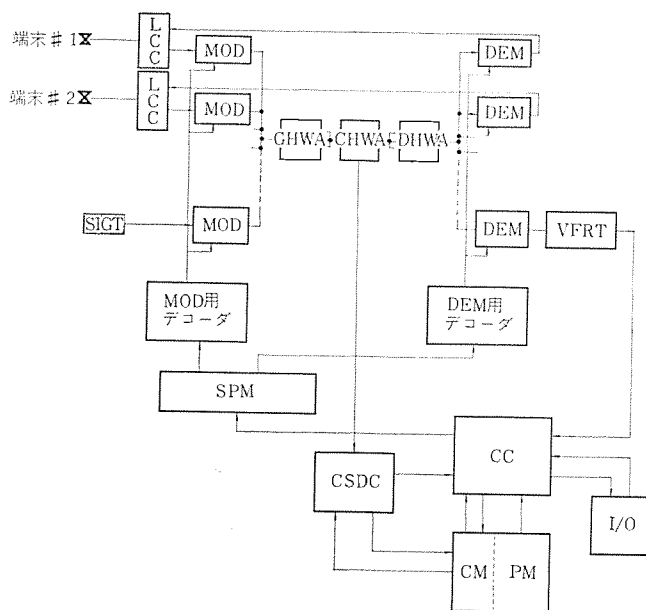


図 2.1 試作交換機のブロック図  
Block diagram of experimental model.

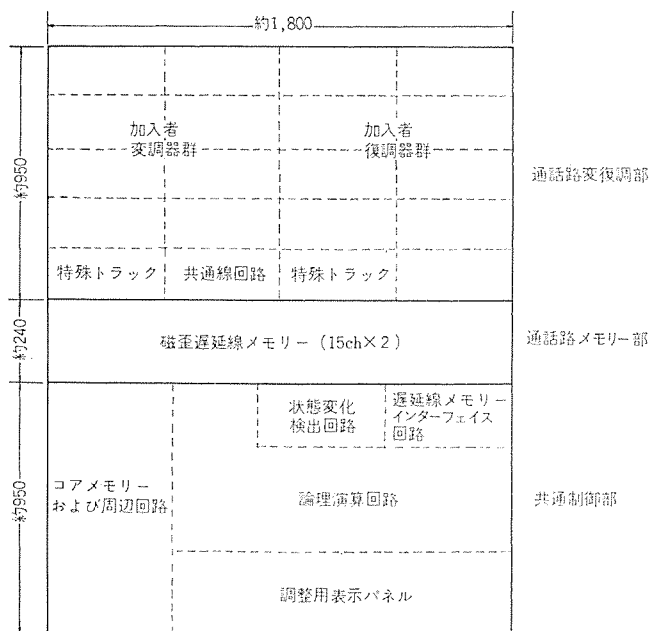


図 2.2 試作交換機の構成  
Construction of experimental model.

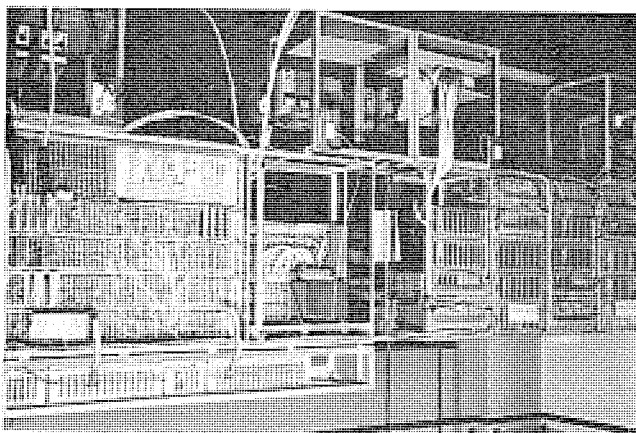


図 2.3 試作交換機の外観  
Exterior view of experimental model.

などのほか、共通線増幅器からの起呼・終話検出、ランダムアクセスメモリによる加入者状態監視方式とした。

## 2.2 方式の概要

本交換機の方式を次に示す。

### (1) システム

- (a) 交換方式：即時式自動
- (b) 回路容量：最大 800 回線
- (c) 端 末：押しボタン、トーンリング電話機

### (2) 通話路部

- (a) 通話路方式：4 線式 PAM 時分割多重
- (b) 標本化周波数：20kHz
- (c) チャンネル数：50 (多重度 100)
- (d) 加入者線路：完全 4 線式 600  $\Omega$
- (e) 通話路メモリ：磁歪遅延線メモリ
- (f) 使用部品：DTL-IC およびハイブリッド IC  
(一部に個別部品使用)

### (3) 制御部

- (a) 制御方式：蓄積プログラム方式
- (b) メモリ：コアメモリ
- (c) 使用部品：DTL, TTL-IC

## 2.3 構成

本交換機のブロック図を図 2.1 に示す。また本交換機の構成図を図 2.2 に示した。(ただし電源架は除く)。写真(図 2.3)では、調整のため通話路部と制御部は分割されている。

## 3. 通話路部

### 3.1 通話路部の概要

4 線式 PAM スイッチ回路網の構成については、以前に<sup>(1)</sup>ブロック図で示した。すなわち、多重通信で使用される PAM 変復調回路(MO DEM)のゲート開閉の搬送パルス位相を制御することにより、任意の加入者間の通話接続(スイッチ)を行なう。

この変復調回路については、いくつかの機能ブロックに分割し、この各ブロック(変調ゲート GM, 復調ゲート GD, 復調ろ波器 LPF, 増幅器 LAD)を用いて構成した変調回路および復調回路を図 3.1 に示した。したがって、本文では変復調回路を除く周辺部、特に共通線増幅器の特性解析結果ならびに通話路全体の総合特性測定結果につき述べる。

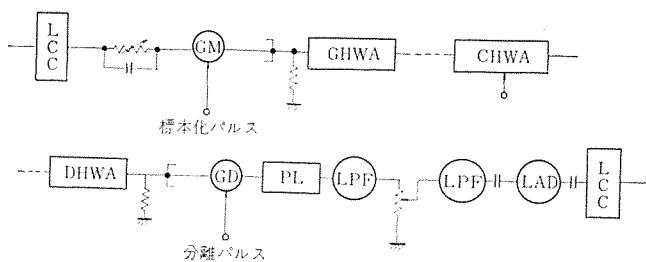


図 3.1 PAM 変復調回路  
Modem block diagram.

### 3.2 変復調回路周辺部

#### 3.2.1 共通線増幅器 (HWA)

変復調回路を除く重要部分に共通線増幅器 (HWA) がある。HWA は各加入者の MODEM を数段にわたって接続し、増幅、インヒビットゲート(会議電話用)、レベルシフト等を有する PAM 信号伝送路である。したがって、この回路の特性いかに電話品質(特に漏話)

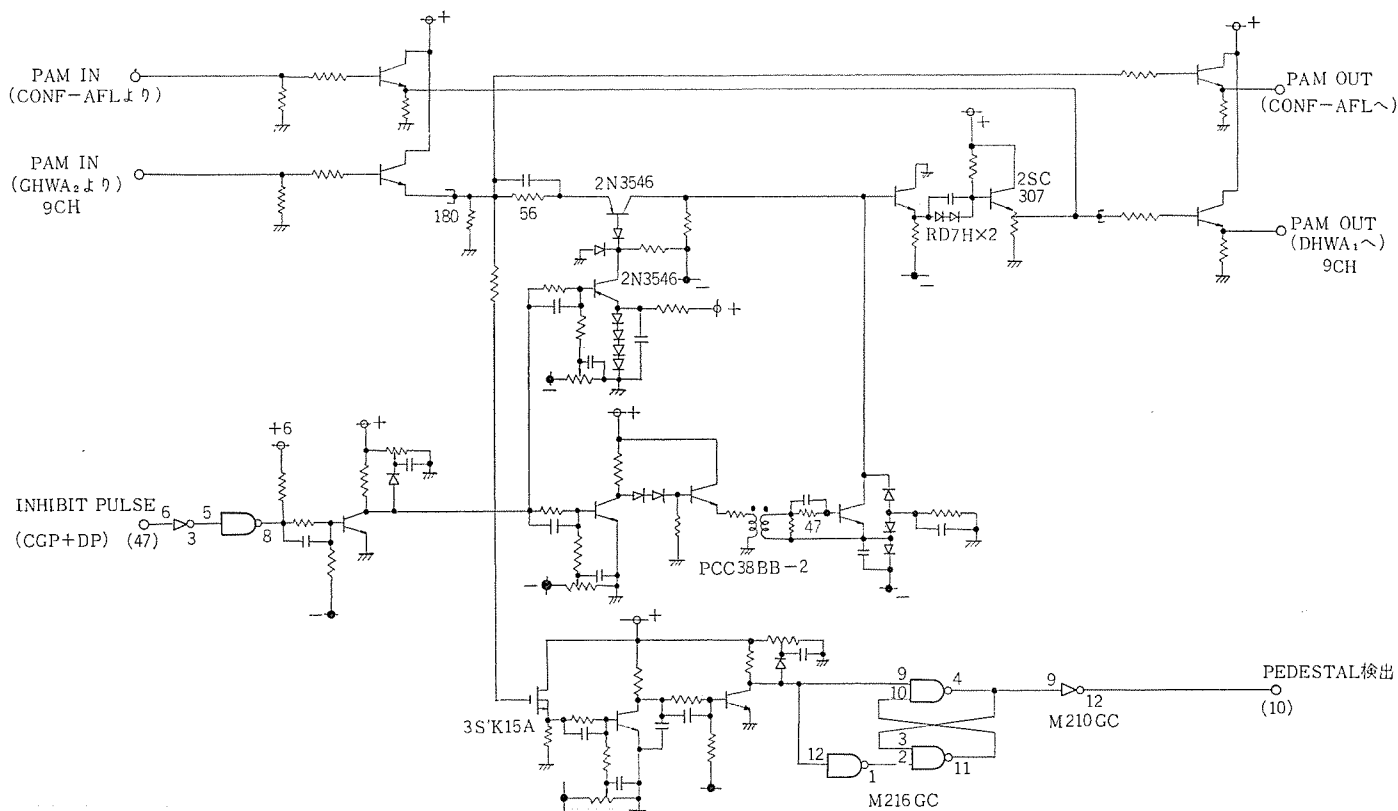


図 3.2 CHWA (共通線増幅器) 回路図の具体例  
Example of CHWA circuit.

に大きく影響する。共通線増幅器は、さらに集中化、中央、分散化に分けられ、集中化および分散化共通線増幅器は8~10のサブハイウェイを集中、分散化するために、容量性の同軸ケーブルの駆動回路を兼ねた電圧形の振動防止回路をもつエミッタホロワタイプで構成されている。中央共通線増幅器は、図3.2にその具体例を示したような回路で、その機能は次のとおりである。

#### (1) PAM 信号増幅機能とレベル再生機能

変調回路から復調回路に至る PAM 信号の減衰補償は、加入者ごとの復調増幅器および共通線増幅器で分担補償する。雑音の配分化のために HWA 系に要求される利得は、約  $10 \pm 2\text{dB}$  であり、後述のように所要周波数帯域は  $0 \sim 20\text{MHz}$  程度で、音声入力  $+6\text{dBm}$  の過負荷に耐えるダイナミックレンジが必要である。

また HWA 系では、単極性 PAM 信号の DC レベルシフトを、たとえばシリコントランジスタ1個当り  $V_{BE} \approx 0.7\text{V}$  程度考慮しなければならず、DC レベルシフトによる再生機能が必要である。

#### (2) ペDESTAL 検出機能と抑止共通ゲート

PAM 交換機の方式的な特長を生かすために、変調ゲートおよび HWA 系を用いた加入者回路状態監視として、PAM 信号の DCL レベル検出機能が必要である。また、会議電話リンクを構成する際のインビットゲートが必要で、この機能を利用して漏話に対する等価的帯域補償のための PAM 信号のガードタイムにおける放電パルスを入れている。

次に、通話路部の漏話に大きな影響を与える HWA 系の周波数特性について、簡単なモデルで定量的に解析した結果と実験結果を比較すると、次のとおりである。

##### (a) 全通漏話

全通漏話の原因は、主として音声帯域内の誘導性、容量性結合によるもの、電源を介するもの、HWA 系の低域不足によるものなど

が考えられるが、いずれも多重化されると雑多なスペクトル成分がバブル化して非了解性となるために、電話交換ではバブル雑音としてとり扱う。

バブル性雑音による全通漏話  $L_G$  は

$$L_G = 10 \log \{ \eta \cdot \gamma \cdot v_S \int_n b \, dn \} \quad (\text{dB})$$

ただし  $\eta$ : チャンネル 使用率

$\gamma$ : 会話平均時間比

$b$ : 2 チャンネル 間平均漏話量

$n$ : 上記 2 チャンネル を除く全チャンネル

$v_S$ : 上記 2 チャンネル を除くチャンネルの音声レベル

$\eta = 0.6$ ,  $\gamma = 0.25$ ,  $n = 98$ ,  $10 \log v_S \approx -12\text{dB}$  とすると、

許容量  $L_G \approx -0.4(\text{dB})$  となる。

一方 HWA 系の低域不足による漏話  $L_L$  は<sup>(3)(4)</sup>

$$L_L \approx 20 \log \frac{f_g}{k \cdot \tau \cdot f_S \cdot f_L} \quad (\text{dB})$$

ただし  $k$ : 変調度

$f_S$ : サンプル周波数

$f_L$ : 低域シャ断周波数

$f_g$ : 入力信号周波数

$\tau$ : サンプルパルス幅

CR 形高域通過回路1段あたりの応答波形より求めたもので、一般に高域シャ断の場合ほど、次数が高くないと考えられるので十分近似できる。この計算結果例を図3.3に示す。

本交換機においては  $f_L \approx 5\text{Hz}$ ,  $\tau = 0.2\mu\text{s}$  としても  $L_L \approx 84(\text{dB})$  が確保できることがわかる。ただし実験結果によると、他の原因(主として音声帯域内での漏話)のためにより大きな結果となっている。(表3.1参照)

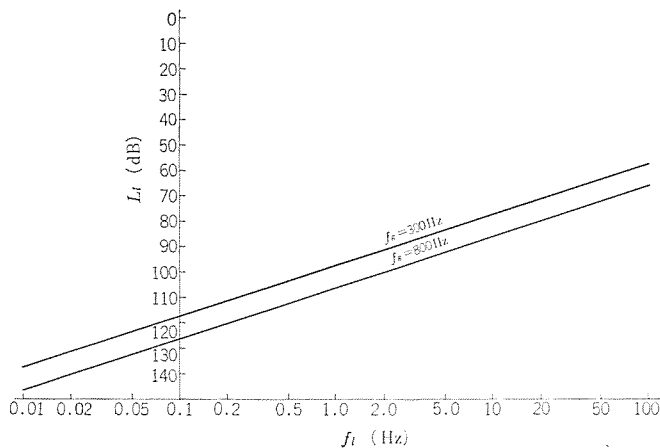


図 3.3 HWA 系の低域不足による漏話レベル  
( $k=1.0$   $f_c=20\text{kHz}$   $\tau=0.2\mu\text{s}$ )  
Characteristics of lower cut off frequency crosstalk level.

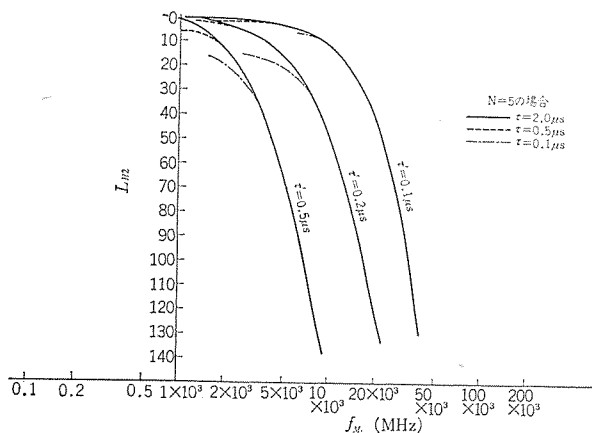


図 3.4 HWA 系の高域不足による漏話レベル  
Characteristics of higher cut off frequency crosstalk level

#### (b) 隣接漏話

隣接漏話は HWA 系の高域不足により生ずるもので、低域不足の場合と同様、CR 形低域通過回路  $n$  段による応答より高域不足による漏話  $L_L$  は、<sup>(3)(4)</sup>

$$L_H \approx 20 \log \left[ e^{-\frac{\tau'}{T_H}} \sum_{i=0}^{n-1} \frac{1}{i!} \left( \frac{\tau'}{T_H} \right)^i - e^{-\frac{\tau+\tau'}{T_H}} \sum_{i=1}^{n-1} \frac{1}{i!} \left( \frac{\tau+\tau'}{T_H} \right)^i \right] \quad (\text{dB})$$

ただし  $\tau'$ : サンプルガードタイム

$$T_H: R_H C_H = \frac{1}{2\pi f_H} \quad (f_H: \text{高域シャ断周波数})$$

で、この計算結果例を図 3.4 に示す。

本交換機において  $\tau=0.3\mu\text{s}$ ,  $\tau'=0.2\mu\text{s}$ ,  $f_H=12\text{MHz}$ ,  $n=5$  とすると、 $L_H \approx 65\text{dB}$  となり、実験値とかなり一致することがわかる。

図 3.5 に HWA 系の周波数特性の測定結果例を示す。

#### 3.2.2 特殊トラंक

特殊トラंकには、

- (1) ダイヤルレジスタラंक (VFRT)
- (2) 各種信号音ラंक (SIGT)

があり、前者はトラフィックに応じ空間分割的に設置する。電話機に押しボタンダイヤル方式を採用しているので、図 3.6 のように音声周波数受信弁別回路で構成されている。

後者はダイヤル音 (DT)、呼出し音 (RGT/RBT)、話中音 (BT) を発生する回路で、マイクロフォークおよびハイブリッド IC による増幅器で構成されている。

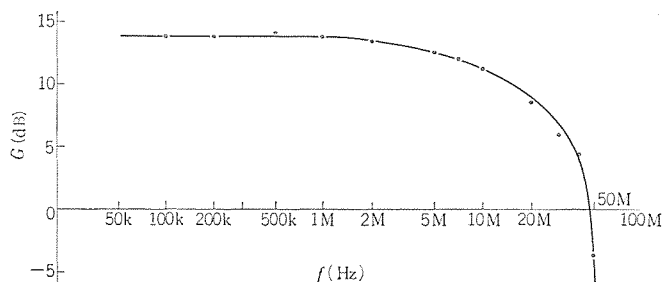


図 3.5 HWA 系の高域周波数特性例  
Frequency characteristics of Highway of Amp.

