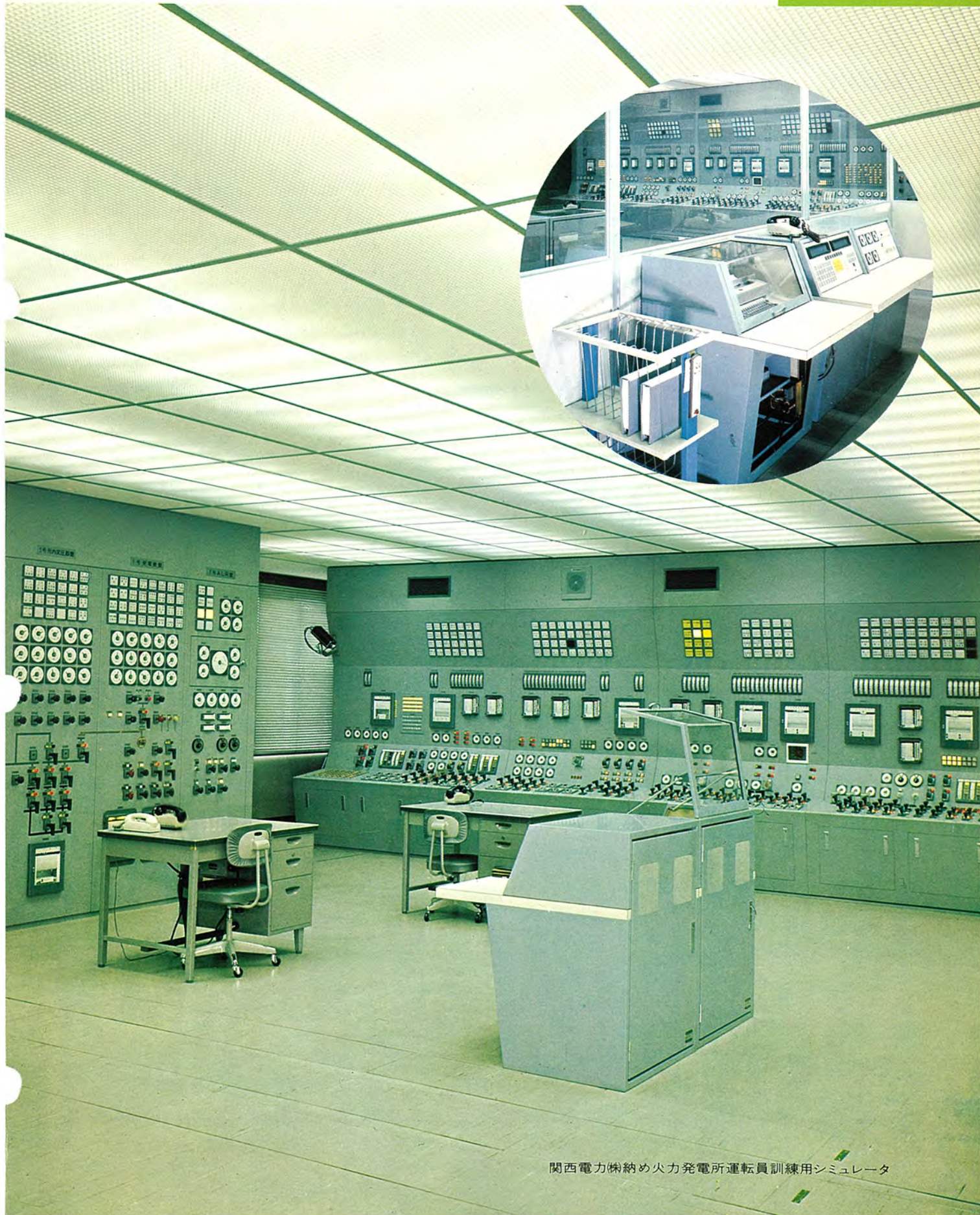


MITSUBISHI DENKI GIHO 三菱電機技報

Vol.50 No.9

9
1976



関西電力㈱納め火力発電所運転員訓練用シミュレータ

三菱電機技報

Vol. 50 No. 9 SEPTEMBER 1976

目次

普通論文

| | | |
|-------------------------------------|----------------------------|-----|
| 高耐圧大電力サイリスタの開発 | 北陽 滋・岩本英雄・寺尾 襄 | 459 |
| 火力発電所運転員訓練用デジタルシミュレータ | 佐藤孟生・梅村忠一・馬場彰憲・横川和之・山上信太郎 | 463 |
| 外鉄形変圧器の油流分布と可視化法によるコイル面流れの観察 | 渡辺次男・玉置栄一・清水 澄・森津一樹・松本隆博 | 469 |
| 静電粉体塗装の直流機への適用 | 藤原健三・門田秋信・中西悠二・寺谷 宏・玉置明信 | 474 |
| 電気浮上法による水産加工排水処理 | 加藤 強・前田満雄・久慈陽一 | 479 |
| 入換用 DE11形液体式ディーゼル機関車用自動操縦装置 | 寺戸浩二・永瀬和彦・六藤孝雄・森原健司・島田友二 | 485 |
| コミュニケーション プロセッサ タイプ 2 | 松永 宏・松田主税・中塚茂雄・田中雄三 | 491 |
| 車両用シリコン油入ポリアミド絶縁変圧器 | 桑原 宏・潮見尚暢・鶴田敬二・児玉俊英・今福誠司 | 495 |
| 超音波によるスポット溶接のインプロセス検査 | 奥田滝夫・稲田幹夫・西川正一・松山 宏・田中洋次 | 500 |
| 南海電鉄(株)納め 8000 形 AVF チョップ制御電車 | 成戸昌司・鉄野治雄・金田順一郎・古田俊久・恵美酒慎一 | 505 |

CONTENTS

GENERAL PAPERS

| | | |
|---|--------------------------|-----|
| The Development of a High-Voltage, High-Power Thyristor | Shigeru Hokuyo et al. | 459 |
| A Digital Simulator for the Training of Operating Personnel for Thermal Power Plants | Takeo Sato et al. | 463 |
| The Oil-Flow Distribution and Visualization of the Oil Flow in the Coil-Surface Ducts of Shell-Form Transformers | Tsugio Watanabe et al. | 469 |
| The Application of Electrostatic-Powder Coating to DC Machine Insulation | Kenzo Fujiwara et al. | 474 |
| Electroflotation Treatment of Waste Water from the Processing of Marine Products | Tsuyoshi Kato et al. | 479 |
| Automatic Train-Operating Equipment for the Type DE11 Shunting Locomotive with a Hydraulic Transmission | Koji Terado* et al. | 485 |
| The Type 2 Front-End Communications Processor | Hiroshi Matsunaga et al. | 491 |
| A Silicone-Oil-Immersed Polyamide-Insulated Transformer for Rolling Stock | Hiroshi Kuwahara et al. | 495 |
| Ultrasonic In-Process Inspection of Spot Welds | Takio Okuda et al. | 500 |
| The Type 8000 AVF Chopper-Controlled Coaches for the Nankai Electric Railway | Masashi Naruto et al. | 505 |

表紙

関西電力(株)納め火力発電所運転員訓練用シミュレータ

当社は昭和41年東京電力(株)にシミュレータ1号機を納入して以来、昭和46年に東北電力(株)向に2号機を納め、今回の関西電力(株)向で3号機となる。2号機までがアナログコンピュータを主体としたシステムであったが、今回のものはデジタルコンピュータを主体としたオールデジタル方式のシミュレータであり、貫流ボイラユニットとドラムボイラユニットの訓練が切替えて実施できるほか、訓練状態のフリーズ機能18種の初期セット、訓練過程を後戻りするステップバック、100種/ユニットにのぼる異常状態模擬(マルファンクション)等、1段とその運用機能が充実した。

COVER

A Digital Training Simulator for Power-Plant Operating Personnel

In 1966 Mitsubishi Electric delivered its first power-plant operating simulator to the Shinagawa Technology and Training Center of the Tokyo Electric Power Co., Ltd., and has subsequently delivered a second simulator to the Tohoku Electric Power in 1971, followed by this one to the Kansai Electric Power Co., Ltd. The first two systems were based upon an analog computer, but an all-digital system has been adopted for the third, which significantly expands its operational functions, not only allowing switchover between training for one-through and drum boiler units but also providing 18 initial settings for halting the training conditions, a training process 'stepback' function, and a malfunction simulator with a repertoire of 100 faults per unit.

* Japanese National Railways

正 誤 表

Vol. 50・No. 8 .409ページ「予混合炎の速度論的解析」の中で誤りが
ありましたので、表の貼付及び本文の訂正をお願い申し上げます。

記

○ 410ページ表 2 の(14)までを

下表を切り取って貼付願います。

| 反 応 | A | n | E | 温度範囲 | ref. |
|---|--|-----|---|-------------------------------------|---|
| (1) $\text{CH}_4 + \text{M} \rightarrow \text{CH}_3 + \text{H} + \text{M}$ * | 2.0×10^{17} 4.0×10^{17} 1.68×10^{18} | | 89,000 88,000 103,000 | | (a) (b) (c) |
| (2) $\text{CH}_4 + \text{OH} \rightarrow \text{CH}_3 + \text{H}_2\text{O}$ * | 5.0×10^{14} 3×10^{13} 2.2×10^{13} 3.5×10^{14} 1×10^{14} 2.8×10^{13} 2.1×10^{13} | | 9,900 6,000 5,000 9,000 8,500 5,000 4,850 | 300~2,500 1,200~1,800 400~600 | (d) (e) (f) (g) (h) (a) (i) |
| (3) $\text{CH}_4 + \text{H} \rightarrow \text{CH}_3 + \text{H}_2$ * | 5.0×10^{14} 1.26×10^{14} 1.6×10^{13} 6.9×10^{13} 4.04×10^{14} | | 13,500 11,900 9,400 11,900 11,610 | 300~2,500 600~700 | (d) (j) (k) (a) (l) |
| (4) $\text{CH}_4 + \text{O} \rightarrow \text{CH}_3 + \text{OH}$ * | 2.0×10^{13} 1.0×10^{13} 2.1×10^{13} 3.19×10^{13} | | 9,280 8,060 4,550 7,950 | | (a) (m) (n) (l) |
| (5) $\text{CH}_3 + \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{CO} + \text{OH}$ * | 1×10^{11} 1.2×10^{11} | | 10,000 | | (o) (p) |
| (6) $\text{CH}_3 + \text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{CO} + \text{H}$ * | 1.3×10^{14} 2.0×10^{13} 1.9×10^{13} | | 2,000 | 300 | (e) (q) (r) |
| (7) $\text{CH}_3 + \text{O}_2 \rightarrow \text{HCO} + \text{H}_2\text{O}$ | 2×10^{10} | | | | (a) |
| (8) $\text{H}_2\text{CO} + \text{OH} \rightarrow \text{HCO} + \text{H}_2\text{O}$ * | 3.0×10^{14} 3.1×10^{14} 2.3×10^{13} 5.4×10^{14} | | 4,000 4,240 6,300 | 1,400~1,800 | (s) (l) (e) (p) |
| (9) $\text{H}_2\text{CO} + \text{H} \rightarrow \text{HCO} + \text{H}_2$ * | 6.0×10^{13} 1.35×10^{13} | | 4,630 3,750 | | (l) (t) |
| (10) $\text{H}_2\text{CO} + \text{O} \rightarrow \text{HCO} + \text{OH}$ * | 1.0×10^{14} 5.0×10^{13} | | 5,300 4,500 | | (u) (p) |
| (11) $\text{HCO} + \text{OH} \rightarrow \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$ * | 4.6×10^{12} 1×10^{14} 1×10^{13} 3×10^{13} | | | | (u) (p) (v) (w) |
| (12) $\text{HCO} + \text{M} \rightarrow \text{CO} + \text{H} + \text{M}$ * | 2.0×10^{12} 1.0×10^{14} 7.1×10^{13} 5×10^{12} | 0.5 | 28,600 26,000 15,000 19,000 | | (a) (x) (w) (y) |
| (13) $\text{CO} + \text{OH} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}$ * | 5.6×10^{11} | | 1,080 | 250~3,000 | † |
| (14) $\text{CO} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{O}$ * | 2.1×10^{13} 1.2×10^{11} | | 55,300 35,000 | | (l) (z) |

○ 412ページ左28行目

誤 正

zeldovich Zeldovich

○ 412ページ右下より 7 行目

誤 正

μ 20.9 $\mu \geq 0.9$

○ 413ページ右16行目

誤 正

zeldovich Zeldovich

高耐圧大電力サイリスタの開発

北陽 滋・岩本英雄・寺尾 襄

三菱電機技報 Vol.50・No.9・P459～462

今回、オフ電圧4,000V、平均オン電流1,000Aの高耐圧大電力サイリスタFT1000BVが開発された。この素子は世界最大級の容量を持つサイリスタであり、高耐圧で大電流容量であるにもかかわらず、臨界オン電流上昇率200A/ μ s、サージオン電流20,000Aなどの優れた動特性を持っている。これらの設計内容を具体的に紹介して、現在の技術水準と問題点を明らかにし、更に、今後の発展に関する考察を行う。

入換用DE11形液体式ディーゼル機関車用自動操縦装置

寺戸浩二・永瀬和彦・六藤孝雄・森原健司・島田友二

三菱電機技報 Vol.50・No.9・P485～490

国鉄武蔵野操車場用として自動操縦装置(ATO)付DE11形液体式ディーゼル機関車が、我が国での実用化第1号機として先般稼動を開始した。このATO装置は、無線指令による定速度制御・定距離転送制御等の機能を有し、特に、最大押上荷重1,300t、定速指令速度1～5km/hに対して ± 0.2 km/hの高精度の追従が必要とされ、始動法の研究や全荷重域での厳しい追従精度を満足させる制御方式の開発を機関、変速機を含め検討し、シミュレーション等の手法を駆使して行い、現車試験の結果、極めて良好な成績を収め、実用機としての完成を見た。

火力発電所運転員訓練用デジタルシミュレータ

佐藤孟生・梅村忠一・馬場彰憲・横川和之・山上信太郎

三菱電機技報 Vol.50・No.9・P463～468

従来の火力発電所運転員訓練用シミュレータは、アナログ計算機を用いたものであったため、モデルを作成するのに演算アンプ台数という大きな制約がありまたシミュレータの運用面においても不便なところがあった。

この報告では、デジタル計算機の適用により、上記問題点の削減に加えてドラム、貫流の2ユニットを切替使用可能とした、全デジタル方式の火力発電所運転員訓練用シミュレータについて述べている。

コミュニケーション プロセッサ・タイプ2

松永 宏・松田主税・中塚茂雄・田中雄三

三菱電機技報 Vol.50・No.9・P491～494

コミュニケーション プロセッサと称されているものには、ネットワークの構成情報の形態、接続される計算機や端末装置に依存して種々のものがある。

この論文では、同装置に必要な特性の検討と、計算機の前置通信制御処理装置として開発されたコミュニケーション プロセッサ・タイプ2の紹介を行う。

外鉄形変圧器の油流分布と可視化法によるコイル面流れの観察

渡辺次男・玉置栄一・清水 澄・森津一樹・松本隆博

三菱電機技報 Vol.50・No.9・P469～473

外鉄形変圧器では、各コイルが垂直に支持されて冷却油の流路が並列に設けられており、本来、冷却のよい構造を有している。しかし、大容量化に伴い、より精度の高い解明が要求されている。そこで、実器相当のモデル変圧器を製作し、変圧器各部の油流分布を測定するとともに、コイル・絶縁物等における流路の部分モデルの解析から、変圧器の油流分布を実用上十分な精度で計算できるプログラムを完成した。更に、将来の超大容量器の冷却に対する最適構造を求めるべく、コイル面、スペーサ近傍の油流について流れの可視化法を適用し、スペーサの形状・配置の検討を実施中である。

車両用シリコン油入ポリアミド絶縁変圧器

桑原 宏・潮見尚暢・鶴田敬二・児玉俊英・今福誠司

三菱電機技報 Vol.50・No.9・P495～499

国鉄電車用主変圧器は、現在A種シリコン油入クラフト紙絶縁が標準になっている。しかし、全国幹線網などの将来の高速大容量電車にあっては、その主変圧器の重量・寸法の一層の低減が強く要求されており、シリコン油の耐熱性を有効に生かすとともに、新たにポリアミド絶縁物を採用し、温度上昇を従来より約50%増大させ得る特別A種絶縁変圧器が検討されている。

当社では、このシリコン油入ポリアミド絶縁に関する各種基礎実験を行い、更に実モデル変圧器の試作・詳細試験の実施により、この絶縁方式変圧器の設計・材料・製造技術を確立することができた。

静電粉体塗装の直流機への適用

藤原健三・門田秋信・中西悠二・寺谷 宏・玉置明信

三菱電機技報 Vol.50・No.9・P474～478

エポキシ塗料を用いた静電粉体塗装法により、直流機の裸導体部をコーティングする技術を開発した。静電粉体塗装を使用すれば、ピンホールレスの均一な絶縁被膜が期待できるので、従来のプロセスによる絶縁処理よりも、耐環境性に対して優れた絶縁特性が得られ、かつ作業プロセスが簡略化される。直流機に適用するにあたり、バーテスト、モデルテストを実施し、諸問題点を解決したので、ここに報告する。

超音波によるスポット溶接のインプロセス検査

奥田滝夫・稲田幹夫・西川正一・松山 宏・田中洋次

三菱電機技報 Vol.50・No.9・P500～504

スポット溶接は、他に類を見ないほど作業能率の高い溶接法であるが、接合状態を外部から判定しにくいという大きな欠点がある。したがって、この高能率の溶接法を強度上さらに重要な部材へ適用していくためには、その非破壊検査法の確立は極めて重大な意義をもつ。

本文では、スポット溶接における品質管理の考え方並びにこれまでに開発された種々の非破壊検査法の特徴と現状を解説するとともに、このたび開発した一つの探触子を用いた透過法による、スポット溶接のインプロセス非破壊検査法について報告する。

電気浮上法による水産加工排水処理

加藤 強・前田満雄・久慈陽一

三菱電機技報 Vol.50・No.9・P479～484

電気浮上処理装置による排水処理が排水浄化に極めて有効な手段であることが最近広く認識され、広く利用され出してきた。

水産加工排水は、一般工場排水に比べ汚濁負荷量が高く、また、各種の汚濁成分が混在している。この水産加工排水に電気浮上処理法を適用する場合の処理効果と、排水の特質についてデータを示し、水産加工排水に電気浮上処理装置を導入する場合の資料を提供する。

南海電鉄(株)納め8000形AVFチョップパ制御電車

成戸昌司・鉄野治雄・金田順一郎・古田俊久・恵美酒慎一

三菱電機技報 Vol.50・No.9・P505～509

自動可変界磁(AVF)チョップパ制御方式は、高速回生能力の増大、制御の安定性の向上を特長とするが、今回この特長を十分に生かし、更にこう配区間を走行する郊外電車として、回生ブレーキ付電機子チョップパ制御車では我が国初の抑速回生ブレーキを備えたDC1,500V用AVFチョップパ制御装置を南海電鉄8000形新車用として製作・納入した。

ここでは、AVF制御方式の概略と、抑速回生ブレーキ制御方式の説明、更にチョップパ誘導障害試験をはじめとする各種現車試験も良好な結果を得ることができたので、報告する。

Abstracts

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 50, No. 9, pp. 485~90 (1976)

Automatic Train-Operating Equipment for the Type DE11 Shunting Locomotive with a Hydraulic Transmission

by Koji Terado,* Kazuhiko Nagase,* Takao Muto, Kenji Morihara & Yuji Shimada

The Japanese National Railways' Musashino marshaling yards recently began utilizing the Type DE11, Japan's first hydramatic-diesel locomotive equipped with automatic train control (ATO) equipment. Providing radio signals for such control functions as constant-speed control and constant distance delivery, the equipment exhibits the high following accuracy of $\pm 0.2\text{km/h}$ at speeds of from $1\sim 5\text{km/h}$ at a maximum push-up capacity of 1300 tons. Studies on the starting system and the development of a control system capable of this high degree of following accuracy took into consideration both the engine and the converter. Simulation techniques were applied, and, in a test locomotive, the control equipment was found to give excellent performance. The equipment is now in actual service.

*JNR

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 50, No. 9, pp. 491~94 (1976)

The Type 2 Front-End Communications Processor

by Hiroshi Matsunaga, Chikara Matsuda, Shigeo Nakatsuka & Yuzo Tanaka

Communications processors may be of a variety of types depending on the network structure, the data format and the type of computer and terminals to which it is connected.

The article discusses the characteristics required of these terminals, and describes the Type 2 communication processor, which has been developed as a front-end processor for computers.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 50, No. 9, pp. 495~99 (1976)

A Silicone-Oil-Immersed Polyamide-Insulated Transformer for Rolling Stock

by Hiroshi Kuwahara, Hisanobu Shiomi, Keiji Tsuruta, Toshihide Kodama & Seiji Imatoku

At present, the rolling stock transformers of the Japanese National Railways employ Class A silicone-oil-immersed kraft paper insulation, but with the increase in high-speed heavy-duty rolling stock, such as that of the nationwide Shinkansen network, further decreases in the weight and dimensions of the main transformers are required. Studies were therefore carried out to develop a 'special Class A' transformer that would retain the excellent thermal stability of silicone oil but would use polyamide insulating paper instead of kraft paper, thereby permitting an approximately 50% increase in the permissible temperature rise.

The article reports on the various types of fundamental research, on the construction and testing of the prototype transformers, and on the development technologies.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 50, No. 9, pp. 500~04 (1976)

Ultrasonic In-Process Inspection of Spot Welds

by Takio Okuda, Mikio Inada, Masakazu Nishikawa, Hiroshi Matsuyama & Hiroji Tanaka

Spot welding is a method of unequalled efficiency, but its major disadvantage is the difficulty of external examination of the weldment. It was therefore vitally important to develop a reliable method of non-destructive inspection, in order that this highly efficient method may be applied to the welding of critical structural members.

The article discusses some concepts of quality control in spot welding as well as the features and applicability of a number of methods of nondestructive inspection, and reports the development of a new inspection technique that involves transmission of ultrasonic waves from a single transducer, and that can be applied in-process to spot welding.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 50, No. 9, pp. 505~09 (1976)

The Type 8000 AVF Chopper-Controlled Coaches for the Nankai Electric Railway

by Masashi Naruto, Haruo Tetsuno, Junichiro Kaneda, Yasuhisa Furuta & Shinichi Emisu

The automatic variable-feed (AVF) chopper-control system gives improved high-speed regenerative-braking performance and control stability. These advantages are fully realized in the Type 8000 coaches developed for the Nankai Electric Railway. These are the first 1500VDC AVF chopper-controlled coaches to employ a suppressing regenerative braking system designed for service over mountain grades.

