

MITSUBISHI DENKI GIHO

三菱電機技報



Vol.54 No.3

固体絶縁と材料特集

三菱電機技報

Vol. 54 No. 3 MARCH 1980

固体絶縁と材料特集

目次

特集論文

エポキシ注型絶縁物の交流耐電圧特性	仲西幸一郎・潮見尚暢・渋谷義一・但田昭司・坂井龍吉	1
高電圧用注型絶縁材料の耐熱性の改善	土橋勝・板橋好文・松田節之・小鯛正二郎	6
変圧器への注型絶縁物の適用	村上靖武・太田照雄・今井満夫・安部勉・原啓治	11
新しい電気絶縁用液状ゴムとその変圧器への適用	森脇紀元・羽仁潔・不可三晃・山崎一郎・松田文雄	16
屋外機器用エポキシ注型絶縁物の長期信頼性	平沢栄一・谷功・坂井龍吉・豊蘇正和・宗村弘次	21
高電圧発電機絶縁の経年変化	平林庄司・谷功・松田禎夫・伊藤裕之・斎藤堅一	26

普通論文

スピーカーのネットワーク用インダクタのひずみ低減	土屋英司・大村俊次・池田英男・岡部正志・佐伯多門	33
大容量送油風冷式変圧器用新形冷却器と低騒音冷却扇	秋下貞夫・川中進・森津一樹・品川博昭	37
シエラレオネ納め国際衛星通信用小形地球局	入江浩一・糸原明義	41
大容量タービン発電機の軸受	菅波拓也・増田隆広・大石紀夫・田熊良行	44
大出力棒状熱陰極形電子ビーム溶接機	下山仁一・安永政司・佐々木茂雄・藪中文春・原且則	48
電圧両用形 IC 化漏電しゃ断器	近藤邦昭・石井和宏・宮崎行雄・竹田貢	53
農林水産省納め香川用水集中管理システム	大塚忠夫・渡辺宏・大石将之・牧本健二	58
マイクロ波用静電誘導形トランジスタの電気的特性	梶原康也・行本善則	63
2,000 m 深海潜水調査船用電機品	黒川武彦・富永隆弘・朝枝健明・鶴野秀之・藤田昇三	67
特許と新案		31
張力制御装置、充電用交流発電機制御装置、燃焼装置		
当社の登録特許一覧		74
スポットライト		72
三菱モールド変圧器 CV-F 形、72~204 kV ガス絶縁複合開閉装置新シリーズ、事務所・店舗用天井吊形エアコン《Mr. SLIM》(表 3)		

FEATURING ELECTRICAL INSULATION MATERIALS

CONTENTS

FEATURED PAPERS

AC Breakdown-Voltage Characteristics of Cast-Epoxy Resins	Koichiro Nakanishi et al.	1
Improvement of the Thermal Properties of Cast Insulating Materials for High-Voltage Use	Masaru Tsuchihashi et al.	6
The Application of Cast Insulators to Transformers	Yasutake Murakami et al.	11
A New Liquid Rubber for Electrical Insulation and Its Application to Current Transformers	Toshimoto Moriwaki et al.	16
Outdoor Exposure Tests of Epoxy Resins Under High-Voltage Stress	Eiichi Hirasawa et al.	21
The Degradation of Synthetic-Resin-Mica Insulation for High-Voltage Generators	Shoji Hirabayashi et al.	26

GENERAL PAPERS

Reducing the Current Distortion of Network Inductors for Loudspeakers	Hideshi Tsuchiya et al.	33
A New Cooler with a Low-Noise Fan for Forced-Oil, Forced-Air-Cooled Large Power Transformers	Sadao Akishita et al.	37
An INTELSAT Standard-B Satellite Communications Earth Station for Sierra Leone	Koichi Irie & Akiyoshi Itoharu	41
Journal Bearings for Large Turbine Generators	Takuya Suganami et al.	44
A High-Power Bolt-Cathode-Type Electron-Beam Welder	Toshikazu Shimoyama et al.	48
Earth-Leakage Circuit Breakers with Dual-Rated Voltage	Kuniaki Kendo et al.	53
Centralized Management Systems for the Kagawa Prefecture Irrigation-Water System	Tadao Otsuka et al.	58
Electrical Characteristics of a Microwave Static-Induction Transistor	Yasuya Kajiwara & Yoshinori Yukimoto	63
Electrical Equipment for a 2,000m-Deep Submergence Vehicle	Takehiko Kurokawa et al.	67

表紙

国鉄新幹線小山試験線における 962 形試作電車と TM202X 形主変圧器

962 形新幹線試作電車は、将来の新幹線の試作電車として製作され、昭和 54 年 2 月国鉄新幹線小山試験線に投入された。この電車は東海道、山陽新幹線の永年の実績を踏まえ最新の技術を折り込み耐寒・耐雪構造とし、保守点検面も十分考慮した車両となっている。

下方に 962 形試作電車に搭載されている TM202X 形主変圧器を示す。この主変圧器には一次線路側に耐熱エポキシ樹脂注型 30 号ブッシングを、また 1 次接地、2 次、3 次側には耐熱エポキシ樹脂を用い、新たに開発した 15 極一体注型端子板をそれぞれ採用し、機器の信頼性向上、小形軽量化に貢献している。

COVER

A Type TM202X Main Transformer for the 962 Prototype Electric Car for JNR's Oyama Test Line

The Type TM202X features primary insulation consisting of a heat-resistant molded epoxy-resin bushing with an insulation number of 30. The same epoxy-resin is used for the integrally molded 15-terminal plate, which was developed for use on the primary ground side and the secondary and tertiary winding sides. This insulation increases reliability and helps reduce the size and weight of the equipment.

アブストラクト

エポキシ注型絶縁物の交流耐電圧特性

仲西幸一郎・潮見尚暢・渋谷義一・但田昭司・坂井龍吉

三菱電機技報 Vol.54・No.3・P1～5

注型用のエポキシ樹脂に金属電極を埋め込み、平等電界及び準平等電界下における短時間及び長時間の交流電圧破壊に及ぼす要因について検討した。短時間破壊の場合には、部分放電も前駆電流もなしに破壊する。電極表面粗さを変えて破壊電圧を求めたところ、表面粗さにはあまり影響をうけていないことがわかった。また、室温及び高温でのV-I特性に影響を与える原因としては、電気と熱による複合劣化あるいは界面の影響などが考えられる。

屋外機器用エポキシ注型絶縁物の長期信頼性

平沢栄一・谷 功・坂井龍吉・農蘇正和・宗村弘次

三菱電機技報 Vol.54・No.3・P21～25

屋外用支持がいし、ブッシング、計器用変成器等へのエポキシ樹脂の適応を目的として、樹脂選択のための屋外課電暴露試験を実施した。暴露期間が5年に達した現時点で、シリカ充填脂環族エポキシ樹脂を用いた実製品モデルの20kVブッシング、110kV支持がいしは絶縁破壊しない実績が得られた。併せて、耐トラッキング性に劣る丸棒試料の課電暴露試験によってトラッキング発生に及ぼす電圧、沿面長の効果が明らかとなった。

高電圧用注型絶縁材料の耐熱性の改善

土橋 勝・板橋好文・松田節之・小鯛正二郎

三菱電機技報 Vol.54・No.3・P6～10

高電圧送変電機器の大容量化や小形・軽量化を行うため、注型絶縁材料の耐熱性の向上が望まれている。注型絶縁材料の耐熱性を向上するには、高温における機械的・電気的特性を高めることにあるが、高電圧用大形注型品としての品質及び生産の安定性を重視して材料の研究を進めてきた結果、耐久性と実用性とに優れた材料を開発することができ、実機への適用を進めている。ここでは、開発材料の熱的特性と、注型品の製造とに必要な諸特性について述べる。

高電圧発電機絶縁の経年変化

平林庄司・谷 功・松田禎夫・伊藤裕之・斉藤堅一

三菱電機技報 Vol.54・No.3・P26～30

我が国最初の無溶剤合成レジン真空含浸絶縁として当社製発電機にダイヤラスチック絶縁が採用されて既に四半世紀を経た。長年月稼働した発電機5台より固定子コイルを抜き取り、絶縁耐力試験ほかの試験を行った結果、各種絶縁評価試験より推定していたダイヤラスチック絶縁の優れた性能を、実証することができた。また、各種絶縁評価試験結果に基づき、運転経歴から残存絶縁耐力を推定する方法の妥当性、及び絶縁更新時期の指針についても述べる。

変圧器への注型絶縁物の適用

村上靖武・太田照雄・今井満夫・安部 勉・原 啓治

三菱電機技報 Vol.54・No.3・P11～15

変圧器には、従来、油・紙・積層品・セラミックス等の絶縁材料が使用されているが、積層部品の組合せの一体化、セラミックスに代えて軽量化、その他、油密化の信頼性を向上させるものとして、近年、注型絶縁方式も変圧器に種々適用されて成果を上げている。これらの注型絶縁物の製造技術と、変圧器への適用事例とについて紹介する。

スピーカーのネットワーク用インダクタのひずみ低減

土屋英司・大村俊次・池田英男・岡部正志・佐伯多門

三菱電機技報 Vol.54・No.3・P33～36

スピーカー単体のひずみが0.1%以下になり、これに伴って音声出力を高低域に分配するネットワーク用インダクタのひずみが目立つようになってきた。このインダクタのひずみを低減するため、まず、ひずみ率を定量的に求める計算式を導き出し、次に、この計算式から低ひずみ化に必要な磁心材料や寸法・形状に関する知見を得た。また、各種インダクタを試作し、計算結果との比較を行った。この結果、ひずみ率を低減するための諸条件が明らかとなった。

新しい電気絶縁用液状ゴムとその変流器への適用

森脇紀元・羽仁 潔・不可三 晃・山崎一郎・松田文雄

三菱電機技報 Vol.54・No.3・P16～20

新しいタイプの電気絶縁用液状ゴム《メルキッド》を開発し、変流器に適用した。この液状ゴムは良好な注型作業性を示し、卓越した耐熱性、耐水性、電気的及び機械的特性を有している。また、液状ゴム注型変流器はEPTゴムモールド製の従来品に比べて大幅に小形軽量化され、そのうえ、コロナ特性も改善された。

ここでは、この液状ゴムの特性及び変流器への適用について述べる。

大容量送油風冷式変圧器用新形冷却器と低騒音冷却扇

秋下貞夫・川中 進・森津一樹・品川博昭

三菱電機技報 Vol.54・No.3・P37～40

火力、原子力発電所用として1,000MVA級の送油風冷式変圧器が製作されるようになり、これに対処するため、冷却器としても、ユニットの大形化、高性能フィン構造の採用及び、冷却エレメントの一括溶融亜鉛めっきなどにより、大容量化、高性能化及び耐久性の向上を図ったもので、更に大形冷却器用として新しく開発した低騒音冷却扇と組合せ、最近の低騒音仕様を十分満足できるようにしたものである。

Abstracts

Mitsubishi Denki Giho : Vol. 54, No. 3, pp. 21~25 (1980)

Outdoor Exposure Tests of Epoxy Resins Under High-Voltage Stress

by Eiichi Hirasawa, Tsutomu Tani, Ryukichi Sakai, Masakazu Noso & Hirotsugu Munemura

Exposure tests have been carried out to select epoxy resins for suspension insulators, bushings and instrument transformers for outdoor use. 20kV bushings and 110kV suspension insulators using cycloaliphatic epoxy resin with silica powder have a five-year performance record on line without breakdown. In addition, outdoor exposure tests on cylindrical samples with reduced tracking resistance have established the effect of voltage and creepage distance on tracking generation.

Mitsubishi Denki Giho : Vol. 54, No. 3, pp. 1~5 (1980)

AC Breakdown-Voltage Characteristics of Cast-Epoxy Resins

by Koichiro Nakanishi, Hisanobu Shiomi, Yoshikazu Shibuya, Shoji Taka & Ryukichi Sakai

By embedding metal electrodes in cast-epoxy resins, Mitsubishi Electric has investigated the factors that affect short-term and long-term AC breakdown under uniform-field and quasi-uniform-field conditions. Short-term AC breakdown occurred without either partial discharge or prebreakdown current. Breakdown voltages were not affected by varying the surface roughness of the electrodes. Complex electrical or thermal deterioration or the effect of the interface appear to be factors affecting V-t characteristics at room temperatures and higher temperatures.

Mitsubishi Denki Giho : Vol. 54, No. 3, pp. 26~30 (1980)

The Degradation of Synthetic-Resin—Mica Insulation for High-Voltage Generators

by Shoji Hirabayashi, Tsutomu Tani, Sadao Matsuda, Hiroyuki Ito & Ken'ichi Saito

A quarter of a century ago Mitsubishi Electric began using Dialastic insulation for generators, the first such use in Japan of nonsolvent-resin vacuum-press impregnation. Tests on the insulation of stator coils removed from five generators after many years of service confirmed the outstanding performance of Dialastic insulation that had been inferred from the original tests. The article examines the validity of the method of estimating a generator's residual insulation resistance from its operating history based on the insulation evaluation tests, and of deciding when insulation should be renewed.

Mitsubishi Denki Giho : Vol. 54, No. 3, pp. 6~10 (1980)

Improvement of the Thermal Properties of Cast Insulating Materials for High-Voltage Use

by Masaru Tsuchihashi, Yoshifumi Itabashi, Setsuyuki Matsuda & Shojiro Kodai

To increase the capacity and reduce the size and weight of transmission and substation equipment for high-voltage use, improvements are called for in the thermal properties of cast insulating materials. These, in turn, presuppose improvements to electrical and mechanical characteristics at high temperatures. As a result of investigations directed primarily at consistent, high-quality production of such insulating materials as large-size castings for high-voltage use, materials with excellent durability and utility have been successfully developed and applied to actual systems. The article describes the thermal properties required of these cast insulating materials and the characteristics needed in producing castings.

Mitsubishi Denki Giho : Vol. 54, No. 3, pp. 33~36 (1980)

Reducing the Current Distortion of Network Inductors for Loudspeakers

by Hideshi Tsuchiya, Toshitsugu Omura, Hideo Ikeda, Masashi Okabe & Tomon Saeki

The reduction of the distortion induced by the individual loudspeaker unit to less than 0.1% has drawn attention to the distortion originating in the network inductors used to distribute the sound-signal output between high- and low-range units. To reduce the distortion of these inductors, equations were first derived that enabled quantitative calculation of the distortion ratios. Then, from these calculations, the information on the magnetic core material, its shape and the dimensions required to lower distortion was derived. Various types of prototype inductors were made and compared experimentally with the results of the theoretical calculations. The results established the conditions for reducing distortion.

Mitsubishi Denki Giho : Vol. 54, No. 3, pp. 11~15 (1980)

The Application of Cast Insulators to Transformers

by Yasutake Murakami, Teruo Ota, Mitsuo Imai, Tsutomu Abe & Keiji Hara

Oil, paper, laminates and ceramics have conventionally been used as insulating materials in transformers. Recently, however, in place of integrated assemblies of laminate parts and ceramics, excellent results have been obtained by using cast insulation to obtain lighter weight and more reliable oil tightness. The article gives the manufacturing techniques for these cast insulating materials and their application to transformers.

Mitsubishi Denki Giho : Vol. 54, No. 3, pp. 37~40 (1980)

A New Cooler with a Low-Noise Fan for Forced-Oil, Forced-Air-Cooled Large Power Transformers

by Sadao Akishita, Susumu Kawanaka, Kazuki Moritsu & Hiroaki Shinagawa

Since the construction of 1,000MVA-class forced-oil, forced-air-cooled power transformers began for thermal and nuclear power stations, efforts have been directed at the development of correspondingly larger cooler units, achieving greater capacities and efficiencies and improving durability by using a high-efficiency fan construction and applying hot-dipped zinc coating to the cooler elements, etc. This has resulted in a newly developed low-noise fan for air cooling which, in combination with an even larger cooler unit, fully satisfies the latest regulations on noise pollution.

Mitsubishi Denki Giho : Vol. 54, No. 3, pp. 16~20 (1980)

A New Liquid Rubber for Electrical Insulation and Its Application to Current Transformers

by Toshimoto Moriwaki, Kiyoshi Hani, Akira Fukami, Ichiro Yamasaki & Fumio Matsuda

A new liquid rubber for electrical insulation (MELQUID) has been developed and applied to current transformers. This liquid rubber shows good casting processability and has excellent heat and water resistance, electrical and mechanical properties. Current transformers cast with this liquid rubber have the additional advantages of significantly reduced size and weight, with improved corona discharge properties.

The article discusses the characteristics of this liquid rubber and its application to electrical insulation.

アブストラクト

シエラレオーネ納め国際衛星通信用小形地球局

入江浩一・糸原明義

三菱電機技報 Vol.54・No.3・P41～43

昭和54年8月、西アフリカのシエラレオーネ国に納入したインテルサット標準B地球局は、電子機器をシェルタに収容する当社の標準小形地球局である。地球局の機器の構成と性能の概要、将来の通信容量の拡張性を述べ、あわせて高温多湿の熱帯地方に設置される小形地球局に対する設計法を述べた。

農林水産省納め香川用水集中管理システム

大塚忠夫・渡辺 宏・大石将之・牧本健二

三菱電機技報 Vol.54・No.3・P58～62

近年、農業分野においては兼業農家の増加、輪換畑への転換など農業の体質が変化しつつあり、一方、水資源の有効利用と合理的な水配分、人件費の高騰による合理化・省力化、災害の早期発見などの観点から、用排水施設及び用水状況の集中管理システムが全国的に導入されつつある。本文では最近、農林水産省中国四国農政局香川用水農業水利事業所に納入した香川用水管理システムについて紹介する。

大容量タービン発電機の軸受

菅波拓也・増田隆広・大石紀夫・田熊良行

三菱電機技報 Vol.54・No.3・P44～47

タービン発電機では軸径と軸長の増大に伴い、高周速・高荷重に耐え、しかも優れた振動抑制機能をもつ軸受の開発が要請されていた。このため、軸受の負荷特性が正確に予測できる理論を確立し、大容量タービン発電機用の軸受を開発して実機に適用している。本文では、当社の大容量化に対処した大径軸受技術とその研究状況について述べる。

マイクロ波用静電誘導形トランジスタの電気的特性

梶原康也・行本善則

三菱電機技報 Vol.54・No.3・P63～66

静電誘導形トランジスタは新しい形のトランジスタとして登場したが、当初はオーディオ用として開発された。静電誘導形トランジスタが本質的に高周波高出力用としての特性を備えていることを見極め、寄生素子の影響を解析し、構造を最適化して、1GHzで100Wの出力を得るトランジスタを実現させることにより、静電誘導形トランジスタの高周波高出力素子としての位置づけを明らかにした。本文ではこの静電誘導形トランジスタの特徴、開発経過、素子の電気特性について報告する。

大出力棒状熱陰極形電子ビーム溶接機

下山仁一・安永政司・佐々木茂雄・藪中文春・原 且則

三菱電機技報 Vol.54・No.3・P48～52

圧力容器や海洋構造物などの極厚肉部材(50～300mm)の溶接に工数低減及び材質劣化の防止を目的として、電子ビーム溶接機の適用が検討されつつある。板厚300mmの鋼板を1層で貫通溶接するためには、100kW程度の電子ビームを長時間安定して発生することが基本条件である。量産部品の生産ラインにおいて、陰極寿命の長さとの高い稼働率が実証されている棒状熱陰極形の120kW電子ビーム溶接機について紹介する。

2,000m深海潜水調査船用電機品

黒川武彦・富永隆弘・朝枝健明・鶴野秀之・藤田昇三

三菱電機技報 Vol.54・No.3・P67～71

海洋科学技術センター向け2,000m深海潜水調査船用電機品は、蓄電池を電源としたトランジスタインバータとかご形誘導電動機による可変速制御方式の推進・ポンプ駆動系及び通信・観測用電源、配電盤等によって構成されている。

潜水調査船の概要と、高水圧の海中で使用される主要電機品の仕様、特徴並びに設計、製作に当たって特に考慮した諸点などについて紹介する。

電圧両用形IC化漏電しゃ断器

近藤邦昭・石井和宏・宮崎行雄・竹田 貢

三菱電機技報 Vol.54・No.3・P53～57

現在市販されているほとんどの漏電しゃ断器は電圧固定形(100V、200V・415V専用)である。漏電しゃ断器の定格は電圧、電流、感度電流の3つが基本である。これらを組合せると莫大な製品の種類となりユーザーでの選定上の煩わしさとなっていた。また種類が多いため流通在庫、補修用在庫も多くなり、種類の縮減が大きな課題であった。

電圧両用形は当社独自のIC化技術などにより100V～200V両用、200V～415V両用化したもので大幅な種類の縮減に成功した。

Abstracts

Mitsubishi Denki Giho : Vol. 54, No. 3, pp. 58~62 (1980)

Centralized Management Systems for the Kagawa Prefecture Irrigation-Water System

by Tadao Otsuka, Hiroshi Watanabe, Masayuki Oishi
and Kenji Makimoto

Fundamental changes in agriculture, the need to husband water resources and to ensure rational water distribution, escalating labor costs and the need for early warning of natural disasters are encouraging introduction of centralized management systems in Japan to control irrigation and drainage facilities. The article introduces a centralized management system for the Kagawa Prefecture Irrigation-Water System recently introduced by the Ministry of Agriculture, Forestry and Fishery, Kagawa Irrigation-Water Project Office.

Mitsubishi Denki Giho : Vol. 54, No. 3, pp. 41~43 (1980)

An INTELSAT Standard-B Satellite Communications Earth Station for Sierra Leone

by Koichi Irie & Akiyoshi Itohara

The INTELSAT Standard-B satellite communications earth station delivered to the West African nation of Sierra Leone by Mitsubishi Electric in August 1979 is the Corporation's standard small earth station with the electronic equipment enclosed in a special shelter. The article describes the station's equipment, structure and performance, and the possibilities of future upgrading of the communications capacity, at the same time detailing the special design considerations that apply to a small earth station intended for the high temperatures and humidities of a tropical installation.

Mitsubishi Denki Giho : Vol. 54, No. 3, pp. 63~66 (1980)

Electrical Characteristics of a Microwave Static-Induction Transistor

by Yasuya Kajiware & Yoshinori Yukimoto

The static-induction transistor is a new transistor developed for audio applications. Mitsubishi Electric, noting that it had characteristics suitable for high-frequency, high-output applications, analyzed the parasitic elements and optimized the structure, achieving a high-frequency, high-output device capable of delivering 100W output power at a frequency of 1GHz. The article describes the special features of static-induction transistors, details the process of their development, and gives the electrical characteristics of the new devices.

Mitsubishi Denki Giho : Vol. 54, No. 3, pp. 44~47 (1980)

Journal Bearings for Large Turbine Generators

by Takuya Suganami, Takahiro Masuda, Yoshio Oishi & Yoshiyuki Takuma

With increases in the diameter and length of the shafts of turbine generators, the need arises to develop bearings that can cope with heavy loads and high speeds and also provide excellent shaft-vibration control. The authors have established a theory that enables accurate prediction of bearing load-carrying characteristics and applied it to the development of practical bearings for a large-capacity turbine generator. The article details Mitsubishi Electric's large-diameter bearing technology for mammoth turbine generators and describes current research.

Mitsubishi Denki Giho : Vol. 54, No. 3, pp. 67~71 (1980)

Electrical Equipment for a 2,000m-Deep Submergence Vehicle

by Takehiko Kurakawa, Takahiro Tominaga, Takeaki ASaeda,
Hideyuki Tsuruno & Shozo Fugita

The 2,000m-deep submergence vehicle for deep-sea exploration supplied to the Japan Marine Science and Technology Center contains electrical equipment comprising storage batteries as the power supply, a transistorized inverter and a squirrel-cage induction motor for the variable-speed drive of the propulsion system and hydraulic pumps, plus power supplies and switchboard, etc. for communications and observation equipment. The article introduces the deep-submergence vehicle, the performance specifications of the main items of electrical equipment designed for operation at high seawater pressures, with their features, and the special factors considered in their design and production.

Mitsubishi Denki Giho : Vol. 54, No. 3, pp. 48~52 (1980)

A High-Power Bolt-Cathode-Type Electron-Beam Welder

by Toshikazu Shimoyama, Seiji Yasunaga, Shigeo Sasaki,
Fumiharu Yabunaka & Yoshinori Hara

The applications of electron-beam welders to pressure vessels and offshore structures have been investigated from the point of view of simplifying welding processes for thick steel plates (50~300mm) and of preventing degradation of their physical properties. In order to weld steel plate that is 300mm thick with a single pass, it was found that an output power of about 100kW is necessary. Long cathode life is also required for the long welds of large-scale structures. Bolt-type cathodes have proven long life in service on mass-production manufacturing lines. The article introduces a 120kW electron-beam welder with a bolt-type cathode.

Mitsubishi Denki Giho : Vol. 54, No. 3, pp. 53~57 (1980)

Earth-Leakage Circuit Breakers with Dual-Rated Voltage

by Kuniaki Kendo, Kazuhiro Ishii, Yukio Miyazaki
& Mitsugu Takeda

Most ELCBs today are of the specific rated-voltage type—i.e., specifically for 100, 200 or 415V. The combinations of their rated voltage, rated current and rated current sensitivity complicate selection and call for large distribution and servicing inventories. However, Mitsubishi Electric's unique IC and related expertise has enabled the development of dual-rated-voltage ELCBs for 100/200V and for 200/415V, greatly reducing the number of products required.

エポキシ注型絶縁物の交流耐電圧特性

仲西幸一郎*・潮見尚暢***・渋谷義一**・但田昭司***・坂井龍吉***

1. ま え が き

エポキシ樹脂は優秀な電氣的・機械的諸特性を有しており、また、さまざまな形に注型することが容易なため数多くの製品に使用されてきた。電気機器へのエポキシ樹脂の適用は、注型技術の著しい進歩と相まって小さなトランジスタや集積回路から超高電圧機器にまで及んでおり、今後更にその需要は増大していくものと予想されている。

この報告は、このような広い適用分野をもつエポキシ樹脂のうち、ガス絶縁変電所 (Gas Insulated Substation : GIS と略す) のスペーサ、操作棒、支持台などに使用されている大形注型用の無機質充填 (填) エポキシ樹脂についての短時間及び長時間の交流耐電圧の諸特性について述べている。GIS においては、エポキシ樹脂は SF_6 ガスとともに主要な絶縁体を構成しており、エポキシの絶縁特性を正確に理解することは GIS の信頼性を向上させる上で極めて重要なことである。

実験に使用した試料としては実機サイズに近い大きさの平板-平板、半球-半球、棒-平板電極をエポキシ樹脂とともに注型、埋め込んだ形状のものの外に、実際に GIS で使用しているスペーサ、ブッシング、支持筒なども用いた。これらの試料を使って、

- (1) 破壊電圧の絶縁厚さ依存性
 - (2) 破壊電圧に対する電極表面の粗さ効果
 - (3) 絶縁破壊の前駆現象の観察
 - (4) 破壊電圧の電極面積効果
 - (5) 常温時及び高温時の電圧-時間 ($V-t$) 特性
 - (6) エポキシ注型各種部品の長期課電試験
- などについて調べた。

2. 実験試料と実験方法

上記 (1)~(4) の実験に使用した樹脂はビスフェノール A 系の樹脂で酸無水物系の硬化剤とともに注型・硬化させた。試料の形状は図 1. (a)~(e) に示したようにできるだけ大きくし、実機に即した絶縁耐力の検討ができるようにした。電極としてはアルミニウムを用い、

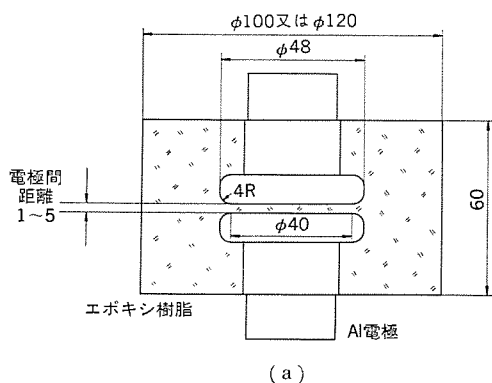
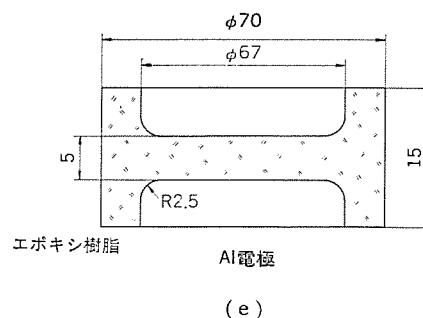
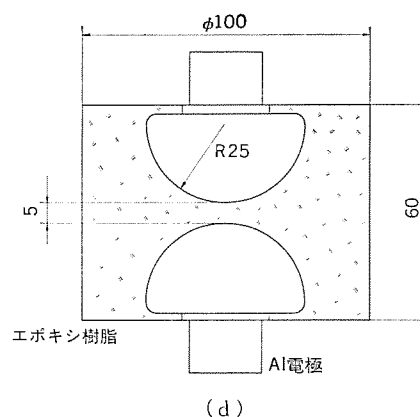
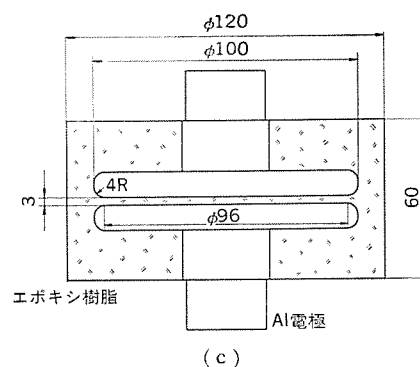
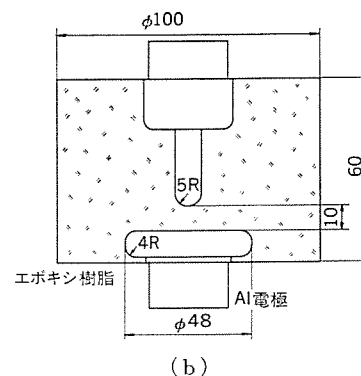


図 1. 試料形状

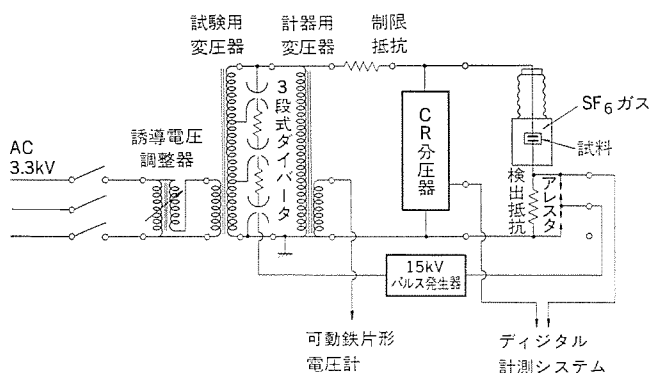


図 2. AC 電源回路と測定回路

電極間の平行度をだすために電極は一体加工により作成した。

試料に印加する電圧は交流電圧 (60 Hz) で、短時間破壊電圧を求める場合は約 1 kV/秒の速度で電圧を上昇させた。一方、 $V-t$ 特性を求める場合は、所定の電圧を印加し破壊に至るまでの時間を求めた。電極間距離が 1 mm 及び 2 mm の試料については絶縁油中で、3 mm 以上の試料については SF_6 ガスタンク (3~5 kg/cm²) 中で実験を行った。

一部の試料については破壊電圧値のほかに、トランジェントレコーダ (Biomation 社, Model 8100) を用いた過渡現象デジタル計測システム⁽¹⁾を使用し、図 2. に示すような電源及び測定回路で破壊前駆電流や部分放電パルスの測定も実施した。

3. 短時間交流破壊電圧値の測定

図 1. (a) に示した形状のエポキシ試料を用いて、交流破壊電圧値の電極間距離依存性を求めると図 3. に示すような結果が得られた。電極表面粗さは実用上用いられる程度の機械仕上げとした。図 3. から、破壊電圧値と電極間距離との関係はほぼ比例関係にあるが、長い電極間距離の領域でわずかに飽和傾向を示す。

この破壊電圧に対する絶縁厚さの効果を、

$$V_B = Ad^n \quad (2)$$

ただし、 V_B : 破壊電圧

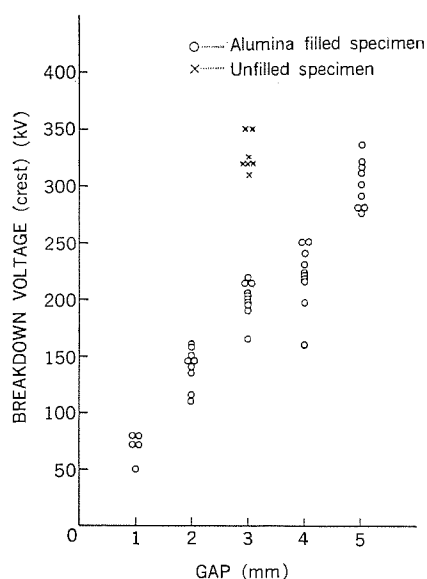


図 3. AC 破壊電圧値の電極間距離依存性

d : 電極間距離

A, n : 定数 (誘電体の種類・測定方法などによって変化する)

のように表現するとすれば、図 3. では $n \approx 0.97$ となりほぼ 1 に近く、実験を行った電極間距離の範囲では絶縁厚さ効果はほとんどない。このことは D. Kind 氏らによっても主張されている⁽³⁾。

また、充填材を混入した試料 (電極間距離 3 mm) の破壊電界値が 0.55~0.74 MV/cm であるのに対して、無充填の試料の破壊電界は 1.13~1.36 MV/cm で、充填材を混入すると破壊電界が低下する。その原因として、エポキシ樹脂と充填材の界面又は Al 電極と充填材入りの樹脂の界面が弱点として作用していると考えられる⁽⁴⁾。

しかし元来、高電圧機器の支持用として充填材はエポキシ樹脂の機械的特性及び熱的特性を増強する目的や、注型時にエポキシ樹脂と金型や埋込導体などの収縮率の相違から発生する内部応力を緩和したりするなどの目的がある。そこで、実機に使用するエポキシ樹脂は、充填材を均一に混ぜた状態で使用されているのである。

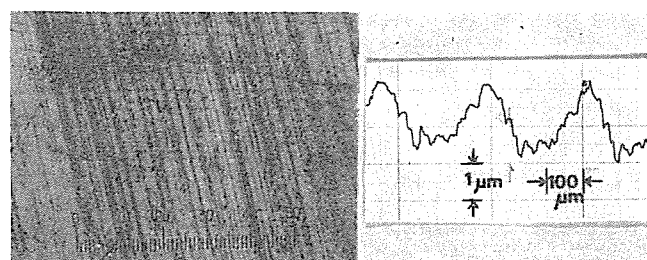
4. 破壊電圧に対する電極表面の粗さ効果

図 1. (a) に示す平板-平板電極について、アルミニウム電極表面を次の 3 種類の仕方により表面処理をした試料を作成した。すなわち、

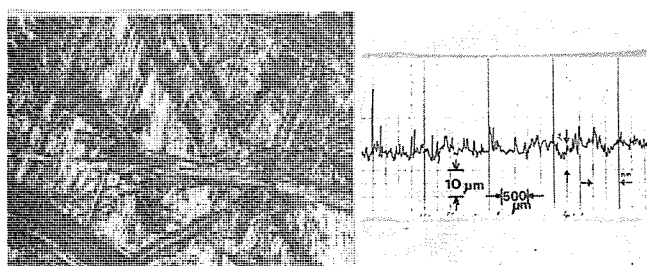
- (a) パフ研摩仕上げ
- (b) 機械仕上げ
- (c) #100 のサンドペーパー研摩仕上げ



(a) パフ研摩仕上げ



(b) 機械仕上げ (▽▽▽)



(c) #100 サンドペーパー仕上げ

図 4. 電極表面の荒さと顕微鏡写真

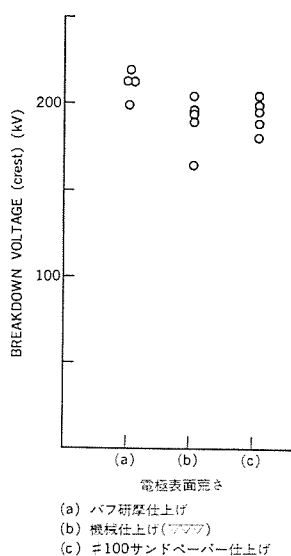


図 5. 電極表面粗さと破壊電圧

である。図 4. はこれらの電極表面の顕微鏡写真及び表面粗さ計によって測定した結果を示す。バフ研摩を行った表面の粗さは約 $0.5 \mu\text{m}$ 、一方機械仕上げの表面の粗さは約 $2 \mu\text{m}$ 、#100 のサンドペーパー研摩の粗さは約 $20 \mu\text{m}$ である。

各試料の破壊電圧を求めると図 5. のような結果が得られた。バフ研摩をした電極を埋め込んだ試料 (a) の破壊電圧値は他の場合の破壊電圧値に比べて少し高くなっているが、機械仕上げ (▽▽▽) の場合 (b) と #100 のサンドペーパー研摩の場合 (c) の破壊電圧値とは大きな差がないことがわかる。すなわち、実験を行った表面粗さの範囲では、電極表面の粗さは交流短時間破壊に対してはあまり影響はないようである。それよりおのおの場合のばらつきが大きいことを考えると、電極表面の粗さ効果より他の要因、例えば上記した試験では制御され得なかったような微視的な界面状態の違いが支配的であるとも推察される。

5. 破壊時の電流及び部分放電パルスの観測

図 2. に示したような電源・測定回路において、破壊直前の電流及び破壊前に部分放電が生じているか否かを、トリガ機能を有するトランジェントレコーダーを使って観測した。図 6. (a) には平板-平板電極を埋め込んだ試料の電氣的破壊時の電圧・電流波形を示しているが、破壊の前駆的な電流 (測定感度 0.1 mA) は観測されなかった。

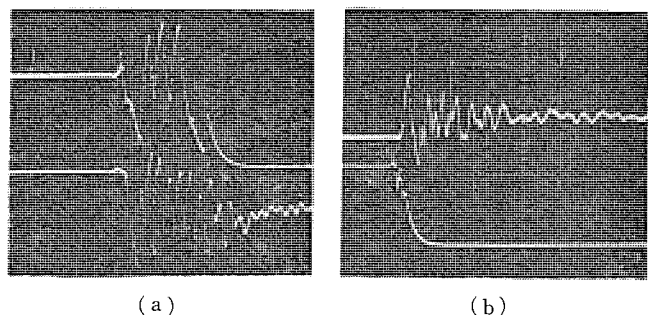


図 1. (a) 試料の場合

図 1. (b) 試料の場合

図 6. 破壊時の電圧・電流波形

また、図 1. (b) に示したような準平等電界を構成する棒-平板電極を埋め込んだ試料においても、図 6. (b) に示すように前駆電流は観測されていない。Schiweck 氏のインパルス電圧についての観測でも、著しい不平等電界試料に対して、ツリーの進展に相当すると考えられる破壊前駆電流波形が観測されているだけで、平等電界に近い試料に対しては前駆電流は何も観測されていない⁽⁶⁾。このように、かなりの不平等電界下では前駆電流が観測されるのに対して、平等電界下及び準平等電界下においては前駆電流波形は観測されない。これに対しては、

(1) 破壊現象が非常にはやくて 10 ナノ秒のサンプリング時間以内に現象が終わっている。

(2) 前駆電流が非常に小さくて観測できない。

という 2 つの理由が考えられる。

また、平等電界下及び準平等電界下で、試料破壊前 1~2 サイクル間に部分放電パルスが生じているか否かを調べたが、部分放電 (検出感度 1 pC) は検知されなかった。以上の結果より、平等電界下及び準平等電界下では、破壊が生ずる前に前駆電流も部分放電パルスも検出されなかった。しかし後に述べるように電圧-時間特性が存在していることは、何らかの劣化要因が存在していることを示している。短時間破壊を決定する因子が、長時間破壊の場合にどのような影響を与えるかについては明らかではないが、試料作成が実際の工程で行われたこと、試料自体が大形であることから考えて、同じ因子が両者の破壊機構に関係していると考えられる。

6. 破壊電圧に及ぼす電極面積効果

図 1. (a), (b), (c), (d) の電極を埋め込んだエポキシ試料を用いて、破壊電圧に及ぼす電極面積の効果を求めた。図 7. にはその実験結果を示しているが、面積が増すにつれて破壊電圧が低くなっている。ただし、棒-平板電極、半球-半球電極の場合は、最大電界の 90% の領域を破壊に有効な面積と考えた。各面積値での最低破壊電界値を結んで面積特性を求めたのが図 7. 中の実線である。

SF_6 ガスの場合は、電極上の突起が弱点因子となって面積効果が生じているが⁽⁶⁾、エポキシ絶縁体の場合は先に述べたように電極上の突起は弱点として作用しないことが示されている。しかし、図 7. のように面積効果は存在しており、弱点因子としては 3 章で示したエポキシ樹脂と充填材の界面又は電極と樹脂の界面が推察される。

実規模の注型品の電極面積を 10^5 mm^2 とすると、短時間的には約 50 kV/mm の耐電界強度が予想され、 $V-t$ 特性を考慮に入れても十分高い耐電界強度が得られるものと考えられる。

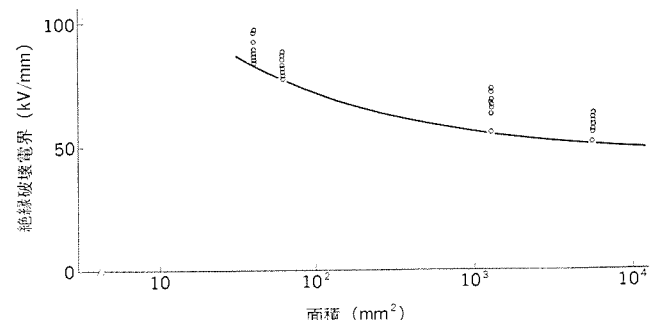


図 7. 破壊電圧値の電極面積依存性

7. 常温時及び高温時の $V-t$ 特性

エポキシ絶縁物の電圧印加時の長時間の耐電圧特性を知るために、先に実験を行った試料を用いて、常温 (25°C) 及び高温 (105°C) での長期課電試験を行った。実験に使用したエポキシ試料は、短時間破壊試験で使ったアルミナ充填試料及びシリカ充填試料を用いた。電極形状は図 1. (a) に示したもので、試料には所定の電圧を印加して破壊までの時間を求めた。

印加電界強度と寿命時間との関係 ($V-t$ 特性) は、図 8. に示すように両対数表示すると直線関係になり⁽⁷⁾、いわゆる逆 n 乗則が成り立っていることがわかる。すなわち、逆 n 乗則は式 (1) のように表される。

$$E = A \cdot t^{-1/n} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 A : 1 分間耐圧時の破壊電界強度 (kV/mm)

t : 課電時間 (分)

n : 劣化の電圧依存性を示す定数

式 (1) を図 8. 中の直線に適用すると n の値は、図 8. 中に示すような値となり、ポイドを含む試料に比べて⁽⁸⁾その傾きはフラットであることがわかる。このように $V-t$ 特性が存在することは、電圧印加時に何らかの劣化要因が存在していることを示している。

また、同様な試料をシリコン油中に設置して高温 (105°C) における課電寿命を求めると、図 9. に示すように充填材の種類による差はあらわれてこず、ほぼ 1 本の直線で表現される結果となった。その直線の傾き n を求めると $n=15.4$ となり、常温における値よりや

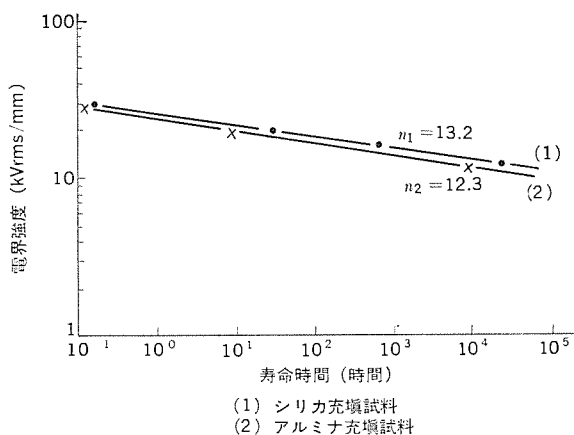


図 8. 室温 (25°C) での $V-t$ 特性

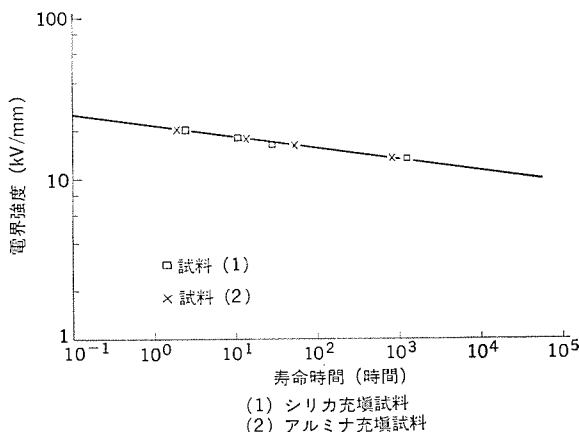


図 9. 高温 (105°C) での $V-t$ 特性

や大きくなった。このように常温の場合と比べて n の値が大きくなった、すなわち、よりフラットな特性が得られた理由としては次のように考えることができる。短時間・高電界領域では高温での試料の破壊電界は常温に比べて低い、しかし長時間・低電界領域では高温での試料の破壊電界は常温のときと比較して差がないという結果から、 n の値としては大きくなっていく。しかし、全般的には高温時の場合のほうが常温時の場合より破壊電界は低くなるという結果がでている。これには、

(1) 高温時にはエポキシと充填材あるいは電極との界面状態が変化し、放電がより低い電界で生じやすくなり、常温時よりも低い電界強度で破壊する。

(2) 電気的な劣化と熱による劣化という複合劣化により、劣化作用がはやめられて熱劣化が存在しないときに比べてより低い電界強度で破壊する。

という 2 つの物理的理由が考えられる。

8. エポキシ注型各種部品の長期課電試験

実験室系の試料で得られた実験結果を更に実機のスケールで確かめるために、実際に GIS 等で使用されているエポキシ注型各種部品の長期課電試験が実施されている。各種部品の形状、試験状況又は使用状況の 1 例を図 10.~図 13. に示し、それらの品名、課電条件、課電時間、それに換算課電時間を表 1. に示している。電源の周波数は 60 Hz で、実験試料はすべて破壊しておらず課電は現在も継続中である。表 1. に示したようにこれらの注型部品に印加している電圧は、それらの定格電圧より高くこの長期課電試験はいわゆる電圧加速試験になっている。

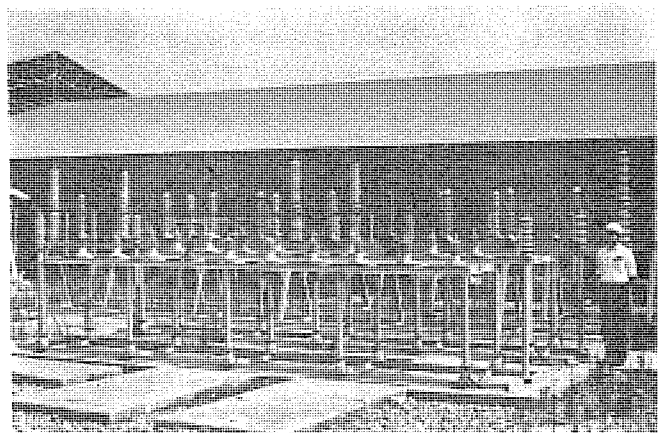


図 10. 20 号 ブラッシング及び 70 号支持がいし課電暴露試験状況

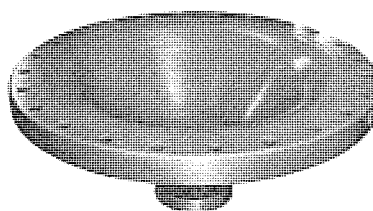


図 11. 550 kV GIS 用スペーサ

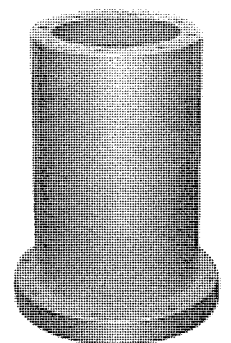


図 12. GIS 用支持筒

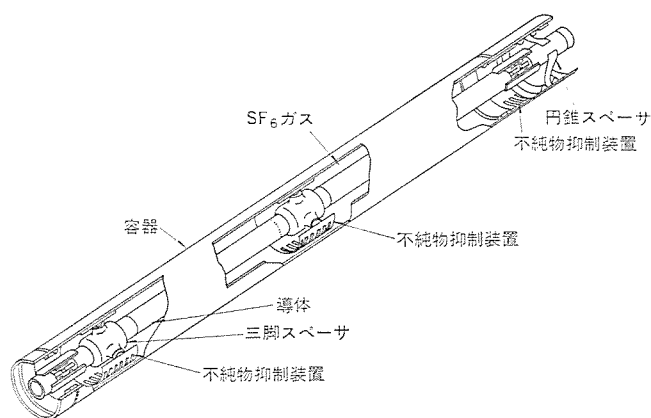


図 13. 三脚スペーサ 使用状況

表 1. 長期課電実績の 1 例

昭和 55 年 3 月 1 日現在 (現在も課電を継続中である)

品 名	周 囲 条 件	印 加 電 圧 (kVrms)	課 電 時 間 (h)	換 算 課 電 時 (年)
ブッシング (20 号)	空気中, 常温	18.0 ($24/\sqrt{3} \times 1.3$)	38,000	101
がいし (70 号)	空気中, 常温	63.0 ($84/\sqrt{3} \times 1.3$)	37,000	98
円錐スペーサ (550kV) A	SF ₆ ガス中, 常温	420	61,000	200
円錐スペーサ (550kV) B	SF ₆ ガス中, 常温	420	23,000	75
支 持 筒 (550 kV)	SF ₆ ガス中, 常温	420	61,000	200
3 脚スペーサ (550 kV)	SF ₆ ガス中, 常温	413 ($550/\sqrt{3} \times 1.3$)	7,200	19
3 脚スペーサ (300 kV)	SF ₆ ガス中, 常温	275	7,200	211

実験室規模の試料で得られた試験結果から、 $V-t$ 特性の直線の傾きが最も大きく寿命が最も短くなる $n=12$ という値を用いて、現在も課電を継続中であるが昭和 55 年 3 月 1 日までの電圧印加時間を定格電圧における課電時間を換算すると、すべて長期的な使用に耐える寿命特性を有していることが明らかにされてきている。

このように GIS に使用されているスペーサやブッシングなどは長時間課電に耐え、その長期的な電氣的絶縁及び機械的支持機能を果たす能力を十分有していると考えられる。

9. 実験の検討及び考察

一般に、実用的な規模の固体絶縁物の劣化・破壊過程には次のような 2 種類のものが考えられている。

(A) 試料の電極間の微小な空けき(隙)又は微小破壊部分において、部分放電又は電子の衝撃作用により材料が劣化し、材料が劣化した部分の耐電圧が下がり、これが弱点となって全路破壊に至る。

(B) 電極間の空隙を起点として、あるいは空隙がなくても高電界部分で微小破壊が起こり、その破壊部分を起点としてフィラメント状の破壊路が徐々に浸食・進展してゆき(ツリー破壊)、最終的に全路破壊に至る。

上記した(A)、(B)を図で示すとその破壊パターンは図 14. のようになると考えられる。パターン A では、高電界下で非常にわずかな劣化が進んがゆき、その劣化度合を非破壊試験的に測定することは

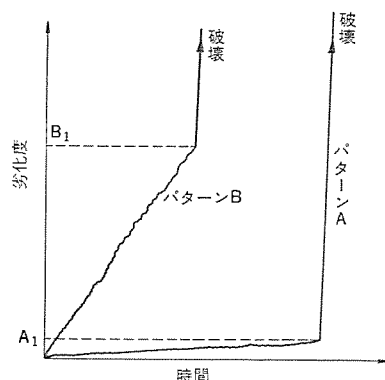


図 14: 劣化の 2 つのパターン

容易ではない。しかし劣化は試料間で起こっており、 A_1 というしきい値で全路破壊が生ずる。一方、パターン B では電圧印加直後から破壊がツリー状に進展してゆき⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾、その進展速度は比較的大きくその破壊のしきい値も B_1 と大きい。したがって、パターン B の場合は試料が破壊する前にその劣化度合を検知することも可能である。

平等電界下及び準平等電界下ではパターン A の破壊過程を経るのが大部分を占める。一方、不平等電界下ではパターン B がほとんどで、ツリー状破壊とよばれている。

このような劣化・破壊過程が $V-t$ 特性を与える主因であるが、先に短時間破壊の項で述べたように、破壊前の前駆電流や部分放電パルスを選定したがいずれも検知されなかったこと、またその破壊こゝん(痕)がツリー状でなく直線的であることから、その破壊過程はパターン A であると考えられる。しかし、このような過程は印加電圧が運転電圧よりもはるかに高い場合に起こる現象で、電圧が低いと劣化現象は非常に遅くなるか又はほとんど起こらなくなる。

10. む す び

エポキシ樹脂は、このように短時間及び長時間の両特性とも、耐電界的には極めて優秀な特性を示した。また、実際に GIS に使用されている各注型部品も 1968 年の GIS 実用化以来、順調にその責務を果たしてきている。

将来的には、GIS の UHV 化や一層の縮小化によって、エポキシ絶縁物の設計電界の上昇が予想されるが、スペーサの形状の検討や界面現象の研究によって、十分その問題は乗り越えることができるであろう。

参 考 文 献

- (1) 宮本, 高見ほか: 三菱電機技報, 48, No. 6, p. 718 (昭 49)
- (2) A. V. Hippel: Z. Phys., 75, p. 145 (1932)
- (3) D. Kind: ETZ-A Bd. 91 H. 3 (1970)
- (4) 仲西, 渋谷: 昭和 53 年電気学会全国大会
- (5) Von L. Schiweck: ETZ-A Bd. 90 H. 25 (1969)
- (6) T. Nitta et al.: IEEE Trans, Paper T73, 449-6 (1973)
- (7) 潮見ほか: 昭和 54 年電気学会関西支部大会 G-5-9 (昭 54)
- (8) T. W. Dakin et al.: Proceedings IEEE International Conference on Electrical Insulation, Montreal, June (1976)
- (9) 仲西, 平林ほか: 電気学会論文誌 96-A, 71 (昭 51-2)
- (10) 仲西, 平林ほか: 電気学会論文誌 97-A, 472 (昭 52-9)

高電圧用注型絶縁材料の耐熱性の改善

土橋 勝*・板橋 好文*・松田 節之*・小鯛正二郎*

1. ま え が き

GIS などの高電圧電力機器の分野において、注型絶縁物に対する技術的要求の1つは、機器の高電圧化に伴う大形化への対処であるが、一方では電力輸送の大電流化の傾向に対して機器の縮小化を推進し、経済性を高めるために注型材料の耐熱性を向上させる必要がある。また、交通関連機器の分野においても、車両積載変圧器⁽¹⁾を始め、種々の機器を小形軽量化するために電気特性に優れた注型品を採用していく傾向にあり、この場合、注型材料に対して更に耐熱性の向上の要求が強い。

このため、当社では、大形注型品を製造するのに適するもので、かつ製品の長期信頼性を向上させることを重視しながら耐熱性を高めるようなエポキシ注型材料を検討してきたが、高電圧機器に十分に適用でき、実用性の高い材料を開発することができた。なお、これらの注型材料は既に実機へ適用され、好結果を得るとともに、高電圧機器の小形化に貢献している。ここでは、これらの注型材料の熱的特性及び大形注型品の製造に関連した諸特性について述べる。

2. エポキシ注型材料の熱的特性

2.1 耐熱寿命特性

エポキシ樹脂には、耐熱性を要求される車両用電動機などの回転機分野で155°C級の絶縁材料として豊富な実績があり、また充てん(填)材を含む注型材料としても、IEC-216 などによる耐熱寿命試験結果でも約170°C程度の値が得られ、熱分解特性上、F種絶縁としての性能をもっている⁽¹⁾。注型材料の大気中における熱劣化特性は、図1.⁽²⁾のように、その重量減少率に対する曲げ強度あるいは絶縁破壊電圧(BDV)の特性低下率が対応した挙動を示すが、BDVには劣化初期段階で特性低下を示さない領域があるので、機械的性質であ

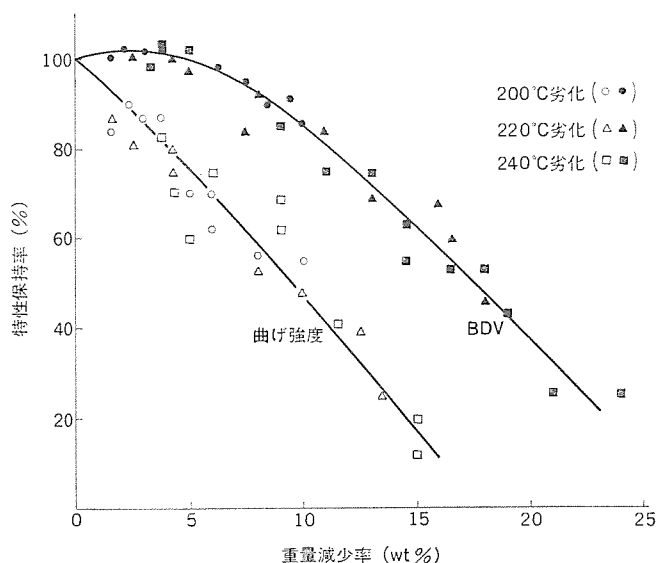


図 1. 重量減少と特性保持との関係

る曲げ強度より低下が遅れる傾向にある。また、機械強度に優れたガラス繊維強化エポキシと、粒子充填材料であるエポキシ注型材料との耐熱性の比較を、強化材の形態に着目して行った結果を図2.に示した。この場合強化材として石英粉末とガラス布とを用いたが、複合材料中の分解成分としての酸無水物硬化エポキシの減量挙動からみれば、石英充填系である注型材料のほうが有利な傾向を示している。200°C程度の温度においては、石英とガラス布とで樹脂成分の分解について材質上の差があるとは思われないから、この差は、熱劣化に伴うマトリクス成分の収縮挙動に対する強化材の追従性の差に起因するものであり、強化材の形態も熱劣化特性上無視できないと思われる。