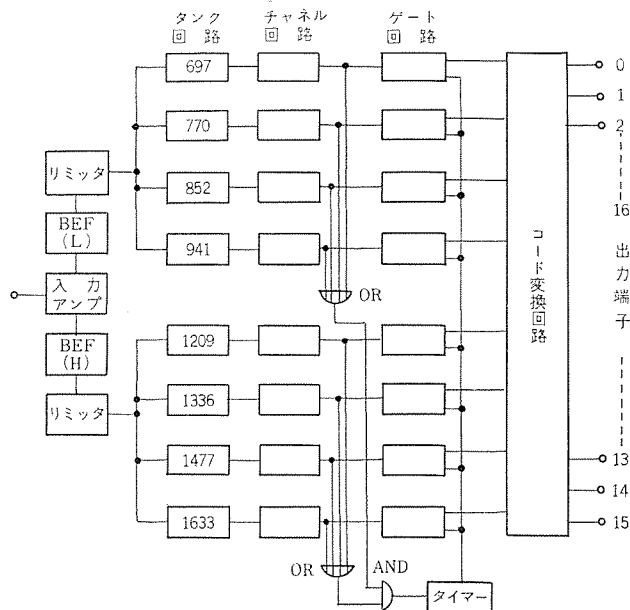


図 3.6 トーンダイヤル変信回路ブロック図  
Block diagram of VFR

#### 3.2.3 その他

変復調回路周辺部としては、以上のほかにライン結合回路、クロック分配回路およびデコード回路などがある。ライン結合回路 (LCC) は、回線とのインターフェイスとして整合、送話器電流の供給、トーンダイヤル発振回路とトーンリング増幅器の電源供給、ライン長補償、PAM 信号のペダスタル調整等を行ない、将来集積回路化のために抵抗網を用い完全 4 線構成とした。

クロック分配回路 (OSP) は、共通制御部より与えられる該加入者のゲートを選択するゲート選択情報 (ほぼ 1 タイムスロット幅—500ns—を有し、パルス幅変動、ジッタ、該選択ゲートまでの信号伝ば(播)時間のばらつきが含まれる) との論理積によりストローブを行なうタイミング規制のための回路で、パルス位置およびパルス幅とも可変で変復調器間の PAM 信号伝ば時間を補償し、最適位置に半固定化される。

デコード回路 (DEC) は、Excess-3 コードで記憶された加入者番号情報を十進に変換するラリデコードの出力を用い、該加入者を指定する選択パルスを発生させる。これらの回路は、DTL-IC を用いているためにスイッチング速度が遅く、また布線のばらつきによる応答波形の影響も受けやすいため、極力実装方法の標準化を図った。

#### 3.3 通話路総合特性

通話路部の総合特性を表 3.1、図 3.7 に示す。

表から明らかのとおり、全通漏話を除いてほぼ目標値どおりのものが得られている。全通漏話については共通線系の周波数特性よりむしろ、主として音声帯域内での誘導性・容量性の結合および電源を介しての漏話の影響があり、実装位置による差異も認められた。

表 3.1 通話路総合特性  
Characteristics of speech path

項目	測定点	特性		備考
		目標値	実現値	
伝送損失 周波数特性 雑音	800Hz	0dB 300~3,400 Hz 0.5 mV	0dB 300~3,400 Hz -64 dBm	ただしCHごと調整 2/5 CCITT (等価換算値) 放送回線評価値 入力 1kHz 0dBm
漏話減衰量 全通漏話 隣接漏話		82 dB 以上 64 dB 以上	78 dB 以上 64 dB 以上	
高調波ひずみ減衰量 第2高調波 第3高調波	0 dBm 入力 0 dBm 入力	30 dB 以上 40 dB 以上	32 dB 以上 48 dB 以上	
過負荷点		+6 dBm	+9.5 dBm	

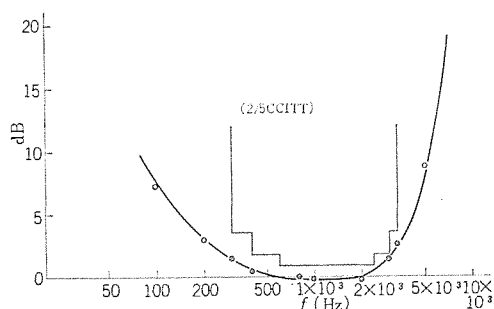


図 3.7 通話路の周波数特性測定例  
Frequency characteristics of speech path.

なお前述のとおり、漏話チャネルの平均音声レベルは-15dBm（余裕をみて-12dBmとした）といわれており、この値によると全通漏話許容量は-0.4dBとなるから、雑音レベル-64dBmの影響や非了解性漏話となることから実用上ほとんど問題なく、むしろ目標値の設定を再検討すべきであろう。（実際には了解性の隣接漏話のほうが問題が多い）

また、その他の項目についても目標値自身、従来の電話交換機の基準の一部を目安に設定したもので、必ずしも適当であるとはいえないものもあるが、実験の結果特に重大な支障になるものではない。

#### 4. 磁わい遅延線メモリー

時分割多重スイッチ回路網のタイムスロット割当情報はサイクリックに繰り返されるので、この情報の記憶には循環形遅延線メモリーが適当で、ここでは縦波モードの磁わい遅延線を検討した。このメモリーは電気エネルギーをジュール効果によって、超音波エネルギーに変換して遅延媒体中に記憶させるもので、基本構成を図4.1に示す。

##### 4.1 遅延線路

メモリーの安定性は第1に遅延線路の特性によって決まり、それは媒体中を遅延してきた超音波エネルギーをダマリ効果によって、電気エネルギーに逆変換されたときの分解能( $\tau_m$ )と出力電圧( $e_m$ )によって評価される。

分解能： 超音波磁わい遅延線のパルス伝送理論については多くの文献があるが、A. Rothbart and L. Rosenberg の図式解法<sup>(5)</sup>により、遅延線に無損失に隣接パルスを重ねることができる最大繰返し周波数 $f_m$ は、変換器コイル下の実効長 $l_1'$ と超音波の伝ば速度 $V_0$ との間に、

$$f_m = \frac{1}{T_m} \leq \frac{V_0}{2l_1'}$$

の関係があり、ここで $f_m=1\text{MHz}$ 、 $V_0=5 \times 10^3 \text{m/s}$ （純ニッケル）とす

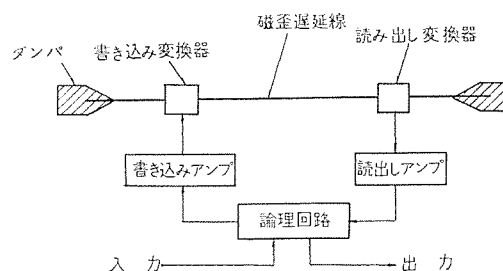


図 4.1 磁わい遅延線メモリーの基本構成  
Block diagram of magnetostrictive delay line memory.

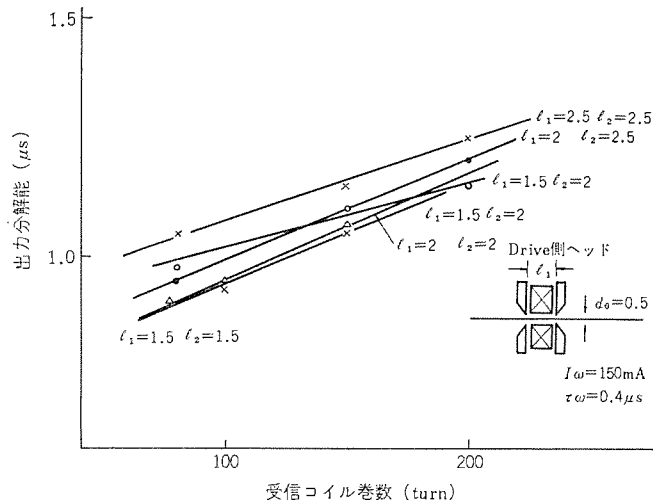


図 4.2 変換コイル形状と出力分解幅  
Relation between transducers and output pulse resolution.

ると、 $l_1$ は2.5mm以下となる。ところで上記文献では変換器部分の端効果と超音波パルスの広がりを見逃しているため、変換コイルの実効長 $l_1'$ は限界長(2.5mm)より短くせねばならない。このため送信側では磁気シールド用磁性体でコイルをはさみ変換器としている。受端はコイルのみである。送受信コイルの長さ( $l_1$ ,  $l_2$ )をパラメータとして、出力分解幅と受信コイルの巻数の関係を図4.2に示す。分解能が低いと出力パターンが変動する。

出力：出力(図4.8)を決定する要因は変換器の形状、変換器のバイアス磁界、線材の熱処理がある。

図4.3に変換コイルの形状と出力電圧の関係を示す。変換器出力はバイアス磁石によるコイル下の媒体と鎖交する磁束の時間微分按比例するが、変化分が大きくなるように媒体のB-H曲線の適当な値にバイアスを設定しなければならない。このため1,500~1,800 Maxwellの棒磁石の磁束の一部を鉄片で側路して受端側で50~80Oeに調整する。

また変換効率も媒体の熱処理の影響を受ける(図4.4)。このときに分解能が低下するので、焼鈍の範囲は変換器の部分に限られる。さらに伝ば長に伴う出力減衰量は、0.2φニッケル線では約2dB/50μs delayで150μs程度まではリニアと考えてよく、分解幅の増分は0.1μs/50μs delay程度となる。

温度特性： 超音波を伝送する音響線材の長さおよびヤング率は温度関数であり、一般には遅延時間の温度係数 $\alpha_T=1/D \cdot dD/dT$ がゼロ付近になるようにNi-Fe合金などが用いられるが、ここでは遅延時間が短かいので磁わい係数が大きい純ニッケルを用いる。純ニッケルの $\alpha_T=+148 \times 10^6$ を用いると、遅延時間変動は線路長25cmで50°Cの温度変化に対し約550nsとなる。また出力電圧 $e_m$ 、分解幅 $\tau_m$ も図4.5に示すように温度変化を受ける。

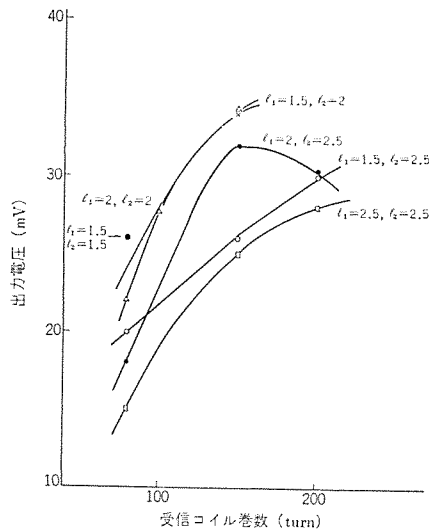


図 4.3 変換コイル形状と出力電圧  
Relation between transducers and output voltage.

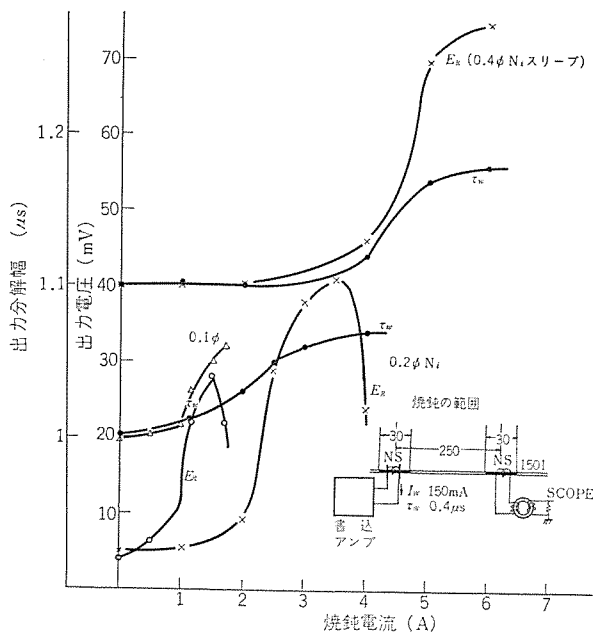


図 4.4 電流焼鈍による出力電圧と出力分解幅の変化  
Change of output voltage and pulse resolution by annealing with current heating.

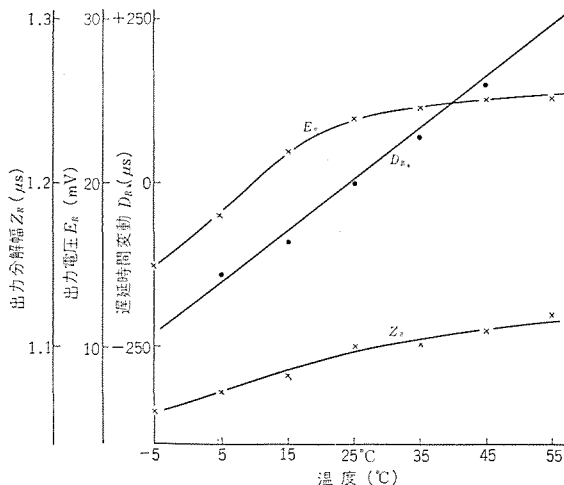


図 4.5 線材の温度特性 (0.4 φ Ni スリプ線の場合)  
Temperature characteristic curve of wire

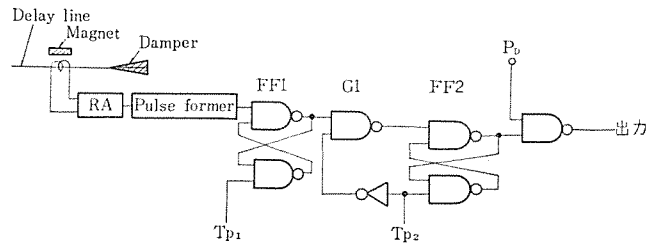


図 4.6 読出し側の回路  
Read out circuits

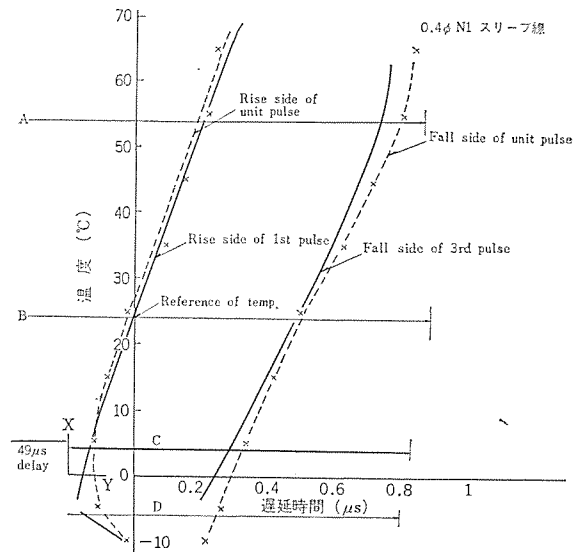


図 4.7 Pulse Former 出力パルスの温度特性  
Temperature characteristics of output pulse

#### 4.2 エラスティック論理回路<sup>(6)</sup>

上述のように磁わい遅延線メモリの出力は、遅延時間変動とパターン変動を受けるので、このメモリが広い動作温度範囲を有するためには、これらの変動ができるだけ小さい線材を用いる必要があるが、一般には出力電圧と分解能、遅延時間変動とは矛盾した傾向になるため、これらを論理的に吸収することも一方法である。ここでエラスティック論理回路とは到着時間位置の不規則な、かつパターンの変形された入力波を受けて、規定時間位置に一定パルス幅の波形を出力とする機能を有するものである。読出し側の回路を図 4.6 に示す。

遅延線出力波形の温度依存性を Pulse Former 出力パルス幅で観察し、単一パルスの rise side と fall side および 3 個連続したパルスの最初のパルスの rise side と最後のパルスの fall side の変化を図 4.7 に示す。エラスティック論理回路は IC-NAND ゲートだけからなり、2 個の RS フリップフロップ (FF1, FF2) はゲート G1 で結ばれている。この回路の動作波形を  $-5^{\circ}\text{C}$ 、 $+25^{\circ}\text{C}$ 、 $+65^{\circ}\text{C}$  について図 4.8 に示す。

3 発連続してくる Pulse Former 出力パルス幅をそれぞれ  $\tau_1$ 、 $\tau_2$ 、 $\tau_3$  (ns) としたとき、出力パルス幅変動率  $\eta$  を、

$$\eta = \frac{\tau_1 - \tau_3}{\tau_1} \times 100(\%)$$

(ただし  $\tau_1 = \tau_3$ )

と定義し、第 1 パルスの rise side の遅延時間の許容変動値  $w$  (ns) との関係を図 4.9 に示す。この回路は、たとえば  $\tau_1 = 400$  ns、 $\eta = 30\%$  に対し 710 ns (実測値) の遅延時間変動を補正する。

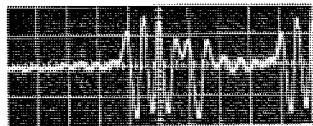


図 4.8(a) 遅延線出力波形  
(V : 50 mV/div,  
H : 2 μs/div)  
Output waveform of delay line.