The article describes the AVF control system and the suppressing regenerative braking system, and reports on the excellent results obtained in inductive reference tests and a variety of other field tests carried out on the new coaches.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 50, No. 9, pp. 459~62 (1976)

The Development of a High-Voltage, High-Power Thyristor

by Shigeru Hokuyo, Hideo Iwamoto & Noboru Terao

A new thyristor, designated Type FT1000BV, has been developed, having an off-state voltage of 4000V and an average on-state current of 1000A. Despite these high values, which place it in the first rank in terms of capacity, the FT1000BV offers outstanding dynamic characteristics, including a $200\text{A}/\mu\text{sec}$ critical rate of rise of on-state current, and a 20kA surge on-state current.

The article presents concrete design details, clarifies the present state of the art and the development problems faced, and discusses the direction of future developments.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 50, No. 9, pp. 463~68 (1976)

A Digital Simulator for the Training of Operating Personnel for Thermal Power Plants

by Takeo Sato, Tadakazu Umemura, Akinori Baba, Kazuyuki Yokokawa & Shintaro Yamagami

Because the thermal power plant training simulators now in use make use of analog computers, they face major limitations when the number of operation amplifiers required to construct models is large, and also present a number of inconveniences in simulator operation.

The article describes how the application of a digital computer has eliminated these problems, giving an all-digital simulator that makes possible selective switchover between the use of a drum boiler unit and a one-through boiler unit.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 50, No. 9, pp. 469~73 (1976)

The Oil-Flow Distribution and Visualization of the Oil Flow in the Coil-Surface Ducts of Shell-Form Transformers

by Tsugio Watanabe, Eiichi Tamiki, Akira Shimizu, Moritsu Kazuki & Takahiro Matsumoto

Shell-form transformers have an inherently efficient cooling configuration but with increases in shell-form transformer capacities, the need has been felt for a more precise means of analyzing oil-flow distribution.

To achieve this, measurements were taken of the oil-flow distribution in all parts of a specially built prototype transformer. By analyzing section models of the oil ducts in the coil, insulation, etc., of the prototype, it was possible to develop a program that permits highly accurate calculation of the oil distribution within the transformer.

Furthermore, with a view to determining the construction that will provide optimum cooling for the large power transformers of the future, work is proceeding on the determination of spacer configuration and arrangement by applying visualization techniques to the oil flow at the coil surface and in the vicinity of spacers.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 50, No. 9, pp. 474~78 (1976)

The Application of Electrostatic-Powder Coating to DC Machine Insulation

by Kenzo Fujiwara, Akinobu Kadota, Yuji Nakanishi, Hiroshi Teratani & Akinobu Tamaki

A technique has been developed for the electrostatic coating of the bare conductors of DC machines using powdered epoxy resins. Since electrostatic power coating allows the application of an even layer of insulation that is free of pinholes, its environment-resistance is better than that obtainable by conventional insulating processes, and the application procedures involved are simpler.

The article describes the bar tests and model tests carried out in applying the technique to DC machines, and discusses the solutions found for development problems.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 50, No. 9, pp. 479~84 (1976)

Electroflotation Treatment of Waste Water from the Processing of Marine Products

by Tsuyoshi Kato, Mitsuo Maeda & Yoichi Kuji

Electroflotation has recently come to be widely recognized as an extremely effective means of treating waste water, and its use is increasing.

Effluent water from factories processing marine products contains considerably more waste material than that from the general run of industrial plants, and the waste is of many different types. The article reports on the effectiveness of applying electroflotation in this field, and discusses actual equipment installation.

高耐圧大電力サイリスタの開発

北 陽 滋*・岩 本 英 雄*・寺 尾 襄*

1. ま え が き

最近、製鉄用レオナード、直流送電、一般交流電力制御装置などの大容量サイリスタ応用装置では、コストパフォーマンスの向上が課題とされ、その高耐圧化、大容量化が活発にすすめられている。これに伴い、サイリスタの高耐圧大容量化が強くのぞまれている。例えば、サイリスタレオナード装置では、電動機の定格電圧を従来の750Vから1,250Vに上げることに伴いコストダウンをはかり、しかも制御装置の小形軽量化をはかるために、従来の2,500Vを大幅に上回る4,000Vの耐圧を有する大容量サイリスタを必要としている。

一方、サイリスタでは、定格オフ電圧がある値を越えると、オン電圧の増大や動特性の低下により、急速に実質的な制御能力（耐圧×電流量）が減少するという性質があり、高耐圧大容量化には限界があった。

今回、前述のような応用上の要求を背景に、高耐圧化に伴う製造上の問題点を解決し、オフ電圧4,000V、平均オン電流1,000Aという最大級の容量を有する高耐圧大電力サイリスタ（形名FT1000BV-80）の開発に成功した。この開発においては、高耐圧化に伴って要求される高い動特性の実現に特に力を注ぎ、 $di/dt \geq 200 \text{ A}/\mu\text{s}$ 、 $dv/dt \geq 1000 \text{ V}/\mu\text{s}$ 、ターンオフ時間 $\leq 800 \mu\text{s}$ という、名実ともに4,000V、1,000Aの大電力サイリスタを実現させた。ここでは高耐圧大容量素子の設計に伴う問題点と構造を紹介し、あわせて応用の面からその特性定格について述べる。

2. 仕様及び設計

FT1000BVの設計にあたっては、(1)オフ電圧4,000V、平均オン電流1,000Aの定格の外に、この電圧電流定格を広い応用分野で生かせるように、特に次の動特性の実現をはかった。すなわち、(2)高い臨界オン電流上昇率(di/dt)をもたせる、(3)高い臨界オフ電圧上昇率(dv/dt)をもたせる、(4)ターンオフ時間(t_q)を短くする、などである。

これらの各特性定格の要求は、高耐圧化の要求と相いれないものが多い。以下設計上の問題点とその改善方法について述べる。

2.1 高耐圧大電流化

オフ電圧4,000V、平均オン電流1,000Aを得るために、高耐圧化に伴う単位電流密度当たりのオン電圧の上昇、及びターンオフ時間を短くするためにおこるオン電圧の上昇を考慮して、直径65mmの大口径シリコン単結晶ウエハを用いることにした。この場合、(1) $\phi 65 \text{ mm}$ の大口径で4,000Vの得られる高比抵抗の良質なシリコン単結晶の安定入手、(2)大口径シリコンウエハに電氣的に均質な高耐圧接合を形成する方法、(3)均一かつ良好な熱的電氣的接続を得るための電極及び外装構造が問題となる。

シリコン単結晶については、 $\phi 65 \text{ mm}$ の大口径で4,000V以上の得られる高比抵抗の結晶欠陥の少ない品質のものが、安定して入手できることが確認された。

また、この大口径シリコンウエハに均質かつ4,000Vの高耐圧接合を再現性よく得るために、重金属による汚染を防ぐとともに、熱処理中に発生する結晶欠陥の発生を抑える製造方法を確立した。特に、拡散不純物濃度の面内及びロット間ばらつきを抑えるために多くの工夫がなされた。

また、シリコンウエハを補強するために、モリブデン円板がシリコンウエハに合金接着された。この場合大口径化によりシリコンウエハにそりが生じるが、このそりを補正する方法として、当社独自の構造⁽¹⁾が採用された。

2.2 臨界オン電流上昇率 di/dt

応用上このクラスの電流量を有する素子には、少なくとも $200 \text{ A}/\mu\text{s}$ の di/dt 耐量をもつことが要求される。

一方、この di/dt 耐量は素子の定格電圧が高まるほど低下する傾向がある。これは、高耐圧化に伴う素子のターンオン損失の増加と、

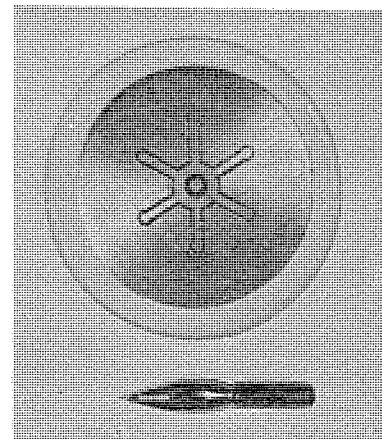
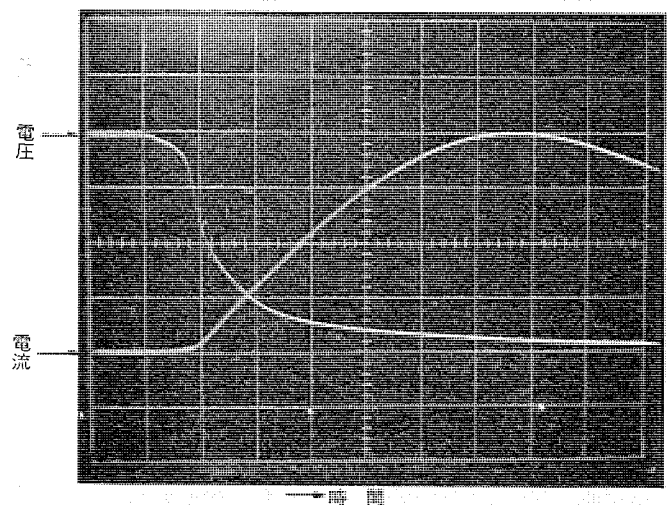


図 1. ベーシックエレメントの外観



縦軸：500A/div, 500V/div
横軸：2 μs /div

図 2. di/dt 試験波形

ターンオン領域のひろがり速度の低下に伴う単位導通面積当たりの損失の増大により、ゲート近傍の温度が局部的に上がり、いわゆるホットスポットを生じるからである。したがって、初期のゲート電流によるターンオン領域を極力広くする必要がある。この素子の設計にあたっては、図 1. に示すように、いわゆる補助サイリスタ付ゲート構造を採用し、主サイリスタのゲート-カソード対面長を長くとっている。すなわち、ゲート信号によりまず補助サイリスタを点弧させ、そこに流れる主電流により長くした主サイリスタのカソード周辺を一斉に強制点弧させる方式である。この補助サイリスタ付ゲート構造においては、補助サイリスタと主サイリスタの点弧感度の比を適切に選ぶことがその機能を発揮させる上で重要である⁽²⁾。この素子では、その感度比を任意に変えうる構造を採用し、 di/dt 耐量が最高になるよう設計されている。図 2. に示す IEC により定められた試験法によりその耐量限界を試験した結果、 di/dt は 330~350 A/ μ s に分布しており、十分定格を満足していることが確認された。

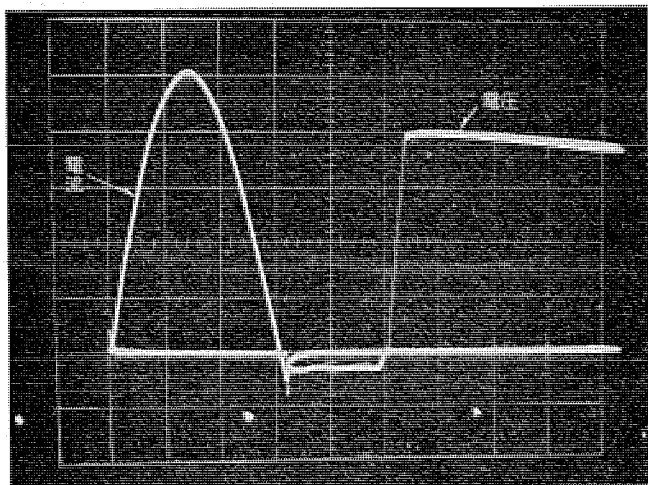
2.3 ターンオフ時間 t_q

サイリスタのターンオフ時間を短くするためには、一般にベース層でのキャリアライフタイムを短くしなければならない。一方ライフタイムの短縮は、オン電圧の増大やオフ電流、逆電流の増大をもたらす、特に高耐圧素子の場合この傾向は顕著になるので、高耐圧サイリスタの設計製作においてはライフタイムを極力長くするのが常識とされている⁽³⁾。しかしながら 4,000 V クラス以上のサイリスタではベース層が厚くなり、オン状態で蓄積されるキャリアが大きくなるため、ライフタイムを無制限に長くしたのではターンオフ時間は応用上必要とされる値をはるかに越え、1 ms 以上になってしまう。それ故、ターンオフ時間のある値以下に抑えるようにライフタイムの最大値を制御するとともに、オン電圧の著しい増大をまねかないようにライフタイムをある値以上にするよう正確に制御しなければならない。

表 1. 新しいターンオフ時間の制御法の効果

| 項 目 | 単 位 | この制御技術を適用した素子 | 従来のライフタイム制御技術による素子 | ライフタイム制御なし |
|--|-------------------|------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| ターンオフ時間 t_q ($T_j=125^\circ\text{C}$) | μs | 338 ($t_q=300\sim370$) | 378 ($t_q=330\sim430$) | 790 ($t_q=650\sim930$) |
| オン電圧 \bar{V}_{TM} ($T_j=125^\circ\text{C}$ at 140 A/ cm^2) | V | 2.30 ($V_{TM}=2.2\sim2.4$) | 2.59 ($V_{TM}=2.4\sim2.8$) | 2.20 ($V_{TM}=2.15\sim2.30$) |
| オフ電流 \bar{I}_{DRM} ($T_j=125^\circ\text{C}$ at 4,000 V) | mA/ cm^2 | 2.25 ($I_{DRM}=2.19\sim2.31$) | 4.8 ($I_{DRM}=3.46\sim5.76$) | 1.5 ($I_{DRM}=1.61\sim1.38$) |

注) t_q は t_q の平均 \bar{V}_{TM} , \bar{I}_{DRM} はオン電圧, オフ電流の平均をあらわす



縦軸: 200A/div, 500V/div
横軸: 200 μ s/div

図 3. ターンオフ時間測定波形

$\phi 65$ mm の大口径シリコンを用いた場合問題となったのは、ウエハ面内でのライフタイムのばらつきである。このばらつきが大きいと、オン電圧が高い割にはターンオフ時間は短くならないという不利な現象を生じ、ライフタイム制御の幅をますます狭くしてしまう。大口径シリコンウエハでは、製造工程における熱処理で発生する転位が一樣ではなく、外周部に多く発生しやすい。ライフタイムキラーの代表的なものである重金属は、転位の多い部分に多く分布する性質がある。したがって、このようなウエハにライフタイムキラーを導入すると、ウエハ面内でのライフタイムの差は大きくなる。

我々は、以上の現象の解明を行い、熱処理による転位発生のはらつきを制御するとともに、ライフタイムの長くなるウエハ中央部に多くのライフタイムキラーを導入する新しい方法を確立した。表 1. は、 $\phi 55$ mm のウエハにこの技術を適用した一例である。

この技術によって、オフ電圧 4,000 V で、オン電圧を低く抑えながらターンオフ時間を 800 μ s 以下に抑えることが可能となった。図 3. にターンオフ時間測定時の電圧電流波形の一例を示す。

3. 素子の構造

図 1. に、FT 1000 BV のベシックエレメントの外観を示す。拡散法により接合を形成し、モリブデン板を支持板として合金接着している。また、ウエハ周辺の接合露出部は特殊な安定化処理を施し、その上を室温硬化ゴムで保護している。この安定化処理技術は極めて優れたもので、図 4. に示すように長時間の熱電圧印加試験にもほとんど変化を示さない。図 5. は FT 1000 BV の外観を示す。

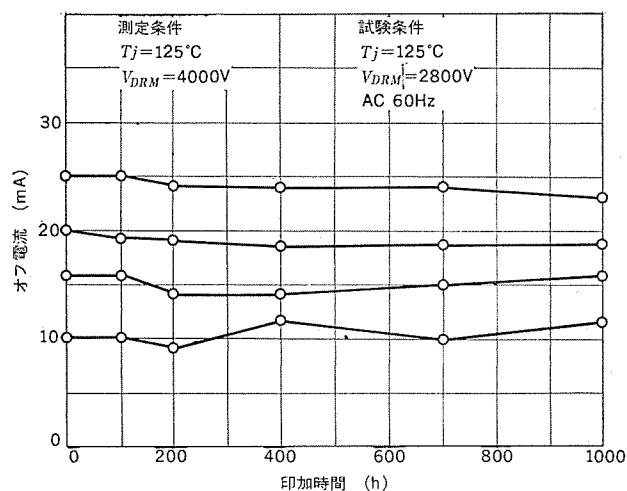


図 4. 熱電圧印加試験結果 (例)

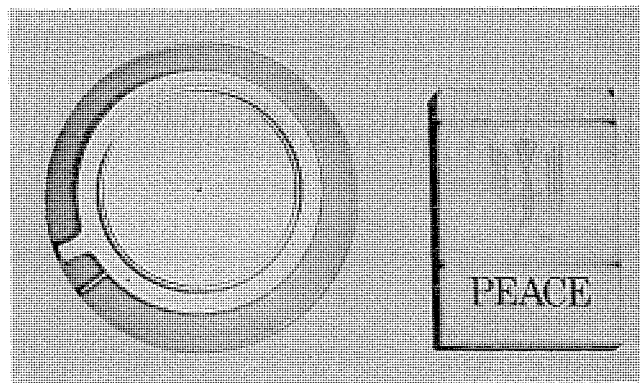


図 5. FT 1000 BV の外観

4. 定格と特性

FT 1000 BV の定格と特性を表 2. に示す。次におもな定格と特性について説明する。

4.1 最大定格

FT 1000 BV は定格ピーク繰り返しオン電圧及び逆電圧が 3,000～4,000 V で定格平均オン電流が 1,000 A という高耐圧大電流サイリスタである。定格サージオン電流は定格最高接合温度から通電する条件で 20,000 A という大きな値が保証されている。

定格臨界オン電流上昇率は、設計、構造の特徴のところで詳述し図 1. で示したような特殊なゲート構造を用いることにより、表 2. に示すような厳しい条件で 200 A/μs が保証されている。

4.2 電気的特性

最大オン状態特性を図 6. に示す。このようにオン電圧が比較的低く、オン電流 3,200 A においてオン電圧は 2.8 V 以下である。

単相半波電流を通電したときの最大オン状態損失と許容フィン温度を図 7. 及び図 8. に示す。平均オン電流 1,000 A 通電時の値はそれぞれ、2,480 W 及び 76°C である。このサイリスタの冷却方法とし

ては、従来の風冷や油冷の外に沸騰冷却も検討されている。

臨界オフ電圧上昇率は 1,000 V/μs 以上という大きな値が保証されているので、 dv/dt による誤動作がなくなり、また CR アブゾーパやアノードリアクトルを小形化することができる。このため、回路設計においてコストダウンが可能となる。

ゲートトリガ電圧及び電流は、ゲート構造の適切な設計により、数百 A クラスのサイリスタと同程度で、最大 2.5 V 及び 250 mA である。このため従来の大電力サイリスタのゲート回路をそのまま使用することができる。

サイリスタレオナード装置や直流送電用変換装置などでは、ターンオフ時間の長いサイリスタを使用すると装置の効率が著しく悪くなるという問題があり、一般に 1,000 μs 以上のターンオフ時間のサイリスタはこのような用途には適さない。この点を考慮して、FT 1000 BV では設計・構造の特徴のところで説明したように、キャリアのライフタイムを制御することによりターンオフ時間を 800 μs 以下に抑えることができた。サイリスタのターンオフ時間は温度、電圧、電流などの影響を受けるが、その例として図 9. にターンオフ時間と接合温度との関係を示し、図 10. にオフ電圧上昇率 dv/dt との関係を示す。図 10. に示すよ

表 2. 最大定格と電気的特性

最大定格

| 項 目 | 記 号 | 耐 圧 ク ラ ス | | | 単 位 |
|--------------|-------------|-----------|-------|-------|-----|
| | | 60 | 70 | 80 | |
| ピーク繰り返し逆電圧 | V_{RRM} | 3,000 | 3,500 | 4,000 | V |
| ピーク非繰り返し逆電圧 | V_{RSM} | 3,250 | 3,750 | 4,250 | V |
| 直流逆電圧 | $V_{R(DC)}$ | 2,400 | 2,800 | 3,200 | V |
| ピーク繰り返しオフ電圧 | V_{DRM} | 3,000 | 3,500 | 4,000 | V |
| ピーク非繰り返しオフ電圧 | V_{DSM} | 3,000 | 3,500 | 4,000 | V |
| 直流オフ電圧 | $V_{D(DC)}$ | 2,400 | 2,800 | 3,200 | V |

| 項 目 | 記 号 | 条 件 | 定 格 値 | 単 位 |
|-----------|-------------|---|--------------------|------------------|
| 実効オン電流 | $I_T(rms)$ | | 1,570 | A |
| 平均オン電流 | $I_T(AV)$ | 商用周波数、正弦半波 180 度連続通電、 $T_j=76^\circ\text{C}$ | 1,000 | A |
| サージオン電流 | I_{TSM} | 60 Hz 正弦半波 1 サイクル波高値、非繰り返し、 $T_j=125^\circ\text{C}$ スタート | 20,000 | A |
| 電流 2 乗時間積 | I^2t | 1 サイクルサージオン電流に対する値 | 16.7×10^5 | A ² s |
| 臨界オン電流上昇率 | di/dt | $V_D=1/2 V_{DRM}$, $I_{TM}=2,000$ A, $di/dt=1$ A/μs, $f=60$ Hz, $C=1$ μF, $R=10\Omega$, $I_{GM}=1.0$ A, $T_j=125^\circ\text{C}$ | 200 | A/μs |
| ピークゲート損失 | P_{GM} | | 10 | W |
| 平均ゲート損失 | $P_{G(AV)}$ | | 3 | W |
| ピークゲート順電圧 | V_{FGM} | | 20 | V |
| ピークゲート逆電圧 | V_{RGM} | | 10 | V |
| ピークゲート順電流 | I_{FGM} | | 4 | A |
| 接合温度 | T_j | | -40～+125 | °C |
| 保存温度 | T_{stg} | | -40～+150 | °C |
| 圧接力強度 | | 推奨値 3,000 | 2,700～3,300 | kg |
| 重 量 | | | 690 | g |