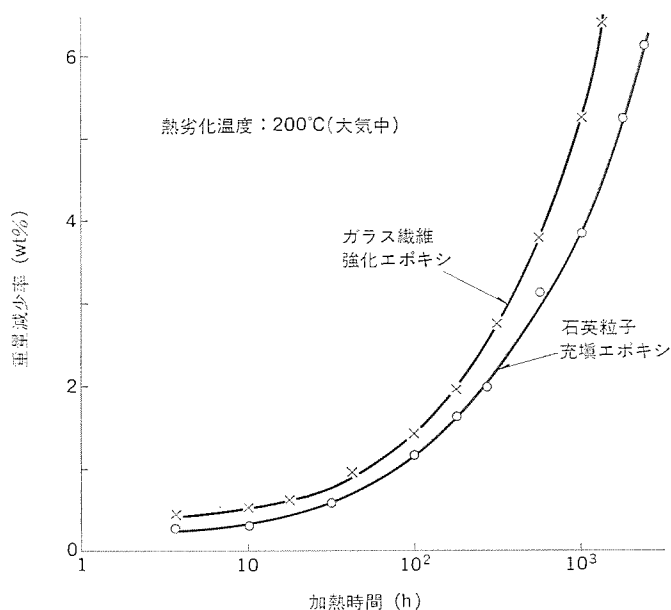


図 2. 熱重量減少に与える強化材の影響

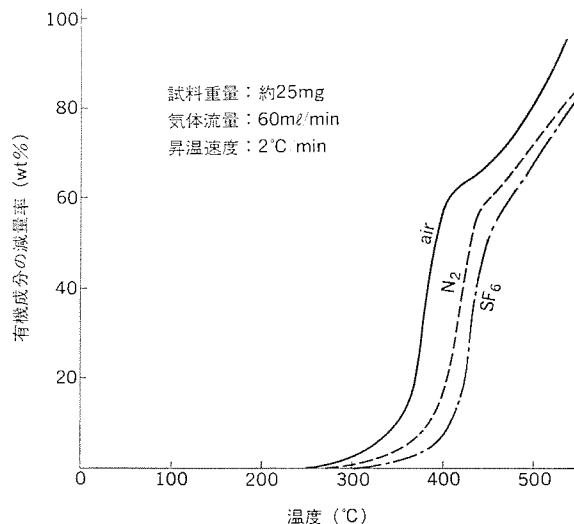


図 3. GIS 用注型材料の熱分解挙動

これらの諸事項を参考にして材料の選択が行われた新注型材料は、IEC-216 に準じた熱劣化試験でF 種絶縁であることが確認されている。

一方、注型材料が SF₆ ガス絶縁機器中で使用される場合、大気中における熱酸化劣化とは異なる挙動が予想される。このため、GIS 用注型材料を用い、熱重量分析による熱分解特性を調べた (図 3)。注型材料は、大気中では約 250°C から分解を開始し、約 350°C で最大の分解速度を示すが、SF₆ 中では分解開始温度が約 310°C で、最大分解速度を示す温度が約 430°C であった。SF₆ 中における分解挙動は、N₂ 中における挙動より優れており、これらの結果は短時間特性ではあるが、注型材料の熱劣化特性上、SF₆ はかなり有利な環境といえる。

また、各種金属と共存下における SF₆ 自体の熱分解温度は、けい素鋼などの特殊な場合を除けば、約 200°C 以上と推測されているが⁽³⁾、この値と比べても注型材料の SF₆ 中の熱分解特性値は、十分に対応できるといえる。なお、SF₆ ガスしゃ断器などにおけるように、放電環境下においては、注型材料の耐アークド SF₆ 性が重要であるが、既に多くの報告⁽⁴⁾があるので、この論文では割愛した。ただし、新材料 D には、同用途の現用材料 B と比較し、同等以上に優れた耐アークド SF₆ 性のあることを確認している。

2.2 高温時の耐絶縁油性

注型材料は、ブッシングや端子板などとして油入変圧器にも使用され、機器の小形化に貢献し、その実績も着実に増加しているが、当社では注型材料を適用するにあたり、絶縁油との相互の影響を高温試験によって調べ、適用可能な注型材料の材質を選定している。表 1. は、注型材料を JIS 2 号鉱油 (110°C) あるいはシリコン油 (140°C) 中に 200 h 浸し (漬) しその影響を調べた結果である。シリコン油中における重量増加は鉱油と比べて若干多いが、液媒の浸入による表面層の変化を熱変形温度に相当する熱機械分析上の軟化温度 (T_g) で調べ、また強度変化を曲げ強度で比較したが、これらの油中では、いずれの注型材料についても劣化は認められない。一方、現用注型材料 A は、2 号鉱油中で 15 年以上、シリコン油中で約 5 年の実績があり、また既に適用は中止されたが、上記の絶縁油より溶解性パラメータがエポキシに近く⁽¹⁾で溶解力の強い不燃性油 (KC 1000) 中で約 10 年間使用された注型品の T_g が、初期値 (105°C) と比べて全く変化のないことを確認している。これらのことから、材料 A 以外の注型材料の長期耐油性も、実用上に十分であると推定される。また、逆に絶縁油に対する汚損の点からも問題のないことを確認した。

2.3 クリープ特性

注型材料は、内部組織が緻密であるので、他の固体絶縁材料と比べて、優れた絶縁特性を持っているが、一般に繊維強化材料と比べて機械的特性が悪く、またその温度依存性も大きい。このような

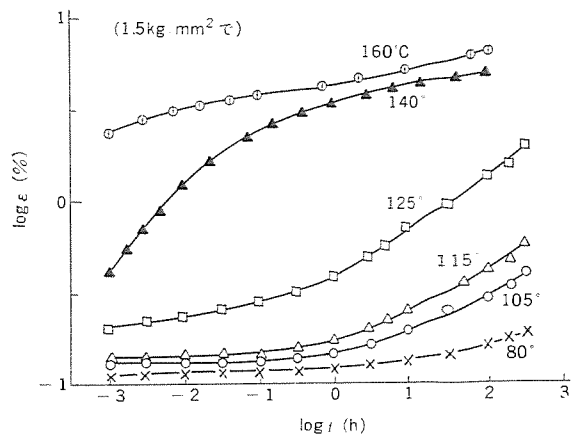


図 4. 圧縮ひずみ-時間特性

機械的特性中のクリープ特性は、機器を構成する上で最も重要な特性の 1 つで、高温時のクリープ挙動が機器の最高許容温度を制約する場合が多い。また、クリープ特性は、注型材料の組成と密接に関連するので、材料開発にあたって種々の観点から検討を加えた。

2.3.1 温度依存性

図 4. は、1.5 kg/mm² の定応力下における注型材料の圧縮ひずみの経時変化を調べた例である。試料は、熱変形温度 (HDT) が 140°C の GIS 用新材料 D であるが、125°C までは高弾性率のガラス状挙動を示し、140°C、160°C ではそれぞれガラス転移域あるいはゴム状の変形挙動を示す。充填材含有率の高い注型材料についても、一般の無定形高分子と同様に、時間-温度換算則が成り立つとすれば、種々の温度 T における比較的短時間の測定から得られるひずみ $\epsilon(t)$ 曲線を時間軸上で移動操作することにより、任意の温度における合成曲線が得られ、その温度における長期間の変形量の大略を推測できる。一方、ひずみ速度と温度 (T_0) との間に式 (1) が成り立つとし、また別の温度 (T) で同一ひずみ量になる時間を t とすれば、 T における合成曲線 $\epsilon(t)$ を得る際、時間軸上を移動させた量 a_T (移動係数) は、式 (2) で表示され⁽⁵⁾、 a_T は温度に依存した特性である。

$$1/t_0 = A \exp(-E/RT_0) \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 t_0 : 一定ひずみへの到達時間 (h), E : 活性化エネルギー (kcal/mol), R : 気体定数, A : ひん度因子

$$\log a_T = \log(t/t_0) = E(1/T - 1/T_0)/2.3 R \dots\dots\dots (2)$$

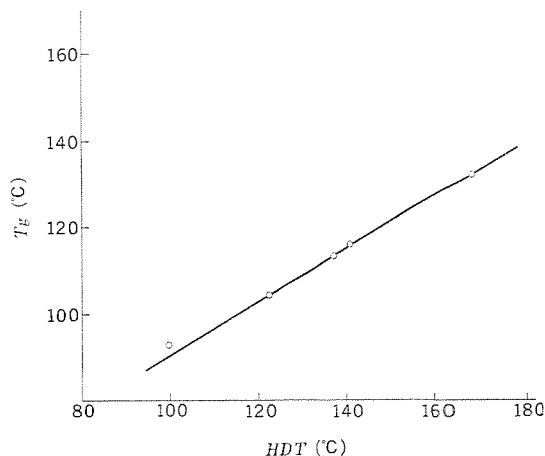


図 5. HDT と T_g との関係

表 1. 注型材料の耐油性試験結果

試料	初 期		2 号鉱油中熱劣化後			シリコン油(KF-96)中熱劣化後		
	T_g (°C)	曲げ強度 (kg/mm ²)	T_g (°C)	曲げ強度 (kg/mm ²)	重量増加 (%)	T_g (°C)	曲げ強度 (kg/mm ²)	重量増加 (%)
注型材料 A	113	13.5	112	13.6	0.12	114	13.1	0.15
B	109	14.5	108	14.3	0.07	107	14.8	0.12
C	142	14.1	141	14.5	0.05	142	14.5	0.14
D	170	12.2	170	12.2	0.04	173	12.6	0.14

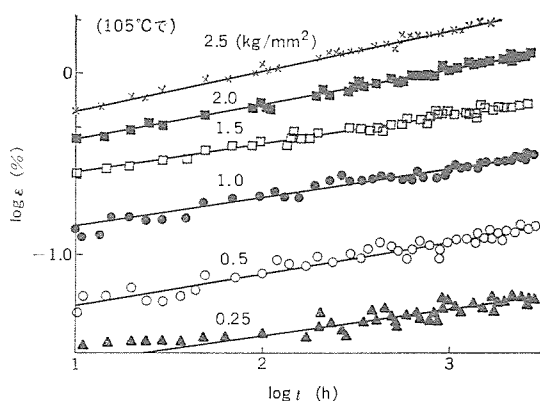


図 6. 引張りひずみ-時間特性

$\log a_T$ を $1/T$ についてプロットした曲線は、ほぼ2本の直線に近似でき⁽⁶⁾、直線の支点からガラス転移温度 (T_g) が求められる。 HDT が $100 \sim 170^\circ\text{C}$ にある、開発材料を含む各種注型材料の T_g を同様に求め、 HDT についてプロットした結果 (図 5.)、両者はほぼ直線関係にあり、回帰式として式 (3) が成り立つ。

$$T_g = 27 + 0.63 HDT \quad (100^\circ\text{C} \leq HDT \leq 170^\circ\text{C}) \dots\dots\dots (3)$$

また、 T_g 以上の温度における活性化エネルギーは $150 \sim 165 \text{ kcal/mol}$ であるのに対し、 T_g 以下では $35 \sim 45 \text{ kcal/mol}$ と約 $\frac{1}{4}$ であり、 T_g 以下における変形量の温度依存性は極めて小さくなることを意味するから、 T_g は、注型材料が構造材料として使われる場合の上限温度の1つの目安であろう。

2.3.2 応力依存性

注型材料は、応力に対して非直線性を示すので、当社では、常用上限温度近傍で $\varepsilon-t$ 特性を求めて長期特性を推測する方法で材料評価を行っている。図 6. は、 HDT 140°C の試料を用い、銀接点の最高許容温度の 105°C における引張りクリープの応力依存性を $0.25 \sim 2.5 \text{ kg/mm}^2$ の応力範囲で測定した結果を示す⁽⁶⁾。いずれの応力でも、 $3,000 \text{ h}$ 以内では、定常クリープ域に達したり、クリープ破壊をすることはなく、長い遷移クリープを示すが、 100 h 以降では $\varepsilon(t)$ と t とが両対数表示で直線に近似でき、Findley 氏の一般式⁽⁷⁾を変形した式 (4) が成り立ち、応力に応じて係数 m , n が求まる⁽⁸⁾。

$$\varepsilon(t) = m t^n \quad (m, n \text{ は係数}) \dots\dots\dots (4)$$

n は大略 $0 \leq n \leq 1$ と考えられ⁽⁸⁾、 0 に近づくほど弾性的挙動を示し、 $\varepsilon(t)$ の時間依存性は小さくなる。一方、 m はほぼ式 (5) で表示され得るので、式 (4)、式 (5) から一定温度における長時間側の応力依存式として式 (6) が得られる。

$$m = m_0 \sinh(\sigma/\sigma_m) \quad (m_0, \sigma_m \text{ は係数}) \dots\dots\dots (5)$$

$$\varepsilon(t) = m_0 \sinh(\sigma/\sigma_m) t^n \dots\dots\dots (6)$$

試験結果と式 (6) とから、一定温度における長期的なクリープ挙動が予測でき、使用時の応力及び温度の上限が推定される。しかし、機器へ実際に適用する場合には、各種のモデル試験を実施するとともに、実機における長期試験を実施して機器の温度及び変形挙動を実測し、その性能が十分であることを確認している⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。

2.4 耐クラック性

注型材料のクリープ特性などの高温時の諸特性を向上させるためには、マトリクス自体の HDT を向上させる必要があるが、一般に HDT が上昇すると、材料の耐熱衝撃性や機械的衝撃強度が低下するなどして耐クラック性が低下する傾向にあり、この対策が重要である。

2.4.1 耐熱衝撃性

注型材料の HDT を低下させないで耐熱衝撃性を向上させる手段としては、低熱膨張率の充填材を選択することや、充填材の濃度を増して複合系としての熱膨張率を低減させること及び熱伝導率を向上させることを図るか、あるいは特殊な方法によって軟質成分を導入して硬化樹脂中に海島構造⁽¹¹⁾などの高次構造を生成させ、この成分の配向や柔軟性によってクラック伝搬エネルギーを吸収させるなどの種々の方法が取り得る。ところが、充填材の材質は、適用機器によっては制約があり、また充填材を高濃度化することは、注型材料の物性上、引張り弾性率が顕著に増大するものの、引張り強度の増加は少なく、また破壊ひずみの急激な減少を招く⁽¹²⁾。更に、この方法では、膨張係数を小さくできるが⁽¹³⁾、熱伝導率の大幅な向上は望めない⁽¹³⁾、また注型時の作業性を低下させるので濃度的に限界もある。このことは、実験室的な小形試料で耐クラック性が向上しても、大形注型品では、厚さの不均一性や形状、埋金の大きさなどから温度の不均一性が避けられず、局所的な応力の増加をもたらし、実験室の結果と逆傾向を示すこともある原因と思われる。図 7. は、無機充填材の濃度によって弾性率を変えた注型材料の耐熱衝撃性をプッシングモデルで試験した結果で、充填材濃度が増加すると、弾性率が上昇する一方、耐熱衝撃性を低下させる傾向を示す。

上述のことから、当社では、適用機器に必要な HDT を満足させ、かつ耐熱衝撃性を向上させるためには、マトリクス自体の特性向上が必要であると判断し、エポキシと酸無水物とで生ずるエステル結合以外に、特殊な手段によって注型材料中に柔軟性と耐薬品性に優れたエーテル結合を多量に導入した。また更に、GIS などに適用される大形注型品用材料 D には、エポキシとの相溶性に優れ、かつ化学結合によって一体化するもので、耐熱・耐薬品性に優れた特殊な高分子量添加剤を見い出して滴用した。以上の結果、今回開発した諸注型材料は、 HDT が 140°C 又は 170°C と高いにもかかわらず、これらを用いて製造した注型品は、液媒による過酷な熱衝撃試験や許容上限温度から -40°C までのヒートサイクル試験にも十分に耐えることが検証された。

2.4.2 機械的衝撃強度

各種注型材料のノッチ付シャルピー衝撃強度の温度依存性を図 8. に示した。この特性曲線は、マトリクス成分の転移挙動に関連してガラス転移温度域で極大を示し、また β 分散域である -40°C 付近で若干上昇する傾向のある材料もある。ガラス転移域におけるピーク温度は、

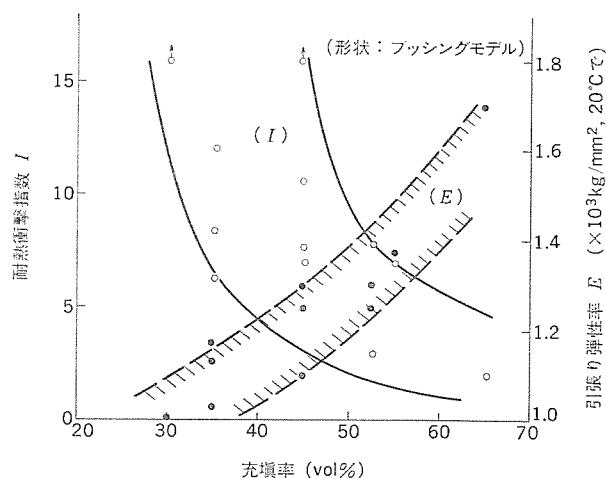


図 7. 充填率と弾性率及び耐熱衝撃性との関係

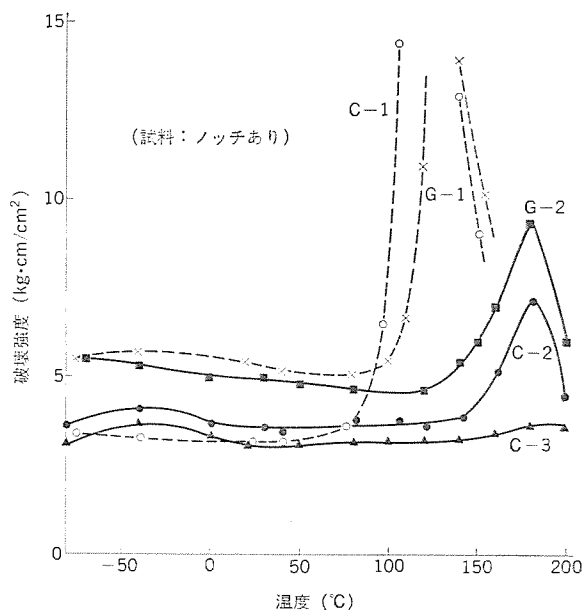


図 8. シャルピー 衝撃強度の温度依存性

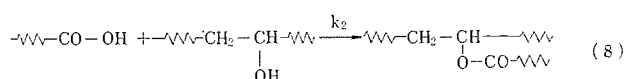
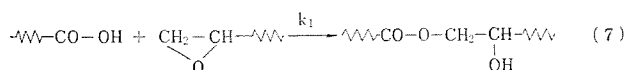
HDT の低いものの低温側にあり、またそのピーク高さも大きくなる。和田氏⁽¹⁴⁾によれば、衝撃強度は、動的粘弾性から得られる力学的 $\tan \delta$ の温度積分値と比例関係にあると報告されているが、図 8. の温度特性曲線は、動的粘弾性における損失弾性率の温度分散⁽¹²⁾に類似しているといえる。構造材料として実用される、HDT 以下の温度範囲では、注型材料の組成によって強度差があり、充填材成分への依存性も大きいようである。衝撃強度は、試料形状に依存した値であるが、これまでに汎用されて実績も豊富な注型材料 A と比較し、いずれの注型材料も十分な特性を持っていると判断できる。

3. エポキシ注型材料の成形性に影響する種々の要因

注型材料を実際の製品に適用する場合には、注型品の形状や埋込物との関係から生ずる内部応力の問題が重要で、当社では、早くから注型品を開発するに際し、電界解析と同様に応力解析法を適用して多くの成果を得ているが、この点については既に多数の報告⁽¹⁵⁾があるので割愛する。一方、大形注型品を製造するにあたり、注型材料の作業性の良否が、製品の電気的あるいは機械的特性を左右する場合があります、生産管理上に重要な特性の 1 つになっているので、ここでは、注型材料の液体から固体への硬化反応過程に影響を与える種々の因子について検討した結果を述べる。

3.1 酸無水物中の遊離酸濃度の影響

エポキシ用硬化剤として汎用される酸無水物は、水と反応して酸を生成するが、有機酸は酸無水物とは異なり、水分や硬化促進剤あるいはエポキシ樹脂中の OH 基が介在しないで以下のような機構で反応し、しかも反応速度 k_1 は、 k_2 の約 2 倍の値であることが知られて



いる⁽¹⁶⁾。市販の酸無水物硬化剤を用いた注型材料について、硬化剤中の遊離酸濃度を変化させて粘度の経時特性を調べた結果を図 9.

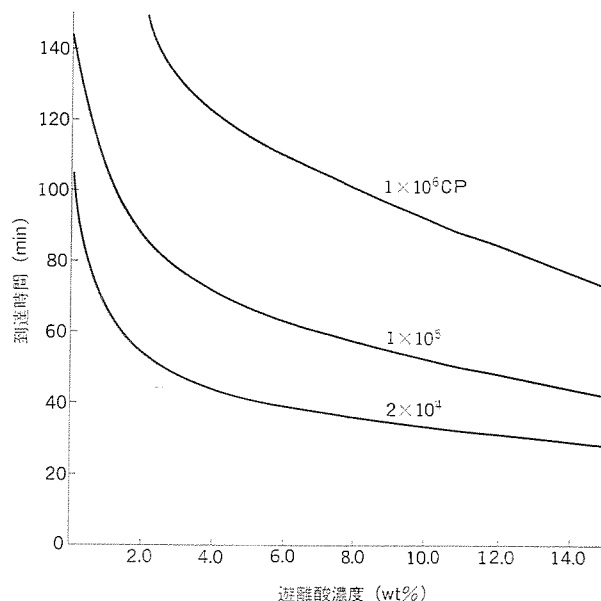


図 9. 酸無水物中の遊離酸濃度の反応性

に示したが、反応初期の低粘度域ほど遊離酸濃度の影響が顕著である。このことは、大形注型品の製造時における可使時間に関係するので重要な現象であり、当社では、酸無水物中の遊離酸濃度の季節変動を含む変動要因をは(把)握して対策をとるとともに、これらの濃度管理を実施して常に製品の安定化を図っている。

3.2 充填材中のきょう雑塩類の影響

3.2.1 反応に与える影響

充填材にきょう(夾)雑された微量の塩類が、エポキシ/酸無水物の硬化反応にどのように影響するかを知るため、市販の充填材から検出される各種塩類を 0.01 モル添加した場合のエポキシ/酸無水物系のゲル化特性を表 2.⁽¹⁷⁾に示した。塩基性塩である Na_2CO_3 は、顕著な促進効果を示すが、 CaCO_3 の影響はほとんど認められない。この差は、マトリクス中における溶解性の差などが原因と思われるが、つまびらかでない。また、上記系へ遊離酸が加わった場合には、塩基性物質が有機酸の電離を促し、エポキシとの反応を促進することが考えられる。一方、酸性塩である $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ では、顕著に反応が遅延し、また中性塩では、多少の差はあるものの、大きな影響は認められない。

3.2.2 分散系の粘度に与える影響

充填材の粒度分布や塩基性成分混入のバロメータとしての水分散系の pH 上に大差は認められず、かつその他の原料品質や作業条件上にも差異が認められない場合でも、注型材料の流動性に変動を来して可使時間が短くなることがある。図 10.⁽¹⁸⁾は、石英充填材料の例であるが、この場合、充填材の水分散系における電導度と可使時間あるいは初期粘度とが極めて良好な相関性を示した。一方、充填材から水中に溶出したイオンとして Ca^{++} , Na^+ , Cl^- , SO_4^{--} などが 90

表 2. ゲル化時間に与える無機塩の影響

無機塩の種類	ゲル化時間 (min)	無機塩の種類	ゲル化時間 (min)
Na_2CO_3	62.0	CaCO_3	231.5
NaCl	219.8	CaCl_2	229.6
Na_2SO_4	249.0	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	617.5
CaSO_4	233.5	無添加	232.1

(添加量 0.01 モル, 温度 130°C)

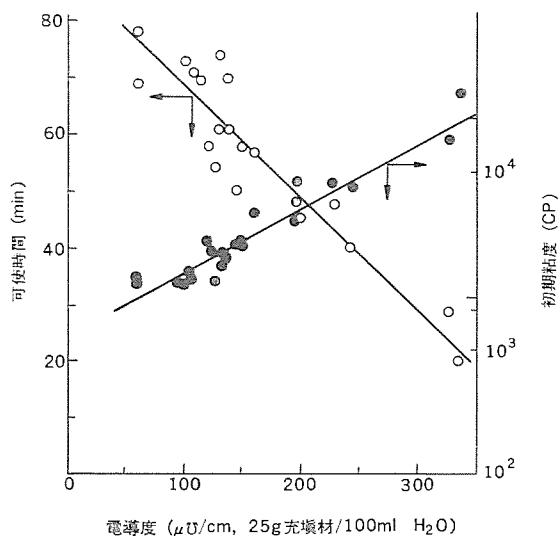


図 10. 電導度と可使時間及び初期粘度との関係

ppm 以下の濃度で認められ、これから想定される夾雑塩類として中性塩が考えられるが、前述したように、これらの塩類は、エポキシ/酸無水物間の反応に関与していない。以上のことから、可使時間の変動は初期粘度に基づくものであり、粒子の分散状態が電解質の共存によって影響され、粘度が高くなると推定される。したがって、エポキシ/酸無水物/充填材からなる注型材料においても、コロイド分散系や塗料などの場合と同様、電解質の混入に十分に注意する必要がある。

以上のように、当社では、従来、エポキシの反応に関与しないと思われていた充填材についても種々の観点から検討を加え、エポキシなどの反応性原料と同様に日常的な検査を徹底し、高電圧機器の信頼性の確保につとめている。

4. 開発材料の諸特性

以上のほかに、注型材料の開発にあたって広範な物性分野にわたる

表 3. 高電圧用注型絶縁材料の諸特性

特性項目	単位	注型材料A (現用)	注型材料B (現用)	注型材料C (開発)	注型材料D (開発)	注型材料E (開発)
吸水率	wt. %	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
熱伝導率	kcal/mh°C	0.6	0.9	0.7	1.0	1.4
熱膨張係数	10 ⁻⁶ mm/mm°C	36	32	32	32	26
熱変形温度	°C	105	110	140	140	170
引張り強さ	kg/mm ²	8.5	8.2	8.2	8.2	7.5
圧縮強さ	"	17	21	20	21	26
曲げ強さ	"					
(常温)	"	12.0	12.0	13.5	12.0	12.0
(100°C)	"	5.0	6.8	11.0	10.5	10.5
曲げ弾性率	"					
(常温)	"	1,000	1,100	1,100	1,100	1,150
(100°C)	"	580	580	1,000	1,000	1,050
衝撃強さ	kg·cm/cm ²	3.2	5.4	3.6	5.0	3.1
絶縁破壊電圧	kV/mm	30.0	27.2	29.0	27.2	26.0
誘電正接	"					
(60Hz) (常温)	%	1.6	0.5	0.5	0.5	0.5
(100°C)	"	4.0	1.0	0.6	0.7	1.2
体積抵抗率	Ω·cm	>3×10 ¹³	>3×10 ¹³	>5×10 ¹⁴	>10 ¹⁴	>3×10 ¹³
耐トラッキング性	CTI	260	>600	>600	>600	310

材料性能の検討が必要であることは言うまでもないが、殊にこれらの注型材料は高電圧下で使用されるので、注型品の実体に近い埋込電極を用いた短時間あるいは長期間の絶縁破壊試験が必要であるが、別論⁽¹⁰⁾を参照されたい。また、GIS 用注型材料については、前述したように、耐アーク^⑧ SF₆ 性が重要であり、当社では、実験室規模で再現性のよい試験方法⁽²⁰⁾を用いて材質の選定を行うとともに、実機でシャ断試験などを実施して検証を行うが、開発材料Dは、現用材料Bと比べて同等以上に優れていることが確認されている。

表 3. には、高電圧絶縁用に汎用されている現用注型材料 A, B を比較対象にし、開発諸材料の JIS に準拠した諸特性を示した。

5. む す び

高電圧機器における大容量化や小形・軽量化などの傾向に対処して機器の縮小化を図るため、注型材料の耐熱性を高める必要があり、高電圧用大形注型品の品質と、生産の安定性を重視して検討を進めてきた結果、耐久性と実用性に優れた各種耐熱レベルの注型材料を開発することができた。既にこれらの材料は実機に適用されて好結果を得ていることから、高電圧送変電分野などにおける今後の機器の開発を促進させるとともに、これまで熱的理由から適用され得なかった機器分野へも注型品を適用することが可能になると思われる。

参 考 文 献

- (1) 土橋、荒畑ほか：三菱電機技報，47，No. 10，p. 1,038 (昭 48)
- (2) 土橋、伊奈、小鯛：電気学会全国大会，214 (昭 53)
- (3) 広岡、土橋ほか：三菱電機技報，44，No. 9，p. 1,175 (昭 45)
- (4) 例えば，T. Nitta, Y. Shibuya : IEEE Winter meeting F 77 -759-4 (1977)
- (5) 志賀、佐藤：第 230 回関西電気絶縁技術懇談会資料，230-5
- (6) 土橋、山崎、片岡、坂井：電気学会絶縁材料研究会資料，EI M-79-48 (昭 54)
- (7) W. N. Findley : Proc. ASTM, 58, p. 841 (1958)
- (8) P. Nutting : Proc. ASTM, 21, p. 1,162 (1921)
- (9) 松村、杉本、富永、桑原、松田：三菱電機技報，53，No. 8，p. 593 (昭 54)
- (10) 松村、富永、今滝：三菱電機技報，51，No. 6，p. 384 (昭 52)
- (11) 横野、長沢：電学誌，97，No. 12，p. 1,075 (昭 52)
- (12) 土橋、児玉：三菱電機技報，47，No. 10，p. 1,063 (昭 48)
- (13) H. Lee, K. Neville : Handbook of Epoxy Resins, p. 14-22 ~24, McGraw-Hill Book Co., New York (1967)
- (14) Y. Wada, T. Kasahara : J. of Appl. Polym. Sci., 11, p. 1,661 (1967)
- (15) 例えば，高橋、小鯛、大田、坂井：三菱電機技報，44，No. 9，p. 1,183 (昭 45)
- (16) 橋本編著：エポキシ樹脂，p. 64，日刊工業新聞社，東京 (昭 44)
- (17) 土橋、板橋、小鯛：第 25 回高分子学会年次大会，1 N 19 (昭 51)
- (18) 土橋、山崎ほか：第 27 回高分子学会年次大会，2 H 23 (昭 53)
- (19) 渋谷、仲西、潮見、坂井ほか：三菱電機技報，54，No. 3，p. 187 (昭 55)
- (20) S. Tominaga, H. Kuwahara, K. Hirooka : IEEE Winter meeting F-79-290-8 (1979)

変圧器への注型絶縁物の適用

村上靖武*, 太田照雄*, 今井満夫*, 安部 勉*, 原 啓治**

1. ま え が き

エポキシ 注型絶縁方式は、電気機器に使用され、その優れた特性のために幅広い機器分野で、コンパクト化・大容量化・高電圧化の要求に答え、当社においてこの10数年間に急速な発展を遂げてきた。

開閉機器関係では、固体絶縁及びガス絶縁による縮小形変電設備や配電機器に使用され、その実施例も多く報告されている⁽¹⁾。一方、変圧器では、従来、油・紙・積層品・セラミックス等が絶縁材料の中心をなしてきており、エポキシ注型品の適用例の報告はあまりないが、既に昭和38年から25kV車両用主変圧器の1次側ブッシングに適用を開始したのをはじめ、タップ切換器・端子板等の各種部品として変圧器の各部への適用が試みられている。

この報告では、これらの注型絶縁物の製造技術について基本的な考え方を述べるとともに、油絶縁変圧器に適用されてきたエポキシ注型絶縁物の実施例を紹介する。

2. 注型絶縁物製造技術

注型絶縁物の製造工程は、材料を加熱し、計量混合した後、金型の中に材料を流し込む注入工程と、金型に注入した樹脂を硬化させる工程とに分けられる。これらの工程を通して気ほう(泡)や空げき(隙)を残さず、かつクラックの心配のない製品が要求される。

高電圧用機器では、特に注型品内部に気泡や空隙を残さないことが不可欠の条件である。気泡・空隙の残る要因には、樹脂中に存在する空気や揮発成分、配合樹脂の粘度と可使時間の長さ、樹脂の局部発熱と収縮の不均一性、樹脂と埋込物との膨張係数の違いなどが挙げられる。一般に樹脂中の空気や水分、その他の揮発分は、樹脂あるいは樹脂と充てん(填)剤との混合系を加熱減圧下で予備処理することによって除かれる。予備処理された樹脂と充填剤との混合系に硬化剤を添加した配合樹脂は、硬化剤が蒸発しやすいので、硬化剤の蒸気圧を考慮して真空度と混合時間とが決められる。

液中の気泡の上昇速度は、ストークスの式(1)に粒体密度($\rho_p=0$)を代入した式で表される。

$$U=g(d_P-d_R)D^2/18\eta.....(1)$$

ここに U : 粒体の沈降速度, g : 重力加速度, d_P : 粒体の密度, d_R : 液体の密度, D : 粒体の直径, η : 液体の粘度

この式によって気泡を除くには、粘度をできるだけ低粘度に保ち、真空処理によって気泡の径を拡大して脱気速度を促進させればよいことがわかる。配合樹脂は、混合脱気されて金型内に注入される一連の作業の間、この脱気性と作業性から一定粘度以下に保たなければならない。一般に配合樹脂の粘度が 400 ポイズに達すると、実用上、取扱えなくなるが、実用上、作業し得る時間を可使時間という⁽²⁾。配合樹脂は、混合されると同時に反応を始め、反応速度は温度によって影響を受け〔式(2)〕、可使時間も変わってくる。

$$k = k_0 e^{-E_1/RT} \dots\dots\dots (2)$$

ここに k : 反応速度, k_0 : ひん度因子, E : 反応速度における

見掛けの活性化エネルギー, R : 気体定数, T : 絶対温度

配合樹脂の初期粘度は温度の上昇とともに低下する〔式(3)〕が、

$$\eta_0 = Be^{E_2/RT} \dots\dots\dots (3)$$

ここに η_0 : 与えられた温度における初期粘度, B : ひん度因子,

 E_2 : 初期粘度における見掛けの活性化エネルギー

時間がたつにつれて反応は進行し、粘度は増加してくる〔式(4)〕。

$$\eta = \eta_0 e^{kt} \dots\dots\dots (4)$$

ここに η : t 時間後の粘度, k : 反応速度, t : 配合樹脂混合後の経過時間

このように配合樹脂の粘度は、式(2)、式(3)、式(4)で特徴づけられた、温度と時間との関数で表され、温度と時間とに関する粘度曲線が作成できる⁽³⁾。この粘度曲線から一定粘度に達するまでの温度範囲を考慮した可使時間も表現し得る。

更に、粘度に関連して留意すべき事に、製造プロセス中の充填剤の沈降防止がある。充填剤が注型硬化中に沈降すると、不均質な硬化物になり、クラックの原因になる。粘度と充填剤の沈降とについて西崎ら⁽⁴⁾は、ストークスの式(1)の液体項に配合樹脂の粘度と密度とを適用し、式(4)の粘度変化を代入後、反応時間で積分した結果と実測沈降量とを比較し、約1,000ポイズで充填剤の沈降は実質上なくなり、粒子の沈降時間は、配合樹脂の粘度が1,000ポイズに達する時間でよいと報告している。

エポキシ樹脂と硬化剤とが反応するときの反応熱は、約 24 kcal/g エポキシ 当量であり⁽⁵⁾、この熱による温度上昇は、エポキシ 当量の大きな樹脂を用いて比熱の大きな充填剤を添加することにより、かなり減じ得るが、エポキシ 当量の大きな、例えば 500 g 当量の樹脂でも、温度上昇は熱絶縁状態で計算すると、144°C に達し、更にシリカを 200 phr 添加した系でも 58°C にもなる⁽⁶⁾。このような内部発熱が生ずると、その局部温度上昇によって注型品内に熱応力を残し、クラック、あるいは埋込物との界面に空隙を生ずる場合がある。この熱が急激に発生しないように硬化条件を決めなければならない。金型内の樹脂モデルを図 1. で表し、発熱量 q が一定で、左右の金型面だけから熱放散すると仮定すると、平衡温度分布は、式 (5) の解の式 (6) で表される⁽⁷⁾。

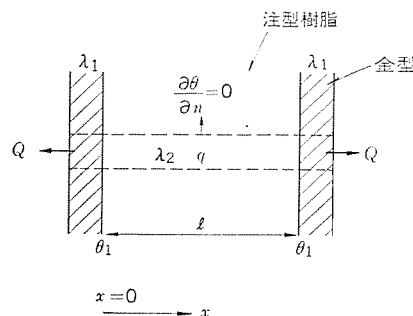
$$\lambda_2 \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + q = 0 \quad \dots\dots\dots (5)$$


図 1. 金型内における樹脂発熱モデル

$$\theta = -\frac{q}{2\lambda_2}x^2 + \frac{ql}{2\lambda_2}x + \theta_1 \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここに λ_2 : 配合樹脂の熱伝導率, θ : 金型から x 点の温度, q : 配合樹脂の発熱量, l : 樹脂層の厚み, θ_1 : 金型の温度
式(6)から, $x=l/2$ のところで温度は最大 ($\theta_{\max}$) になる [式(7)]。

$$\theta_{\max} = \frac{ql^2}{8\lambda_2} + \theta_1 \quad \dots\dots\dots (7)$$

すなわち, 金型内における発熱を抑えるには, 硬化温度を低くして発熱量を小さくし, 充填剤を添加して熱伝導率を大きくすることに併せて注型品の厚みをできるだけ小さくすることが必要である。

配合樹脂は, 硬化反応とともに体積が収縮する。硬化反応が液状の状態が進んでいる間は, 収縮による空隙や応力は発生しないが, 固化 (ゲル化) が始まる時点では, ゲル化部分への樹脂の補充が悪いと, 収縮による空隙が生ずる。しかし, 内部応力については, ゲル化後の収縮でも, その収縮が3次的に拘束されない限り, 無視し得る。注型品に応力が固定される最も重要な要因は, 硬化樹脂と埋込物との熱膨張係数の違いである。その発生応力は, 硬化樹脂のガラス転移温度 (T_g) 以下の温度について式(8)で表せる。

$$\sigma_T \cong E_G(T_G - T_1) \cdot (\alpha_G - \alpha_1) \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここに σ_T : 温度 T_1 における樹脂中の応力, T_G : 硬化樹脂のガラス転移温度, E_G : T_G 以下における硬化樹脂の弾性率, α_G : T_G 以下における硬化樹脂の線膨張率, α_1 : 埋込物の線膨張率

この応力を減ずる1方法は, 硬化樹脂の線膨張率を埋込物の線膨張率に近づけることである。樹脂に充填剤を添加した場合の線膨張率の変化は, 樹脂と充填剤間の応力相互作用を考慮して求められた Fahmy and Ragai の式 [(9式)] によって表される⁽⁸⁾。この式から求めた値は, T_g 以下の温度において実測値とよく一致している (図2.)。

$$\alpha = \alpha_m - \frac{3(\alpha_m - \alpha_f)(1 - \nu_m)\phi_f}{2(1 - 2\nu_f)(\phi_m)\frac{E_m}{E_f} + 2\phi_f(1 - 2\nu_m) + (1 + \nu_m)} \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここに α : 複合系の膨張係数, 添字 m は樹脂を表し, f は充填

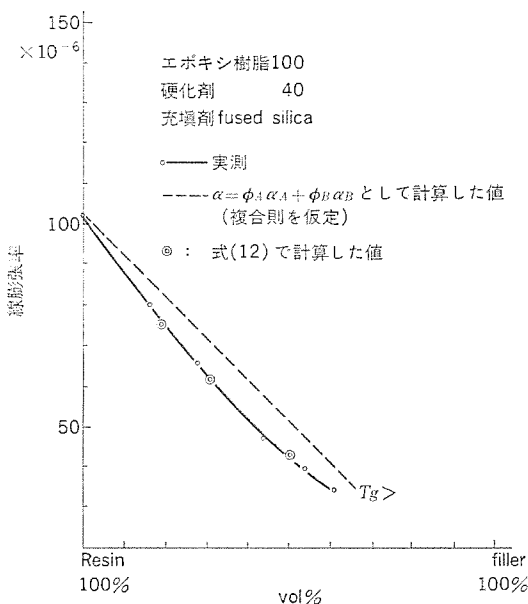


図2. 充填率と熱膨張係数

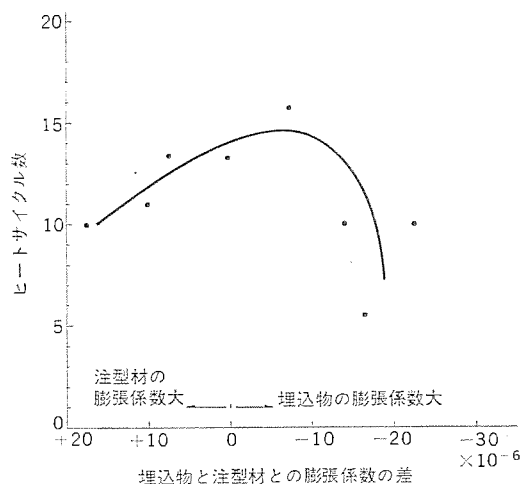


図3. 膨張率の差と耐クラック性との関係

剤を表す, ϕ : 体積分率, ν : ポアソン比, E : 弾性率

このように樹脂に充填剤を添加して膨張率を減じ, 埋込物と膨張率を近づけることは可能であるが, 一方, 充填剤の添加によって硬化樹脂の弾性率は増加し, 40~50 vol % の添加で, 無充填樹脂の2.5~3.5 倍の弾性率になる⁽⁹⁾。すなわち, 充填剤の添加によって膨張係数は小さくなるが, 逆に弾性率が大きくなり, 充填率は微妙に注型品のクラック性に影響を及ぼすことが予測される。1例に, 埋込物と樹脂との膨張率の差に対する耐クラック性の測定結果を (図3.) に示す。応力を減ずる第2の方法は, 弾性率の小さい注型材や, T_g の低い注型材を使用することであるが, 構造材としてクリープ変形しやすく, 強度も低くなる。そこで充填剤による膨張率の調整に併せて複雑な埋込物に対しては, 緩衝材を使用する。緩衝材には, (1) 膨張率が大きいこと, (2) 弾性率が小さいこと, (3) 一般に非接着性であること, などが要求される。シリコンゴム系の緩衝材の場合, 注型品の径に対して埋込物の径が小さければ, 緩衝層の厚みは 0.2 mm 程度で十分である⁽¹⁰⁾。

3. 注型材料

エポキシ注型品の用途が拡大・増大したのは, エポキシ樹脂自体の特性に併せ, エポキシ樹脂の配合技術の進歩に負うところが大きい。注型材料は, エポキシ樹脂・硬化剤・硬化促進剤・希釈剤・可とう (撓) 性賦与剤・充填剤を種々に組合せ, それぞれの機器に適合した配合が選択される。したがって, 機器の使用条件・環境条件を十分に考慮する必要がある。変圧器に使われる油は, 主絶縁機能のほかに, 冷却媒体としての機能も果たしている。この油と共存状態で使われる注型材料には, 耐熱性・耐油性の配慮が必要である。

3.1 耐熱性

エポキシ注型絶縁物の熱耐久性は, その製品が与えられた条件下でどれぐらいの期間, 要求される性能を満足に果たし続け得るかを表すもので, 熱耐久性は, 当然ながら電気的・機械的な機能上から規定される。橋かけ高分子材料の電気的性質や機械的性質は, T_g 近傍で変化が著しくなる。注型材料は, 粉体を充填基材としているので, 樹脂の熱的挙動の影響を受けやすく, ガラス繊維を基材にした積層材などと比べると温度特性が顕著に現れる。したがって, 電気機器に注型材料を適用する場合, T_g (実用的には熱変形温度) が使用限界温度を決める基準になっている。この T_g 値は, エポキシ樹脂の種

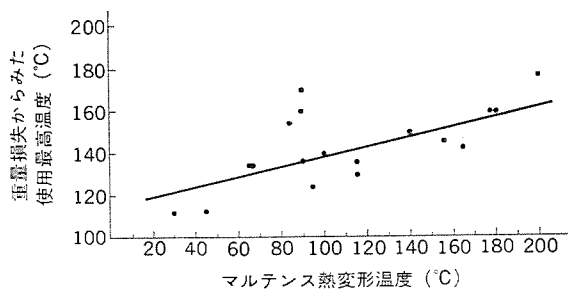


図 4. 熱変形温度と使用最高温度

類、硬化剤の種類及び結合構造で異なるが、橋かけ密度の調整により、ある程度選択できる⁽¹¹⁾。

絶縁材料の熱劣化も、一種の化学反応であり、化学反応速度論に従う。化学反応の速さは、温度とともに増大し、Arrhenius の式で表される〔式(2)〕。一定特性低下率までの加熱時間の対数と、絶対温度の逆数をプロットして得られた直線から使用温度における寿命が推定できる。このようにして得られた各種エポキシ配合の使用最高温度と、マルテンス熱変形温度との関係が、安西⁽¹²⁾から報告されている(図 4.)。配合によってばらつきはあるが、かなりの相関性が認められ、エポキシ配合の寿命を熱変形温度から予測する上で興味あるデータである。また各種硬化剤の耐熱劣化性を評価すると、酸無水物>芳香族アミン>脂肪族アミンの順になり、エポキシ樹脂では、シクロ系の樹脂と比べてエピビス系エポキシ樹脂が安定であり、シクロ系の樹脂では、エステル形が初期特性に優れているが、熱劣化ではエーテル形のほうが安定である⁽¹³⁾⁽¹²⁾。

3.2 耐油性

油を主絶縁として使用する変圧器では、その油による膨潤や、油の汚損について十分に検討する必要がある。高分子材料の液媒に対する膨潤性の度合は、高分子の極性と液媒の極性との類似性による。この極性の大きさを数値化したものを溶解性パラメータ(SP)といい、材料の液媒に対する溶解性あるいは膨潤性の指標を与えてくれる⁽¹⁴⁾。酸無水物硬化エポキシ樹脂を SP 値の異なる液媒でその膨潤度を測定すると、エポキシ樹脂の SP 値に近い液媒に対して大きな膨潤度を示す⁽¹²⁾。酸無水物硬化エポキシ樹脂は、9~11 の SP 値を示し、また、膨潤性は、樹脂の架橋密度にも左右される。変圧器に用いられる液媒の代表は鉱油である。その SP 値は 8.2 以下であり、酸無水物硬化のエポキシ樹脂であれば、鉱油には侵されないものと推定される。 T_g が 110°C の酸無水物硬化エポキシ樹脂を、110°C 及び 140°C の鉱油に浸し(漬)実験した結果を図 5 に示す。110°C では全く特性変化は無く、140°C で多少膨潤の傾向が認められる。液媒がシリコン油の場合、シリコン油の SP 値は 5.5 であり⁽¹⁴⁾、鉱油と比べて更に SP 値は低く、エポキシ樹脂の T_g 値が使用温度以上であ

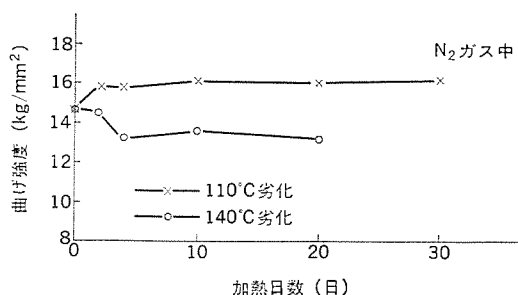


図 5. 鉱油中における加熱時間と曲げ強度の変化

れば、膨潤は起こり得ないことが分かる。

4. 変圧器への応用例

2 章及び 3 章でサンプルモデルについての一般的な製造技術・材料技術上の問題について論じたが、実機用の注型品では、製造条件・内部構造・形状・材料物性等が複雑に絡みあい、種々の問題が現れるので、実機としての使用条件を考慮した評価検証試験が最も重要になる。ここでは、油を主絶縁とする変圧器に注型品を適用した代表例について述べ、その注型品の評価の一端にも触れる。

4.1 タップ切換器

タップ切換器は、大別して切換開閉器とタップ選択器とから構成する。切換開閉器は、その機能上、(1)数 10 万回に及ぶ高速運動、(2)電流シャ断によるアークふんい気、(3)アークによる油の汚損、(4)高電界、といった非常に厳しい条件にさらされる。タップ切換器の信頼性を確保するためには、それを構成する部品は材質が適切に選択されるだけでなく、合理的な配置、結合されていなければならない。更に使用部品の個数を最小限度にとどめることも信頼性確保の大きな要因である。

タップ切換器の中で、特に主要な機能を果たす切換開閉器は、従来、積層材部品の組合せであったので、必然的に多数の部品が複雑に結合された構造にならざるを得なかった。これらの部品を一体注型品にして極度に簡略化を行った。図 6. は可動接点と、それを高速回転させ、かつ対地絶縁筒を構成する絶縁とを一体化した例である。この注型品は埋金が多く、常に軸回転による衝撃荷重を受けるので、単にクラック性だけでなく、埋金と注型部との接着・固定を考慮した処置が行われている。評価には単体での光弾性応力解析、破壊強度試験に併せ、アークふんい気、及びそのアークによる汚損油にさらす数 10 万回に及ぶ切換試験、高温油中(80°C)、低温油中(-30°C)における繰返し強度試験などの各種検証試験を実施し、満足な結果を得ている。同様な検証試験によって開発された無負荷タップ切換器への適用例を図 7. に示す。

4.2 新幹線電車搭載用主変圧器

日本国有鉄道では、東海道、山陽に引き続き、将来の新幹線に対処するため、962 形試作電車・925 形電気軌道総合試験車を製作し、今後予想される高負荷、耐寒耐雪、その他多岐にわたる諸条件に対して各種の検証を進めている。これらの電車には各電気部品をはじめとして高信頼性、高性能化が要求され現行新幹線電車の永年の実績を踏まえた最新の技術が導入されている。電車用主変圧器は現行

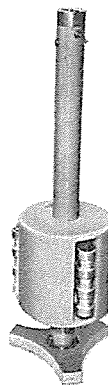


図 6. 切換開閉器可動接点

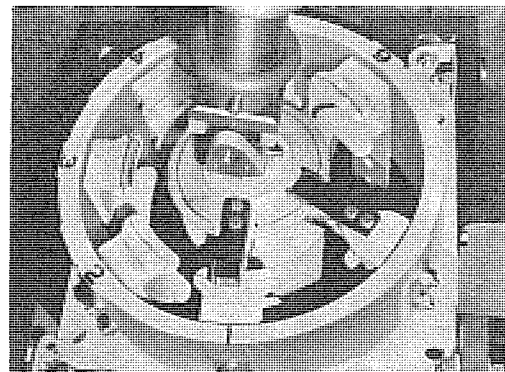


図 7. 無負荷タップ切換器コンタクト支え

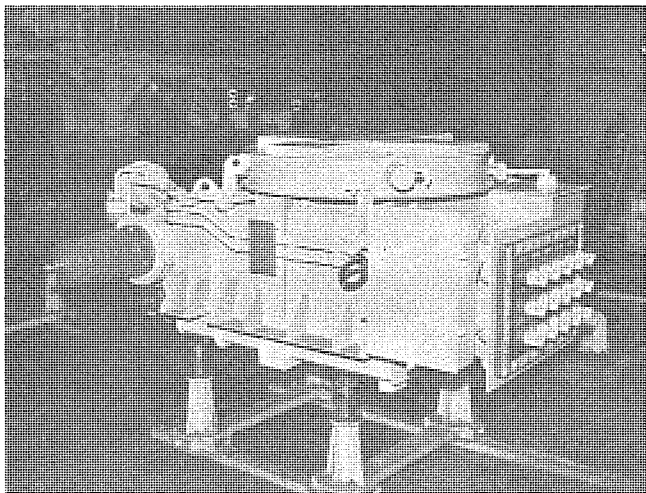


図 8. 925 形車両用変圧器と高・低圧 ブッシング

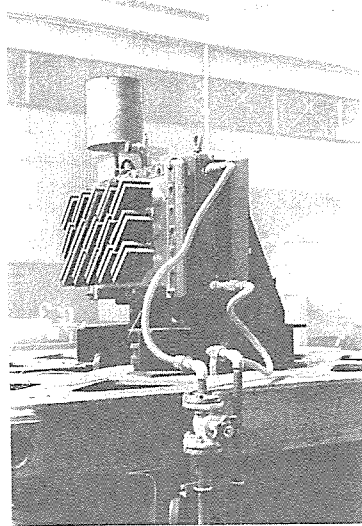


図 9. 加熱振動試験

新幹線に比し容量は 42% 増加され、温度条件が一段と厳しいものとなっているため、ポリアミド紙、シリコン油等の耐熱性に優れた材料を適用し、更に、当社では、日本国有鉄道の指導のもとに、現行新幹線での技術を生かして、これら 962 形、925 形電車用主変圧器にも、エポキシ樹脂注型による耐熱形の高圧ブッシングを、更に低圧側端子板の開発を行い、主変圧器の小形軽量化、信頼性の向上に答えている（図 8.）。これら注型品には高温における機械的強度と電気的特性、クリープ変形に伴う油密性、耐絶縁油性などが要求される。そこでエポキシ注型材料には橋かけ密度が高く、使用最高油温度より少なくとも $20 \sim 30^\circ\text{C}$ は高い T_g を有する配合の中から、機械的強度、耐クラック性、作業性の安定した材料を選択している。しかし一般に注型材料の T_g が高くなると、硬化後の熱応力が大きくなることは 2 章で触れた。したがってサンプル実験では一応の特性が得られ、製品として一通りの開発試験に合格しても、形状因子が絡み、厳しい使用環境条件を考慮した場合、実使用条件を踏まえた検証試験が重要になる。その 1 つとして夏期・冬期の温度変化と運行停止に伴う温度変化による繰返し熱応力の影響が考えられる。夏期の周囲温度を 40°C 、冬期の周囲温度を -35°C まで考慮すると、変圧器油の温度上昇が 85°C の場合、夏期で $40 \sim 125^\circ\text{C}$ 、冬期で $-35 \sim 50^\circ\text{C}$ の温度変化を受ける。車両運用を考慮すると、少なくとも $2 \sim 3 \times 10^4$ 回以上の温度サイクルを検証しておく必要がある。この温

度サイクルによる熱応力変化を材料疲労試験の S/N 曲線を基に、 85°C の温度差を 110°C にすることで約 100 回の温度サイクルで検証し得ると推定し、周囲温度 40°C の場合と周囲温度 -35°C の場合とについて、それぞれタンク内の油温度を変化させて 100 サイクルずつ試験を実施して、電氣的にも機械的にも全く異常のないことを検証している。温度サイクルを考慮した振動試験も実施し、その様子を図 9. に示す。

その他、常態での長期課電試験及び高温加熱下 (125°C) における長期課電試験を、それぞれ実施し、現在すでに 2 年を経過しているが、何ら異常は認められない。なお試験は引き続き続行中である。

4. 3 大電流端子板

整流器・電気炉などとの接続に使用される変圧器の大電流用口出しブッシング（以下、大電流端子板と称す）は、従来積層板に所定の形状の穴を必要端子数だけあけ、パッキンを介して導体を貫通させ、ボルトを締めつけて油密構造にしていた、しかし、この方法では部品点数が多く、面倒な組立てを要するので、形状的にも大形化すること、またパッキンの劣化による油漏れの可能性もあった。これらに対処するため、各部品を一体小形化し、耐油密性の信頼度向上を目的にして大電流端子板の注型化を行った（図 10.）。

これらの端子板には、耐熱性 ($100 \sim 110^\circ\text{C}$)・耐油性・耐油密性・耐クラック性が要求されるが、このような製品構造では、2 章で論じたように、耐クラック性については導体部の応力集中を除かなければならず、一方、油密性からは、注型材料の導体に対する締付応力によって接着力を上げることが必要である。すなわち、導体近傍の内部応力を局部集中させることなく、材料強度を考慮して一定基準以下に調整しなくてはならない。開発に当たり、材料、導体形状と

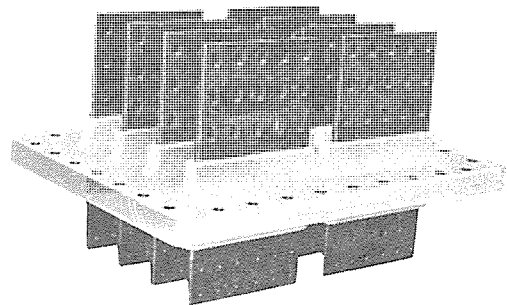


図 10. $32\text{ kA} \times 2$ 相 大電流端子板

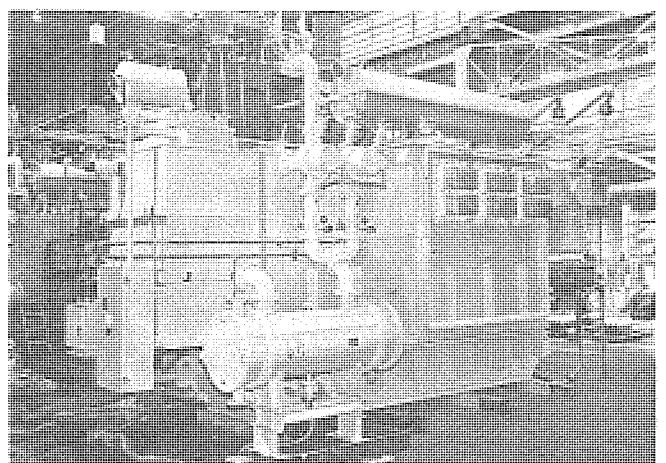
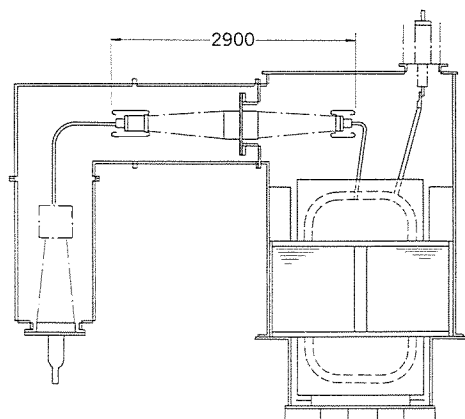
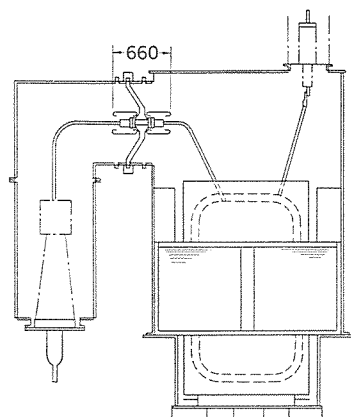


図 11. 変圧器と低圧端子板



(a) 従来方式



(b) エレファント 仕切板形方式

図 12. 従来方式と新しい仕切板との比較

処理、硬化条件などを、有限要素法や光弾性法で応力分布状態を調べ、モデル実験によって検証している。更に実機製品では取付け運転での最悪条件を仮定し、端子板をタンクに取付けて、導体を加熱することにより $105 \sim 110^\circ\text{C}$ に、タンク内の油を冷却することにより室温にもどす温度サイクルを、タンクに $2 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{G}$ の油圧を、導体に 2 ton の荷重を付加した状態で 50 サイクル実施した結果クラック・油密性に異常のないことを検証している。変圧器に組込まれた状態を図 11. に示す。

4.4 ケーブル直結形変圧器

変圧器本体タンクとケーブル接続室との間の仕切用 プッシングには、エレファントプッシングと称する油中-油中 プッシングが使用されている。このエレファントプッシングは、構造的には油中-気中の通常のプッシングの油中部を背中合わせにしたもので、高電圧になるに従って相当長大なものになり、図 12. (a) に示すように、エレファント室の占有スペースが、変圧器本体タンクのスペースに比肩できる程度にも達し、変圧器の所要スペースを縮小するのに大きな障害になっていた。このエレファントプッシングの目的は、油中リードの中間に油の仕切板を設け、変圧器本体側とケーブルヘッド室側とを分離することであり、この部分は本質的に電界分布が良く、特にコンデンサコーンにする必要はなかった。この見地から、図 12. (b) に示す、仕切板形の油中-油中貫通 プッシングを開発し、120 号以上の変圧器の小形化に寄与している。この仕切板は、エポキシ樹脂注型品で(図 13.)、通常の電氣的試験はもちろん、長期使用条件に対して特に熱的・機械的試験を重視して十分に検証している。エレファント仕切板の左右の圧力差は、通常、 0.3 kg/cm^2 以下であるが、圧力差の影響による油の漏れを 2