- 5°C



+25°C



+65°C

Pulse former 出力  
FF1  $Q_{n+1}$   
FF2  $Q_{n+1}$   
出力 (再書込波形)

(b) エラスティック論理回路の動作波形  
Wave form of elastic logic circuits.

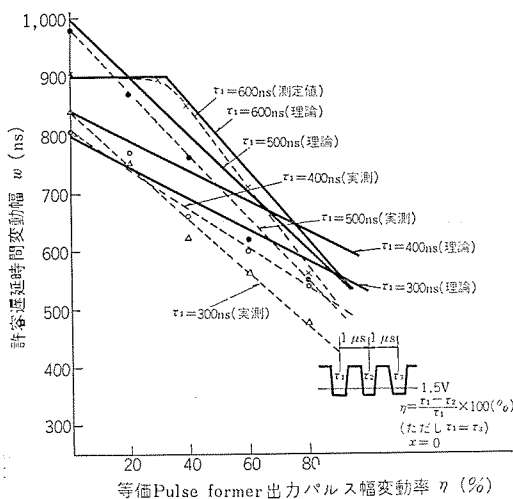


図 4.9 パターン変動率と許容遅延時間変動幅の関係  
Relation between pattern fluctuation and allowable delay time.

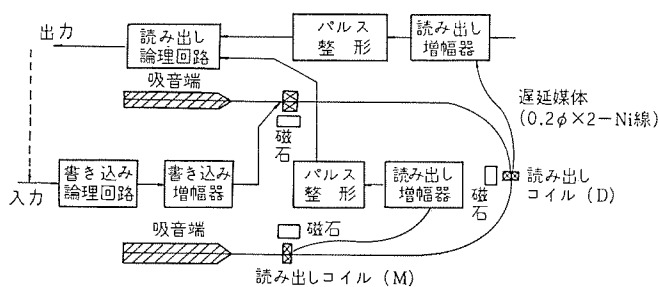


図 4.10 磁わい遅延線メモリの構成  
Block diagram of magnetostrictive delay line memory.

### 4.3 実装

PAM 通話路のタイムスロットの割当ては逆位相法を用いたので、読出し側の回路は 2 系統必要である。全実装された遅延線メモリの構成を図 4.10 に、実装写真を図 4.11 に示す。

最後に特性をまとめると次のようになる。

遅延線材	0.2 φ × 2 純 ニッケル 線
遅延時間	50 ± 4 μs (50 bits)
書き込み周波数	1 MHz
駆動電流	150 mA

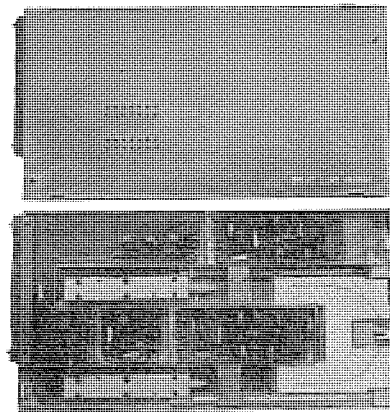


図 4.11 PAM 通話路用磁わい遅延線 メモリ  
Magnetostrictive delay line memory for PAM speech path.

出力電圧	70 mV
動作温度範囲	-5°C ~ +65°C
外形	280 × 145 × 200 (mm)

サンプリング 周波数 20 kHz, 多重度 100 の要求を満たすためには、1 遅延線の記憶容量は 100 ビット、書込周波数にして 2 MHz が必要である。実験的には 2 MHz までの特性を得たが、信頼性などの点から試作機では 1 MHz のものを並列にして使用している。

### 5. む す び

以上、試作電子交換機のシステムと通話路部の一部につき述べた。本交換機の試作にあたっての主たる目的は、関連技術の研究開発にあり、システムの周辺、関連 (たとえば伝送) 技術とのバランス等にも留意して進めた。電子交換機としては種々不満な点、改良を要する点もあるが、このような目的から一応所期の目標を達することができ、可能性、経済性追求などの目安と今後の研究開発の方向の指針を得ることができた。

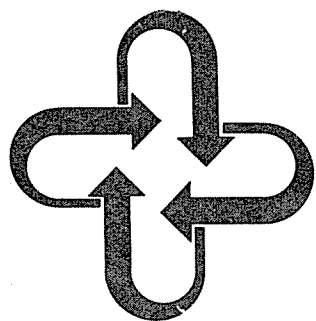
最後に、本試作に協力いただいた北伊丹製作所の集積回路担当部門のかたがた、通信機製作所の関連部門のかたがたに感謝いたします。(昭和 45—4—20 受付)

### 参 考 文 献

- (1) 前田, 平沢, 後藤: 4 線式 PAM スイッチ 網の集積回路化 三菱電機技報 41, No. 8, 1,057 (昭 42)
- (2) 前田, 杉山: 試作電子交換機——共通制御方式—— 三菱電機技報 44, No. 9, (昭 45)
- (3) Harold M, Straube: Dependency of Crosstalk on Upper and Lower Cut Off Frequencies in PAM Time Multiplexed Transmission Paths, IRE Trans. com. sys., Sept. (1962)
- (4) 鈴木, 小野, 回陽: 4 線式 PAM 交換通話路の研究, 通研実報, 16, No. 10, (昭 42)
- (5) A. Rothbart and L. Rosenberg: A Theory of Pulse Transmission Along A Magnetostrictive Delay Lines, IRE Trans. PGUE-6, (1957)
- (6) 前田, 石坂: DTL R-S フリップフロップを用いた 1 MHz 磁わい遅延線メモリ 読出し方式, 電四連大, (昭 42)

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 所 制
制御整流装置の保護方式	44-4-3	539382	小川 裕 三	神戸製作所
時間素子	44-4-3	539383	{秦 卓也・松岡 宏 昌 錦 織 威 紀	中央研究所
自動車用 クラッチ 制御装置	44-4-3	539384	辰 巳 巧	姫路製作所
直流電動機の制御装置	44-4-3	539385	六 藤 孝 雄	伊丹製作所
コッククロフトウォルトン 型高電圧発生装置	44-4-3	539386	柳 沢 武	中央研究所
整流子電動機の手速度制御装置	44-4-3	539387	藤 井 学・太 田 誠	商品研究所
ネットワーク 配電方式	44-4-3	539388	林 重 雄	中央研究所
誘導電動機の手速度制御装置	44-4-3	539389	{吉田 太郎・梶 野 幸 男 佐 竹 幸 雄	名古屋製作所
信号検出回路装置	44-4-3	539390	川 上 昭・中 村 信 弘	通信機製作所
半導体気相成長膜中の不純物濃度勾配の制御方法	44-4-3	539391	{伊藤 昭子・岩 田 泰 昌 中 島 当 記・山 本 武	北伊丹製作所
温度補償回路を備えた マルチバイブレータ	44-4-3	539392	亀 田 亨	北伊丹製作所
レーダ 方式	44-4-3	539393	近 藤 輝 夫・岩 部 昭	通信機製作所
通過車の平均速度測定装置	44-4-26	541794	{田 村 祥 一・阿 部 寿 夫 宮 内 忠 二	鎌倉製作所
偏光系を用いた変色移動視板	44-4-26	541796	井手平三郎・依 田 功	大船製作所
レコーダモニタ 装置	44-4-26	541798	桑 田 博	鎌倉製作所
水銀放電灯	44-4-26	541799	{土 橋 理 博・若 林 正 雄 三 上 龍 夫	大船製作所
真空 スイッチ	44-4-26	541795	亀 山 三 平・林 幸 平	伊丹製作所
インバータ 装置	44-4-26	541797	赤 松 昌 彦	中央研究所
送電線保護継電装置	44-4-26	541800	古 谷 昭 雄	神戸製作所
誘導電動機の運転装置	44-4-28	541801	川 畑 隆 夫	中央研究所
保護継電装置	44-4-28	541802	古 谷 昭 雄	神戸製作所
送配電線の故障区間標定装置	44-4-28	541803	寺 田 真・下 迫 賀 生	神戸製作所
カウンタスイッチ	44-4-28	541805	佐 藤 孟 生	中央研究所
回転磁極の無刷子励磁制御装置	44-4-28	541806	尾 畑 喜 行	神戸製作所
チャンネルスキッピング 高速化方式	44-4-28	541807	前 田 良 雄・杉 山 康 夫	中央研究所
自動点滅装置	44-4-28	541808	三 好 明 好	福山製作所
電動噴霧器	44-4-28	541804	服 部 信 道・鶴 谷 嘉 正	群馬製作所
放電加工装置	44-5-2	542230	斉 藤 長 男	名古屋製作所
周波数測定装置	44-5-2	542231	藤 原 謙 一・柳 沢 忍	通信機製作所
酸化銀電池の製造方法	44-5-9	542530	鳥 生 次 郎・長 谷 川 知 治	商品研究所
サーボ 系に於ける 定常速度遅れ補償方式	44-5-9	542532	藤野正太郎	鎌倉製作所
ドラムを利用したシーケンス 記録装置	44-5-9	542534	{的 場 徹・仁 田 周 一 五十嵐 善 英	鎌 本 重 制
電話交換方式	44-5-9	542528	前 田 良 雄	中央研究所
再開路継電装置	44-5-9	542529	古 谷 昭 雄・鈴 木 健 治	神戸製作所
電車線の区分装置	44-5-9	542531	白 庄 司 昭・久 山 研 一	伊丹製作所
気密容器内の三方向駆動装置	44-5-9	542533	中 田 省 三	中央研究所
遠方監視制御装置	44-5-9	542535	森 健・山 中 彪 生	神戸製作所
変圧器	44-5-9	542536	菅 寿 郎・三 浦 良 和	伊丹製作所
半導体装置	44-5-9	542537	船 川 繁・山 本 勇	北伊丹製作所
半導体装置	44-5-9	542538	船 川 繁・山 本 勇	北伊丹製作所
パルス 発生装置	44-5-9	542539	小 嶋 鈴 夫	北伊丹製作所
電動タイプライタの操作装置	44-5-9	542540	大 野 才 三	中央研究所
レーダにおける目標検出方式	44-5-9	542543	山 内 信 治・柴 田 信 之	通信機製作所
磁気円板	44-5-9	542541	池 上 麒 一 郎・岡 村 康 弘	鎌倉製作所
サーキュレータ	44-5-9	542542	中 原 昭 次 郎・川 端 俊 一 郎	鎌倉製作所
皿洗滌方法	44-5-21	543655	東 海 枝 明 男・初 川 昇	日 建 (単)
電気毛布の保護装置	44-5-29	544342	中 村 富 家・高 梨 靖 士	群馬製作所
環状永久磁石の磁化方法	44-5-29	544343	網 島 芳 和	相模製作所
アーク 溶接用変圧器	44-5-29	544340	竹 内 友 彦・野 口 昌 介	名古屋製作所
位相変調器	44-5-29	544341	{桂 川 弘・川 上 昭 中 村 信 弘	通信機製作所
搬送保護継電装置	44-5-29	544344	北 浦 孝 一	神戸製作所
磁気増幅器	44-5-29	544345	藤 井 学	商品研究所



## 固体表面の研究とその応用

西嶋 光昭\*・小宮 啓義\*\*・伊吹 順章\*\*

### 1. ま え が き

近代的技術の進歩に伴い固体表面の研究は、基礎科学的な面においてもまたその工業面での応用という実際の面からも、多くの分野に貢献するようになってきた(図 1. 1)。

長らく表面研究は、理論的解釈をするにしても実験を行なうにも、泥沼であるという考え方があった。定量的な理論計算はつい最近までほとんどなかった。これは表面上での原子配列に関する情報が少なかったこともあるが、根本的には結晶内部の問題に比べて表面では対称性が悪いというためであろう<sup>(1)</sup>。しかし最近の電子計算機の発達が困難な計算の処理を可能にしつつある。

実験面ではかなり最近まで表面の平均的な性質を調べる研究が行なわれていたが、超高真空技術の発展が表面研究を容易にした<sup>(2)</sup>。

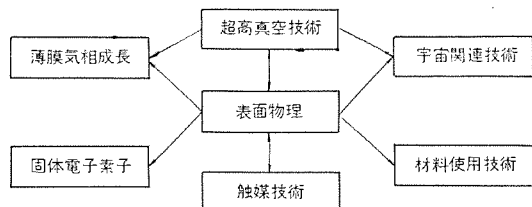


図 1. 1 固体表面の研究とその応用

$10^{-6}$  torr 程度の圧力中では金属表面は約 1 秒間でガスの単原子層で完全におおわれるが、 $10^{-10}$  torr 程度の圧力中では数時間を要する。それゆえに原子的に清浄な表面の作成が可能となり、表面特有の観測手段も急速に進歩した。今やはっきりと表面構造をつかんで原子的な尺度で表面現象の研究が行なわれるようになり、表面科学という新しい研究分野が形成されてきた。

この領域で行なわれている研究内容も非常にぼう大となったが、これは大まかに次の四つの分野に分類される。それらは

(1) 粒子線(電子、光子、イオン、中性原子)を表面に照射して表面から放射される粒子線を検出して表面の状態を調べる分野—低速電子線回折、低速電子線散乱、オージェ電子分光、電場イオン顕微鏡、光電子放出効果、低速電子線によるイオン放出等

(2) 電場、熱、機械的ストレスを加えて表面から放射される粒子線を検出して表面の状態を調べる分野—電場電子顕微鏡、フラッシュフィラメント等

(3) 粒子線、電場、熱機械的ストレス、磁場を加えて表面の電磁気的性質の変化を調べる分野—電子磁気共鳴、ホール効果、磁気抵抗効果(電気伝導度測定)等

(4) 半導体—金属、異種半導体間等の界面の研究—トンネル分光、磁気抵抗効果(電気伝導度測定)等

表 1. 1 表面の代表的な研究分野の一覧

研究分野	おもな研究方法	内 容	応 用 (基 礎 的)
粒子線を表面に照射して表面から放射される粒子線を検出して表面の状態を調べる	低速電子線回折	電子線を照射して表面で散乱された電子線の回折像を調べる	清浄単結晶表面の構造、表面金属原子の再配列、ガス吸着、表面反応、薄膜成長
	低速電子線散乱	電子線を照射して表面で散乱された電子線のエネルギー分布を調べる	吸着ガスのエネルギー状態
	オージェ電子分光	電子線を照射して表面から放射されるオージェ電子のエネルギー分布を調べる	表面不純物の同定
	電場イオン顕微鏡	針表面の近傍で電場イオン化したガス原子による電流のパターンをけい光面で調べる	格子欠陥、粒界、放射線損傷、合金構造、吸着、表面反応
	光電子放出効果	光を照射して表面から放射される光電子の測定	仕事関数、電子親和力、遷移準位のエネルギー値、状態密度、選択則、固体内電子の散乱機構
	低速電子線によるイオン放出	電子線を照射して表面から放射されるイオンを測定する	吸着ガスと表面の相互作用ポテンシャル、イオン放出断面積、全放出断面積、ガス吸着脱着のカイネティクス
電場、熱、機械的ストレスを加えて表面から放射される粒子線を検出して表面の状態を調べる	電場電子顕微鏡	針表面から高電場により放射される電子のパターンをけい光面で調べる	結晶面による仕事関数の差、吸着脱着、吸着分子の表面拡散、表面反応、ウィスカの成長
	フラッシュ・フィラメント	表面を高温にして脱着されるガスの検出	吸着ガスの結合状態、吸着確率、吸着脱着のカイネティクス
粒子線、電場、熱、機械的ストレス、磁場を加えて表面の電磁気的性質の変化を調べる	電子磁気共鳴	不対電子の持つ磁気モーメントによるマイクロ波の吸収	機械的損傷、熱処理によって生ずる ESR 中心とガスの相互作用、吸着ガスと伝導電子の相互作用、dangling bond の ESR
	ホール効果	電流をある方向(縦方向)に流し、それと垂直に磁場を加えると横方向に電場が生じる	表面の導電機構、吸着ガスの電気伝導への影響
	磁気抵抗効果(電気伝導度測定)	電気伝導度の磁場依存性を調べる	
半導体—金属、異種半導体間等の界面の研究	トンネル分光	トンネル接合を流れるトンネル電流を測定する	界面準位、不純物準位、電子帯構造、電子格子相互作用
	磁気抵抗効果(電気伝導度測定)	電気伝導度の磁場依存性を調べる	界面の導電機構
応用分野(実用的)	薄膜、厚膜、スパッタリング、コーティング、エッチング、イオンインプラネーション、実用光電子面、実用二次電子面、接着、摩擦、摩耗、触媒、電界効果トランジスタ(MOST)、薄膜トランジスタ(TFT)、薄膜電場発光素子、トンネル接合、ヘテロ接合、ショットキーバリアダイオード、表面安定剤、電子写真		