電気的特性

| 項 目 | 記 号 | 測 定 条 件 | FT 1000 BV | | | 単 位 |
|-----------|---------------|---|------------|-------|-------|------|
| | | | 最 小 | 標 準 | 最 大 | |
| 通電電流 | $I_{T(RM)}$ | $T_j=125^\circ\text{C}$, V_{RRM} 印加 | — | — | 120 | mA |
| オフ電流 | $I_{D(RM)}$ | $T_j=125^\circ\text{C}$, V_{DRM} 印加 | — | — | 120 | mA |
| オン電圧 | V_{TM} | $T_j=125^\circ\text{C}$, $I_{TM}=3,200$ A | — | — | 2.80 | V |
| 臨界オフ電圧上昇率 | dv/dt | $T_j=125^\circ\text{C}$, $V_D=1/2 V_{DRM}$ | 1,000 | — | — | V/μs |
| ゲートトリガ電圧 | V_{GT} | $T_j=25^\circ\text{C}$, $V_D=6$ V, $R_L=2\Omega$ | — | — | 2.5 | V |
| ゲート非トリガ電圧 | V_{GD} | $T_j=125^\circ\text{C}$, $V_D=1/2 V_{DRM}$ | 0.20 | — | — | V |
| ゲートトリガ電流 | I_{GT} | $T_j=25^\circ\text{C}$, $V_D=6$ V, $R_L=2\Omega$ | — | — | 250 | mA |
| ゲート非トリガ電流 | I_{GD} | $T_j=125^\circ\text{C}$, $V_D=1/2 V_{DRM}$ | 5 | — | — | mA |
| ターンオン時間 | t_{on} | $T_j=125^\circ\text{C}$, $V_D=2,000$ V, $I_{TM}=2,000$ A, $di/dt=100$ A/μs | — | 3.5 | — | μs |
| ターンオフ時間 | t_q | $T_j=125^\circ\text{C}$, $I_{TM}=1,000$ A, $di/dt=-5$ A/μs, $dv/dt=5$ V/μs | — | — | 800 | μs |
| 逆回復電荷 | Q_{rr} | $T_j=125^\circ\text{C}$, $V_R=150$ V, $I_{TM}=1,000$ A, $di/dt=-5$ A/μs | — | 2,000 | — | μC |
| 熱抵抗 | $R_{th(j-f)}$ | 接合フィン間 | — | — | 0.017 | °C/W |

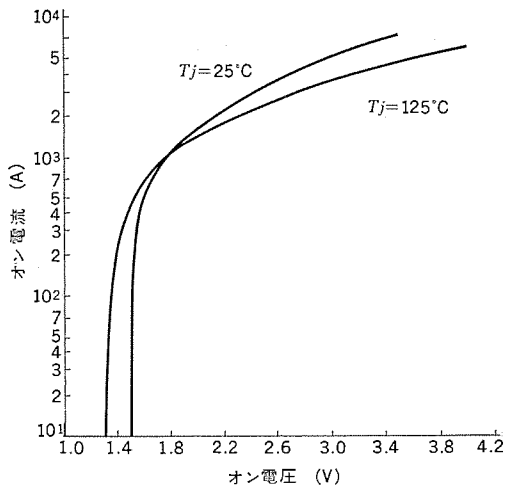


図 6. 最大 オン 状態特性

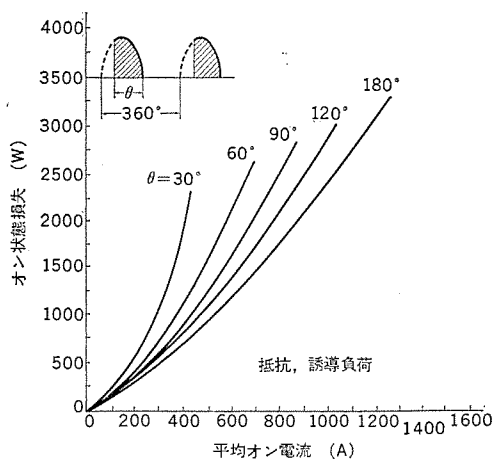


図 7. 最大 オン 状態損失特性 (単相半波)

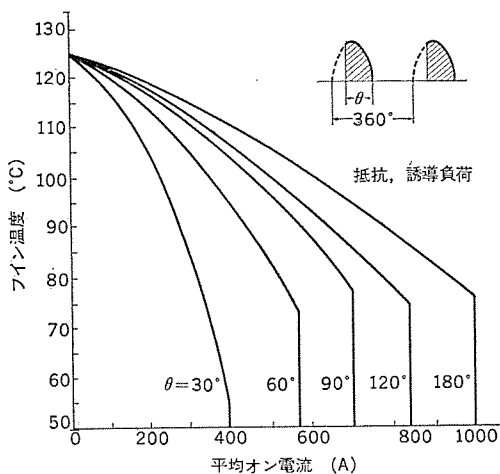


図 8. 平均 オン 電流の限界値 (単相半波)

うに、ターンオフ時間はオフ電圧上昇率の影響を強く受けるので、サイリスタの転流時に印加される dv/dt に注意しなければならない。

サイリスタの直列接続時にはできるだけターンオン時間及び逆回復時間の近いものを使用する必要がある。これらの標準値はそれぞれ $3.5 \mu s$ 及び $2,000 \mu C$ である。直列接続素子数が 10 個以下であればこれらの値のばらつきをそれぞれ $1.0 \mu s$ 以下及び $300 \mu C$ 以下に選別・組合せて使用することが可能である。

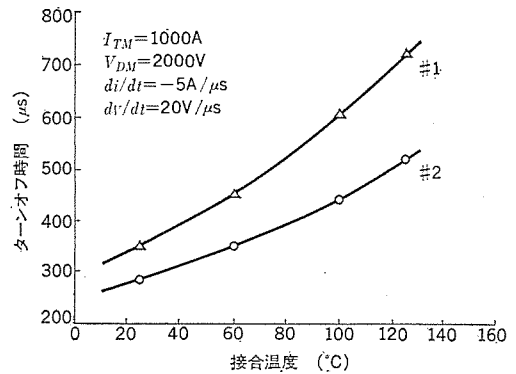


図 9. ターンオフ 時間の接合温度特性 (代表例)

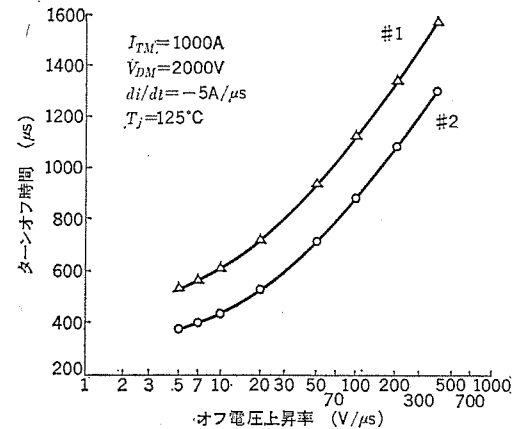


図 10. ターンオフ 時間の オフ 電圧上昇率特性 (代表例)

5. 応 用

FT 1000 BV は高耐圧・大電流量でかつ上記のような優れた特徴を有しているため、製鉄 ミルモータ 制御用 サイリスタレオナード、直流送電 用変換装置、交流電動機 の速度制御用 サイクロコンパタ、発電機 の励磁装置 などへ多くの需要が期待されている。またこのサイリスタは特殊 ゲート 構造の採用により di/dt 耐量 が大きく、ピーク 値の大きいパルス 電流を許容 できることから、核融合装置 のプラズマ 制御用電源 への採用 も検討 されている。

また、他の用途においてもこのサイリスタの採用により直並列素子数を減少でき、これに伴い、装置の小型軽量化、高信頼度化、コストダウンが可能となるため、幅広い用途に多数使用されるものと期待される。

6. む す び

以上、今回開発された高耐圧大電力サイリスタ FT 1000 BV について、設計・構造・特性定格・応用を中心に説明を行った。

この素子は、高耐圧大容量サイリスタとしては、実用される最高水準のものであるが、一方、応用面からはサージオン電流、 di/dt 耐量の一層の向上が要請されている。今後はこの面での性能向上が課題になっている。この報告が、応用上役立てば幸いである。

参 考 文 献

- (1) 清水ほか：半導体装置，特許登録番号 656703
- (2) P. Voss : IEEE Conference Record of IAS, Part 1, 467 (1974)
- (3) 船川ほか：三菱電機技報，47, 719, (昭 48)

火力発電所運転員訓練用デジタルシミュレータ

佐藤 孟生*・梅村 忠一*・馬場 彰憲*・横川 和之**・山上 信太郎**

1. ま え が き

私達の住みよく豊かな環境を築くため、メカ、ユーザともども新しい装置やシステムの開発、改善に努めてきた。しかし、これらの装置やシステムが私達の豊かな生活を支えているのではなく、これらの装置・システムを誤りなく運用すべく日々努力をしてくれる人々があってこそ、手にできた豊かさである。

近年の火力発電所のように、エネルギー及び運転情報の高密度化されたシステムを誤りなく運転するには高度な技術を要し、そのような運転員を効率よく育成する教育手段が望まれている。

当社では、電力会社の指導の下に火力発電所運転員訓練用シミュレータの1号機を東京電力(株)、2号機を東北電力(株)に納めてきた。これらの実績を基に、ドラムボイラユニット、貫流ボイラユニットの訓練が可能で、更に効率的な訓練を可能とするため、従来のアナログ方式から、全デジタル方式とした火力発電所運転員訓練用シミュレータを関西電力(株)の指導の下に完成、納入した。

この報告は、ドラムボイラユニット(堺港7号機)、貫流ボイラユニット(高砂1号機)切替全デジタル火力発電所運転員訓練用シミュレータについて述べたものである。

2. 訓練用シミュレータ機能概要

2.1 機能概要

火力発電所運転員の教育方法として、従来実施されていた机上教育並びに実機教育に比べて、シミュレータ教育では次に挙げるような効果が期待できる。

- (1) 実機では長い年月を要する訓練を短時間に反復訓練できる。
例：プラントの種々の状態(コールド・ウォーム・ホット・ベリ・ホット始動、通常・冷却・非常停止)からの運転が任意に開始できる
- (2) 実機では密度が高い訓練が困難な運転操作訓練を、高密度で行うことができる。
例：発電機並列操作、自動制御機器の自動投入操作。
- (3) 実機ではほとんど期待できない運転操作訓練を行える。
例：機器異常時の対応操作(所内単独運転など)
- (4) 最近のプラントでは自動化が進んでおり、これらの装置故障時の対応操作訓練ができる。
例：ABC装置の故障(操作器、検出器、装置本体)
- (5) 実機では安全上の制約のため明確にし得ないプラント特性の知識を修得できる。
例：自動制御機器手動モード時のプラント特性(オープンループ特性)

上記のような特長を持つ全デジタル火力発電所運転員訓練用シミュレータの機能を図1.に示す。

2.2 全体機器構成

この訓練用シミュレータは、中央操作室の運転員の訓練を中心に、現地の運転員との協調も含めた訓練を目的とするものであり、図2.に示すように中央制御室、現地模擬室、指導員室、計算機室に分け

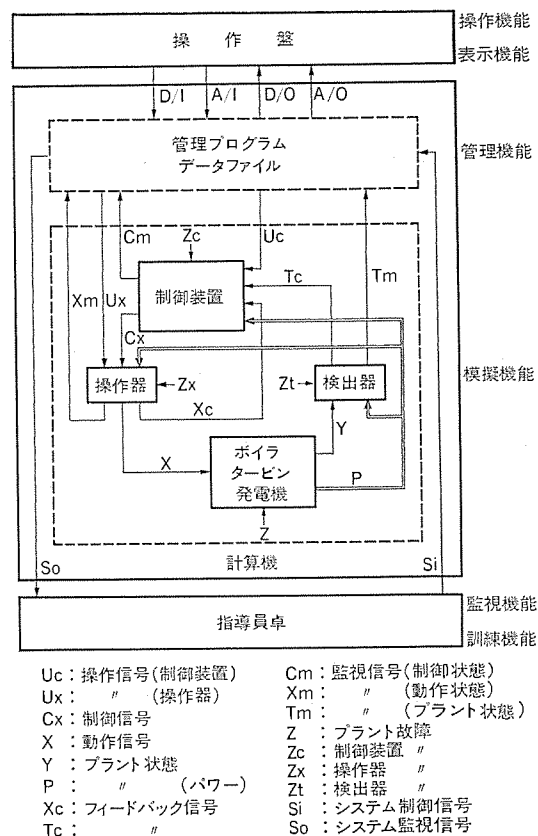


図1. シミュレータの機能概要

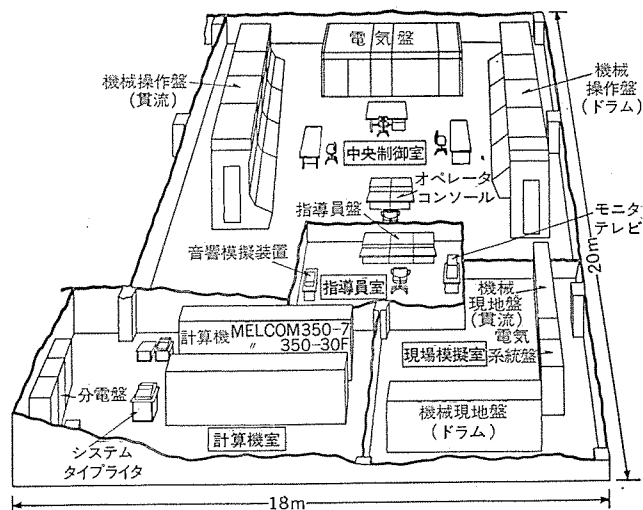


図2. シミュレータ機器配置図

て各機器が設置してある。

(1) 中央操作室

ボイラ・タービン関係の制御を行うのに必要な操作器具、及び運転状態をは(把)握するのに必要な指示計、記録計、表示灯などが取付けられた機械操作盤(BT盤)がドラム形と貫流形のおのおの1面ずつ設置されている。また電気関係の操作器具、指示計、記録計、表示灯

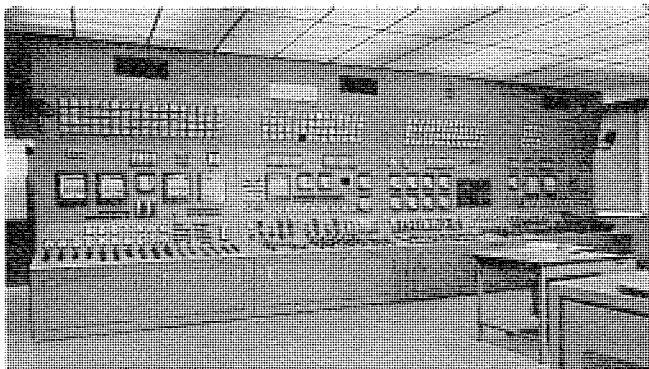


図 3. 貫流ボイラユニット 機械操作盤

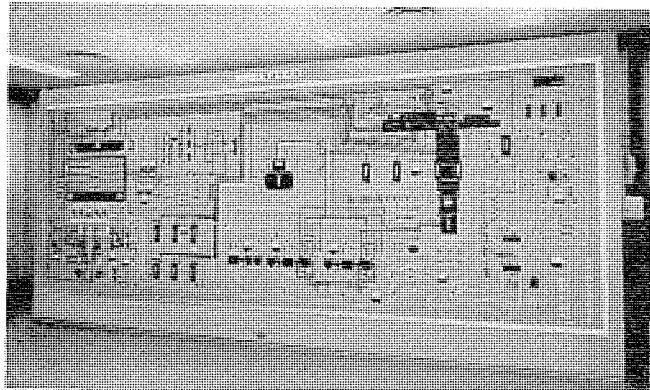


図 4. ドラムボイラユニット 機械現地盤

などが取付けられた電気盤 (E 盤) が設置され、これは正面から見て右側がドラム形、左側が貫流形、中央が起変・ガスタービン盤でドラム・貫流共用となっている。盤の形式、盤面構成などはモデルプラントに類似して作られている。

(2) 現地模擬室

火力発電所の現地の機器をグラフィック面に模擬したものである。機械現地盤 (ドラム、貫流各 1 面) は現地の補機、パイプ、バルブ、ダンパ、制御装置等の運転状態をランプ表示したり、状態量を指示計に示すようになっている。また、盤面は系統別、機能別に色分けされ、発電所全体の構成が理解しやすく表現されている。電気系統盤は 1 面で切換えによってドラム・貫流に使い分ける。盤面には所内の電気系統が模擬されており系統、発電機、メタクラ、パワーセンタ、コントロールセンタ、しゃ断器の状態が表示され、模擬母線は電圧別に色分けされている。

このシミュレータにおける貫流用 BT 盤及び、ドラム用機械現地盤の写真を図 3.、図 4. に示す。

2. 3 シミュレータ用計算機システムと運用機能

2. 3. 1 シミュレータ用計算機

シミュレータ用計算機は、ボイラ・タービン・発電機の静特性、動特性の演算及び、ABC (ボイラ制御装置) 制御系の演算を受け持つマスタ計算機 (《MELCOM》350-30 F)、並びにプロセスとの I/O 処理、シーケンスロジック、バルブ等のポジション演算、アナウンシェータ処理及びインストラクタ・オペレータコンソール機能の演算を行う I/O 計算機 (《MELCOM》350-7) の 2 機で構成されている。マスタ計算機と I/O 計算機とは高速データリンク (20 キロバイト/秒) で接続されている。ドラム/貫流の切換えは指導員盤からワンタッチで短時間に切換えられるようになっている。

表 1. 計算機の概略仕様

| | | |
|---------------|---------------------------|--------------|
| 中 央 処 理 装 置 | 《MELCOM》350-30 F (マスタ計算機) | |
| | コ ア | 32 K 語 |
| | ドラム | 512 K 語 |
| | 《MELCOM》350-7 (I/O 計算機) | |
| 周 辺 機 器 | コ ア | 32 K 語 |
| | ディスク | 131 K 語 |
| | タイプライタ | 2 台 |
| | 指導員盤 | 1 台 |
| プ ロ セ ス 入 出 力 | オペレータコンソール | 1 台 |
| | システムタイプライタ | 2 台 |
| | 高速データリンク | 1 式 |
| | 接点入力 | 1,024 点/ユニット |
| プ ロ セ ス 入 出 力 | 接点出力 | 1,024 点/ユニット |
| | アナログ入力 | 32 点 |
| | アナログ出力 | 320 点/ユニット |
| | プロセス入出力切換コネクタ盤 | 1 式 |



図 5. 指 導 員 盤

2. 3. 2 指導員盤

シミュレータ訓練の指導員のための操作監視卓で、指導員室に置かれる。これは図 5. に示すように、左から指導員 タイプライタ、指導員 コンソール及び指導員 モニタコンソールの 3 面で構成されている。これらは以下に示すような機能を有している。

(1) ドラム/貫流切換機能

訓練用シミュレータにはドラムユニット、貫流ユニットの 2 ユニットのモデルが収納されており、訓練に先立ちワンタッチで計算機入出力及びシミュレーション用プログラムを訓練しようとするユニットに切換えを行うための機能である。

(2) スナップショット機能

1 ユニット当たり 18 種類のプラント運転状態を任意に設定できる機能であり、その選択された任意の状態より訓練を開始できる。また、設定した状態に対し BTG 盤、電気盤等の制御盤上にあるスイッチの位置が正しいか否かのチェックを行い、不正な位置のスイッチが存在する場合にその不正スイッチ名を指導員 タイプライタに印字する機能も含んでいる。

(3) マルファンクション機能

この訓練用シミュレータにはヒータのチューブ破損、ABC コントローラハンチング、補機モータの過電流、所内全停等、1 ユニット当たり約 100 種類の事故又は機器の誤動作を発生させる機能があり、これにより実プラントではめったに経験できないような事故対応操作の訓練ができる。

(4) ステップバック機能

ステップバック機能とは現在訓練中の時刻の 5 分前及び 10 分前の状態に逆もどりさせる機能であり、これによって例えば前記 マルファンクション機能で生じた異常状態の対応処置訓練の繰り返し訓練、つまり

反復訓練ができる。

(5) フリーズ機能

訓練用シミュレータプラントを任意の状態で凍結させる機能でありこれにより任意の状態でのボイラ、タービン、電気の状態量の把握ができる。

(6) 誤操作チェック機能

プロセス運転の際に生ずる運転手順誤り、あるいは機器の操作時期が適当か否かなどをチェックし、その旨を運転員に知らせる機能である。

(7) その他の機能

指導員盤の機能としては上記の外、プラント諸量をモニタする機能として、トレンド表示、トレンド印字、アナログ指示等がある。

2.3.3 オペレータコンソール

オペレータコンソールは訓練生が操作するもので下記の機能がある。

- (1) トレンド表示
- (2) トレンド印字
- (3) 経過値印字
- (4) 全点グループ印字
- (5) 運転記録

3. 訓練用シミュレータモデル概要

3.1 模擬範囲

訓練用シミュレータでは、プラントの全停止状態から、全負荷ひいてはプラント異常状態にいたるまで、非常に広範囲な領域を運転員に違和感を与えないよう実時間で模擬する必要がある。このため限られたハードウェア容量、限られた演算スピードでこの目標を達成するにはその模擬範囲の選定が非常に重要である。このシミュレータのモデルの基本的な考え方は下記のとおりである。

- (1) (給水系) - (ボイラ) - (タービン) - (復水器) を循環して熱機関を構成する作業流体 (水) の状態については、できるかぎり物理的に忠実なモデル構成とする。
- (2) ヒートバランスに補助的に影響を与える特性、すなわち、水質、補助蒸気、冷却水、燃料トレース等は操作手順上一応の現象が把握できる程度に簡略化する。
- (3) ヒートバランスに直接影響を与えない給水、排水処理装置 スートブロフ、燃料受入タンク回りの諸機器等はすべて模擬範囲外としている。
- (4) 自動制御は、ABC装置、タービン昇速装置、AVR、ALRとし、プラント用コンピュータによる総括自動制御は模擬範囲外とした。
- (5) ロジックシーケンスは、直接中央操作に関係のない保守用のバルブ、補機等、及び現場ジョグテスト用回路等を除きほぼ実機に近いシーケンスとした。
- (6) 電気系統においては発電所内の主変、起変以内を主たる模擬範囲とし、系統側はある系統容量、系統時定数をもった単一電源と仮定し、系統単独などはその系統容量、時定数が小さくなるということによって模擬している。発電機の水素冷却装置、各変圧器の冷却装置などは模擬範囲外としている。
- (7) その他臨場感を与えるため、大容量補機を投入した時、照明が暗くなる照明模擬、発電所暗騒音、安全弁の吹出音を模擬する音響模擬装置が用意されており、また訓練効果を増大するためのビデオテレビモニタ装置も設備されている。

3.2 ソフトウェア全体構成

ソフトウェア全体構成は図6.に示すとおりである。

マスタ計算機 (M-30F) においては TSOS-IV (TIME SHARING OPERATING SYSTEM-IV) の下にボイラモデル、タービンモデル、電気