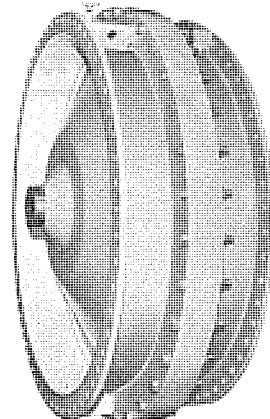


図 13. エレファント 仕切板

$\text{kg/cm}^2 \cdot \text{G}$ で検証し、更に運転中に変圧器本体側とエレファント室側とで温度の異なる油に接する場合を想定し、両面に接する油に温度差を設けて圧力試験、及び各部の応力側定を実施し、温度差 42°C 、圧力差 2 kg/cm^2 で最大応力が 1.1 kg/mm^2 であり、材料の疲労限度より十分に低いことを確認している。製品の耐圧力は、 10 kg/cm^2 まで試験された各部のひずみ(歪)変化から判断すると約 20 kg/cm^2 の破壊圧力と推定される。

5. む す び

エポキシ注型技術と、注型品の油絶縁変圧器への適用例について述べた。油絶縁変圧器でも、機種によって使用条件が異なり、注型品の適用を拡大するに従ってその使用環境条件が複雑なものになっている。これらの環境条件をどのように製品に反映させて評価を行うかが、今後、注型品の適用範囲を広げる上で大きな課題と考えられる。基礎技術力にあわせて評価技術を製品開発の両輪とし、更に努力する所存である。

終わりに、ご助言・ご協力を賜った社外の関係各位に深く感謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- (1) 例えば、三菱電機技報, 44, No. 9, p. 1183 (昭 45)
- (2) 橋本ほか: エポキシ樹脂, 日刊工業新聞社
- (3) Vladinir Liska: Die Angewandte Makromolekulare chemie 28, 95~110 (1973)
- (4) 西崎ほか: 21 回熱硬化性樹脂討論会 (昭 46)
- (5) H. Lee, K. Neville: Hand book of Epoxy Resins, Mcgraw Hill Book Co. (1967)
- (6) G. BUCHI and R. FIYNN: 29th Annual Technical Conference, 1974 Reinforced Plastics/Composites Institute, The Society of the Plastics Industry Inc., Section 11-F
- (7) ギート著, 久我, 横堀訳: 基礎伝熱工学, 丸善
- (8) GILBERTW et al.: Journal of Materials Science 9, 307~314 (1974)
- (9) L. E. NIELSEN 著, 小野木訳: 高分子の力学的性質, 化学同人
- (10) Frank D. Swauson: Insulation, February p. 142 (1966)
- (11) 土橋ほか: 三菱電機技報, 47, No. 10, p. 1038 (昭 48)
- (12) 安西: プラスチックマテリアル, 17(2), p. 50 (昭 51)
- (13) 田村ほか: 東芝レビュー, 26, No. 9, p. 835 (昭 46)
- (14) 黄慶雲: 接着の化学と実際, 高分子化学刊行会

新しい電気絶縁用液状ゴムとその変流器への適用

森脇紀元*・羽仁 潔*・不可三 晃*・山崎一郎**・松田文雄**

1. ま え が き

ゴム材料は高度の弾力性が要求される製品、部品には不可欠で、その成形品は目的に応じてさまざまな形で使用され、多くの電気・電子機器、部品の機能を十分に発揮させるのに役立っている。

これらゴム製品、部品の多くには、いわゆる固形ゴムが使用されているが、混合・成形などの加工工程で種々の問題を内包している。このため、これらの諸工程の省エネルギー化、省力化をもたらす液状ゴムが脚光をあい、一部では固形ゴムにとって変わりつつある⁽¹⁾。

液状ゴムの中で高度の弾性、絶縁性などの特性を要求される電気絶縁用としてはポリウレタン及びシリコンゴムがおもに使用されている⁽²⁾⁽³⁾。しかし、前者は耐熱性、後者は機械的特性及び価格の点でそれぞれ問題が多く、そのため用途も限定されている。

一方、電気・電子機器の低価格化、コンパクト化、大容量化、更には信頼性の向上などは今まで以上に要求されてきており、そのためには使用材料の諸特性が優れ、しかも、価格とのバランスもよく取れていることが極めて重要になってきている。

これらのことから、当社では、ポリオレフィンポリオールと変性ポリイソシアネートとを基にした新しいタイプの電気絶縁用液状ゴム《メルキッド》を開発したが、ここでは、この液状ゴムの諸特性及び変流器への適用について述べる。

2. 液状ゴムの特徴

液状ゴムとは「室温で流動性を持つ重合体で、適当な化学処理によって3次元網目構造をとり、通常の加硫ゴムと全く同じ物理的特性を有する物質」⁽⁴⁾、更に加工面からは「ある種の加硫方法（鎖延長又は架橋、あるいは両者の併用）によって加硫でき、注入又はポンプ移送できる。（すなわち100℃までの温度で、500センチポイズ以下の粘度を有する）ゴム製品の先駆物質」⁽⁵⁾ととらえられている。

固形ゴムと比較して分子量が極めて低い液状ゴムを固体の弾性体に変えるには、鎖延長によって高分子量化し、更に橋かけを行い、3次元網目構造をとる必要がある。図1に固形ゴムと液状ゴムとの網目構造モデルを示す。

次に、一般に市販されている液状ゴムの種類、硬化（加硫）、配合及び成形方法、更に長所、留意点について述べる。

(1) 種類

主鎖、反応基、加硫方法を異にする種々の液状ゴムが市販されているが、ここでは固形ゴムで分類されているような方法にしたがって分類を行い、末端官能基を有する液状ゴムを表1に示した。その数は、固形ゴムの約20種類と比較するとまだ少なく、約10種にすぎない。これらの液状ゴムの反応点として働く官能基には水酸基、カルボキシル基、ビニル基及びエポキシ基などがあげられる。

(2) 硬化

固形ゴムと液状ゴムとの間で極めて重要な化学的な相違は硬化方法であり、ある種の特定の硬化機構を考へて、それに対応した官能基、

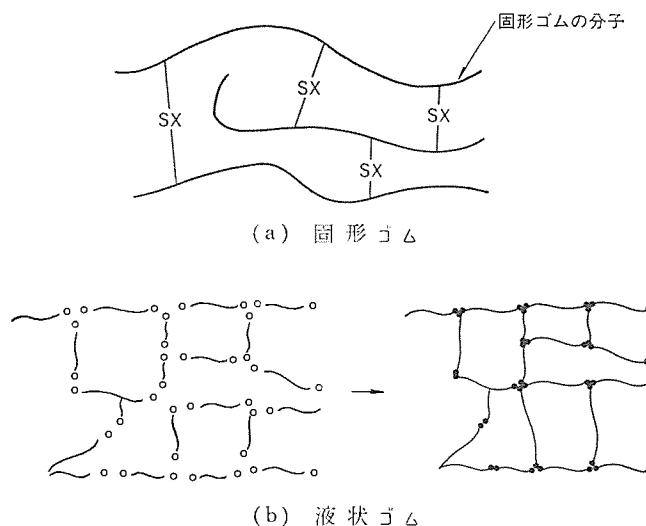


図1. 固形ゴムと液状ゴムとの網目構造

表1. 市販液状ゴム

種類	末端官能基	メーカー名
ウレタン	水酸基、イソシアネート基	日本ポリウレタン、 武田薬品など
シリコン	水酸基、ビニル基	信越シリコン、東レ シリコン
ポリサルファイド	チオール基	東レ
ブタジエン	水酸基、カルボキシル基、ビニル基	出光石油、宇部興産
スチレンブタジエン	〃	出光石油
ニトリル	〃	出光石油、宇部興産
クロロプレン	ゼンテート基、水酸基、エポキシ基	電気化学
エピクロルヒドリン	水酸基	宇部興産
飽和炭化水素系	水酸基	三菱化成

例えば、酸無水物、アミノ基あるいはエポキシ基などを有する化合物が硬化剤として用いられる。⁽⁶⁾

固形ゴムの加硫機構は化学量論的に進行することはほとんどないが、液状ゴムの場合には多くの硬化方式において化学当量に厳密な注意を必要とし、また、不注意に橋かけの成長を止めると、橋かけ密度は低下し、硬化物の諸特性の低下を招く恐れがある。

(3) 配合剤

液状ゴムの配合剤は従来の固形ゴムとほとんど変わらず、補強、経済性及び着色などのために補強剤、充てん（填）剤が使用される。また、用途によっては可塑剤、伸展油の添加も可能である。しかしながら、硬化系に悪影響を与えないように、これらの配合剤の水分含有量及び酸性度などに注意を払う必要がある。

(4) 成形

液状ゴムの成形にはエポキシ及び不飽和ポリエステル樹脂、更には固形

ゴムにおいて用いられているような、次にあげる種々の成形技術を利用できる。

- (a) 常圧下、真空中、遠心力などによる注型。
- (b) 圧縮及び押し出しなどによる成形。
- (5) 長所及び留意点

液状ゴムの長所をあげると次のようになる⁽²⁾。

- (a) 液状で取扱えるため、加工工程における機械化、自動化及び連続化が容易で、省力化及び作業性の改善が図れる。
- (b) 加工設備及びモールドに対する投下資本が少なくすむ。
- (c) 用役費の節減が図れる。
- (d) 溶媒及び水などの分散媒を用いずに液状で取扱える。
- (e) 主鎖延長及び架橋方法により幅広い物性及び硬化速度のコントロールが可能である。

また留意点としては次のようなことがあげられる。

- (a) 液状ゴムは対応する固形ゴムに比べて割高となる。
- (b) 液状ゴムは固形ゴムと比較して、現在のところ、その種類によっては強度あるいは伸びなどが若干劣るため用途に応じた十分な検討が必要となる。
- (c) 補強充填剤の混練及び成形加工法に独自のプロセスを確立する必要がある（既存のゴム加工設備が使いにくい）。
- (d) 加工工程は機械化、自動化又は連続化しなければ逆にコスト高となる恐れがある。

3. 《メルキッド》(《MELQUID》)

《メルキッド》は耐熱性、耐水性、電気的及び機械的特性などの特性が優れた液状ゴムを得るために開発したもので、ポリオレフィンポリオールと変性ポリイソシアネートとを基にした新しいタイプの液状ゴムである。次に、この液状ゴムの諸特性について述べる。

3.1 性 状

《メルキッド》はポリオレフィンポリオールと変性ポリイソシアネートとを基にした2液システムで、それらの粘度及び当量などを表2.に示した。このポリオールの水酸基当量は1,100~1,200で、80°Cにおける粘度は約2,000 cpsである。また、変性ポリイソシアネートのイソシアネート当量は500~530で、80°Cにおける粘度は1,000 cpsである。イソシアネート基と水酸基との混合当量比は0.8~1.1の範囲が好ましい。すなわち、主剤と硬化剤との混合重量比は約2:1となり、硬化剤の配合量は比較的多いため、計量及び混合上のトラブルはほとんど生じない。

3.2 注型作業性及び硬化

注型材料としてエポキシ樹脂はいろいろな機器及び部品に適用されているが、エポキシ樹脂の持つ種々の優れた硬化物特性もさることながら、注型作業性の面で優れているため用いられる場合も多い。それは、エポキシ樹脂、硬化剤及び促進剤の種類は極めて多く、それらの適切な選択によって、目的に応じた注型作業性を備えた配合物を比

較的に得られるからである。

ポリウレタンの場合、ポリイソシアネートとポリオールあるいはポリイソシアネートとポリアミンなどを基にした、いわゆる2液性組成物が多く用いられている。しかし、イソシアネート基とこれらの硬化剤との反応性は高く、したがってポットライフは、一般に、極めて短くなり、注型作業中に混入したボイド(気泡)あるいはイソシアネートと配合物中に混在する水分との反応のため発生する炭酸ガスによってもたらされるボイドは完全に抜けない状態で硬化が進み、硬化物中にボイドを残しやすい。このため、高度の電気絶縁性を必要とする注型品や大形注型品に適用した場合、電気機器のコロナ放電劣化あるいは耐電圧不良を起こす大きな要因となる。このような不都合を避けるために、例えば、100°C程度でもポットライフが非常に長い1液性の組成物についての検討はなされているが、1液化のための安定化剤として添加されるフェノール化合物あるいはカプロラクタム化合物などは硬化物中に残存しやすく、硬化物のさまざまな特性、特に、電気特性及び耐熱性の点で良好な結果を与えない。

図2.に《メルキッド》及び市販ポリウレタンの粘度変化特性を示した。《メルキッド》の場合、反応はマイルドに進み、80°Cにおけるポットライフは約60分と極めて長い。このため、《メルキッド》は通常のエポキシ樹脂と同様の注型方法を採用でき、電気機器に適用した場合、ボイドフリーの絶縁組織が容易に得られる。

《メルキッド》は130°Cの場合4時間で、150°Cの場合2時間で完全に硬化する。なお、第3級アミンや脂肪酸金属化合物など通常の促進剤の添加により、更に短時間での硬化も可能である。

この報告では《メルキッド》の硬化には150°Cで2時間の硬化スケジュールを採用した。なお、特性比較のために用いたポリエーテル系ポリオール(ポリテトラメチレンエーテル形)及びポリブタジエン形(1.4シス構造60%)ポリウレタンの硬化スケジュールは100°Cで2時間とした。

3.3 機械的特性

ゴムには、他の絶縁材料と異なって高度の弾性及び伸びが必ず(須)であり、用途によっては大きな引張り強度を要する場合もあるが、それ以上に優れた引裂き強度が一般に要求される。その理由は、ゴ

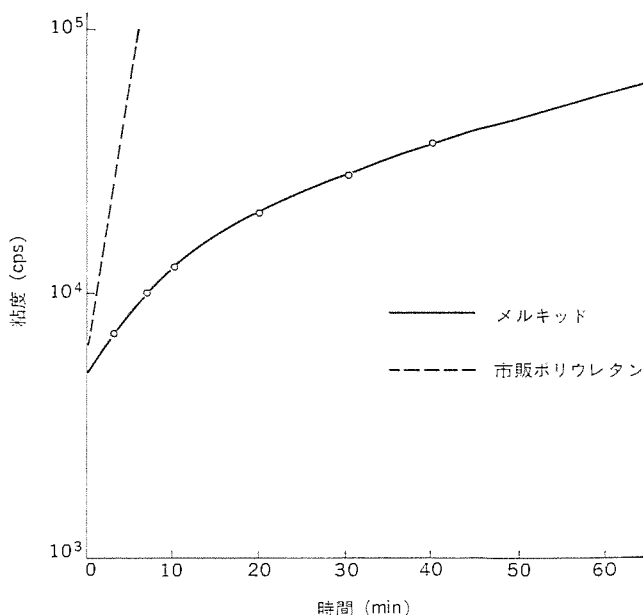


図2. 《メルキッド》の粘度特性 (80°C)

表2. 《メルキッド》の性状

	主 剤	硬 化 剤
名 称	ポリオレフィンポリオール	変性イソシアネート
粘度 (cps) 80°C	2,000	1,000
水 酸 基 当 量	1,100~1,200	—
イソシアネート当量	—	500~530

表 3. 《メルキッド》の機械的特性

	メルキッド	市販ポリウレタン	
		ポリブタジエン	ポリエーテル
引張り強度 (kg/cm ²)	75	13	275
伸び (%)	370	130	660
100% 弾性率 (kg/cm ²)	23.5	8.5	9.4
引裂き強度 (kg/cm)	22.0	4.8	22.0
硬度 (JIS)	76	47	55
T は く 離 (kg/cm)			
銅-銅	2.07	0.32	2.40
アルミ-アルミ	2.28	0.84	1.84
黄銅-黄銅	1.80	0.12	1.23

△ 製品は実際使用中には破断伸びまで伸長されることはほとんどないのに、老化や鋭い外物によって小さいひび割れを生ずると応力集中によって引張り強度よりも極めて小さい外力によってその割れた箇所から破壊されるためである。

室温における《メルキッド》の機械的特性を表 3. に示した。《メルキッド》は引張り強度及び伸びなどが優れ、また市販ポリウレタンと比較すると、特に、電気機器の機械的特性上重要な引裂き強度及び金属導体に対する接着性がポリエーテルポリウレタンと同様に極めて良好である。なお、弾性率及び硬度は幾分高めで少し硬いゴムといえるが、いろいろの配合剤、例えば、反応性希釈剤、伸展油の添加により低硬度品も得られる。

3. 4 電気的特性

電気絶縁材料に必要な電気特性として、絶縁抵抗、絶縁破壊電圧、誘電率、誘電体損失、耐トラッキング性、耐アーク性及び部分放電特性などがあげられる。

《メルキッド》の電気的特性を表 4. に示した。《メルキッド》はポリブタジエンポリウレタンと同様に誘電率及び誘電体損失が小さく、また、体積固有抵抗及び絶縁破壊電圧が大きいなど良好な電気絶縁性を示す。更に、Dip-Track 法による耐トラッキング性も 3kV 以上の値を示すほど優れている。また、80°C の熱水に 7 日間浸し(漬)後の電気的特性の変化も極めて小さい。図 3. に誘電率、誘電体損失及び体積固有抵抗の温度特性を示したが、《メルキッド》は温度特性も良好といえる。

表 4. 《メルキッド》の電気的特性

	メルキッド	市販ポリウレタン	
		ポリブタジエン	ポリエーテル
誘電率	3.70 (3.49)	3.96 (3.50)	8.03 (9.01)
誘電体損失 (%)	4.27 4.59	1.11 (1.53)	6.20 (10.80)
体積固有抵抗 (Ω・cm)	2.0 × 10 ¹⁵ (1.1 × 10 ¹⁵)	2.5 × 10 ¹⁵ (1.5 × 10 ¹⁵)	9.6 × 10 ¹⁰ (4.1 × 10 ¹⁰)
絶縁破壊電圧 (kV/mm)	28.8 (27.5)	27.0 (26.5)	22.9 (22.7)
耐トラッキング性 (kV)	3.00>	2.65	2.50
Dip-track			

() : 80°C 熱水に 7 日間浸漬後

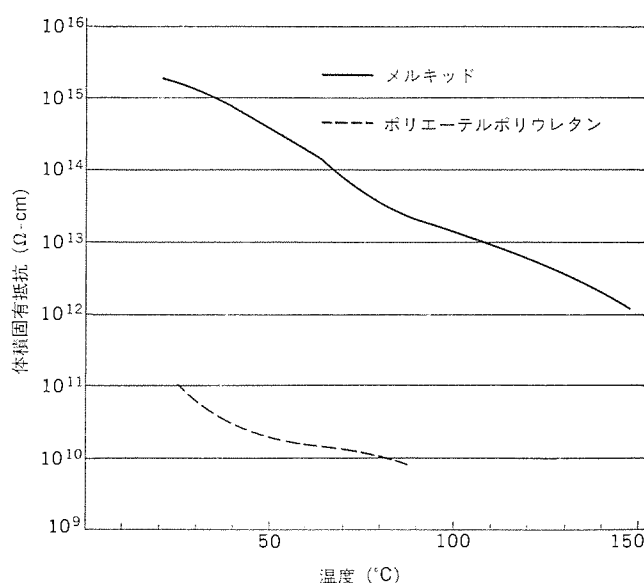
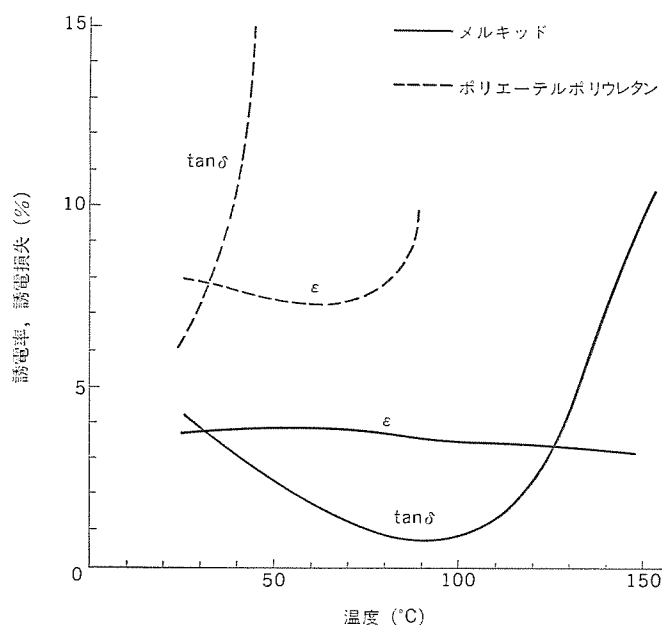


図 3. 《メルキッド》の電気特性-温度特性

3. 5 耐熱性

ゴムの耐熱性という場合、比較的短時間で何度まで耐えるかという耐熱温度と長時間の熱劣化に抵抗する耐熱老化性などが含まれる。短時間の現象としては、高温によるゴムの熱分解が主体であり、長時間ではゴムの酸化反応による変質と考えられる。前者では、分解による減量や灰化を来し、後者では、き裂の成長と破壊をもたらす。

いずれにしても、ゴムは有機材料の中でも硬質のプラスチックと比較すると、概して、耐熱性は良好とはいえず、負荷による発熱が大きく、高温環境下で用いられる電気及び電子機器に使用する場合、老化しやすいため、ゴムの選択に当たっては特に注意を払う必要がある。

《メルキッド》の最も優れた特性の 1 つは通常のポリウレタンにはみられないほどの高耐熱性である。140°C 空气中で熱劣化後の機械的特性と劣化時間との関係を図 4. に示した。《メルキッド》は 1,000 時間劣化後でさえ、なおかつ 130% の伸び率及び 40 kg/cm² の引張り強度を保持している。それにひきかえ、ポリブタジエンポリウレタンは、わずか

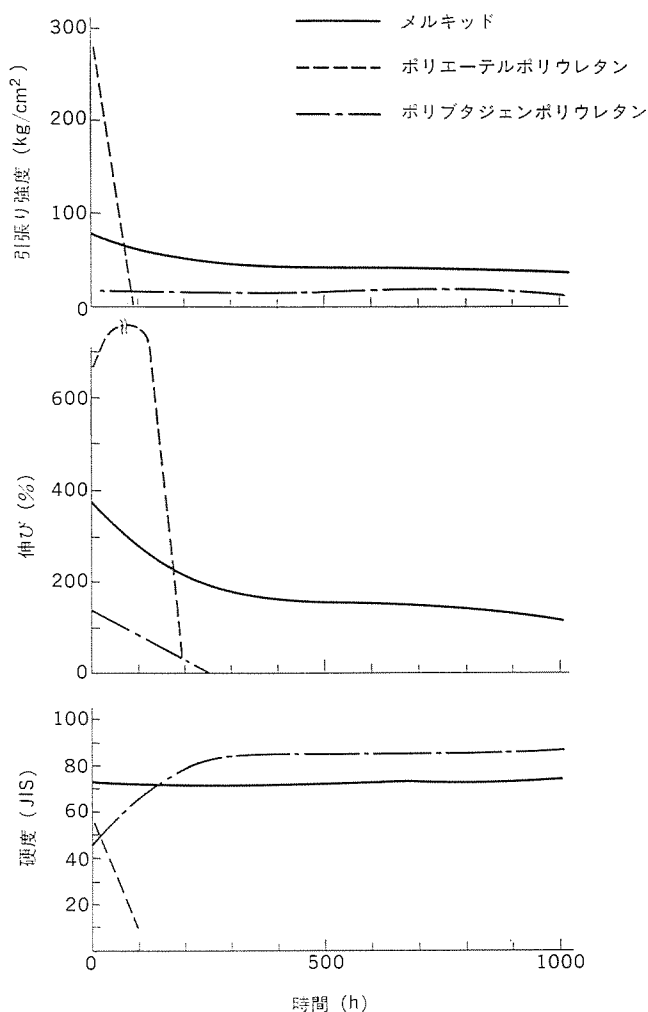


図 4. 《メルキッド》の耐熱性 (140°C 空气中)

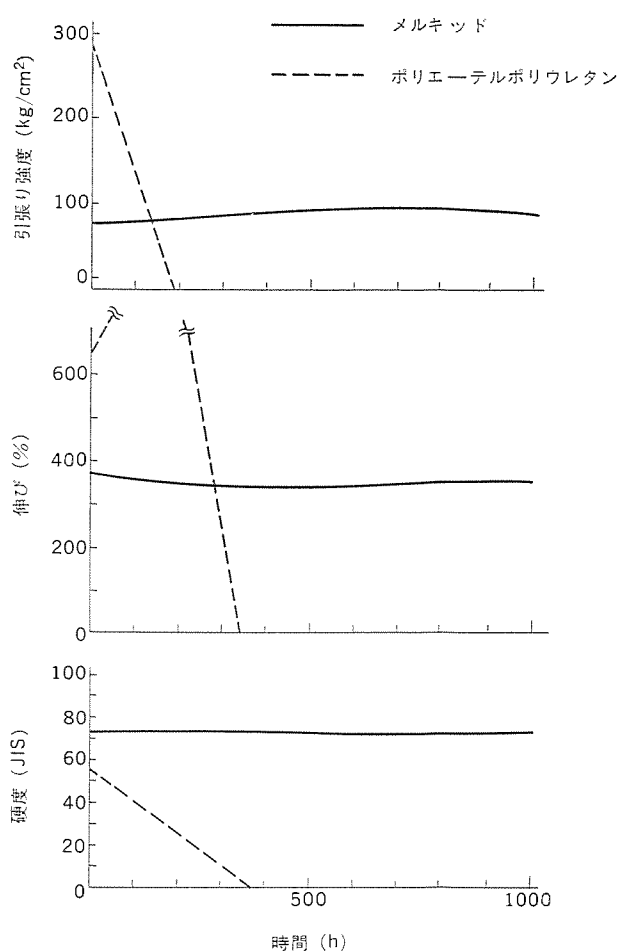


図 5. 《メルキッド》の耐熱水性 (80°C 熱水)

250 時間以内にこれらの特性を完全に失うほど劣化し、極めて悪い物質に変化する。また、ポリエーテルポリウレタンはこれまた 200 時間以内に粘着性物質に変わるほど劣化が激しい。

このように《メルキッド》は卓越した耐熱性を示すが、これは熱によって切断されやすいエーテル結合とか、架橋する 2 重結合は《メルキッド》の分子構造中にほとんど存在せず、耐熱性を有する飽和炭化水素が主成分となっているためである。

3.6 耐熱水性

水と親和力のある極性基が分子構造中に存在すると、吸水しやすくなり、その結果、絶縁抵抗や絶縁耐力の低下を招くなど電気的特性に悪影響を及ぼす。また、その極性基が易加水分解性を示す結合だと加水分解し、機械的特性の低下を伴う。

80°C 熱水に浸漬後の《メルキッド》の機械的特性と劣化時間との関係を図 5. に示した。《メルキッド》は 1,000 時間後でさえ、引張り強度、伸び及び硬度の変化はほとんどみられない。一方、室温での耐水性が良好とされているポリエーテルポリウレタンは、わずか 200 時間以内に引張り強度を失うほど激しい劣化を示す。

このように《メルキッド》の耐熱水性は良好であるが、その理由としては分子鎖中に極性基が少なく、しかも、その極性基は疎水性炭化水素に覆われているためだと考えられる。

なお、耐候性については促進耐候試験で良好な結果を得ている。

4. 変流器への適用

4.1 変流器用《メルキッド》配合

従来、変流器には、モールド用としてブチルゴムあるいは EPT ゴムを使用して製作している。これに対して以上述べたような《メルキッド》の優れた流動性や耐熱性を応用して、変流器のモールド用として《メルキッド》ゴムを適用した。コイル及び鉄心を一体成形した全モールド形ゴム絶縁変流器はゴム材料の卓越した機械的柔軟性と炭化水素構造に基づく優れた電気絶縁性を応用した機器であり、《メルキッド》を適用する場合、現用ゴムの特性を参照し、大略以下のような特性を持つことが必要である。

- (1) コイル及び鉄心を一体成形するため、その内部構造に基づく応力集中に耐え、更に、フィールドでの短絡電流などによる過酷な電磁力に耐える機械的特性を有すること。
- (2) 成形硬化時のひずみが小さく、鉄心の磁気特性を損なうことがないこと。
- (3) 現用の固形ゴムと同等以上の電気的及び熱的特性を持ち、また、変流器が使用される湿潤・汚損環境に対して、十分な耐トラッキング性と耐久性のあること。
- (4) 変流器の使用環境上、耐燃焼性に優れていること。

以上のことから、《メルキッド》を変流器用材料とするためには、補強材あるいは改質剤の検討が必要である。一般的に、ゴムの補強材としてはカーボンブラックが最も効果的であるが、絶縁材料としては多量

表 5. 変流器用各種 ゴムの特性

特 性 項 目	メルキッド配合	EPT ゴム配合	ブチルゴム配合
誘 電 率 (60 Hz)	4.2	3.9	3.7
体積固有抵抗率 ($\Omega \cdot \text{cm}$)	$>10^{14}$	$>10^{14}$	$>10^{14}$
絶縁破壊電圧 (kVrms/mm)	25	21	22
耐トラッキング性			
IEC 法 (V)	>600	>600	>600
Dip-track 法 (kV)	>3	>3	>3
引裂き強さ (kg/cm)	34	19	18
引張り強さ (kg/cm ²)	58	30	23
破 断 伸 び (%)	200	760	600
燃 焼 性 (酸素指数)	27	36	26

の添加は好ましくなく、電気絶縁用途にはタルク、クレー、炭酸カルシウムあるいは水和アルミナなどの充填材が補強材あるいは適用機器の用途目的に適した改質剤として用いられる。変流器用《メルキッド》配合の開発にあたっては、《メルキッド》の優れた諸性質、殊に、流動性や金属導体への接着性などを低下させることなく、耐燃焼性や剛性あるいは熱伝導性を向上させる必要があり、種々検討を行ってきた結果、《メルキッド》に好適な特殊な複合充填材系を見出し適用した。

表 5. には今回開発した変流器用《メルキッド》配合の諸特性を現用ゴムと比較して示したが、《メルキッド》配合は現用ゴムと同等の電気的諸特性を持っているとともに、引裂き強さや引張り強さなどの機械的強度は2倍近い値を示している。一方、破断伸びは現用ゴムより小さいが、変流器の機能上からは適用可能と思われる。その燃焼性は酸素指数で表示したが、大気中の酸素濃度では燃焼しないことを意味し、また JIS K 6911 の評価法では不燃性材料である。EPT ゴムやブチルゴムは一般に金属との接着性に乏しいが、《メルキッド》配合は金属との接着性に優れ、銅板あるいはけい素銅板を用いた T はく離強さで平均 4 kg/25 mm の値を示し、エポキシ系接着剤と比べても同程度以上の特性を有す。なお、熱劣化試験や耐湿性試験ではブチルゴムより優れ、EPT ゴム並みの特性が得られている。

4.2 《メルキッド》製 6 kV 級全モールド形変流器

変流器用《メルキッド》配合は、既に、従来、ブチルゴムあるいは EPT ゴムで生産されてきた 6 kV 級の全モールド形変流器や貫通形変流器へ適用し、実用に供している。図 6. は《メルキッド》の特長を生かし、設計及び製造技術上の各種検討を行って小形軽量化された 6 kV 全モールド形変流器の例であり、その性能は表 6. のように十分規格値を満たしている。また、耐電流試験では定格電流の 200 倍（ピーク値）まで実施し、電磁力に対し十分な機械的特性を有することを検証するとともに、実機で想定される各種の機械的試験や屋外課電を含む長期課電試験を行い、従来品と同様、十分な実用性能を有することを確認した。

変流器へ《メルキッド》を適用した場合、固形ゴムに比べ、エポキシ同様の注型法が採用でき、形状の自由度が増し、ボイドフリーの絶縁が容易に得られ、低圧成形のため磁気特性の低下のない製品が得られやすく、また小形軽量化が図れるなど種々のメリットがある。

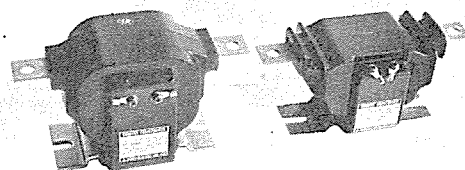


図 6. メルキッド製 (右側) 及び EPT 製 (左側) 6 kV 変流器

表 6. 6 kV 《メルキッド》製変流器の試験結果

試 験 項 目	規 格 値	試 験 結 果	試 験 法
商用周波耐電圧	22 kV (1 分)	良 好	JEC-190, JIS C 1731
雷インパルス耐電圧	60 kV	〃	〃
誤 差 階 級	1	〃	〃
2 次 開 路	1 分	〃	〃
耐 電 流	40 倍	〃	〃
温 度 上 昇	MAX. 55 deg	〃	〃
部 分 放 電	—	6.9 kV までコロ ナフリー	
冷 熱	—	良 好	90°C~0°C, 3 サイクル

5. む す び

ポリオレフィンポリオールと変性ポリイソシアネートとを基に新しいタイプの電気絶縁用液状ゴムの開発を行い、その諸特性と変流器への適用について述べた。これらをまとめると次のようになる。

- (1) 《メルキッド》は良好な注型作業性を有する。
- (2) 《メルキッド》の耐熱性、耐熱水性、電気的及び機械的特性は従来の液状ゴムに比べ極めて優れている。
- (3) 新形変流器（《メルキッド》注型）は従来品（EPT 成形）に比べて大幅に小形軽量化され、そのうえ、部分放電特性も向上している。このように《メルキッド》は諸特性が優れていることから、変流器以外にも電波吸収体、コネクタ類等へも適用され好結果が得られている。今後、耐熱性、耐熱水性、電気的及びゴム弾性などの機械的特性が要求される機器の絶縁材料として広く使用されることが期待できる。

終わりに、種々の原料を提供いただいた三菱化成工業(株)の関係各位、その他助言、協力を賜った各位に厚く感謝する。

参 考 文 献

- (1) 箕浦：日本ゴム協会誌，48，229 (昭 50)
- (2) G. Lottanti, K. Schigg：Kunststoffe Plastics Feb. 23 (1976)
- (3) E. C. Elliott, J. W. Swanson：E/EIC, 75 CH 1014-EI-26 (1975)
- (4) 山下：高分子の分子設計(3)，114，培風館 (昭 47)
- (5) 液状エラストマーの展望，ラバーダイジェスト，26，16 (昭 49)
- (6) 箕浦：液状ゴム開発研究セミナー，要旨集，2-6 (昭 49)

屋外機器用エポキシ注型絶縁物の長期信頼性

平沢 栄一*・谷

功*・坂井 龍吉**・農 蘇正和**・宗村 弘次**

1. ま え が き

最近の脂環族エポキシ樹脂の進歩によって、これら樹脂が屋外用高電圧機器に適応されるすう勢にある。欧州では、一部の屋外用支持がいし、ブッシング、計器用変成器 (PT, CT) にエポキシ樹脂が用いられており⁽¹⁾⁽²⁾、132 kV 送電系統の実ラインのがいしに適応されている実績もある⁽³⁾。国内では、屋外用としてエポキシ樹脂が使用された例は少ないが、開発研究が活発に進められている⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

一般に、屋外でじんあいが付着した絶縁物治面が降雨によって湿潤すると、絶縁物治面が乾燥した場合に比べて大きな治面もれ電流が流れる。この電流によるジュール熱によって湿潤層の水分が蒸発し、湿潤層の一部に局部的ないわゆる乾燥帯が形成される。この乾燥帯の抵抗は、湿潤層のそれに比べて高い。このため乾燥帯部の分担電圧が大きくなる結果、乾燥帯周辺の空気が絶縁破壊して微小放電が発生する。微小放電直下の絶縁物が放電の発生熱によって温度上昇するため、絶縁物に局部的に炭化した導電路、いわゆるトラッキングが形成される場合がある。エポキシ樹脂の屋外用機器への適応に対しては、耐トラッキング性に優れたものを選定することが重要である。また、エポキシ樹脂中に埋め込まれた金属周辺部の樹脂に気候劣化による機械的ひび割れが発生しないような材料を選定することも重要である。

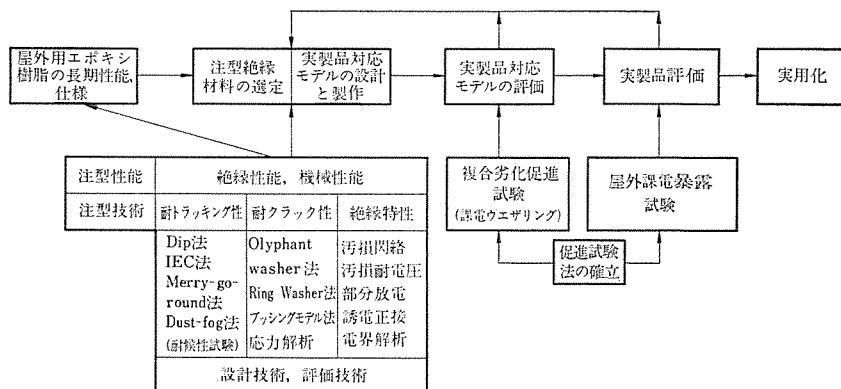
この論文では、当社における屋外用エポキシ樹脂の評価方法について紹介するとともに、屋外用エポキシ樹脂の長期的な信頼性 (寿命) を評価する目的で実施している屋外課電暴露試験結果について述べる。主に、実製品形状の 20 kV ブッシング、70 kV 支持がいし及び 110 kV 支持がいしの試験開始後 5 年経過時点での結果と単純形状であるエポキシ樹脂丸棒の 3 年経過時点での結果について述べる。なお、前者の実製品形状のブッシング、がいしの試験開始後 3.5 年経過時点の結果については前報で報告している⁽⁶⁾。[現時点において、エポキシ樹脂の種類によって絶縁物表面の劣化状態が異なるがまだ絶縁破壊に至ったものはない。そこで、表面劣化状態、劣化と治面もれ電流との相関性、劣化と塩分付着密度との関係について主に検討した。

また、トラッキング発生に及ぼす絶縁物の治面長さ、印加電圧の影響について検討した。ここでは短期間にトラッキングを発生させるために故意に耐トラッキング性に劣るエポキシ樹脂を供試した。この結果、トラッキング発生に及ぼす治面長さ、印加電圧の関係が明らかとなった。

2. 屋外用エポキシ樹脂の評価方法

当社では、屋外用エポキシ樹脂の長期性能評価を表 1. に示す考え方を基に進めている。この表は、従来の注型、設計及び評価技術を基に、屋外用として必要なエポキシ樹脂の絶縁性能、機械性能両者の評

表 1. 屋外用エポキシ樹脂の長期性能評価方法



価方法について示している。なお、ここでは注型性能評価については別報⁽⁷⁾が詳しいので割愛した。これらの評価方法の特徴は、小さな試験片での規格評価試験とは別に製品対応モデル試料の評価を重視した点にある。

屋外用注型樹脂は、耐トラッキング性及び耐クラック性に優れていることが特に重要である。一般に脂環族エポキシ樹脂は耐トラッキング性には優れているが耐クラック性には劣っている。耐クラック性評価では、一般に Olyphant Washer 法 & Ring Washer 法⁽⁸⁾が用いられているが、当社では実用面を考慮してブッシングモデルを用いたヒートショックによる評価方法を採用している。また、従来屋外用注型品の耐トラッキング性向上のために無機充てん (填) 剤として水和アルミナが用いられている。しかし、ブッシングモデルでの評価結果によれば水和アルミナは機械強度が低く耐クラック性に劣る。そこで、現在は充てん剤として溶融石英粉 (シリカ) を採用している。

一方、耐トラッキング性については、まず小さな試験片を用いた規格あるいはこれに準じた試験によって数種類のエポキシ樹脂を選定し、次にこの選定材料を用いた製品対応モデル試料を用いた試験を行うという方法を採用している。第一段階の材料選定方法としては、Dip-Track 法、IEC 法、Dust-Fog 法の内でも Dip 法⁽⁹⁾を採用している。また、最近国際電力網会議 (略称 CIGRE) の WG-06 (絶縁材料)、TG-4 において Merry-go-round トラッキング試験法が提案された⁽¹⁰⁾。当社もこの委員会に参画して検討を開始した。この評価方法は、比較的長い治面長の供試物を 30 kV 程度までの高電圧で試験するもので、小さな試験片での試験と屋外課電暴露試験の中間的な試験方法として期待されている。この方法の原理は Dip-Track 法に類似したもので、円板に取付けられた供試物が円板の回転によって汚損液を想定した電解質の水溶液中に浸し (漬) され、その後供試物が水溶液から出た後に電圧が印加されるという浸漬と電圧印加のサイクルが絶縁破壊まで繰り返される。この絶縁破壊までに要する課電 - 浸漬 サイクル数によって耐トラッキング性を評価するものである。更に、当社では実製品対応モデル試料の複合劣化促進試験 (課電ウエザリング試験と称す) を実施している。この試験は、従来の耐

* 生産技術研究所 ** 伊丹製作所

候性試験（ウェザリング試験）が電圧印加状態で実施できるもので、屋外での劣化要因である降雨、紫外線を模擬して、これらを課電状態の供試物に与えることができる。屋外でのエポキシ樹脂の寿命を推定する上で、これらの促進試験方法の検討が重要と考えられる。

3. 長期課電暴露試験

3.1 供試料及び試験条件

表 2. に長期課電暴露試験中の供試料及び試験条件を示した。また表 3. に供試料の材料配合内容を示した。屋外課電暴露試験によって脂環族エポキシ樹脂の化学構造の差異と長期寿命との関係を明らかにすることを目的としたため、製品対応モデルである 20 kV プッシングと 70 kV、110 kV プッシングの材料配合はできるだけ単純なものとした。この配合の要点は次のようである。(1) 充填剤は、すべて一定粒度分布の溶融石英粉とした。(2) 硬化剤はすべて酸無水物(飽和脂環族系)で同一種類とした。(3) 試料(C)以外には、着色剤は用いず自然色とした。(4) 促進硬化剤は、それぞれの配合特有のものをを用いたが完全硬化するようにした。(5) (A)～(E) 試料の炭化傾向の値はほぼ等しく 0.3 前後であり、Dip-Track 電圧は(F) 試料も含めてすべて 3 kV 以上である。なお、一般に耐トラッキング性

表 2. 供試料と試験条件

(a) 製品対応モデル			
	20 kV プッシング	70 kV 支持がいし	110 kV 支持がいし
樹脂組成物	内容は表 3. 参照		
試験電圧 (kV)	18.5	63.0	73.5
試料数 (本)	20	20	1
54 年 10 月までの 課電時間 (年)	5	5	5
試験場所	当社伊丹製作所 屋外試験場		大トー佐野工場海 岸線より 60 m
沿面距離 (mm)	665	1 860	3,600
高さ (mm)	235	750	1,170
AC せん絡電圧 (kV)	107	310	483.5
Imp. せん絡電圧 (kV) (50 % せん絡電圧)	(-)191	(-)580	(-)976

(b) 丸棒試料					
試験電圧 (kV)		27	18	13.8	6.6
みかけの平均電界 注 (1)					
50 V/mm	沿面長 (mm)	540	360	276	132
	シリカ充填試料 試験本数	3	3	3	3
	シリカ無充填試料 試験本数	—	—	—	—
66 V/mm	沿面長 (mm)	405	270	207	99
	シリカ充填試料 試験本数	3	3	3	3
	シリカ無充填試料 試験本数	12	12	12	12

- 注) 1. みかけの平均電界とは試験電圧を沿面長で除した便宜的な値である。
2. 樹脂組成物の内容は表 3. に示した。
3. 試料はすべて円筒形で直径 30 mm である。

表 3. 試料内容

(a) 製品対応モデル						
試料	エポキシ樹脂の種類	熱軟化度 温 (°C)	クラック 指数 (プッシング法)	Dip-Track 電圧	供試数	
A	脂環族 (グリシジルエステル系)	110	7.3	3 kV 以上	4	4
B	脂環族 (グリシジルエステル系)	110	18 以上	3 kV 以上	4	4
B'	脂環族 (グリシジルエステル系)	108	4.0	3 kV 以上	2	2
C	脂環族 (環内エポキシド系)	178	1.8	3 kV 以上	4	2
D	脂環族 (ヒダントイン系)	116	20 以上	3 kV 以上	4	4
E	脂環族 (環内エポキシド系)	153	3.8	3 kV 以上	1	1
F	エビビス系+ 環内エポキシド系	125	10.8	3 kV 以上	1	1

- 注) 1. 硬化剤はすべて酸無水物(飽和脂環族) 同一種のものをを用いた。
2. 充填剤は一定粒度分布の溶融石英粉を用いた。

(b) 丸棒試料					
シリカ充 填試料	樹脂		硬化剤		炭化傾向 $\Delta H_c/\Delta H_T$
	エビビス 系エポキシ 樹脂	脂環族エポキシ 樹脂 (グリシジル エステル系)	酸無水物 (不飽和脂環 族)	酸無水物 (飽和脂環族)	
G-1	—	48.0	—	52.0	0.34
G-2	重量部 42.3	6.7	36.6	14.4	0.41
G-3	38.0	11.1	30.4	20.5	0.40
G-4	31.5	17.6	22.3	28.6	0.39
シリカ充 填試料	エビビス系 エポキシ樹脂	酸無水物硬化剤 (芳香族系+脂環族系)		シリカ	$\Delta H_c/\Delta H_T$
H	100 重量部	30		200	0.45

は材料の化学結合において熱(放電発生熱)に対して炭化しやすい結合と気化しやすい結合の分類から総結合エネルギー(ΔH_T)と炭化されやすい結合エネルギーの総和(ΔH_c)との比($\Delta H_c/\Delta H_T$)が大きい程トラッキングが生じやすいとされている⁽¹¹⁾。また($\Delta H_c/\Delta H_T$)の値が約 0.35 より小さい場合にはトラッキングが生じにくくエロージョン(炭化路を残さない放電侵食)が生じやすいという報告もある⁽¹²⁾。

丸棒試料(G₁)～(G₄)は、脂環族エポキシ樹脂とビスフェノールエポキシ樹脂の混合割合を変化して材料単体としての屋外での寿命を評価することを目的として供試した。また($\Delta H_c/\Delta H_T$)の値は 0.34～0.41 まで変化した。試料(H)は、屋外でのトラッキング発生に及ぼす印加電圧、沿面長の効果の検討を目的として供試したもので、($\Delta H_c/\Delta H_T$)の値は 0.45 と大きく、耐トラッキング性に劣る屋内用配合とした。

暴露試験場所は表 1. に示したが、図 1. に 1 例として丸棒試料の暴露試験状況を示す。

3.2 試験結果

3.2.1 20 kV プッシング、70 kV、110 kV 支持がいしの試験 (1) 表面劣化

課電開始後 5 年経過したが、試料配合(A)～(F)のすべてにおいて絶縁破壊は生じていない。そこで、ここでは表面劣化割合の変化を

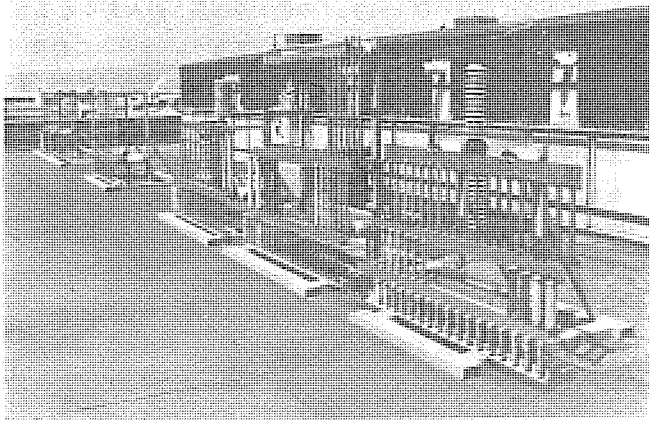


図 1. 暴露試験状況

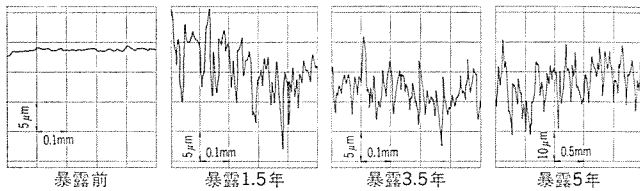


図 2. 110 kV 支持がいしの面粗度の変化

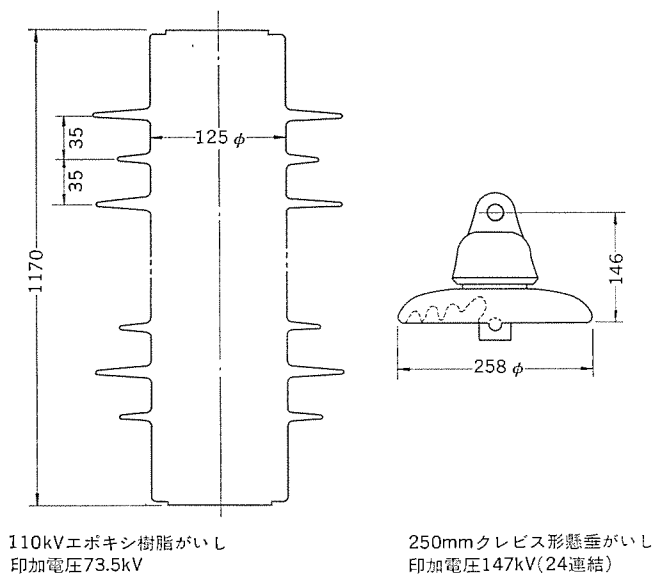


図 3. 等価塩分付着密度測定用がいしの形状

面粗度の測定によって検討した。面粗度は、紫外線及び降雨の影響を最も受ける南向き最上部、日照面ひだの一部を測定した。試料配合(A)～(F)の供試物の中で環内エポキシ系(C)の劣化が最も大きく、面粗度で 20～30 μm に達している。他の試料配合はおおむねこの値より小さく、グリジルエステル系試料配合(B)の劣化が最も小さい。材料配合の違いによる劣化割合の差異は、樹脂の化学構造の差に起因したもの⁽¹³⁾と考えられるが現時点において詳細は明らかではない。

各試料配合の中で最も劣化の大きい環内エポキシ系(C)を用いて作成した 110 kV 支持がいしについての面粗度の暴露経過による変化を図 2. に示した。なお、110 kV 支持がいしはある材料メーカーより提供を受けたもので、がいしの表面層は、グリジルエステル系脂環族エポキシ樹脂にシリカと水和アルミナを配合したものである。5 年経過

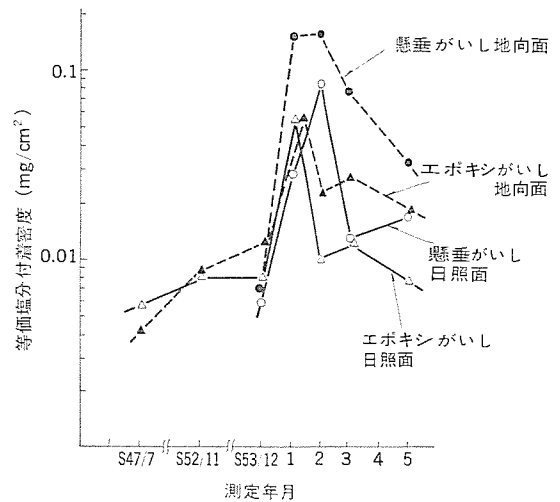


図 4. 等価塩分付着密度の測定結果

時点の表面劣化割合は 3.5 年時点のそれに比べてやや大きくなっているが、雨洗効果による充填剤の脱落などに起因して面粗度の変化は緩慢となっている。

(2) 塩分付着密度

ここでは、表面あれと塩分付着密度との関係について検討し、併せて、エポキシ樹脂がいしと磁器がいし両者の塩分付着密度を比較した。暴露開始後 5 年経過した前述の 110 kV 支持がいしと暴露 15 年の実績がある磁器製懸垂がいしを供試した。この両供試物の形状を図 3. に示す。また、暴露試験は両供試物とも海岸より 60 m 離れた塩害地区(大ト KK 佐野工場, 泉佐野市)で実施した。図 4. に両供試物の等価塩分付着密度の測定結果を示す。なお、ここでは日照面と地面向両者の等価塩分付着密度の測定結果を示している。この結果よりエポキシ樹脂がいしと磁器がいし両者の塩分付着密度には顕著な差異は認められない。また、磁器がいし地面向は水切り構造になっているため雨洗効果が小さく塩分付着密度が大きい値を示している。現時点での正確な判断は困難であるが、塩分付着は、表面劣化よりはむしろ季節、降雨状態、がいし形状に大きく影響されていると推定される。

3. 2. 2 丸棒試料の暴露試験

(1) 無機物無充填試料

表 3. に樹脂配合を示したように、ここではシクロ系エポキシ樹脂とビスフェノール系エポキシ樹脂両者の混合比を変化して無機物を充填していない樹脂単体での材料比較を実施した。暴露試験開始後 3 年経過するがすべての試料においてトラッキングは全く発生していない。また、表面の面粗度も図 5. に示すように課電前が 10 μm 前後であるのに対して暴露試験経過後 3 年の時点でもほとんど変化していない。また、現時点で樹脂の配合による表面劣化の差異はほとんど認められない。なお、この供試物は、ポリプロピレン製パイプによって注型硬化したため、金属金型を用いた場合に比べて面粗度が大きくなっている。

(2) シリカ充填試料

ここでは、前述したように、トラッキング発生に及ぼす沿面長、印加電圧の影響について検討した結果について述べる。試験電圧と沿面長は表 1. に示したようにみかけの平均電界(試験電圧を沿面長で除した値)が一定になるようにした。みかけの平均電界が 50 V/mm におけるトラッキングの最大進展長を試験期間に対して図 6. に示し

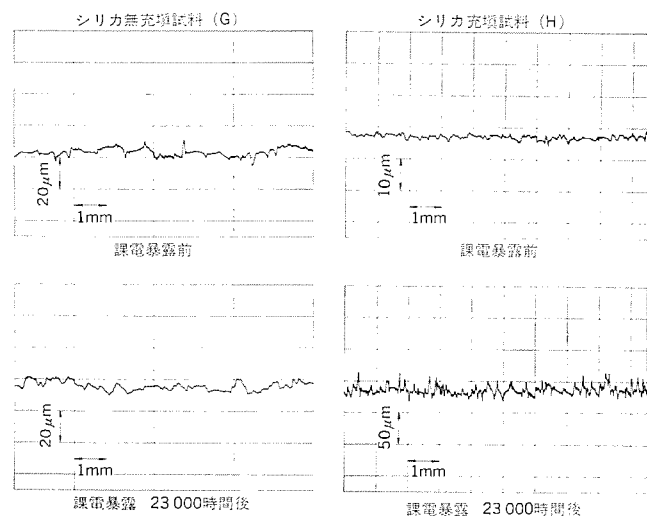


図 5. 丸棒 エポキシ 樹脂の面粗度の変化

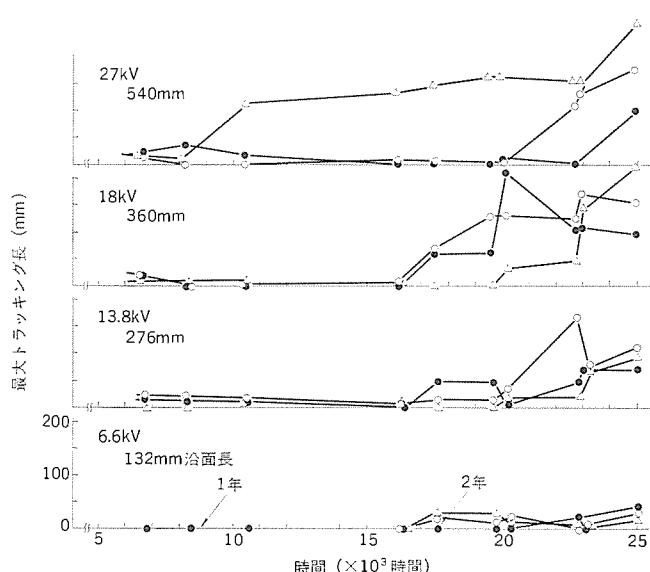


図 6. トラッキングの最大進展長さと印加電圧の関係

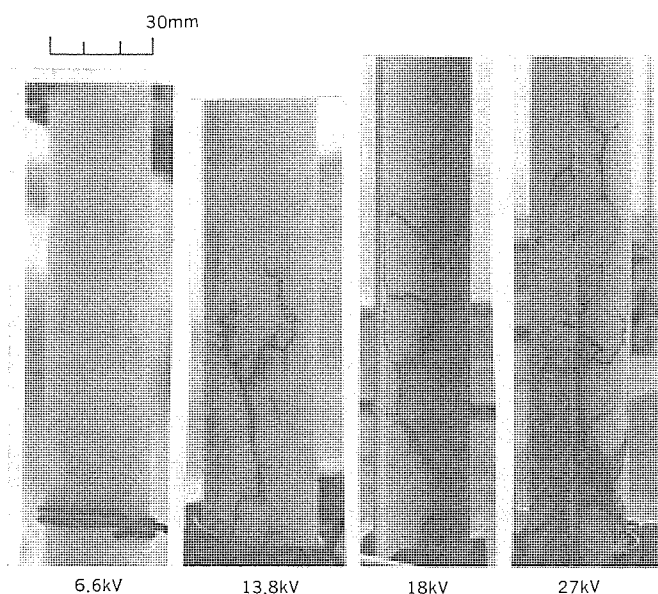


図 7. トラッキングの進展状況

た。この結果より、みかけの平均電界が 50 V/mm と一定にもかかわらず印加電圧が高い程トラッキングの最大進展長さが大きくなる傾向が認められる。この様子を写真で図 7. に示す。また、この傾向はみかけの平均電界が 66 V/mm においても同様に認められた。なお、1 度発生したトラッキングが降雨によって流れ消失する場合がみかけの平均電界とは無関係に認められた。

なお、図 5. に丸棒試料の暴露前後の面粗度を比較して示したが、暴露前の面粗度が 5 μm 以下であるのに対して暴露 23,000 時間経過後の面粗度は 30 μm 程度になっている。また、図には示していないが、課電部と無課電部の面粗度を比較した結果、課電部のほうが無課電部に比べやや大きくなっている。しかし、課電部と無課電部の差異は思いの外小さく、表面あれに対しては放電侵食作用よりはむしろ天候劣化が大きな影響を及ぼしているといえる。

3. 2. 3 表面劣化と沿面もれ電流、放電発生特性

前項までに述べたように課電暴露による表面あれは、ある時点で見かけ上一定値に落ちつく傾向が認められた。ここでは、表面劣化と沿面もれ電流、放電発生特性との関係について検討した。図 8. に試料配合 (A), (B), (C), (D) の 20 kV プッシングにおける降雨時の沿面もれ電流の測定結果を示す。この結果は、沿面もれ電流を区分し、各区分値の電流が流れた回数を課電月数に対して図示したものである。この結果より、課電月数が増しても沿面もれ電流が大きくなるような傾向は認められない。

次に、丸棒試料について表面劣化と沿面もれ電流との関係を検討した。シリカ充填試料、無充填試料両者について課電暴露前後の沿面もれ電流の大きさを比較して図 9. に示した。なお、この結果は、供試物に人工降雨を与えて沿面もれ電流を実測したものである。人工降雨は、水道水を毎分 0.3 mm の割合で試料表面に与えた。水道水の抵抗率は 28°C において $3.8 \times 10^3 \Omega \cdot \text{m}$ である。この結果より、課電暴露後のシリカ充填エポキシ樹脂 (H) の沿面もれ電流は課電暴露前に比べて著しく増大していることがわかる。一方、シリカ無充填エポキシ樹脂 (G) の課電暴露後の沿面もれ電流は課電暴露前に比べて