である。これらの各分野の内容は表 1. 1 にまとめておいた。

表面研究は工業面でもきわめて広い応用研究の分野がある。具体的な例としては薄膜、厚膜、スパッタリング、コーティング、エッチング、イオンインプラネーション、光電面、二次電子面、接着、摩擦、摩耗、触媒、電界効果トランジスタ (MOST)、薄膜トランジスタ (TFT)、薄膜電場発光素子、トンネル接合、ヘテロ接合、ショットキーバリアダイオード、表面安定剤、電子写真があげられる。

もとよりこのように急速に進歩しつつある表面科学の研究の全ぼう(貌)を一小論にまとめることは不可能である。筆者らは最近開拓されつつある比較的新しい表面物性観測技術である低速電子線回折、低速電子線散乱、オージェ電子分光、低速電子線によるイオン放出、光電子放出効果、電子磁気共鳴、トンネル分光、表面二次電導について各分野での代表的な研究とその応用について述べ、表面研究に関する現状の解説としたい。

## 2. 低速電子線回折 (Low Energy Electron Diffraction, LEED)

LEED は Germer たち (1960 年) が結晶表面で散乱された電子線を後段加速してけい光面に回折像を映す実験技術に成功して以来、固体表面の研究の有力な手段として使われている (図 2. 1)<sup>(3)</sup>。電子線のエネルギーは 1~300 eV 程度、すなわち波長にして 0.7~12 Å 程度で、これは固体表面の単位格子およびその数倍の長さを周期とする超格子のほぼすべてに対応する。したがって LEED は清浄単結晶表面の構造、表面金属原子の再配列、ガス吸着、表面反応、薄膜成長の過程等の研究手段として有効である。測定法には Germer たちが開発した回折像直視形があり、また回折現象のより精密な研究には Farnsworth たちが長らく研究を行ってきたファラデーケージ形がある。Germer たちの研究以後 10 年を経過し量子論的な取り扱いも試みられているが、電子線の結晶表面における散乱が複雑であるために回折理論はまだ確立されていない。表 2. 1 にはこれまで調べられた半導体試料を示した。以下典型的な Si(111) 清浄表面の回折像について述べる。

Lander たち (1963 年) はへき (劈) 開によって Si 結晶の (111) 面を作り  $\sim 10^{-9}$  torr の真空中で 1,200°C くらいに加熱焼きなましして図 2. 2 に示すように正規の回折点 (うち一つを矢印で示した) のほかに 1/7 の分数次回折点 (もとの格子では 7 倍) をもった超構造回折図形 (うち一つを丸印で示した) を得た<sup>(5)</sup>。7×7 回折像はその再現性の良いことも各所で確かめられている。この結果のみからは表面原子配列を一義的に決めることはできないが、Lander たちは、共有結合が表面で断ち切られるとその余った dangling bond は、エネルギー的に最低の状態となるために変位して、図 2. 3 に示すような共役 2 重結合の色彩を持った構造となると考えた。このほかにも Seiwatz の共鳴連鎖模型<sup>(6)</sup>、平林の刃状転位網模型<sup>(7)</sup>、Haneman の表面原子を一つおきに浮き沈みさせた模型 (後述) が提案されている<sup>(8)</sup>。

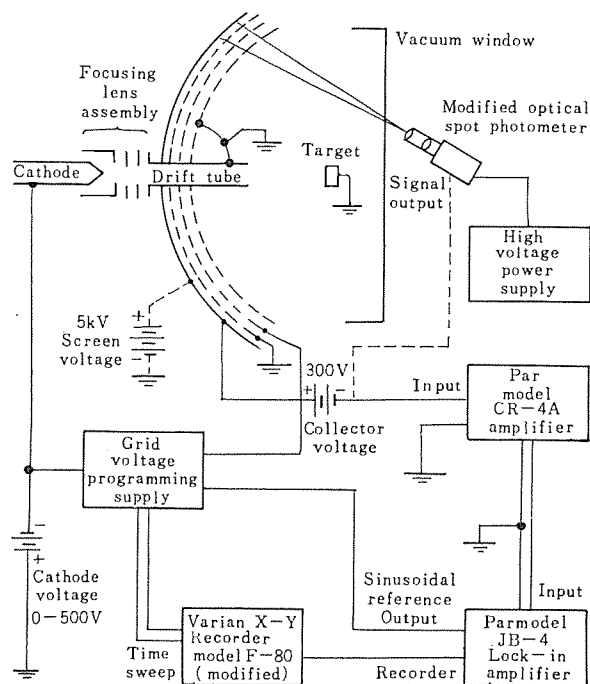


図 2. 1 後段加速形低速電子線回折系<sup>(4)</sup>

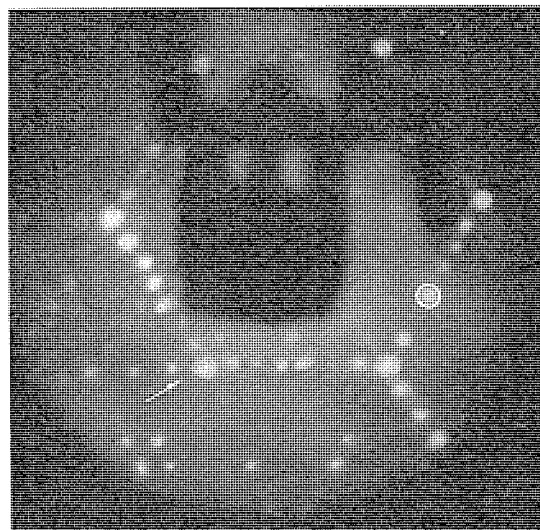


図 2. 2 典型的な Si (111) 清浄表面の 7×7 回折像 (電子線のエネルギーは 60 V)<sup>(5)</sup>

表 2. 1 LEED で調べられた半導体試料<sup>(35)</sup>

清浄な表面	Ge, Si, C(diamond, graphite), Bi <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> , CdS, CdTe, GaAs, GaSb, InAs, InS, InSb, PbS, PbSe, PbTe
エピタキシャル成長	Al/C(diamond), Si, I, Na/Ge, Ag, Al, Ba, Br, Ca, Cs, Ge, I, In, Na, P, Pb, Sb, Se, Sn, Ta/Si
ガス吸着と表面反応	CO <sub>2</sub> /C(diamond), H <sub>2</sub> /C(diamond), H <sub>2</sub> S, H <sub>2</sub> Se/Ge, As <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Br <sub>2</sub> , Cs, C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> Br, FeCl <sub>3</sub> , GeI <sub>3</sub> , GeI <sub>4</sub> , Xe, ZnI <sub>2</sub> /C(graphite)

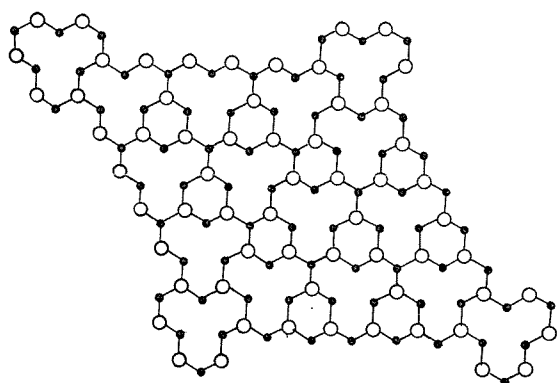


図 2.3 Lander たちが提案した Si (111) 7×7 回折像に対応する清浄表面の原子配列(二重結合や内部の原子は省いた)<sup>(5)</sup>

これらの優劣は回折強度特性をいかに再現できるかで決まるが、回折理論が不完全なために決着はついていない。最近、オージェ分光によって 7×7 超構造は鉄の不純物によると報告されて大きな問題となったが確認はされていない<sup>(9)</sup>。

最近の興味の中心は清浄単結晶表面の構造にとどまらずガス吸着表面反応薄膜成長に及んでいる。LEED は次に述べる低速電子線散乱と並んでますます威力を発揮するものと考えられる。

### 3. 低速電子線散乱

(Low Energy Electron Scattering, LEES)

これは最近盛んになってきた分野で入射電子線のエネルギーと試料表面で散乱された電子線のエネルギーとの差から固体表面上の吸着ガスのエネルギー状態に関する情報を得るものである。実験方法としては LEED を使った方法と静電偏向法(図 3.1)が考えられている<sup>(10)</sup>。前者はエネルギーの分解能は悪いが LEED との対応づけが容易で、方向性に関する情報が得られる。後者は分解能の点で一段とすぐれている。Propst たち(1967 年)は約 50 meV なる分解能を持った静電偏向形の装置を開発し、W の(110)表面上に吸着した H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub>O による振動エネルギーに対応するピークを検出することに成功した<sup>(10)</sup>。

図 3.2 に H<sub>2</sub> にさらした W 表面で散乱された電子線のエネルギー分布を示した。この図からわかるように約 135 と 65 meV に二つのピークがあり、これらは水素原子の W 表面に平行な振動成分と垂直な振動成分に対応するものと考えられる。水素分子の振動エネルギーである 550 meV 付近にはピークがまったく存在しないことから、水素は W 表面上で解離していると考えられる。さらに水素原子が W 原子と 1 対 1 で結合しているとすると、その振動エネルギーは 300 meV 程度と予想されるところであるが、この付近にはピークが現われないので水素原子は W 表面と多重結合していると解釈される。図 3.3 には H<sub>2</sub> と N<sub>2</sub> の両方にさらした場合の散乱電子のエネルギー分布を示した。この図でたとえば 404 meV のピークは H-N の伸縮振動に対応すると考えられている。

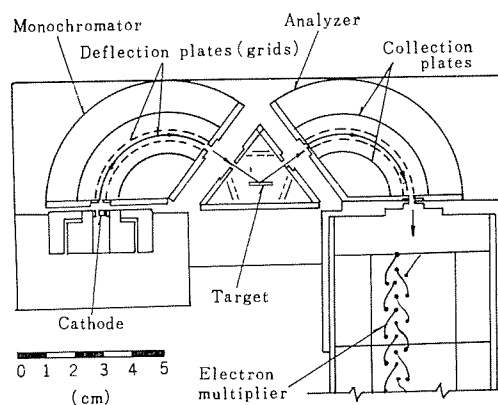


図 3.1 低速電子線散乱の研究のための静電偏向形電子線エネルギー分析器<sup>(10)</sup>

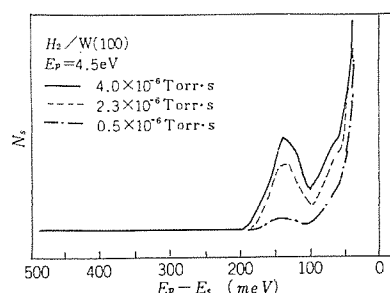


図 3.2 H<sub>2</sub> ふんい気にさらした (100) W 表面で散乱された電子のエネルギー分布 ( $E_p$  は一次電子の,  $E_s$  は二次電子のエネルギー)<sup>(10)</sup>

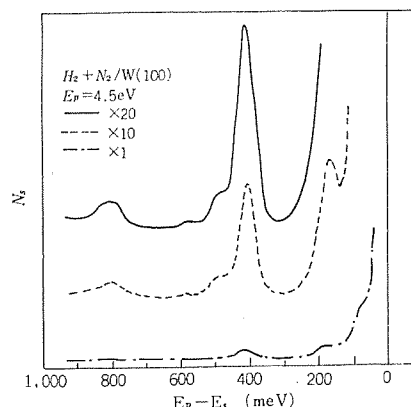


図 3.3 H<sub>2</sub> と N<sub>2</sub> ふんい気にさらした (100) W 表面で散乱された電子のエネルギー分布 ( $E_p$  は一次電子の,  $E_s$  は二次電子のエネルギー)<sup>(10)</sup>

LEES においては試料は原理的には単結晶である必要がなく、この点 LEED と根本的に異なりしたがってより広範囲の応用が期待されよう。

### 4. オージェ電子分光

(Auger Electron Spectroscopy, AES)

LEED や LEES では表面不純物の同定を行なうことはできない

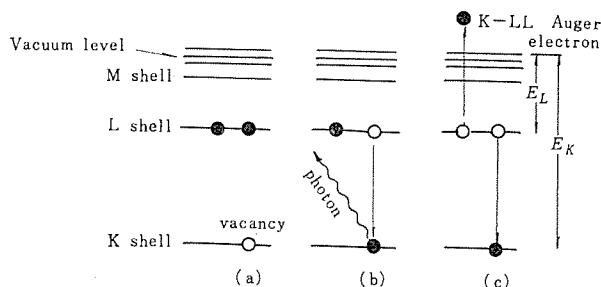


図 4.1 オーージェ電子放射の機構を説明した簡単な原子のエネルギー準位図<sup>(12)</sup>

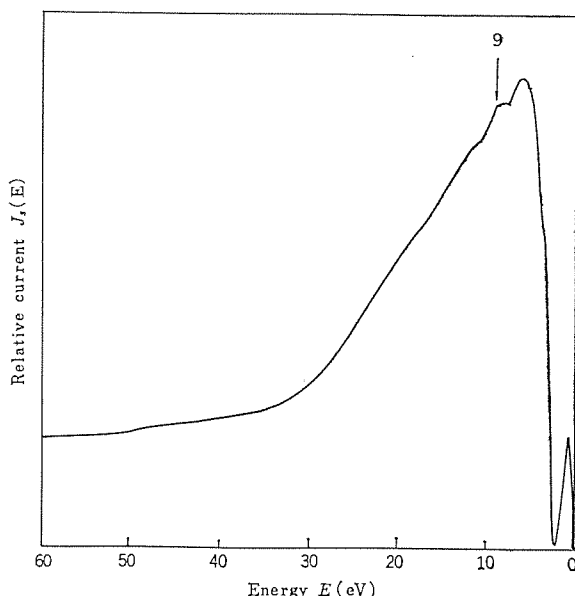


図 4.2  $O_2$  の単原子層を吸着した (110) W に、130 V の電子線を照射した場合の二次電子のエネルギー分布図。9 eV の所に酸素特有のオーージェピークがある<sup>(4)</sup>

が、最近 オーージェ効果を使い LEED を併用すると不純物を同定するのに有力であることが知られた。

オーージェ効果は Auger (1925 年) によって発見されたものであり<sup>(11)</sup>、これは定性的に次のように説明される (図 4. 1)<sup>(12)</sup>。入射電子によって内殻電子 (たとえば K 殻) に空孔を作るとそこに上の準位 (たとえば L 殻) から電子が落ち込む。そのとき上の準位と下の準位のエネルギー差に相当する光子 (特性 X 線) を放出する過程 (図 4. 1 (b)) と、光子の放出を伴わない過程 (図 4. 1 (c)) の二とおりがある。後者の場合には上の準位の電子が K 殻へ落ち込むと同時に、もう一つの電子が静電相互作用によって原子の外へ放出される。図 4. 1 (c) の例では K 殻の空孔に L 殻から電子が落ち込み、同時に L 殻の電子が放出されるので、これを K-LL オーージェ遷移と呼ぶ。

このようにして放射された電子の全エネルギーは  $E_K - E_L$  であるから、真空中でのオーージェ電子の運動エネルギーは  $E_K - 2E_L$  となり、固体内原子から放出される場合はさらにこれから仕事関数  $\phi$  を引いたものとなる。 $E_K$ ,  $E_L$  等は原子の内殻電子の結合エネルギーで決まる

から、ある物質から放射されたオーージェ電子のエネルギースペクトルを測定すれば、そこに存在する元素の種類や電子のエネルギー帯構造がわかる。オーージェ電子のエネルギーは外からの電子線のエネルギーに依存しないから、これはけい光 X 線と X 線マイクロアナリシス法に対応する。実験方法としては先に述べた LEED 装置を使った方法と偏向法の二つがあるが、前者の場合は LEED や LEES との併用が簡単である。

Tharp and Scheibner (1967 年) は、Germer 形 LEED 装置を一部改良して二次電子のエネルギー分析を行ないオーージェ電子ピークを捕えた<sup>(4)</sup>。LEED によって  $O_2$  が吸着している W の (110) 表面から得られた回折像は清浄表面から得られたものと本質的に同じであり、この場合、LEED パターンのみでは  $O_2$  の存在を探知することができなかった。しかしオーージェピークには差異が現われ、 $O_2$  の吸着した面では 9 eV に明確なピークが観察されそれは表面被覆度とともに増加した (図 4. 2)。

オーージェ電子分光による不純物同定法は緒についたばかりで測定技術はまだ確立されていない。しかし微量の不純物による表面現象への影響を追求することが可能になったので吸着、脱着、蒸着、触媒等の各分野にいっそうの進歩をみるであろう。

## 5 低速電子線照射によるイオン放出

電子線照射によるイオン放出のプロセスは Dempster (1918 年) がはじめて報告したが<sup>(13)</sup>、1963 年まではこれは細々としか研究されていなかった。1964 年に Redhead<sup>(14)</sup> と Menzel and Gomer<sup>(15)</sup> がこれを表面研究の新しい手段として使い、その後この分野の研究が活発に行なわれるようになった。

イオン放出の機構は、ガス分子に電子線を照射した場合に運動エネルギーを持ったイオンが形成されるという過程に類似している (図 5. 1)。すなわち入射電子により基底状態にある原子がイオン化状態へ励起されるが (過程 1)、イオン化状態の相互作用ポテンシャルは反発的であるとする、運動エネルギーを持ったイオンが形成放出されることになる (過程 2)。気体中の分子と表面に吸着した原子とのおもな違いは、後者の場合にはオーージェ過程により表面近傍でイオンが中和される確率が大いことにある (過程 3)。