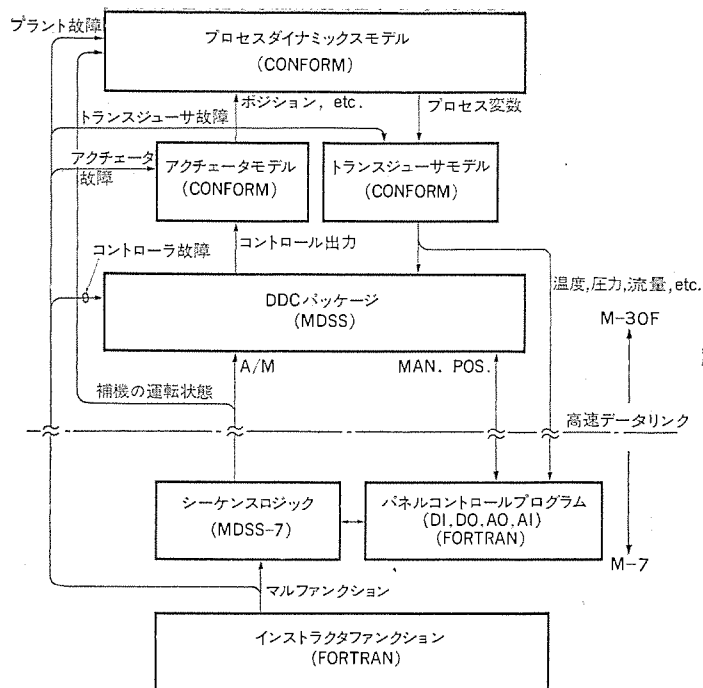


図6. ソフトウェア構成

モデルのプロセスダイナミクスモデル、ABC制御系モデルのDDCパッケージを中心に、アクチュエータモデル及びトランスジューサモデルにより構成されている。プロセスダイナミクスモデルのうち電気モデル、油圧モデル等は高速応答が要求される一方、メタル温度などのモデルは比較的遅いモデルでも十分である。この訓練用シミュレータでは、これらのモデルを500ms～4sまでに分類して周期的に演算し所定の結果を得ている。

使用言語はほとんどをプロセスコンパイラ (COMFORM) で構成しABC制御系についてはMDSS (MELCOM DDC AND SUPERVISORY CONTROL SYSTEM) を使用した。

I/O計算機 (M-7) においてはRDM (REAL TIME DISK MONITOR) の下にシーケンスロジック、デジタル入出力、アナログ入出力及びインストラクタファンクション、オペレータコンソールファンクション等を演算処理している。火力発電所のシーケンスロジックは非常に膨大であり、機器操作から機器動作までの応答のスピードを考慮して高速プログラム処理を要する部分はEVENT演算方式とし、タイマ、弁開度等の時間要素を含むものは周期的演算方式とした。

3.3 ボイラモデル

モデルは基本的には、物質収支、エネルギー収支及び水の属性を模擬した蒸気関数からなっている。このシミュレータでは、収束演算ループをできるだけ避けるため、流体の物質収支とエネルギー収支から一義的に得られるところの、流体比容積と流体内部エネルギーを入力とし、出力として流体の温度、圧力、エンタルピーを得る蒸気関数を用意した。この蒸気関数をベースとしたボイラモデルの考え方は貫流ボイラ、ドラムボイラにより異なるものではなく、その概略構成は図7.に示すとおりである。ただし貫流ボイラにおいては起動系から貫流系に切換わる過程において過熱器圧力がタービン側から演算される要素がある。この様子を図7.では破線で示している。

ボイラモデルにはこのような水の属性以外に燃料の圧力、流量、温度を演算する燃料系モデル、及び風煙道の空気、ガスのドラフト、流量、温度を演算する風煙道モデルを含んでいる。

3.4 タービン・給水モデル

タービン・給水系のモデルは、図8.に示すように、主機モデル、復水器

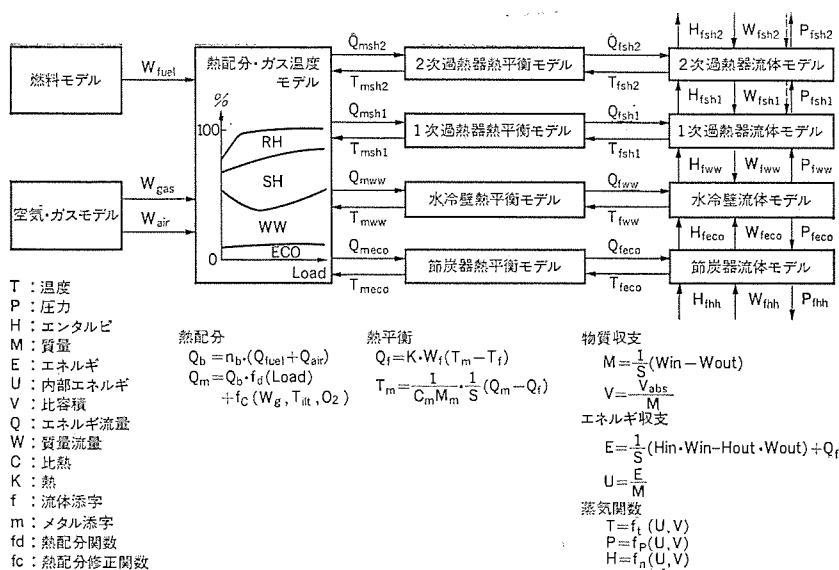


図 7. ボイラモデル

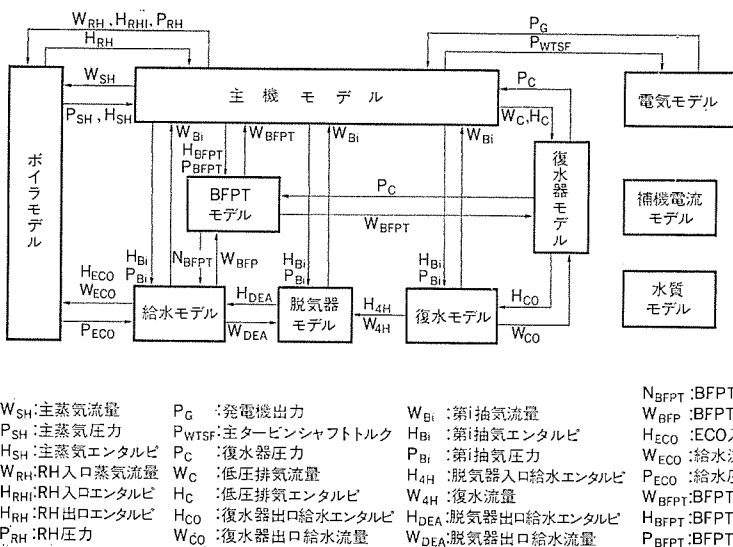


図 8. タービン・給水系モデルブロック図

モデル、復水モデル、脱気器モデル、給水モデル、BFPTモデルの六つのブロックに分割されており、その他補機電流モデル、水質モデル等が付加されている。

各ブロックは、それぞれまた幾つかのブロックに分割されていて、全体のモデルが構成されている。図 8. はそれらの結合の様子を示したものであって、以下に各モデルの特性を示す。

(1) 主機モデル

SH 出口から復水器入口までの主蒸気の流量・圧力・エンタルピーを管路モデルとして算出し、それらの流量・圧力・エンタルピーから、タービンの回転数・トルク及び蒸気温度、メタル温度を計算するモデルである。タービン昇速装置及び油圧モデルもこれに含まれている。

(2) 復水器モデル

主機モデル及び復水モデル、BFPTモデル等で計算された、復水器への流入、流出流量及びそのエンタルピーと、循環水への放熱量からエネルギーバランス式より復水温度、海水出口温度、復水器真空度などを算出し、またマスバランス式より復水器の水位を計算するモデルである。

(3) 復水モデル

復水器から脱気器までの復水の流量・圧力・温度等を計算するモデルで、同時に、給水ヒータへの抽気流量・ヒータレベル等の計算も行っ

ている。

(4) 脱気器モデル

復水モデル、給水モデル等で計算された、流量・温度・エンタルピーから、エネルギーバランス式、マスバランス式により、脱気器内給水の温度・圧力・エンタルピー・水位、及び第 5 抽気の抽気流量を計算するモデルである。

(5) 給水モデル

脱気器から、ECO 入口までの給水の流量・圧力・温度等を計算し同時に、高圧給水ヒータへの抽気流量、ヒータレベル等の計算も行うモデルである。

(6) BFPTモデル

主機モデルで計算された、抽気圧力、エンタルピーから、BFPTの回転数、駆動蒸気流量、排気エンタルピー、温度等の計算を行うモデルである。

(7) 補機電流モデル

上記の(1)～(6)で計算された各補機の負荷に応じた電流値を計算するモデルである。

(8) 水質モデル

復水・給水等の pH、含鉄濃度等の計算や、グラウンド蒸気圧力、冷却水圧力・温度、制御空気圧力等、付加的なプラントの状態量を計算するモデルである。

3.5 電気系統モデル

電気関係の各モデル間の関連と主な信号を表したものが図 9. でその内容を表 2. に示す。

3.6 制御系モデル

3.6.1 アナログ制御系モデル

アナログ制御系モデルはプラントの状態量を検出し、スケール変換し、その検出値と設定値によってプラントを制御する制御器の部分及び、その制御器によって制御される弁の部分をモデル化した部分である。

このシミュレータは訓練用であるため、制御器を手動操作した場合と、自動においた場合における違和感を防ぐため、高速応答を要求される手動操作部の

モデルは I/O 計算機である M-7 側に、また制御性能を良くするために、自動制御部のモデルはマスタ計算機である M-30 F 側におかれている。(以下マスタ計算機を M-30 F、I/O 計算機を M-7 と略す) 図 10. は、ウオータセパレータの圧力制御器のモデルである。このモデルにおいて、手動操作される AUTO/MANUAL ステーションや、ウオータセパレータ圧力設定サーボモータ (BIAS POSITION), SP 弁モデル等は M-7 側にあつて、手動操作時は SP 弁開度や、ウオータセパレータ圧力設定値等のメータ出力を最短の周期で表示するようにできている。自動操作部分である P/I コントローラ、AUTO/MANUAL パンパレストランスファ等は M-30 F 側にあつて、自動時はこれらのモデルによって M-30 F にあるダイナミックモデルを制御している。この制御性能を高めるために M-30 F 側にも SP 弁モデルを持ち、自動時は演算周期の違いやデータリンク等による遅れに関係なくスムーズに弁制御が行われる。またこれら二つの弁モデルは、手動操作時は M-7 側の弁開度を M-30 F 側がトラッキングし、自動時は M-30 F 側の弁開度を M-7 側がトラッキングする事で同一性が保たれている。

訓練用の故障設定入力としては、ABC 電源断、操作端電源断、制御器機能故障 (ハンチング)、弁スティック、発信器異常等があり、それぞれモデルの対応する部分に入力されている。例えば、ウオータセパレー

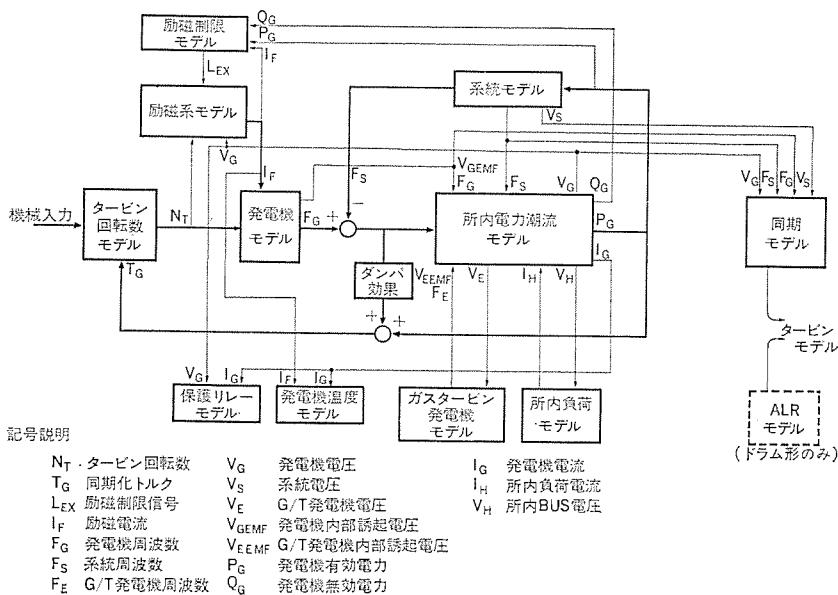


図 9. 電 気 モ デ ル

表 2. 電 気 モ デ ル の 内 容

| モデル名 | 内 容 |
|--------------|--|
| 励磁系モデル | 界磁調整器、界磁追従装置、自動電圧調整の模擬が中心となっており、常用(軸直結形)と予備(モータ駆動形)の励磁機切換えが可能となっている |
| 発電機モデル | タービン回転数と励磁電流から周波数と内部誘起電圧を模擬している |
| 所内電力潮流モデル | 発電機、系統、ガスタービン発電機、所内負荷の間の電力潮流を計算し、電気の変数(電力、電圧、電流、力率etc.)を模擬している。このモデルでは遮断器等のインタロックを考慮したアドミタンスをもとに複素演算を行い、その出力は電気系統モデル全体の状態を決定づけるものである |
| 系統モデル | 系統とユニット出力との関係から系統周波数を算出しているもので、系統じょう乱、系統分離、起変系全停等の異常時も考慮に入れて模擬されている |
| 励磁制限モデル | 最高励磁制限(OEL)と最低励磁制限(MEL)を考慮に入れた制限装置を模擬している |
| 所内負荷モデル | メタラ BUS 以下の負荷を算出していて補機の ON・OFF の状態、BUS 切換えの状態によって負荷の移動を模擬している |
| ガスタービン発電機モデル | BLACK OUT START 用、系統じょう乱時起変系から切換えとして設置され、所内負荷とのバランスは上記の所内電力潮流モデルで考慮されている |
| 発電機温度モデル | 発電機電流、励磁電流をもとに温度を模擬している |
| 保護リレーモデル | 界磁さう失リレー等の発電機まわりの保護リレーを中心に模擬している |
| 同期モデル | 手動同期及び自動同期装置を模擬し、併入方法はストロトル、ガバナの両方で可能になっている |
| ALRモデル | 自動負荷調整器(ALR)を模擬し、ガバナへ信号を送っている。この装置はドラム形のみが存在し負流形ではABC装置にこの機能が含まれる |

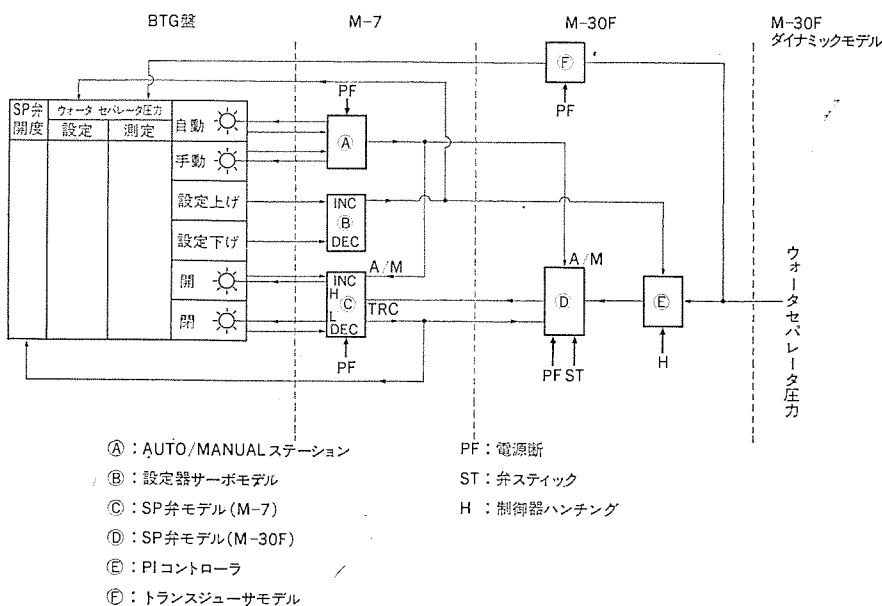


図 10. アナログ制御系モデルブロック図

タ圧力コントローラハンチングの故障がリクエストされれば、PIコントローラの出力にハンチングのバイアスが加えられて手動状態にしないかぎり、SP弁制御がハンチングを起こし、ウオータセレータ圧力のハンチングを引き起こす。

3. 6. 2 シーケンス制御モデル

(1) シーケンス制御の概要

ドラム形、貫流形ユニット切換えに伴う電源系統の変更と主に表示灯回路への電源供給シーケンス、同期検定器用制御回路等の一部分をハードウェアで構成している。

それ以外、すなわちボイラ・タービン、電気の入タロックをはじめ、それらの補機のインタロック、ABCのコントロールステーション及び制御ロジック、バーナ制御、ローカルコントローラ等をすべてプログラム化し、シーケンス制御モデルとして扱っている。

またシーケンスモデルは、論理制御だけでなくバルブアクチュエータやコントローラのポジション演算も行い、そのポジション信号をプラントの主機モデルに送出している。

(2) プログラムの構成

シーケンスモデルはPERIODIC MODULEとLOGIC MODULEと呼ばれる二つのプログラムモジュールで構成されている。

前者は、ABCステーション、同期検定器用出力等、アナログ処理を含むプログラムモジュールであり、実動作時間に応じた周期的処理を行っている。また、後者は論理演算プログラムのモジュールで、入力状態変化に応じて始動されるものであり、その内容を表3.に示す。

(3) プログラム形式

プログラムはMDSS-7と呼ばれる制御用言語により構成され、非常に単純なものになっている。図11.にコントロールセンタ補機の機能図を示している。これは高砂発電所の可逆バルブと同じものであり、ワンタッチ操作、手動優先、電源断で現状保持、全開以外で赤ランプ(RL)、全開以外で青ランプ(GL)を点灯する機能を有する。シミュレータではこれを図示のように、2種類の標準パッケージプログラムに分け、変数をアドレス与えてコールすることにより実行している。このような標準パッケージプログラムを約40種使用し、シーケンスモデルを構成している。

4. 訓練内容

4. 1 教育内容の種別

現在客先で立案されている訓練内容は、表4.に示すとおりである。

4. 2 主な訓練項目

このシミュレータにより運転員に対し、表5.に示す種々の運転操作の訓練が可能である。

表 3. シーケンスモデルの構成

| 略 称 | MODULE SYMBOL | | 内 容 |
|-----------------------------|---------------|---------|--|
| | 貫 流 形 | ド ラ ム 形 | |
| BOILER MAIN | KB 0 | DB 0 | ユニットインタロック、BCP、BCP 出入口弁、BCP バイパス弁、ボイラ再循環弁及びそれらのインタロック等 |
| AIR, GAS | KB 1 | DB 1 | FDF, GRF, GIF, AH, 風煙道のダンパとそれらの補機類とインタロック等 |
| FUEL | KB 2 | DB 2 | トーチ、軽油、重原油系統の各種ポンプ及びバルブとインタロック燃料のウォーミング、ブレンド制御等 |
| BURNER | KB 3 | DB 3 | ドラム形バーナ制御は現場手動操作とし簡略化しモニタを主としている。貫流形は自動バーナ制御を採用し中央操作とし各種インタロック有 |
| ABC | KB 4 | DB 4 | ドラム形貫流形とも実機ベースの ABC を採用、ステーション、アクチュエータバルブをも含むがアナログ制御は含まない |
| BOILER AUXIALY | KB 5 | DB 5 | 上記以外の各種弁類、ユニット連絡弁等 |
| TURBINE MAIN | KT 0 | DT 0 | タービンインタロック、MSV, GOV, RSV, ICV, 抽気弁、DACA 制御関係及びそれらのインタロック等 |
| BFP TURBINE | KT 1 | DT 1 | BFP インタロック、各バルブ、ポンプ、モータ、GOV、主そく止弁等とそれらのインタロック |
| CONDENSER | KT 2 | DT 2 | CWP とその周辺機器、真空ポンプ関係（エゼクタ）復水器周辺機器及びそれらのインタロック |
| CONDENSATE FEED WATER | KT 3 | DT 3 | 復水ポンプ、復水ブースタポンプ、給水ポンプ、給水ヒータ関係及びそれらの周辺機器とバルブ類 |
| TURBINE BEARING | KT 4 | DT 4 | メインタービンターニング制御、ターニング、補助、非常用油ポンプ |
| TURBINE AUXILIARY | KT 5 | DT 5 | その他のタービン補機とバルブ類、ドレン弁関係グラッド蒸気、クリーンアップ弁等 |
| TURBINE MISCELLANEOUS | KT 6 | DT 6 | 制御用、雑用空気圧縮機 |
| GENERATOR EXCITER | KE 01 | DE 01 | 発電機しゃ断器、昇磁しゃ断器、AVR 関係、ロックアウトリレー |
| SYNCHRO HOUSE | KE 23 | DE 23 | 同期検定回路、4-1, 4-1 S, 4-1 T, 4-1 E, 3-1 各しゃ断器とインタロック、所変、動変、起変のロックアウトリレー |
| GAS TURBINE ANNOUNCIATER | KE 456 | ANN | ガスタービンインタロック、BTG、電気盤のアナウンスジェタロジック |

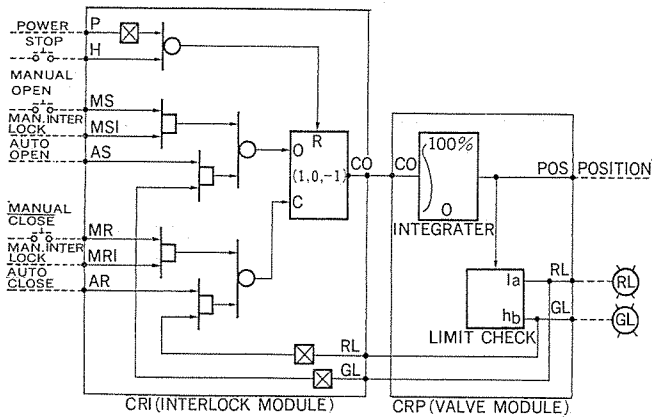


図 11. コントロール補機モデル

表 4. 教育 内 容

| 研修コース | 対 象 者 | 研 修 内 容 |
|---------|-------|---|
| 教 育 内 容 | 基礎研修 | 主機巡回員 制御員の立場でユニットの始動停止と事故時対応操作を習得する |
| | 応用研修 | 制 御 員 事故時対応操作を重点的に習得する |
| | 監督者研修 | 係長・主任・班長 ユニットの始動停止及び事故時における監督者の技能を習得する |

5. む す び

プラントの情報密度の増大、自動化の急速な発達とともに、企業の公共責任が大きくクローズアップされている昨今、シミュレータのような教育機械による教育というのは、今後ますますその重要度が増すものと考えられる。今回の工事は当社としても初めての大規模なオー