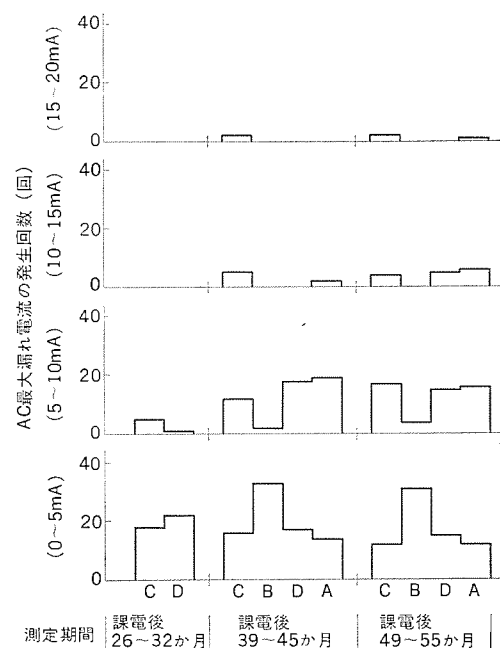


図 8. 20 kV プッシングの降雨時における AC 最大もれ電流の発生回数

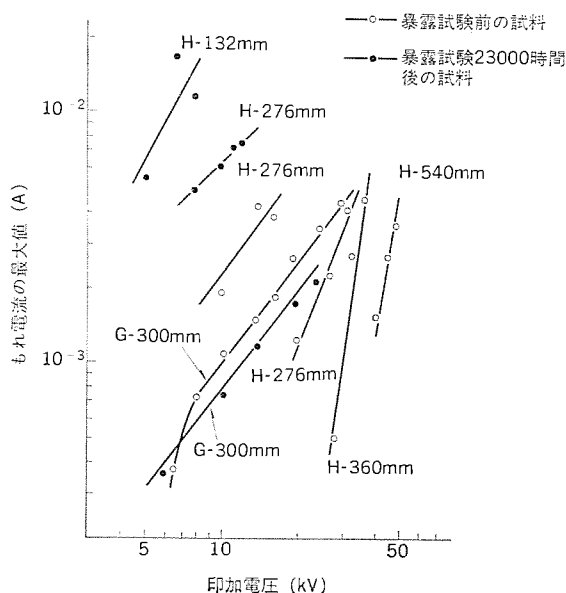


図 9. 課電暴露による沿面もれ電流の変化

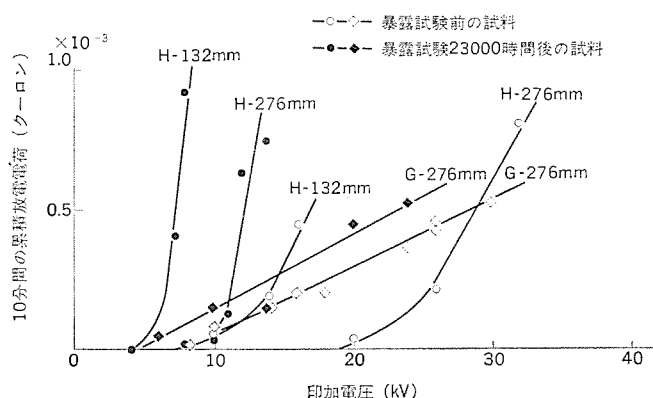


図 10. 課電暴露による放電発生特性の変化

変化が小さい。これは図 5. に示したように、シリカ充填エポキシ樹脂の課電暴露による表面劣化が無充填エポキシ樹脂に比べて小さいためと考えられる。すなわち、表面劣化により水と試料とのなじみ(濡れ)が良くなる結果沿面もれ電流が増大すると推定される。次に人工降雨を供試物に与えた時の放電発生特性を、沿面もれ電流と放電電流を半サイクルごとに分離する方法⁽¹⁴⁾によって求めて図 10. に示した。この結果より、シリカ充填エポキシ樹脂の放電発生特性は課電暴露後著しく低下していることがわかる。これは、暴露後沿面もれ電流が増大し、このため熱ジュールによる乾燥帯の形成が容易となる結果放電発生が低下したのと考えられる。

以上述べたことから、屋外において表面の劣化が進行し放電が発生しやすくなった条件下でトラッキングが発生しないような耐トラッキング性に優れたエポキシ樹脂の選定が重要といえる。今回供試したがいし、プッシングが課電暴露後2年以内に表面劣化がかなり進行しているにもかかわらずその後トラッキングが発生していないことから長期

の寿命が期待できると思われる。

また、みかけの平均電界が同一でも印加電圧が高い程トラッキングが進展しやすいのは図 10. に示した無機物充填試料の課電暴露後の放電発生特性において沿面長 132 mm で 6.6 kV 並びに 276 mm, 13.8 kV の 50 V/mm における放電電流の 10 分間の積分値を比較して、後者が前者のほぼ 3 倍程度大きい。このため、みかけの平均電界が同一でも沿面長が長く印加電圧が高い程トラッキングが進展しやすいものと考えられる。このことから、今後汚損時の放電発生特性を考慮した絶縁設計が必要と考えられる。

4. む す び

以上、エポキシ樹脂の長期課電暴露試験結果について述べた。ここで得られた主な結果は以下のようである。

- (1) シリカ充填脂環族エポキシ樹脂を用いた 20 kV プッシング, 70 kV, 110 kV 支持がいしにおいて、屋外課電暴露による表面の白亜化、表面のあれが認められるが、5 年間トラッキングが発生しないという実績が得られた。また、表面劣化度合は樹脂の種類によって異なる傾向が認められた。
- (2) エポキシ樹脂がいしと磁器がいしとの等価塩分付着密度を比較検討した。この結果、エポキシ樹脂がいしは表面があれても磁器がいしの等価塩分付着密度とほぼ同等であることがわかった。
- (3) 屋外課電暴露によって表面があれると雨と試料表面とのなじみが良くなり沿面もれ電流が大きくなる結果、放電発生量が增大する傾向が認められた。また表面あれはシリカ充填エポキシ樹脂が無充填試料に比べ大きくなる傾向が認められた。
- (4) 同一種類の試料においてみかけの平均電界(印加電圧を沿面長で除した値)が同一でも、印加電圧が高い程トラッキングが進展しやすい傾向が認められた。これは、印加電圧が高い程放電発生量が多いことに起因したものであると推定した。

参 考 文 献

- (1) M. J. Billing et al. : IEEE 32C, 79-71
- (2) Hannover Messe 1974 catalogue (Mess wandler Bau, Jordan Ritz etc.)
- (3) G. B. Pugh : Electrical Review 2, November (1973)
- (4) 新田, 黒沢, 平田 : 絶縁材料研究会資料 EIM-79-50 (昭 54)
- (5) T. Tanaka, K. Naito et al. : IEEE Trans. EI. EI-13, No. 3 (1978)
- (6) 坂井ほか : 三菱電機技報, 51, No. 8, p. 533 (昭 52)
- (7) 寺谷ほか : 三菱電機技報, 43, No. 12, p. 1683 (昭 44)
- (8) A. Noshay : Insulation/circuit 19, 33 (1973)
- (9) 平林ほか : 三菱電機技報, 47, No. 11, p. 1172 (昭 48)
- (10) P. Mahonen et al. : CIGRE 15-01 (1974)
- (11) D. J. Parr et al. : Proc. IEE, 112, No. 8 (1965)
- (12) シエル 化学技術資料, R 72 E 2
- (13) 寺谷ほか : 三菱電機技報, 47, No. 10, p. 1033 (昭 48)
- (14) 平沢ほか : 絶縁材料研究会資料, EIM-79-69 (昭 54)

高電圧発電機絶縁の経年変化

平林 庄司*・谷

功*・松田 禎夫**・伊藤 裕之**・斎藤 堅一**

1. ま え が き

当社が昭和29年に、我が国最初の無溶剤合成レジン真空含浸絶縁方式であるダイヤラシック絶縁を高電圧発電機絶縁として実用化して以来、既に四半世紀を経ようとしている⁽¹⁾。無溶剤合成レジン絶縁の採用により絶縁の信頼性は飛躍的に向上し絶縁性能に起因するトラブルは一掃されたが、実用初期の発電機はすでに20数年か(稼働)しており、信頼性確保のため絶縁更新を検討すべき時期にきている。

絶縁更新の要否を検討するためには、機器絶縁の状態、特に残存絶縁耐力を知る必要がある。しかし、各種絶縁評価モデル試験データを総合し実機運転条件より推定する方法、実機の絶縁状態を非破壊的に計測診断し絶縁耐力との相関関係より推定する方法など、これまで種々の試み、提案がなされているが、有用といえる残存絶縁耐力推定法は確立されていない。

このたび、14～23年間運転した5台のタービン発電機の固定子コイルを一部抜取り、当社旧方式合成レジン絶縁⁽²⁾(不飽和ポリエステル含浸ダイヤラシック絶縁、以下“旧ダイヤラシック絶縁”と呼ぶ)の経年変化状態を計測診断する機会に恵まれ、残存絶縁耐力推定の可能性について分析・検討した。

以下、経年変化診断試験結果の概要を紹介するとともに、その結果、絶縁更新保守指針として有用性が確認された運転経歴から残存絶縁耐力を推定する方法について述べる。

2. 供試発電機及びコイル

昭和31年から昭和54年にわたり、稼働した当社製66～175 MWタービン発電機5台より、各2～8本計25本の固定子コイルを抜取り、固定子コイル絶縁の詳細な試験・診断を行った。各発電機の仕様、経歴を表1に示す。

いずれの発電機も当社の標準設計機であり、固定子コイル絶縁に大きな影響を与えるような異常な運転経歴のない平均的な経歴を持った発電機とみなすことができる。

表 1. 供試発電機の仕様・経歴

供試発電機		A発電機	B発電機	C発電機	D発電機	E発電機
仕様・経歴						
仕 様	出 力 (MW)	175	75	66	75	156
	端子電圧 (kV)	18	13.2	13.2	13.8	18
	相 電 流 (kA)	7.18	4.02	3.54	3.69	6.16
経 歴	起動停止回数(回)	207	4,219	5,565	3,050	213
	運 転 時 間 (h)	110,000	100,889	103,637	100,535	125,424

3. 固定子コイル絶縁の試験・診断方法

3.1 非破壊電気試験

非破壊電気試験として、直流、誘電正接、部分放電電荷量及び交流電流の各特性を、各供試コイルにつき測定部分を1～5箇所に分割して測定し、弱点比、 $\tan \delta$ 増加分及び最大放電電荷量と絶縁耐力との相関関係を求めた。

なお、直流電流急増電圧及び交流第2電流急増電圧の測定については、絶縁耐力試験に影響を与えない電圧範囲にとどめたため、急増点は測定できなかった。

3.2 化学分析

供試コイルより、含浸レジンを採取し、赤外線分光分析及び熱重量測定を行い、劣化による組成・化学構造の変化と絶縁耐力との関係を調べた。

3.3 機械的特性試験

供試コイルの直線部より試料を採取し、コイルの曲げ剛性、縦弾性係数を求め、絶縁耐力との関係を調べた。

3.4 絶縁耐力試験(電氣的絶縁破壊試験)

各供試コイルにつき、コイル単体あるいは、コイルエンド部とスロット部を3～5箇所にわけて交流階段上昇試験法により破壊試験を行い、絶縁耐力を測定した。

4. 試験・診断結果と考察

4.1 非破壊電気試験

非破壊電気試験の結果を表2に示す。表の特性値は、各発電機から抜き出した供試コイル中の最悪のものを示したものであるが、各特性値とも特に問題となるような著しい劣化を示すものではなく、旧ダイヤラシック絶縁は、長期間の運転後も優れた非破壊電気特性を保持していることが確認できた。

4.2 化学分析

赤外線分光分析の結果を図1に示すが、劣化が進行したものにOH基($3,400\text{ cm}^{-1}$)及びエステル基($1,750\text{ cm}^{-2}$)の吸収に増加の傾向が認められ、また熱重量測定では、劣化が進行したものに重量変化が低温側に移行する傾向が認められた。これらは含浸レジンが劣化により低分子化されたことに基づくものと考えられる。

4.3 機械的特性試験

曲げ剛性、縦弾性係数に若干の変化が認められたが、おおむね新品のばらつきの範囲で、ほぼ初期の特性を保持していることが確認できた。

4.4 絶縁耐力試験(電氣的絶縁破壊試験)

電氣的破壊試験による絶縁耐力測定結果を表2に示す。残存絶縁耐力と発電機の運転経歴である起動停止回数との間には図2に示すように相関関係は認められるが、運転時間については、供試発電機が10万～12.5万時間と比較的せまい範囲にあることもあり、相関関係は明らかではない。

表 2. 供試 コイル の電気特性

試 験 項 目		供 試 発 電 機	A 発 電 機	B 発 電 機	C 発 電 機	D 発 電 機	E 発 電 機
非 破 壊 試 験	直 流 吸 収 試 験	PI at 5 kV	4.5	3.6	3.5	3.4	4.4
		PI at 10 kV	4.3	3.5	3.7	3.0	4.2
		弱点比 $\left(\frac{R_{5kV}}{R_{10kV}}\right)$	1.00	1.11	1.02	1.21	1.01
	直 流 高 電 圧 ・ 電 流 試 験	電 流 急 増 電 圧 (kV)	45 以上	34 以上	45 以上	45 以上	45 以上
	※ 誘 電 正 接 試 験	$\tan \delta_0$ (%)	1.06	1.46	1.81	2.32	0.91
		$\Delta \tan \delta$ at $E/\sqrt{3}$ (%)	0.49	0.14	0.28	0.66	1.03
		$\Delta \tan \delta$ at E (%)	1.93	2.54	2.10	3.82	3.19
	部 分 放 電 試 験	$Q_{\max}$ at $E/\sqrt{3}$ (C)	6.4×10^{-10}	7.2×10^{-9}	1.85×10^{-9}	3.0×10^{-9}	2.75×10^{-9}
		$Q_{\max}$ at E (C)	1.9×10^{-9}	3.7×10^{-8}	5.0×10^{-9}	5.5×10^{-9}	6.0×10^{-9}
	交 流 電 流 試 験	第 1 電 流 急 増 電 圧 (kV)	6.0	9.0	9.0	10.0	9.3
		第 2 電 流 急 増 電 圧 (kV)	22.5 以上	16.5 以上	16.5 以上	17.25 以上	22.5 以上
破 壊 試 験	絶 縁 耐 力 試 験	平 均 値 (%)	83.0	68.5	63.5	71.1	85.6
		標 準 偏 差 (%)	4.4	12.3	6.4	8.8	5.3

※ $\tan \delta_0 = \tan \delta$ at 2 kV, $\Delta \tan \delta$ at $E/\sqrt{3} = \tan \delta$ at $E/\sqrt{3} - \tan \delta_0$, $\Delta \tan \delta$ at $E = \tan \delta$ at $E - \tan \delta_0$ (E = 定格電圧)

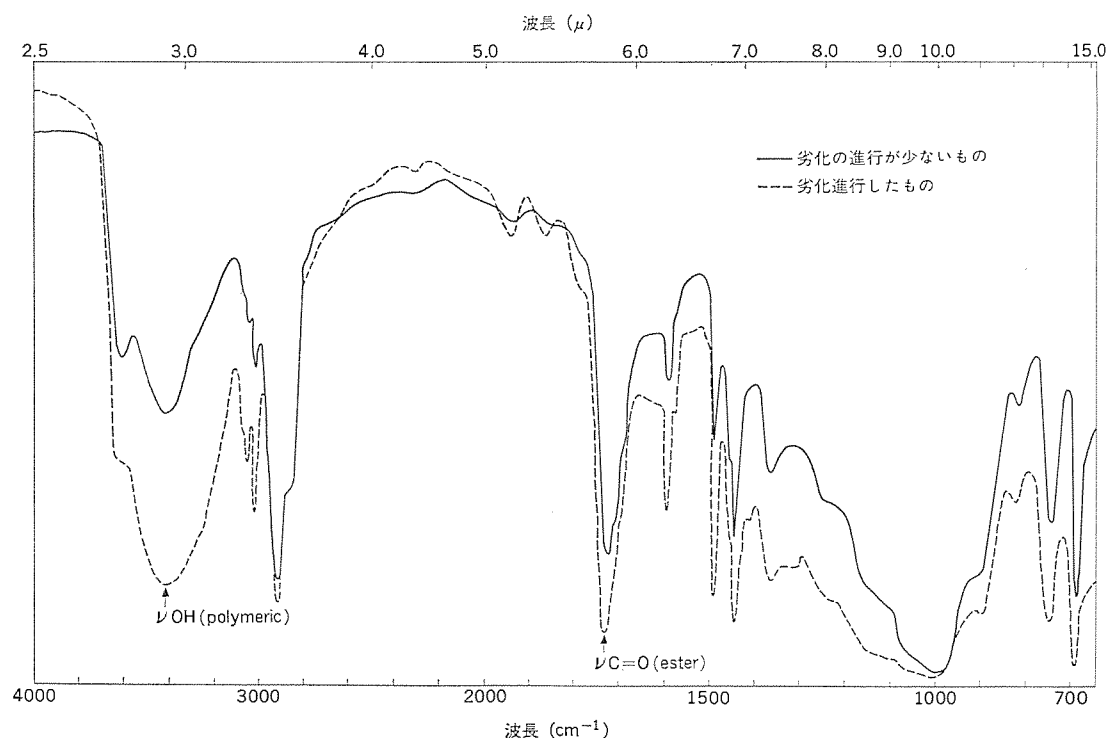


図 1. 赤外線分光分析結果

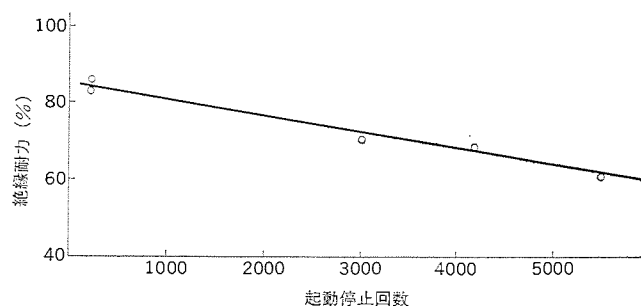


図 2. 起動停止回数と絶縁耐力の関係

各コイル単体で最低の破壊電圧を示す位置は表 3. に示すように、起動停止回数が多くなるにしたがってスロット内部より、スロット端部からコイルの曲がり部にかかる部分に移行する傾向にあり、また最低の破壊電圧を示すコイルの位置は必ずしも高電圧端子側に近いものに限られておらず中性点に近いものもあり、電気的劣化の影響よりもヒートサイクル劣化の影響が大いことを示唆している。

4. 5 絶縁耐力と非破壊諸試験との相関

残存絶縁耐力と非破壊電気試験の相関を、弱点比 (R_{5kV}/R_{10kV})、定格電圧及び運転電圧における $\tan \delta$ 増加分 ($\Delta \tan \delta$ at E , $\Delta \tan \delta$ at $E/\sqrt{3}$) と最大放電電荷量 ($Q_{\max}$ at E , $Q_{\max}$ at $E/\sqrt{3}$) について分析を行ったが、これまで収集し得たデータからは有意と思われる結果は得られなかった。弱点比、 $\tan \delta$ 増加分及び最大放電電荷量と絶縁耐力との関係を図 3., 図 4., 図 5. に示す。また、化学分析、機械的特性試験結果からも、定性的傾向以上の有意な情報は得られ

ず、今回の試験ではいずれの非破壊試験結果も残存絶縁耐力と定量

表 3. 固定子 コイル 絶縁破壊位置

発 電 機	起動停止回数	絶 縁 破 壊 位 置	
		スロット内部	スロット端から曲がり部分
A 発 電 機	207	100 %	0 %
E 発 電 機	213	71 %	29 %
D 発 電 機	3,050	25 %	75 %
B 発 電 機	4,219	0 %	100 %
C 発 電 機	5,565	0 %	100 %

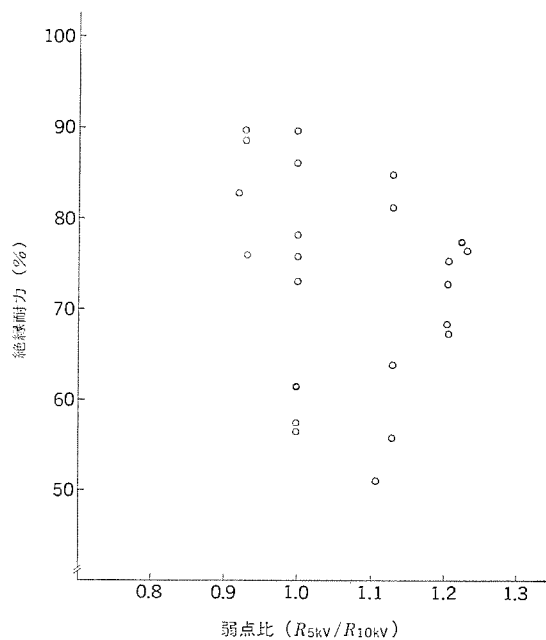


図 3. 弱点比と絶縁耐力の関係

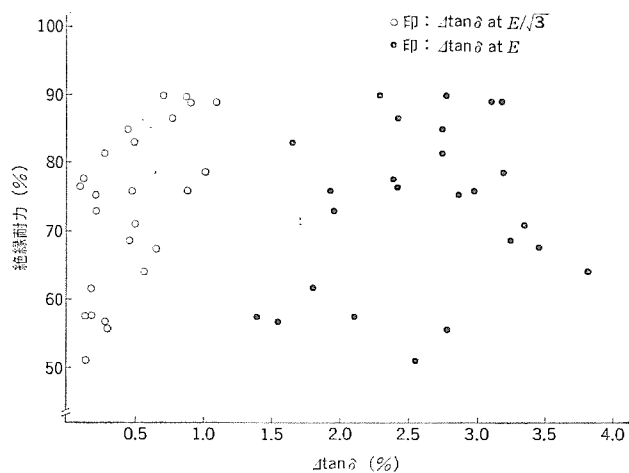


図 4. $\Delta \tan \delta$ と絶縁耐力の関係

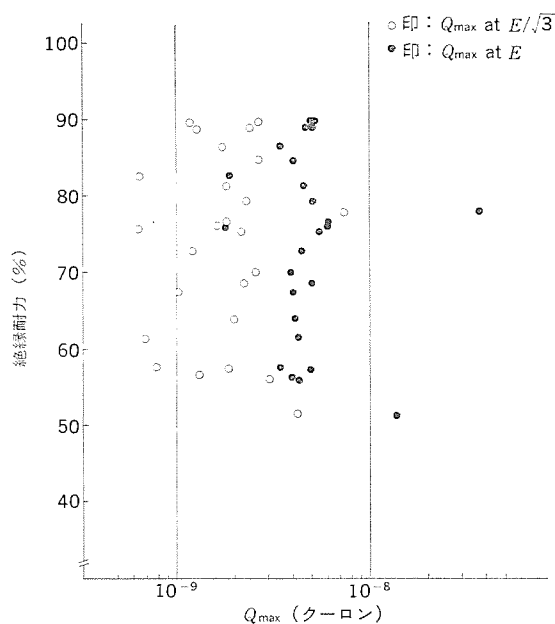


図 5. $Q_{\max}$ と絶縁耐力の関係

的に関係づけるには至らなかった。

5. 残存絶縁耐力の推定法

発電機の安全な運転を保証するには、固定子コイル絶縁の残存絶縁耐力レベルを知り、適切な処置を行う必要があるが、現在までのところ、非破壊絶縁試験により、固定子コイル絶縁の残存絶縁耐力レベルを推定する技術は確立しておらず、また実運転により経年変化した供試コイルを使用した今回の一連の試験・分析によっても明らかな相関を見出すことはできなかった。

かねて筆者らは、長期課電寿命試験などの各種絶縁劣化試験から精度よく求められている絶縁性能劣化データをベースとして、発電機の運転経歴（起動停止回数、運転時間）から固定子コイル絶縁の残存絶縁耐力レベルを推定する方法を、補修指針として提示してきた。以下にその考え方について述べる。

5.1 固定子コイル絶縁の劣化要因

絶縁物の劣化機構は非常に複雑であるが、偶発的な損傷を除外すれば、主として電気的要因、機械的要因、熱的要因及び環境的要因が複合したものと考えられる。

(1) 電気的劣化

絶縁物に高電圧が印加されると、部分放電が発生し経年劣化を生ずるが、その劣化の程度は、長期課電寿命試験により知ることができる。印加電圧 (V) と寿命時間 (t) との電気的な寿命特性、すなわち $V-t$ 特性は、両対数表示と半対数表示が提案されているが、ここでは便宜的に半対数表示を採用して検討した。半対数表示 ($V = a - b \log t$) での当社旧ダイラシック絶縁の場合)、平均的な運転レベルでの寿命より逆算した年次損耗率は、平均では約 0.9 %、3 σ 下限では約 1.8 % となる⁽²⁾。

(2) 機械的劣化

固定子コイル絶縁には、起動停止に伴うヒートサイクルにより熱応力が繰返し加わって、機械的に劣化が進行する。運転中の磁電振動も絶縁の疲れ劣化の要因ではあるが、定常時電磁力による応力は小さく、ヒートサイクルの影響に比べれば無視しうる程度である。また、突発短絡などの異常時でも比較的影響は小さく、特に過渡電流が大きい場合又は数多く発生した場合以外は考慮に入れなくてよい。

ヒートサイクルによる劣化の程度は、総合機能評価試験、ヒートサイクル試験及び各種機械的疲労試験により知ることができる。当社旧ダイラシック絶縁の場合は、コアとコイル導体の温度差が 70~85°C では、損耗率は 1 サイクル当たり 6×10^{-3} %、100~140°C では、1 サイクル当たり 8×10^{-3} % 程度である⁽²⁾⁽³⁾。実機では温度差は 50~60°C 程度であり、損耗率は 1 サイクル当たり $2 \sim 5 \times 10^{-3}$ % 程度になると推定される。

(3) 熱的劣化

一般的に高分子化合物は、長期間高温にさらされると、分子間の架橋が破壊され絶縁性能はしだいに低下する。この劣化の程度はアレニウス則に従うとすれば、強制加熱劣化試験により知ることができる。当社旧ダイラシック絶縁の場合は 180°C、5,000 時間後の損耗量は 5 % 程度であり⁽²⁾、120~130°C における損耗率は、毎年 0.1 % 程度となり、劣化への影響は小さい。

(4) 環境的劣化

絶縁物を劣化させる環境的要因には、じんかい(塵芥)、腐食性ガス、水分、油分及び放射線などの影響が考えられる。一般的に環境的劣化要因の絶縁物に及ぼす影響は複雑であるが、通常全閉で運転され

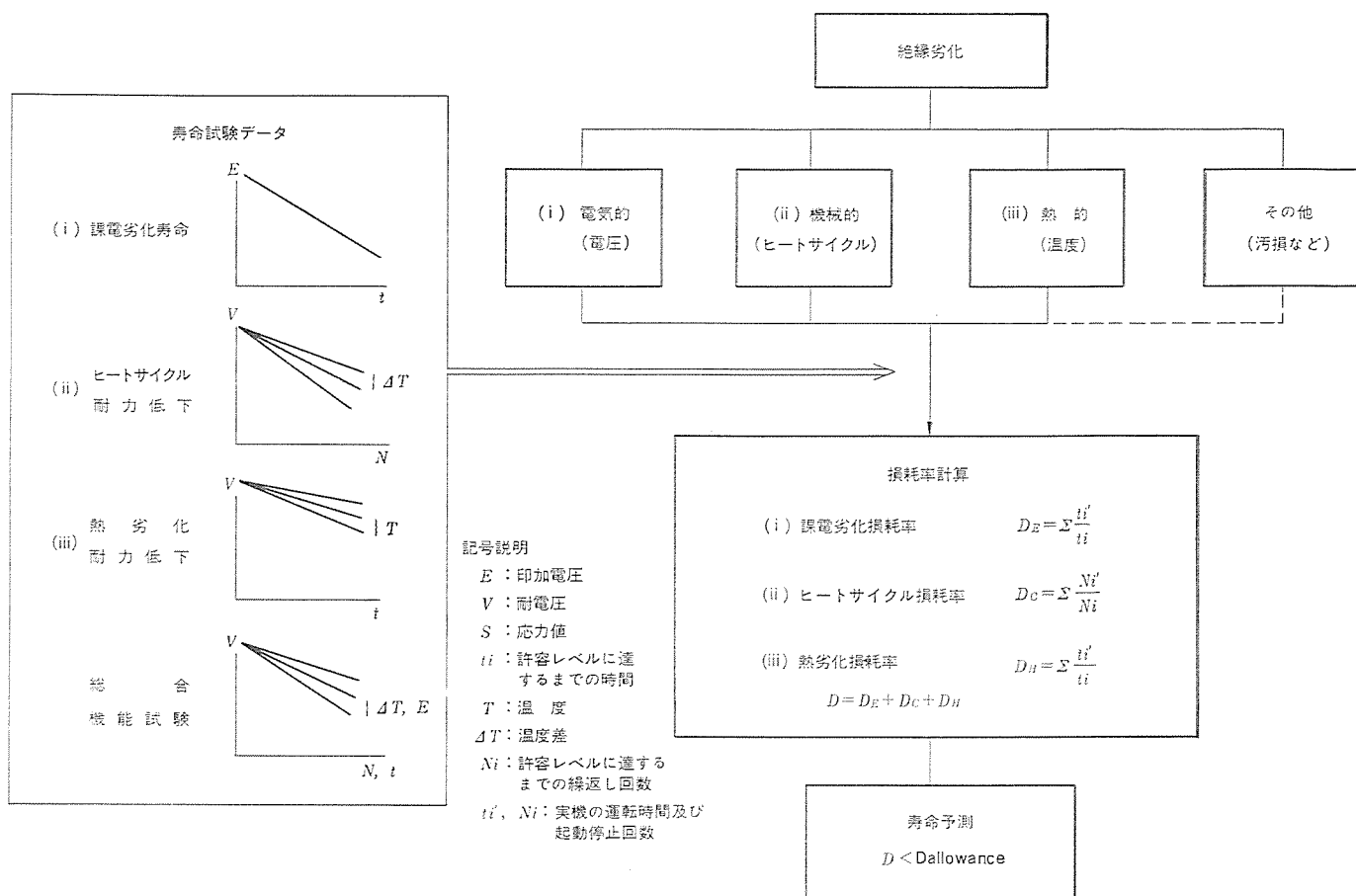


図 6. 高電圧発電機絶縁の寿命予測

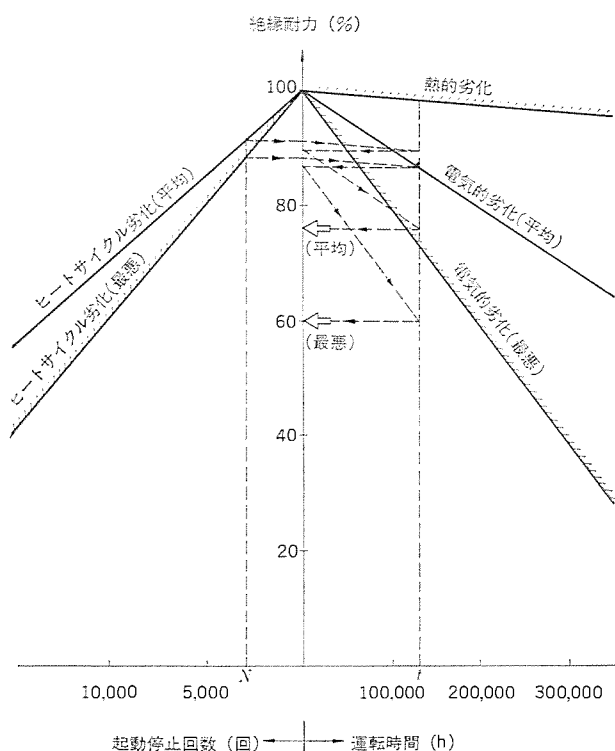


図 7. 高電圧発電機絶縁耐力損耗推定曲線
(旧 ダイアラスチック 絶縁)

表 4. 絶縁耐力損耗推定曲線の基準損耗量
(旧ダイアラスチック絶縁)

劣 化 要 因	基 準 損 耗 量 (%)	
	各種劣化試験データ	実機試験データベース
熱 的 劣 化 (6,760 h 当り)	平均	0.1
	最 悪	0.9
電 氣 的 劣 化 (6,760 h 当り)	平均	1.2
	最 悪	1.8
ヒートサイクル劣化 (起動停止 1,000回当り)	平均	3
	最 悪	4

ことは困難であるが、図 6. に示すように各種劣化要因による絶縁耐力の損耗は、各種劣化要因ごとに独立に作用し、累積効果による全損耗量は、各種劣化要因ごとの損耗量の単純加算によって求められると考えた。

5.2 高電圧発電機固定子絶縁耐力損耗推定曲線

図 7. は、前記の考え方に基づき、これまで各ユーザーに提示してきた当社旧 ダイアラスチック 絶縁の絶縁耐力損耗推定曲線である。中央縦軸に % 絶縁耐力をとり、左側に起動停止回数に対するヒートサイクル劣化量、右側に運転時間に対する熱的劣化量及び電氣的劣化量を半直線で示したものである。この絶縁耐力損耗推定曲線作成に使用した各種劣化要因の損耗量は、5.1 節の考察に基づいて表 4. に示す値を採用した。なお、当社が昭和 46 年以降採用したエポキシ絶縁の損耗量は、旧 ダイアラスチック 絶縁の 1/2~1/3 程度である⁽²⁾。

図 7. から起動停止回数 N 回、回運転時間 t 時間の運転経歴を持つ

るタービン発電機の場合、劣化要因としての影響は無視できる。

(5) 劣化要因の複合的な影響

各種劣化要因がどのように複合的に作用するかを、正確に把握する

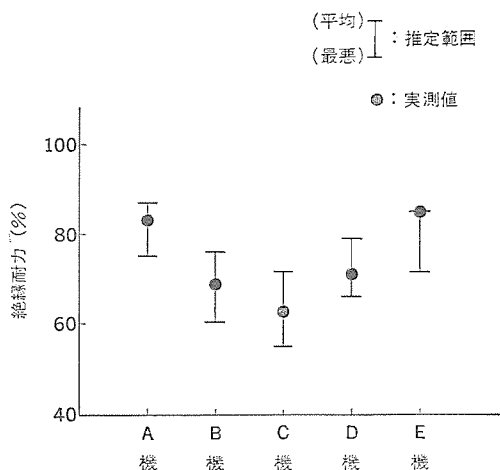


図 8. 絶縁耐力の推定値と実測値の関係

発電機固定子 コイル 絶縁の残存絶縁耐力を推定するには、例示のように、縦軸上に各種劣化要因による損耗量を加算し全損耗量を求めてやればよい。

5.3 実測値と推定値の関係

絶縁耐力損耗推定曲線による推定値と実測値との関係を図 8. に示したが、推定値と実測値とは比較的良好な一致を示し、発電機の運転経歴（起動停止回数、運転時間）から絶縁耐力損耗推定曲線により残存絶縁耐力を推定する方法は比較的高い精度の推定方法であることが確認できた。

また、表 2. に示した絶縁耐力試験結果のデータのばらつきは標準偏差約 7% であり、新品のものと大差なく劣化は平均的に起こっていると考えて差し支えない。各供試発電機のデータの平均値を統計処理して算出した各種劣化要因の基準損耗量は表 4. に示すとおりとなり、これまで各種絶縁劣化試験によるデータをベースとした損耗量と比較すると、ヒートサイクル劣化の影響はやや大きめに、電気的劣化の影響はやや小さめになっているが、おおむね良好な一致がみられる。

以上述べたようにこの推定法によれば、各種絶縁劣化試験と、でき得れば実機測定によるデータ集積を行い、各種劣化要因の基準損耗量を正確に把握してやればかなり精度のよい推定を行うことができ、実用的に有効な残存絶縁耐力推定法であると考えられる。

5.4 補修巻替の時期

長年月運転された発電機の固定子コイル絶縁の継続使用の可否は、残存絶縁耐力が運転電圧あるいは予想される異常電圧に対し十分余裕

があるかどうかを判断して決定されるべきものとする。発電機の安全運転に必要な最低限の絶縁耐力レベルとしては、これまで表 5. に示すような種々の提案があるが、これら諸提案及びその背景となる考え方を総合して、 $(2E+3,000 \text{ ボルト}) \times 0.65$ 、AC 1 分間値 (E : 定格端子電圧) 程度を考えるのが適当と思われる。

絶縁更新の時期をどこに置くかは経済性その他の事情により一様に決めることは困難であるが、発電機がもつ社会的使命の重要性にかんがみ、絶縁耐力レベルが安全運転可能レベルの 2 倍程度まで低下した時点が一応の目安になると考える。

6. む す び

無溶剤合成レジン絶縁のパイオニアである当社旧ダイラステック絶縁の実運転による経年変化を、長年月稼働したタービン発電機より抜取った高電圧固定子コイルについて、総合的に診断・評価した結果、

- (1) モデルによる各種絶縁劣化試験により推定された通りの優れた絶縁性能を保持している。
- (2) モデル試験の強制劣化データと運転経歴より推定した残存絶縁耐力と実測値とは良好な一致を示す。
- (3) 今回の試験範囲では、各種非破壊電気特性、機械特性、化学分析結果などと絶縁耐力との相関は、有意なものが見い出せない。などの知見が得られた。

従来より当社が提案している発電機の運転経歴から残存絶縁耐力を推定する方法は、実用的に十分な精度があることが確認できた。この推定法は発電機保守計画のための有用な指針となり得ると考える。また、実機実測値とモデル試験をベースとした推定値が良好な一致を示したことより、改めて各種絶縁評価モデル試験の有効性が確認できた。特に、タービン発電機の場合、ヒートサイクルの影響が大きく、巻線支持構造を含めた総合的な耐ヒートサイクル性能の評価・分析が重要である。

非破壊諸特性と絶縁耐力の相関については、サンプル数が少なく重点を絶縁耐力変化の測定においたため十分な試験が行えなかったこともあって有用な情報が得られなかった。今後機会をとらえて更に詳細な試験を行い、非破壊諸量をベースとした推定の可能性を探ることとしたい。

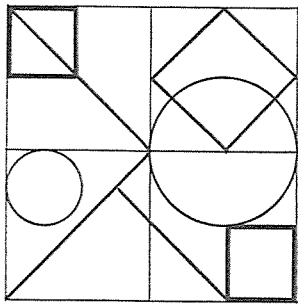
また、最近、非破壊絶縁試験の 1 つとして新交流電流試験法⁽⁹⁾が提案されているが、今後検討してみたい。

参 考 文 献

- (1) 石黒, 伊佐山: 三菱電機技報, 30, No. 5 (昭 31)
- (2) 柴山, 平林, 松田ほか: 三菱電機技報, 48, No. 3, p. 291 (昭 49)
- (3) 原, 川上, 松田, 伊藤: 三菱電機技報, 40, No. 11, p. 1731 (昭 41)
- (4) L. F. Hunt, J. H. Vivian: AIEE, Tech, Paper, No. 51-126 (1950)
- (5) J. S. Johnson: AIEE, Tech, Paper, No. 51-125 (1950)
- (6) 上之園, 福田: 電研所報, 4, No. 4 (昭 29)
- (7) R. V. Wieseman: GE Rev. 24, Aug. (1950)
- (8) 発電機巻線絶縁劣化判定基準委員会: 電力中央研究所技術研究所報告, No. 67,001 (昭 42)
- (9) 寺瀬, 高木: 電気学会論文誌, 99-A, No. 10 (昭 54)

表 5. 安全運転に必要な絶縁耐力レベル

提 案 者	所 要 絶 縁 耐 力
Hunt, Vivian ⁽⁴⁾	$1.5E$ AC 1 分間
Johnson ⁽⁵⁾ 上之園, 福田 ⁽⁶⁾	$(2E+1,000 \text{ ボルト}) \times 0.65$ AC 1 分間
Wieseman ⁽⁷⁾	$6/5 E+400$ ボルト AC 1 分間
電力中央研究所 発電機巻線絶縁劣化判定基準委員会 ⁽⁸⁾	$2E+1,000$ ボルト AC 短時間



特許と新案

張力制御装置 (実用新案 第 1191734 号)

考案者 浅野哲正・柏原正信

この考案は、長尺材の巻取り又は巻出機に使用される張力制御装置に関するものである。

従来巻わく(棒)軸駆動トルクを巻径に比例させるようにした開ループ式の張力制御装置は各種外乱に伴う張力誤差が補正できない欠点があり、また張力検出器の出力と張力設定器の出力とを比較制御する閉ループ式の張力制御装置は応答が悪くまた機械の停止時において閉ループが構成されなくなる欠点があった。

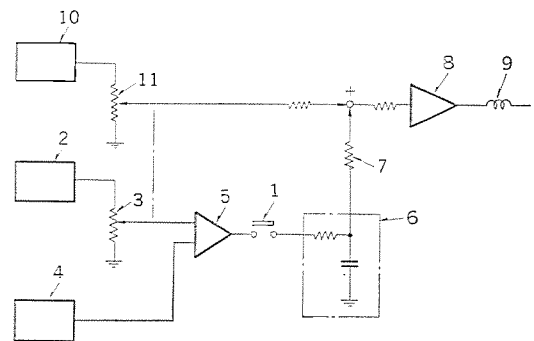
そこで、この考案は開ループ及び閉ループの張力制御装置を効果的に組合せて上記欠点を除去するものである。

図において、巻取機械を起動するときのみスイッチ(1)が閉じ、定電圧源(2)、張力設定用可変抵抗(3)による設定張力値と張力検出器(4)による実測張力値との間に誤差があれば比較器(5)で比較し、積分回路(6)、加算抵抗(7)を通して増幅器(8)に正負の補正入力が増えられ励磁コイル(9)が付勢され巻棒の軸トルクが補正されて張力を設定値と等しく保つことになる。

ここで、この考案においては、張力設定用可変抵抗(3)と巻径検出器(10)の出力調整用可変抵抗(11)を連動し、各可変抵抗(3)(11)による各設定張力は互いに等しく設定されるようにしたから開ループ系の外乱がない場合には長尺材の張力はこの開ループ系のみによって設定張力に制御され、設定張力の大きさは無関係に比較器

(5)の出力は常に零であり、機械の停止中は可変抵抗(11)により巻径検出器(10)の出力が調整されこれを増幅した値の励磁電圧が励磁コイル(9)に印加され、可変抵抗(11)による設定張力と実際の張力が異なっても励磁電圧は変わらない。

このようにこの考案では、簡単な回路構成により閉ループ系が開ループ系における外乱誤差のみを補正するようにしたから閉ループ系の応答が悪くても実用上の問題はなく、また高精度の張力制御を得ることができる。



充電用交流発電機制御装置 (実用新案 第 1170739 号)

考案者 荒金堅次郎

この考案は車載バッテリーを充電する交流発電機の制御装置に関するもので、交流発電機の中性点電圧で付勢される電圧検出線輪で作動する充電表示継電器のハンチング現象を防止し、ハンチング音の発生防止及び接点寿命の延長を図ることを目的とするものである。

図はこの考案の1実施例を示すもので、運転開始時、キースイッチ(8)を閉合すると、バッテリー(5)からキースイッチ(8)、電圧調整器(6)の常閉接点(7)を通して交流発電機(1)の界磁線輪(3)に励磁電流が供給される。一方、同じく、バッテリー(5)、キースイッチ(8)、充電表示灯(13)、充電表示継電器(10)の常閉接点(14)、可動接点(11)、アースへと電流が流れ充電表示灯(13)は点灯し、交流発電機(1)の未発電を表示する。次に機関が起動し、この機関によって駆動される交流発電機(1)が運転を始めると、電機子線輪(2)に電圧が発生し、整流器(4)を介してバッテリー(5)へ充電を開始するとともに、中性点電圧によって充電表示継電器(10)の電圧線輪(15)は付勢され可動接

点(11)は常閉接点(14)から開離し常開接点(12)と閉合する。したがって充電表示灯(13)は消灯し、交流発電機(1)が発電していることを示し、同時に電圧調整器(6)の電圧検出線輪(9)の両端が交流発電機(1)の整流後の出力電圧を検出できるように接続される。

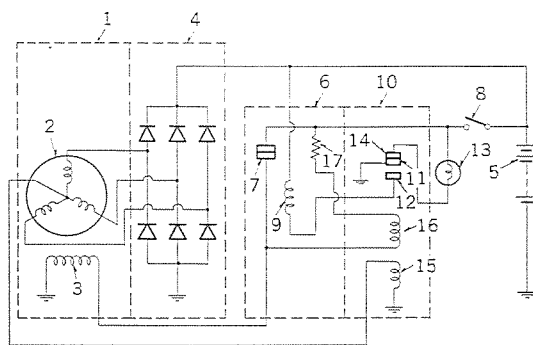
ここで交流発電機の出力電圧が規定値より高くなれば電圧調整器(6)の常閉接点(7)は電圧検出線輪(9)による図示しないばね圧力のバランスによって約 100 Hz の周期で ON, OFF し出力電圧を一定に保つ。この時充電されるバッテリー(5)が満充電で、他にバッテリー(5)と並列につながれる電気負荷がない時は、バッテリー(5)の電圧が交流発電機(1)の出力電圧と一致するまで上昇し、電圧調整器(6)の常閉接点(7)が OFF の時交流発電機(1)の出力電圧が低下する期間において瞬時的にバッテリー(5)の電圧のほうが高くなり、このバッテリー電圧によって電圧検出線輪(9)の付勢が接続される。このため電圧調整器(6)の常閉接点(7)の OFF 周期が必要以上に長くなり交流

発電機(1)の出力電圧の低下が大きくなり、中性点電圧も低下する。充電表示継電器(10)の作動が電圧線輪(15)のみの場合には可動接点(11)は常開接点(12)から開離し常閉接点(14)側に閉合復帰することになり、充電表示灯(13)の点灯を招く。更に電圧調整器(6)の電圧検出線輪(9)が消勢され常閉接点(7)が閉路するため、再び充電表示継電器(10)の可動接点(11)は常開接点(12)側に閉合するように作動することを繰返し、いわゆるハンチング現象を呈する。

そこでこの考案では電圧調整器(6)の常閉接点(7)がOFFした時、元来消弧抵抗(17)を通して界磁線輪(3)に流れる電流を利用し、消弧抵抗(17)と直列に補助線輪(16)を電圧線輪(15)と和動するように巻回することによって、電圧調整器(6)の常閉接点(7)のOFF期間が長くなっても十分に充電表示継電器(10)の可動接点(11)と常開接点(12)の閉合を保持するようにしたものである。また機関の停止時には交流発電機(1)の出力電圧もなくなり、バッテリー(5)の電圧も通常の開放電圧になるため、電圧調整器(6)の常閉接点(7)は必ずONの状態であり、補助線輪(16)の付勢電流は流れないため、充

電表示継電器(10)の可動接点(11)は確実に閉接点(14)側に閉合復帰する。

以上のようにこの考案によれば消弧抵抗(17)に補助線輪(16)を直列接続することにより、充電表示継電器(10)のハンチング現象を有効に防止できハンチング音の発生を防止できるとともに接点寿命を延ばすことができる。



燃 焼 装 置 (特許 第 880284 号)

発 明 者 酒 井 正 侃・原 明

この発明は気体燃料と燃焼用空気との混合比を一定比率に持続させて安定化した燃焼を持続する燃焼装置に関する。

図 1、図 2 において、(1)は液体燃料タンク、(2)は液体燃料搬送ポンプ、(3)は液体燃料を気化し気体燃料を生成する気化装置、(4)は気体燃料切換弁、(5)は気体燃料と燃焼用空気とを混合し混合気を生成する混合室、(6)は混合気を燃焼させる燃焼室、(7)は気化装置の加熱装置、(8)は燃焼空気用送風機である。

まず着火準備までの動作は、液体燃料は気化装置(3)によりガス化され、着火限界気化ガスになるまで図 1 の実線矢印のごとく切換弁(4)を介して液体燃料タンク(1)などの液体燃料供給装置へ環流される。次に燃焼時の動作は、気化装置(3)の内部圧が図 3 に示すごとく時間後に所定の着火限界気化ガス圧 P_1 になれば、切換弁(4)が図 2 のごとく切り替わり、気体燃料は実線矢印のごとく気化装置(3)より切換弁(4)を介して混合室(5)へ供給され、ここで燃焼用空気と混合し燃焼室(6)にて点火せん(栓)により着火し燃焼が開始する。

ここでこの発明は気化装置(3)より切換弁(4)までの抵抗 r_1 と

切換弁(4)より液体燃料タンク(1)までの抵抗 r_2 との和 $R_1(r_1+r_2)$ と、気化装置(3)より切換弁(4)までの抵抗 r_1 と切換弁(4)より混合室(5)までの抵抗 r_3 との和 $R_2(r_1+r_3)$ との関係が $R_1 \leq R_2$ となるように設定する。すると気化装置(3)の内部圧が着火限界気化ガス圧 P_1 に達し、切換弁(4)が切り替わり図 2 のごとく混合室(5)へ気化ガスが流れれば、着火開始準備までの気化装置(3)内の気化ガス圧が図 3 に示すごとく時間とともに P_1 より P_3 上昇する。このガス圧の上昇に伴い液体燃料搬送ポンプ(2)の吐出圧とバランスするまで気化装置(3)内の液体燃料領有域は切換弁(4)が切り替わる時点の位置を持続するか、又はそれより後退するため流入する液体燃料は等価又は減量する。したがって加熱による気化ガス発生速度は同等又は増大し、それに伴い混合室(5)に流入する気体燃料量は等量又は増大するので燃焼室(6)における燃焼は、着火しやすい状態となり、最終的には気化装置(3)のガス圧と液体燃料搬送ポンプ(2)の吐出圧とがバランスして一定の流量になり、混合室での燃料用空気との混合比が一定比率となって安定した燃焼を得ることができる。

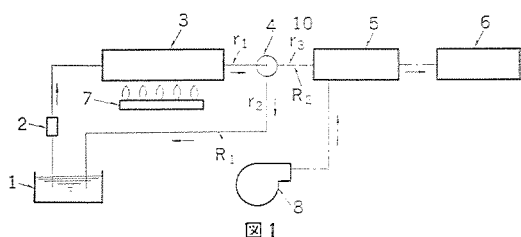


図 1

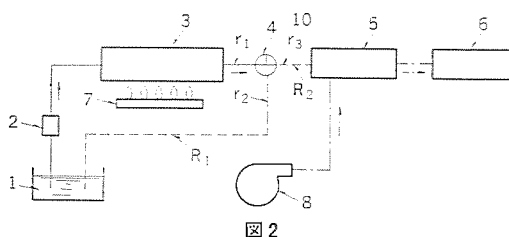


図 2

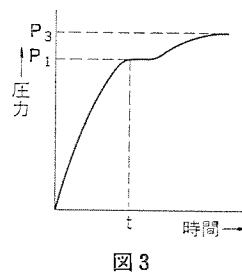


図 3

スピーカーのネットワーク用インダクタのひずみ低減

土屋 英 司*・大村 俊 次**・池田 英 男**・岡部 正 志**・佐伯 多 門***

1. ま え が き

スピーカーシステムの音圧ひずみは年々低減され、これに伴ってオーディオ製品全般の性能が向上している。

音圧ひずみの原因としては、振動系の機械特性の非直線性、ボイスコイルが置かれた空けき(隙)部の磁束分布の不均一性、ボイスコイル周辺の磁性体及び帯域分割回路の素子の非直線性などがある。筆者らは以前から磁性体の非直線性に基づく音圧ひずみの改善に取組み、特殊な工程により製造した Fe-Ni 合金(FN リング)を用いてスピーカーの低ひずみ化に成功しているが⁽¹⁾⁽²⁾、この改善が進むにつれて帯域分割回路に起因するひずみが目立つようになってきた。

帯域分割回路は一般にネットワークと称されるもので、複数のスピーカーユニットから構成されるシステムにおいて音声の電気信号をその周波数によっていくつかの帯域に分割し、各ユニットに供給する役割をもつ回路である。ネットワークにはインダクタやコンデンサが用いられているが、いずれも電気特性は厳密には非直線性を有している。ここでは、前者のインダクタの電流ひずみに着目し、その低減方法について述べることにする。

インダクタは磁心にコイルを巻いた構造となっている。磁心はインダクタンスを大きくするために用いられ、一般に低周波回路では許容電流を高める目的で飽和磁束密度の大きい電磁鋼板を、高周波回路ではうず電流の増加を避けるためにフェライトを使用する。インダクタの電流ひずみはこれら磁心材料の磁気特性が非直線であることによって発生するが、ひずみ率の大きさは、磁心材料の磁気特性だけでなく、その寸法にも左右される。これはインダクタが開磁路となっているため、反磁界の影響を受けるからである。

本文では、まず電流ひずみの発生機構を解明し、ひずみ率を定量的に求める計算式を示した。次に、この計算式からインダクタの低ひずみ化に有効な磁心材料の特性や寸法・形状に関する知見を得た。また、これらの計算結果を立証するために各種インダクタを試作してひずみ率を測定した。これら解析的・実験的検討によって電流ひずみを低減するための諸条件が明らかとなり、低ひずみインダクタの開発に成功した。

2. 電流ひずみの予測

磁心材料の磁気特性及び構造と電流ひずみの関係についての基礎的な検討の結果は既に報告している⁽³⁾⁽⁴⁾。ここでは、まず材料磁気特性や構造をパラメータとしたひずみ率の計算式を簡単に説明し、インダクタの低ひずみ化の方法について考察する。

2.1 ひずみ率の計算式

磁心材料の磁気特性の非直線性が電流ひずみの原因となっていることは知られてはいても、これを定量的に扱ったものは少ない。電流ひずみを定量的に予測するためには材料の磁気特性を適当な関数で近似することが必要である。強磁性体では磁界の強さ H と磁束密度 B は図 1. に示すようなヒステリシスループを描く。図中の B_m は最

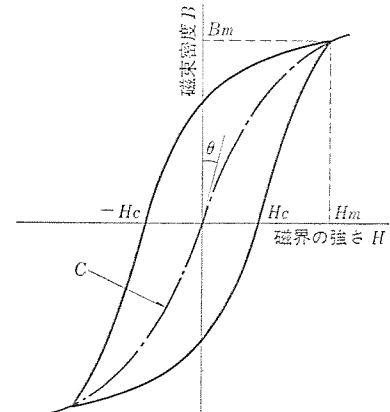


図 1. 磁心のヒステリシスループ

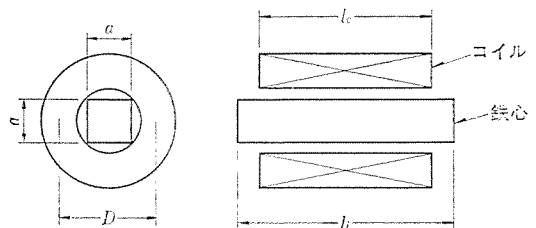


図 2. インダクタの断面図

大磁束密度、 H_m は B_m での H 値、 θ は $H = \pm H_c$ におけるループと B 軸の成す角の大きさである。このヒステリシスループは次式のような形で表現することができる。

$$H = h(B) = f(B) \pm g(B) \dots \dots \dots (1)$$

式(1)の $f(B)$ は図 1. に 1 点鎖線で示した曲線 C の近似式であり、 $g(B)$ は同一の B に対する曲線 C とループの H との差を表している。ヒステリシスループの対称性から、 $f(B)$ は奇関数、 $g(B)$ は偶関数となる。ここでは、次の近似式を用いることにする。

$$f(B) = \frac{H_m - PB_m}{B_m^3} B^3 + PB \dots \dots \dots (2)$$

(ただし、 $P = \tan \theta$)

$$g(B) = H_c \left(1 - \frac{B^2}{B_m^2} \right) \dots \dots \dots (3)$$

電流のひずみ率 K は高調波の実効値と基本波の実効値との比で表される。図 2. のインダクタに正弦波電圧を印加したときの K は式(2)、式(3)を式(1)に代入し、アンペアの周回積分の法則を適用して計算される電流をフーリエ級数に展開することによって求められる。インダクタンスを L 、鉄心の長さを l_i 、鉄心の幅及び高さを a 、コイルの巻数を n とすると、 K は結局、次式で計算できる。

$$K = \alpha \cdot \beta \dots \dots \dots (4)$$

ここに、

$$\alpha = \frac{1}{B_m} \sqrt{0.0625 (H_m - PB_m)^2 + 0.0295 H_c^2} \dots \dots \dots (5)$$

$$\beta = \frac{L l_i}{n^2 a^2} \dots \dots \dots (6)$$

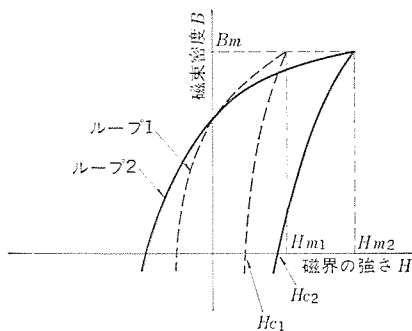


図 3. 2つのヒステリシスループの比較

α は材料の磁気特性から定まる係数であり、ヒステリシスループの形状に大きく依存する。 β

は磁心の寸法やコイルの巻数など、インダクタの構造によって決定される係数と見なすことができる。ここで言う材料の磁気特性とは閉磁路で測定される材料固有の性質であり、磁心の寸法とは無関係のものである。したがって、 α と β は互いに独立した係数と考えることができ、これら両者によってインダクタのひずみを定量的に求めることが可能である。

2.2 磁心材料の磁気特性と電流ひずみ

インダクタの構造が同じであれば K は α に比例する。ここでは、材料の磁気特性と α の関係について定性的に説明する。

通常のインダクタは反磁界が非常に大きいので、磁心の見かけの透磁率はほとんどその構造のみによって決まる。そのため、式(5)の B_m は磁心材料が異なっても不変であると扱って差し支えない。ゆえに、 α を小さくするには、同一の B_m において $(H_m - PB_m)$ や H_c の小さい材料を選べばよい。 $(H_m - PB_m)$ は式(2)から明らかに、図1.の曲線Cが直線的であるか否かによってその大小を判断することができる。

次に、ヒステリシス損と α の関係について述べる。図3.に似かよった2つのヒステリシスループを示しているが、ループ2はループ1を H 方向へ一様に k 倍に引き伸ばしたものである。図から分かるように、両者の間に次の関係式が成り立つ。ただし、記号の添字はループの番号に対応する。

$$H_{m2} = kH_{m1}, P_2 = kP_1, H_{c2} = kH_{c1} \quad \dots\dots\dots (7)$$

このとき式(5)から、

$$\alpha_2 = k\alpha_1 \quad \dots\dots\dots (8)$$

である。一方、両者のヒステリシス損 W_h は次のようになっている。

$$W_{h2} = kW_{h1} \quad \dots\dots\dots (9)$$

したがって、式(7)の関係が成り立っている2つの材料では、 α と W_h は比例関係にある。もちろん、すべての磁性体が図3.のような関係にあるわけではないが、一般に H_m が大きい材料では H_c 、 P も大きくなる傾向があり、 W_h と α は強い相関があると言える。

このように、ヒステリシス損は低ひずみインダクタを実現する場合の磁心材料の選択に有力な手がかりとなる。

2.3 インダクタの構造と電流ひずみ

式(6)の L がある値に設定されているとき、 β を低減するには l_i を小さくして n と a を大きくすればよいが、このとき、インダクタに含まれている電気抵抗 R も変化する。 R が大きくなるとスピーカのボイスコイルの制動が低下し、特に低周波領域で音圧ひずみが大きくなる。また、 L も l_i 、 n 、 a によって変化するため、これらの値を個別に変えることはできない。したがって、インダクタの β を低減し

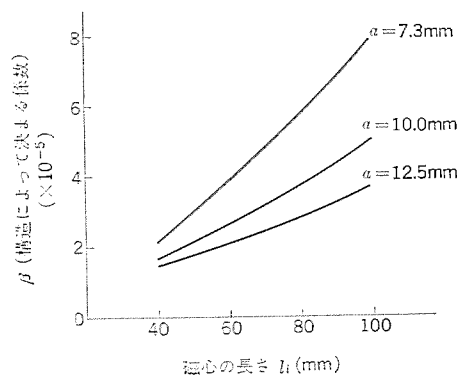


図 4. β の計算結果($d=1.2\text{mm}$)