イオン放出に関しては、阻止電場エネルギー分析器や質量分析器が使われていたが、筆者らは最近、高感度、高分解能でイオンのエネルギーを測定できるという特長を持ち、かつイオンの種類も決定できるという装置を開発した (図 5. 2)<sup>(16)</sup>。装置は原理的には円筒形の  $\beta$  線分析器と類似しているが、電子線によって試料から放出されるイオンの軌道を磁場で曲げ、特定のエネルギーを持ったもののみが、パッチを通過して静電レンズによって直接コレクター (電子増倍管) で集められる。この装置を使うとイオンのエネルギー分布、イオン放出断面、中性原子放出断面、イオン放出のスレッショルド等を入射電子のエネルギー、電流密度やガスの表面被覆度の関数として測定できる。さらにイオン電流の時間や温度依存性を調べることによりガス吸着の

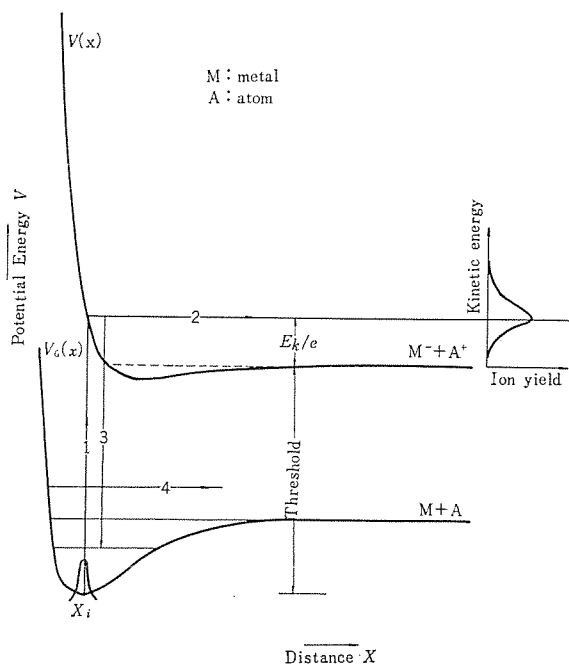


図 5.1 低速電子線照射によるイオンや中性原子放出の機構を示す簡単な吸着のエネルギーダイヤグラム

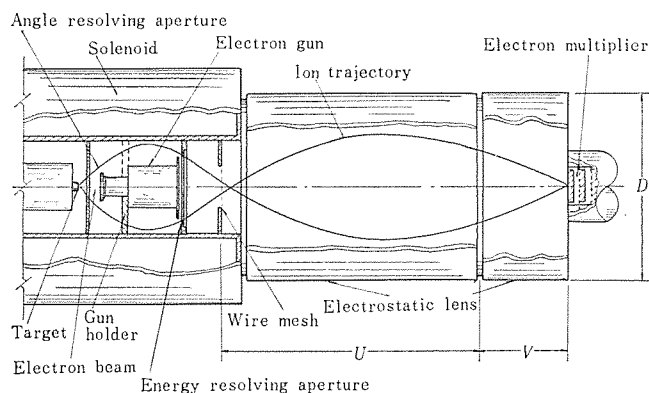


図 5.2 電子線照射による固体表面からのイオン放出に関する研究を行なうための円筒形磁気分析器

機構も解明される。

筆者らは W 表面に吸着した  $O_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $H_2$ ,  $H_2O$  のガスから  $O^+$ ,  $CO^+$ ,  $H^+$  のイオンを検出し、それらの量を測定して、その解析を行なった。重要なパラメータの値を表 5.1 にまとめておいた。図 5.3 には筆者らがはじめて測定した  $H_2$  や  $H_2O$  を吸着した W 表面から放出される  $H^+$  イオンのエネルギー分布を示しておいた。 $H_2/W$  の分布のピークは約 1.7 eV にあり、半値幅は 1.7 eV でエネルギーは 0 から 6 eV にわたっているが、 $H_2O/W$  ではピークは約 4.1 eV にあり、半値幅は 4.8 eV でエネルギーは 0 から 14 eV にわたって広がっている。 $H_2/W$  のイオン放出断面積は  $3 \times 10^{-23} \text{ cm}^2$  で  $H_2O/W$  の約百分の一と非常に小さい。

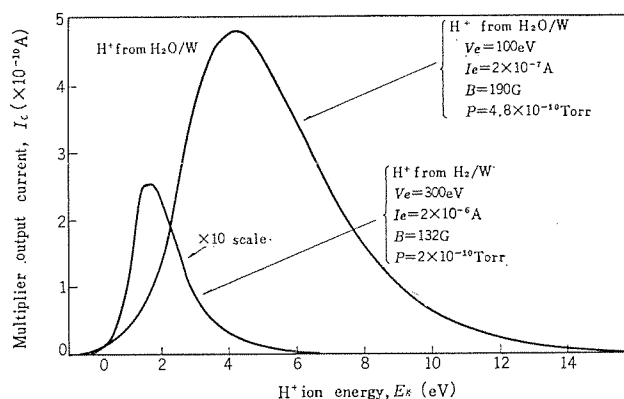


図 5.3  $H_2$  および  $H_2O$  の吸着した W 表面から電子線照射によって放出される  $H^+$  イオンのエネルギー分布図 ( $V_e$  および  $I_e$  はそれぞれ入射電子のエネルギーと電流である)<sup>(10)</sup>

表 5.1 電子線照射による W 表面からのイオン放出に関する重要なパラメータの値<sup>(10)</sup>

系	イオン	イオン放出率 (イオン/電子)	エネルギー分布のピークにおけるイオンのエネルギー (eV)	エネルギー分布の半値幅	スレッシュホールド (eV)
$O_2/W$	$O^+$	$8 \times 10^{-8}$	8.8	3.0	20.5
$CO/W$	$O^+$	$3 \times 10^{-8}$	7.9	2.8	18.5
$CO/W$	$CO^+$	$8 \times 10^{-7}$	1.3	1.6	15.5
$H_2/W$	$H^+$	$6 \times 10^{-9}$	1.7	1.7	—
$N_2/W$	—	$< 10^{-9}$	—	—	—
$CO_2/W$	$O^+$	$2 \times 10^{-7}$	5.7	2.5	—
$H_2O/W$	$H^+$	$6 \times 10^{-7}$	4.1	4.8	—

イオン放出の研究は表面研究の新しいテクニックとして LEED 等を補うものであり、今後、金属や半導体と吸着ガスとの相互作用の研究に使われよう。

## 6. 光電子放出効果

光電子放出効果とは、適当な波長の光で固体を照射すると表面から電子が放出される効果をいい、光量子の直接の証明の一つとなったものである。この効果の研究は 1960 年代に入って Ge, Si, III-V, II-VI 化合物、アルカリハライド等において特に物性論的な立場から急速に進歩した。

放出される電子の数やエネルギー分布は光学的遷移の形、バンド構造、励起電子の散乱過程の複雑な関数であるから、それらを調べることによって、遷移準位の真空準位からのエネルギー値、光学的仕事関数、電子親和力、フェルミ準位の真空準位からの位置、遷移準位間の選択則、遷移準位の状態密度、固体内電子の散乱機構についての情報が得られる。実験を行なうには真空紫外線分光器、清浄表面を得るための超高真空装置、真空中へき開の技術、エネルギー分布測定用の阻止電場分析器、微小電流測定用のロックインアンプが入要である。ここでは基本的な Gobeli たち (1962 年) による研究について述べる<sup>(17)</sup>。

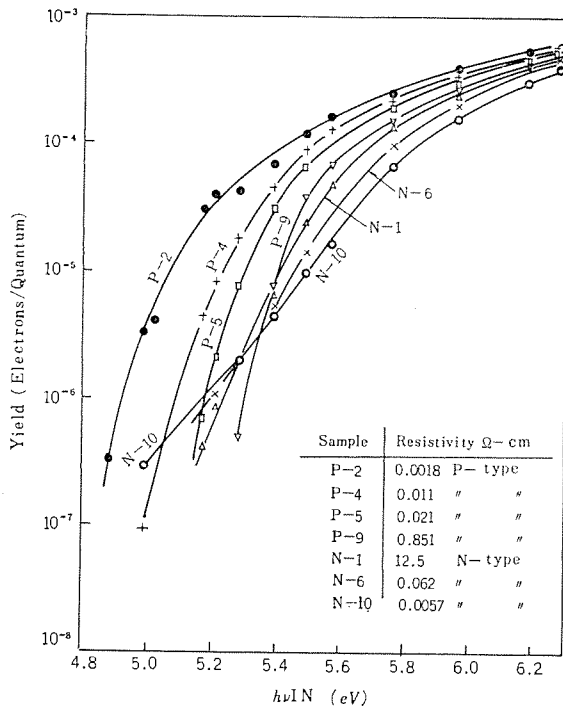


図 6.1 いろいろな不純物濃度をもったへき開 Si (111) 面の量子効率と光子エネルギーとの関係 (半対数図)<sup>(17)</sup>

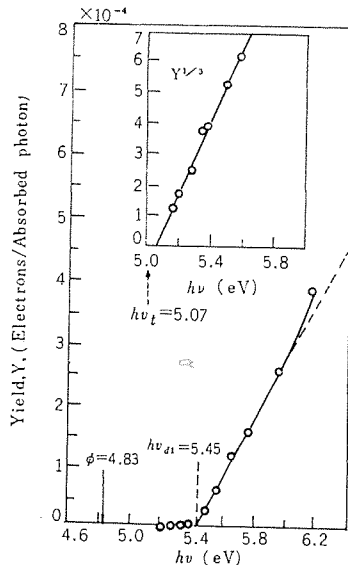


図 6.2 へき開 250 Ω-cm P-Si の量子効率と光子エネルギーとの関係。  $h\nu_{d1}$  は直接遷移のスレッシュホルド,  $h\nu_t$  は間接遷移のスレッシュホルド,  $\phi$  はケルビン法で測定した仕事関数<sup>(18)</sup>

図 6.1 は  $1 \times 10^{-10}$  torr の超高真空中でへき開した Si (111) 面での量子効率を光子エネルギーに対してプロットしたものである。量子効率は試料が P 形になるほど高くなるが、これは表面でのバンドの曲りによるものと考えられる。試料が N 形になるほど、低エネルギー側における尾が著しくなるのは、N 形になるほど表面準位の電子密度

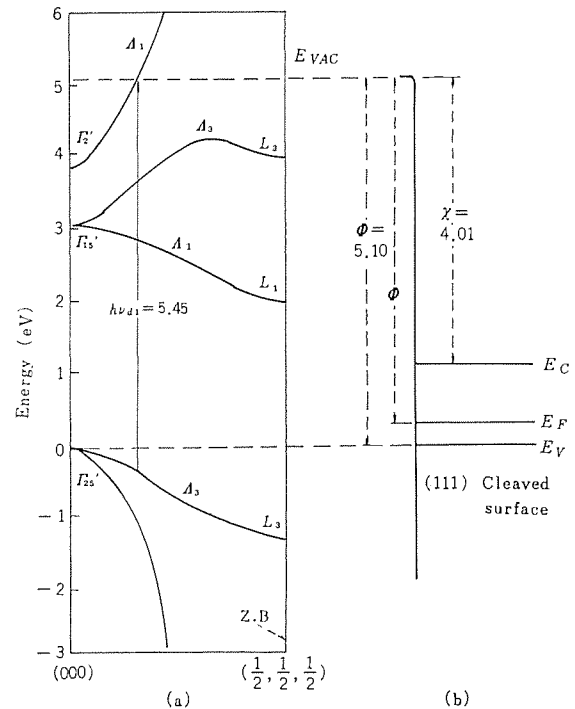


図 6.3 (a) Si におけるエネルギーと波動ベクトル  $k$  (111) との関係, (b) へき開 Si (111) 面でのエネルギーと距離との関係<sup>(18)</sup>

表 6.1 いろいろな電子励起過程と励起電子の固体からの脱出過程に対するスレッシュホルド ( $E_T$ ) 近傍の量子効率 ( $Y$ ) の光子エネルギー ( $E$ ) 依存性。  $E_F$  は真空から測ったフェルミレベルの深さ<sup>(19)</sup>

体積効果	直接遷移	散乱なし 弾性散乱	$Y \propto (E - E_T)$ $Y \propto (E - E_T)^2$
	間接遷移	散乱なし 弾性散乱	$Y \propto (E - E_T)^{5/2}$
表面効果	母体電子の遷移, 表面は運動量の受 取手として働く	粗面 完全平滑面	$Y \propto (E - E_T)^{3/2}$ $Y \propto (E - E_T)^{3/2}$
		直接遷移	$ET >  EF , Y \propto (E - E_T)$ $ET =  EF , Y \propto (E - E_T)^{3/2}$
	表面バンド	間接遷移	$ET >  EF , Y \propto (E - E_T)^2$ $ET =  EF , Y \propto (E - E_T)^{5/2}$
		表面の欠陥準位	幅のあるエネルギー分布 $EF$ 以下の局在準位 $ET =  EF , Y \propto (E - E_T)^2$ $Y \propto (E - E_T)$

が高くなるためだと解釈される。

量子効率のスペクトル分布は抵抗率が  $1 \Omega \cdot \text{cm}$  以上の試料では N 形, P 形によらず図 6.2 に示した 250 Ω-cm P-Si の曲線と同様となる。すなわち、低エネルギー側では 3 乗法則が成立ち、高エネルギー側では直線関係が成立つ。外そう (挿) したスレッシュホルドは、それぞれ 5.1 eV および 5.45 eV となり前者は間接遷移のスレッシュホルド、後者は直接遷移のそれと解釈されている。これらの結果とバンド構造の関係を図 6.3 に示しておいた。

Kane は限界振動数付近の量子効率と光子エネルギーとの関係をエネ

ルギー帯の準位密度、表面準位密度を考慮に入れて計算しており、その結果を表 6. 1 にまとめておいた<sup>(19)</sup>。Gobeli たちが得た 3 乗法則は実験精度を考慮すると 5/2 乗法則に対応するものと考えられ、理論計算とよく一致している。

Gobeli たちの BTL グループのほかにも Philips の Sheer, GE の Swank, Stanford の Spicer, Yale の Fischer たちによって精力的な物性的研究がなされている。実用面では Spicer たちは昨年、GaAs に Cs-O を吸着させると銀酸化セシウムより量子効率が大きくなることをみつけ、赤外光電面への大きな道を開いている。光電子放出効果の研究は、物性解析手段としても実用面でもますます威力を発揮するものと考えられる。

## 7. 電子磁気共鳴 (Electron Spin Resonance, ESR)

Fletcher (1954 年) は Si の ESR で  $g \approx 2.006$  に弱い吸収線を見出し、これが表面をエッチすることの影響されることから、この ESR 中心は多分表面と関係があると結論した<sup>(20)</sup>。これが半導体表面に関してみられた ESR のはじめである。その後表面の機械的損傷によって生ずる ESR 中心の研究、熱処理によって生ずる ESR 中心とガスとの相互作用の研究や吸着ガスと伝導電子の相互作用に関する ESR 等が Feher<sup>(21)</sup>, Walters and Estle<sup>(22)</sup>, 有住<sup>(23)</sup>, Kokes<sup>(24)</sup> 等によって行なわれた(表 7. 1)。使われた試料は、大部分が空気中または  $10^{-2}$  torr 中で研ま(磨)したり粉碎して作ったものである。しかし粉末試料を使用していること、表面処理が悪く表面は清浄表面からほど遠いことから、これらの実験では ESR 中心そのものがどのようなものかはほとんどわからなかった。

最近、Haneman (1968 年) は  $10^{-9}$  torr 以下の超高真空中で Si をへき開いて清浄な (111) 結晶表面を得てその ESR を測定することに成功した<sup>(8)</sup>。累積法を使って見いだされた表面の不對電子による ESR 信号は、 $g = 2.0055$  で幅は 6 Oe であった(図 7. 1)。清浄表面上の不對電子の密度は  $8 \times 10^{13}$  スピン/cm<sup>2</sup> くらいであったが、信

号の異方性や Si<sup>29</sup> による hfs は観測されなかった。信号は  $10^{-3}$  torr・min 以下の O<sub>2</sub> (仕事関数や表面伝導度を変えることが知られている) にさらしても変化しなかったが、 $10^{-1}$  torr・min 以上の O<sub>2</sub> にさらすと高さが 45%、スピン数にして 20% ほど増加した。

これらの結果と LEED 像とを考慮して Haneman は Si(111) 面の表面構造について図 7. 2 のようなモデルを提案している。これによると原子の切が互いに浮き沈みしており浮いた原子は S 形の dangling bond を、沈んだ原子は P 形の dangling bond を持っている。P 形の dangling bond はその波動関数が互いに完全に重なり合っているため、ESR 信号に寄与しないが S 形の dangling bond の場合はその重なり合いは完全でない(80% 程度)ので ESR 信号に寄与する。Haneman はさらにこれらの S および P 形の dangling bond は二つの表面エネルギーバンドを形成しているのではないかと推論している。