表 5. 主 な 訓 練 項 目

| 始動・停止操作訓練 | 通常操作訓練 | 異常時操作訓練 | 変則運転訓練 |
|--|---|--|---|
| <ol style="list-style-type: none"> 1. 機器操作手順の把握 2. 運転諸量・制限に対する操作 3. インタロックシーケンスに係る操作 4. 各種自動制御装置の使用除外操作 <p>注) コールド、ウォーム、ホット等の各運転モードにおける上記訓練が可能</p> | <ol style="list-style-type: none"> 1. 主要補機の切換操作 2. 励磁機の切換操作 3. 復水器の洗浄操作 4. 負荷変化に伴う一連の操作 5. 保安テスト操作 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 系統事故、所内単独、全停時の対応操作 2. 自動制御装置故障時の対応操作 3. ユニットのトリップ時の対応操作 4. 通風機・復水器・給水ヒータ故障時の対応操作 5. 発電機・変圧器・励磁機故障時の対応操作 6. 各種制御電源断時の対応操作 7. 主要機器圧力・流量・温度・水位異常時の対応操作 8. 主機・主要補機軸関係異常時の対応操作 9. 主要補機トリップ時の対応操作 10. 水質異常時の対応操作 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 復水器・風煙道の片肺運転 2. 変圧運転 3. ヒータカット |

ルディジタル方式によるシミュレータで、開発要素も多かったが、熱機関のモデルの基本的概念は今後さまざまな応用範囲が考えられそうである。

この工事において多大のご指導、ご協力をいただいた、関西電力(株)、及び三菱重工業(株)の関係各位に深くお礼申しあげる次第であります。

外鉄形変圧器の油流分布と可視化法によるコイル面流れの観察

渡辺次男*・玉置栄一*・清水 澄*・森津一樹*・松本隆博*

1. ま え が き

外鉄形変圧器のコイルは、長手方向に垂直に支持され、各コイル・鉄心等の冷却ダクトは、変圧器を包む下部タンクより上部タンクへそれぞれ並列回路を構成しているため、本来、この形の変圧器は絶縁油の流れやすい冷却上有利な構造である。

しかしながら、最近の変圧器の高電圧化・大容量化に伴い、変圧器内部の冷却に対する解析も、より精度の高いものが要求されるようになった。すなわち、コイル・鉄心の平均温度上昇だけでなく、部分的な温度上昇を検討しなければならない。また、発熱量の大きなコイル面については圧力損失が少なく油流量の大きい流路を構成する必要がある。

これまで、変圧器の冷却を考える上で、コイルあるいは鉄心等のそれぞれについて油流の測定、熱伝達の解析がなされてきた⁽¹⁾。しかし、これだけでは実際の運転状態における油流分布を正確には(把)握し得なかった。

そこで今回、実器相当のモデル変圧器を製作し、温度上昇と同時に変圧器全体、すなわちコイル面・鉄心面はもちろん、他の流路を流れる流量を実測して油流分布を求めた。

更に、このモデル変圧器の測定結果、及び部分モデルによる実験結果より、変圧器の油流分布を求める計算プログラムを作成した。また、コイル面の油流については、コイル面の実物大全体モデルと部分モデルとに可視化法を適用し、コイル面における流れの分布を均一化するとともに、圧力損失の少ないコイル面流路形状を求めた。

2. 外鉄形変圧器の油流分布

変圧器の大容量化に伴う技術的問題の一つとして、温度上昇の低減、及び部分的な温度上昇の防止がある。温度上昇を考える場合、発生熱量の把握と同時に、冷却媒体である変圧器油の流れを知ることが不可欠の問題である。

これらの問題を検討するため、実器相当のモデル変圧器を製作し、各種の試験を行って性能の検証を行うとともに、各種の計算手法の確認を行った。本章では油流分布についてだけ報告する。

2.1 モデル変圧器による油流分布の実測⁽²⁾

試験に使用したモデル変圧器の外形を図1に示す。このモデル変圧器は1,000 MVA級の1/2相分で、温度上昇・磁界・電流分布・油流の解析用モデル変圧器である。測定箇所は、温度683カ所、磁界1,087カ所、電流分布70カ所、油流33カ所である。

図2は外鉄形変圧器の内部構造の概略図である。送油風冷・送油水冷の変圧器では、ポンプより吐出された油が変圧器本体に入り、コイル・鉄心の冷却を行い、上部タンクよりクーラに入ってポンプにもどる流路に構成されている。

変圧器本体の油の流路は、コイル面、タンク-鉄心間、鉄心-コイル間、鉄心-鉄心間、絶縁物間より成り立っている。

各流路の流量を求めるには、既存の流量計・流速計では構造上か

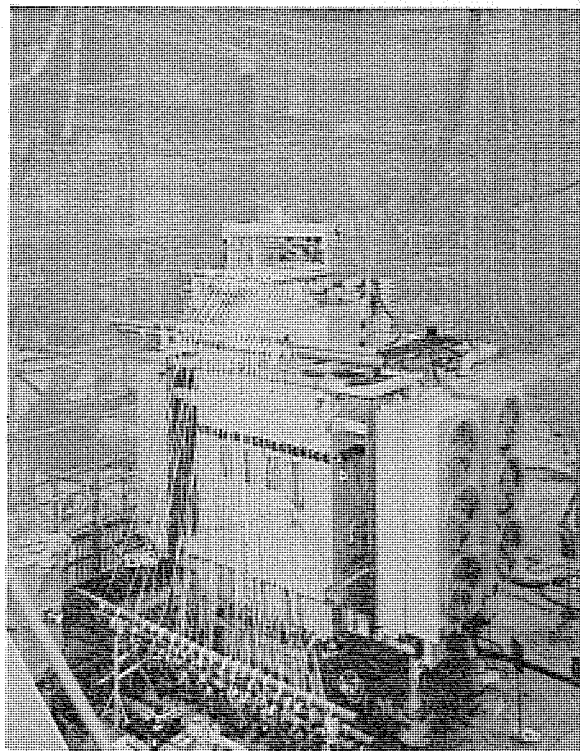


図1. モデル変圧器

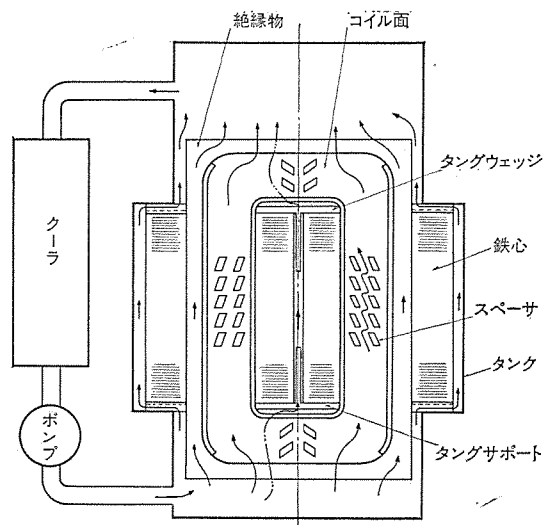


図2. 外鉄形変圧器概略図

ら測定が困難である。そこで、圧力損失が流量(流速)に依存することに着目し、各流路の一定箇所で見ずる圧力損失を測定して流量を求めた。すなわち、各流路について同一形状の部分モデルを製作し、あらかじめそのモデルを用いて圧力損失と流量との関係を校正しておき、変圧器で実測された圧力損失から流量を求めた。図3に校正試験装置を示す。

モデル変圧器による油流分布を測定した結果、各流路を冷却するために十分な流量であることが、温度上昇の実測値からも検証された。

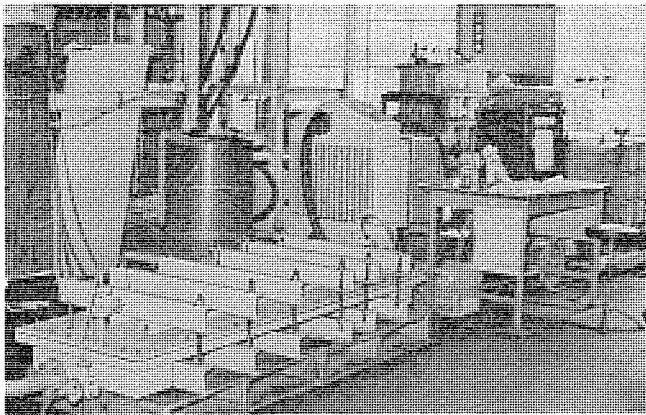


図 3. 油流校正モデル試験装置

2.2 外鉄形変圧器の油流分布計算プログラム

外鉄形変圧器の各部を流れる流量を求めるプログラムを開発した。図4. は、計算手順を示すフローチャートである。このプログラムはポンプの流量-揚程特性と、全流路の流量-圧力損失特性との合致点を見いだすものである。

流体の圧力損失は、一般に摩擦損失、及び流路の形状変化（拡大・縮小・曲り）による損失から成り立っている。しかし、一般に用いられている係数をそのまま外鉄形変圧器の流路に適用することはできず、実験式を用いた。

一例として、コイル面の流れについて、後述のコイル面の流れの可視化実験による観察（図15.～図17. 参照）から図5. のようにモデル化した。スペーサ間の縮小部A、三角形の遷移部B、スペーサのない拡大部Cの三つの部分に流れを分け、各部の摩擦損失、流路の拡大・縮小・曲り損失をそれぞれ式(1)、(2)、(3)、(4)で計算した⁽³⁾⁽⁴⁾。

$$H_1 = \lambda \cdot l/d \cdot v^2/2g \quad \lambda = 64/R_e \cdot 8a^2/(a+b)^2 X \dots\dots\dots (1)$$

$$H_2 = \zeta_1 \cdot v^2/2g \quad \zeta_1 = (1 - A_2/A_1)^2 \dots\dots\dots (2)$$

$$H_3 = \zeta_2 \cdot v^2/2g \quad \zeta_2 = (1/C_e - 1)^2 \dots\dots\dots (3)$$

$$H_4 = \zeta_3 \cdot v^2/2g \quad \zeta_3 = 0.946 \sin^2(\theta/2) + 2.05 \sin^4(\theta/2) \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 H_1 、 H_2 、 H_3 、 H_4 は圧力損失、 l は流路長さ、 d は流路相当直径、 v は流速、 g は重力加速度、 λ は摩擦係数、 ζ_1 、 ζ_2 、 ζ_3 は損失係数を示す。

また、 R_e はレイノルズ数、 $a \cdot b$ はく(矩)形流路の長辺及び短辺長さ、 A_1 、 A_2 は流入側断面積、流出側断面積、 C_e は収縮係数、 θ は流路の曲りの補角、及び X は次式で示される。

$$X = \frac{16}{3} - \frac{1025}{\pi^5} \cdot \frac{b}{a} \left[\tan h \frac{\pi a}{2b} + \frac{1}{3^3} \tan h \frac{3\pi a}{2b} + \dots\dots \right]$$

A、B、C各部に式(1)～(4)を適用して整理すると、圧力損失 H は、

$$H = \alpha v + \beta v^2 \dots\dots\dots (5)$$

の形で表される。ここで、 α 、 β は定数である。

一方、実物大モデルによる実験結果は、式(5)とやや異なり、

$$H = \alpha v + K\beta v^2 \dots\dots\dots (6)$$

の形で表現されることが判明した。 K は、実験係数であり、スペーサの形状・配置によって異なった値をとる。しかし、流路部や流路厚さの変化に対しては図6. に示すようにほぼ計算と一致する。

以上のような手法を用いてコイル面を流れる流量と圧力損失との関係を導き、同様の手法を他の流路にも適用して変圧器内部の圧力損失特性を計算した。

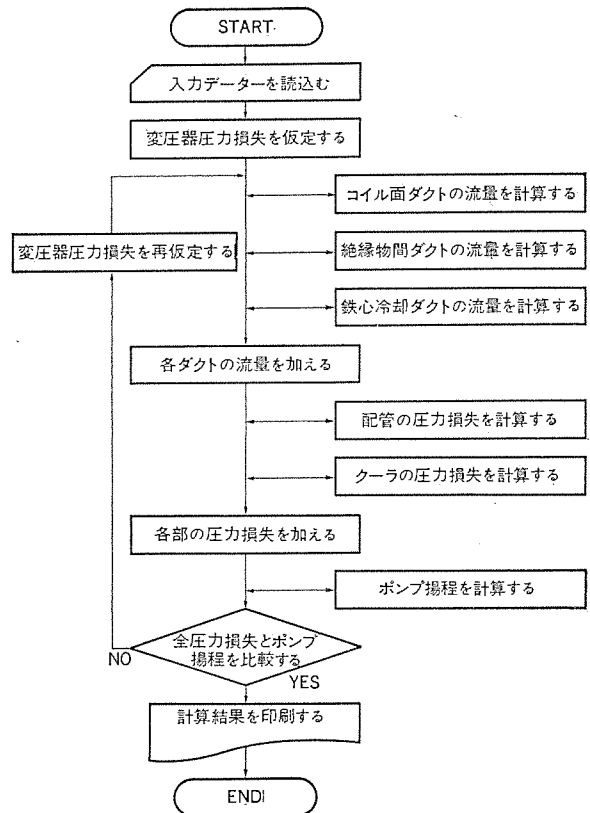


図 4. 外鉄形変圧器油流計算プログラムフローチャート

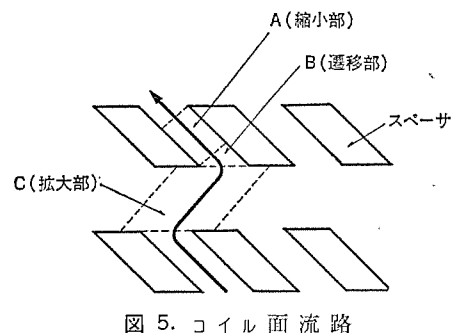


図 5. コイル面流路

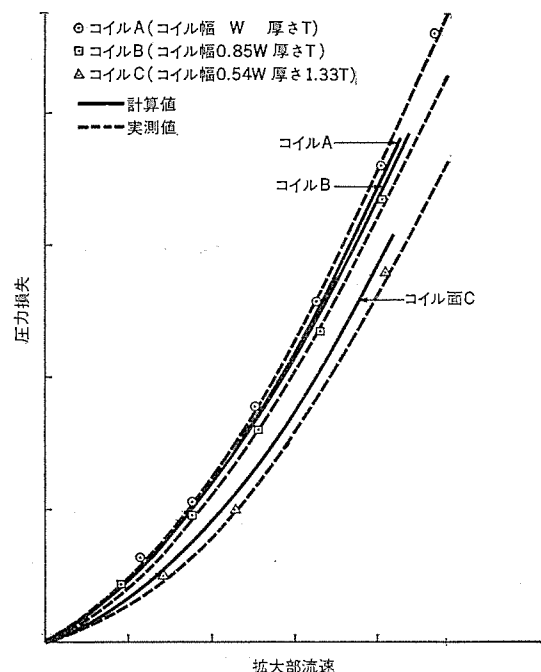


図 6. コイル面流速-圧力損失

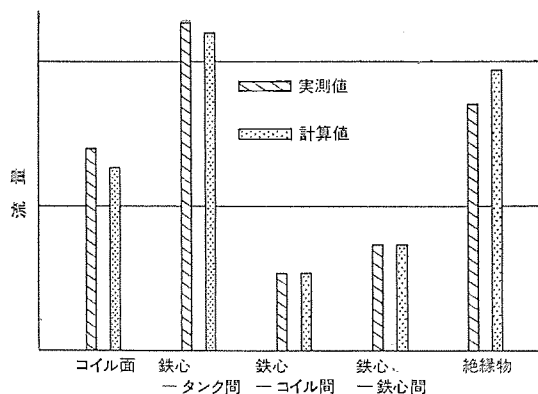


図 7. モデル変圧器の油流分布と計算値

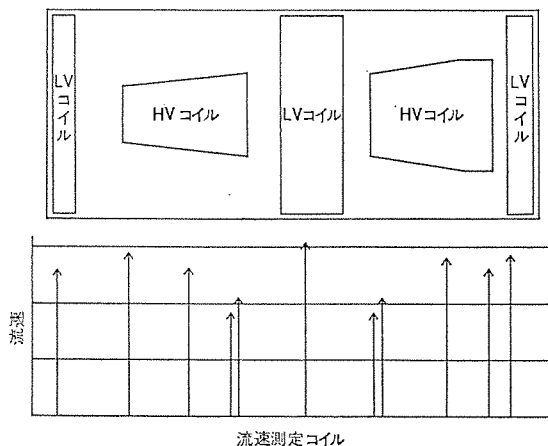


図 8. モデル変圧器のコイル面流速分布

配管の圧力損失については、ハンドブック等の式により、またクーラ、ポンプの特性については、試験データを使用した。

2.3 モデル変圧器の実測と計算

モデル変圧器における実測の一例と同一条件の計算を図 7. に示す。また、コイル面の油流バランスの状態を図 8. に示す。各コイル面にはややばらつきはあるが、これは測定法にまだ問題を残しているためである。しかし、冷却上に問題のない分布状態である。

プログラムによる計算値と実測値とはほぼ一致し、この手法を用いることにより、運転状態での変圧器各部の油流分布の計算が可能となって冷却計算の精度向上を図ることができるとともに、変圧器の構造改良に伴う油流分布の変化の予測が可能になった。

3. コイル面の流れの解析

外鉄形変圧器に使用されるコイルの形状は、長方形で長手方向に垂直状態に支持されており、油ダクトは、すべて上下方向に設けられて広い冷却面積を有し、油流を妨げるものが少ない。したがって、特にコイル入口に油流の案内を設けなくても、油流の条件は各コイルに均等になり、タンクの底部に必要なヘッドと油量を与えれば、超大容量変圧器であっても冷却不平衡は起こらず、コイルの温度上昇は均一化する。1枚のコイル面には多数のく(矩)形片(スペーサ)が置かれ、コイル面に垂直に働く力を支持するとともに、油げき(隙)を保ち、コイル面を流れる油流を均一化する。

実際の変圧器コイル面の流れの様子をそのままの形で知ることが困難なので、モデルを用いてコイル面の流れの観測・改良を試みた。流速の測定には種々の方法があり、例えばピトー管・熱線流速計・レーザ流速計などが考えられるが、これらの方法は流れの状態があらかじめ推測できるような単純な流れの測定には有効な手段であるが、

外鉄形変圧器のコイル面の流れに適用するには能率が悪くて煩雑である。これに対して流れの可視化法は、人間の視覚に訴える手法で、他の計測法とは異なり、解析可能な数学的モデルを見いだして流れを支配する法則・要素を発見することができる有効な手法である。

一般に、流体の運動をそのままの形で肉眼で見ることができないが、可視化の技術によって流れ全体を見ることも可能である。流れを可視化する手法は、レイノルズの有名な色素による層流・乱流の流れの模様の観察に端を発し、種々様々な手法が提案されている⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾。

ここでは、流れにトレーサを入れてその動きを観察するトレーサ法と、流れの中の密度変化を光学的に捕えるシュリーレン法を用いてコイル面の流れを観測した。また、局部的な流速の測定も試みた⁽⁸⁾⁽⁹⁾。

3.1 コイル面モデル

モデルとして、コイル全体の実物大モデル、及びコイルの一部だけの部分モデルとを製作した。実物大のコイル面モデルを図 9. に示す。このモデルは、コイル全体の流れの状況を知るためのもので、モデル容器の上面にはアクリル樹脂板を用いて油の流路を見ることができ構造で、一様厚さのスペーサを所定のパターンに並べて油隙を構成している。

このモデルでは、アルミ粉・気泡をトレーサとして流れを可視化し、コイル面における流れのよど(淀)みの有無の検証、及び圧力損失の測定を行った。このモデルによって淀みの少ない、かつ圧力損失の少ないスペーサの形状・配置を検討した。

コイルの一部を模擬した部分モデルの試験装置を図 10. に示す。このモデルは2枚のアクリル樹脂板でスペーサをはさみ構造で、スペーサを縦5段、横4列に並べて油隙が構成されている。油は、変圧器と同様に下から上へ流す。このモデルの目的は、スペーサ周辺の流れを観察することで、可視化の手法としてシュリーレン法を用いた。

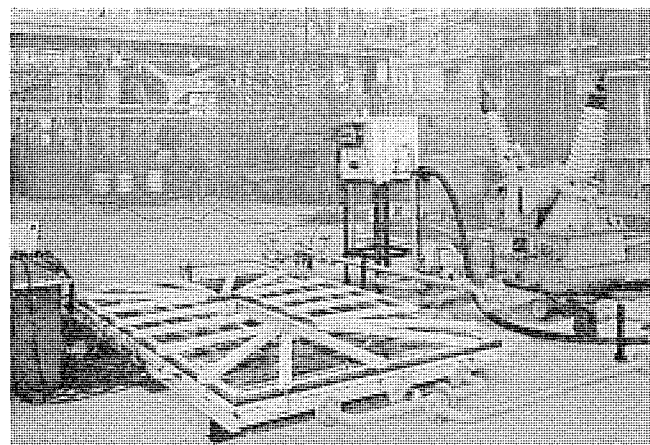


図 9. コイル面モデル試験装置

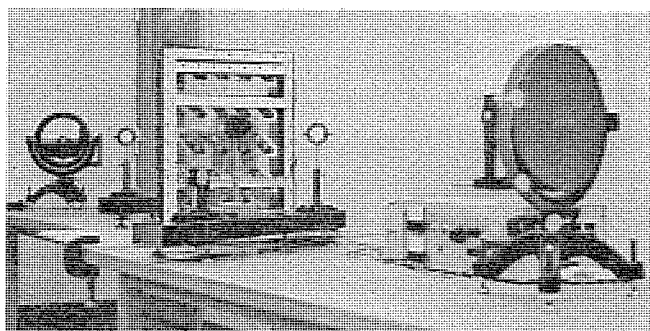


図 10. 部分モデル試験装置

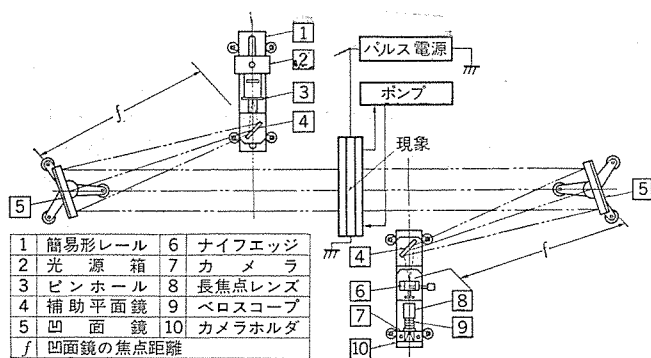


図 11. シュリーレン法装置

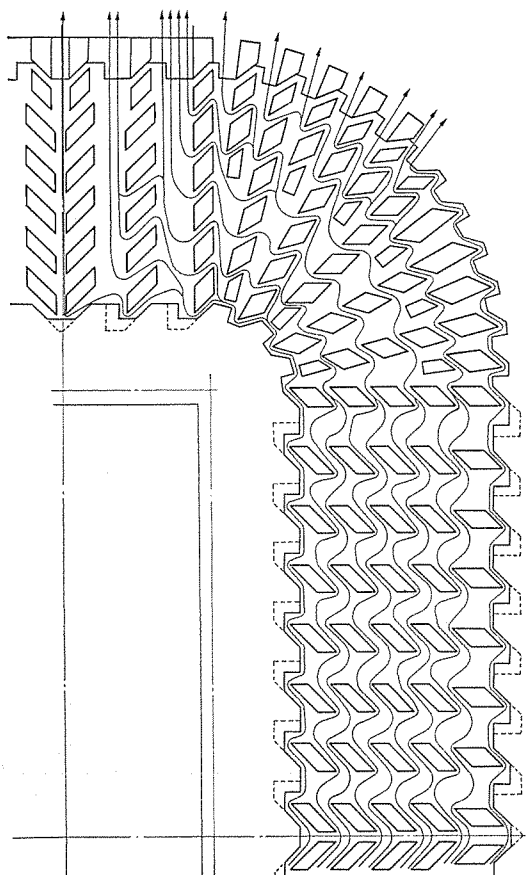


図 12. コイル面流跡図

3.2 変圧器油流のシュリーレン法による可視化

シュリーレン法を実際の変圧器にそのまま応用することはできないが、前述のようなモデルには使用可能である。シュリーレン法は、透明な気体・液体・固体で生じた不均質状態が、屈折率の場のこう配として与えられたとき、不均質部分を通過する光が曲げられて明暗の影として観測する方法である。この現象が顕著な場合には、かげろう・逃げ水などの現象として肉眼で観測できるが、通常の場合には、シュリーレン法装置によって観測される。