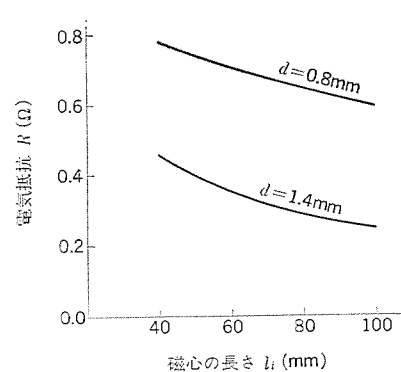


図 5. 電気抵抗の計算結果($a=10\text{mm}$)

ようとする際には、 R を小さくし、また L を一定に保つように、インダクタの構造を変えなければならない。そのため、 R や L の値も知る必要がある。

図2.に示したインダクタの断面図において、線径 d の巻線を用いて製作したコイルの平均直径 D は次式のようにになる。

$$D = \sqrt{2}a + \frac{\sqrt{3}}{2}d \left(\frac{nd}{lc} - 1 \right) + d \quad \dots\dots\dots (10)$$

これにより、

$$R = \rho \pi D n \quad \dots\dots\dots (11)$$

ただし、 ρ は巻線の単位長さ当たりの抵抗である。一方、 L は磁心が飽和磁化に達していなければ次式で求められる。ここで、 μ_0 は真空の透磁率である。

$$L = \frac{\pi l_i n^2 \mu_0 \left\{ 1 - \frac{0.7}{3} (lc/li)^2 \right\}}{4 lc \sqrt{(D/lc)^2 + 1} \left(\ln \frac{3 li \sqrt{\pi}}{4 a} - 1 \right)} \quad \dots\dots\dots (12)$$

磁心の磁束密度がある値(B_c)を超えると H_m が急に大きくなるため、2.2節で説明した α が急増するようになるが、磁束密度がこの B_c となるときの電流はインダクタの構造によって定まる。以下、このときの電流を許容電流と呼ぶことにする。許容電流 I_c は磁心内の磁束分布から計算され、次式で近似できる。

$$I_c = \frac{3na^2}{4\sqrt{2}L} B_c \quad \dots\dots\dots (13)$$

B_c の値は材料によって異なるが、例えば方向性けい素鋼板では0.7テスラ(T)前後であるとみてよい。 I_c が大きいインダクタは大電流に対してもひずみ率の増大が少なく、インダクタの構造を決定する上で I_c は β とともに重要な因子である。

これら相互の関係を考慮した解析結果の1例として、 $L=5\text{mH}$ のときの磁心の寸法や d に対する β 、 R 、 I_c の変化を示す。なお、 lc は l_i より4mm小さいものとし、 n は式(10)、式(12)から逆算している。図4.から分かるように、 l_i と a が β に及ぼす影響は非常に大きい。 l_i が小さくなると β は減少するが、これは反磁界が大きくなるために見かけの磁気特性が直線性を増すからである。その反面、見かけの透磁率が低下し、必要なコイルの巻数が増える。そのため、図5.に示すように R が増大する。また、図6.は式(13)の B_c を0.7Tとしたときの I_c の計算結果を示したものであるが、 I_c は a のみに依存すると考えてよいようである。つまり、 a を大きくすることにより、 β が低減されるばかりでなく、同時に I_c を増大できるという利点を得られることになる。

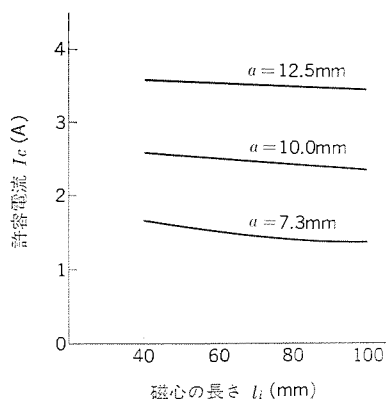


図 6. 許容電流の計算結果

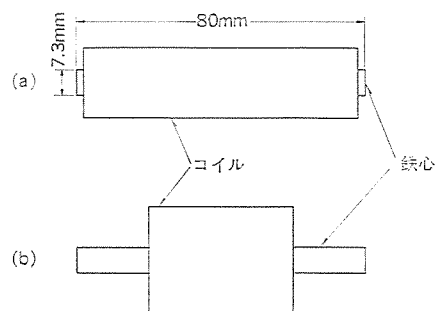


図 7. 巻線の構造が異なる インダクタ

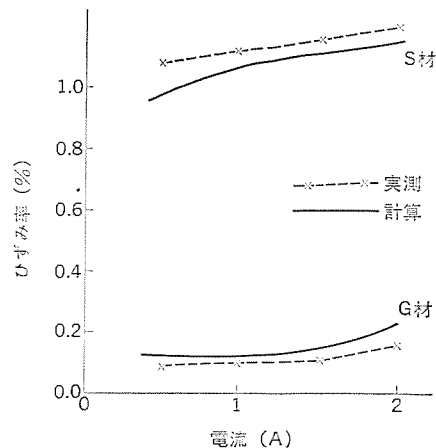


図 8. ひずみ率の電流特性

以上は l_c と l_i がほぼ等しい場合であるが、コイルの形としては図 7. (b) のようなものも考えられる。(a), (b) とともに磁心の寸法は同じであるが、(b) に示すインダクタの β を計算すると、(a) の約 2 倍となっている。したがって、低ひずみ化の観点からは (b) の構造は好ましくないとと言える。

これまで述べたように、インダクタの構造を工夫することによって β や R を低減させ、また、許容電流を高めることができる。

3. 実験結果及びその検討

インダクタの低ひずみ化について、2 章においては理論的な展開を行ってきたが、ここでは、理論と実測との対応について述べる。

3.1 磁心材料の比較

インダクタの電流ひずみは、磁心材料の特性、磁心寸法及びコイルの巻数などの影響を受ける。ここでは、磁心材料の特性と電流ひずみの関係について検討する。

表 1. に計算及び実測に用いたインダクタの材料特性の諸元を示す。まず、表 1. に示す材料を用いて、同じ構造で同一の L を持つインダクタを試作し、ひずみ率の電流特性を測定した。次に、式 (4)、式 (5)、式 (6) に示したひずみ率の計算式を用い、表 1. の材料特性を入れて、インダクタのひずみ予測曲線を求めた。ここで、計算式から求められるひずみ率は、 B_m 対応となるが、式 (14) によって電流対応とした。

$$I = \frac{3na^2}{4\sqrt{2}L} \cdot B_m \dots\dots\dots (14)$$

以上のようにして求めたひずみ率実測値と計算値を図 8. に示した。この結果から、実測値と計算値とはよく一致しており、2.1 節に示したひずみ率の計算式の精度は、かなり高いことが確認された。

表 1. 使用材料の諸元

	材 料 定 数					
	B_m (T)	H_m (A/m)	H_c (A/m)	P (A/m · T)	α	G 材に対する S 材の W_h の比
S 材	0.1	31.6	9.50	29	17.9	8.0
	0.5	62.6	31.6	56	20.4	7.5
	0.7	80.3	40.8	41	21.6	6.7
	1.0	120	46.2	36	22.2	6.9
G 材	0.1	3.40	1.41	29	2.69	
	0.5	8.66	4.07	8.7	2.57	
	0.7	11.5	5.06	6.5	2.76	
	1.0	19.1	6.50	3.8	3.98	

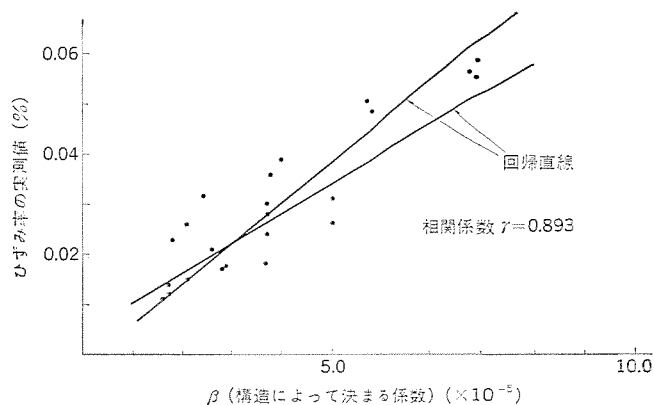


図 9. β の値とひずみ率の実測値の比較 (α 一定)

図 8. において、G 材と S 材とのひずみ率の比は、8~10 となっている。一方、表 1. には、これらの両磁心材料の実測した W_h の比も併示しているが、この値も 7~8 となっており、ほぼ一致した値を示している。これは、2.2 節でも述べているように、インダクタのひずみは磁心材料の W_h と比例関係にあり、同一の構造のインダクタであれば、一般には、ひずみ率は W_h に比例すると言ってよいことを裏づけている。

したがって、 W_h の小さい材料を磁心に用いることが、インダクタの電流ひずみの低減に効果的であり、これらを織り込んだ実用新案を出願中である。

3.2 インダクタの構造の比較

3.1 節では、磁心材料の特性と電流ひずみの関係について検討した。ここでは、インダクタの構造によってきまる β や I_c について検討する。

同一の磁心材料を使用し、 L を一定に保ち、線径 d 、磁心の幅 a 及び磁心の長さ l_i の組合せにより、23 種類のインダクタを試作した。これらのインダクタのひずみ率を $f=250$ Hz、 $I=1.5$ A の条件で測定するとともに、2 章に示した方法により計算した。 β の値とひずみ率の実測値を図 9. に示した。 β の値とひずみ率の実測値との相関係数は $r=0.896$ ($n=23$) であり、両者の間には強い相関がある。この結果からも、式 (6) の β 予測式の精度はかなりよいと言える。したがって、 β の値を小さくすることにより、電流ひずみの低減が可能となる。

次に、 β 及び I_c がひずみ率の電流特性にどのような影響を及ぼすかを調べた。試作インダクタから、 β 及び I_c の値が異なる構造を選び出し、ひずみ率の電流特性を実測した。その結果を図 10. に

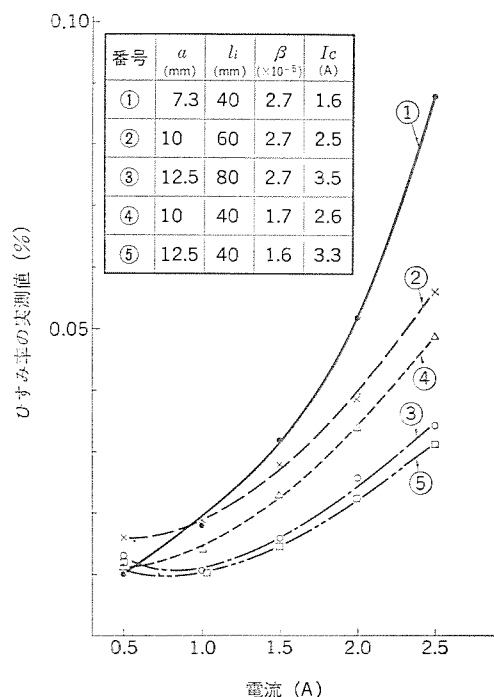


図 10. ひずみ率の電流特性

表 2. 巻線構造と電流ひずみ

インダクタの構造		計 算 値			実 測 値
磁心と巻線	磁心寸法	n (Turn)	電気抵抗 R (Ω)	β ($\times 10^{-5}$)	ひずみ率 at 250 Hz (%)
	a (mm) l_i (mm)				
図 7. (a) $l_c = l_i$	7.3 80	360	0.57	5.8	0.048
図 7. (b) $l_c = 1/2 l_i$	7.3 80	244	0.41	12.5	0.076

注) 線径 0.8 ϕ $L=5$ mH

表 3. 磁心寸法と各諸量の関係

寸 法	a		l_i	
	小	大	小	大
n	増 加	減 少	やや増加	やや減少
電 感	やや増加	やや減少	増 加	減 少
β	増 加	減 少	減 少	増 加
R	— (1)	— (1)	増 加	減 少
I_c	減 少	増 加	—	—
コイル重量	—	—	増 加	減 少

注) — はほとんど変化がない若しくは、明確でないことを示す。

示す。図から明らかなように、 β 及び I_c の改善により、ひずみ率は減少することが分かる。図 10. において、①、②及び③は、磁心の寸法を変えたもので、 β の値が互いに等しく、 I_c の値が異なっているものである。これらを比較すると、 β の値が同じであっても、 I_c の値が大きければ、大きい電流に対してもひずみ率が小さいことが分かる。また、①、④及び⑤を比較すると、 a を大きくすることによって、 β と I_c の両者が改善され、ひずみ率は大幅に減少する

ことが認められる。これらの実測結果は 2. 3 節の計算結果の妥当性を裏付けている。

いままで検討したインダクタは図 7. (a) に示すように、 l_c と l_i がほぼ等しい場合である。図 7. (b) に示すような $l_c = 1/2 l_i$ の構造のものも試作し、ひずみ率を実測した結果を表 2. に示した。図 7. (b) の構造にすることにより、ひずみ率が増加することが認められた。

これまでの理論的考察とインダクタの試作・実測により、インダクタの低ひずみ化に必要な諸条件が明らかになった。その結果に基づき、磁心の寸法と性能、構造の関係をまとめると表 3. のように示すことができる。帯域分割回路に用いられるインダクタでは、性能を表す β , R 及び I_c の値は、 β と R は小さく I_c が大きい程よい。 l_i を大きくすれば R は減少するが、その反面、 β を増加させる。したがって、 R を減少させつつ β を増加させないためには、 a も大きくする必要がある。 a を大きくすることにより、この時、同時に I_c が増加するメリットを得ることができる。

本文におけるインダクタの電流ひずみの低減方法は、まず、磁心材料の磁気特性からひずみを予測し、次に、構造に関する諸条件を明らかにすることにより実現したものである。この方法により、磁心材料及び構造を適切に選ぶことにより、ひずみ率 0.01 % のインダクタが得られることが分かった。

4. む す び

オーディオ機器の性能向上の一環として、帯域分割回路に用いられているインダクタのひずみ低減の具体策について検討した。それらの結果を要約すると次のようになる。

- (1) インダクタの電流ひずみの発生機構を明らかにするとともに、磁心材料の非直線性に基づく電流ひずみを計算する式を求めた。
- (2) 磁心材料の材料特性から求められるひずみ率の係数 α とひずみ率の実測値との間により対応が認められた。
- (3) ヒステリシス損失 W_h とひずみ率とはほぼ比例関係にあることが認められ、 W_h の小さい磁心材料ほど低ひずみになることが分かった。
- (4) 磁心の構造から求められるひずみ率の係数 β とひずみ率の実測値との対応について調べたところ、両者の相関は $\gamma=0.896$ であり、よい相関が認められた。
- (5) 磁心材料の特性及び構造を適切に選ぶことにより、非常にひずみ率の小さいインダクタが得られる。

参 考 文 献

- (1) 土屋、岡田ほか：スピーカの駆動系による非直線ひずみの低減、三菱電機技報、50, No. 12 (昭 51)
- (2) 土屋、池田ほか：低ひずみスピーカの開発—FN リングの特性—、三菱電機技報、51, No. 12 (昭 52)
- (3) 岡部、池田ほか：インダクタの電流ひずみ、磁性材料研究会資料、MAG-78-50
- (4) 岡部、大村ほか：インダクタのひずみ低減、磁性材料研究会資料、MAG-79-25

大容量送油風冷式変圧器用新形冷却器と低騒音冷却扇

秋下 貞夫*・川中 進**・森津 一樹**・品川 博昭***

1. ま え が き

近年、電力需要の増大及び製作技術の進歩に伴い、電力用変圧器はますます大容量化される傾向にあり、火力・原子力発電所用をはじめとして、1,000 MVA 級の送油風冷式変圧器が製作されるようになった。一般に送油風冷式変圧器では、本体の周囲に冷却器を配置するが、大容量化されるに従い発生熱損失に対するタンク周囲長の比率が小さくなり、配置が困難となる。このため、単位冷却器の大容量化、高性能化が要求され、更に火力・原子力発電所などの腐食環境において十分な耐久性が要求される。一方、最近では環境保全の立場から都市近郊の変電所では特に低騒音であることが要求され、送油風冷式でも 50 ホン 級の変圧器が製作されるようになっており、冷却器の高性能化と低騒音化は急速に進展しつつある。このような背景のもとに、大容量高性能冷却器と、これに適した低騒音冷却扇を開発したので以下にその概要を紹介する。

2. 新形冷却器

2.1 設計指針

新形冷却器は、単器容量の増大、高性能化、低騒音化を主体に次の設計指針により開発した。

(1) 単器冷却容量の増大

冷却効率の優れたフィン構造の冷却エレメントを採用して、単器冷却容量を増大させて、変圧器 1 台当たりの所要冷却器台数を少なくすることにより、1,000 MVA 級変圧器の周囲に配置できるようにする。

(2) 耐久性の向上

冷却器の構造、適用材質、表面処理などを検討し、沿海工業地域で長期間連続運転された場合でも十分な耐久性を有するようにする。

(3) 補機損比率の低減

冷却性能の向上と、油ポンプ、冷却扇などの効率向上により補機損比率（補機損 kW / 冷却容量 kW）を低減し、省エネルギー形冷却器とする。

(4) 低騒音化

送油風冷式冷却器では冷却と騒音は反比例関係にあるが、冷却性能の低下を最小限におさえ騒音仕様を満足させるため、冷却器の構造及び新形低騒音冷却扇の検討を行う。

(5) 保守の簡便化

変圧器用送油風冷式冷却器の保守は、冷却エレメント空気側表面の清掃と、冷却扇用電動機の軸受交換及びグリースアップに集約されるが、これらが容易に行える構造とする。

その外、変圧器用冷却器としての条件を満足すべく、過去の経験と新しい技術を加味して種々の角度から検討を加えた。

2.2 標準仕様

新形冷却器の標準仕様及び諸元を表 1. に、概略構造及び外形寸法を図 1. に、外観を図 2. に示す。単器冷却容量は 1,000 MVA 級変圧器用として所要台数、補機などの付属品要素、常設予備比率など

表 1. 新形送油風冷式冷却器の諸元

項 目		性 能 そ の 他 の 諸 元
形 式		EFP 形冷却器
冷 却 器 ニ レ メ ン ト	構 造	鉄製フィンチューブ形
	表 面 処 理	一括溶融亜鉛めっき
フ ァ ン	送 風 量	325 × 4 = 1,300 m ³ /min
	電 動 機 出 力	1.5 × 4 = 6 kW (900 rpm)
油 ポ ンプ	循 環 油 量	4,500 l/min
	電 動 機 出 力	5.5 kW
冷 却 器 寸 法	冷却エレメント	1,640 × 440 × 5,000
	冷却器全体 (冷却扇箱含む)	1,640 × 1,030 × 5,000
重 量 (油含まず)		4.5 ton
騒 音 値 (単 体)		73 ホン (A スケール)
冷 却 容 量		600 kW at 40°C Rise

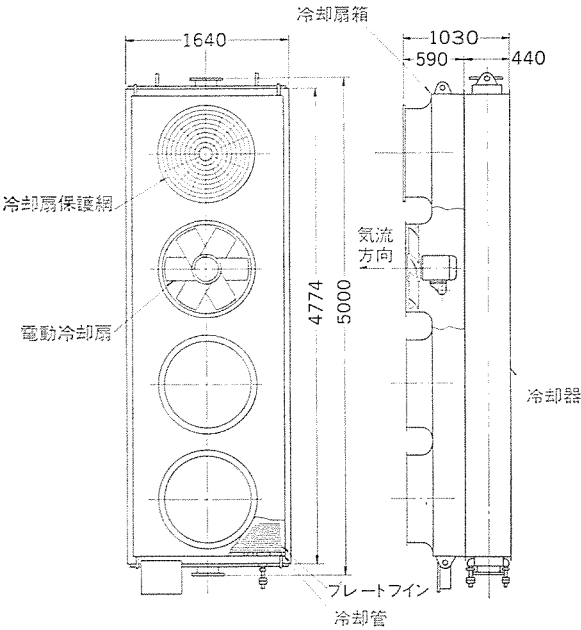


図 1. 新形送油風冷式冷却器構造、外形寸法

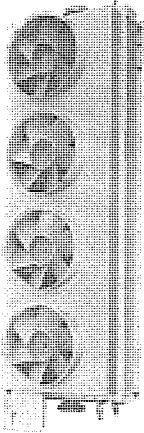


図 2. 新形送油風冷式冷却器

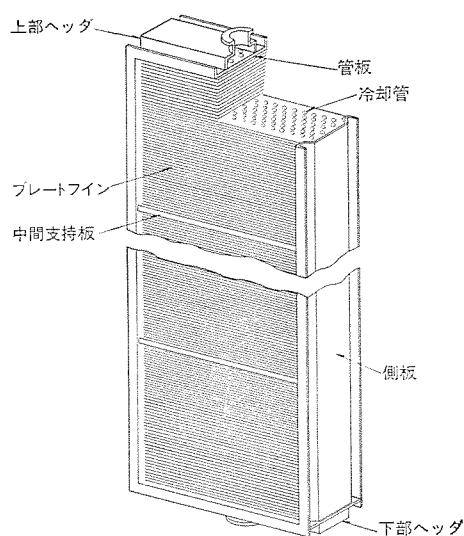


図 3. 新形冷却器冷却エレメント部構造

を考慮して 600 kW (油温 40°C 上昇にて) とした。なお、騒音値については、特に低騒音を要求される場合は、冷却扇を低回転とした防音風どう(洞)を設けるなどにより、大幅な低騒音化が可能である。

2.3 構造

送油風冷式冷却器は管内に油を、管外に空気を強制対流させて熱交換させるものであるが、一般に液体と気体の熱交換器では両者の比熱の差が大きいため、熱交換性能は気体側の伝熱面積に支配される。通常、送油風冷式冷却器では油側と空気側の熱伝達率比が 10~20 もあるため、冷却器を小形、高性能化するには主として空気側熱伝達率の改善と、単位体積内の空気側伝熱面積の増大を図る必要がある。新形冷却器では図 3. に示すように冷却エレメント部にプレートフィンチューブ方式を採用し、プレートフィンには薄鋼板、冷却管には鋼管を使用して両者を組合せて溶融亜鉛めっきすることにより、熱的・機械的に結合させている。このようにプレートフィンと冷却管を金属的に結合させることにより、両者間の接触熱抵抗を除去し、更に冷却管の配列、管径、フィンピッチなどを最適設計することにより、空気側熱伝達率の向上、伝熱面積の増大を図った。また、油側についても、変圧器用冷却器としての適正循環油量に適合したうず(渦)流増加器の構造を検討し、これを油流路内にそう(挿)入することにより熱伝達率の向上を図った。

2.4 冷却性能

新形冷却器の冷却性能を図 4. に示す。これは冷却扇の回転数をパラメータとし、循環油量に対する冷却容量を示すもので、冷却性能は冷却扇回転数 900 rpm、循環油量 4,500 l/min の定格仕様で 600 kW であり、冷却容量は、冷却扇回転数の 0.6 乗、循環油量の 0.2 乗に比例して変化することがわかる。

2.5 耐久性 (特に溶融亜鉛めっきについて)

電力用変圧器は屋外で長期間連続運転される機器であり、特に火力原子力発電所など沿海工業地帯では耐食性の面から厳しい耐久性が要求される。新形冷却器では、冷却エレメントの防食処理として冷却性能、耐久性の両面から最も有利とされており、かつ従来から多くの実績がある溶融亜鉛めっきを採用することとし、冷却エレメントを構成するプレートフィン、冷却管、管板及び上下ヘッダなどはすべて鉄材を使用し、これらを溶接、組立てした状態で一括して溶融亜鉛め

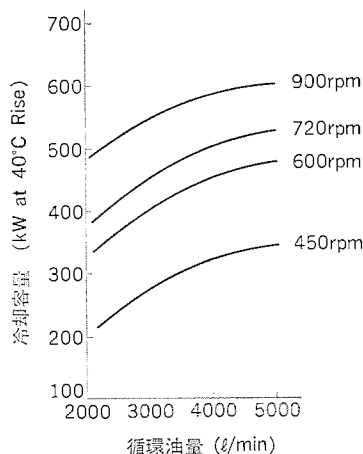


図 4. 新形冷却器の冷却性能

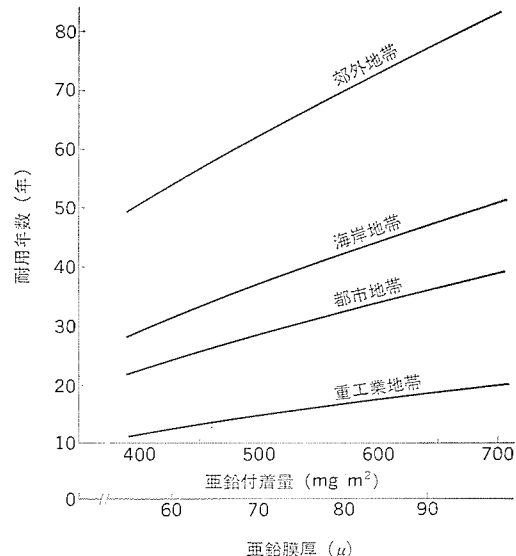


図 5. 溶融亜鉛めっきの耐用年数 (亜鉛付着量と環境別耐用年数) 全国溶融亜鉛メッキ協会調査による

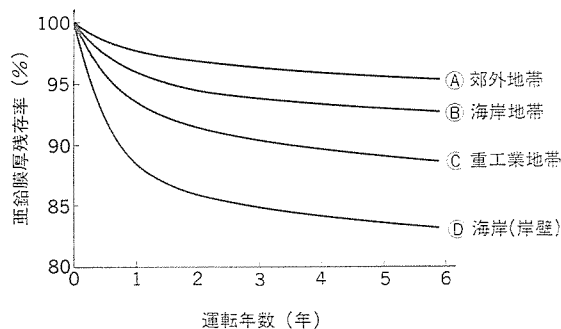


図 6. モデル冷却器による冷却エレメントの耐久性調査結果 (実稼働模擬運転年数と亜鉛膜厚残存率)

っきしている。このようにプレートフィンと冷却管を熱的、機械的に金属結合して、高い熱伝達率と耐振強度を得、同時に耐食性を向上させている。溶融亜鉛めっきの耐用年数はめっき膜厚及び周囲環境によって決まるが、新形冷却器ではこの種構造物としては最大のめっき膜厚を形成させるため JIS-H 8641 (1969)-HDZ 55 C を適用し、冷却エレメント空気側表面の亜鉛膜厚は約 80 μ となっている。図 5. は溶融亜鉛めっき試験片を各地で長期間大気曝露して耐用年数を調査したものである⁽¹⁾。これによると溶融亜鉛めっき鋼の耐用年数は亜鉛膜厚に比例し周囲環境によって大幅に変化することがわかり、沿岸工業地帯の火力発電所に比べ、海岸ではあるが他の工場がほとんどない原子力発電所のほうが耐用年数が長く、郊外の変電所では更に長くなることを示している。また図 6. は変圧器用冷却器か(稼)働状態を模擬したモデルを各地で長期運転し、冷却エレメント部の亜鉛膜厚残存率を調査したもので、これより運転開始後 1~2 年間で表面層の亜鉛が消耗し、以後は消耗速度が極めてゆるやかになることがわかる。なお、この調査における④の曲線は波しぶきのかかる岸壁に設置したため、表面に塩分が結晶するなど塩水噴霧に近い試験となり、他の条件に比べて亜鉛の消耗が多くなっているが、実際の運転状態に比べ非常に過酷な条件下での試験となった。この試験においても環境による亜鉛消耗の傾向は図 5. とよく一致しており、溶融亜鉛めっき冷却器の耐久性を推定する指標とすることが

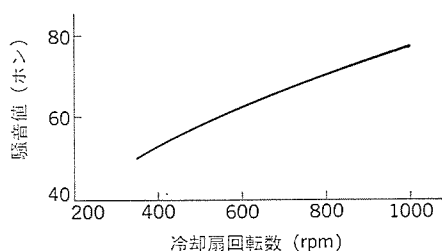


図 7. 新形冷却器の騒音特性

できる。このことは、実益として、30 年近い実績を持ち、その間運転され続けた溶融亜鉛めっき冷却器のエレメント部を調査しても、冷却管表面に数 10 μ の亜鉛層が残存していることで裏付けられており、新形冷却器の場合も亜鉛膜厚を 80 μ 程度とすることによって今後の厳しい使用条件に対しても、期待される耐用年数を十分満足させることができる。

2. 6 補機損比率

新形冷却器では、単器冷却容量を従来の同種冷却器の約 2 倍程度とし、単位体積当たりの伝熱面積増大、熱伝達率の向上などにより、単位循環油量、単位送風量当たりの冷却性能も向上している。また、同時に開発した高効率の低騒音冷却扇を適用することにより、冷却容量に対する補機損比率を従来品に比べ 10～20% 低下させている。

2. 7 騒音特性

新形冷却器の騒音特性を図 7. に示す。図に示す騒音値は、冷却器正面及び左右 45° の各方向 2 m の位置で、冷却器高さの 1/3, 2/3 の 6 点の測定結果から式(1)によって求めたものである。なお式(1)は、測定値間の差が 5 ホン(A) 以内の場合に適用される⁽²⁾

$$\bar{L}_p = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N L_{pi} - Y \quad \text{ホン(A)} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに $\bar{L}_p$: 冷却器の騒音レベル ホン(A)

L_{pi} : i 番目の測定値 ホン(A)

N : 測定点数 $N=6$

Y : 暗騒音補正值の絶対値 ホン(A)

新形冷却器の騒音特性は図 7. に示すとおり、冷却扇標準回転数 900 rpm で約 73 ホンであり、騒音のエネルギーは回転数の約 6 乗に比例して変化する。火力・原子力発電所及び郊外の変電所向け変圧器では冷却扇回転数を低くすることで規制値を満足することができるが、更に低騒音であることを必要とする場合は防音風洞を装備するなどの方法によって対処することができる。

2. 8 保守の簡便化

変圧器用送油風冷式冷却器の保守は、主として冷却エレメント部空気側表面の清掃と冷却扇用電動機の保守であるが、新形冷却器ではこれらの保守事項に対し次の改善を行っている。

(1) 冷却エレメント部空気側表面の清掃

長期間屋外で連続運転すると、空気側表面にじんあい(塵埃)、虫類及び海塩粒子などの腐食因子が付着し、冷却性能の低下、表面の腐食促進などの原因となるので、汚損状態によって水洗その他の方法で清掃する必要がある。新形冷却器では冷却エレメントの空気側フィンがプレート状であり、空気入口から出口までの構造が簡単のため、清掃しやすく、また、構造が堅ろうであるため、高圧の水や蒸気を使用して洗浄しても損傷することはない。

(2) 電動冷却扇の軸受潤滑

冷却扇用電動機の保守は、ほとんど軸受の取扱いに集約される。軸

受の寿命計算精度は年々向上しているが、ある程度確率的現象を伴うので、事故未然防止の見地から周期を定めて取替える必要がある。一般に、この種の電動機に使用する軸受として密閉形軸受と開放形軸受とがあり、前者は使用期間中グリスアップする必要はないが、軸受の寿命は封入グリスの寿命で決まり、一般に 3 年程度といわれている。これに対し後者は定期的なグリスアップが必要であるが、荷重設計に余裕を持たせることにより、期待寿命を長くすることができる。新形冷却器の冷却扇用電動機については、機器の信頼性を重視し、軸受故障による冷却器の停止、変圧器負荷の制限などの事態を招かないこと、及び軸受の取替周期を 10 年以上とすることを目標として設計し、開放形軸受で、スラスト荷負に強いアンギュラコンタクト形を背面組合せにして負荷側に用い、グリスアップを定期的に行うこととして軸受寿命を長くし保守の簡便化を図った。また、冷却扇箱の構造も、グリスアップ及び軸受交換が容易であり、構造物として単純かつ機能的であることを配慮して設計した。

3. 低騒音冷却扇

低騒音冷却扇は主として前述の大形冷却器を対象として開発したもので、その概要は次のとおりである。

3. 1 冷却器低騒音化の現状と低騒音冷却扇開発の背景

変圧器の大容量化と発電所周辺の市街地化に伴って、変電設備の低騒音化が急速に進められており、同時にすえ(据)付面積の縮小、防災の見地から総油量の低減が要求され、従来低騒音仕様に採用されていた送油自冷式に代わり、送油風冷式の採用が望まれることが多くなってきた。送油風冷式変圧器では、変圧器本体の防音対策とともに、冷却器騒音の主成分である冷却扇の低騒音化が重要な課題であり、このため、回転数を下げて発生騒音を低減し、更に防音風洞を設けて大幅な低騒音化を図り、現在最も低騒音仕様のものとして、50 ホン級の極低騒音送油風冷式冷却器を製作、納入してきた⁽³⁾。しかしながら、これらの騒音低減対策は、冷却扇回転数低下による風量・風圧の低下、更に防音風洞内の圧力損失による送風量低下などにより、冷却器の冷却能力を低下させ、所要冷却器台数が大幅に増加し不経済であった。このような背景のもとに、低騒音でかつ、空力的性能の優れた冷却扇の開発が望まれ、従来標準の FT-76 形冷却扇に代わるものとして、先に紹介した新形冷却器に適した低騒音冷却扇を開発したものである。

3. 2 設計指針

変圧器用送油風冷式冷却器には従来から低圧軸流送風機が多く使用されている。この種の送風機の騒音は、翼通過周波数とその高調波成分を有する回転騒音と、流れの渦や乱れに起因する広帯域騒音とからなっており、一般に低騒音化の対象となるのは後者の広帯域騒音である。変圧器用冷却扇についても、翼枚数が少なく、低回転数(1,000 rpm 以下)であるため、A 特性騒音値では、前者の回転騒音はほとんど無視でき、後者の広帯域騒音が低騒音化の問題点となる。通常の使用状態における広帯域騒音の発生原因としては、主に次のものがあげられる。

(1) 翼の後縁からの渦の流出に伴う揚力変動

(2) 翼の上流での流れの乱れによる揚力変動

要因(1)によるものを後流渦乱れ騒音、(2)によるものを吸込流乱れ騒音と呼ぶ。実際の冷却器では、冷却エレメント部での流速均一化、流体抵抗損失の低減などのため、冷却器を冷却扇の吸込側におくことが多いが、これは、冷却エレメント部で生ずる気流の乱れや、吸込

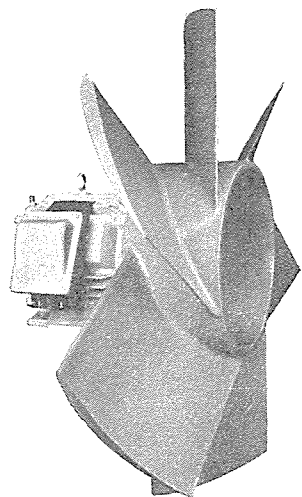


図 8. FT-3076 形低騒音冷却扇外觀

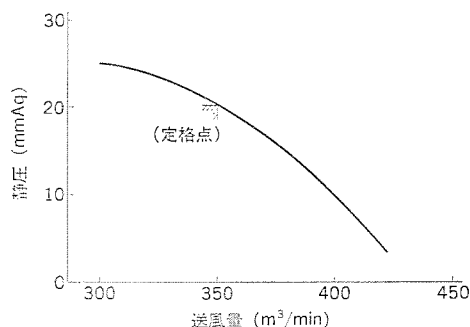


図 9. FT-3085 形冷却扇の性能

表 2. 低騒音冷却扇の仕様及び構造諸元

分類 仕様, 構造諸元	低 騒 音 冷 却 扇		在来形冷却扇
	FT 3085	FT 3076	FT 76
最高回転数 (rpm)	1,200		
口 径 (mm)	850	760	760
ボ ス 比	0.4	0.4	0.3
翼 枚 数 (枚)	6	6	4
翼 形	NACA 4 桁系	NACA 4 桁系	円 弧 翼
最大翼弦長 (mm)	291	260	416
翼 厚 比 (%)	8	8	—
翼 材 質	AC 3 A-F	AC 3 A-F	A 5052 P
重 量 (kg)	34	25	12
駆 動 方 式	電 動 機 直 結		

口ベルマウス部での気流の乱れなどによる吸込流れ騒音の原因になっている。新形冷却器ではこれらの吸込側気流の乱れに起因する騒音を低減するため、低騒音冷却扇に適したベルマウスを試作検討し、冷却エレメント部についても、プレートフィンチューブ形の採用とフィンピッチの検討を行っている。更に新しく開発した冷却扇では、広帯域騒音の中でも後流渦乱れ騒音の低減を主な対象とし、冷却エレメント部、防音風洞などの流体抵抗損失を含めた予想される最大損失を与えた状態での動作点において、翼面上のあらゆる部分で翼性能が最大となるよう設計したものである。これにより、同風量、同風圧を得るための回転数が低くなり、翼周速度の低下により後流渦乱れ騒音を大幅に低減することができるし、逆に回転数を同じにした場合は、大風量、高風圧が得られる高性能な冷却扇となる。

3.3 仕様及び構造諸元

新形冷却器用として開発した FT-3085 形及び相似形で縮小した FT-3076 形の各低騒音冷却扇と在来の FT-76 形冷却扇の仕様及び構造諸元とを比較して表 2. に示す。低騒音冷却扇は前述のように、低騒音化と空力的特性の改善を目標として開発したもので、翼形も在来形の円弧翼に対し、図 8. のようにボスと翼部を一体としたアルミ鋳物で NACA 4 けた(桁)系の翼形翼を採用している。

3.4 性能

FT-3085 形低騒音冷却扇の標準回転数 (900 rpm) における性能曲線を図 9. に、FT-3076 形と FT-76 形 (同一口径) の標準回転数

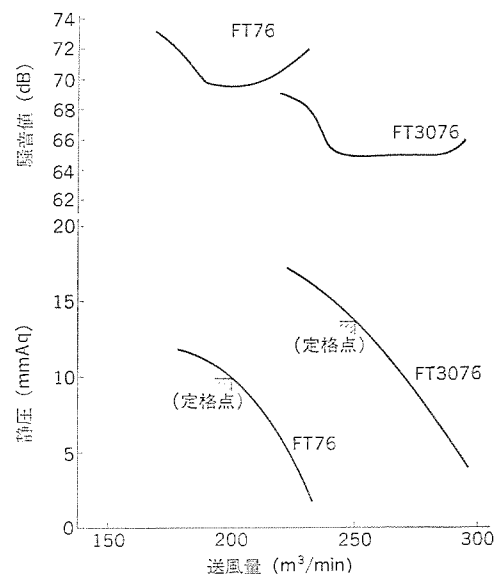


図 10. FT-3076 形低騒音冷却扇の性能 (FT 76 形在来形冷却扇との比較)

(900 rpm) における性能曲線と騒音特性を図 10. に示す。図から、FT-3076 形は在来の FT-76 形に比べて、同一回転数で風量が約 25 % 多くなり、高性能であることがわかる。また、同一風量、同一風圧における騒音値比較は、次の式で定義された単位風量、単位風圧での騒音値を表す比騒音値を求めることによって概略の比較をすることができる。

$$L_s = L - 10 \log \cdot Q \cdot P_s^2 \quad \dots \dots \dots (2)$$

ここに L_s : 比騒音値 (dB)
 L : 定格点での騒音値 (dB)
 Q : 定格点での送風量 (m³/min)
 P_s : 定格点での静圧 (mmAq)

式(2)により両冷却扇の比騒音値を求めると、FT-3076 形が 19 dB、FT-76 形が 26 dB となり、新形低騒音冷却扇は在来形に比べ、約 8 dB 低騒音化されている。

4. む す び

電力用変圧器の大容量化と低騒音化は時代の要求であり、これの推進を側面から支援するためにも大容量低騒音送油風冷式冷却器の開発が望まれていたが、以上に紹介した通り 1,000 MVA 級変圧器に対しては数台で、2,000 MVA 級変圧器でも 10 台余りで処理可能な大容量低騒音冷却器が実現できた。この結果、これを大容量変圧器に適用することにより、冷却器台数は従来の約 2/3 となり、据付面積の縮小、油量の低減、保守点検の簡略化など技術的、経済的に多大の利点を生ずることがわかった。今後は更に冷却エレメント部の構造、防音風洞及び周辺構造の検討を進めて、冷却性能及び騒音特性をより優れたものにしたいと考えている。なお本件開発に多大の協力をいただいた多田電機(株)技術者の方々に謝意を表する。

参 考 文 献

- (1) 日本溶融亜鉛メッキ協会報告書 (昭 41)
- (2) 電協研報告書第 33 巻, 第 2 号 (第 II 編) (昭 52)
- (3) 岡田, 平井, 森津, 電気学会全国大会論文集, 1265 (昭 50)

シエラオーネ納め国際衛星通信用小形地球局

入江 浩一* 糸原 明義**

1. ま え が き

昭和54年8月に西アフリカのシエラオーネ国に納入した国際衛星通信用 インテルサット (INTELSAT, 国際電気通信衛星機構) 標準B地球局は、電子機器を小形シェルタに収容した当社の標準地球局⁽¹⁾である。

地球局の設置されたシエラオーネの首都フリートンは、北緯8.5°、西経13°にあり、大西洋に面した高温多湿の熱帯性気候の地にあり、年間を通して、最高気温35°C、最低気温20°Cであるが、湿度は常時70%から90%あり、6月から9月にかけての雨期には、1日に200mm、1月に1,000mmを超える豪雨もあり、年間雨量は3,000mm以上となる。

以下に、このような熱帯性気候の地で使用される地球局電子機器について特別に考慮した事項、シェルタの空調などについて報告し、あわせて地球局の構成と性能の概要を述べる。

2. 地球局の構成

図1. は地球局のアンテナとシェルタを示す外観であり、大西洋上のインテルサット IV-A 形 F-4 衛星にアクセスしているので、アンテナ仰角は63°と非常に高い。地球局は市内、Wilberforce の短波送信所の敷地に設置されており、海をながめる小高い丘にある。短波送信所に伴う電磁干渉をさけるため、シェルタは全金属性の構造としている。

図2. は地球局の主要機器を示す機器系統図であり、図3. にこれら機器のシェルタ内機器配置を示している。以下に、これら主要構成機器について簡単に説明する。

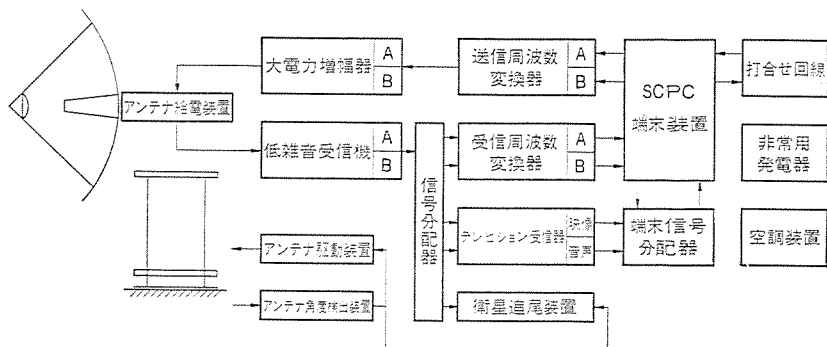


図2. 地球局機器系統図

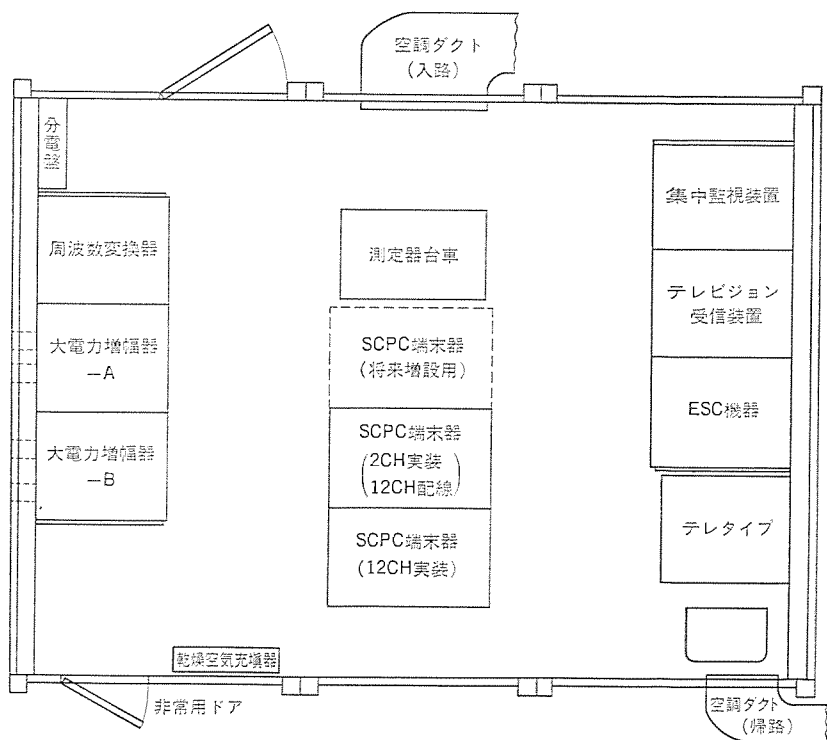


図3. シェルタ内の機器配置図

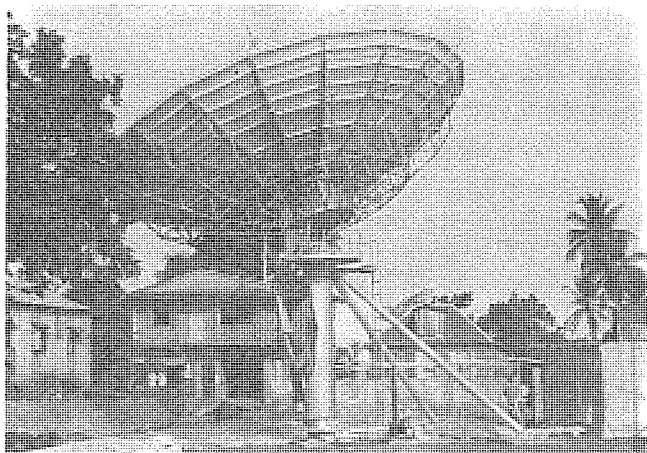


図1. Wilberforce 地球局

(1) アンテナ

直径11mのカセグレン形で、コルゲートホーンを使用し広角放射特性が、インテルサットの規定値 $(32-25 \log \theta)$ dBiを十分満足するようにしている。アンテナは仰角方向と方位角方向に駆動でき、衛星のビーコン信号を利用したステップトラック方式の自動追尾機構をもっている。また、アクセスする衛星の変更に迅速に対応でき、どのアンテナ位置でも60m/sまでの風速に耐える構造となっている。

(2) 低雑音受信機 (LNR)

パラメトリック増幅器と電界効果形トランジスタ (FET) 増幅器を用いた低雑音受信機は冗長構成 (現用予備方式) としており、アンテナの背面小室に設置している。背面小室には、シェルタから空調された空気を送り込み、日照や受信機自体の発熱による温度上昇を抑えている。

(3) 大電力増幅器 (HPA)

飽和出力 750 W のクライストロンを用いた電力増幅器を冗長構成でシェルト内に設置している。電源部には、電圧安定化を含めて小形化と高能率化をはかるため、3 kHz のスイッチングレギュレータとインバータ方式を採用している。送信出力の安定化は、クライストロン印加電圧の安定により行い、複雑な回路となる Automatic Level Control (ALC) は、使用していない。またシェルト空調の熱負荷を低減するため、クライストロンのコネクタ強制空冷の空気は外部よりとり入れ、外部へ放出する構造としている。

(4) 周波数変換器

周波数変換器は 2 重変換形で、冗長構成となっている。送信周波数変換器では、原発振に高安定水晶発振器を用い、これに位相同期した位相同期形局部発振器を用いている。図 4. には、シェルト内の大電力増幅器と周波数変換器 (右側) を示したものである。

(5) SCPC 端末装置

SCPC-PCM-PSK (Single Channel Per Carrier-Pulse Code Modulation-Phase Shift Keying) 端末装置は、インテルサットの SCPC に関する標準仕様を満足するもので、現在 14 回線が実装されているが、あと 12 回線が容易に増設できる構造となっている。地球局全体の構成からは、60 回線まで増設が可能である。

(6) 打合せ回線 (Engineering Service Circuit)

SCPC 回線を利用した音声・ラジエ通信の業務用打合せ回線を、2 回線もっている。

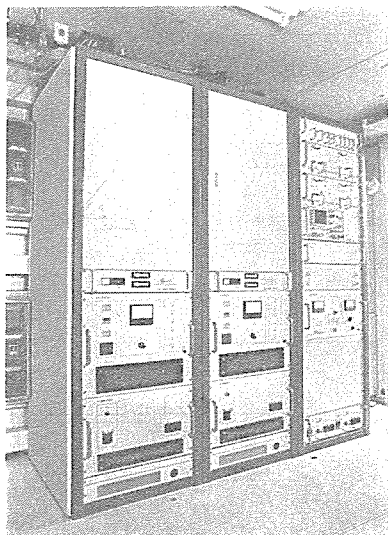


図 4. 大電力増幅器と周波数変換器

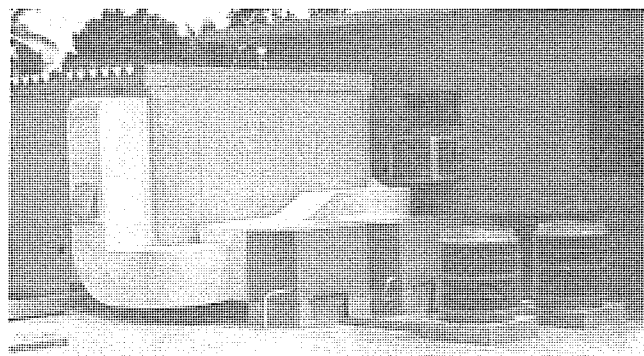


図 5. シェルトと空調装置

(7) シェルト

シェルトの大きさ (内寸) は幅 3.3 m, 長さ 4.3 m, 高さ 2.2 m で輸送時には長さ方向に 3 分割できる構造となっている。シェルトの外観と空調装置を図 5. に示す。空調装置は熱帯地域で信頼性を向上するために冗長構成とした。

3. 地球局の性能

大西洋上のインテルサット IV-A 形 F-2 衛星にアクセスするときのアンテナ仰角は 70° となる。このときの実測主要性能諸元を表 1. にまとめて示した。

表 1. Wilberforce 地球局の性能

受信系性能指数, G/T	: 32.2 dB/K (4 GHz, 70°EL)
受信系雑音温度	: 78 K (4.098 GHz, 70°EL)
受信アンテナ利得	: 51.7 dB (4 GHz)
送信アンテナ利得	: 54.1 dB (6 GHz)
実効放射電力	: 50.4 dBw/CH
SCPC チャネルユニット数	: 14
混変調積実効放射電力	: 13 dBw (12 CH, 58.5 dBw/CH)

現在は前述のように 14 回線の SCPC チャネルユニットを設置しているが、更に増設可能である。最大チャネル数を決める 1 つの要素は、混変調積 EIRP (Equivalent Isotropically Radiated Power) に関するインテルサット規定である。多数波共通増幅に伴う混変調積を求める方法は、いろいろあるが、ここでは代表的な 2 つの方法について求めている。

(1) 等価 2 搬送波により求める方法

これは、現地試験時に Cable & Wireless 社から指示された方法で、等振幅 N 波 ($N > 3$) の場合の搬送波対最大混変調積の比 C/I は、 N 波の全電力和と等しい電力を持つ等振幅 2 波の場合の搬送波対混変調積 $(C/I)'$ から求められる。

$$(C/I) = (C/I)' + 20 \log \left(\frac{N}{2} \right) - 6 \text{ (dB)} \dots\dots\dots (1)$$

これは、 N が変わっても混変調積の振幅は変わらない、すなわち増幅器の入出力特性のコンプレッション効果を考えないものである。クライストロン出力からみたアンテナの実効送信利得を 51.8 dB, EIRP の仰角効果を 3.2 dB, SCPC 波 EIRP を 54.4 dBw, クライストロンの混変調特性を等振幅 2 波増幅の飽和出力からバックオフ 4 dB で $C/I = 26$ dB として式 (1) を用いて計算すると、 $N = 60$ では混変調積の EIRP はインテルサット規格の許容値よりの余裕は 12 dB となる。

(2) BG/T-16, 29 April 1976 の方法

これは、等振幅 4 波の場合の混変調特性から、コンプレッション効果を考慮して求める方法であり、我々の実測したクライストロンの混変調特性を用いて求めると、60 波で余裕は 11 dB となる。

クライストロン特性のばらつきや使用時間に伴う性能低下を考慮しても、最大送信容量は 60 波としてよい。

4. 熱帯性環境への適合化

4.1 大電力増幅器 (HPA)

HPA の電源は、直流-直流変換器形であり、直流 200 V から直流 5 kV, 500 mA をうるための高圧トランスは、3 kHz のく(矩)形波で動作する。この程度の容量のトランスを自然空冷のエポキシモールド形にすれば、小形化が可能であるが、温度上昇の点から限界に近い。ト

ランスの設計と製作については特に次の点に注意を払った。

(1) 内部発熱量を極力減らすため、コア及びエポキシ樹脂の材質の選定、及び含浸法に注意した。エポキシ樹脂は、高温用として可塑剤を用いず、硬化速度の遅いものを使い通常より低い真空度で含浸をした。含浸の良否の判定はコロナ量の測定で行い、コロナ量は従来のものに比べて1/10から1/30にできた。

(2) 他方、高温度での動作で十分な寿命が期待できるように巻線材料、絶縁材料、エポキシ材質を選定した。耐熱寿命の設計値は、110°Cで2万時間である。

(3) 寿命は、温度が10°C下がると2倍のびる。長寿命化をはかるため放熱板つきのトランスとし、強制空冷とした。

以上により、トランス内部の温度上昇の最大値をHPA周囲温度から30°Cにとどめることができ、シェルタ内の気温が40°Cの場合でも、トランスの寿命は30年以上となり、十分な設計寿命を持たせている。

4.2 電子部品一般

一般に電子部品の耐湿性については、次の点に考慮を払う必要がある。

(1) 銀の移行性 (Migration)

モールド形トランジスタ、リレー、スイッチ、コネクタ、端子板などは銀端子が絶縁物上に移行して、絶縁不良や短絡を起こすことがある。微少電流の接点部品は銀接点でなく、金接点を使わなくてはならない。

(2) モールド部品

IC、トランジスタ、ダイオードその他モールド部品については長期的にみれば耐湿性が劣る。リーク電流がふえるので、回路によっては、問題が生ずる。

(3) コネクタ

保管時に結合状態によい金接点以外のコネクタは耐湿性がない。

(4) 抵抗

カーボン皮膜抵抗で100 kΩ以上のものは耐湿性がない。

(5) リレー

密封していないリレーでは、接点の腐食とコイルの電触の問題がある。

以上の諸点に注意の上、更にプリント基板その他の部品にはポリエステル樹脂による防湿処理をほどこした。

アルミ及びタンタル電解コンデンサについては、耐湿性よりも耐熱性が問題であり、前者では容量低下、後者では絶縁不良が生じる。特に寿命の短い小形サイズのもの、使用をさけている。

以上の考慮を払った上、はん(汎)用の低圧直流電源ユニットについては50°C、90%相対湿度の環境に48時間放置48時間動作のテストを行い、HPA用高圧電源については、40°C 80%相対湿度の環境で、30時間連続運転を2回、12時間連続運転を5回行い、異常のないことを確認した。

4.3 架の冷却とシェルタの冷房

図3.のシェルタ内の機器の配置図からもわかるように、電子機器のラックは一部シェルタの壁面にそって配置しているので、ラックの側面や背面からの放熱は期待できない。そこで各ラックにはファンパネルなど設けて、前面から冷気を吸込み、ラックの上部から放出できるようにし、ラック内の通風が十分行えるような配慮をした。

表 2. シェルタ冷房設計のパラメータ

条 件		外 気 : 35°C, 90%相対湿度
		室 内 : 25°C, 50%相対湿度
		冷却風量 : 0.944 m³/s
熱負荷	機器発熱	: 7.13 kW
	蒸発器ファン	: 0.55 kW
	取入れ外部空気 (55 m³/h)	: 0.18 kW
	太陽ふくしゃ	: 2.01 kW
	壁からの熱伝導	: 1.08 kW
	輻射合計	: 10.95 kW
潜 熱		: 1.05 kW
エアダクト圧損		: 10.5 kg/m²
空調機性能	顕熱容量	: 11.86 kW
	潜熱容量	: 3.51 kW
設計マージン	風 量	: 3%
	顕熱容量	: 8%
	潜熱容量	: 70%

シェルタの冷房の設計計算を表2.にまとめてある。この設計に対して、得られた性能の実測値は、

外 気 : 30°C, 90%相対湿度

室 内 : 22°C, 50~60%相対湿度

冷却風量 : 0.85 m³/s

現在は雨期で、外気温は設計の最高温度より低いので、直接の比較はむずかしいが、ほぼ設計値どおりになっていると考えられる。これは設計に際して、機器の詳細なデータが利用できたことが大きな要因と思われ、太陽光による熱負荷についてもシェルタ材料の熱抵抗の実測値を設計計算に使用した。また、環流形冷却方式を採用することにより、冷気を効率よく使用でき、シェルタ内の温度分布を均一化するために、方向可変形のグリルを使用している。なお、現在の設定温度22°Cでは、空調器は約5分ごとの間欠運転であるため、室内の湿度は設計値よりやや高くなっている。

5. む す び

以上述べたような小形地球局用電子機器は、それがシェルタに収容される場合でも、ひとたび定常運転に入ると空調された環境で使用されると考えられるが、部品の耐湿性については、輸送途上や現地でのすえ(据)付段階で高湿度にさらされることを十分考慮しておかねばならない。またシェルタの空調については、温度の均一化をはかるように空気の流れをよく考えた設計を忘れてはならない。

以上紹介した小形地球局は、設置場所の特殊な環境条件にもかかわらず、機器は安定に動作し、インテルサットの標準B地球局としての運用承認を得て、8月にシエラレオネ政府に引渡しを行い英国及びフランスとの間の通信とテレビ受信に用いられている。この地球局の設計段階での種々の検討は、今後同種の機器設計について、多くの参考となるものである。

終わりに、この地球局完成のためご指導・ご協力いただいた関係各位に対して厚くお礼申しあげる。

参 考 文 献

- (1) 石井, 中西: 三菱電機技報, 52, No. 2, p. 159 (昭53)

大容量タービン発電機の軸受

菅波 拓也*・増田 隆広*・大石 紀夫**・田熊 良行**

1. ま え が き

タービン発電機の単機容量の増大に伴うロータの長大化及び大径化によって、その軸受は高荷重・高周速の条件で作動する。図1.はタービン発電機の大容量化に伴って生ずる軸受の技術的課題⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾を示す。これらの課題のうち、タービン発電機の軸受設計において、軸受の温度上昇と安定性は基本的な制約条件となる。更に、軸受の損失増加は発電プラントの高効率化のために、大容量機において特に考慮すべき課題の1つとなっている。

タービン発電機は高い信頼性が要求される機械であり、これらの技術的課題に対処した軸受設計は高度の技術が必要とされる。このため、当社では軸受の諸特性を精度よく予測する解析法を確立するとともに、温度上昇の小さい安定性に優れた大径ティルティングパッド軸受を開発した。