清浄表面を用いさらに単結晶を用いた表面の ESR の研究は、実

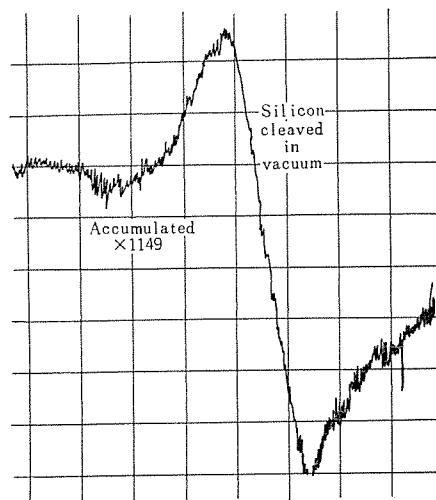


図 7. 1 累積法で見いだされたへき開法で作った Si(111) 清浄表面の ESR 信号<sup>(8)</sup>

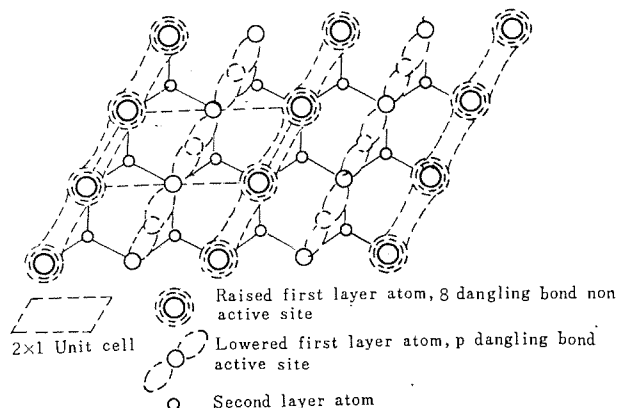


図 7. 2 Haneman が提案した Si(111) 7×7 回折像に対応する清浄表面の原子配列<sup>(8)</sup>

表 7. 1 半導体表面の ESR の研究例

機械的損傷による ESR 中心の場合 <sup>(22)</sup>			
試料	g 値	線幅 (Oe)	
Ge	2.023	50	
Si	2.0055	7~8	
SiC	2.0027	5.5	
ZnO	2.0050	8	
MgO	2.0021	1.2	
熱処理によって生じた ESR 中心の場合 (熱処理温度: 400~800°C) <sup>(23)</sup>			
試料	g 値	線幅 (Oe)	
Ge	2.0027	0.5~1.5	
Si	2.0027	0.7~1.5	
GaAs	2.0027	1.0~1.5	
ZnS	2.0027	0.4~1.5	
CdS	2.0027	1.2~1.5	

験上でも理論的解釈の面でも非常に困難と思われるが、今後このような研究が行なわれることによって表面の不均電子の状態がミクロな立場から検討されるものと考えられる。

### 8. トンネル分光

江崎 (1957 年) は Ge の p-n に接合を用いてトンネル効果による電流を見出し、これにより固体中の電子構造の特にバンド端の情報が得られることを示した<sup>(25)</sup>。その後トンネルダイオードは、高速度のスイッチング素子として応用面でも発展している。最近ではトランジスタから集積回路へと進んできた半導体試料の加工・処理の技術の発達により、MOS または MIS 構造のトンネル接合を作ることが可能となった。この新しいトンネル接合の誕生によりトンネル効果の応用範囲はいっそう広がった。

物性面ではトンネル現象が電子格子相互作用に関する情報や界面準位に関する情報を与えてくれることが明らかにされた。以下界面準

位に関する 2, 3 の研究例を記す。

Gray (1965 年) は P 形 Si のへき開面を酸化してその上に Al を蒸着して MOS 構造のトンネル接合を作り、その伝導度や静電容量を周波数の関数として測定した (図 8. 1)<sup>(26)</sup>。周波数が低くなるとトンネル遷移した電子は、界面準位にトラップされるので容量は大きくなるが、周波数が高くなるとこの帯電は起こりにくくなり、容量は酸化膜の幾何学的静電容量と空間電荷層の容量だけになるので小さくなる。

伝導度の場合には、界面準位は周波数が低くなると帯電して伝導度にきかなくなるが、周波数が高くなると電子の出入りに寄与する

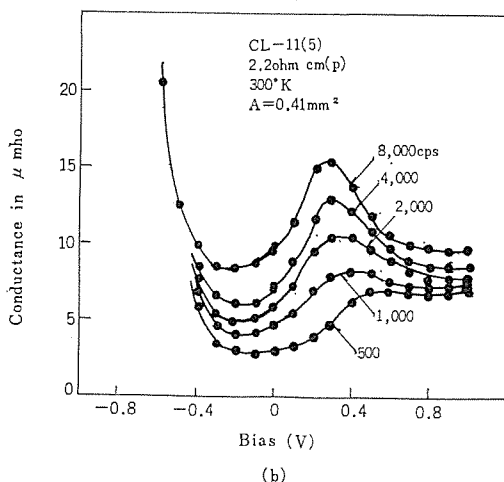
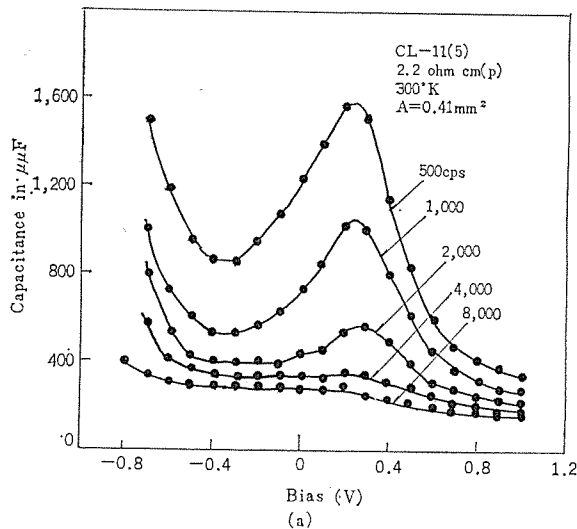


図 8. 1 周波数をパラメータにした微分静電容量および伝導度とバイアス電圧の関係<sup>(26)</sup>

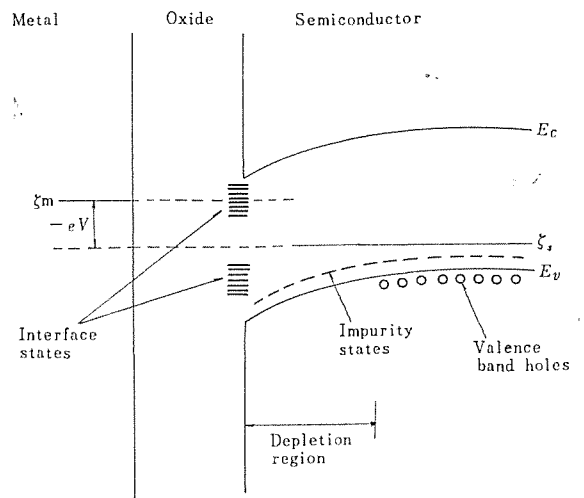


図 8. 2 MOS 構造のエネルギー準位図。ζ<sub>m</sub> および ζ<sub>s</sub> はそれぞれ金属および半導体の準フェルミレベルである<sup>(26)</sup>

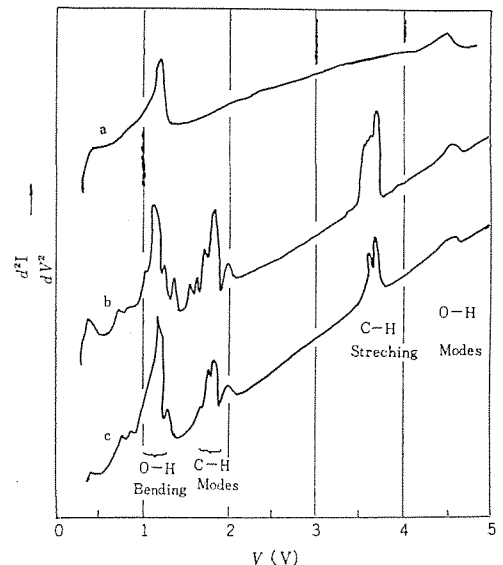


図 8. 3 4.2°K における Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Pb 接合の伝導度と電圧バイアスの関係。(a) は“清浄”な接合の場合、(b) および (c) は接合面をそれぞれプロピオン酸および酢酸にさらした場合<sup>(27)</sup>

ので大きくなる。この実験から真性フェルミ準位の下に全体で  $1.5 \times 10^{13}$  個/cm<sup>2</sup> の表面準位があると見積られている。Gray の推定した P-Si-SiO<sub>2</sub>-Al 接合の電子エネルギー構造の概念を図 8.2 に示した。

Jacklevic たち(1966 年)は、Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Pb 等の MOM トンネル接合を作ってトンネル電流が Pb と Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> との界面にある分子の振動状態と相互作用することを見い出した<sup>(27)</sup>。界面にある分子の振動数  $\nu$  に対応する電圧、すなわち  $eV = h\nu$  において伝導度の増加がみられた。図 8.3 の (a) は不純物分子を故意に加えないで作った接合の伝導度と印加電圧の関係を示している。このスペクトラムには、残留水蒸気等による O-H の屈曲および伸縮モードに対応するピークがあらわれる。

(b) と (c) は Al 膜上に Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 膜層を作った後、さらにそのう

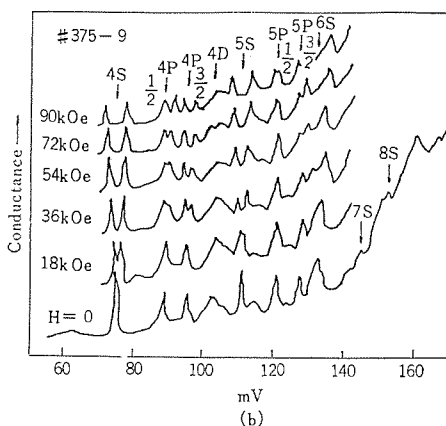
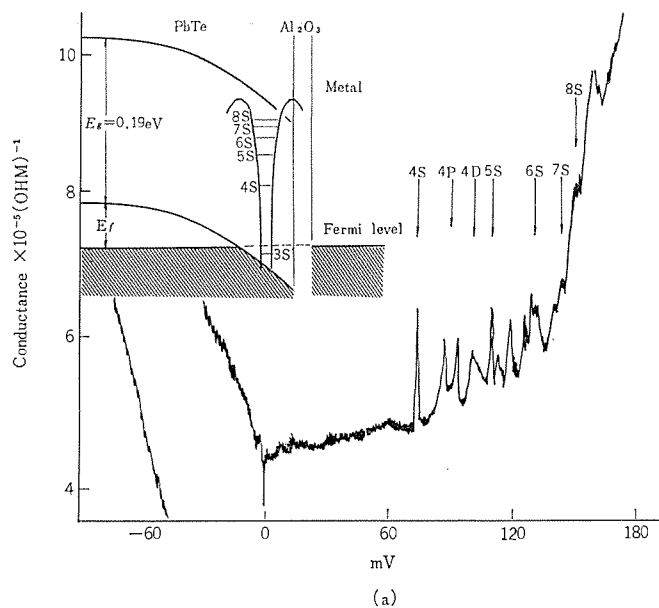


図 8.4 1.3°K における PbTe-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Metal 接合の伝導度と電圧バイアスの関係。(a) の各ピークは界面準位のエネルギーに相当し (b) はその磁場依存性を示す<sup>(28)</sup>

えに Pb 膜を蒸着する前にプロピオン酸や酢酸を導入した場合である。この場合には C-H の屈曲および伸縮モードに対応するピークがあらわれ、また特長ある O-H の振動モードもあらわれた。この研究法は吸着や触媒の表面現象の研究やさらにトンネル接合製作技術に応用される。

江崎たち(1968 年)は PbTe-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Metal トンネル接合の伝導度を測定して、PbTe と Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の間にある界面準位らしいものを見つけた(図 8.4)<sup>(28)</sup>。金属電子は PbTe の中へトンネル遷移するとき、界面トラップが作る原子的なスペクトラムを持ったエネルギー準位に捕えられると考えられている。エネルギー準位は磁場によるゼーマンシフトから推定している。

トンネル分光学は、最近の半導体表面の処理技術によって可能になったものであることは注目に値する。逆にこれによって得られた知識が、半導体の実用面での開発にも大いに役立つことが期待される。

## 9. 表面二次元伝導

半導体表面の二次元伝導といえばまず Tamm (1932 年)<sup>(29)</sup> や Shockley (1939 年)<sup>(30)</sup> の表面準位による電気伝導が考えられるが、これを見つけようとする努力はまだ成功していない。半導体表面にはこれら表面準位や吸着原子等の帯電、または外部電界等によって  $10^{-4}$  cm 程度の深さに帯電した表面空間電荷層が形成されており、表面反転層や表面蓄積層でできている。集積回路の発展にうながされて、特に反転層の電気伝導の研究は最近急速に進歩した。MOS 構造を利用すると反転層のキャリア濃度は、ゲート電圧を変えることによって制御でき  $10^{13}$ /cm<sup>2</sup> 以上にできるようになった。そうした場合反転層内のドブロイ波長は反転層の厚さよりも大きくなる。

このときキャリアの運動は、反転層を形成する逆三角形のポテンシャルの中で表面に垂直な方向で量子化され、表面に平行な面内では自由であるが表面に垂直な方向では自由でなくなる。すなわちキャリアの運動は二次元ガスのようになり、この伝導は二次元伝導となる。キャリアの表面と垂直な方向のエネルギーが量子化されるであろうということは、はじめ Schrieffer<sup>(31)</sup> によって指摘され、その後 Handler たち<sup>(32)</sup> によって実験が行われていた。キャリア量子化の確証は Fowler たち<sup>(33)</sup> によって初めて与えられた。

Fowler 達 (1966 年) は P 形 Si の (100) 面上に酸化膜をつけ、その上に金属を蒸着してゲート電極とした MOS-FET を製作し、1.34°K において試料表面に垂直に強磁界を加えて図 9.1 に示すように、ゲート電圧の変化(伝導電子濃度の変化)に対して伝導度が一樣な周期で振動的に変化することをみいだした<sup>(33)</sup>。二次元ガスの観点からこれは次のように解釈される。

表面に垂直な方向に Z 軸をとると、キャリアのエネルギー状態は、

$$E(n) = E_z(n) + (k_x^2 + k_y^2)/2m_{11}$$

となる(図 9.2)。ここで  $n$  は表面に垂直な方向の離散的な運動エ

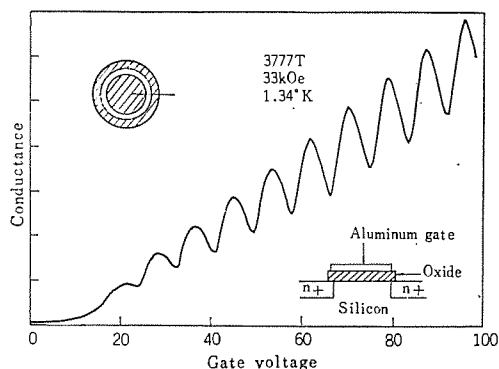


図 9.1 P 形 Si の (100) 表面の反転層におけるシュブニコフドハース振動。ソースおよびドレインの電極構造と MOS-FET 構造も示す<sup>(33)</sup>

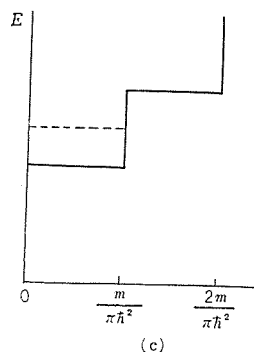
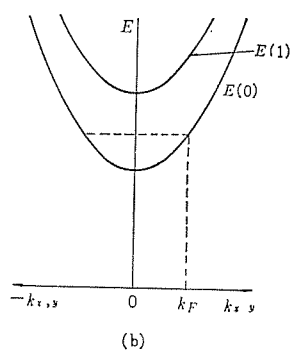
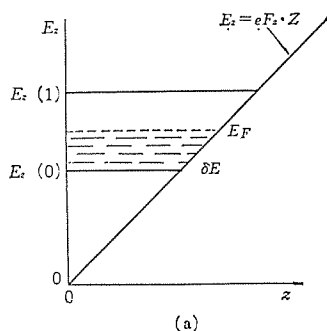


図 9.2 半導体表面の量子効果。(a) キャリヤの運動エネルギーの表面に垂直な成分の量子化。(b) キャリヤのエネルギー準位。(c) キャリヤの状態密度とエネルギー<sup>(34)</sup>

エネルギーを指定する量子数、 $k$  はキャリヤの波動ベクトル、 $m_{11}$  はキャリヤの表面に平行な面内の有効質量である。空間電荷層の電界が強く、 $E_z(n)$  の各エネルギー準位間げき(隙)が広がると、キャリヤはすべて  $n=0$  なるサブバンドに収容されると考えられる。このときキャリヤのエネルギー状態はまったく二次元的となり、その状態密度は  $m_{11}/\pi\hbar^2$  となってエネルギーによらない。試料に強磁場を加えると、キャリヤの表面に平行な運動は量子化されて Landau 準位ができるが、各 Landau 準位内の状態密度は一樣となるはずでこれは実験結果と一致する。

このほかに InAs や InSb 等の表面を利用した川路<sup>(34)</sup>や小松原<sup>(35)</sup>の実験も報告されている。理論面からの検討は Duke<sup>(36)</sup> および Stern and Howard たち<sup>(37)</sup> によってなされている。二次元伝導に関しては最近イオン化不純物散乱、格子散乱、抵抗および磁気抵抗の異常現象等が研究されつつあり、工業面での応用とあいまって深く研究されるものと考えられる。