試験に用いたシュリーレン法装置は、図 11. に示す 2 面のおう (凹) 面鏡を用いるものであるが、これ以外に凹面鏡 1 枚を用いる方法、レンズ 1 個あるいは 2 個用いる方法などがある。シュリーレン法で流れを可視化するには、流体に検出可能な密度差が必要である。一方、変圧器のコイル面の流速は、たかだか数十 cm/s 程度であり、流れだけによってはその模様を観測できず、また流速測定も不可能である。

そこで、流れの中に電気抵抗の大きな細線を張り、それに電流を流すことによって局部的に流体を加熱して密度差を与えた。また、

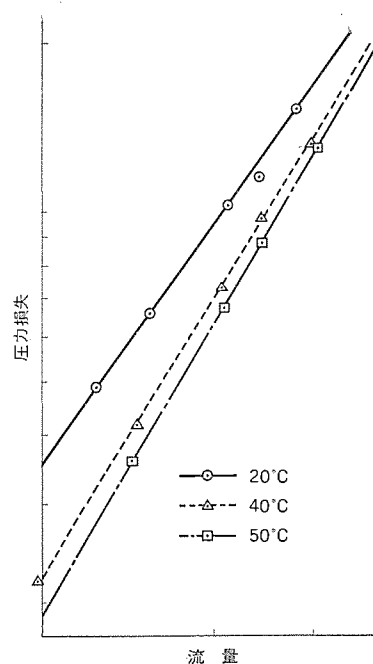


図 13. コイル面流量 - 圧力損失

細線には一定ピッチで銅めっきを施し、パルス電流を流して銅めっきをされていない部分の油を強く周期的に加熱すると、シュリーレン法装置で観測したときに破線状のタイムラインが得られる。

このようにしてコイル面のスペーサ周辺の流れを可視化した。また、破線状のタイムラインの間隔から局部流速の測定も可能になった。

3.3 実験結果と考察

3.3.1 コイル面全体モデル

コイル面全体モデルによる流れの模様の一例を図 12. に示す。なお、ここにはコイル面出口側の 1/2 の部分だけを示した。これは、トレーサとしてアルミ粉を用い、その軌跡を描いたものである。

コイルのストレート部では、油の流れはほとんど混合されないで同じ列の流路を流れていることが分かる。曲線部に入ると、中央部へ回り込みながら少しずつ出口へ片寄って流れている。また、スペーサの形状・配置によって程度の差はあるが、コイル上部の中心線上の内周でも十分な流れを確認することができた。この試験は、横置きされた状態であるので、実際のコイルでは油温上昇による浮力の効果により流れやすくなる。

図 13. は、コイル面流量と圧力損失との関係を示す一例である。コイル面の流れが均一化され、圧力損失の少ないスペーサの形状・配置をこの方法によって選定した。

3.3.2 部分モデル

部分モデルによる実験結果の一例を図 14. ～図 16. に示す。これは、シュリーレン法によって可視化したものである。流れの中に張られた細線が加熱されてできた温度むら、タイムラインとして現れている。ただし、熱線位置から最初のタイムラインまでの間隔は、時間がパルス 1 周期より短いために狭くなっている。

これらの写真は、光源として細線の加熱に用いるパルス電源と同期させたストロボを用いているので、静止像として肉眼でも観察することができる。図 14. は、スペーサ間の平均流速が 5 cm/s、図 15.、図 16. は 15 cm/s である。写真のタイムラインの間隔が、一定時間 (パルス電源の 1 周期) における油の移動距離を表し、この移動距離を図 15.、図 16. について測定して求めたのが、図 17. の流速分布図である。

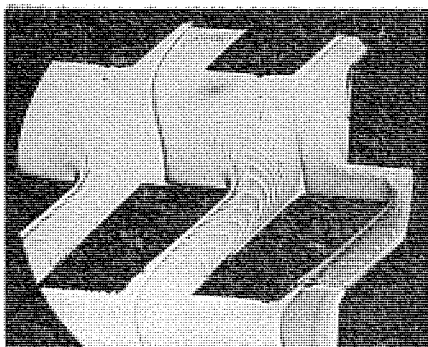


図 14. シュリーレン法によるコイル面の流れ
スペーサ間 平均流速 5 cm/s

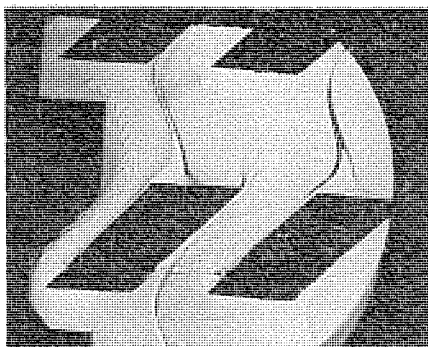


図 15. シュリーレン法によるコイル面の流れ
スペーサ間 平均流速 15 cm/s

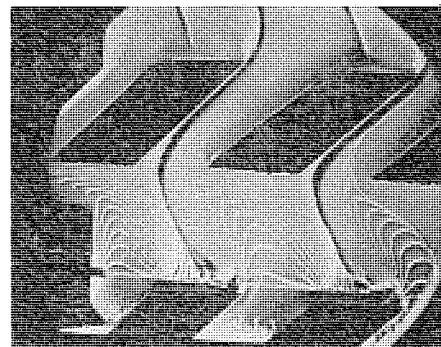


図 16. シュリーレン法によるコイル面の流れ
スペーサ間 平均流速 15 cm/s

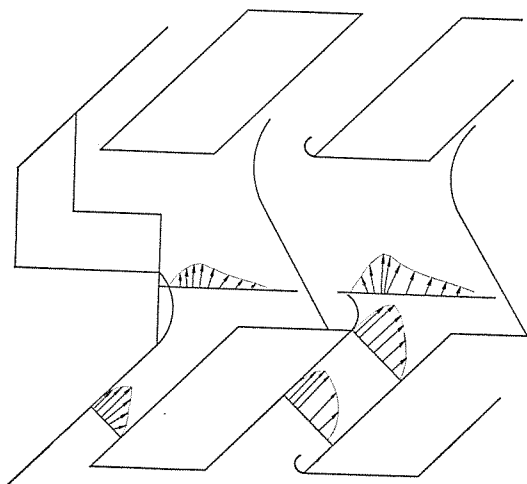


図 17. コイルダクトの流速分布

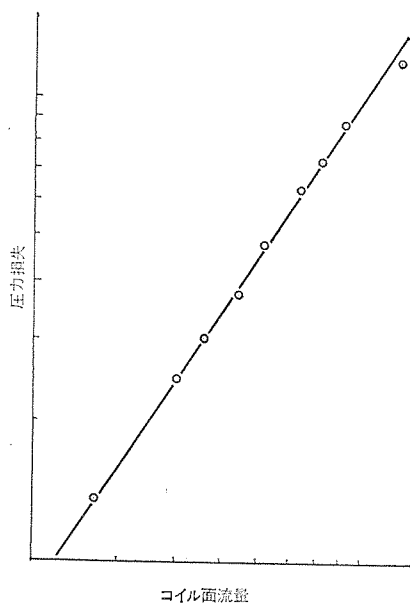


図 18. コイル面流量-スペーサ1列当たりの圧力損失

3枚の写真から、流速が低い場合にはスペーサ間でも流速分布は均一分布に近いが、流速が速くなるとスペーサ間では流速分布に鋭いピークをもつようになる。

スペーサのない部分の流れは、コイル面全体モデルの項でも述べたように、油の流れはほとんど混合されないで、同じ列の流路を流れていることが確認できる。スペーサ間を流れ出た油は拡大するが、流れ

は、スペーサ間と同程度の幅の部分は流れ、流速の非常に遅い部分ができることが分かる。この傾向は、流速が増すにつれて顕著になり、スペーサの後にうず(渦)が生ずるようになる。図 10. は、スペーサ1列当たりの流量-圧力損失特性である。

このようにしてスペーサ形状・配置により、流れの模様がどのようになるか、流速分布がどうなるか、また圧力損失がどう変化するかを検証し、妥当と考えられる形状・配置を選び、コイル面全体モデルにおいて更に検討を加えた。

スペーサの形状・配置は、機械強度・工作性などから制約があり、最適なものを見いだすには更に試験をする必要があるが、流れの可視化法を用いることは非常に有効である。

4. む す び

外鉄形変圧器の温度上昇をより精度よく解明するため、各流路の流量を実器相当のモデル変圧器によって測定した。また、部分モデルによる測定結果を用いて変圧器の運転状態における各部の油流分布を求める計算プログラムを完成した。このプログラムによる計算値と、モデル変圧器における実測値とはほぼ一致し、実用上に十分な精度であることが判明した。

今後、このモデル変圧器における測定結果及び計算プログラムを元にしてバランスのとれた油流分布を有する変圧器を追求するとともに、コイル面流路については、流れの可視化法を利用して更に圧力損失が少なく、流量が多く得られるスペーサの形状・配置を検討し、より効率と信頼度の高い変圧器の製作に寄与したい。

参 考 文 献

- (1) 石井, 篠原, 伊奈: 電気四学会連合大会論文集 710 (昭 45)
- (2) 玉置, 清水, 森津, 村士: 電気学会全国大会論文集 696 (昭 51)
- (3) 例えば機械学会, 機械工学便覧, 8-19~8-23
- (4) 清水, 森津, 村士: 電気学会全国大会論文集 719 (昭 50)
- (5) 浅沼: 機誌 77-666 75 (昭 49-5)
- (6) 妹尾: 機械の研究 23, 1号, 261 (昭 46-1)
- (7) 浅沼: 機誌 72-609 76 (昭 44-10)
- (8) 渡辺, 清水, 松本: 電気学会全国大会論文集 621 (昭 51)
- (9) 渡辺, 清水, 松本: 電気学会静止器研究会資料 TC-75-6 (昭 50)

静電粉体塗装の直流機への適用

藤原 健三*・門田 秋信*・中西 悠二*・寺谷 宏**・玉置 明信**

1. ま え が き

近年、直流機は用途の多用化とともに悪環境下で使用されることが多く、耐環境性に対して信頼性の高い絶縁方式が要請されている。

当社の直流機では、従来から一般絶縁性能はもとより、特殊環境も考慮した信頼性の高い絶縁方式を提供してきたが、今回、絶縁抵抗低下のウィークポイントともいえるべき、裸導体部絶縁として、エポキシ粉体塗装を用いた静電粉体塗装を応用した絶縁（以下EPC絶縁と呼ぶ）を開発した。

このEPC絶縁により、裸導体部分はすべてピンホールレスの均一被膜で完全に覆われ、従来より一層耐環境性のすぐれた絶縁方式を確立した。

以下、エポキシ粉体塗料の性質、絶縁処理技術及び実機モデルによる評価結果について述べる。

2. E P C 絶 縁

EPC絶縁は、無公害、省資源形の粉体塗装法の一つである静電粉体塗装法でエポキシ粉体塗料を裸導体部分に塗装する新しい絶縁処理法である。このEPC絶縁は、粉体塗装の特徴をいかした厚膜塗装性、粉体塗料が荷電されることによる裸導体部への良好な付着性及び、裏面への良好なつきまわり性を生かした方法で、従来の絶縁処理に比べて性能の向上及び、生産の省力化がはかれる。

直流機のEPC絶縁適用部位としては、電機子ではライズ部・電機子コイルの反整流子側接続部及び整流子スパイダ背面、また静止部では、裸導体極端コイル・補償コイルリード及び裸接続線などが考えられる。従来、これらの部位は数回ワニス処理をくり返して形成されたワニスの厚膜によって、絶縁抵抗の低下を防止していた。

2.1 静電粉体塗装法

図1. は、静電粉体塗装法の原理をモデル化したもので、高圧発生器、スプレーガン、粉体塗料供給装置よりなっている。塗装原理は、スプレーガン先端に $-40 \sim -90$ kVの直流電圧を印加することにより、エポキ

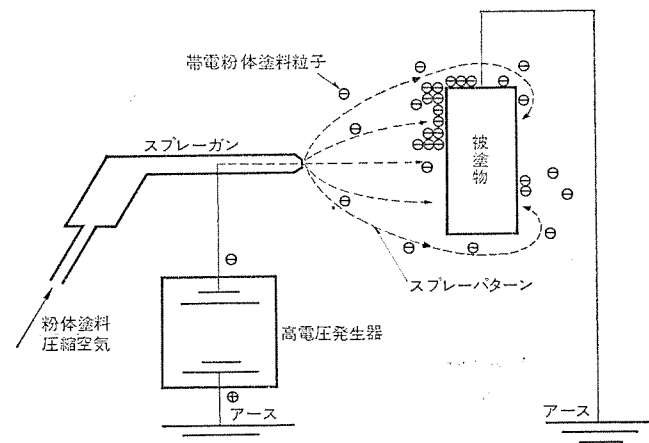


図1. 静電粉体塗装法の原理図

シ粉体塗料が負に帯電し、スプレー空気流と粉体塗料のニュートンの力により、アースされた被塗物の金属表面に飛走し、クーロン力で付着する。付着した粉体塗料は、加熱することにより粉体塗料は溶融、硬化され被膜が形成される。その被膜の厚さは誘電率、印加電圧及び電界が大きいほど増大する。また被塗物との距離が短いほど増大するが、一般に室温で最大200ミクロン程度である。被塗物を加熱すると粉体塗料の熱融着と被塗物及び粉体塗料の表面抵抗低下による付着量の増大により、金属及び絶縁物の上にも塗膜を形成し、その塗膜の厚さも300ミクロン以上にすることは容易である。

2.2 従来の絶縁とEPC絶縁

電機子の裸導体部分はワニスの厚膜が形成されるまで数回ワニス処理を繰り返し（以下ワニス絶縁と略す）、静止部裸導体部分は、ガラステープなど繊維質の材料を骨材とし、数回ワニス処理を施した（以下テーピング法と略す）方法がとられていた。これに対しEPC絶縁は1回の処理で優れた性能の被膜が形成され省力化にも大いに貢献する。

ワニス絶縁の被膜は平坦部（坦）部で100～300ミクロンであり、テーピング法の絶縁被膜は、平坦部・エッジ部ともに300～600ミクロンである。この膜厚はワニス処理を多回数にしたりテーピング作業を綿密に行って得られるものであり、こうすることによってエッジ部でのピンホールやテーピングしまり不良によるピンホールがなくなる。EPC絶縁は電機子部、静止部裸導体とも加熱して塗装されるためピンホールレスの300ミクロン以上の厚膜を得ることができる。EPC絶縁は、環境の悪いところで長期間使用しても、ブラシのカーボンドストやその他のダスト及び水分による絶縁抵抗の低下を起こすおそれが少なく従来の絶縁より、より一層信頼性の高いものである。

3. 絶縁塗膜の性能

3.1 絶縁塗膜の性質

ワニス絶縁、テーピング法及びEPC絶縁の被膜の性質を表1.に示した。得られた絶縁被膜は、その材料形態が異なるためそれぞれ長所・短

表1. 絶縁被膜の性質

| 絶 縁 法 | ワニス絶縁 | テーピング法 | EPC 絶 縁 |
|---------------------------------|------------|------------|------------|
| 材 料 形 態 | ワニス | テープ+ワニス | 粉体塗料 |
| 主 成 分 | エポキシアルキッド | エポキシアルキッド | エポキシ |
| 融 点 (°C) | <20 | <20 | 85 |
| た れ 性 | あり | あり | なし |
| ピンホール | あり | あり | なし |
| ゲル化時間 130°C (分) | 120 | 120 | 200 |
| 比 重 | 1.20 | 1.90 | 1.40 |
| 表面固有抵抗 (Ω) | $>10^{14}$ | $>10^{14}$ | $>10^{14}$ |
| 引 張 り 強 さ (kg/mm ²) | 1.2 | 15 | 4.5 |
| せん断接着力 (kg/cm ²) | 94 | 94 | 134 |
| 吸 水 率 煮沸 2h (%) | 3 | 2 | <1 |
| 加熱減量 200°C 10日 (%) | 6 | 3 | 3 |
| ガラス転移温度 (°C) | 25 | 25 | 120 |

所をもっているが、EPC 絶縁被膜は、従来のワニス絶縁、テーピング法の絶縁被膜に比べて同等以上の特性を有することが分かる。接着力、ガラス転移温度が、従来のワニス絶縁、テーピング法による被膜に

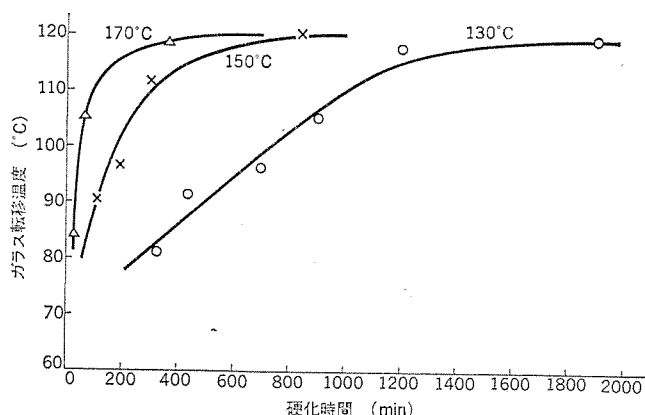


図 2. エポキシ粉体塗料の硬化過程におけるガラス転移温度の変化

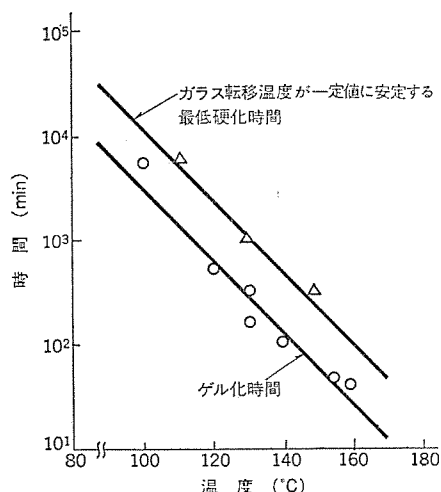


図 3. エポキシ粉体塗料の硬化特性

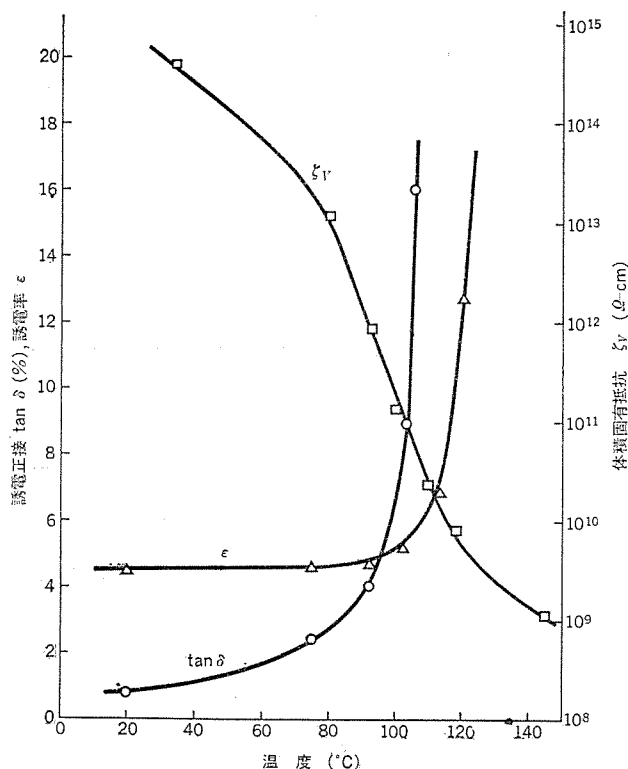


図 4. エポキシ粉体塗料の硬化後の電気的性質

比べて良好な値が得られている。

3.2 エポキシ粉体塗料の性質

エポキシ粉体塗料は、エポキシ樹脂の種類、硬化剤の種類、充てん剤の種類と量により種々の性質のものが得られる。図 2. は、EPC 絶縁に適するエポキシ粉体塗料のテストピースでの硬化過程におけるガラス転移温度（針入度法）の変化を示したもので、硬化温度の高いほど短時間で安定したガラス転移温度が得られる。図 2. よりガラス転移温度が一定値に安定する硬化条件とゲル化特性を図 3. に示した。これから最低硬化時間はゲル化時間の約 6 倍必要であることが分かる。

図 4. は、エポキシ粉体塗料の硬化被膜の電気的性質の温度特性を示した。誘電正接、誘電率は 110°C 付近で急激に上昇し体積固有抵抗は、80°C 付近で低下する。

4. パーテスト

4.1 試料作成

2.2 mm 厚さ×22 mm 幅の平角銅帯を 230 mm 長さに切断したものをを用いた。銅バーは脱脂し銅の酸化の影響を調べる試料は 200°C 2 時間加熱した。絶縁処理は、ワニス絶縁、テーピング法、EPC 絶縁のいずれについても銅バー全面を絶縁被膜で覆ったもの (Closed End) とした。

4.2 試験法

4.2.1 ヒートサイクル

試料のヒートサイクルに対する絶縁被膜の性能の評価はこう (恒) 温恒湿そう (槽) を用いて、-20~100°C のヒートサイクルを 30 回実施した。ヒートサイクルの条件は、-20°C 及び 100°C 保持各 3 時間、昇温降温速度は 18°C/1h である。評価は、ヒートサイクル後の外観変化 (クラックなど) とピンホールの発生状況を調べた。ピンホールは高圧放電によるピンホールテストで検出し、クラックは目視で調べた。ピンホール、クラックとも絶縁抵抗の低下につながるため、絶縁性能として重要な要素である。