本稿では、タービン発電機軸受の構造と特徴について紹介し、軸受特性の解析法や試験の概要について述べる。

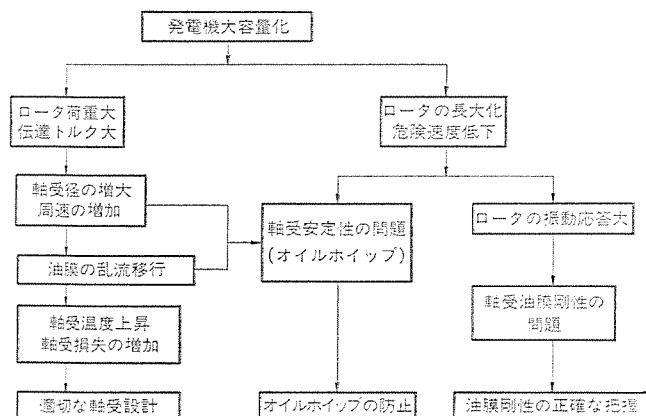


図1. 発電機大容量化に伴って生ずる軸受の技術的課題

2. タービン発電機軸受の構造と特徴

ここでは、タービン発電機に用いられるスリーブ軸受やティルティングパッド軸受の構造と特徴を紹介し、上記の技術的課題への対処について述べる。

2.1 スリーブ軸受

図2.にスリーブ軸受の断面図を示す。軸受キャップには、大きな幅の上部偏心みぞ(溝)を加工している。また軸受荷重は、負荷メタルに形成される軸受張角で支持される。この上部偏心溝は、ポンプ作用による軸受冷却効果とともに、軸受の摩擦損失低減に大きな効果がある。軸受外周には球面座を設け、回転軸の傾きに軸受が追従するようにしている。下部中央溝はオイルホイップに対する安定性向上の目的で加工するが、油膜が2分されるため軸受の温度を上昇させる。しかしながら、解析技術の向上により、特に大容量の2極機を除き、

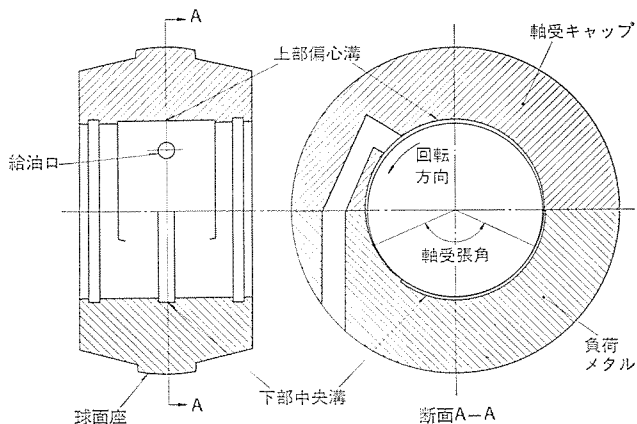


図2. スリーブ軸受

安定性と温度上昇に対して十分裕度をもった下部中央溝の設計が可能となっている。

2.2 ティルティングパッド軸受

スリーブ軸受は構造が簡単であるという反面、大容量機に対しては、安定性・軸受温度の双方を許容値内に抑えることが困難な傾向にある。ティルティングパッド軸受はスリーブ軸受におけるこの問題を本質的に解決するもので、特にその振動抑制機能においてすぐれた性能を発揮する。図3.は大容量2極発電機用として開発したティルティングパッド軸受の断面図を示す。

従来、高圧タービン、直結励磁機にティルティングパッド軸受(4パッド)が用いられてきたが、これらは主に軽荷重を考慮し、安定性向上を

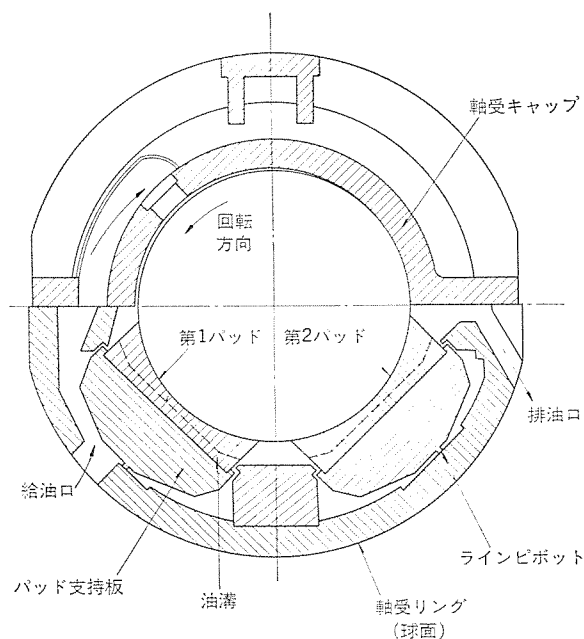


図3. ティルティングパッド軸受

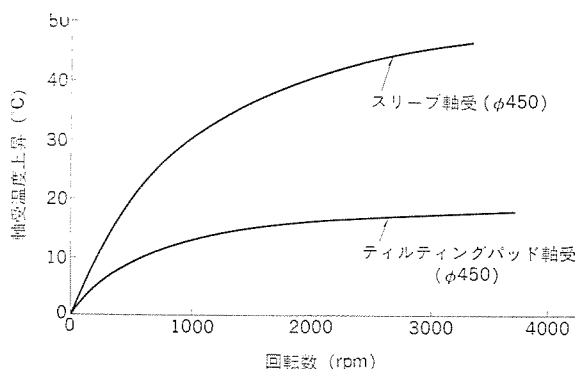


図 4. スリーブ軸受とティルティングパッド軸受の温度上昇値比較

図ったものである。これに対し図 3. に示した ティルティングパッド軸受は高荷重・高周速用として設計している点に特徴がある。その構造は下半部に対称に 2 個のパッドを配置した 2 パッド形で、上半部はスリーブ軸受と同じような構造とし、摩擦損失の低減・加工組立ての簡易化を図っている。また銅板で支持する銅板パッドの使用、並びに銅板パッドの背面に油を通す溝を設けた構造により、パッドに高い冷却効果をもたせている。更に第 2 パッドの後縁から排油する構造を採用し、軸受の温度上昇が小さくなるように配慮している。パッド支持板は回転方向に若干オフセットさせたラインボルトで軸受リングに支持され、軸受リングは球面軸受座で支持する。

図 4. に ティルティングパッド軸受の温度上昇試験結果を同一サイズのスリーブ軸受の試験結果と比較したものを示す。このように ティルティングパッド軸受は本質的に安定である点に加え、温度上昇を十分低く抑えることができる点において、特に大容量機に有用な軸受となっている。当社では 500 MW クラス以上の 2 極機に標準的に採用し、既に数台の発電機に設置済みであるが、いずれも好調な運転を継続中である。

3. 軸受理論の進歩

タービン発電機の軸受は、高周速の条件で作動するため、軸受油膜の流れは層流から乱流へ遷移していることが知られている。また、高周速の条件で作動する軸受の温度上昇は大きく、油膜には温度変化に対応して一様でない粘度場が発生する。このため、その性能の計算は従来の一様な“有効粘度”に基づくことができない。更に、軸受の温度を正確に推定することの重要性は、温度に依存する油粘度が、その負荷特性に大きな影響を与えるためばかりでなく、軸受の設計がしばしばその最高許容温度によって制約されるためでもある。このような背景のもとに、乱流の影響を考慮して軸受の最高温度を含めた諸特性を高精度に推定する研究を進めてきた。

Suganami と Szeri⁽⁴⁾ はこれまでの軸受性能解析上の障害点を克服した熱流体潤滑理論を報告している。この理論モデルの大きな特徴は次の 2 点に集約される。

(1) 油膜の流れが層流及び乱流のいずれの作動条件にも近似的に適用することができる。

(2) 油膜に逆流が発生するような高荷重（高偏心率）の作動条件にも適用することができる。

そして、この理論モデルによる計算結果を実測値と比較し、満足いく一致を確認した。この熱流体潤滑理論では、軸及び軸受からの熱放散も考慮することができるが、詳細は文献(4)に述べられている。

更に筆者ら⁽⁵⁾は、油膜の流れが乱流であり、熱放散が無視できる場合には、油膜の厚さ方向に温度は一様として近似できることを実験的に明らかにしている。

当社では、これらの基礎理論の開発に立脚して、スリーブ軸受やティルティングパッド軸受の給油構造を考慮した実用的な解析法を開発した。

スリーブ軸受の解析には、図 5. に示すような、軸受内部における潤滑油の流れモデルを用いる。そして、負荷メタルの出口端における

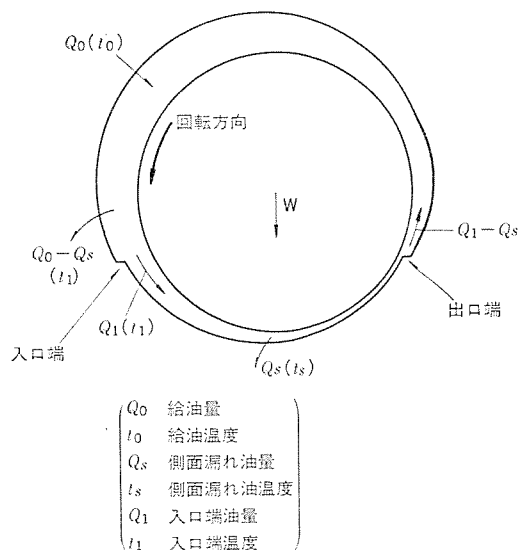


図 5. スリーブ軸受潤滑油流れモデル

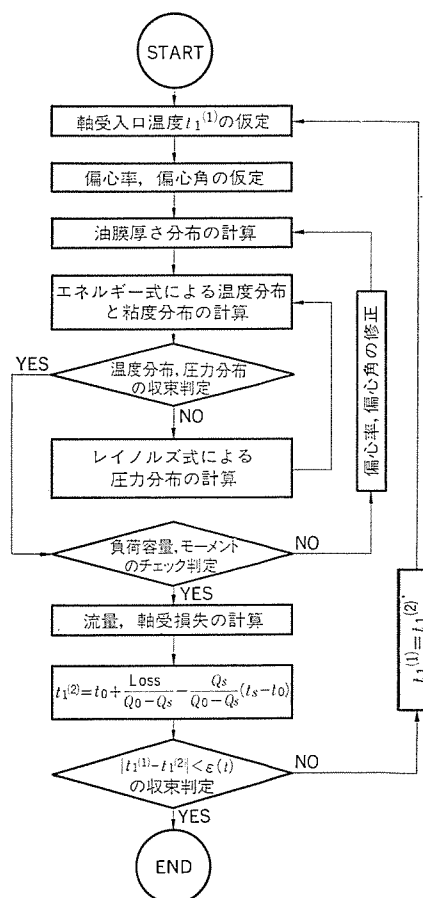


図 6. 潤滑油の再循環を考慮した解析手順

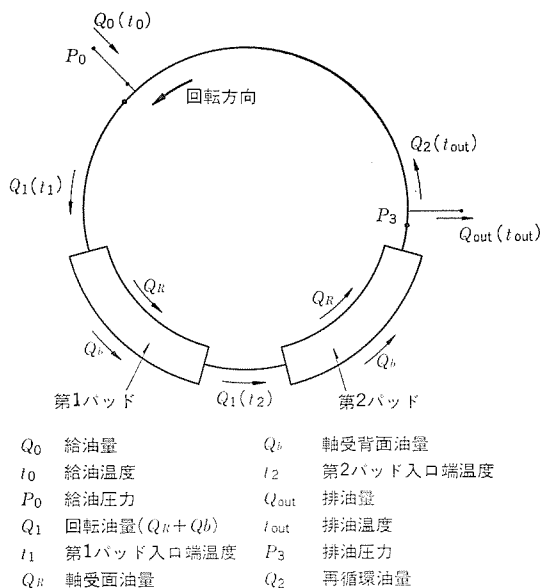


図 7. ティルティングパッド軸受潤滑油流れモデル

Hot Oil が軸受キャップを通して軸受入口端へ再循環する過程を考慮する。この解析法によれば、給油量・給油温度から軸受の諸特性を知ることが可能となる。この潤滑油の再循環を考慮した解析手順を図 6. に示す。

ティルティングパッド軸受においては、軸受キャップより給油した油は、パッド負荷面とパッド背面に分岐、合流をくり返し、一部は排油孔へまた一部は軸受キャップへ再循環する。この様子を図 7. に示す。そして、軸受への給油特性を含めた諸特性はこのような潤滑油の流れモデルを想定し、軸受キャップの粘性ポンプ作用や各部の流路抵抗から解析できるようになっている。

4. 静特性試験

大径軸受の静特性をは(把)握し、その信頼性を確認するため、実機工場試験を利用して静特性試験を実施した。そして前述の基礎理論に立脚したスリーブ軸受やティルティングパッド軸受の実用的な解析法の妥当性を実測値と比較して検証した。

4.1 スリーブ軸受

図 8., 図 9. に直径 450 mm のスリーブ軸受の静特性試験の温度分布や損失の実測値を理論値と対比して示す。実測値は理論値とよく

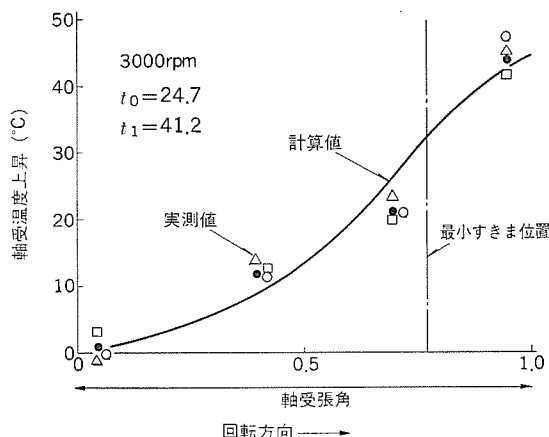


図 8. スリーブ軸受の温度上昇

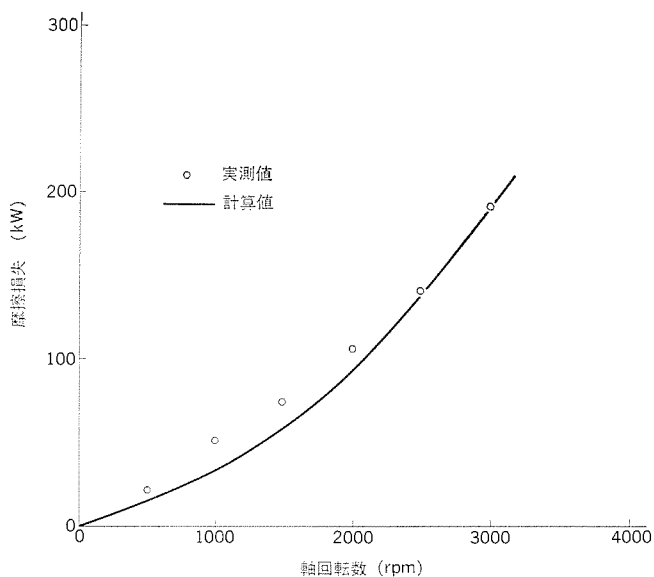


図 9. スリーブ軸受の摩擦損失

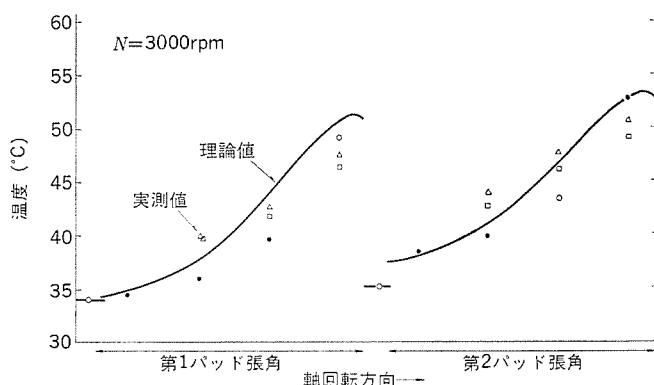


図 10. ティルティングパッド軸受の温度上昇

一致し、この解析法の妥当性を確認した。

4.2 ティルティングパッド軸受

ティルティングパッド軸受の静特性試験は、スリーブ軸受との対比のため、直径 450 mm について実施し、各回転数における軸受静特性を調べた。図 10. はこの試験での実測値の 1 例としてパッド表面の温度分布を理論値と比較して示すが、実測値は理論値とよく一致している。なお、理論にはパッド背面の冷却を考慮した熱流体潤滑理論を適用している。そして、理論の妥当性ととも、ティルティングパッド軸受のもつ優れた諸特性を確認した。

5. 動特性試験

回転軸は、軸受の油膜に浮上して作動するが、この時油膜はあたかも軸を支持するばねと減衰の作用をしている。そして、この軸受油膜の動的諸特性(ばね定数や減衰定数)を正確に知ることが、回転軸の不安定振動や、不つり合い振動の予測に不可欠のものとなっている。このため、スリーブ軸受やティルティングパッド軸受の縮小モデルを用いて、油膜動特性諸定数や安定性を把握する動特性試験を実施した。図 11., 図 12. に軸受動特性試験装置の外観と概略構造を示す。油膜係数は垂直方向及び水平方向の回転軸の変位によって生ずる油膜反力の変動から次式で定義する 8 個の係数である。ここに、 k_{ij} , b_{ij} はばね定数、減衰定数である。

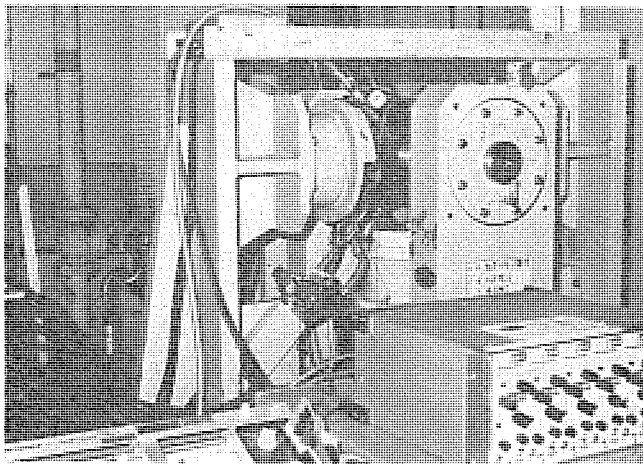


図 11. 軸受動特性試験装置

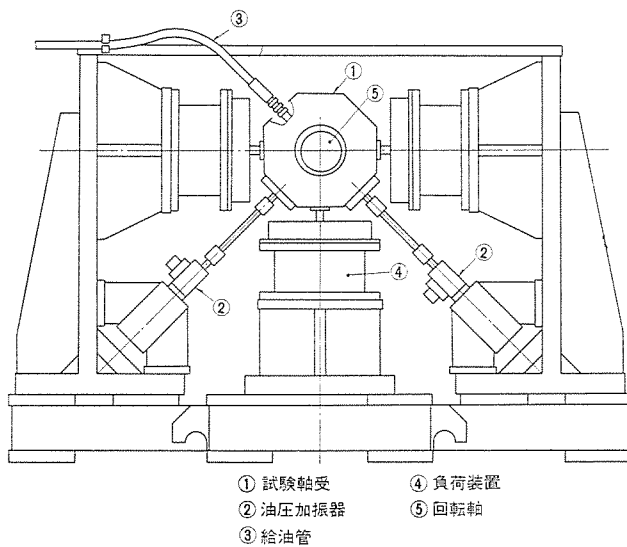


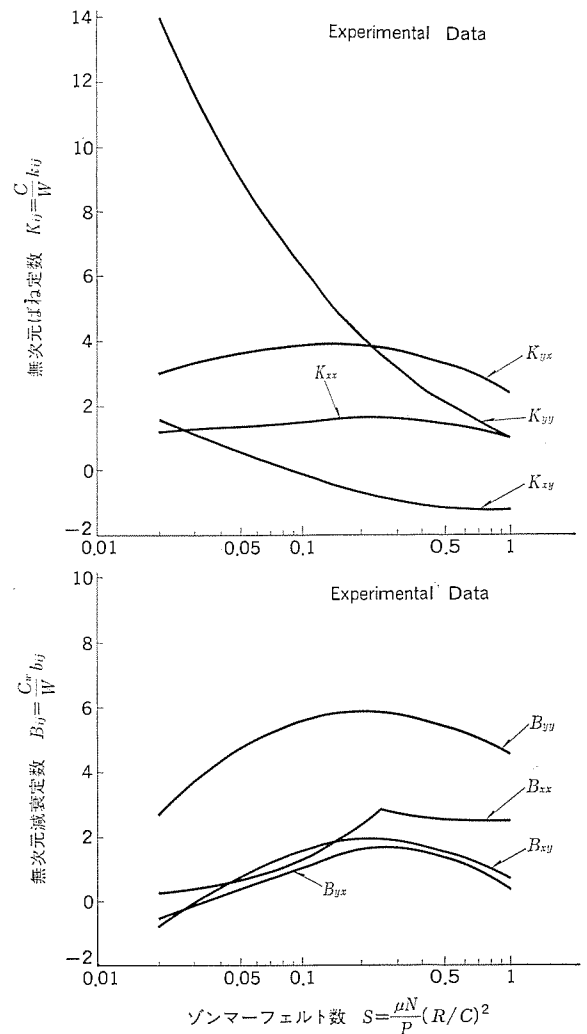
図 12. 軸受動特性試験装置構造

$$\begin{Bmatrix} \Delta F_x \\ \Delta F_y \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} k_{xx} & k_{xy} \\ k_{yx} & k_{yy} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x \\ y \end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} b_{xx} & b_{xy} \\ b_{yx} & b_{yy} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{Bmatrix}$$

このため、試験機は、固定回転軸に対して、軸受を2方向から所定の周波数で加振し、この時の軸受挙動から上記の諸定数を実測した。図 13. は、このモデル試験機で得られたスリーブ軸受の油膜係数実測値の1例であり、理論値とほぼ一致することを確認している。

6. む す び

タービン発電機軸受について、その構造と特徴、並びに当社で進めている開発の概要を紹介した。本文で述べた解析手法は、軸受特性の正確な把握とともに軸受の信頼性向上に大きな役割を果たしつつある。また、発電機用に開発したティルティングパッド軸受は将来の大容量



W: 軸受荷重 N: 回転数 R: 軸受半径
C: 半径すきま P: 軸受面圧 μ: 油粘度

図 13. スリーブ軸受の油膜動特性

機にも適合し得る有用な軸受となっている。

当社ではこの外に動特性試験装置により、軸受油膜の動特性と軸系の不安定振動・不つり合い振動との関連性についても、調査を進めている。今後はこれらの結果をふまえ、軸系を含めた軸受のいっそうの信頼性向上をはかる予定である。

参 考 文 献

- (1) 田熊・大石: 機械設計, 20, 11 (昭 52)
- (2) 菅波: 設計製図, 14, 71 (昭 54)
- (3) 土方・菅波: 電気学会, 99, 4 (昭 54)
- (4) T. Suganami & A. Z. Szeri: Trans. ASME 101, 1 (1979)
- (5) 田熊, 菅波, 大石: 機械学会講演論文集 No. 770-6 (昭 52)

大出力棒状熱陰極形電子ビーム溶接機

下山 仁一* 安永 政司**・佐々木 茂雄**・藪中 文春**・原 且 則***

1. ま え が き

電子ビーム溶接法の対象物は、特殊金属部品に始まり、溶接装置の発達とともに、特殊金属から一般鋼材へ、精密部品から量産部品へ、小物部品から大形構造物へと範囲が広がって、導入する産業分野も、原子力、航空機、精密、自動車、重工業、電機と多岐にわたっている。

大出力電子ビームによる極厚鋼板の1層溶接の可能性が示されて以来⁽¹⁾、溶接工数の低減、複雑な熱履歴による材質劣化の防止を目的として、圧力容器、海洋構造物などの極厚肉鋼板を対象に、大出力電子ビーム溶接機の適用が各国で検討されている。我が国においても、SEP (Specification of Electron Beam Welding for Pressure Vessel) 委員会が設立され、圧力容器の電子ビーム溶接に関する JIS 規格の検討が進んでいる。

極厚肉部材から成る大形構造物の組立てに適用される電子ビーム溶接機は(1)長時間大出力を安定して発生する能力、(2)低真空ふんい気圧で溶接できる能力、(3)割れ、ポイドに代表される溶接欠陥の発生を防止する機能が、要求される。これらの要求を実現するため、三菱電機(株)は長年にわたって、棒状熱陰極形電子ビーム溶接機の開発を進め⁽²⁾、自動車部品の量産ラインにおいて、長い陰極寿命と高い稼働率を実証している⁽³⁾。

これらの設計思想と実績に基づいて製作された大出力棒状熱陰極形電子ビーム溶接機は、最大出力 120 kW と世界最大の出力を保有し、三菱重工業(株)高砂研究所に設置されて、各種厚肉部材に対する溶接施工法の研究、及び大形溶接構造物への適用化の検討に用いられている。

本稿では、棒状熱陰極の特性及び 120 kW 電子ビーム溶接機の概要と主要特性を述べる。

2. 棒状陰極の原理と特性

電子ビーム溶接機的主要構成部品の内で、最も寿命の短い部品は電子銃の陰極である。量産部品を対象とした 6 kW 級の小出力装置においても、陰極の寿命が装置の稼働率を決める主要因となっている。大形構造物を対象とする場合、陰極の寿命が短いと、装置の稼働率低下を招くばかりでなく、長い溶接パスの途中で陰極が破断する恐れがあり、実用化にあたって大きな障害となる。また、陰極の寿命は、溶接電力が増加するほど短くなるため、陰極の長寿命化は大出力電子ビーム溶接機の重要な課題である。

以下、電子ビーム溶接機用の長寿命陰極として開発された棒状熱陰極について説明する。

2.1 動作原理と構成

棒状熱陰極は、電子衝撃加熱形の陰極で、図 1. に動作原理と構成を示している。

円柱形の棒状陰極のまわりに同軸に配置されたフィラメントを通電加熱する。フィラメントと棒状陰極間に電圧を印加し、フィラメントから

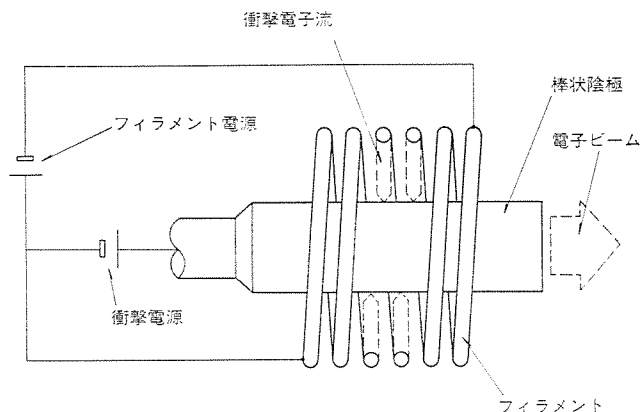


図 1. 棒状熱陰極の動作原理と構成

放射される電子流を棒状陰極の側面に衝撃して、陰極を高温に加熱する。

2.2 出力特性

熱平衡時における棒状陰極の温度 (T_K) は次式で近似される。

$$\alpha W_F + W_B = S_K \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_K^4 + W_C \quad (1)$$

ここで、 α はフィラメントからのふく(幅)射加熱効率、 W_F はフィラメントの加熱電力、 W_B は陰極の衝撃加熱電力、 S_K は棒状陰極の輻射面積、 ε は輻射率、 σ はステファンボルツマン定数、 W_C は熱伝導によって損失する熱量の電力換算値である。

一方、陰極面から放射される熱電子の放射電流密度 (j_K) は、近似的に次式で与えられる⁽⁴⁾。

$$j_K = A_e \cdot T_K^2 \exp(-\phi/kT_K) \quad (2)$$

ここで、 A_e は熱電子放射定数、 ϕ は熱電子放射の仕事関数、 k はボルツマン定数である。

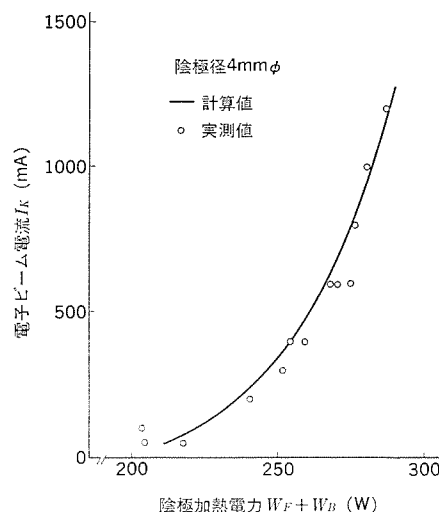


図 2. 棒状熱陰極の加熱及び出力特性

陰極の材料に純タングステンをを用い、陰極の放射電流値として 1.2 A を得るためには、陰極径 (d_K) が 4 mmφ の場合 ($j_K=10 \text{ A/cm}^2$)、電子放射面を 2,950 K まで加熱する必要がある。陰極径を 5 mmφ ($j_K=6 \text{ A/cm}^2$) に増加すれば、陰極温度を 2,880 K と 70 度低くすることができる。

図 2. に、直径 4 mmφ の棒状陰極に関し、陰極加熱電力と電子ビーム電流との関係を示す。計算値と実測値との違いは、陰極材料の純度、陰極の表面状態及び、実効電子放射面の差によると考えられる。

出力 120 kW (100 kV, 1.2 A) の電子銃の場合、電子ビームの集束特性を重視すると 4 mmφ の陰極、陰極寿命を重視すると 5 mmφ の陰極が有利である。

2.3 寿命

棒状熱陰極の寿命に関連する要因を列記すると、次のとおりである。

- (1) 高温に加熱されたフィラメントの蒸発消耗による破断。
- (2) 電子衝撃加熱による棒状陰極側面の蒸発消耗と消耗に伴う加熱特性の経時変化。
- (3) 逆流するイオン流の衝撃による陰極面の消耗(イオンパattering)と消耗に伴う電子ビーム特性の経時変化。

棒状熱陰極の寿命を決める主要因は、使用方法によって異なり、量産部品を溶接対象とする 6 kW 級の装置では、陰極面の消耗も大きい(1)項又は(2)項の要因によって寿命が決まる。大出力装置では、逆流するイオン流が多いため(3)項の要因によって寿命が決まる。

棒状陰極の消耗例を図 3. に示す。陰極面の中心に深いクレータが発生しており、イオンパattering 現象が、電子ビーム溶接機の陰極寿命を決める大きな要因であることがわかる。通電加熱される棒状陰極の場合、板厚が薄い (0.2 mm 程度) ため、イオンパattering によって消耗した箇所の抵抗値は大幅に増加する。このため消耗箇所が局部的に過熱し、蒸発消耗が促進されて、陰極は短時間で破断に至る。ちなみに、図 3. に示される陰極と同一の使用条件下で稼働している棒状陰極の取換え周期は、平均すると 8 時間程度である。

イオンパattering による陰極面の消耗速度は、逆流するイオン電流量に比例するから、電子ビーム電流、電子ビーム通路の真空圧力分布、溶接箇所が発生する金属蒸気量に依存する。このため消耗量を統一的には(把)握することは難しい。使用条件が近い場合は、積算溶接電力に比例して消耗が進む。図 4. に、積算使用電力と消耗量の測定例を示す。

棒状陰極の消耗量が、溶込み特性に与える影響の例を図 5. に示す。この図からわかるように溶込み深さへの陰極消耗量の影響はほとんど認められない。

大出力電子ビーム溶接機の場合、電子ビーム電流量、発生する金属蒸気量共に多く、陰極面の消耗は激しい。棒状陰極に比べて、著しく寿命の長い棒状陰極を採用しても、陰極の取換え周期は短く取換えに伴う作業を簡単にしなければならない。

3. 大出力電子ビーム溶接機の概要

大出力電子ビーム溶接機は、一般に大形構造物の厚肉部材を溶接するために導入されるから、次の条件を満たす必要がある。

- (1) 長時間連続して安定した大出力電子ビームを発生できること。
- (2) 溶接箇所の熔融池で大量に発生する金属蒸気によって、電子銃の電極間で放電(以下アーキングと呼ぶ)が誘起されないこと。

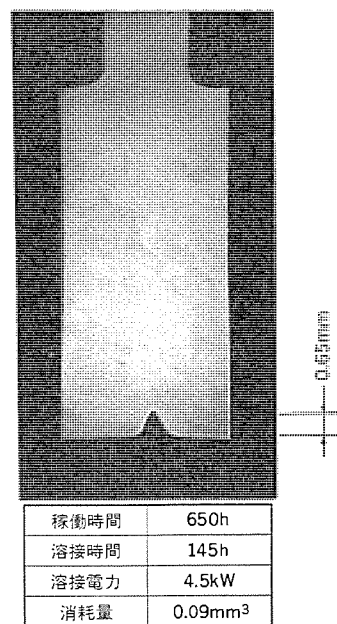


図 3. 棒状陰極の消耗例

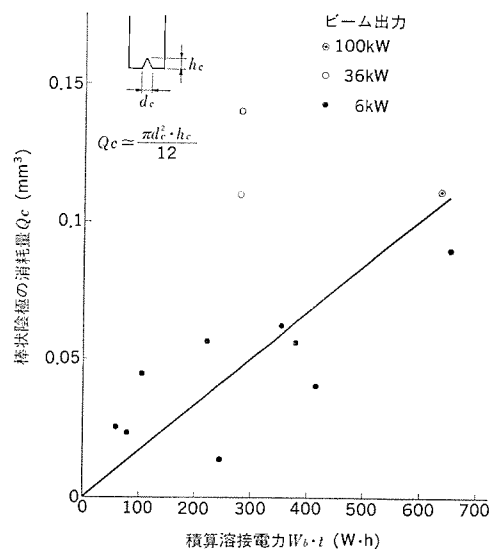


図 4. 陰極の消耗量

消耗量 $Q(\text{mm}^3)$	0	0.29
溶接条件	溶接電力 $W_b=36\text{kW}$ 溶接速度 $V=30\text{cm/min}$	
溶接ビード 横断面		
溶込み深さ $h_p(\text{mm})$	72	70
溶け幅 $d_e(\text{mm})$	8.0	10.8

図 5. 陰極の消耗と溶込み特性(下向溶接)

(3) 排気が容易な低真空ふんい気圧 ($\sim 10^{-2}$ torr) で、安定して溶接が施工できること。

(4) 割れ、ポイドに代表される溶接欠陥の発生を防止する機能を、豊富に備えること。

これらの条件を基に設計した、最大出力 120 kW の電子ビーム溶接機の外観を図 6. に示す。溶接対象物全体を真空ふんい気に入れる全真空形の溶接機で、電子銃は溶接作業室の外部に取付けられる。溶接対象物の形状に合わせて、電子銃の取付箇所と姿勢（下向又は横向）を変えられることができる。

3. 1 電子ビーム発生系

図 7. に、電子ビーム発生系の構成を示す。溶接施工時に発生する X 線を鋼鉄製の溶接作業壁で確実にしゃへいできるように、電子ビームの最高加速電圧は、100 kV に設定している。

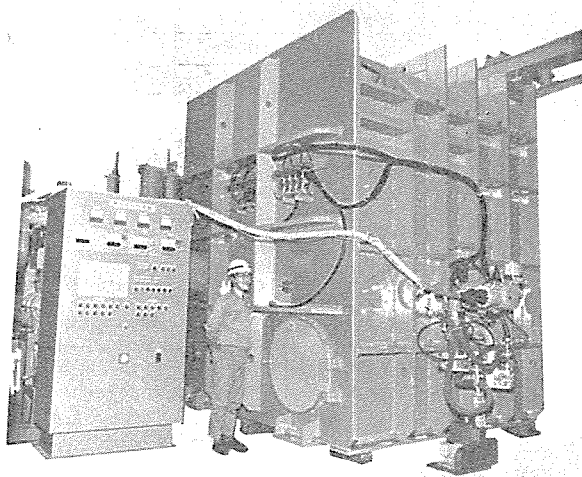


図 6. 120 kW 電子ビーム溶接機

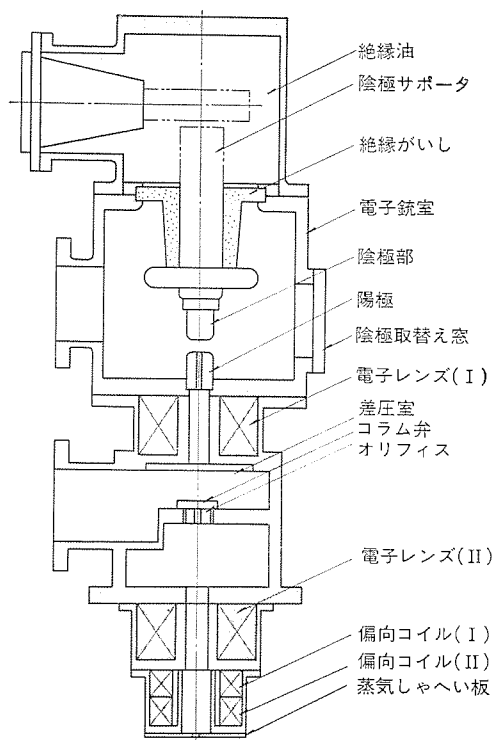


図 7. 120 kW 棒状熱陰極形電子銃の構造

3. 1. 1 陰極部

低真空ふんい気で、大出力電子ビームによる溶接を実施すると、大量のイオン流が陰極に逆流するため、陰極の消耗が激しい。そこで、陰極部は、容易に着脱でき、取換え後の調整を不要にするため、プラグインユニット化している。

3. 1. 2 集束電子レンズ

電子ビーム集束系は、2枚の電子レンズで構成している。このため、溶接対象物の形状、板厚に応じて、電子ビームの集束点、集束角、集束径を最適に調整することができる。

3. 1. 3 偏向装置

2枚の偏向コイルを組込んでおり、それぞれが、2軸 (X・Y) の方向へ独立に $\pm 10^\circ$ の範囲で電子ビームを偏向することができる。このため、下記の機能を独立して発揮することができる。

(1) DC 偏向

(a) 電子ビームを2回偏向させることによって、電子ビームのワークへの投入角を維持したまま、溶接線と直交方向に、 ± 10 mm 電子ビームを偏位させることが可能である。シームトラッキング装置と組合せると、溶接線に沿って電子ビームを追従させることができる。

(b) 電子銃を傾斜して取付けた上、電子ビームの投入角を調整することができるため、蒸気しゃへい板との組合せによって、電子ビーム系に流入する金属蒸気量を減らすことができ、電子銃の動作が安定する⁽⁵⁾。

(2) AC 偏向

電子ビームを線状（直線・円）及び面状に偏向走査し、最適な溶接条件を得ることができる。

3. 1. 4 差圧排気装置

電子銃室と溶接室との間に差圧室を設け、3室を独立に真空排気しており、次の機能がある。

(1) 溶接室の真空圧力が、 5×10^{-2} torr 以下になれば、大出力電子ビームで溶接施工を開始することができる。

(2) 電子銃室に流入する金属蒸気量を減らすことができ、電子銃の動作が安定する。

3. 2 電力制御系

電子ビームの出力を溶接線の目合わせに必要な微小出力から大出力まで、安定して制御できるよう、加速電圧と電子ビーム電流とは、完全独立に制御されている。図 8. に、制御系のブロック図を示す。

3. 2. 1 加速電圧

2次電圧（加速電圧）の信号をサイリスタ制御系に帰還することによって、加速電圧は、 $\pm 1\%$ 以内に安定化されている。また急激な電源変動、負荷変動に対して急速な応答ができるように、1次電圧も帰還回路を形成している。このため、溶接のスパッタなどの飛び込みによって、電子銃の電極間でアーキングが発生した場合、直ちに加速電圧を垂下して、アーキングの継続を断ち、100 ms 後に自動的に加速電圧を復帰させて、溶接を継続することができる。

3. 2. 2 電子ビーム電流

電子ビーム電流の制御法には、ウエネルト電極の電位を調整する方法と、陰極の温度を調整する方法とがあり、大出力装置の場合、出力制御幅が広く、電流値による集束点移動の小さい陰極温度制御方式を用いている。電子ビームの信号を PID 制御系に帰還することによって、陰極の衝撃加熱電力を調整し、電子ビーム電流を数 mA から 1,200 mA の範囲で制御することができる。安定度は $\pm 1\%$ 以内である。

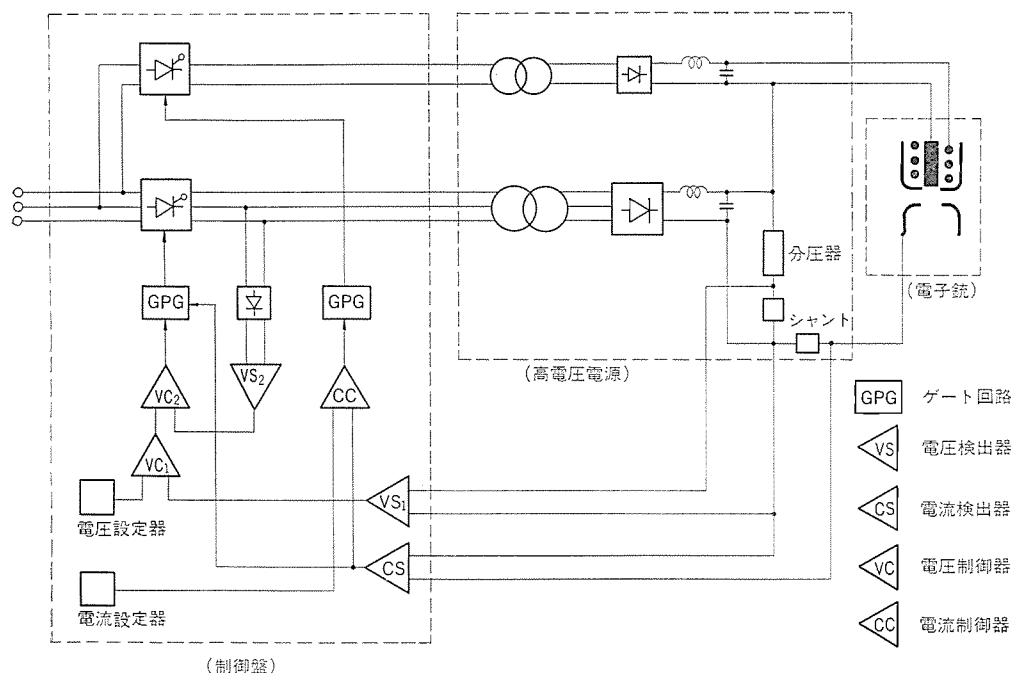


図 8. 出力制御系ブロック図

3. 2. 3 溶接作業室

溶接作業室の大きさは、内面寸法で、2.9 m(L)×2.9 m(W)×3.4 m(H)である。溶接テーブルの移動機構は、X-Y 走行台車と、溶接作業室への搬入・搬出台車とから成り、大形の重量物を溶接テーブルに着脱する作業を、溶接作業室の外で行うことができる。

3. 2. 4 真空排気装置

溶接作業室の真空排気系は、油拡散ポンプ、メカニカルブースタポンプ、油回転ポンプから成り、約 29 m³ の溶接作業室を、30 分で 5×10^{-4} torr に排気する。

4. 主要特性

大出力電子ビーム溶接機の諸特性の内、出力特性、電子ビーム集束特性及び溶込み特性を、実証結果に基づいて説明する。

4. 1 出力特性

集束した大出力電子ビームを連続的に受け止められるコレクタ装置を開発し、出力特性を確認した。電子ビームの出力試験は、120 kW (100 kV, 1.2 A) を 5 分間、100 kW (100 kV, 1 A) を 1 時間連続的に発生し、設計仕様を確認した。試験中の電子ビームの集束状況を図 9. (a) に示す。

出力 100 kW 時における、電子ビーム電流の過渡応答時間は約 3 秒、定常時の安定度は $\pm 1\%$ 以内である。

4. 2 集束特性

(1) 集束径

大出力電子ビーム溶接機の場合、電子ビームの空間電荷は、金属蒸気や残留気体が電離されてきた正イオンによって中和していると考えられる⁽⁴⁾。したがって、電子ビームの集束点における半径 (V_b) は、電子熱初速度、陰極の電子放射面積、集束レンズ類の収差、電子ビームの集束距離 (レンズ主面から集束点までの距離) によって決まり、2 枚レンズ構成の場合、近似式が求まる⁽²⁾。

(2) 測定法

大出力電子ビームの集束特性を測定する方法は確立されていない。

荒田らの提唱による斜面溶接法があるが⁽⁶⁾、電子銃の取付姿勢 (横

向) の関係で利用できない。そこで、電子ビームが気体を励起してできる電子線けい光を写真測定する方法と、溶接ビードの断面形状を測定する方法とを併用した。

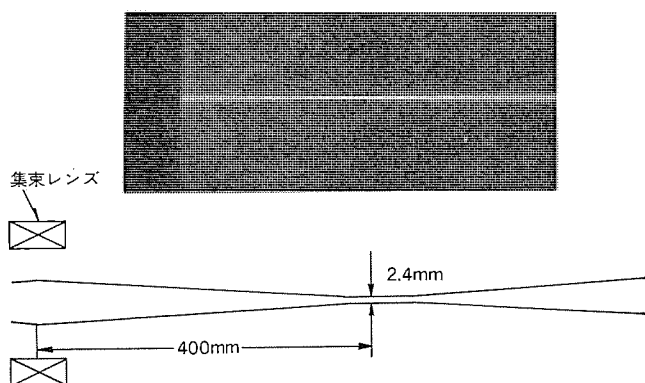
(3) 測定結果

図 9. に、電子ビーム軌道の写真測光例と溶接ビード断面例を示す。写真から、電子ビーム集束位置でのけい光の径を読取ると、 $d \approx 2.5$ mm、溶接ビードの断面形状から最小溶融幅を測定すると、 $\omega \approx 2$ mm である。また、実測値 ($T_K = 2,950$ K, $r_K = 0.2$ cm, $r_0 = 0.6$ cm, $K_S = 0.09$ cm/cm³, $K_C = 0.5$ cm/cm, $\gamma_f = 2 \times 10^{-2}$, $b_0 = 30$ cm, $f_1 = 8$ cm, $f_2 = 15$ cm) を用いて電子ビームの集束

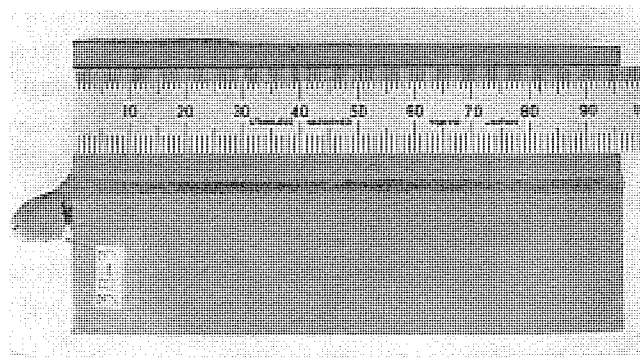
径を近似計算すると、 $r_b = 3$ mm と求まる。これらの値を比較すると、集束距離 (b_0) が 300 mm のとき、100 kW の電子ビームは直径 3 mm 程度に集束されていると見なせる。

4. 3 溶込み特性

軟鋼板 (SS 41) にビードを置き、水平溶接時における溶込み深さ (h_p) と実効ビード幅 (d_e) とを測定した。図 10. に h_p と h_p/d_e を示す。電子ビーム出力 100 kW の場合、15 cm/min の溶接速度で 300 mm の鋼板を溶接することができる。

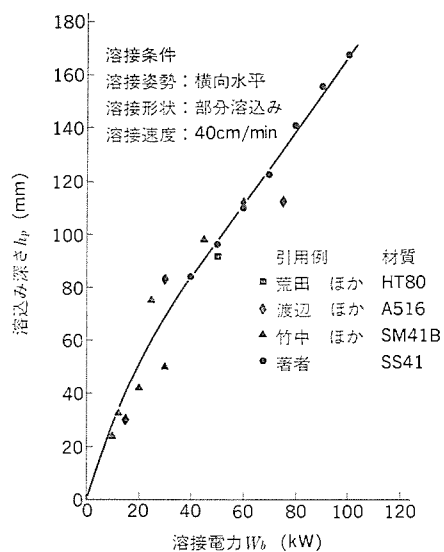


(a) 集束電子ビームの電子線けい光

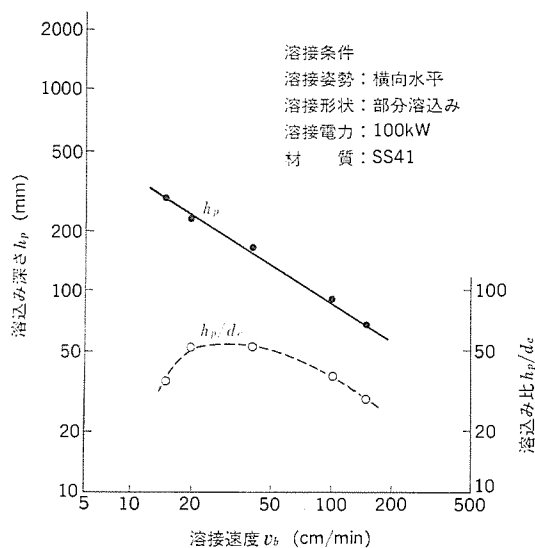


(b) 溶接ビード断面例

図 9. 電子ビームの集束 (100 kW)

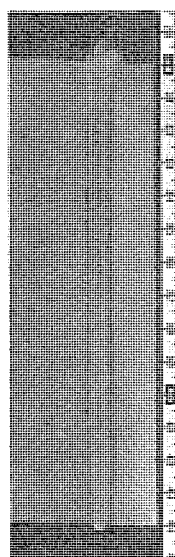


(a) 溶接電力と溶込み深さ

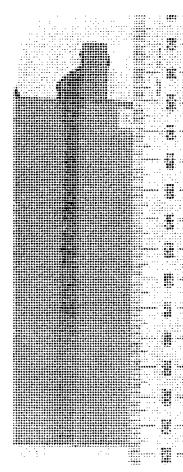


(b) 溶接速度と溶込み深さ

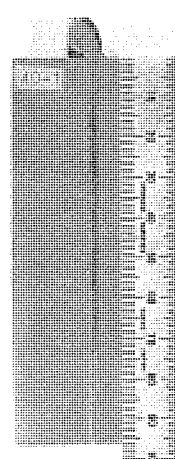
図 10. 溶込み特性 (水平溶接)



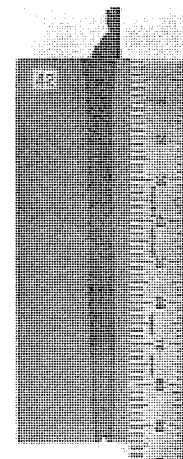
低合金鋼 (A 533)
板厚: 140 mm^t



軟鋼 (SS 41)
板厚: 117 mm^t



ステンレス 鋼 (SUS 304)
板厚: 96 mm^t



耐熱鋼 ($2\frac{1}{4}$ Cr-1 Mo)
板厚: 94 mm^t

図 11. 鋼板の貫通溶接例

図 11. に鋼板の貫通溶接例を示す。

5. む す び

以上, 120 kW 棒状熱陰極形電子ビーム溶接機の概要と主要特性を紹介した。

極厚肉部材で構成される大形構造物に電子ビーム溶接法を適用するためには, 長い溶接パスにわたって安定して溶接を施工できる能力が装置に要求される。120 kW 棒状熱陰極形電子ビーム溶接機は, 鋼板 300 mm を 1 層で貫通溶接できる上, 低真空ふんい気圧で長時間の連続稼動が可能であり, 大形構造物用の溶接機としての基本的機能を満たしている。

本稿では, 溶接物全体を真空ふんい気にする全真空形の装置について述べたが, 大形構造物に対して局所真空を形成する技術も, 各国で研究開発されている⁽⁷⁾。また, 極厚肉鋼板の 1 層溶接を目的と

した溶接施工技術の研究も進んでおり, 大出力電子ビーム溶接機の適用範囲は, 次第に拡大されると確信する。

参 考 文 献

- (1) Arata, Y., M. Tomie: The 2nd. Inter. Sym. of the Japan Welding Society (1975)
- (2) 上山, 安永, 佐々木: 三菱電機技報, 50, No. 8, p. 434 (昭 51)
- (3) 原, 安永, 大峯: 溶接技術, 27, No. 6 (昭 54)
- (4) 裏: 電子・イオンビームハンドブック, 日本学術振興会, 第 132 委員会編, 日刊工業新聞社
- (5) 浜崎, 勝村: 電子ビーム溶接研委資料, No. EBW-142-75
- (6) 荒田: 溶接学会誌, 41, No. 11 (昭 47)
- (7) 氏家, 佐藤ほか: 三菱重工技術, 13, No. 6 (昭 51)

電圧両用形IC化漏電しゃ断器

近藤邦昭*・石井和宏*・宮崎行雄**・竹田 貢**

1. ま え が き

低圧電路の地絡保護装置として、漏電しゃ断器は我が国で使用され始めてから約 10 年を経過するが、その適用範囲は多様化ははじめている。これに伴い漏電しゃ断器に要求される機能・性能も高度になってきた。漏電しゃ断器は漏電から人命や財産を保護する保安機器であるから、高品質と高信頼度の製品でなければならない。

このような観点から当社では、早くから漏電しゃ断器の電子回路を IC (半導体集積回路) 化することに取り組み、約 5 年前より、漏電しゃ断器専用の IC を組込んだ電子式漏電しゃ断器を市場に出してきた。

このたび、この IC 化技術をさらに発展させて、消費電力が小さく、高信頼度の新しい IC を採用した電子回路の開発及び、小エネルギーで駆動できる高感度の電磁装置を研究した結果、業界に先がけて、異なる電路電圧でも使用可能な電圧両用形漏電しゃ断器を開発、販売したので、その概要を紹介する。

2. 電圧両用形漏電しゃ断器の仕様と特長

2.1 従来の漏電しゃ断器との比較

漏電しゃ断器の定格電圧は、JIS C 8371 によると表 1. のとおりである。従来当社では JIS 規格に準拠して単一定格電圧 (異なる電路電圧には使用できない) の漏電しゃ断器を製作していた。

これに対し、今回開発した電圧両用形の漏電しゃ断器は、表 2.