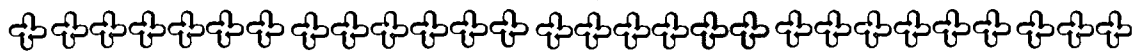
## 10. むすび

固体表面に関する新しい物性観測手段が最近急速に開発されつつあり、ここでは筆者らに興味のあるおもな分野について解説した。もちろんこれらの分野は、それぞれ独立ではなく互いに有機的に結合されていていっそう表面についての理解が深まるものと考えられる。

固体表面の研究は実用に深く関係しており、新しい表面物性観測手段の開発とあいまって、その応用分野もますます広がっていくものと考えられる。

## 参考文献

- (1) J. Bardeen : Surface Science, 2, 381 (1964)
- (2) S. Dushman : Scientific Foundations of Vacuum Technique (1961) John Wiley and Sons, Inc.
- (3) J. J. Lander : Recent Progress in Solid State Chemistry (1965) Pergamon Press
- (4) L. N. Tharp and E. J. Scheibner : J. Appl. Phys., 38, No. 8, 3,320 (1967)
- (5) J. J. Lander and J. Morrison : J. Appl. Phys., 34, No. 5, 1,403 (1963)
- (6) R. Seiwatz : Surface Science, 2, 473 (1964)
- (7) 平林 : J. Phys. Soc. Japan, 22, 590 (1967)
- (8) D. Haneman : Phys. Rev., 170, 705 (1968)
- (9) E. Bauer : Phys. Letters, 26 A, 530 (1968)
- (10) F. M. Propst and T. C. Piper : J. Vac. Sci. and Technol., 4, 53 (1967)
- (11) M. P. Auger : J. Phys. Radium, 6, 205 (1925)
- (12) 小野, 中山 : 応用物理, 38, No. 10, 951 (昭44)
- (13) A. J. Dempster : Phys. Rev., 11, 316 (1918)
- (14) P. A. Redhead : Can. J. Phys., 42, 886 (1964)



- (15) D. Menzel and R. Gomer : J. Chem. Phys., 41, 3,311(1964)
- (16) M. Nishijima and F. M. Propst : Phys. Rev., (to be published)
- (17) G. W. Gobeli and F. G. Allen : Phys. Rev., 127, 141 (1962)
- (18) G. W. Gobeli and F. G. Allen : Phys. Rev., 137, A 245 (1965)
- (19) E. O. Kane : Phys. Rev., 127, 131 (1962)
- (20) R. C. Fletcher et al : Phys. Rev., 94, 1,392 (1954)
- (21) G. Feher : Phys. Rev., 114, 1,219 (1959)
- (22) G. K. Walters and T. L. Estle : J. Appl. Phys., 32, 1,854 (1961)
- (23) 有住ほか : 薄膜第 131 委員会第 47 回研究会資料 (昭 44)
- (24) R. J. Kokes : J. Phys. Chem., 66, 99 (1962)
- (25) L. Esaki : Phys. Rev., 109, 603 (1958)
- (26) P. V. Gray : Phys. Rev., 140 A, 179 (1965)
- (27) R. C. Jaklevic and J. Lambe : Phys. Rev. Letters, 17, 1,139 (1966)
- (28) L. Esaki et al : Phys. Rev. Letters, 20, 1,108 (1968)
- (29) I. E. Tamm : Z. Physik, 76, 849(1932) ; Physik Z. Sowjetunion, 1, 733 (1932)
- (30) W. Shockley : Phys. Rev., 56, 317 (1939)
- (31) J. R. Schrieffer : Phys. Rev., 97, 641 (1955)
- (32) P. Handler and S. L. Eisenhouer : Surface Science, 2, 64 (1964)
- (33) A. B. Fowler et al : Phys. Rev. Letters, 16, 901 (1966) ; Proc. Intern. Conf. Physics Semiconductors, Kyoto, 1966, J. Phys. Soc. Japan, 21, Suppl. 331 (1966)
- (34) 川路ほか : 物性, 10, No. 7, 396 (昭 44) ; 物性, 10, No. 8, 462 (昭 44)
- (35) 小松原ほか : 応用物理, 38, No. 10, 981 (昭 44)
- (36) C. B. Duke : Phys. Rev., 168, 816 (1968)
- (37) F. Stern and W. E. Howard : Phys. Rev., 163, 816 (1967)
- (38) 小野, 中山 : 応用物理, 37, No. 2, 181 (昭 43)

正 誤 表

44 巻 8 月号記載の普通論文「回転曲面に分布する電流による磁界の計算法 (野村)」に、原稿受付日が落ちていましたのでつぎのように訂正いたします。

ページ	誤	正
1073 左 上から 13 行目	……いたします。	……いたします。(昭和 45-3-19 受付)

# 新製品紹介

## 日よけカバー付き屋外形三相誘導電動機シリーズ完成

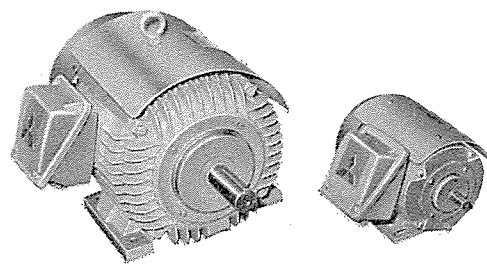
従来より好評を博していた三菱スーパーライン SF-E 屋外形電動機を、さらに高性能化し、日よけカバーを取付けた新形屋外形電動機シリーズを完成した。

この電動機は、常時屋外に設置されるため、直射日光による異常過熱を防止するとともに、より防水構造を完全に施し、すぐれた屋外形電動機として、十分期待にそえるものとなった。

### ■ 特 長

- (1) 直射日光による電動機内部の異常過熱の防止
- (2) フレーム上部の雨水のたまり水による、腐食原因の除去
- (3) 屋外の砂、小石あるいはほこりから十分に保護
- (4) 日よけカバー付きにもかかわらず、取付寸法は I. E. C. 寸法に準拠
- (5) 日よけカバーを取付けたまま、端子箱を左右取換え (A・B組換え)、およびケーブル引込口を上下左右 90° 単位で方向変換が可能
- (6) 合理的かつスマートなデザインにより、あらゆる屋外機械によく調和する

[名古屋製作所]



## 三菱ソリッドステートカラーテレビ〈高雄〉2機種

### 1. 20 CKS-933 〈高雄〉

#### (20 形 ソリッドステートカラーテレビ)

当社では、ソリッドステートタイプのカラーテレビ第一弾として、機種の多様化に対応する高級設計の 13 形 (13 CPS-136) を 7 月に発売し好評を得ている。今回第二弾として、20 形シャープコーナのカラーブラウン管を採用した、大形コンソール豪華機種 20 CKS-933 形を、9 月中旬より発売する予定である。

20 CKS-933 形は、真空管を一本も使用していない完全なソリッドステート化により、高信頼性高性能設計で、しかも微調整・カラー調整ともに自動化した最高級カラーテレビである。

本機 20 形シャープコーナカラーブラウン管を採用し、回路的には、従来より主力メ리트として好評を得ているカラー調整の IC 全自動化を採用するとともに、画面を明るくしても映像がばげない ABL 回路 (自動電子ビーム制御回路)、放送局やカメラの差による色の濃さの変化を補正する新 ACC 回路、また正しい白色や明暗を再現する各種自動回路の働きで、常に美しい映像が得られるようになっている。音量音質も世界初の高出力 IC による ITL、OTL プッシュプル回路および 4 スピーカーによりステレオ級の迫力で楽しめる。

もちろん完全ソリッドステートタイプなので、消費電力が、140 W と経済的で、スイッチオンと同時に美しいカラー映像がとび出すなど新回路方式を数多く採用し、最高級の電子技術を駆使した最高級設計となっている。

### ■ 特 長

- (a) 放送局のモニターと同じく、縦・横の比率が 3 : 4 の新サイズの 20 形シャープコーナ

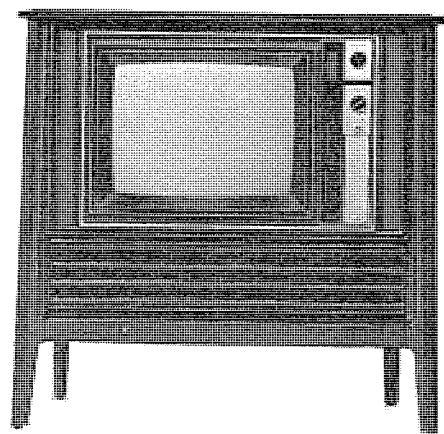


図 1 20 形ソリッドステートカラーテレビ

# 新製品紹介

ロングライフブラウン管により、ワイドで長寿命

(b) 故障率ゼロを目標にした、IC 2 個と、33 石の半導体による、完全なソリッドステートシャシで高信頼性・高性能

(c) ABL 回路の採用で常に明るくて切れのよい映像

(d) 常に正しいカラーを再現する新 ACC 回路

(e) めんどろな微調整やカラー調整も IC 全自動により、いっさいノータッチ

(f) 明暗をはっきり映し出し、ナイトやステージ番組など常に“生”の忠実な映像で楽しめる、リアルコントロール装置付き

(g) 電源安定化回路・雑音消去回路付き

(h) 音声多重用端子付き

(i) 各種自動回路

ALFC	自動局発制御回路
ABL	自動電子ビーム制御回路
ACC	自動クロマ制御回路
ARE	自動解像度増強装置
AHFC	自動水平周波数制御回路
AFPC	自動色安定回路
ANC	自動雑音消去回路
AHVC	自動高圧安定回路
ADG	自動消磁回路
AGC	自動利得制御回路
ACKC	カラー白黒自動切換回路
AHC	自動垂直振幅補償回路
AVC	自動電圧制御回路
AUTO・COLOR	カラー自動調整回路

## ■ 定 格

消費電力：140 W

ブラウン管：20 形 シェルボンドカラーブラウン管

トランジスタ：50 石

IC：2 個

ダイオード：78 石、その他 5 石

スピーカー：16 cm 2 個、5 cm 2 個、計 4 個

音声出力：2.5 W

大きさ：946(幅)×921(高さ)×579(奥行)mm

重 さ：50 kg

■ 現品正価 198,000 円

## 2. 13 CPS-136 <高雄/136>

(13 形 ソリッドステートカラーテレビ)

13 CPS-136 形は、46 個のトランジスタ、54 個のダイオード、それに高性能 IC を納めた高信頼性・高安定性水準のシャシで、13 形テレビでは業界初の ALFC 回路を採用したほか、画面を明るくしても映像がぼけない ABL 回路、肌色を忠実に再現するメイクアップ回路など新回路方式により、日本の色を一段と鮮かに映し出す 13" の最新鋭機である。消費電力は 90 W、0.8 秒のクイックスタートが可能である。

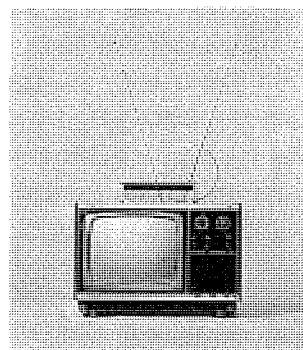


図 2 13 形 ソリッドステートカラーテレビ

## ■ 特 長

- (a) ソリッドステートシャシで高信頼性・高性能
- (b) ABL 回路の採用で常に明るくて切れのよい映像
- (c) メイクアップカラー 回路の採用で肌色を忠実に再現
- (d) 新緑色けい光体採用の明るい長寿命の 13 形 ロングライフブラウン 管
- (e) ALFC 回路により微調整は不要
- (f) その他音声多重用端子付き

## ■ 定 格

消費電力： 90 W  
 ブラウン 管： 13 形 シェルボンドカラーブラウン 管  
 トランジスタ： 46 石  
 ダイオード： 54 石  
 IC： 1 個  
 真空管： 1 球  
 スピーカー： 10 cm 円形 1 個  
 音声出力： 1.0 W  
 大きさ： 506(幅)×356(高さ)×400(奥行)mm  
 重 さ： 17.2 kg

■ 現品定価 108,000 円

[京都製作所]

## ヒステリシスクラッチ・ブレーキ新発売

今回、国内で初めて、純電磁的な連結をする非接触形のヒステリシスクラッチとブレーキを開発し、10月に発売する予定である。

その動作原理は、従来から最も多く使用されている摩擦式電磁クラッチ、および非接触式の渦電流クラッチとは全く異なるものであり、従来のものに比べて数多くの特長がある。したがってこのクラッチは新しい応用分野での活躍が期待されている。

### ■ 動作原理

磁気的にヒステリシス特性をもった永久磁石と、その内外周に空(げき)隙を介して設けられた磁極があり、その磁極を回転させながら、励磁コイルによって励磁すると、永久磁石も磁化されるが、ヒステリシス特性があるため、極性の変化が磁極のそれより遅れる。その結果、永久磁石と磁極が磁気的に連結しトルクを伝達する。

### ■ 特 長

(1) 半永久的な寿命  
 機械的接触がないため、摩擦式のように摩耗する部分がなく寿命が半永久的である。

(2) 連続スリップでトルク制御可能

駆動側と被動側の相対回転数に関係なく、励磁電流に比例したトルクが得られ、相対回転数のある状態で連続的に使用可能である。

- (3) 安定した動作と正確な反復性  
高真空中、遠心力の場合、周期的な温度変化などの過酷な条件でも安定し、かつ正確なく  
り返し動作が可能である。
- (4) 高速運転が可能  
非接触形のため動作面の周速による回転数の制限がなく、高速運転が可能である。
- (5) 伝達効率 100%  
スリップがなくともトルクの伝達が可能であり、完全連結ができる。

**用 途**  
最近特に高速化・高精度化が要求されている繊維機械、電線加工機などの巻きとり・巻  
きもどしの張力制御、計測器・計算機・事務器などの速度制御、および小形回転機・ギヤ  
・チェーンなど動力伝達要素の耐久テストなどのシミュレーション負荷としての使用がある。  
表 1 はおもな仕様、図 1 は ZHA 2.5 A 形 ヒステリシスクラッチ、ZHY 2.5 A 形 ヒステリシスブレー  
キの写真である。

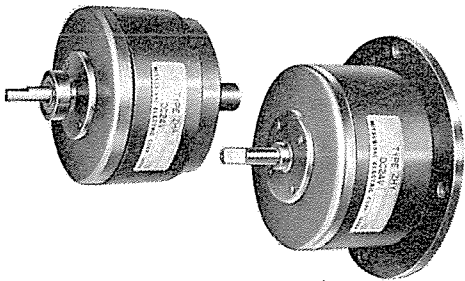
表 1 ヒステリシスクラッチブレーキのおもな仕様

D. C 24(V)

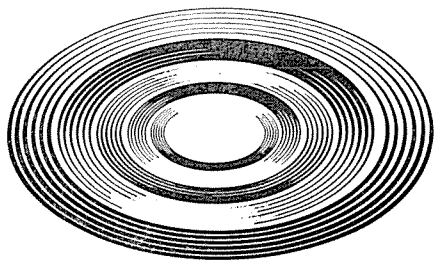
形 名	定格トルク kg・cm	外 径 × 幅 mm	軸 径 mm	スリップ効率 W	重 量 kg
ZHA-1.2 A (ZHY-1.2 A)	1.2	63×92 (86×58)	6	27	0.8 (0.7)
ZHA-2.5 A (ZHY-2.5 A)	2.5	74×103 (68×65)	7	32	1.2 (1.1)
ZHA-5 A (ZHY-5 A)	5.0	88×117 (110×76)	8	40	1.8 (1.6)

( ) 内はブレーキの仕様を示す

[姫路製作所]



ZHA 2.5 A 形 ヒステリシスクラッチ と  
ZHY 2.5 A 形 ヒステリシスブレーキ



## 火力および原子力用大容量タービン発電機あいついで完成

電力需要の急激な増加に伴って、タービン発電機の単機容量は最近一段と大型化してきたが、当社神戸製作所では、このほど関西電力美浜発電所向け 2 号 560 MVA 原子力用 4 極機を含む、国産最大級のタービン発電機 3 台をあいついで完成した。これらの機械は優秀な成績で工場試験を終了し、現地据付に着手したところであり、現在のひっ迫した電力需給の緩和に貢献するものと期待される。

### 1. 関西電力美浜発電所向け 2 号 560 MVA 1,800 rpm 原子力用タービン発電機

昭和 43 年に当社が製作した、同発電所向け 1 号機 400 MVA に続く国産 2 台目の原子力用発電機で、国産最大容量の記録品である。1 号機よりも容量が大きいため、固定子コイルに 2 列ベントチューブ式水素内部冷却、固定子鉄心に軸方向通風など多くの新構造を採用し、運転の信頼性が高く保守が簡単という内部冷却の特色を維持しながら、極力コンパクトになるよう計画した。工場試験で機械各部に多数の熱電対をそう入して、これらの新構造の効果を実測した結果、十分満足すべきデータが得られた。また、本機の軸材は荒削り重量約 100 t で、同一容量の 2 極機の軸材の 2 倍以上の重量材であるが、1 号機に引続き国産の単一鍛鋼品を使用した。励磁機も 1 号機と同様に、運転の信頼性が高く保守が容易なブラシス励磁機を採用している。

■タービン 定格 500 MW

■発電機定格

出力	560 MVA
電圧	17,000 V
力率	90%
短絡比	0.58
ガス圧	4 kg/cm <sup>2</sup>
回転数	1,800 rpm
冷却方式	固定子コイル—2 列ベントチューブおよびコイルつなぎ部冷却 固定子鉄心—軸方向通風 回転子コイル—標準内部冷却