4.2.2 熱劣化

試料の絶縁被膜の耐熱性を評価するために、180°C 20 日間熱風循環式オーブン中で熱劣化させた。評価法は、熱劣化後の試料の室温における外観変化 (クラックなど) とピンホールの発生状況を調べた。

4.2.3 耐水性

試料の絶縁塗膜の耐水性を評価するために、室温で水中 20 日間浸せきした。評価法は、試料の室温における外観変化 (クラックなど) とピンホールの発生状況を調べた。

4.3 結果と考察

表 2. は試料の初期性能で、絶縁被膜の厚さは、230 ミクロンから 475 ミクロンまでであったが、EPC 絶縁ではクラック、ピンホールとも認められず良好なものであった。しかし、ワニス絶縁、テーピング法ではピンホールが確認された。

表 2. テストバーの絶縁処理と初期性能

| 試料 | 絶縁システム | 銅の酸化する | 絶縁処理 | 膜厚(μ) | 塗膜形状* | クラック | ピンホール |
|----|-----------|--------|-----------|-------|-------|------|-------|
| A | 現行(ワニス) | あり | ワニス | 230 | C | なし | あり |
| B | EPC | " | ワニス+EPC | 354 | C | " | なし |
| C | EPC | " | EPC | 270 | C | " | なし |
| D | 現行(テーピング) | なし | テーピング+ワニス | 444 | C | " | あり |
| E | EPC | " | ワニス+EPC | 475 | C | " | なし |
| F | EPC | " | EPC | 238 | C | " | なし |


注) *Cは、Closed End () の塗膜形状

表 3. テストバーの寿命試験結果

| 試 料 | -20~100℃ ヒートサイクル 30 回 | | 180℃ 20 日熱劣化 | | 浸 水 20 日 | |
|-----|--------------------------|-------|--------------|-------|----------|-------|
| | クラック | ピンホール | クラック | ピンホール | クラック | ピンホール |
| A | ※0/5 | 増 加 | 5/5 | 増 加 | 0/5 | 変化なし |
| B | 0/5 | 変化なし | 0/5 | 変化なし | 0/5 | 〃 |
| C | 0/5 | 〃 | 0/5 | 〃 | 0/5 | 〃 |
| D | 0/5 | 増 加 | 0/5 | 増 加 | 0/5 | 〃 |
| E | 0/5 | 変化なし | 0/5 | 変化なし | 0/5 | 〃 |
| F | 0/5 | 〃 | 0/5 | 〃 | 0/5 | 〃 |

注) ※0/5 はテストバー 5 本中、クラック発生が 0 本であることを示す

表 3. は、ヒートサイクル、熱劣化、耐水性の試験結果を示した。ヒートサイクルではすべての試料にクラックは発生しなかったが、試料 A 及び D にピンホールの増加が認められた。試料 A、すなわちワニス絶縁のものは、エッジ部にピンホールが発見された。

また試料 D、すなわちテーピング法のものは平坦部、エッジ部ともピンホールが発生した。これは、テーピング法のテーピング繊維の方向にそったワニス被膜のはく(剝)離と考えられるマイクロクラックが、顕微鏡観察によって確認された。

熱劣化では、ワニス絶縁の試料 A の全数にクラックの発生が認められたが、他の試料はすべて異常なかった。またピンホールは、ヒートサイクル結果と同様試料 A と D にピンホールの増加が認められた。特に試料 A は、全数にクラックが発生したためピンホールの評価ができなかった。試料 D は、ワニス熱劣化を起こし、テーピング繊維方向に沿ってヒートサイクル結果と同様マイクロクラックが発生していた。

耐水性ではすべての試料に異常が認められず、クラック、ピンホールの変化はなかった。

以上の結果より EPC 絶縁の試料 B、C、E、F は、ヒートサイクル、熱劣化、耐水性試験のすべてに異常が認められず良好な絶縁被膜であることが分かった。

5. 被膜形状とクラック性

5.1 被膜形状とクラック性の試験

試料は 3.5 mm 厚、35 mm 幅、500 mm 長の平角銅帯を用いて、被膜形状による耐クラック性をヒートサイクルと熱劣化を併用して評価した。

一般に被膜は、被塗物になんらかの形で密着しているが、その被膜の性能は、すべて被塗物との接着性に依存している。その中でも被膜の破損は被膜形状及び被膜中の残留応力によって引き起こされることが多い。試料はバーテストと同様の方法で製作しそれぞれの被膜形状を変えた。銅の酸化については試料 No. 1~5 が酸化したもので、試料 No. 6, 7 が酸化していないものである。これらの試料により接着力に対する酸化皮膜の依存性が分かる。被膜形状は、Closed End と称する全面被覆と Open End と称する端部に銅バーが

露出した被膜に切れ目のある絶縁被膜について調べた。なお、銅が酸化している銅バーを一部ブラッシングした試料についても検討した。

表 4. は、それらの絶縁処理法と被膜形状及び、耐クラック性について評価した結果を示した。結果より、被膜形状が Open End のものはクラックが発生しやすく、Closed End のものはクラックが発生しにくいことが分かる。しかし Open End でも試料 No. 6, 7 は熱劣化に伴うヒートサイクルにおいても全く異常が認められず、素地との接着性に対して酸化皮膜の有無の影響度は大きい。

また試料 No. 5 も試料 No. 6, 7 と同様、全く異常なく、銅表面のブラッシングによる酸化皮膜の除去効果が顕著である。

試料 No. 1, 2 は、従来のワニス絶縁による絶縁被膜で、No. 1 の Closed End のものは 200℃ 1 日劣化後のヒートサイクルで全数クラックが発生し、No. 2 の Open End のものは初期のヒートサイクルで全数クラックが発生した。

試料 No. 3, 4 は EPC 絶縁で、No. 3 の Closed End のものは 200℃ 12 日劣化した後のヒートサイクルでも全く異常なかった。これは、EPC 絶縁が Closed End であれば良好な耐クラック性を示すことが分かる。No. 4 の Open End のものは 200℃ 2 日劣化後のヒートサイクルで、全数クラックの発生が認められたが、従来のワニス絶縁の試料 No. 2 に比べて優れた耐クラック性があり、No. 1 の Closed End のものに比べても優れていることが分かる。このことは、従来のワニス絶縁に比べて、いかなる状態においても EPC 絶縁が優れていることを示す。

以上の結果より、EPC 絶縁は、従来の絶縁法に比べて優れた性能を示すと同時に、銅の酸化物を部分的に除去することにより耐クラック性を向上することができ、銅が酸化していない状態では、全く異常のない優れた絶縁被膜であると考えられる。

5.2 有限要素法による応力解析



試料の被膜が Open End のもののクラック発生原因を調べるため有限要素法による応力計算をした、その結果を図 5. に示した。軸方向応力は、端部でほとんどなく、端部から内部に移るにつれ応力 2.75 kg/mm² に達し、厚さが増大しても同一値を示した。しかし、被膜のせん断応力は、端部で最大値(被膜厚さ 500 ミクロンで 2

表 4. 被膜形状とクラック性*

| ** 試料 No. | 銅の酸化 | 下地処理 | 絶縁処理 | *** 被膜形状 | 膜厚(μ) | 200℃ 劣化日数 | | | | | |
|--------------|------|--------|---------|-------------|-------|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| | | | | | | 0 | 1 | 2 | 3 | 6 | 12 |
| 1 | あり | なし | ワニス | C | 320 | **** 1/3 | 3/3 | — | — | — | — |
| 2 | 〃 | 〃 | 〃 | O | 320 | 3/3 | — | — | — | — | — |
| 3 | 〃 | 〃 | EPC | C | 460 | 0/3 | 0/3 | 0/3 | 0/3 | 0/3 | 0/3 |
| 4 | 〃 | 〃 | 〃 | O | 530 | 0/3 | 2/3 | 3/3 | — | — | — |
| 5 | 〃 | ブラッシング | 〃 | O | 490 | 0/3 | 0/3 | 0/3 | 0/3 | 0/3 | 0/3 |
| 6 | なし | なし | 〃 | O | 230 | 0/3 | 0/3 | 0/3 | 0/3 | 0/3 | 0/3 |
| 7 | 〃 | 〃 | ワニス+EPC | O | 570 | 0/3 | 0/3 | 0/3 | 0/3 | 0/3 | 0/3 |

注) * -20~100℃のヒートサイクル3回と200℃熱劣化とを併用して評価した。

** バーサイズ3.5×35×500mm平角銅帯。

*** CはClosed End () で、OはOpen End () の形状。

**** クラック発生本数/試料本数を示す。つまり、1/3は試料3本中1本クラックが発生したことを意味する。

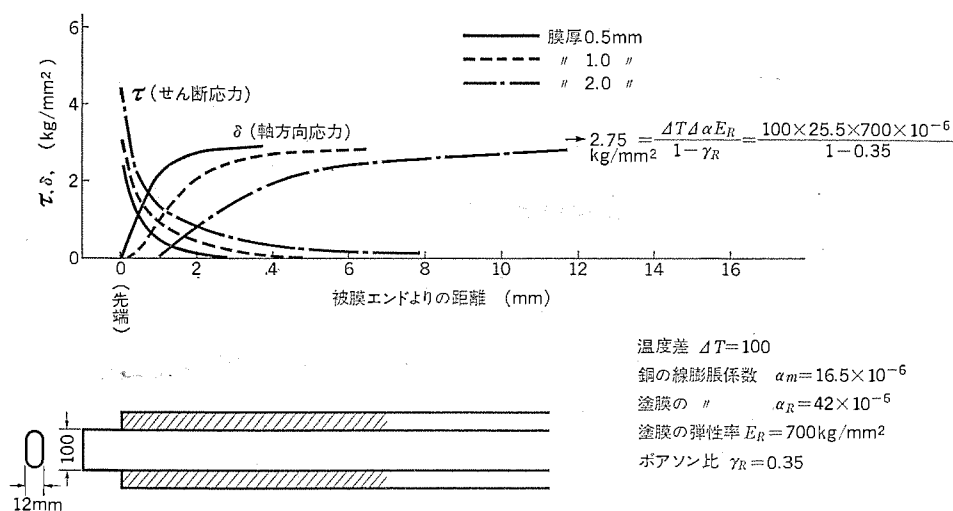
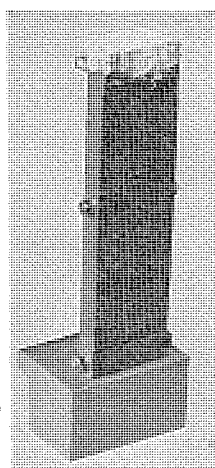
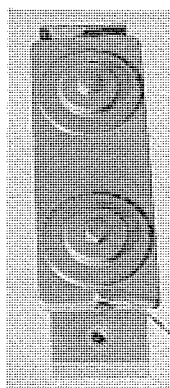


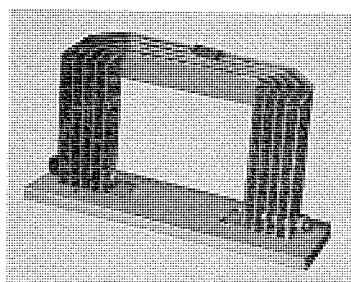
図 5. 軸方向の応力分布



(a) ライザ



(b) 補極コイル



(c) 補償コイルエンド

図 6. モデルコイル

kg/mm² 以上) を示し、端部より約 2～5 mm 中に入るとほとんど零に近づくことが分かる。また膜厚が厚くなるにつれせん断応力も増大する。したがって、被膜のせん断接着力 (1.34 kg/mm²) から考えて、Open End 被膜では端部にせん断接着力以上の剥離を起こす応力が生じていると考えられる。

また平角銅バーの平坦部被膜の有限要素法による応力計算からは平坦部の中心が最大であることが分かる。これらのことより平角導体の被膜のせん断応力による剥離は、被膜端部の平坦部中心より剥離が進行し被膜端部のエッジ部に応力が集中してクラックが発生するものと考えられる。

6. モデルコイルテスト

6.1 モデルコイルの絶縁処理

図 6. は、実機のライザ部、補極コイル、補極・補償コイルつなぎ (以下 IC つなぎと略す) のモデルの形状を示す。それらのモデルにおいて、ライザと補極コイルはワニス絶縁と EPC 絶縁、IC つなぎはテーピング法と EPC 絶縁を施し、それぞれ性能を評価した。

6.2 評価法

絶縁されたモデルコイルの性能を評価するため、ヒートサイクル+加振+熱劣化の劣化サイクルをくり返した。ヒートサイクルは 4. 2. 1 項と同一条件で実施し、3 G で 4 時間の加振を行い、180°C 2 日間熱劣化させた。これを 1 サイクルとして継続して行い、1 サイクルごとに、外観変化 (クラック など) 及びピンホールを調べた。

6.3 結果と考察

表 5. は、従来の絶縁法と EPC 絶縁との寿命評価結果を示した。結果より、初期値はすべてクラックのない良好なものであったが、ワニス絶縁のライザ、補極コイルのエッジ部及び、テーピング法の IC つなぎはピンホールがあり、パーテスト結果と同様であった。EPC 絶縁では、ピンホールが認められなかった。

1 サイクル後、すべてのコイルにクラックの発生はなく、2 サイクル後で、ワニス絶縁のライザ、補極コイルにそれぞれ 1～3 箇所クラックの発生が確認された。また、このクラックは、サイクル数が増すにつれそれらのクラック箇所が大きくなるとともに、新しい箇所にクラックが発生し増加していくことが確認された。5 サイクル後、ライザの EPC

表 5. モデルコイルのクラック性

0 は異常なし、数値はクラック数

| モデル 絶縁 | ライザ | | 補極コイル | | *IC つなぎ | |
|-----------|-----|-----|-------|-----|---------|-----|
| | ワニス | EPC | ワニス | EPC | テーピング | EPC |
| サイクル数 | | | | | | |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 3 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 9 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | 15 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 17 | 1 | 3 | 0 | 0 | 0 |

注) *IC つなぎのテーピング絶縁は劣化に伴ってピンホール増加

絶縁に1箇所クラックが認められたが、ウニス絶縁に比べて、格段に優れた性質を示すことが分かる。EPC絶縁の補極コイルは、5サイクル後も全く異常が認められなかった。

ICつなぎは、5サイクル後もテーピング法、EPC絶縁ともにクラックの発生はなかった。しかし、テーピング法はピンホールが1サイクル後より増加傾向を示し、5サイクル後は無数のピンホールが発生していた。EPC絶縁は、5サイクル後もピンホールの発生がなく初期と同一の特性を示し良好なものであった。

なお、サイクルが増すにつれ、ウニス絶縁、テーピング法の絶縁被膜は黒褐色に変化してくるが、EPC絶縁の絶縁被膜はほとんど変化なかった。

以上の結果より、EPC絶縁は、実機モデルにおいても良好な寿命を有することが分かる。

7. EPC 絶縁の実機への適用

エポキシ粉体塗料の性質、絶縁処理技術及び実機モデルによる評価など、材料、機能及びプロセスという観点から技術開発し、EPC絶縁の実機適用に至った。

図7. は実機のEPC作業とその適用例を示している。このEPC作業のプロセスはEPC絶縁の性能に大いに影響を与える。EPC絶縁を直流機に適用するうえでのプロセスを、次に述べる。

(1) 前処理

5.1節に述べたとおり、絶縁被膜の接着強度は、被塗部分の酸化皮膜、油脂、ダスト等の影響を受けるので、それらを除去し接着強度を向上維持させる。

(2) 予備加熱

EPC絶縁は被塗物が平板のような単純形状の場合では、室温でも100~200ミクロン程度の被膜が得られるが、直流機のように複雑な形状の場合は焼付け炉内での塗料落下、絶縁皮膜としての膜厚確保などの配慮から加熱しておくことが望ましい。

(3) 静電粉体塗装

図1. のとおり被塗物は電気的に接地し、塗料の付着してはならない部分はマスキングしてからスプレーを開始する。スプレー順序は上記(2)の理由から、被塗物の熱容量の小さい部分から順次スプレー作業を行う。またスプレーは、被塗物の形状に合ったスプレー方向・パターン形状・粉体吐出量等を調節することも重要である。

(4) 焼付け

塗膜の形成状態は粉体材料独自の性質により異なるので、焼付温度・時間条件は実機のオーブン中の昇温特性と昇温途中における材料の物性変化の関係を十分には(把)握してから決定しなければならない。

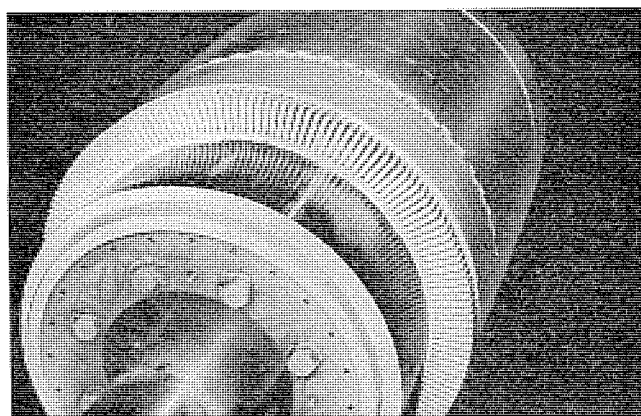
8. む す び

従来、直流機で絶縁抵抗低下を生じやすいといわれてきた裸導体部の絶縁方式として、当社が開発したEPC絶縁について、絶縁被膜の性能・パーテスト・モデルテスト及び被膜のクラック発生機構について述べてきた。

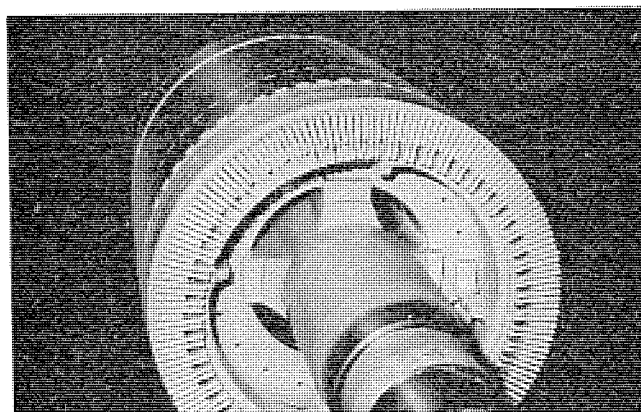
各種評価の結果、EPC絶縁は耐熱性・耐ヒートサイクル性・耐振動



(a) EPC 絶縁作業



(b) 電機子ライザ部



(c) 電機子反整流子側コイルエンド部

図7. 実機のEPC絶縁

性などすべてについて、従来の絶縁方式より優れた性能を示し、今後、ますます多様化する使用環境に十分応じ得る絶縁方式といえる。

終わりに、この報告のために種々のデータ、アドバイスをいただいた関係各位に謝意を表する。

電気浮上法による水産加工排水処理

加藤 強*・前田 満雄**・久慈 陽一***

1. ま え が き

産業規模の大形化、集中化にともなって産業構造は多様化し、また、工業用水の使用量も急激に増大し、水資源の確保に大きな問題を投げかけている。

同時に、この多量の水は排水として河川、湖沼、海域等に排出されている現状において水質汚濁、生活環境の確保等、公害問題として一段とクローズアップされて来ている。

特に水産加工業は用水産業の一業種として、その排水はBOD、CODなどの汚濁負荷が非常に高く、処理技術は各方面で研究され、提案されている。生物処理を適用しようとする場合でも各種の制約条件に左右され一過処理では法規制値を満足する水質までBOD、COD等を低減することができない場合があり、一般には電気浮上処理等の物理化学的処理法との併用処理をする必要にせまられているのが現状である。

ここでは水産加工排水処理法として幾多のすぐれた特徴をもつ電気浮上処理法について処理効果と併せて紹介する。

2. 水産加工排水の特質

水産加工排水の汚濁成分は含窒素化合物であり、魚体加工工程でたん(蛋)白質、脂質、エキス等の溶解性成分がBOD負荷成分として高濃度で排出される。また加工原料から生ずる特質として季節による原魚の種類が異なる事、そして同種の魚体でも漁期、漁場、魚体の大小等によって魚体成分が異なるため、排水中の汚濁物質は常に変化する。

表1. に各種魚介類筋肉の一般的化学組成⁽¹⁾を示す。これより魚体中に蛋白質15~20%、脂質1~10%、炭水化物0.5~1%、灰分

1~1.5%、エキス分1~5%程度含有されていることが分かる。これらが排水中の溶解性汚濁成分の主要なものである。以下にこれらの成分について排水処理の観点から記述する。

2.1 蛋白質

蛋白質はミオシン区蛋白、非ミオシン区蛋白、ヘム蛋白などに分類される。これらの蛋白質はそれぞれ異なった性状を有し、各工程排水ごとに含有比率及び排水処理過程の挙動も異なると考えられる。

ミオシン区蛋白は繊維状で疎水性をもっており、数%の塩の存在下で溶解し、全蛋白質の70~80%を占め、普通鮮度ではアクトミオシンとして存在することが多い。すり身工程で添加する食塩はこれを溶出させる働きがあり、この工程からの排水にはミオシン区蛋白が多いと言える。ミオシン1分子中には1,200個の⊕電荷と1,400個の⊖電荷とがあり、食塩中に溶出したアクトミオシン繊維は静電的反発力により長く伸びようとする傾向を持っている。水産加工排水の凝集処理過程ですり身排水が混じるとフロックの性状がよくなる場合がある。これはミオシン区蛋白の作用によるものと考えられる。

つぎに非ミオシン区蛋白は球状で親水性を持っており、ミオゲン類がこれに属し、全蛋白質の20~30%を占め、水さらしにより血液、脂肪、エキス成分などととも排水中に流出する。したがって、この工程から排出される溶解性蛋白質としてはミオゲン類が多いが、いかなの場合には例外的にミオシン区蛋白もかなり水に溶解するため、水さらし工程で50%以上もの蛋白が洗い出される。

筋原蛋白は水にも塩にも不溶であり、主要成分はコラーゲンが90%前後、エラスチンが1.5%前後、その他糖蛋白質が少量含まれる。多くは魚皮中に存在するが、魚体重における魚皮の占める割合は5~10%である。筋原蛋白は排水中では魚皮片などの固形態中に存在し、溶解性汚濁負荷成分として問題になることはないと考えてよい。