表 1. JIS C 8371 の定格電圧と使用電圧範囲

定 格 電 圧 の 種 類	使 用 電 圧 範 囲
100 V 240 V (265 V)	+10%
200 V 415 V (460 V)	-20%
100/200 V	

表 2. 電圧両用形漏電しゃ断器の定格電圧と使用電圧範囲

電 路 電 圧	定 格 電 圧	使 用 範 囲
AC 100 V 電路 AC 110 V "	100 V~200 V 両用	80~242 V
AC 200 V AC 220 V "		
AC 200 V AC 220 V "	200 V~415 V 両用	160~484 V
AC 240 V AC 265 V "		
AC 400 V AC 440 V "		
AC 400 V AC 440 V "		

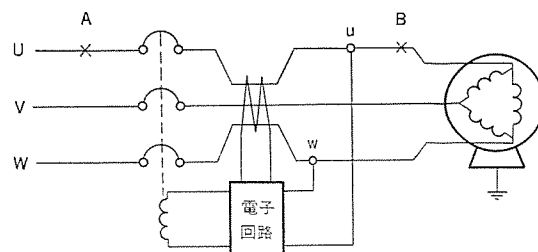


図 1. 欠相時の動作

のように異なる電路電圧でも使用可能なものである。つまり定格電圧 100 V-200 V 両用品は最低 80 V から最高 242 V まで、定格電圧 200 V-415 V 両用品は最低 160 V から最高 484 V までの広い範囲に使用できる。

2.2 電圧両用形漏電しゃ断器の利点

電圧両用形漏電しゃ断器は、需要家にとって次のような利点がある。

- (1) 100 V と 200 V あるいは 200 V と 400 V 系の電路のどちらにも同じ製品が使用できるので保守予備品が少なく済む。
- (2) 配線替え、電圧変更があっても取替えを要しない。また電圧を誤って取付けることもない。
- (3) 400 V 系 3 相 4 線式電路の中性線-電圧線間の電路用には定格電圧 200 V-415 V 両用品がそのまま使用できる (従来は特殊品が必要であった)。
- (4) 3 相用では 1 線が欠相しても漏電が生ずれば動作する。

図 1. は漏電しゃ断器の実用例を示す。今漏電しゃ断器の電源 A 点で断線があり、欠相したとすると、漏電しゃ断器の電子回路には、U 相からの電源供給がなくなる。しかし負荷側電動機の巻線を介して V-W 間の 1/2 の電圧 (巻線電圧の 1/2) が u 点を介して電子回路に供給される。電子回路の電源電圧は、正常 (欠相なしの状態) の 1/2 となる。ここで 100 V-200 V 両用品を使用していれば、欠相時であっても地絡事故があれば十分に正常動作する。B 点での断線事故による欠相は、電子回路には何ら影響がないので動作には何の支障もない。

なお製造者側にとっても電圧両用形漏電しゃ断器は種類を半減できることは合理化面で利点が大い。

2.3 電圧両用形の製品シリーズと特長

三菱漏電しゃ断器は、現在 30 A フレームから 1,200 A フレームまで製品化しているが、このうち 600 A フレームまでの製品について電圧両用品を製品化した。

表 3. に製品仕様の例を示す。機種により 100 V-200 V 両用品と 200 V-415 V 両用品のいずれか一方を採用し、100 V 又は 415 V が必要な場合は単一定格とした。これは市場の要求の強いほうを電圧両用化し、需要の比較的少ないほうを単一定格として単純化したものである。

表 3. 電圧両用形の仕様一覧の例

種 類		地絡保護専用品		過 負 荷・短 絡 保 護 兼 用 品								
フ レ ー ム A		30	30	50	50	30	30	50	100	225	400	600
形 名		NV-KF	NV-K30F	NVB 50	NVB50-P	NV-1 F	NV30-CA	NV 50-CA	NV 100-CA	NV 225-CA	NV 400-CA	NV 600-CA
相 線 式		1φ 2W	3φ 3W, 1φ 3W, 1φ 2W	1φ 2W	1φ 2W	1φ 2W	3φ 3W, 1φ 3W, 1φ 2W	1φ 2W	3φ 3W, 1φ 3W, 1φ 2W	3φ 3W, 1φ 3W, 1φ 2W	3φ 3W, 1φ 3W, 1φ 2W	3φ 3W, 1φ 3W, 1φ 2W
極 数		2	3	2	2	2	3	2	3	3	3	3
定 格 電 圧 AC (V)		100-200 両 用							100-200両用, 415	100-200両用, 415	(100)200-415 両用	200-415 両用
定 格 電 流 (A) (基準周囲温度 40℃)		最大通電電流 30	最大通電電流 30	15 20 30 40 50	15 20 30 40 50	15 20 30	15 20 30	15 20 30 40 50	60 75 100	125 150 175 200 225	250 300 350 400	500 600
高 速 形	定 格 感 度 電 流 (mA)		15 30					30	15 30 100	30 100 200(500)	30(100) 200(500)	200 500
	動 作 時 間 s 以 内		0.1									
漏 電 表 示 方 式		機 械 式 ボ タ ン										
定 格 し ゃ 断 電 流 (kA) (asym/sym)	AC	415 V	—		—	—	—	—	—	5	7.5	20/18
		200 V	定 格 短 時 間 電 流 1.5	2.5(単 3 200V 5)	2.5(単 3 200V 5)	1 (単 3 200V 1.5)	2.5	2.5	7.5	16/15	35/30	
		100 V	定 格 短 時 間 電 流 1.5	5	5	1.5	2.5	2.5	10	25/22	50/42	—

3. 構造と動作

3.1 全体の構成と動作原理

図 2. に電子式漏電しゃ断器の回路構成を示す。漏電引外し装置は地絡電流を直接検出する電流動作形で、その構成は鉄心に巻回した各相の 1 次巻線、零相電流（地絡電流）を検出する零相変流器（以下 ZCT という）、ZCT の出力を増幅するための電子回路及びしゃ断器をトリップさせる電磁装置により構成している。動作原理を説明すると、図 2. の回路において ZCT の入出力をみると回路が健全な場合は、往路電流と帰路電流による磁束が互いに打ち消しあって 2 次巻線には電圧が誘起しない。しかし地絡が発生すると、往路電流 I_A は大地を通過して変圧器に戻る I_G と ZCT を通って帰る電流 I_B ・ I_C に別れるため、ZCT を通る電流ベクトルの和は、

$$I_A + I_B + I_C = I_G$$

となり、ZCT の鉄心に I_G による磁束 ϕ_g が発生し、2 次巻線に電圧が誘起される。この信号が電子回路内のサイリスタのゲート回路に入り、サイリスタを駆動させて、これと直列に接続された電磁装置が作動して、しゃ断器をトリップさせる。3 相の場合、各相の電流が等しくない不平衡負荷の場合でも回路が健全であれば、各相の電流の和は、

$$I_A + I_B + I_C = 0$$

となり、漏電しゃ断器が動作することはない。

ここで電子回路は、しゃ断器の両端極（左右極）より制御電源が供給されているので、電圧（線間）

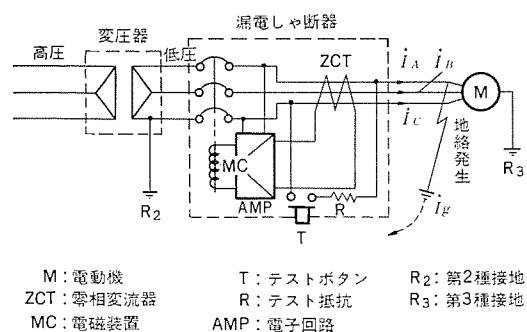


図 2. 漏電しゃ断器の回路構成

が 100 V と 200 V とでは、電子回路に倍の電圧が印加されることにより、200 V での電子回路は 100 V に比べて約 4 倍の消費電力に耐え、また、電磁装置も 100 V、200 V の両電圧で吸引力が確保でき、かつコイルの温度上昇も限度を超えないことが必要である。

次に、電圧両用形漏電しゃ断器の製品化に当たり、技術的ポイントである電子回路部と、電磁装置の詳細について述べる。

3.2 電子回路部の構成

電圧両用化を実現するためには、高いほうの定格電圧では電子回路部の安定用抵抗器や、各種電子部品の発熱が、周囲の部品に対し許容できることと、低いほうの定格電圧でも安定に動作することが必要である。

発熱を小さくするためには電子回路部の消費電力を抑えることが必要であり、従来の IC 化漏電しゃ断器に使用している IC の約 1/5 に消費電力を抑えた新形 IC、M 54122 L を開発することにより、電圧両用化が実現できた。M 54122 L を採用した電子回路部の構成例を図 3. に示す。

制御電源電圧は整流回路で整流し、定電圧回路へ接続する。定電圧回路の入力電圧 V_S は電源平滑用コンデンサ C_1 の容量と電源側インピーダンスの値により定まり、IC 内部に構成する低消費電力形の定電圧回路を経て安定化電源電圧 V_{CC} を供給する。制御電源電圧 V と、定電圧回路の入力電圧 V_S 、安定化電源電圧 V_{CC} との関係を示すと

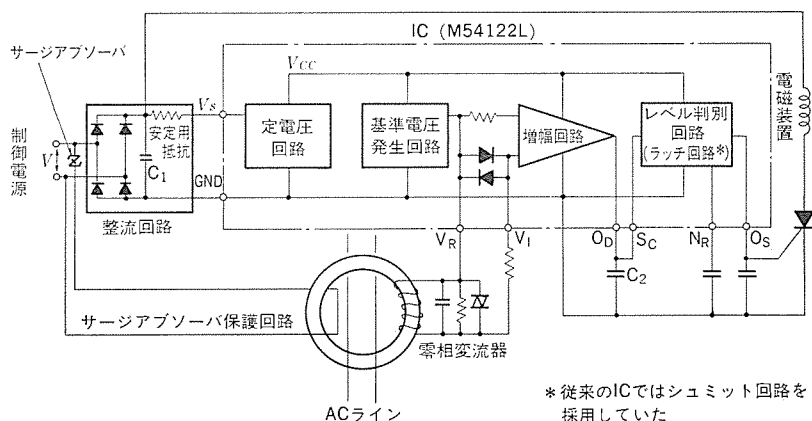


図 3. 電子回路部の構成例

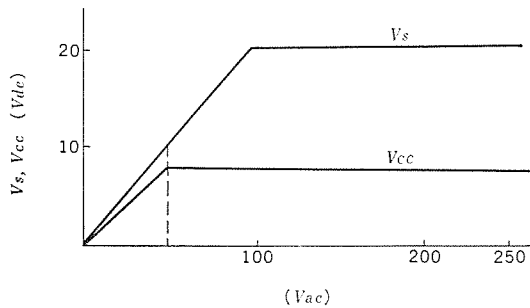


図 4. V - $V_S \cdot V_{CC}$ 特性

図 4. のようになっている。IC は V_S の値が所定の値以上(約 10 V) に維持されていれば、 V_{CC} は一定電圧に保たれ、正常に動作する。図 4. の特性に示すごとく、 V_{CC} は漏電しゃ断器の回路電圧 V が 50~250 V の範囲で、一定であり、約 5 倍の電圧変動があっても IC には過電圧が加わったり、低電圧による不安定動作はない。 V_S は V の増加に伴って $V_S=20$ V まで上昇する。 $V_S=20$ V になると定電圧回路の作用で V が増加しても V_S はほぼ一定である。

一方、IC を駆動するために必要な供給電流の最大値は $580 \mu A$ ($-20^\circ C$) である。これを電路電圧の最小保証値 (80 V) で供給できるように設計することにより、電路電圧の最大保証値 (242 V) での IC 及び、安定用抵抗器のワットロス は著しく小さくすることができた。

このようにして電源 (回路) 電圧の変動を補償するとともに温度上昇を小さく抑えてあるので 80~242 V (100 V~200 V 両用品の場合) の電圧範囲で使用できる電子回路が可能となった。

3.3 新形漏電しゃ断器用 IC の設計

新形漏電しゃ断器用 IC M 54122 L は、従来の IC に比べ、消費電力の低減、増幅回路の増幅率の向上、電源電圧及び周囲温度の変動に対する電気的特性の安定化等の性能向上を図るとともに、外付け部品の一部を IC に内蔵することにより、外付け部品を削減することに成功した。

M 54122 L の主な特性を表 4. に、チップ写真を図 5. に、また、外観写真を図 6. に示す。M 54122 L の設計で最も重要な点は、漏電しゃ断器用 IC に要求される機能をみながら、更に低消費電力化を図ることである。以下に M 54122 L の消費電力の低減について簡単に述べる。

M 54122 L では、消費電力の低減のため、IC を駆動するのに必要な電流 (図 3. で電源端子 V_S から IC に供給される供給電流) を、諸特性の低下を招くことなしに、従来の IC の 1/5 にすることを目標におき、次の 4 項目を考慮して設計した。ただし従来の IC の実績を考慮し、回路の基本構成は従来の IC と同一とした。

- (1) 各ブロックへの供給電流の低減
- (2) 漏電発生時に供給電流の増加防止のため、レベル判別回路にラッチ回路の採用
- (3) 前 1 項によるインピーダンス増加に伴う耐サージ性能の低下防止
- (4) ゲートリガ電流の小さいサイリスタの使用を可能にする耐サージ特性が優れたサイリスタ駆動回路の採用

上記各項目の概要を以下に述べる。

3.3.1 各ブロックへの供給電流の減少

M 54122 L の回路の基本構成は、図 3. に示したとおりである。

表 4. IC (M 54122 L) の主な特性

(a) 絶対最大定格

記号	項目	定格値	単位
I_S	電源電流	8	mA
P_d	消費電力	200	mW
T_{opr}	動作周囲温度	$-20 \sim +80$	$^\circ C$
T_{stg}	保存温度	$-55 \sim +125$	$^\circ C$

(b) 電気的特性

記号	項目	測定条件	温度 ($^\circ C$)	規格値			単位
				最小	標準	最大	
I_S	電源電流	$V_S=12$ V $V_R-V_I=30$ mV	-20			580	μW
			25		400	530	
			80			480	
V_T	入力感度, 電圧	$V_S=16$ V	$-20 \sim +80$	10	13.5	17	mV rms
I_0	出力電流	$V_{SC}=1.4$ V $V_{OS}=0.8$ V	-20	-200			μA
			25	-100			
			80	-75			
T_{ON}	動作時間	$V_S=16$ V $V_R-V_I=0.3$ V	25	2		4	ms
$V_{SC ON}$	Sc オン電圧	$V_S=16$ V	25	0.7		1.4	V

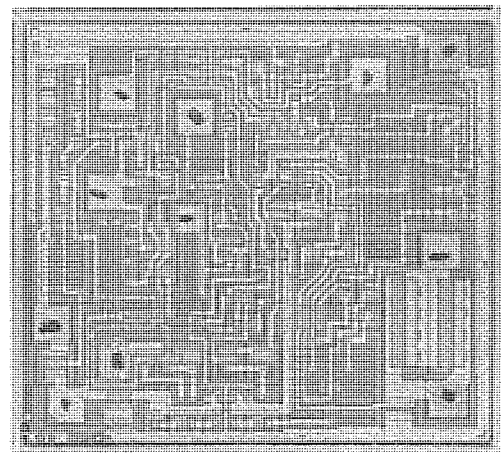


図 5. M 54122 L のチップ写真

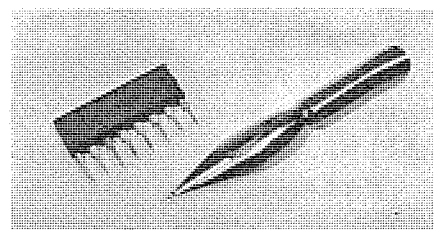


図 6. M 54122 L の外観

表 5. 各ブロックへの供給電流の M 54122 L と従来の漏電しゃ断器用 IC との比較 (標準値)

(単位: mA)

機 種	各ブロック	定電圧回路	基準電圧発生回路	増幅回路	レベル判別回路	そ の 他	出力電流 (ゲート順電流)	全供給電流
	動作モード							
M 54122 L	非漏電時	0.14	0.1	0.11	0	0.05	0	0.4
	漏電発生時	0.01	0.05	0.06	0.07	0.01	0.2	0.4
従来の IC	非漏電時	0.15	0.45	0.85	0.5	0	0	1.95
	漏電発生時	0.15	0.45	0.85	0.4	0	1.5	3.35

M 54122 L は、各ブロックを構成する各回路の回路定数の再設定にとどまらず、各回路を再設計し、供給電流の減少を図った。

表 5. に各ブロックへの供給電流を示す。M 54122 L の各ブロックへの供給電流は、表 5. から明らかなように、非漏電時において、従来の IC よりも大幅に減少しており、全体で約 1/5 になっている。更に、M 54122 L は次項に述べる改良により、漏電発生時においても、供給電流の増加を防止している。

3. 3. 2 レベル判別回路

従来の IC は、レベル判別回路にシュミット回路を使用しているため、漏電発生時、出力端子 O_s に接続するサイリスタのゲート順電流に相当する出力電流が O_s より流れ出し、非漏電時に比べ、IC へ供給電流がほぼ出力電流分だけ増加する。このため、安定用抵抗器での電圧降下が増大し、IC が安定に動作する電源電圧を維持できなくなる。これを防止するため、 V_s -GND 間にツェナダイオードをそう入し、出力電流に相当する電流を、非漏電時にダミー電流として流しておく必要があり、低消費電力化を妨げていた。一方、M 54122 L では、上記漏電発生時に電源電圧の降下が生じても、1 度動作すると、規定の出力電流を流し続けるラッチ回路をレベル判別回路に採用し、この問題を解決した。非漏電時には、供給電流のほとんどが増幅回路、定電圧回路、基準電圧発生回路に流れており、ラッチ回路には流れていない。漏電発生時には、ラッチ回路の出力インピーダンスが下がり、安定用抵抗器での電圧降下が増大し、電源電圧が降下するので、非漏電時に各ブロックに流れていた電流が減少する。この減少した電流が、出力電流として、 O_s より流れ出るように回路設計を行っている。なお、このラッチ回路は、 V_s が約 3 V まで降下しても出力電流を流し続けることができる。

3. 3. 3 IC の耐サージ

耐サージ性能は、IC への供給電流を減少させると、必然的に IC 各ブロックのインピーダンスが高くなり、悪化する。M 54122 L は、この問題を解決するために、サージ吸収回路の一部を内蔵するとともに、種々の誤動作防止回路をも内蔵し、従来の IC よりも良好な耐サージ性能を得ている。

3. 3. 4 サイリスタ駆動回路

O_s に接続するサイリスタのゲートトリガ電流が大きいと、IC への供給電流の増大に直接影響を与えるため、ゲートトリガ電流の小さいサイリスタの使用が望ましい。M 54122 L では、低消費電力化を実現するため、ゲートトリガ電流が周囲温度 25°C で 100 μ A 以下のサイリスタを駆動できる出力電流に設定するとともに、ゲートトリガ電流の小さいサイリスタの採用による耐サージ性能の悪化を防止するために、非漏電

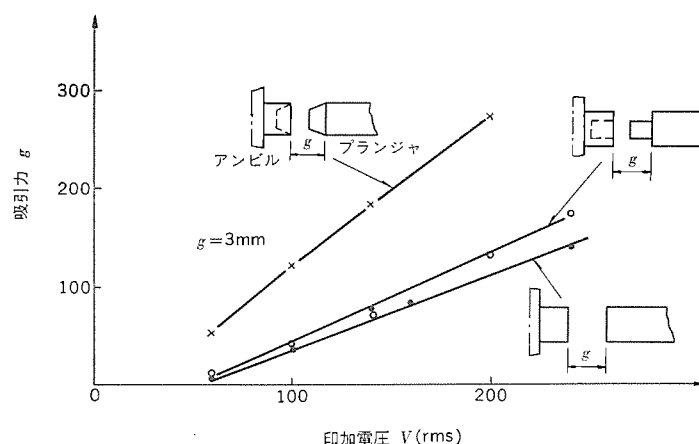


図 7. アンビルの形状と吸引力特性

時にサイリスタのゲート、陰極間を低インピーダンスに保つサイリスタ駆動回路を採用している。

3. 4 電磁装置の設計

電磁装置は、電子回路と同様に広い電圧範囲で作動し、かつ十分駆動力を有し、開閉機構部を余裕をもって引外さなければならない。このためには、電磁装置の効率向上を図る必要がある。

100 V-200 V 両用品は円錐フランジ形電磁装置を採用した。また 200 V-415 V 両用品は小形変圧器を使用しているので小勢力で駆動可能な釈放形電磁装置を採用した。

高効率を達成するための電磁石としてはヒンジ形電磁石に比較し、フランジ形が効率が良いことが実験的に判明したので、更に電磁石を構成するフランジ、アンビルの最適形状を見出すための実験を実施した結果、円錐形フランジに近い程強い吸引力が得られた。この実験結果の 1 例を図 7. に示す。

4. 特性と性能

4. 1 電源電圧特性

図 8. に定格電圧 100 V-200 V 両用品 (定格感度電源 30 mA) の電源電圧特性の 1 例を示す。低消費電力と IC 内部の定電圧回路の働きにより、電源電圧の変動があっても感度電流は非常に安定している。

4. 2 周囲温度特性

一般的に感度電流は周囲温度の影響を受けて変化するが、そのほと

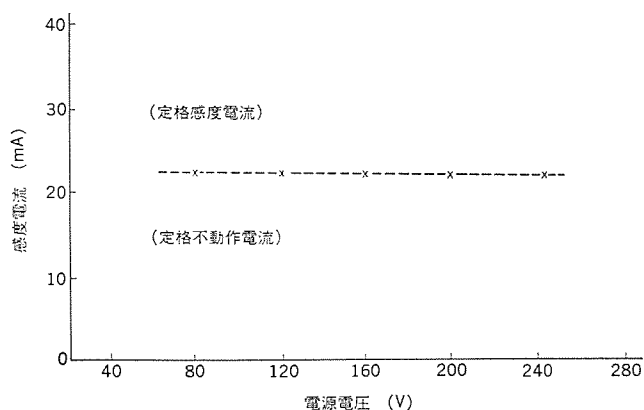


図 8. 電源電圧の特性例

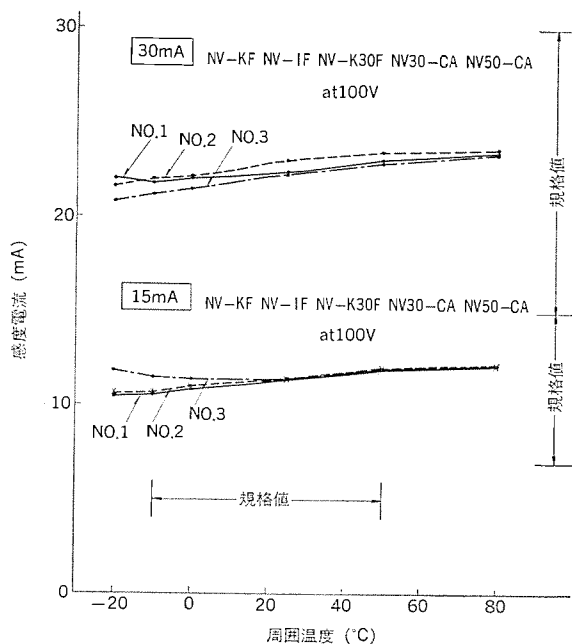


図 9. 周囲温度特性の例

んどは電子回路と ZCT 部の温度特性に起因している。

IC 内部の増幅回路は原理的に温度の影響を受けない高感度の差動増幅器を採用している。また IC の入力感度は 13.5 mV (rms) であり、従来の IC 化漏電シャ断器の入力感度の 1/2 以下となっている。このため ZCT は小形化できると同時に十分余裕をもって選定できるので、周囲温度特性を良好とすることができた。

周囲温度特性の 1 例を図 9. に示す。

4.3 耐サージ性能

耐サージ性能を向上させるため、図 3. の増幅回路とレベル判別回路を接続し、その接続端と GND 間にコンデンサ C_2 (0.047 μ F) をそう入して時限回路を構成している。入力信号 (ZCT の出力) が 13.5 mV を超えたとき、IC 内部の定電流源により、このコンデンサを一定速度 (この場合 0.36 V/ms) で充電する。次に入力信号が 13.5 mV 以下になると逆に一定速度 (0.47 V/ms) で放電する構造となっている。

一方、レベル判別回路の判別レベルは 1.1 V であるので動作時限は

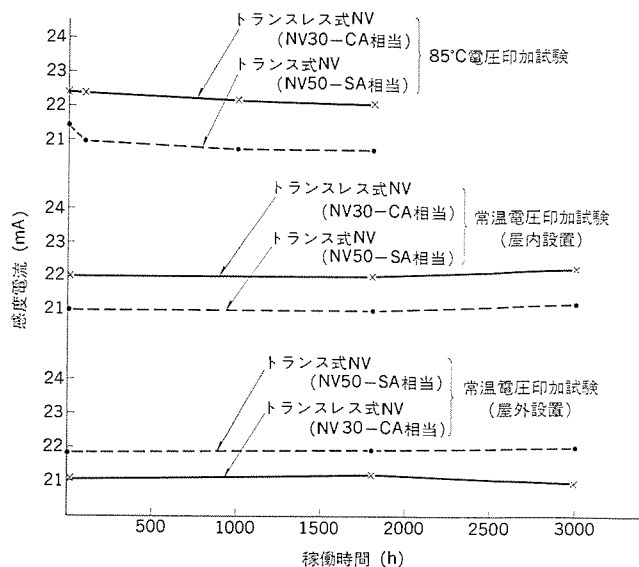


図 10. 経年変化のデータ例

約 3 ms (1.1/0.36) となる。すなわち入力信号は 3 ms 以上持続しないとレベル判別回路は ON せず漏電シャ断器はトリップしない。これによりパルス幅が 3 ms 以下のサージに対しては誤動作の防止が可能である。実際の開閉サージの測定によるとサージ電流幅はほとんど 2 ms 以下であるのでこの時限回路の構成により誤動作は防止できた。

なお、JIS 規格による衝撃波不動作性能も 6 kV の規格値に対し 10 kV 以上の性能を有しており十分余裕をもって耐えた。

4.4 信頼度

電子回路の信頼度は電子部品個々の固有信頼度とその使用個数により決まるので部品点数は少ないことが望ましい。電圧両用形電子回路の場合、図 3. より明らかなように部品点数は非常に少なく、従来のディスクリート回路に比べ約 60% 縮減できた。更にはんだ付点数も含めると IC 化回路の故障率は大幅に改善でき、高い信頼度が確保できた。

回路設計にあたっては、IC 自体にサージ吸収回路を内蔵していることをはじめ、各部品の定格値に対し十分なるデレーティングして選定してあるので電子部品の固有信頼度も高い。

図 10. に感度電流の経年変化の試験データ例を示す。

5. む す び

漏電シャ断器の普及に伴い使用環境も複雑かつ厳しくなり、ますます高信頼度が要求されている。同時に使い勝手のよい漏電シャ断器の追求も必要である。当社では独自の専用 IC 及び関連技術の開発により、高信頼度を確保するとともに、業界に先がけて電圧両用形の製品シリーズ化に成功し、需要家各位のご好評をいただいている。今後とも、安全性・使いやすさ、信頼性向上の追求に努力して、漏電シャ断器の普及に努力したいと考える。

なお、新形 IC、M54122L に関し、外国出願を含め、16 件の特許出願を終えている。

農林水産省納め香川用水集中管理システム

大塚 忠夫*・渡辺 宏**・大石 将之**・牧本 健二***

1. ま え が き

近年、国家的見地から水資源の有効利用が叫ばれ、各分野においてこの対策が種々な形で推し進められている。農業分野においてもこのような社会的背景に加えて、兼業農家の増加、輪換畑への転換など農業そのものの体質が変化しつつあり、上流から下流に至るまでの公平な水配分、災害の早朝発見などを目的とし、加えて人件費の高騰による用水管理の合理化・省力化などの観点から、用排水施設及び用水状況などを集中管理化する地区が増加している。

本文で紹介する香川用水管理システムは、管理設備としてテレメータ装置に加えて、データ処理装置、CRT表示装置、グラフィック監視盤などの設備が導入されており、今後、計画・施工される農業用水水管理システムの参考に供する次第である。

2. 香川用水事業の概要

香川県は、瀬戸内特有の温和な気候に恵まれ耕地面積が県土面積の26%を占めているが、古くから用水不足に悩まされ、これを解消するために多くのため池を作り、このため池に水源を依存してきたが昭和43年に徳島県下を流れる吉野川の水を阿讃山脈を貫いて香川県の讃岐平野に導入する香川用水事業が着工され、現在事業はほぼ完了する段階に至っている。

この事業は、吉野川水系の水資源高度化をめざす吉野川総合開発の一環として実施されたもので、吉野川を水源（早明浦ダム）とし池田ダムでせき上げてここより取水し、香川県の農業用水、上水道用水、工業用水のために年間2億4,700万トンを導入、県下のほぼ全域に配水するものである。図1.は計画概要図である。

概略事業計画諸元は下記のとおりである。

(1) 受益面積	水田用水改良	25,051 ha
	畑地かんがい	5,632 ha
	水田裏作かんがい	(5,235 ha)
	計	30,683 ha
(2) 主要工事	(池田ダム)	別途他事業施工
	導水幹線(トンネル)	延長 8.0 km
	幹線水路	延長 84 km
	支線水路	延長 14.5 km
	計	106.5 km
(3) 関係市町村		5市30町

3. システム計画

3.1 管理システム導入の目的・必要性

この地区における水の価値は非常に高く、いわば一滴の水もむだにはできないものであることは受益者すべての認めるところである。

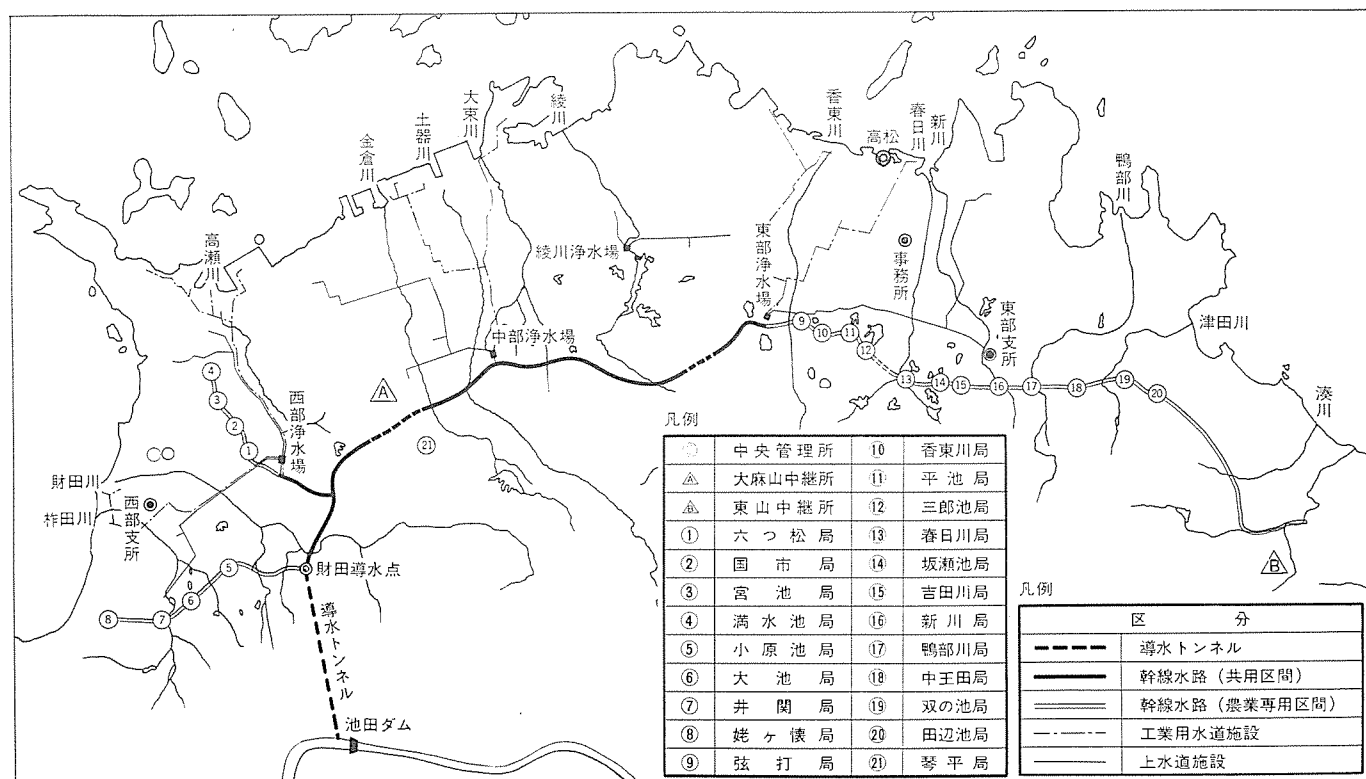


図 1. 香川用水計画概要図

一方、過去の水管理形態は取水施設から下流の通水・分水に至るまで、「水番」という監視員のパトロールとコントロールに頼っているのがほとんどで、そのため

- (1) 水の有効利用が十分行われず無効水が多く出る。
- (2) 最も重要な渇水期における配水が合理的に行われず、受益者の不信を招く。
- (3) 誤った操作による施設の故障とこれに伴う下流域における人災などの発生が懸念される。
- (4) 管理費の増大に伴い管理密度が低下する。

などの諸問題があり、そのため単一意志による取水・通水・分水操作が必要であり、集中管理の目的、必要性はこれら諸問題を根本的に解消しようとするものであるが、更に前述の用水管理の合理化・省力化を図ろうとするものでもある。したがって、集中管理の役割はあらかじめ規則化された意志決定手段と操作方法によって組織的かつ総合的に管理し、無統制の偶発的・散発的管理操作による利水上並びに施設の保守管理上の問題点を改善するためのものである。

3.2 管理システムの検討

この地区の場合、事業の計画当初から管理システムの導入が検討されていた。例えば、

- (1) 幹線は自然流下水路にもかかわらず、サイホン部分などの管路部に、主要地点ごとに超音波流量計が設置されている。
- (2) 分水工には、すべてフロア式の流量計が設置され、各分水流量の計測を可能としている。
- (3) 取水位を保つためのチェックゲートに機械式定水位自動ゲート（ネルピック）が採用され省力化されている。

などである。したがって、管理システムは、これら既に設置されている施設の機能が最大限に発揮されるよう、すなわちトータルシステムとして最も効率的、かつ安全・確実・適正に水利用がなされるための手段として、現行の水利運用形態を考慮した上で管理システムの検討がなされた。

3.3 管理主体

この事業は国営、水資源公団、県営、団体営の一連事業であるため、管理についても少し複雑となっている。すなわち、図 1. における水資源開発公団が実施した共用区間については、昭和 49 年度に工事が完了し、既に上水道用水・工業用水及び農業用水区間も含めて管理業務が行われている。一方、農林水産省が施工した農業専用区間については、現行の土地改良法により土地改良区が管理を行うことになっている。この事業の受益地約 30,000 ha の中には 153 の土地改良区があり、この関係土地改良区を包含した香川用水土地改良区が高松市の中心部に位置し、この水管理システムはここを中央管理所とし、農業専用区間は直接に、共用区間は水資源開発公団を介して情報を収集し、名目上の一元管理を行っている。

3.4 システム設計

システム設計は以上の事柄を考慮し、主要項目は下記のように検討し設計を行った。

(1) 管理

管理については、管理レベル、管理範囲と内容、経済性、維持管理レベルなどを考慮し、数案につき比較検討した結果下記のように方向づけをした。

①管理レベルについては、遠方監視（テレメータ）のみとし、遠方制御（テレコン）は、自然流下水路でもあり緊急操作の必要性がなく、また水路には自動調整ゲートがついている、などの点から行わない。

表 1. 情報の種類と量

区間	情報	仕様	信号	数量	備考
農業専用区間	1 幹線流量 A	超音波式	DC 4~20mA	9	中央局にて積算
	2 " B	セキ式	"	2	"
	3 分水流量 A	軸流式	"	30	"
	4 " B	ベンチュリ式	"	3	"
	5 池水位	静電容量式	"	12	主要池のみ
	6 "	フロート式	DC 4~20mA	1	田辺池（ポンプ設備）
	7 吐水槽水位	"	"	3	主要吐水そう（槽）のみ
	8 吐水槽水位	フロート式	DC 4~20mA	1	奈延（ポンプ設備）
	9 放水工水位	"	"	1	中央局で放水量に換算
	10 水位上下限	水位上下限検出	接点	14	チェックゲート上流、吐水槽
	11 雨量	転倒マス式	接点	4	
	12 その他	—	—	—	田辺池ポンプ運転状態、有線テレメータ故障など
共用区間	1 取水流量	超音波式	データ分岐	2	No. 1, No. 2
	2 東西分水流量	"	"	3	東部幹線×2, 西部幹線×1
	3 幹線流量	"	"	2	二宮, 古川
	4 分水流量	超音波式軸流式	"	24	上工水×4, 農水×20
	5 雨量	転倒マス式	"	3	東西, 綾川, 取水工
	6 琴平時刻	水晶発振式	親時計	1	
	7 S V	—	接点	2	停電, CPU, 異常

ただし、移動パトロール班を完備し、現場手動によるきめ細かい制御を行う。②管理範囲については、国営幹線分水工までとし、以降は現場受益者に任せる。③経済性については、初期投資と維持管理の最適バランスをとる。④維持管理は香川用水土地改良区が行うことになっており、管理体制が充実しており、データ処理装置、CRT 表示装置などの設備の導入についても受入れが比較的スムーズである。

(2) 管理情報

水管理情報については表 1. に示すとおりであるが、特に情報の主体は流量であり、この地区では 0.3 m³/s 以上の分水工、重要分水工、子局周辺の 0.1 m³/s 以上の分水工の流量を中央管理所では(把)握し、分水工流量把握率でいえば 83 % にあたる。

(3) 伝送回線

この地区は図 1. に示すとおり、用水路が香川県全土にまたがっていること、共用区間によって農業専用区間が分断されていることなどから、情報伝送回線は無線方式を採用した。また移動パトロール車用の無線回線については、使用ひん度からテレメータ用の情報伝送回線から分離し、更に、管理範囲がテレメータ用回線よりも更に広いことなどから 2 中継所方式とした。

(4) 他施設との関連

共用区間については、前述したように水資源開発公団が管理を行っているため、名目上の一元管理を行うために、公団琴平管理所内にデータ転送装置を設置し定期的に共用区間の主要データを収集することにした。

4. 集中管理設備

4.1 システム構成

このシステムは、幹線水路の流量、分水量、主要ため池水位、雨量等の情報を農業専用区間については直接に、また共用区間については水資源開発公団琴平管理所を経由して、高松市街に設立された香川用水記念会館内にある中央管理所に集中し、用水状況及び施設の監

視、情報の各種処理、記録を行うとともに、地区内を巡回する移動パトロール車との連絡通信を行うものであり、システム構成は下記のとおりとなっている。

- | | |
|------------------------|-------|
| (1) 中央管理所（香川用水記念会館内） | 1 か所 |
| (2) 無線中継局（大麻山、東山） | 2 か所 |
| (3) データ転送局（公団琴平管理所内） | 1 か所 |
| (4) 子局（田辺池 ポンプ 場監視局含む） | 20 か所 |

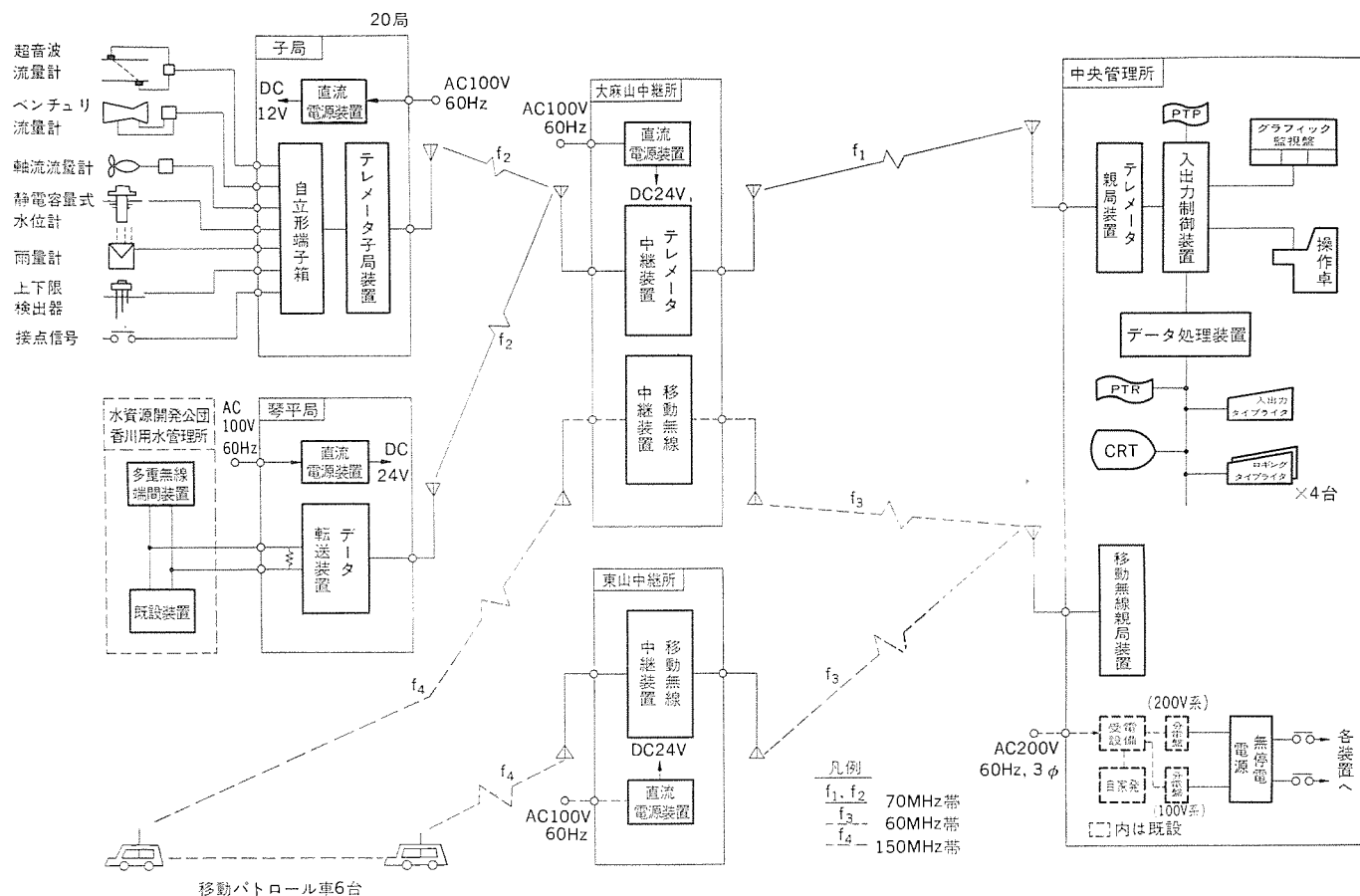


図 2. システム 系統図

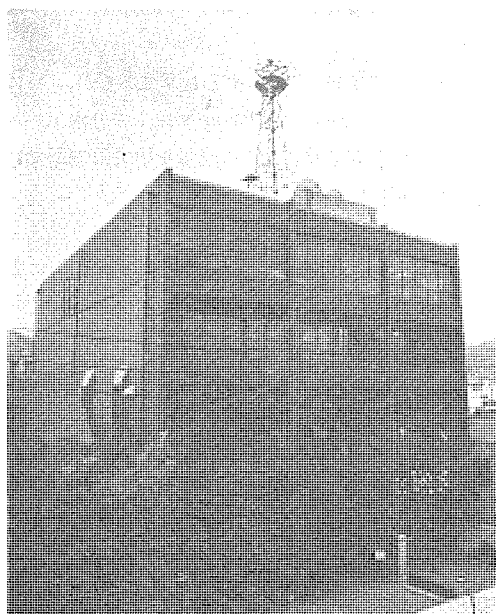


図 3. 中央管理所



図 4. 無線中継所

(5) 移動パトロール車

6台

図2. はシステム系統図である。

また、図3. は中央管理所、図4. は無線中継所、図5. は子局の外観である。

4.2 情報伝送方式

この水系は、ほとんどが自然流下水路であり、管理対象の情報伝送にはさほどの速応性が要求されないため、1:N形のポーリング方式としている。呼出し周期は、15分、30分、1時間、6時間の4段階の選択及び任意時の呼出し選択が操作卓押しボタンにより可能となっている。また琴平データ転送局については、情報収集周期が異なるため、そのデータ転送装置は、無線機出力レベルでの分岐方式とし、全データのうち必要データを検定する機能、最新データを蓄積する機能、中央局呼出しに応じて情報を伝送する機能などを有し、これらの機能はマイクロコンピュータにより制御される。

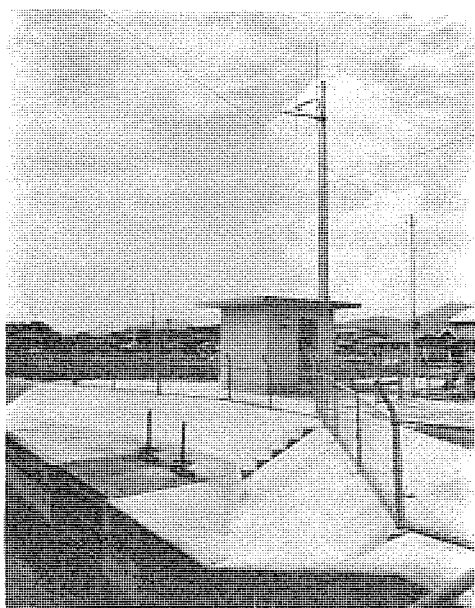


図5. 子局

表2. 情報処理内容一覧

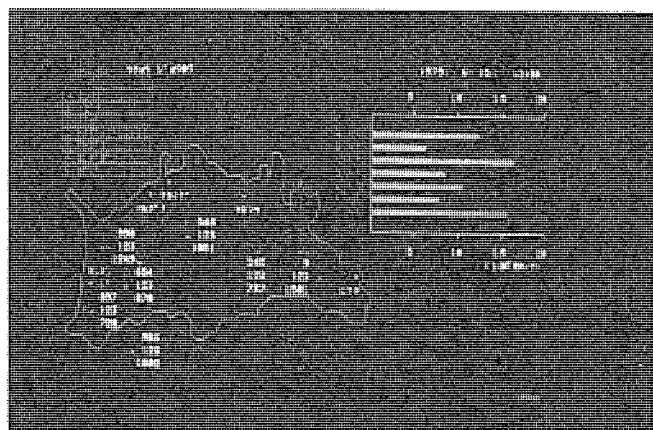
機 能	内 容
テレメータ処理	データ読込
	データ検定
	欠測処理
	データ転送処理
データ処理	積算処理
	演算処理
	最大/最小/平均処理
データ監視	上下限値チェック
	故障監視
作表記録	時報・日報作成
	警報記録作成
バックアップ処理	生データ表示
	データメンテナンス
CRT処理	画面表示処理
	ハードコピー処理

4.3 情報処理方式

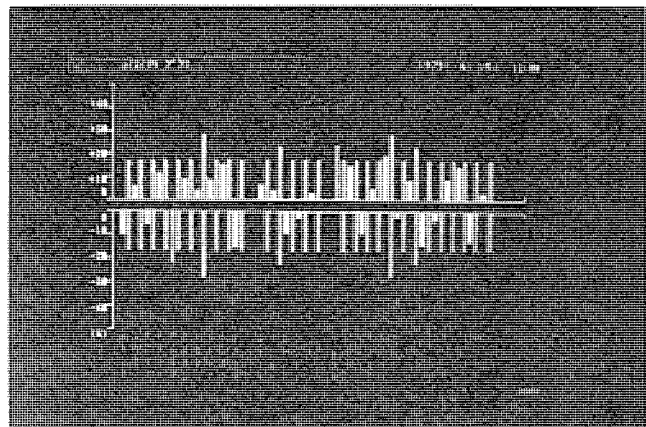
中央管理所では、データ処理装置を設置して下記の処理を行い、操作員への各種情報の提供、管理データの蓄積と省力化を図っている。情報処理内容は、(1)テレメータ処理、(2)データ処理、(3)データ監視、(4)作表記録、(5)バックアップ処理、(6)CRT処理、等であり、これを表2. に示す。

4.4 マンマシンインタフェース

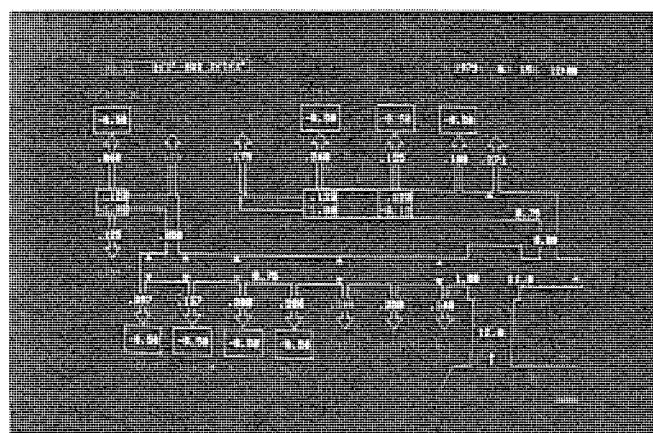
広域の大量のデータを取扱うシステムにおいて、操作員と機械との対



(a) パターン例1



(b) パターン例2



(c) パターン例3

図6. CRT画面

話機能、いわゆるマンマシンインタフェースは重要な要素となる。マンマシンインタフェースとしては、このシステムでは、(1)グラフィックディスプレイ装置(CRT表示装置)、(2)グラフィック監視盤、(3)監視操作卓、(4)ロギング及びアナウンスメントタイプライタ(入出力タイプライタと兼用)などがあり、おのおの機能的に使い分けている。特にCRT表示装置は、グラフィック監視盤のマクロ的な監視機能に対し、ミクロ的(詳細)な監視をするのに適している。

今回導入されたCRT表示装置の画面の一部を図6.に示すので参照願いたい。

(a) パターン例1

雨量と配水量とは密接な関係にあり、この地区の降雨量(時間、日、月雨量)を地図上に、年間雨量を棒グラフで表示したものである。

(b) パターン例2

幹線流量及び分水流量の設定がCRTキーボードから入力可能(0~±50%)で、その上下限設定幅と基準値からの変化幅を棒グラフ状で表示したものであり、設定幅から逸脱すると表示色が変わる。

(c) パターン例3

グラフィック監視盤には表示していない分水流量、池水位などブロック

表 3. 主要構成機器一覧

機器名	仕 様	機器名	仕 様
テレメータ装置	形名 MELTEC-8 テレメータ方式 デジタルテレメータ方式 呼出方式 ボーリング方式 信号伝送方式 パルスコード方式 伝送速度 200ビット/秒	データ処理装置	形名 MELCOM-70 モデル 25 主メモリ 24 KW 以上 主メモリ素子 nMOS LSI サイクルタイム 0.5µs 入出力タイプライタ 1台 ロギングタイプライタ 4台
操作卓	形名 コントロールデスク形 構成 テレメータ制御部 移動通信部 状態表示部(ランプ) 時刻表示部	グラフィック監視盤	盤面材質 モザイク方式 寸法 幅 6130×高 2,100×奥行 800mm 表示部 月日、時分表示 幹線流量表示 水位上下限表示 池、吐水槽水位表示(主要部)、雨量表示等
無停電電源装置	容量 5kVA, 10分間 入力電源 AC 200V 3φ, 100V 1φ 出力電源 AC 100V, 60Hz 充電方式 全自動浮動充電方式(バイパス構造付) 蓄電池 炭結形アルカリ電池	CRT表示装置	表示寸法 20インチ 表示色 7色 表示字数 2,000字/画面 表示字種 英数カナ211字 種簡易図形表示機能付 オプション ライトペン付

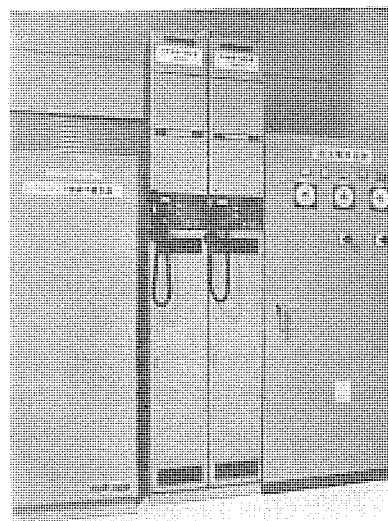


図 8. 無線中継所機器

ごとの詳細データを表示したものである。

なお前記の画面一覧表は、異常状態が発生すると自動的に表示され、操作員に選択すべき画面をフリッカして知らせるようになっている。

4. 5 構成機器及び機器仕様

このシステムを構成する主要機器及びその概略仕様を表3.に示す。

図7.は中央管理室であり、グラフィック監視盤、操作卓、CRT表示装置、タイプライタ、データ処理装置等が監視操作しやすいように配置されている。また図8.は無線中継所のテレメータ中継装置・移動無線中継装置及び直流電源装置である。

5. む す び

以上、香川用水管理システムについてその概要を述べたが、農業用水における管理システムの導入はまだ全国的に実施例が少なく、管理システム導入の評価はまだ十分になされていない現状ではあるが、今後急速に集中管理システムの導入が増加するものと考えられる。

導入された管理システムがいかに効力を発揮するかは農業分野あるいは、農業土木と近代エレクトロニクス技術とのマッチングの問題でもあり、導入される地区の特徴をとらえ、維持管理体制を考慮しつつ導入の主目的を明確にした上で、管理設備を積上げていくことが重要であり、いたずらに高級設備を導入したり、維持管理面を無視したような設備を導入することは厳に慎まなければならない。そういった意味で、今後ともこの分野に携わる関係各位のご指導、ご協力をお願いしたい。

終わりに当たりこの管理システムの計画・施工にご指導・ご協力いただいた香川県開発水利課、香川用水土地改良区その他関係各位に深く感謝する次第である。

参 考 文 献

- (1) 山下、松尾：香川用水における農業用水の管理制御機構について、農土誌、45(10)
- (2) 田丸：香川用水の管理について、“水と土”第28号(昭52)
- (3) 佐戸、脇谷、和田：香川用水における農業用水の配水管理について、“水と土”第31号(昭52)
- (4) 小林ほか：三菱電機技報、52, No. 10(昭53)

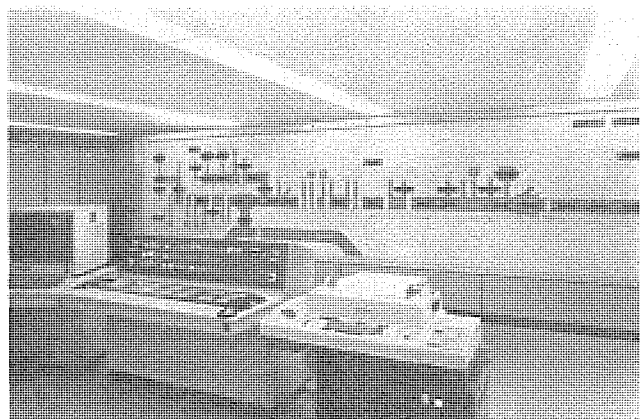


図 7. 中央管理室

マイクロ波用静電誘導形トランジスタの電気的特性

梶原 康也*・行本 善則**

1. ま え が き

静電誘導形トランジスタは、1950年に渡辺、西沢ら⁽¹⁾によりアイデアが出された半導体素子である。静電誘導形トランジスタを実現するには、高比抵抗で短チャネルの電界効果トランジスタ構造を作らなければならないが、アイデアが出てから20年後の1970年に至ってはじめて静電誘導形トランジスタが実現した。

当時の静電誘導形トランジスタの構造は、3極真空管と類似の構造で、図1.に示すようなプレートに相当するドレイン、カソードに相当するソース、グリッドに相当するゲートよりなっており、ゲートは半導体内部に埋め込まれていた。その電流電圧特性は3極真空管形の非飽和形特性を示す。このような構造のトランジスタは縦形FETと一時呼ばれたことがある。

同様な構造の電界効果トランジスタ(FET)は、S. Tszher⁽²⁾、R. Zuleeg⁽³⁾らによって試作されているが、5極真空管形の電流電圧特性を示していた。3極真空管形特性と5極真空管形特性とは、動作原理に大きな違いがある。

当時開発された静電誘導形トランジスタはシャ断周波数が1MHzくらいで、主としてオーディオ用として実用化された。筆者らは、この静電誘導形トランジスタが本質的には高周波高出力素子になり得る可能性をもっていることを見極め、新技術開発事業団の委託を受けて、マイクロ波用静電誘導形トランジスタの開発を行い、1GHzで100WのRF出力を得る素子を開発したので、静電誘導形トランジスタの特徴、開発経過、開発した素子の電気的特性などについて報告する。

2. 静電誘導形トランジスタの構造と動作

静電誘導形トランジスタは、当初3極真空管に類似した埋め込みゲート

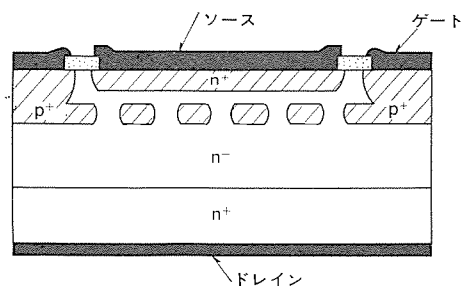


図1. 埋め込みゲート形静電誘導トランジスタ

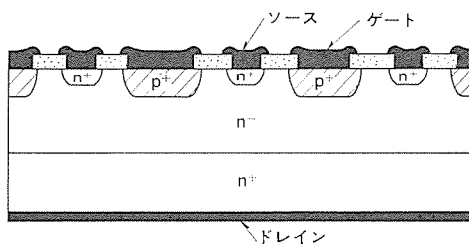
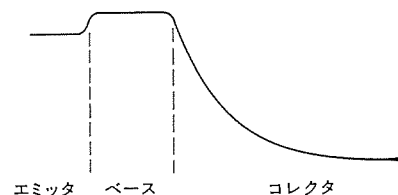
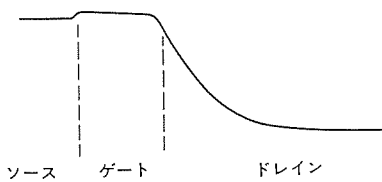


図2. 表面配線形静電誘導トランジスタ

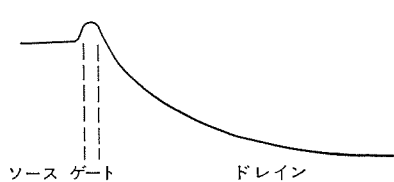
電流が制限される方式になっていて、ドレイン電圧を印加しても電圧はチャネルの末端のピンチオフ点よりドレイン側に主としてかかり、電流は飽和してしまう。ゲート電圧により、チャネルが完全に空乏化すれば、ドレイン電圧を印加しても電流は流れなくなってしまう。電流の



(a) バイポーラトランジスタ



(b) 電界効果トランジスタ



(c) 静電誘導形トランジスタ

図3. 各種トランジスタのポテンシャル分布図

温度特性はキャリアのドリフト移動度の温度特性に等しくなり、シリコンでは絶対温度の約-2.6乗に比例し、温度係数は負になり、熱的には安定である。

電界効果トランジスタの高周波特性は、チャンネルのソース側に残る抵抗とゲート・チャンネル間で形成される静電容量によるCRの時定数により決まる。したがって高周波動作にとっては、チャンネル長を短くすればする程好ましいといえる。

静電誘導形トランジスタは、電界効果トランジスタのチャンネル長を極限まで短くしたものと考えられる。したがって、チャンネル内には抵抗の領域が残らず、キャリアはソースから直接ドレイン領域の空乏層中に流れ込む。

一方バイポーラトランジスタとの比較では、ベース幅を極限まで薄くしたものと考えられる。単にベース幅を薄くすれば、パンチスルーのため耐圧が低下してしまうが、ゲートを設けて、電位障壁を作ることにより、ドレイン電流の制御を行うとともに、耐圧の低下を防いでいると考えられる。

以上の比較からわかるように、静電誘導形トランジスタでは、バイポーラトランジスタのベースを取り去ることにより、キャリアの走行時間を短くしたのと同様であり、また、電界効果トランジスタのチャンネル抵抗を極端に小さくすることにより、CR時定数を短くしたのと同様である。静電誘導形トランジスタでは、ソースからドレインまで空乏化され、高い電界が生じているために、キャリアは $10^7 \text{ cm}^2/\text{s}$ という飽和速度で走行する。

以上のことから、静電誘導形トランジスタは、本質的に高周波動作に適していることがわかる。

3. 静電誘導形トランジスタの電流電圧特性

静電誘導形トランジスタの電流電圧特性は、小電流領域では、ゲートによって形成された電位障壁を熱的に励起されて超える電子の数が電流を決めるために、式(1)で示されるようなゲート電圧、ドレイン電圧に対して指数関数になる。

$$I_D = I_0 \exp \left\{ \frac{q}{kT} \eta \left(V_G - \phi_B + \frac{V_D}{\mu} \right) \right\} \quad (1)$$

ここで、 I_D はドレイン電流、 I_0 は構造によってきまる電流である。 η はゲート電圧やドレイン電圧の電位障壁への寄与率、 μ は電圧増幅率、 ϕ_B はゲートとチャンネル間のビルトインポテンシャルである。 V_G 、 V_D はそれぞれゲート電圧、ドレイン電圧で、ゲート電圧は負電圧、ドレイン電圧は正電圧が印加される。

この領域では、式(1)からわかるように、ドレイン電流の温度係数は正になっている。

キャリアの注入量が増し、キャリアの濃度が、イオン化したドナー濃度と同程度又はそれ以上になると、注入されたキャリアにより、ドレイン領域の電位分布が変化し、キャリアの走行速度も飽和しているの、ドレイン電流は式(2)のように表される⁽⁴⁾。

$$I_D = A \frac{v_s}{l} V_D + g_m V_G + I_{D0} \quad (2)$$

ここで、 l はドレイン領域の空乏層厚み、 v_s はキャリアの飽和速度、 A 、 I_{D0} はそれぞれ構造からきまる定数である。 g_m は相互コンダクタンスで、構造からきまる。

大電流領域では、ドレイン電流の温度係数は主として、 v_s の温度係数になり、絶対温度の約-0.5乗に比例する。このことは実験的にも確認された。

静電誘導形トランジスタは、ドレイン電流の温度係数が、大電流領域で負になることから、熱的に安定であり、大電力用素子としても適していることがわかった。

このような特徴をもった静電誘導形トランジスタが、これまでその実力を発揮できなかった原因は寄生素子の影響が大きかったからと考えられる。1つは2章で述べたように、ゲートのリード抵抗が大きかったことである。次に本質的な要因に基づく寄生素子を検討する。

4. 静電誘導形トランジスタの高周波等価回路

静電誘導形トランジスタの高周波等価回路は、その構造と動作から図4.に示すようになる。(a)は断面で見て寄生素子の入る様子を示したもので、(b)は R_G 、 R_s 等が金属配線で十分に小さいとして本質的に寄生する素子のみをとり出した等価回路図である。チャンネルの抵抗が入らないことが特徴である。

図4.(b)の等価回路により求めたYパラメータは次のようになる。

$$Y_{11} = j\omega(C_G + C_{DG}) \quad (3)$$

$$Y_{12} = -j\omega C_{DG} \quad (4)$$

$$Y_{21} = g_m - j\omega C_{DG} \quad (5)$$

$$Y_{22} = G_D + j\omega C_{DG} \quad (6)$$

ここで、 ω は角周波数、 G_D はドレインコンダクタンスである。最大安定利得(MSG)は、Yパラメータから次のように求められる。

$$\text{MSG} = \left| \frac{Y_{21}}{Y_{12}} \right| \quad (7)$$

式(4)、式(5)からMSGは次のようになる。

$$\text{MSG} = \frac{\sqrt{g_m^2 + (\omega C_{DG})^2}}{\omega C_{DG}} \quad (8)$$

MSGを大きくするには、 g_m を大きくし、 C_{DG} を小さくすればよいことがわかる。 g_m は主として構造によって決まるために、 g_m の変動範囲は限定される。したがって利得を高めるには C_{DG} を小さくすることが重要である。

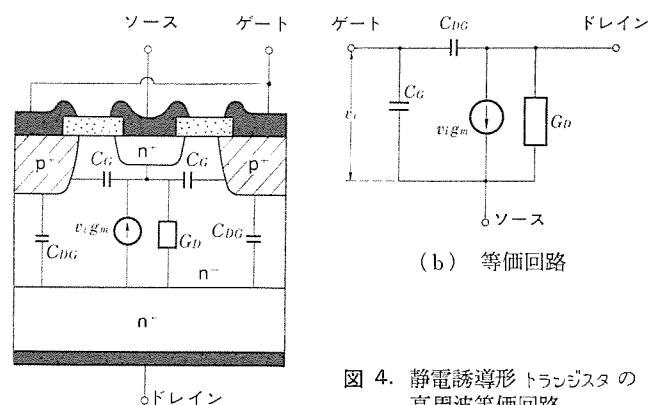


図4. 静電誘導形トランジスタの高周波等価回路

(a) 寄生素子を示す断面図

5. マイクロ波用静電誘導形トランジスタの設計

C_{DG} は動作領域の空乏層を、ゲート、ソースの存在する面とドレインとではさむコンデンサの容量になり、動作領域の面積に比例し、厚みに反比例する。一方 g_m はソース長に比例するので、単位動作領域中の総ソース長ができるだけ長くなるようなパターン設計が必要である。そのためには、インタディジタル構造が適した構造である。動作領域の

厚みは空乏層が厚いほうが利得を高めるのによいが、動作領域の厚みを厚くしすぎると、出力電力が低下する。

出力電力はドレインコンダクタンスと印加電圧の2乗の積に比例するので、ドレインコンダクタンスとドレイン・ゲート間耐圧とを大きくすることが大出力化に必要である。ドレインコンダクタンスは動作領域の厚みの2乗に反比例するので、ドレインコンダクタンスを大きくするには、動作領域の厚みを薄くするのがよいが、利得の低下、耐圧の低下などを招くので最適化しなければならない。

大電力素子では放熱の問題が重要である。静電誘導形トランジスタでは、ドレイン電流の温度係数が負であるので熱的安定性はよいが、発熱が集中すると温度が上昇し、ドレイン電流が減少し出力電力を低下させてしまう。したがって動作領域を多数のセルに分割することにより、発熱を分散させるような設計を行った。

6. マイクロ波用静電誘導形トランジスタの

試作と電気的特性

マイクロ波用静電誘導形トランジスタのチップ表面パターンは図5.に示すように、数個のセルを集めた形になっている。各セルはソースとゲートとが互にくしの歯状の電極配置になっている。

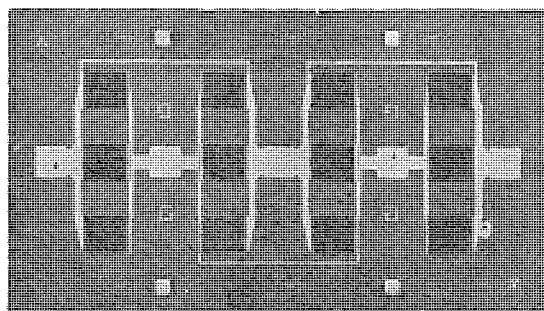


図 5. 20 W 素子の表面パターン

図5.に示すチップは高周波出力20 Wの素子で、代表的な電流電圧特性は3極真空管形特性である。このチップの温度分布を図6.に示す。直流消費電力20 Wのとき、セル内の温度は100~110°Cの間に入っており均一に分布していることがわかる。

小信号Sパラメータによる高周波特性の評価では、図7.に示すように、1 GHzでの最大安定利得は7 dBを示した。

(MAG: 最大有効利得, MSG: 最大安定利得)

この素子での1 GHzでの入出力特性は、図8.に示すように、出力20 W、利得4 dB、ドレイン効率50%の特性であった⁽⁵⁾。

次に、この素子を使った700 MHz帯の増幅器の試作例を示す。増幅器は3段の増幅段からなり、最終段は2素子の並列動作で40 Wの出力を得ようになっている。試作した増幅器の外観を図9.に示す。周波数特性は図10.