■励磁機定格

形式	ブラシス励磁機
出力	2,600 kW
電圧	500 V
回転数	1,800 rpm

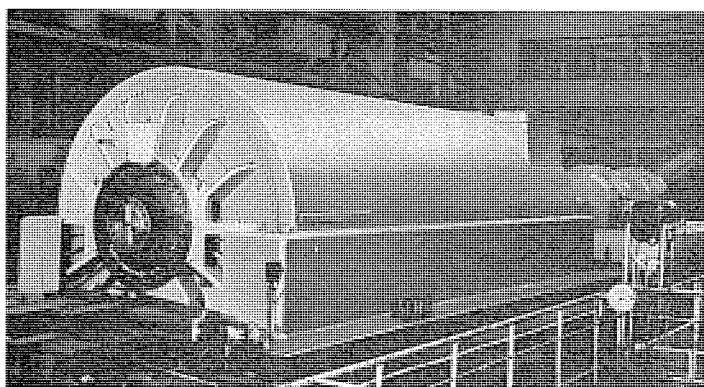


図 1 関西電力美浜原子力発電所向け 2 号タービン発電機  
560 MVA 1,800 rpm

## 2. 関西電力高砂発電所向け 1 号 500 MVA 3,600 rpm 火力用タービン発電機

2 極 タンデム 機としては国産最大級の発電機で、固定子コイル・回転子コイルとも水素内部冷却であるが、固定子コイルつなぎ部を裸にするとともに、回転子コイル・メインリードなども、従来の内部冷却機とは若干異なった構造にして冷却効果の改善を図っている。また、励磁電流の増大によるブラシ数の増加とスリップリングの大形化に伴い、スリップリング用のティルティングパッド形軸受を設け、オイルウィップなどオーバハング部の自励振動を防止する構造にしている。工場試験の結果、軸振動は従来の中小容量機と同程度の十分小さい値に収まった。

■タービン 定格 450 MW

■発電機定格

出 力	500 MVA
電 圧	16,000 V
力 率	90%
短 絡 比	0.58
ガ ス 圧	4 kg/cm <sup>2</sup>
回 転 数	3,600 rpm
冷却方式	固定子コイル—コイルつなぎ部冷却 回転子コイル—標準内部冷却

■励磁機定格

形 式	ギヤ減速直流励磁機
出 力	2,300 kW
電 圧	500 V
回 転 数	514 rpm

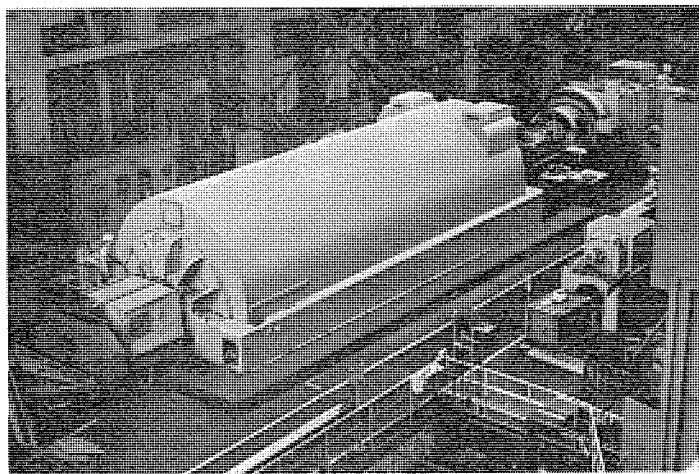


図 2 関西電力高砂火力発電所向け 1 号タービン発電機  
500 MVA 3,600 rpm

## 3. 中国電力岩国発電所向け 2 号 390 MVA 3,600 rpm 火力用タービン発電機

これまでに多数の実績を持つ標準内部冷却機であるが、水素ガス圧力を 500 MVA 級と同一の 4 kg/cm<sup>2</sup> とし、固定子コイルの結線を二重星形として寸法・重量の軽減を図っている。励磁方式はブラシレスで、その容量 1,600 kW は、3,600 rpm 機としては現時点における国産最大容量である。冷却水として高圧（最大 31 kg/cm<sup>2</sup>）の復水を使用する関係上、ガス冷却器には特殊な水密構造を採用している。おもな仕様は次のとおりである。

■タービン 定格 350 MW

■発電機定格

出 力	390 MVA
電 圧	16,000 V
力 率	90%
短 絡 比	0.58
ガ ス 圧	4 kg/cm <sup>2</sup>
回 転 数	3,600 rpm
冷却方式	固定子・回転子とも標準内部冷却

■励磁機定格

形 式	ブラシレス励磁機
出 力	1,600 kW
電 圧	500 V
回 転 数	3,600 rpm

なお、以上のほか、関西電力海南火力発電所向け 3 号 670 MVA

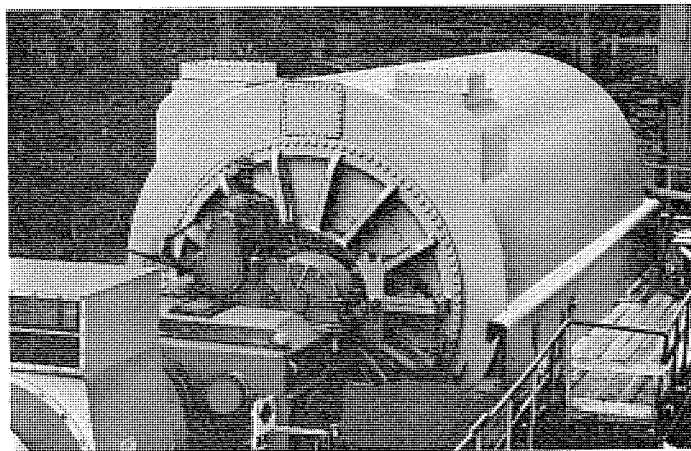


図 3 中国電力岩国火力発電所向け 2 号タービン発電機  
390 MVA 3,600 rpm

3,600 rpm 2極タンデムコンパウンド機、東京電力鹿島火力発電所向け 2号および4号 700 MVA  
 3,000 rpm 2極クロスコンパウンド機、関西電力高浜原子力発電所向け 1号 920 MVA 1,800 rpm  
 4極 タンデムコンパウンド 機などの国産最大容量機をはじめとして、国内・国外の事業用タービ  
 ン発電機二十数台を鋭意製作中である。

[神戸製作所]

## 国鉄通勤電車用冷房装置

国鉄納め通勤電車用冷房装置 AU 75 X 形 ユニットクーラー を完成した。今夏国鉄では通勤電車の冷房として最適な方式を検討するため、扇風機の有無、天井ダクトの形式を種々変化させ試作車を製作した。当社より納入した AU 75 X 形は、電車の屋根中央に配置されるのを考慮して特に小形・軽量に設計されている。ユニットクーラーで冷却された車内空気が、電車の全長にわたって設けられた天井ダクトより車内に吹出され、乗客に快適な通勤を約束する日が間もなくやってくると思われる。そのための試験が東京地区は山手線 103 系通勤電車で行なわれる。なお大阪地区にも 113 系近郊形電車用として発注があった。

冷房能力	42,000 kcal/h
電 源	主 AC 440 V 三相 60 Hz
	制御 AC 100 V 単相 60 Hz
冷 媒	フロン 22
風 量	140 m <sup>3</sup> /min
外形寸法	長さ 幅 高さ
	(3,732+1,081) × 2,130 × 416 mm
	(本体+ふさぎ板)
重 量	940 kg(本体)+77 kg(ふさぎ板)

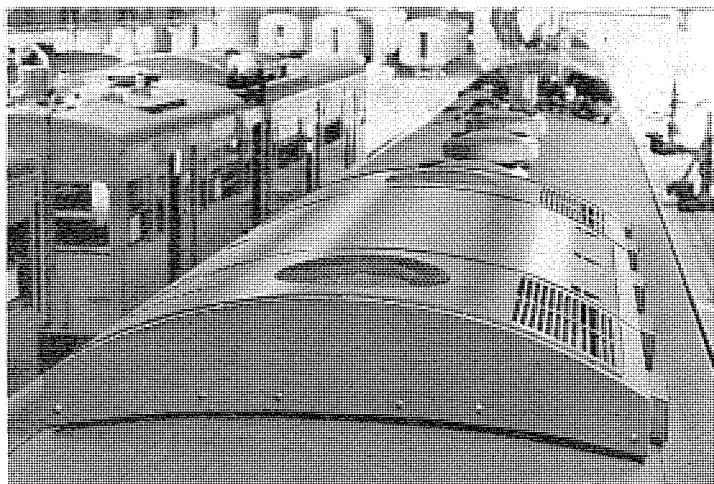


図 1 AU 75 X 形 ユニットクーラー 外観

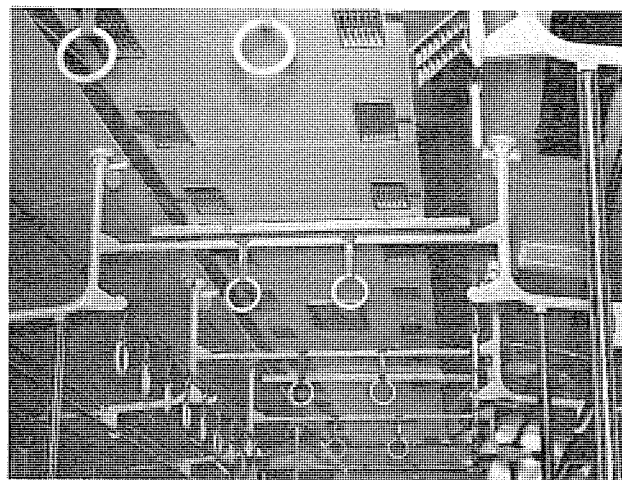


図 2 通勤電車天井ダクトの一例

[長崎製作所]

TAWG 形地絡表示線継電器・  
LAWS 形短絡表示線継電器の完成

最近の都市電力系統拡大に伴い、表示線保護適用系統の増大に対処した高性能表示線継電器の新シリーズを完成した。現在、すでに 77 kV 以上の系統に各 50 端子分納入され、好調にか(稼)動されている。

■ 特 長

- (1) 地絡・短絡表示線継電器とも、検出感度は 2 ～ 4 倍に向上
- (2) 適用こう(亘)長の長距離化
- (3) 地絡表示線継電器は、静止化により低負担化を計っている
- (4) 表示線こう長補償回路には  $\pi$  および  $2\pi$  回路を採用し、低圧側補償としている
- (5) 絶縁トランスに固体絶縁材料を使用し、小形軽量化を計り従来の 1/5 の重量としている

■ 仕 様

	TAWG-1-D	LAWS-1-D
(1) タ ッ プ 値 (2 端子系 1 端電源動作値, 3 端子系動作値 = $\frac{3}{2} \times$ タップ値)	0.15 A ~ 0.6 A	1.5 A ~ 6.0 A
(2) 適 用 こ う 長	片道抵抗 1,000 $\Omega$	往復 1,000 $\Omega$
(3) C T 負 担	1.3 $\Omega$ (at 5 A)	約 10 VA
(4) 定 格	AC 2 A 50/60 Hz DC 110 V	AC 5 A 50/60 Hz DC 110 V
(5) ケ ー ス	D-E ケース	D-E ケース

[神戸製作所]

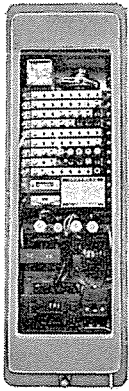


図 1 TAWG-1-D 形

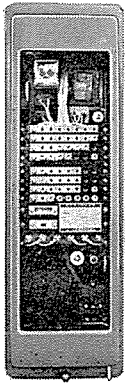


図 2 LAWS-1-D 形

# 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) (電) 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)	(電) 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)	(電) 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)	(電) 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)	(電) 810	(電) 福岡 (092) 75局6231番
長崎出張所	長崎市丸尾町6番14号	(電) 850-91)	(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)	(電) 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)	(電) 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) 930	(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)	(電) 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)	(電) 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) 760	(電) 高松 (0878) 51局0001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)	(電) 100	(電) 東京 (03) 218局2111番
城北家電営業所	東京都文京区大塚3丁目3番1号(新茗溪ビル)	(電) 112	(電) 東京 (03) 944局6311番
城南家電営業所	東京都世田谷区池尻3丁目10番3号(三菱電機世田谷ビル)	(電) 154	(電) 東京 (03) 411局8181番
城西家電営業所	国分寺市南町2丁目16番14号(秀美ビル)	(電) 185	(電) 国分寺 (0423) 22局1881番
横浜家電営業所	横浜市中区富士見町3番地4	(電) 232	(電) 横浜 (045) 251局2226番
千葉家電営業所	千葉市新宿町2丁目49番地(三菱電機千葉ビル)	(電) 280	(電) 千葉 (0472) 42局5486番
大阪商品営業所	大阪市北区堂島北町8番地の1	(電) 530	(電) 大阪 (06) 344局1231番
洲本出張所	洲本市上物部2丁目6番33号	(電) 656	(電) 洲本 (07992) 2局0631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)	(電) 450	(電) 名古屋 (052) 561局5311番
静岡出張所	静岡市小島2丁目1番22号	(電) 420	(電) 静岡 (0542) 85局6141番
福岡商品営業所	福岡市天神2丁目12番1号(天神ビル)	(電) 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)	(電) 060-91)	(電) 札幌 (011) 261局9111番
仙台商品営業所	仙台市大町4丁目175番地(新仙台ビル)	(電) 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) 920	(電) 金沢 (0762) 52局1151番
広島商品営業所	広島市中町7番32号(日本生命ビル)	(電) 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) 760	(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)	(電) 950	(電) 新潟 (0252) 45局2151番
関東商品営業所	与野市上落合後原842番地	(電) 338	(電) 与野 (0488) 33局3181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)	(電) 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) 530	(電) 大阪 (06) 344局1231番
中央研究所	尼崎市南清水字中野80番地	(電) 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	(電) 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	(電) 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	(電) 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	(電) 669-13)	(電) 三田 (07956) 局 4371番
長崎製作所	長崎市丸尾町6番14号	(電) 852	(電) 長崎 (0958) 23局6211番
稲沢製作所	稲沢市菱町1番地	(電) 492	(電) 稲沢 (0587) 32局8111番
和歌山製作所	和歌山市岡町91番地	(電) 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	(電) 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	(電) 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	(電) 664	(電) 伊丹 (0727) 82局5131番
熊本工場	熊本市竜田町弓削720番地	(電) 862	(電) 熊本 (0963) 62局7211番
名古屋製作所	名古屋市中区矢田町18丁目1番地	(電) 461	(電) 名古屋 (052) 721局2111番
福岡製作所	福岡市今宿青木690番地	(電) 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	(電) 720	(電) 福山 (0849) 21局3211番
姫路製作所	姫路市千代田町840番地	(電) 670	(電) 姫路 (0792) 23局1251番
相模製作所	相模原市宮下1丁目1番57号	(電) 229	(電) 相模原 (0427) 72局5131番
世田谷工場	東京都世田谷区池尻3丁目1番15号	(電) 154	(電) 東京 (03) 414局8111番
静岡製作所	静岡市小島3丁目18番1号	(電) 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	(電) 508	(電) 中津川 (05736) 5局7151番
大船製作所	鎌倉市大船5丁目1番1号	(電) 247	(電) 鎌倉 (0467) 46局6111番
郡山製作所	郡山市栄町2番25号	(電) 963	(電) 郡山 (02492) 2局1220番
群馬製作所	群馬県新田郡尾島町大字岩松800番地	(電) 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	(電) 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図所1番地	(電) 617	(電) 京都西山 (075) 921局4111番
長野工場	長野市大字南長池字村前	(電) 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	(電) 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	(電) 060	(電) 札幌 (011) 231局5544番

溶接機・荷役運搬装置自動化特集

《溶接機特集論文》

- 溶接技術の進歩
- 溶接機の進歩
- 標準半自動アーク溶接機
- 最近の MIG 溶接機
- MISA 溶接機
- 数値制御自動アーク溶接装置
- プラズマ電子ビーム溶接機
- 鉄鋼プロセスライン用ウエルダ
- 自動溶接装置
- 拡散接合機

《荷役運搬装置自動化特集論文》

- 荷役運搬装置自動化の最近の傾向
- 自動倉庫システム

- 石炭鉱石ヤードにおける スタッカ リクレーマ自動運転
- クレーンにおける直流電動機の制御と最近の実例
- クレーンにおける交流電動機の制御と最近の実例
- 新シリーズ電気ホイスト
- 三菱リフティングマグネット

《普通論文》

- 超音波探傷器 FD-160 形
- 中小容量特高受電における低圧側保護しゃ断器の経済設計
- 新シリーズダイヤパワーユニット
- 最近の距離継電器

《技術解説》

- 透過式全熱交換器(ロスナイ)の新開発

三 菱 電 機 技 報 編 集 委 員 会

委員長	仙 石 廉	常任委員	湊 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	北 垣 成 一
"	宇 佐 見 重 夫	"	南 日 達 郎
"	北 川 和 人	"	泰 卓 也
"	古 賀 享	"	林 昇 寿
"	小 堀 富 次 雄	"	松 元 雄 蔵
"	鈴 木 正 材	"	吉 武 正 彦
"	牧 野 六 彦	"	和 田 義 勝

(以上 50 音順)

昭和 45 年 9 月 22 日印刷 昭和 45 年 9 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

仙 石 廉

印刷所

東京都新宿区市谷加賀町 1 丁目 12 番地  
(郵便番号 162)

大日本印刷株式会社

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