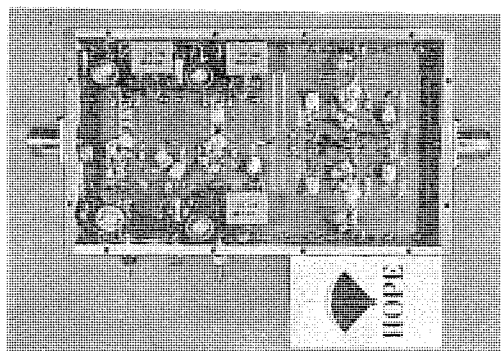


図 9. 700 MHz, 40 W 増幅器

に示すように、中心周波数700 MHzで、利得が18 dBであり、 ± 0.5 dBの幅では60 MHzの帯域幅を得ている⁽⁶⁾。

次にパターンを微細化し高性能化をはかって50 Wチップを試作した。チップは図11.のごとく、分割された5個のトランジスタブロックからできている。それぞれのブロックは10 Wの出力を出す性能をもっている。このチップ3個から12ブロックを使い、内部整合を行うことによって1 GHzで100 Wの出力を得た⁽⁷⁾⁽⁸⁾。

1ブロックの小信号Sパラメータの測定から求めた高周波特性を図12.に示す。最大安定利得は2 GHzでも約6 dBの利得を示し、単方向利得(U)を外そう(挿)して利得が0 dBになる周波数、すなわち最大発振周波数は約5 GHzであった。

1ブロックで、1 GHzでの入出力特性は、10 Wの出力で、利得7 dB、ドレイン効率約50%を示している。多ブロックの電力を合成するには、そのまま並列接続すると、インピーダンスが低くなり入出力回路

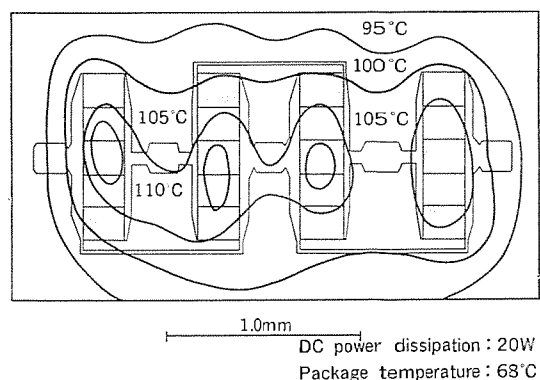


図 6. チップ表面の温度分布

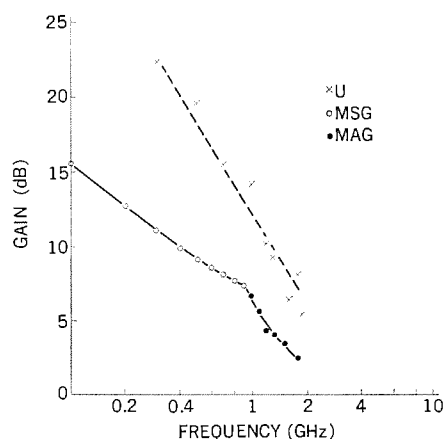


図 7. 20 W 素子の小信号利得の周波数特性

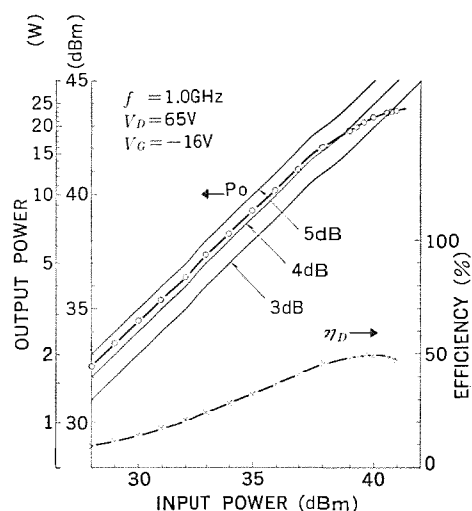


図 8. 1 GHz, 20 W 素子の増幅特性

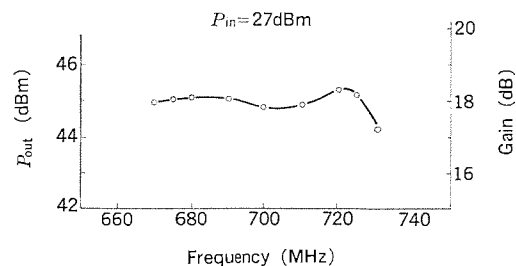


図 10. 700 MHz, 40 W 増幅器の周波数特性

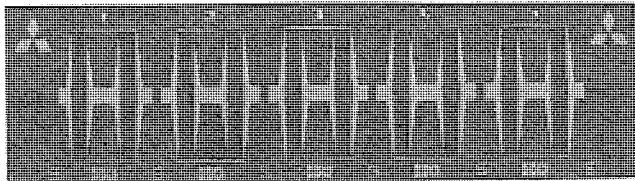


図 11. 50 W 素子の表面パターン

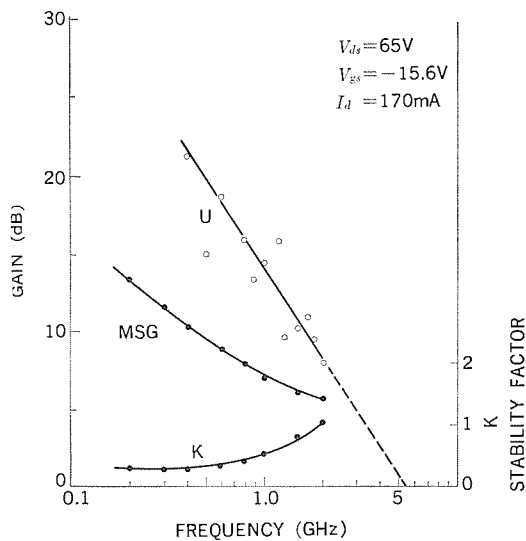


図 12. 50 W 素子の 1 ブロックの高周波特性

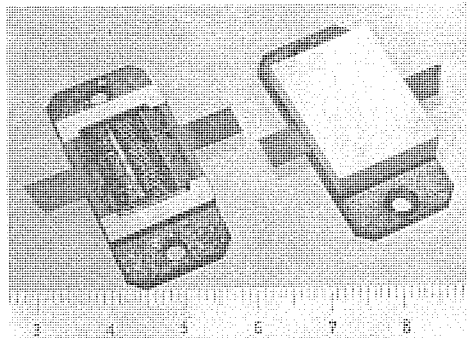


図 13. 1 GHz, 100 W 素子の外観

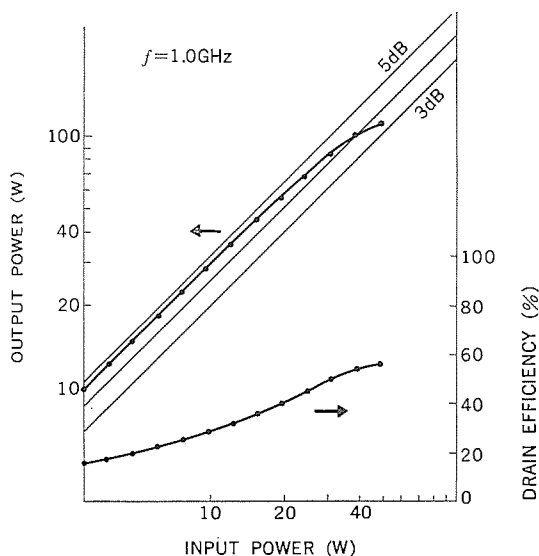


図 14. 1 GHz, 100 W 素子の増幅特性

表 1. 試作素子の電氣的諸特性

項 目	1 GHz 20W 素子	1 GHz 10W (1 ブロック)	1 GHz 100W 素子	100MHz 100W 素子
ゲート・ソース間耐圧 (V)	40	30	30	60
ドレイン・ゲート間耐圧 (V)	85	90	90	350
ドレイン電流 ($V_D=10V$) (mA)	500	600	7,200	1,500
相互コンダクタンス (ms)	100	105	1,200	500
電 圧 増 幅 率	7.5	10	10	10
ゲート・ソース間容量 (pF)	12	5.3	63	160
ゲート・ドレイン間容量 (pF)	7	2.5	30	40
飽 和 出 力 (W)	25	11	110	130
電 力 利 得 (dB)	4.5	7	4.5	10

での損失が大きくなるため、利得は低下し、出力はのびない。損失を少なくするには、チップのすぐ近くに整合回路を設けインピーダンスを高めることが必要である。

12 ブロックで内部整合を行った素子の外観と、1 GHz 増幅器での入出力特性とを図 13., 図 14. に示す。出力電力が 100 W で利得 4 dB, ドレイン 効率 55 % の特性が得られた。

また、100 MHz 程度の周波数で耐圧を高くした素子は、耐圧が 250 V, 動作電圧が 130 V で、30 MHz では 200 W, 100 MHz で 100 W の出力が得られている⁽⁹⁾。最後に、試作した素子の電氣的特性を表 1. にまとめておく。

7. む す び

静電誘導形トランジスタは本質的に高周波高出力トランジスタに適した構造と動作原理をもっているにもかかわらず、従来から実現が困難であったが、微細加工技術の進歩により、1 GHz, 100 W の静電誘導形トランジスタを試作しその特性を確認した。

静電誘導形トランジスタは、高周波高出力の真空管の置き換えや加熱装置やプラズマ装置などの応用が期待される。

なお、この研究開発に関し、ご指導いただいた東北大学の、西沢潤一教授に深く感謝いたします。また、この研究開発は新技術開発事業団の委託により実施されたものである。

(昭和 54-12-4 受付)

参 考 文 献

- (1) 渡辺, 西沢: 特許公報, 昭 28-6077
- (2) S. Tszner and R. Gicquel: Proc. IEEE, 52, p. 1,502~1,513 (1964)
- (3) R. Zuleeg: Solid State Electron, 10, p. 559~576 (1967)
- (4) 山本ほか: 信学会研報, ED 76-42, p. 33 (昭 51)
- (5) Y. Yukimoto et al.: Japanese J. Appl. Phys. 17, Supplement 17-1, p. 241 (1978)
- (6) 相賀ほか: 信学会全国大会, No. 696, p. 3-222 (昭 53)
- (7) M. Aiga et al.: 9th European Microwave Conference.
- (8) Y. Kajiwara et al.: Digest of Tech. Papers, 11th Conf. (1979 International) on Solid State Devices, Tokyo, p. 195

2,000m深海潜水調査船用電機品

黒川 武彦*・富永 隆弘**・朝枝 健明***・鶴野 秀之+・藤田 昇三+

1. ま え が き

科学技術庁の委託により、海洋科学技術 センターにおいて昭和 52 年度に我が国初めての「2,000 m 深海潜水調査船 システム」の基本設計が行われ、続いて 53 年度より開発建造が開始された。このシステムの中の潜水調査船は三菱重工業(株)に発注され、現在神戸造船所において建造中である。

三菱電機(株)は主として本船の動力装置用電機品を担当し、受注前より三菱重工業(株)と共同して機器開発についての事前研究を実施した。深海での耐環境性能はもとより徹底した小形軽量化、高性能化の要求を満足するため、基本部品の開発、試作機による性能検証を重ねてこのほど実機を製作納入した。

ここでは、我が国最初の 2,000 m 級用電機品として、その概要と設計製作に当たって特に考慮した諸事項などを紹介する。

2. 潜水調査船の概要

この潜水調査船は長さ約 9.3 m、空中重量約 25 t で、3 人が乗込むための内径 2.2 m の球形耐圧かく(殻)をもっている。耐圧殻は通常の鋼材の約 4 倍の強度をもつ特殊鋼で作られ、2 個の観測用のぞき窓と 1 個のカメラ用窓がついている。また耐圧殻内には操船用の操縦スティック、制御監視装置及び航海・通信装置を組込んだコントロールコンソールを装備している。図 1. に本船の機器一般配置を示す。

潜水調査船は、支援母船にとう(搭)載されて調査海面まで運ばれ、母船の装置により着水、揚収される。着水後、潜水調査船は母船から離れ、原則として、重量・トリム調整装置により潜水調査船を負浮力の状態にして潜入し、正浮力の状態にして浮上する。中正浮力状態で推進操縦装置により前進、後進、回頭及び上昇、下降運動を行う。

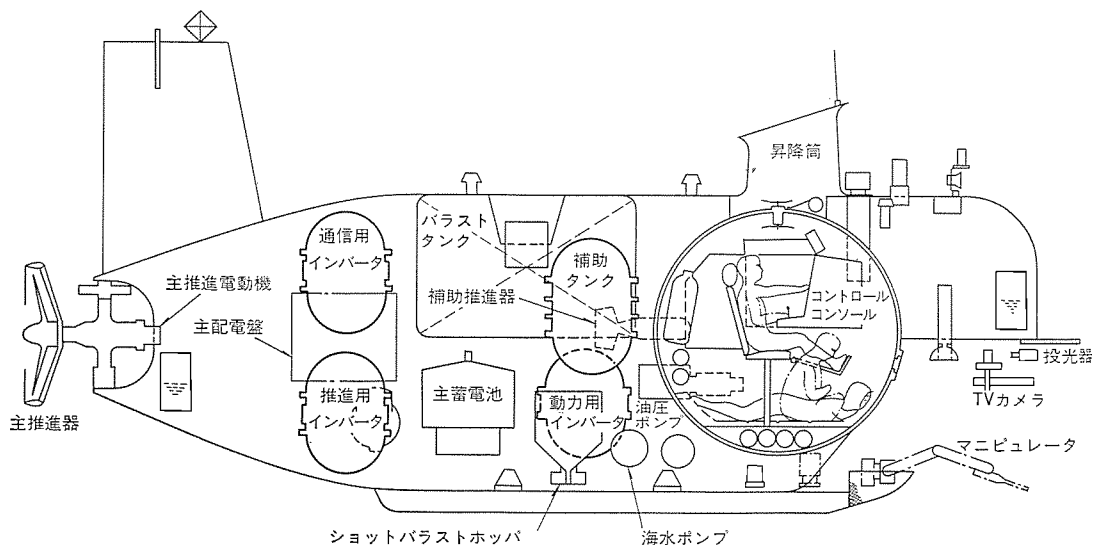


図 1. 潜水調査船の機器一般配置

有人潜水調査船の目的は、人間の目で直接対象物を調査、観察することにある。このため調査船の水中での運動は、3次元方向に敏しょうでかつきめ細かさが要求される。したがって、全面的に極度の小形・軽量化を行うとともに重量・トリム調整装置、推進操縦装置は、微細な制御が必要である。そこで、有効な小形・軽量化の方策として、操作部、監視部を除き、ほとんどの機器を耐圧殻外に置き水中重量の低減をはかっている。

潜水調査船の動力源である主蓄電池装置は、酸化銀-亜鉛電池を油し(漬)として均圧構造のチタン合金製容器に納め、1群(基)の定格電圧を 108 V として、2 群を耐圧殻外に装備している。この電源から同じく、チタン合金製油漬均圧構造の主配電盤を通して、水中投光器へ直接給電し、またインバータを介して、推進、ポンプ用電動機及び航海・通信装置負荷等へ給電している。電動機は油封均圧形を採用し、インバータはチタン合金製の仮形耐圧容器に収納して、いずれも耐圧殻外に装備している。

主蓄電池装置の入切、主配電盤各回路の開閉、各インバータの始動、停止は、コントロールコンソール上の電源操作パネルで操作される。主推進器、補助推進器の発停回転数制御、首振り制御は、コントロールコンソール上の操縦スティックで行われ、また、観測者が、のぞき窓から外部を見ながら操作できるよう別にコントロールボックスが備えられている。

3. 電 動 機

潜水調査船には、主推進用、補助推進用、海水ポンプ用、油圧ポンプ用の各電動機が搭載されている。

2,000 m という高水圧の海中で、しかも有人の潜水調査船に使用する電動機は、高信頼性を有するものでなければならず、耐深度圧(耐圧力性)、巻線絶縁物の耐圧力性・耐油性、小形軽量化、高効率

化、軸シール、ケーブルの接続方式等が大きな問題項目である。これらは要素ごとに詳細な検討を行い、油封均圧形かご形 3 相誘導電動機を選定し、モデルテスト、試作機による確認試験を経て、実機的设计製作を行った。

表 1. は各電動機の仕様を示し、図 2. は主推進用電動機の外観、図 3. は主推進用電動機の構造を示す。

以下にこれらの電動機の特徴を述べる。

表 1. 電動機の仕様

	主 推 進	補 助 推 進	海水ポンプ	油圧ポンプ
形 式	油封均圧形かご形 3 相誘導電動機			
出 力 (kW)	4.6	1.5	4.5	1.5
相 数	3	3	3	3
電 圧 (V)	85	85	85	85
周 波 数 (Hz)	105/116	120	32	60
回 転 数 (rpm)	3,060/3,312	3,420	660	1,700
絶 縁 種 別	F	F	F	F
減 速 比	1:18	1:6	—	—
設計圧力 (kg/cm ²)	311	311	311	311
台 数	1	2	1	1

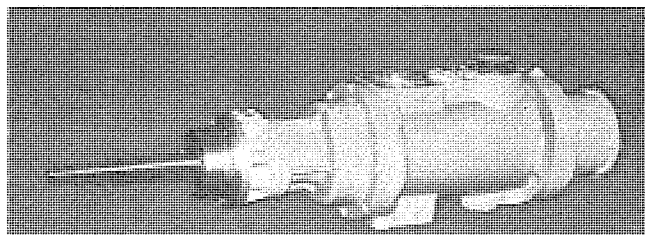


図 2. 主推進用電動機

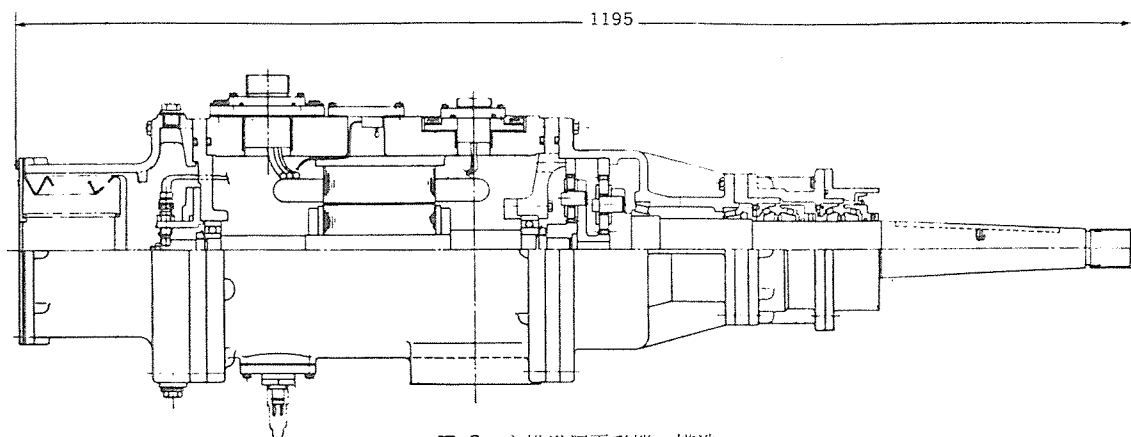


図 3. 主推進用電動機の構造

(1) 構 造

(a) 小形軽量化

ケーシング材料として耐食性に優れ、熱伝導性のよいアルミ鋳物を採用して軽量化することができた。

(b) 高効率化

電動機の損失には、銅損、鉄損、機械損があるが、油封式電動機においては、機械損、すなわち油中で回転することによる摩擦損が最も大きい。したがってこの損失をいかに小さく設計するかが効率向上の決め手となる。

損失低減策として電動機の回転子スロットはクローズスロットとし、固定子内径面も極力滑らかになるよう製作した。

また、封入油については、極力低粘度の油を使用した。これらの方策により計画効率を十分満足する結果を得た。

(c) 耐圧力性

電動機の内外圧をバランスさせるため、ベローズを用いた。ベローズの容量は、深度圧による封入油の体積収縮、温度上昇による封入油の体積膨張を考慮して決定し、ストロークにも十分の余裕を見込んだ。

(d) 軸シール

軸シールは、メカニカルシールをタンデムに組合せ、更にダストシールを目的としてオイルシールを設けた。メカニカルシールとメカニカルシールとの間には、油を封入し独立した均圧ベローズを設けている。

シールは、メカニカルシール単独で達成されるものではなく、正しい油封入と、均圧機構の正常な作動が必要である。

(e) ケーブルとの接続

外部ケーブルとの接続にはプラグインタイプのコネクタを採用した。このコネクタの採用により、ケーブルとの着脱は極めて簡単になり、電

動機運搬の際、ケーブルと別々に運搬できるため、ケーブルに傷をつけることがなくなり、信頼性をより高くできた。

(2) 絶 縁

巻線は深度圧による 207 kg/cm² の高圧油中にさらされるため、実物大のモデルを用いて検証試験を行った。

まず、加圧による絶縁物の圧壊や減圧時の絶縁物の膨張による絶縁特性の変化について、0~311 kg/cm² で加圧速度毎秒 25 kg/cm²、減圧速度毎秒 40 kg/cm² という極めて過酷な条件で 600 回の圧力サイクルテストを行い、絶縁方式が耐圧力性の面で問題ないことを確認した。

更に、効率向上の面から低粘度の作動油を使用するため、各種の絶縁材料について長時間の油中浸漬試験を行い、問題がないことを確認した。

(3) 騒 音

海中における通信には音波による方法がとられるため、電動機あるいはその他の機器から発生する騒音は通信障害を招く恐れがある。今回納入した電動機の中で、主推進用、補助推進用電動機は遊星歯車の減速機を内蔵しているため、特に高精度の歯車を製作するなど騒音対策には十分な注意を払った。

4. インバータ

インバータ装置には推進、動力、通信用の 3 種類があり、用途別に 3 台のチタン合金製の耐圧容器に収納されている。仮の鉄容器に収納した推進及び通信用のインバータを試作して、温度上昇、効率、性能、騒音、振動等についての検証試験を行い、その結果にもとづいて実機のインバータを製作した。実機においても耐水圧コネクタの取扱いの問題から仮の鉄容器に組込み、電動機あるいは模擬負荷との組合せ

試験を行った後、チタン合金製の耐圧容器に組替えた。インバータの方式として、重量、効率、騒音等を比較検討した結果、電圧形のトランジスタインバータを採用し、更に素子の並列数を減らして信頼性を向上させるために、大容量のトランジスタを開発した。

4.1 インバータの仕様

推進、動力、通信の各インバータの仕様を表2.に示す。

(1) 推進用インバータ

推進用インバータは、主推進用と補助推進用の2台のインバータから成り、1台の耐圧容器に収納している。制御方式としては、ひん繁な

可逆可変速運転が要求されるため、PWM（パルス幅変調）制御方式を採用し、VVVF（可変電圧可変周波）運転を行う。電源が銀電池であるため、回生制動時には回生電力を動力及び通信用の負荷に消費させる。図4.に主推進用インバータのブロック図を示す。速度指令が与えられると、その極性で正逆転を判別し、相回転を指令する。また速度指令は傾斜信号に変換されて、電圧及び周波数パターンを発生し、高周波変調回路に与えられるが、電圧パターンは主回路の入力直流電圧値に対応して補正される。高周波変調回路は出力電圧を零から最高電圧（120°幅のく(矩)形波モード）までを64ステップに分割して、電圧パターンに対して所定の高周波変調モードを発生する。

表 2. インバータの仕様

用途	インバータ	定 格				過 負 荷			負 荷 (電動機定格)	制御電源 (DC-DC)
		kVA	V	A	Hz	CONT	10分間	1分間		
推進用	主推進用	6.5	85	58	105 MAX (120)	100%	150%	180%	(4 kW 1台)	個 別
	補助推進用	6.4	"	44	120	"	/	125	(1.5kW 2台)	
動力用	海水ポンプ用	7.4	"	50	32	"	110%	"	(4.5kW 1台)	共 通
	油圧ポンプ用	3.2	"	22	60	"	/	"	(1.5kW 1台)	
通信用	DC/AC	2.2	115 ±2%	19.1	60	"	/	125	2.2 kVA	共 通
	DC/DC	2.3	28 ±2%	82.1	DC	"	/	"	2.3 kVA	

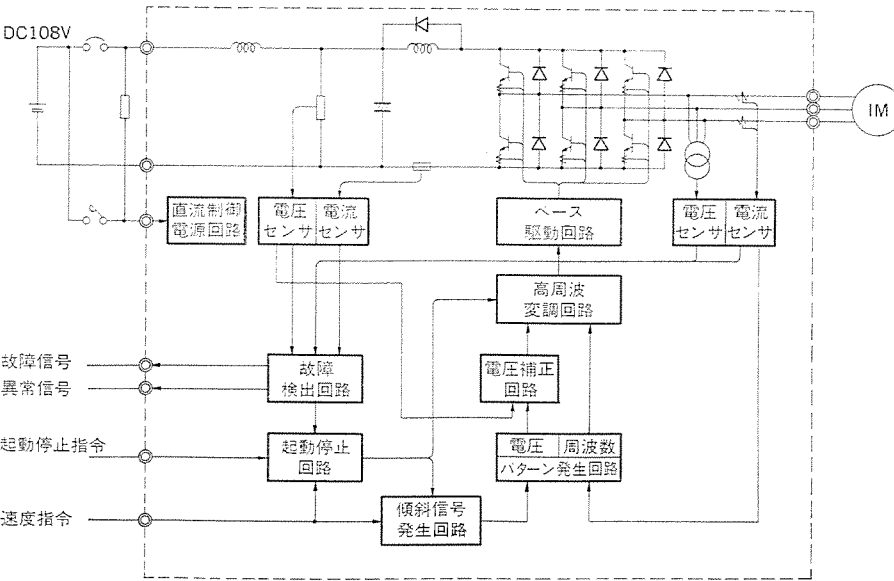
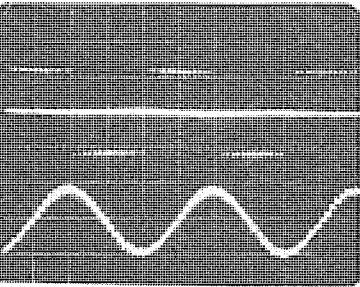
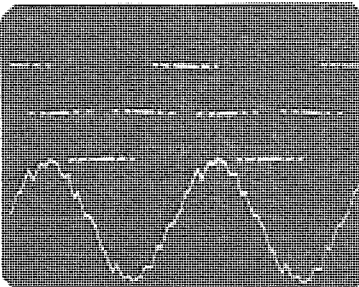


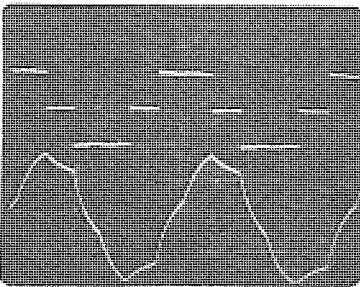
図 4. 主推進用インバータのブロック図



(a) 非同期モード



(b) 同期モード



(c) 矩形波モード

図 5. PWM 制御出力波形

高周波変調モードは2つの異なるモードを有し、同期モードと非同期モードに分けられる。同期モードでは出力電圧の位相は常に一定となり、ROM（リードオンリメモリ）で記憶された所定の基本波電圧のパルス幅変調波形で高調波含有率が最小になるように考慮している。非同期モードでは出力周波数に同期した正弦波信号と一定周波数の三角波信号との大きさを比較して得られるパルス幅変調波形で、零から24ステップまでの低電圧領域で使用される。この高周波変調信号を増幅して主回路のトランジスタのベースを駆動する。最適なベース電流を確保するために、エミッタ側に、トランジスタの電流増幅率と同じ変流比を有する変流器を設け、エミッタ電流を帰還させている。図5.に各モードにおける出力電圧及び電流の波形例を示す。

補助推進インバータは主推進インバータとほとんど同じ構成で、補助推進器2台が並列運転されるが、1台のみ相順切換えができるコンタクトを出力側に設けている。このため、2台の補助推進器の回転方向は4種類の組合せが可能である。

(2) 動力用インバータ

動力用インバータは海水ポンプ用と油圧ポンプ用の2台のインバータから成り、1台の耐圧容器に収納している。始動時の加速を滑らかにするために推進用インバータと同様の回

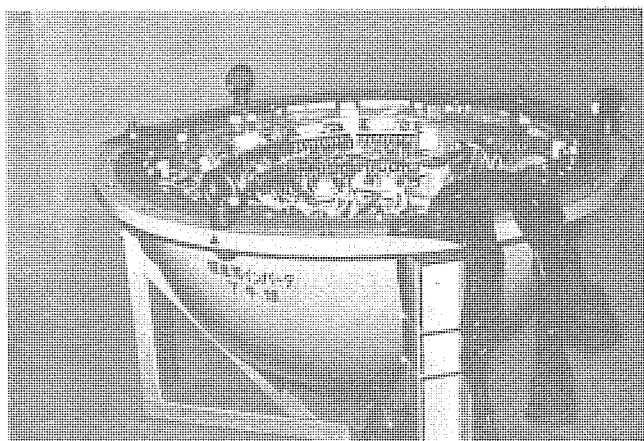


図 6. 推進用インバータの下半球

路構成で、PWM 制御による VVVF 方式を採用している。

(3) 通信用インバータ

通信用インバータは航海、通信、調査観測装置の電源として、AC 115 V 60 Hz 用と DC 28 V 用の 2 台のインバータから成り、1 台の耐圧容器に収納している。インバータは単相ブリッジ構成にして、出力側に変圧器及びフィルタ装置を設けている。制御方式は出力電圧をフィードバックして、インバータの位相制御により、電圧制御を行っている。DC 28 V 用インバータの周波数は 480 Hz にして変圧器及びフィルタ装置の重量軽減を図った。

4.2 構造

各インバータはチタン合金製耐圧容器内に立体的に組込み小形化を図っているが、この耐圧容器は三菱重工業(株)の製作によるもので、上下半球部と胴体部とに分離される。上下の半球部にはインバータを 1 台ずつ取付け胴体部には主回路と制御回路の耐水圧コネクタ、制御装置及び制御電源装置を納めている。半球部と胴体部のケーブルの接続にはキャノンプラグを使用して、開放運転及び密閉作業を容易にしている。図 6. に推進用インバータの半球部の外観を示す。チタン合金製の半球容器の内面にアルミシエルを装着し、このアルミシエルにインバータ部品を取付けている。主回路のトランジスタ及びダイオードはフラットベース形とし、絶縁スペーサを介して取付け、また変圧器、リアクトルはモールド成形してアルミシエルに密着させている。発生熱はアルミシエル、耐圧容器を通り、外部へ伝達され、水中での連続運転及び気中での 30 % 負荷 1 時間運転を可能にした。絶縁、腐食等の対策として、耐圧容器を密閉した後で、まず真空引きして水分を除去し、最後に窒素ガス

を封入した。

5. 主配電盤及び制御装置

5.1 配電系統

電源及び配電系統は、図 7. に示すように 2 基の主蓄電池による並列給電で、主推進、補助推進、動力、通信電源の 4 回路と、6 灯の投光器回路から構成されている。以下その特徴を述べる。

(1) 主回路しゃ断器と給電しゃ断器は選択しゃ断方式とし、万一負荷端で短絡故障が発生しても全停電にならぬよう協調をとっている。

(2) 2 基の主蓄電池のうち、1 基が事故を起こした場合にも健全主蓄電池及び回路に事故が波及しないよう、主蓄電池回路間の選択しゃ断を行う。このために各主蓄電池回路には方向性をもたせるためのダイオードをそう(挿)入した。これにより主蓄電池の 2 重系統と併せて給電の連続性を最大限に生かす方式となっている。

(3) 短絡保護には、一般にヒューズが用いられるが、油漬形の場合保守に難点があるため、配線用しゃ断器を用いることにより信頼性を向上させ保守点検を容易にした。

(4) 主回路の過負荷保護は、過電流リレーと電磁接触器の組合せで行い、過電流リレーは両蓄電池主回路の電流和で動作させる。

(5) 給電しゃ断器の保護装置は電磁引外しによる瞬時動作のみとし、負荷異常時は、各インバータ内に設けた過電流リレーの信号により各給電しゃ断器をトリップさせる。

5.2 油漬主配電盤

盤の形式はチタン合金製の密閉構造で、内部に電気絶縁油を封入し、下端部にベローズによる均圧装置を備えている。

盤内には、各給電回路用 225 A 配線用しゃ断器、400 A 主回路用電磁接触器、100 A 充電回路用電磁接触器のほか、補助リレー、選択引外し用ダイオードブロック、保護装置等を収納している。

油漬形のため、部品、配線材料等はすべて耐油性を十分吟味して

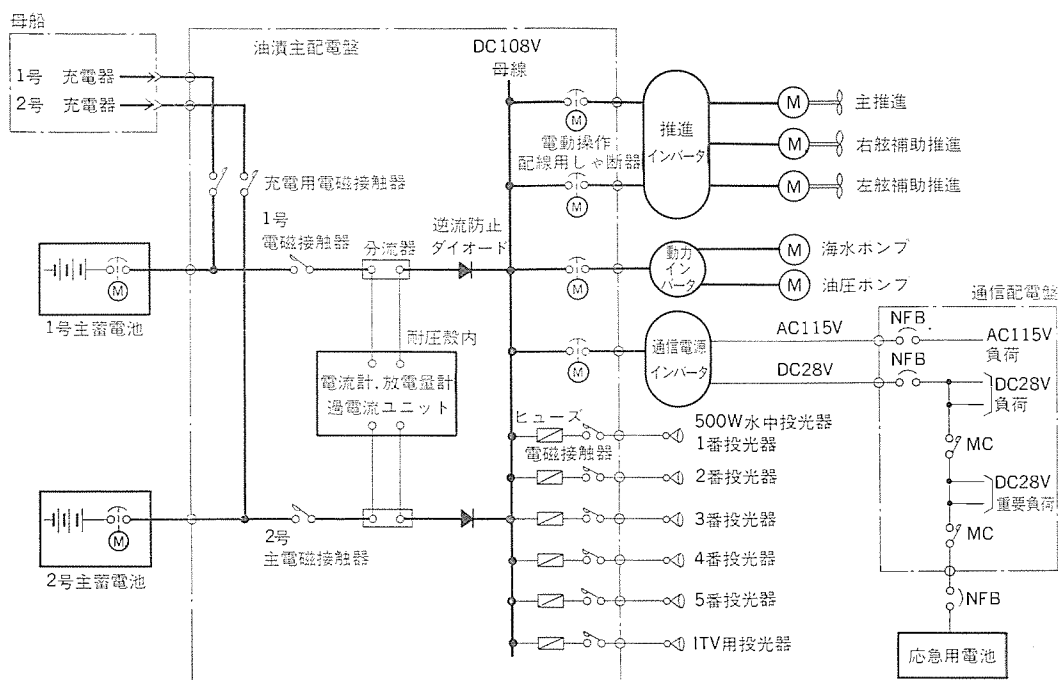


図 7. 配電系統図

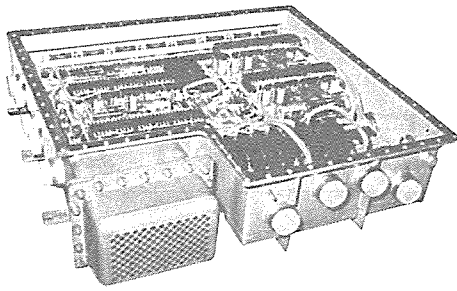


図 8. 主配電盤（開放状態）

使用した。また、微量ではあるが、高圧油中では開閉 アーク により クリカ（導電性炭素固形粒子）が発生するので、これによる絶縁劣化に備えて盤内の金属部はすべて耐油性の絶縁 コーティング を施した。

使用部品のうち、油中式として開発したしゃ断器、電磁接触器等の開閉器については、特に高圧油中下でのしゃ断性能の確保に力を注いだ。

ヒューズについては、常圧油中下における大電流しゃ断時の機械的強度の保持と、高圧油中下における小電流しゃ断時のクリカ生成防止対策に留意した。

その他の部品についても、すべて試供品により常圧及び高圧油中下における各種検証試験を行った後、実機を製作、更に実機用も再度性能を確認して使用した。

5.3 制御装置

図 8. は下部均圧装置側から見た主配電盤を示す。

制御装置はいずれも耐圧殻内のコントロール コンソール に組込まれるため、徹底した小形軽量化と同時に長時間の エージングテスト を実施するなど、特に信頼性の向上を図っている。制御装置の内容は次のとおりである。

- 1 式 電源操作 パネル……………電源及び動力関係の操作用
- 1 式 警報 パネル……………船内設備の故障及び異常警報用
- 1 式 推進操縦装置……………主推進及び補助推進用電動機 の速度設定器として使用し、操船のための前後進、回頭、上下動及び主推進首振り コントロール を行う
- 1 式 海水浸入検出装置……………油漬均圧容器、耐圧容器内に海水が浸入した場合これを検知する
- 1 式 ショットバラスト 投棄量処理、表示装置

6. 工場試験

(1) 常圧下の組合せ試験

推進及び動力 システム は、電動機、インバータ、配電盤及び制御装置を組合せて総合試験を行い、海運局、海洋科学技術 センター 及び日本海事協会の立会検査を受けた。なお、試験時電動機及び インバータ は試験用水そう（槽）に浸漬し、所定周囲条件下で計画性能を十分満足することを確認した。図 9. は推進 システム の試験状況を示す。

また特殊試験としては、同一耐圧容器内の インバータ の相互干渉、電子機器の耐 ノイズ 性能のほか高調波計測、波形分析を実施し、いずれも システム として問題のないことを確かめた。

(2) 耐水圧試験

配電盤用基本部品については盤製作前に個々に耐水圧試験を実施した。電動機は最終検査として深度圧の 1.5 倍に相当する 311 kg/cm^2 の加圧 サイクルテスト を行った。

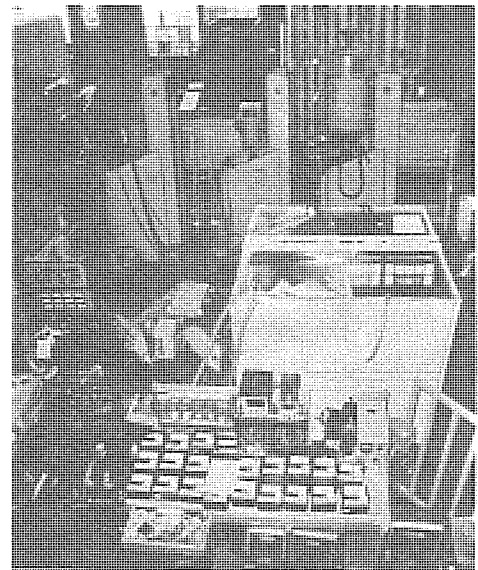


図 9. 推進 システム の総合組合せ試験

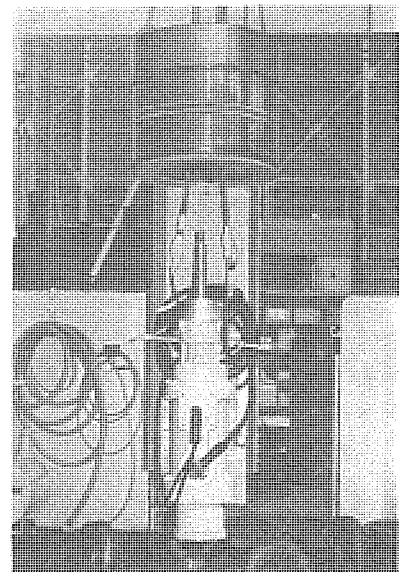


図 10. 耐水圧試験状況

この内、主推進用電動機は代表機として 207 kg/cm^2 の加圧下の無負荷可逆運転を行い、高圧油中での電動機損失と加圧力との関係が計画値を満足していることを確認した。図 10. は耐水圧試験用タンクに挿入中の主推進用電動機である。

7. む す び

2,000 m 潜水調査船用電機品は、長時間にわたって数々の検証試験を経て十分な信頼性をもつ製品として完成した。これらは深深度の海中用電機品としての特徴のほかに トランジスタインバータ とかご形誘導電動機による可変速制御方式の電気推進への応用としての意義をあわせ持っている。

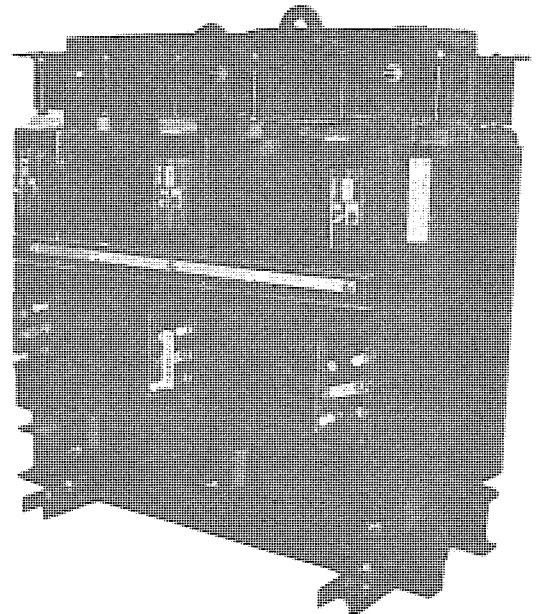
今後、大形耐水圧試験設備による システムチェック を経て実船に装備され潜航テストが行われるが、電機品は十分な性能を発揮するものと確信する。

終わりに、開発から製作納入まで終始ご指導をいただいた海洋科学技術 センター の関係各位に深く感謝の意を表する。

三菱電機では、このたび防災性・安全性にすぐれたF種モールド変圧器(CV-F形)を製品化し、発売を開始しました。このモールド変圧器は、電気的・機械的特性にすぐれたエポキシ樹脂でコイル導体をおおっているため、絶縁性・難燃性にすぐれ、防災・防湿などに高い信頼を要求される高層ビル、病院、公共施設をはじめとして、あらゆる分野に幅広く適用できます。

特長

- すぐれた難燃性・耐湿性
コイル導体をエポキシ樹脂で完全に包んでいるので、自己消火性にすぐれ、また吸湿による絶縁劣化が少なく、耐湿性にもすぐれています。
- 保守点検が容易
乾式ですから油の管理が不要で、長期間休止に伴うコイルの除湿および乾燥処理の必要がありません。
- 低騒音
コイルをモールド化し、さらにそのコイルを弾性支持してあるので、H種乾式と比較して騒音レベルが低くなりました。
- 絶縁強度は油入変圧器と同等
6kV級の絶縁強度(雷インパルス)は、油入変圧器と同等の60kV(6A号)です。
- 低電力損失
従来の油入変圧器と比較して低損失になるので、電力料金の節約になります。



- 安全性を配慮した構造
高圧端子関係を絶縁カバーでおおっているため、充電部が露出していません。
- 高信頼性、長寿命設計
コイル導体がエポキシ樹脂層で包まれているので、インパルス強度が高く、耐コロナ性にすぐれています。また振動・衝撃力、短絡機械力に強く、長期間の使用に耐えます。
- 小形・軽量
F種絶縁の採用で、一層の小形・軽量になっています。

標準仕様

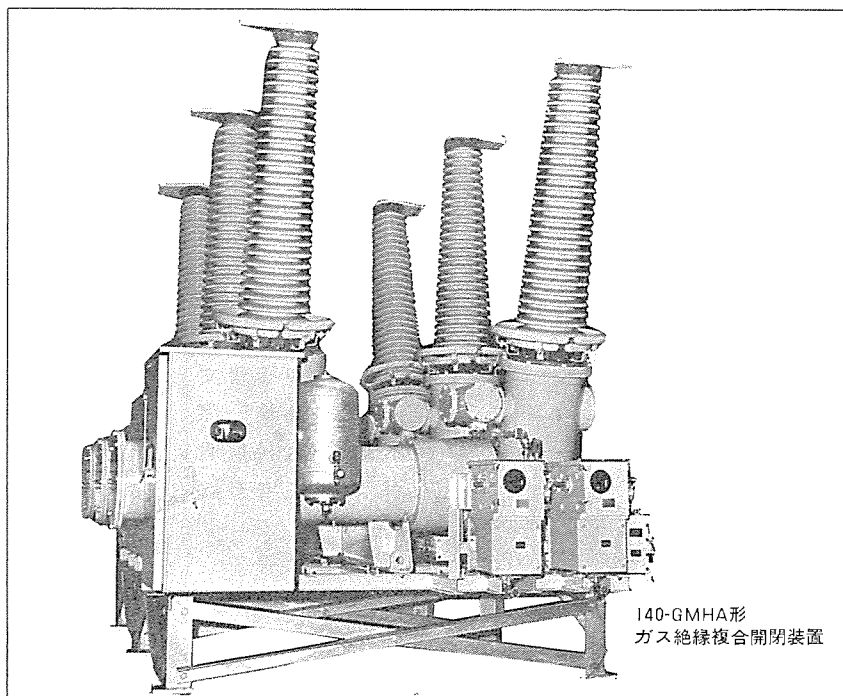
形 式		CV-F形、乾式、自冷式、屋内用				
絶 縁 種 別		F種絶縁(温度上昇限度95deg)				
適 用 規 格		JEC-204				
周 波 数		50、60Hz				
相 数		三 相			単 相	
高圧側電圧 (kV)	50kVA以下	R6.6－F6.3－6.0またはR3.3－F3.15－3.0			F6.75－R6.6－F6.45－F6.3または F3.375－R3.3－F3.225－F3.15－3.0	
	75kVA以上	F6.75－R6.6－F6.45－F6.3－6.0またはF3.375－R3.3－F3.225－F3.15－3.0				
低圧側電圧(V)		210		420(440)		210 105
容量(kVA)	10					単二・単三 共用
	20					単三専用
	30					
	50					
	75					
	100					
	150					
	200					
	300					
	500					
750						
1000						
1500						
2000						
標 準 絶 縁 強 度		電圧 交流試験電圧 雷インパルス試験電圧	6kV級 22kV 60kV	3kV級 16kV 45kV	400V級 4kV —	200V級以下 2kV —

1) 上記以外の特種仕様(容量、電圧、結線、インピーダンス電圧指定、混触防止板付き、その他)についても製作可能ですからご照会ください。

2) は標準品です。

新しい構成のコンパクトシリーズ完成 72~204kVガス絶縁複合開閉装置新シリーズ

三菱電機では、信頼性の向上、据付面積・重量の縮小、およびスマートな外観などを追求した、まったく新しい構成のコンパクトなガス絶縁複合開閉装置を完成しました。ガス絶縁複合開閉装置とは、発・変電所向けのしゃ断器、断路器および接地開閉器を一括して金属容器に入れてSF₆ガスで絶縁し、両側端子をブッシングにより気中に引き出した開閉装置です。在来の外部機器との接続も簡単になり、広い用途が期待されています。



特長

● シンプルな構成

このガス絶縁複合開閉装置では、しゃ断器と断路器との接続部を一直線配置とし、シンプルな構成を採用しました。その結果、内部導体を受ける電磁力および外部に与える電界強度を低く抑えることに成功しました。

● 小形軽量

両端の相のブッシングを相方向外側に傾斜して取付けており、下部の装置本体を小さくしています。当社の旧シリーズと比較して、重量は約50%、据付面積は約60%となりました。

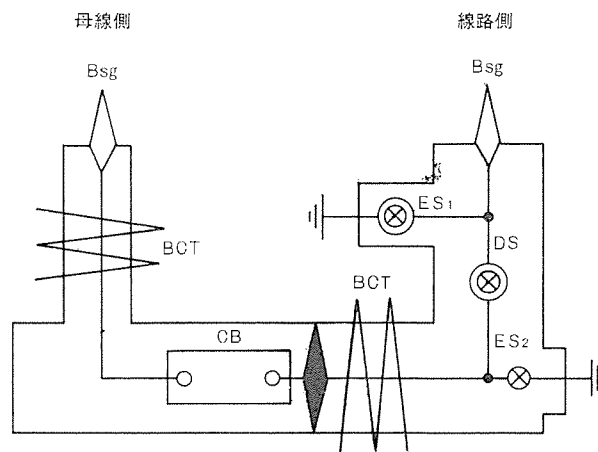
● 全装可搬

各機器をすべて架台より上に配置していますので、架台を切り離し、ブッシングを取付けてSF₆ガスを封入したまま輸送できます。据付工事および現地でのガスの取扱いが非常に簡単で、据付時間は大幅に短縮されました。(当社比50%)

● 高い信頼性

ガスシール箇所が少なく、各機器の構成がシンプルであるため、信頼性が一段と向上し、また、装置全体の重心が低く耐震性がすぐれています。

構成図



Bsg : ブッシング
BCT : ブッシング変流器
CB : しゃ断器
DS : 断路器
ES1 : 線路側接地開閉器
ES2 : しゃ断器側接地開閉器

主要定格事項

形 式	GLHA形				GMHA形			
	70-GLHA	100-GLHA	140-GLHA	170-GLHA	70-GMHA	100-GMHA	140-GMHA	170-GMHA
定 格 電 圧(kV)	72/84	120	168	204	72/84	120	168	204
絶 縁 階 級(号)	60/70	100	140	140	60/70	100	140	140
定 格 電 流(A)	1200、2000、3000				1200、2000、3000			
定格しゃ断電流(kA)	31.5				40			
定格ガス圧(kg/cm ² ・20℃)	5(CB)、4(DS)				5(CB)、4(DS)			

登録番号	名 称	発 明 者	登録番号	名 称	発 明 者
871214	蓄熱装置	明石克寛・西山 槐	871232	硬化性樹脂組成物	不可三晃・森脇紀元
871215	永久電流 スイッチ	{ 森川鉄也・佐藤 隆 山田忠利	871233	サイリスタの制御装置	岩本英雄
871216	直流電気動力計の保護回路	森岡邦雄	871234	サイリスタの制御装置	岩本英雄
871217	電気掃除機	長嶺 元・野口善弘	871235	点弧回路	山崎隆司・林伸一郎
871218	超電導 マグネット の製造方法	{ 平田郁之・佐藤 隆 逢来 勝・藤原健三	871236	巻尺張力安定装置	藤川 宏・若林広業
871219	半導体装置の製造方法	石井 孝	871237	半導体冷却方式	小山 滋
871220	永久電流 スイッチ	{ 森川鉄也・佐藤 隆 山田忠利	871238	回転計発電機を利用した主電機 の制御装置	斉藤 功・森 康雄
871221	螢光体	栗津健三・松永 数	871239	マンコンベアの停止装置	{ 鬼頭勝己・乾 昌雄 原田輝夫
871222	電気式積算距離計	成戸昌司	872644	磁束制御装置	大村俊次
871223	移動体の領域監視方法	山崎宣典・伊藤善文	872645	沸騰冷却装置	小倉新三・福島 満
871224	発泡性組成物	児玉峯一・高橋一郎	872646	高周波 パルス 直流 アーク 溶接装置	{ 高木 茂・梶野幸男 後藤 徹
871225	ベルト式動力伝達装置	藤木博愛・大村信明	872647	エポキシ 樹脂組成物	{ 不可三晃・森脇紀元 広田 潔
871226	駆動用 ケーブル の駆動機構	{ 石井 明・三富至道 監崎 登	872648	蓄熱装置	{ 木村 寛・甲斐潤二郎 武藤勝俊・小浜秀子
871227	熱材位置検出装置	西岡忠臣	872649	熱交換器の水量制御装置	徳永 龍
871228	位置制御装置	遠藤義昭・岡田東亜	872650	蓄熱材	{ 木村 寛・武藤勝俊 甲斐潤二郎
871229	制御回路	山村隆司・林伸一郎			
871230	半導体素子	石井 孝			
871231	安全装置	清水賢一			

〈次号予定〉 三菱電機技報 Vol. 54 No. 4 周辺端末機器特集

特集論文

- 高品質を目的とした高速漢字プリンタ
- M 2483 形光文字読取装置 (OCR)
- M 2884 密閉形固定ディスク装置
- 《MECOM 80》シリーズのマルチワークステーションシステム
- ファクシミリを利用したコンピュータシステム
- カラーグラフィック表示を実現した工業分野向けディスプレイ装置

普通論文

- 三菱電子式ノーヒューズしゃ断器《MELNIC》による低圧電路の保護協調
- 配水管網における末端圧保持プログラム《SONET-II》
- 人工衛星搭載用電子衝撃形水銀イオンエンジン
- 人工衛星の三軸姿勢制御方式と試験装置
- 大電力インバータ用サイリスタ素子
- 新しい規格形エレベーター《エレベット アドバンス》
- エレベーター用P波センサ付地震管制システム
- 耐震形温水器の開発

三菱電機技報編集委員				三菱電機技報 54 巻 3 号			
委員長	喜連川 隆	常任委員	的 場 徹				
副委員長	浦 徳 太 郎	"	斎藤春雄				
"	後藤正之	委 員	徳山 長				
常任委員	佐々木二郎	"	樋口 昭				
"	増淵 悦男	"	神谷友清				
"	葛野 信一	"	橋爪 基				
"	三 輪 進	"	福井三郎				
"	高 月 一	"	土井貞春				
"	瀬原田三郎	"	川井 尚				
"	高橋広光	"	小野勝啓				
"	忍 足 博	幹 事	本間吉夫				
"	武田克巳	"	足立健郎				
"	清 田 浩	3号特集担当	平林庄司				
"	福 家 章		坂井龍吉				
				(無断転載を禁ず)			
				昭和55年3月22日 印刷			
				昭和55年3月25日 発行			
				編集兼発行人	本 間 吉 夫		
				印 刷 所	東京都新宿区市谷加賀町1丁目12番地 大日本印刷株式会社		
				発 行 所	東京都千代田区大手町2丁目6番2号 (〒100) 菱電エンジニアリング株式会社内 「三菱電機技報社」Tel. (03) 243 局 1785		
				発 売 元	東京都千代田区神田錦町3丁目1番地 (〒101) 株式会社 オーム社書店 Tel. (03) 233 局 0641, 振替口座 東京 20018		
				定 価	1部400円送料別 (年間予約は送料共5,200円)		

スポット ライト

天井空間を利用した省スペースタイプ 事務所・店舗用天井吊形エアコン《Mr.SLIM》

三菱電機では、事務所・店舗用エアコンとして、従来からの天井吊タイプであるPC(H)-C形を大幅に改良した《Mr.SLIM》PC(H)-D形を発売しました。天井吊タイプは床面スペースが不要であるところから、事務所・店舗用エアコンの主流となっており、特にこのPC(H)-C形は、省スペース、省エネルギー、低騒音というニーズにこたえて開発した製品です。

寺長

- 下吹込方式のため、ユニット背面の吹込スペースが不要となり、天井・壁にユニットを密着させて据え付けることができます。
- 室内・室外ユニットの冷媒配管の接続は、室内ユニット内となるので、インテリアの妨げとなります。
- ニューグリーンサインにより、ご希望の温度を確実にセットすることができ、過冷、過熱を防止して経済的な運転ができます。
- フィルターアイで、フィルターの定期清掃時をお知らせします。
- ユニットの厚さは25cmとす形で、ユニット背中部分を天井内に埋込めば、露出部分はわずか17cmとなります。
- スイングルーバーにより気流のムラをなくし、快適な室内環境が実現できます。
- ファン形状の改善、通風抵抗の低減等により、3HPで弱ノッチ36ホン(50Hz)と、大幅な低騒音化を実現しました。
- 冷媒回路系圧力損失の低減、高性能圧縮機などの採用により、従来比でエネルギー消費効率(EER)を7%向上させました。



様一覧<50/60Hz>

形 式	形 名	冷房能力 <kcal/h>	暖房能力 <kcal/h>	圧縮機出力 <kw>	外 形 寸 法<mm>			製品重量 <kg>
					高 さ	幅	奥 行	
冷房専用	PC-2D	4,500/ 5,000	—	1.5	220<516>	1,187<785>	665<414>	37<81>
	PC-3D	7,100/ 7,700	—	2.2	250<850>	1,187<800>	665<320>	39<74>
	PC-4D	9,000/10,000	—	2.7	250<1,150>	1,556<950>	665<390>	52<110>
	PC-5D	11,200/12,500	—	3.75	300<1,150>	1,556<950>	730<390>	53<128>
ヒートポンプ	PCH-2D	4,500/ 5,000	7,006/ 7,506	1.5	250<516>	1,187<785>	665<414>	38<83>
	PCH-3D	7,100/ 7,700	9,564/10,264	2.2	250<850>	1,187<800>	665<320>	40<84>
	PCH-4D	9,000/10,000	11,822/12,922	2.7	250<1,150>	1,556<950>	665<390>	54<113>
	PCH-5D	11,200/12,500	15,480/16,980	3.75	300<1,150>	1,556<950>	730<390>	55<138>

1.能力・消費電力はJIS規格の条件による

2.暖房能力はヒートポンプ+補助ヒータの合計値

3.外形寸法・製品重量<>は室外ユニットを示す