次にヘム蛋白としてミオグロビン、ヘモグロビンがある。ヘモグロビンは解体工程で血液として排出される。

排水中の蛋白質の回収、再利用をはかる場合、これらの性状に十分配慮し、工程別に排水処理を行うことが排水処理効果の向上と回収蛋白の価値を高める一方法と考えられる。

2.2 脂質

脂質は電解凝集などの電氣的凝集処理で非常に効果的に除去できる。脂質は蛋白質とエマルジョンを作りやすく、さば、さんまなどの脂質の多い魚種の加工工程からの排水では、これがクリーム状となることもある。脂質の分布は皮下組織、内臓(特に肝臓、すい臓)、頭蓋腔などに多く、肉部では血合肉が普通肉に比較して多い。また、魚種により分布組織は異なり、さんま、さば、いわしなどでは皮下組織、筋肉に多いのに比較して肝臓中では少ない。たら、いかなどでは逆である。これらの事から脂質のほとんどは解体工程から排出されることが多いがその量は魚種、工程等によって異なる。

脂質はグリセリドを主体とする蓄積脂肪とりん脂質、コレステロールを主体とする組織脂肪の2種に大きく分類されるが、そのほかにワ

表 1. 魚介類筋肉の一般化学組成

| 種 類 | 水 分 | タンパク質 | 脂 質 | 糖 質 | 灰 分 |
|--------|------|-------|------|-----|-----|
| あじ | 75.0 | 20.0 | 3.0 | 0.7 | 1.3 |
| いわし | 75.0 | 17.0 | 6.0 | 0.8 | 1.2 |
| うなぎ | 60.7 | 20.0 | 18.2 | 0.3 | 1.0 |
| かつお | 70.0 | 25.0 | 3.0 | 0.7 | 1.3 |
| かれい | 74.0 | 22.0 | 2.0 | 0.8 | 1.2 |
| こい | 67.0 | 22.0 | 9.0 | 0.7 | 1.3 |
| さば | 76.0 | 18.0 | 4.0 | 0.7 | 1.3 |
| さんま | 64.5 | 20.0 | 14.0 | 0.2 | 1.3 |
| すけそうだら | 81.0 | 16.0 | 0.1 | | 1.7 |
| たら | 81.1 | 14.6 | 0.6 | | 3.7 |
| なまず | 77.3 | 18.3 | 2.3 | | 1.4 |
| ほうばう | 76.6 | 19.9 | 2.8 | | 1.1 |
| まぐろ | 52.5 | 20.9 | 26.4 | | 1.0 |
| あさり | 85.4 | 10.0 | 1.3 | 2.1 | 1.2 |
| あわび | 73.4 | 23.5 | 0.4 | 0.7 | 2.0 |
| かき | 79.6 | 10.0 | 3.6 | 5.1 | 1.7 |
| ばかがい | 84.4 | 11.0 | 0.6 | 1.8 | 2.2 |
| はまぐり | 84.8 | 10.0 | 1.2 | 2.5 | 1.5 |
| いか | 80.3 | 17.0 | 1.0 | 0.5 | 1.2 |
| たこ | 83.0 | 14.6 | 0.6 | 0.2 | 1.6 |
| くるまえばい | 81.4 | 14.2 | 0.3 | 3.5 | 0.6 |
| なまこ | 91.6 | 2.5 | 0.1 | 1.5 | 4.3 |

ックス、アルコール、炭化水素、カロチノイド色素、脂溶性ビタミン（A、D、E）などを構成成分として含む。

グリセリドを構成する脂肪酸はパルミチン酸などの飽和脂肪酸のほか、オレイン酸、リノール酸、リノレン酸、アラキドン酸などの不飽和脂肪酸などがある。

一方、りん脂質はグリセリン、脂肪酸、りん酸などにより構成する複合脂質である。組織脂肪は不飽和度がよく素価が高い。したがって酸化しやすい。フィッシュミール、魚かす(粕)製造で得られる浮上油、圧搾液分離油は主に蓄積脂肪であるが、圧搾液の抽出物は主に組織脂肪である。脂質が酸化すると種々のカルボニル化合物を生成し、これがアミノ酸や蛋白質と褐変反応をおこす。

したがって、排水中ではこれらの反応を伴いながら汚濁負荷成分として存在していると考えられる。

2.3 エキス分

エキス分とは遊離アミノ酸、低分子窒素化合物、有機酸、低分子炭水化合物などを総称して呼ぶものであり多様多様である。排水処理にさいして特に物理化学的処理の場合、これらのエキス分は前述の汚濁成分に比べ除去しにくく、これに起因したBOD、COD負荷を除去することが大きな技術的課題といえよう。

魚かす(粕)の煮汁排水や腐敗による蛋白質の分解を伴った排水では、これらのエキス分が多くなる傾向にあり、処理しにくい排水の一種である。エキス成分のCOD負荷率を表2.に示す。特にL-トリプトファンは非常に高いCOD負荷を示し、トリメチルアミンや塩酸ベタイン等はほとんどCOD負荷成分として作用しないことが分かる。

表2. 魚肉エキス成分のCOD値

| 成 分 | 分子量g/モル | COD 負 荷 比 |
|---------------|---------|-----------|
| ク レ ア チ ン | 149 | 0.240 |
| L-ヒ ス チ ジ ン | 155 | 0.473 |
| ミ オ グ ロ ビ ン | — | 0.345 |
| ヘ モ グ ロ ビ ン | — | 0.300 |
| グ リ コ ー ゲ ン | — | 0.650 |
| 乳 酸 | 90 | 0.350 |
| イノシン-5-りん酸ソーダ | 518 | 0.280 |
| L-カ ル ノ シ ン | 226 | 0.400 |
| L-ア ルギ ニ ン | 174 | 0.135 |
| L-トリプトファン | 204 | 1.400 |
| 塩 化 コ リ ン | 140 | 0.238 |
| イ ノ シ ト ー ル | 180 | 0.608 |
| 塩 化 カ ル ニ テ ン | 198 | 0.250 |
| ビ ル ビ ン 酸 | 88 | 0.295 |
| タ ウ リ ン | 125 | 0.015 |
| グ リ シ ン | 75 | 0.015 |
| DL-α ア ラ ニ ン | 89 | 0.010 |
| 塩 酸 ベ タ イ ン | 154 | 0 |
| トリメチルアミン | 59 | 0 |
| か つ お エ キ ス | — | 0.255 |

2.4 無機成分、そのほか

魚体中にはほとんどすべての金属元素が含まれているが、P、S、K、Mg、Ca、Clなどが一般に多い、これらは無機態で存在するものもあるが、蛋白質、脂質、糖と結合して存在することが多い。

排水の汚濁負荷成分としては、これら自体については問題にはならない。

無機成分のほかにビタミンなどがある。これには脂質中に存在する脂溶性ビタミン（A、D、E、K）と水溶性ビタミン（B、C）とに分類されるが、排水の汚濁負荷成分としては相対的に濃度が低く、あまり問題にならないものと思われる。

2.5 実排水における汚濁量の変動

前述のように水産加工排水の汚濁源はいろいろな条件が重なって

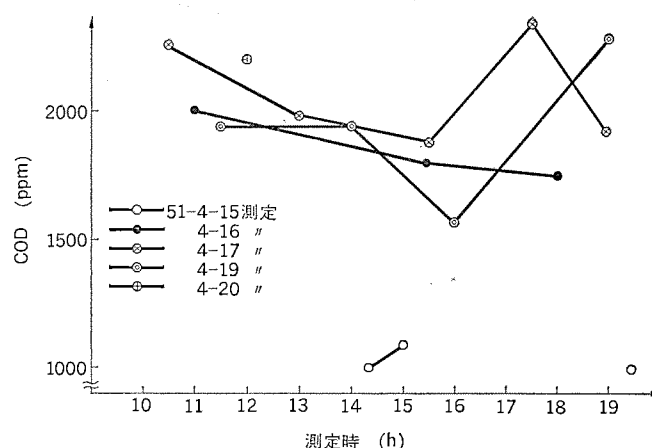


図1. 原水のCOD値のばらつき

る。図1.は、水産1次加工排水としてすけそうだらの魚そう(槽)、截割排水、めぬけの丸洗い排水等が200m³原水槽においてかくはん(攪拌)混合した場合の原水のCOD値のばらつきを示すものであって、これより時々刻々その汚濁COD値が変化していることが分かる。この事は排水処理装置に対する負荷変動として表れるため、排水処理装置の設計において最も重要な事前調査測定事項である。

3. 水産加工排水処理法

水産加工排水の処理法を大別した場合、等電点凝集処理法、及びSchultz-Hardyの法則に立脚した硫酸バンド凝集処理法を挙げることができる。

3.1 等電点凝集処理法

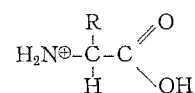
蛋白質はアミノ基と酸基をもっているが、いずれも



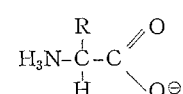
のように(+)、(-)の極性をもつイオンの形で存在するから遊離アミノ酸におけるように両性電解質であり、酸性溶液では「陽」に荷電して酸と塩を作る。また、アルカリ性溶液では「陰」に荷電しアルカリと塩を作る性質がある。

しかし、蛋白質やアミノ酸は種類によって、ある特定のpHにおいて酸性解離への傾向と、アルカリ解離への傾向が等しくなってイオンの移動がおこらない点がある。この時の溶液のpH値をその蛋白質の等電点と言い、蛋白質はこの点において最も溶けにくくなり凝固反応によって析出する。等電点凝集処理法はこの特質を利用して水産加工排水中の蛋白質を回収し、排水を浄化する方法である。

一方アミノ酸も蛋白質と同じように両性電解質であり、その水溶液に酸を加えると



のように塩基性解離をおこし、アルカリを加えると



のように酸性解離をする。各アミノ酸は特定のpH値において両性イオン、すなわち

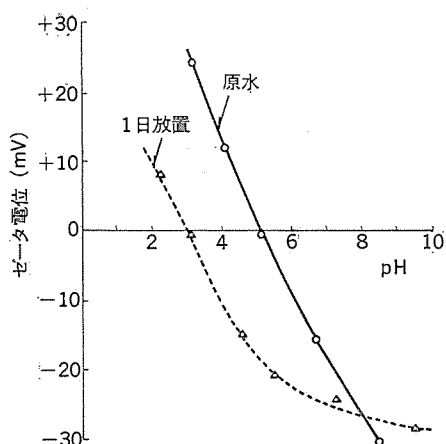
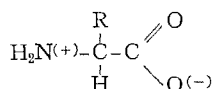


図 2. すけそうだら排水のゼータ電位 - pH 特性の経時変化



として存在する。この点を蛋白質の場合と同様 アミノ酸の等電点と言う。この点においてアミノ酸は中性分子として挙動する。

以上のように蛋白質やアミノ酸は、その種類によって固有の等電点を持っている。例えばたらみのミオグリンの等電点は雄で pH=4.99, 雌で pH=4.58, ミオシンは雄で pH=5.36, 雌で pH=5.31 である。

一方、この等電点は魚種によって異なるだけでなく同一魚種の場合でもその水産加工工程によって排水中に溶出する成分が異なるため等電点が異なる。一例として、K 水産会社におけるすけそうだらの加工工程別の等電点を調べた結果、下記のとおりであった。

| | |
|----------|---------|
| 解体排水 | 4.2 |
| すり身排水 | 5.3 |
| 除りん(鱗)排水 | 4.9 |
| 総合排水 | 5.3~5.5 |

図 2. は、すけそうだらの加工排水についてのゼータ電位を調べたものであって、1 日放置することによって等電点 pH=5 から等電点 pH=3 にまで低下していることが分かる。この事は、排水の経時変化によって等電点 (pH) が低くなる傾向にあることを示す。すなわち等電点凝集排水処理において、前日に排出された排水と当日排出された排水では、そのおのおのの等電点 (pH) が異なるため、良好な処理水を得ることが困難になる。ゆえに等電点凝集排水処理においては、同一原水槽に何日分もの原水を滞留混合して処理することは好ましい事ではなく、その日の排水はその日のうちに処理する必要がある。

3.2 等電点凝集法に与える塩の影響

等電点 (pH) に与える添加無機塩の影響について、さんまフィーレをつぶした模擬排水について等電点 (pH) - ゼータ電位特性を図 3. に示す。塩なしの純排水だけの場合の等電点 (pH) は pH=6.5 であったが MgCl_2 や NaCl 等の添加によって等電点 pH=6.55 程度とわずかな上昇である。一方、 Na_2SO_4 の場合等電点 pH=6.7 程度であって、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の場合で等電点 pH=6.3 程度である。これを図 2. のデータと比較して考えた場合、排水を放置させておくことのほうが等電点 (pH) の変化が著しく大きく、無機塩の添加では大きな変電点 (pH) の変化のない事が分かる。すなわち、無機凝集剤としてこれら無機塩を用いても等電点 (pH) の変化がほとんどなく安定した良好な排水処理の可能であることが分かる。

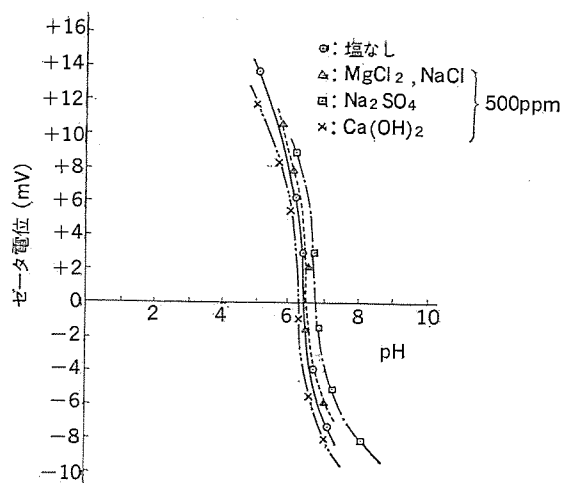


図 3. ゼータ電位 - pH 特性の共存塩効果

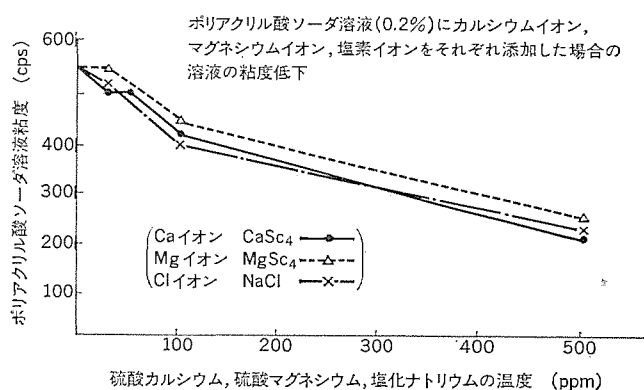


図 4. ポリアクリル酸ソーダ溶液の粘度変化に与える共存塩の影響

表 3. ポリアクリル酸ソーダと共存塩の反応

| 添加塩の種類 | ゲル化点における (添加塩 meq/PAS meq) |
|-----------|-------------------------------|
| 塩化カルシウム | 0.87 |
| 塩化バリウム | 0.80 |
| 塩化ストロンチウム | 0.91 |
| 塩化マグネシウム | 1.02 |
| 塩化第2水銀 | 42.0 |
| 酢酸水銀 | 0.78 |
| 塩化アルミニウム | 0.20 |

等電点凝集処理法において用いられる高分子凝集剤はポリアクリル酸ソーダ (略称=PAS) である。PAS は、強電解質であり、その水溶液は完全に解離しているが、これに Ca^{+2} , Mg^{+2} 等の 2 価塩、又はそれ以上の多価塩が共存すると PAS の解離性が減少し難溶又は不溶となる。図 4. は PAS 水溶液にこれら無機塩を添加した場合 PAS と塩が反応し、その水溶液の粘性が低下する傾向を示したものであり、粘性が低下したということは高分子凝集剤としての作用が減少したことを意味する。

ゆえに等電点凝集処理法において、無機塩の添加は等電点 (pH) の変動には大きな影響を与えないが、その場合に使用する高分子凝集剤 PAS と反応し凝集処理効果が減少するため、等電点凝集処理法においてイオンとして存在する金属無機塩の存在は好ましいことではない。

表 3. は PAS と金属無機塩が反応する比率を mg-当量 (meq) で示したものであり、塩化第2水銀等は少量の PAS と反応するだけであるが、塩化アルミニウム等は、多量の PAS と反応することが分かる。ゆえに塩化アルミニウム等が排水中に存在する場合はアルミニウムイ

オンが水酸化アルミニウムとして沈殿させることが必要であり、イオンとして存在させることは好ましいことではないことが分かる。このことよりこれら金属イオンの含有している海水が混入している水産加工排水に対する等電点凝集処理法の適用は一考を要することが分かる。

3.3 硫酸バンド凝集法

水産加工排水の pH 値は一般に中性である。この場合排水中の蛋白質のゼータ電位は一般に \ominus 電位を示す。この排水にゼータ電位 \oplus の重金属硫酸化物を生成する金属イオンを添加することによって排水は中和され、溶解性蛋白質は変性し難溶性となって沈殿する。このような蛋白質の特性を利用し、硫酸バンドを排水の汚濁負荷に応じて適量添加する浄化法が硫酸バンド凝集法である。

4. 処理効果

各種の水産加工排水の等電点凝集処理効果及び硫酸バンド凝集処理効果について示す。

図 5. はすけそうだらのすり身、及び総合（模擬）排水のデータを、

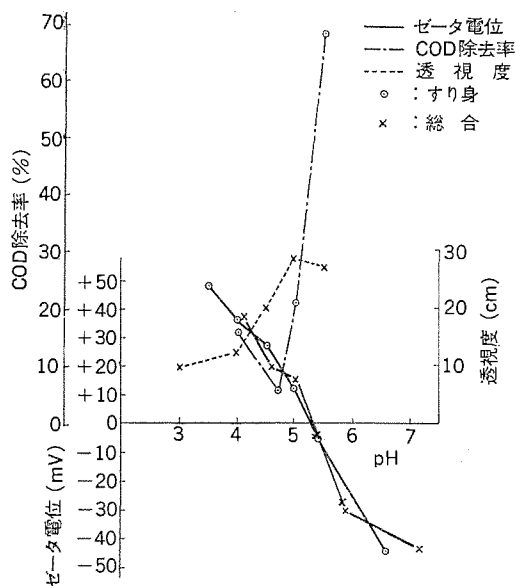


図 5. すり身総合排水の等電点特性 (すけそうだら)

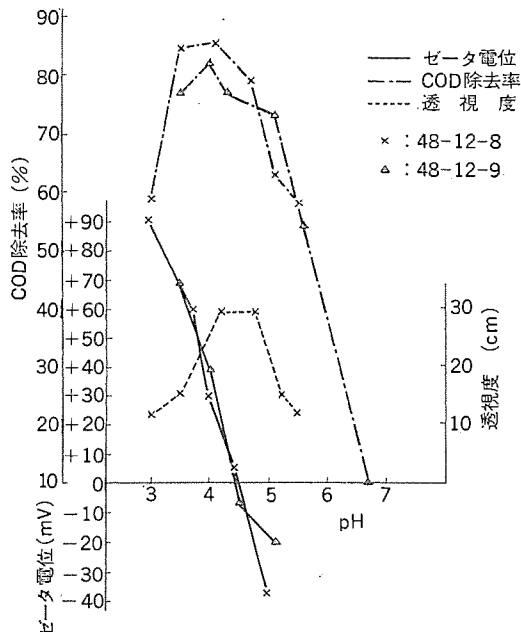


図 6. 解体（截割）排水の等電点特性 (すけそうだら)

また、図 6. にはすけそうだらの解体（截割）排水のデータであり、図 7. はすけそうだらの 3 枚おろし、皮むきの工程から出る解体排水である。図 8. は前記同様すけそうだらの除鱗排水の等電凝集処理した場合のピーカテストによる電気浮上処理結果である。これらのデータより同じ工程から排出される排水でもその処理効果及びゼータ電位（等電点）が異なることが分かるがその処理効果のよい点はゼータ電位が 0 mV になる等電点である。

一方図 9. は硫酸バンド凝集法によるおおなご魚槽排水の原水汚濁量と COD 除去率の関係を示す。図 10. はすけそうだらの魚槽排水、解体（截割）排水等の混合排水の硫酸バンド凝集法による処理水中の残留 COD とランニングコストの関係を示す。

ランニングコストは処理薬品及び電気浮上電解電力より算出した。原水の COD 値は 1,500~2,000 ppm の範囲のものをを用いた。

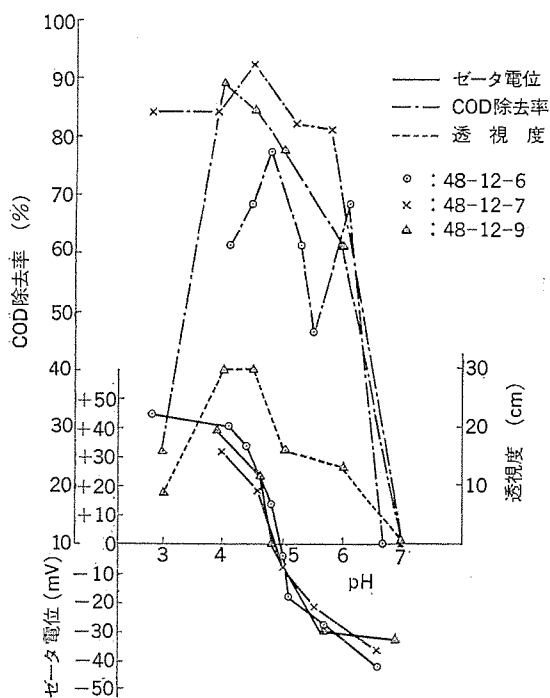


図 7. 解体（3 枚おろし）排水の等電点特性

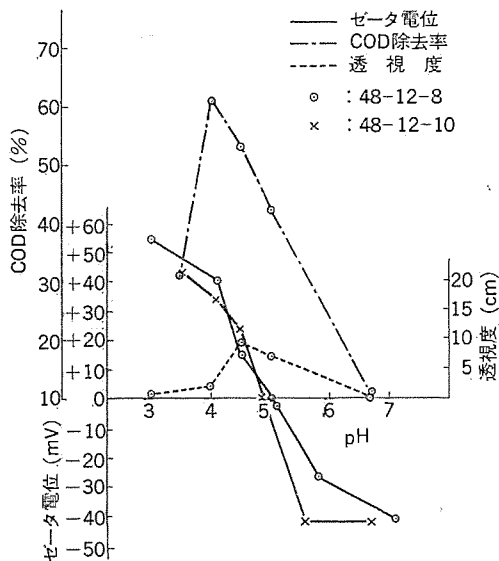


図 8. 除鱗排水の等電点特性

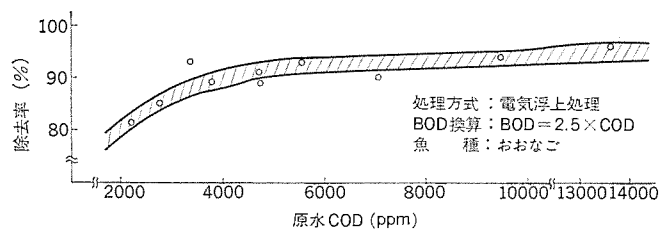


図 9. COD 除去率と原水 COD の関係

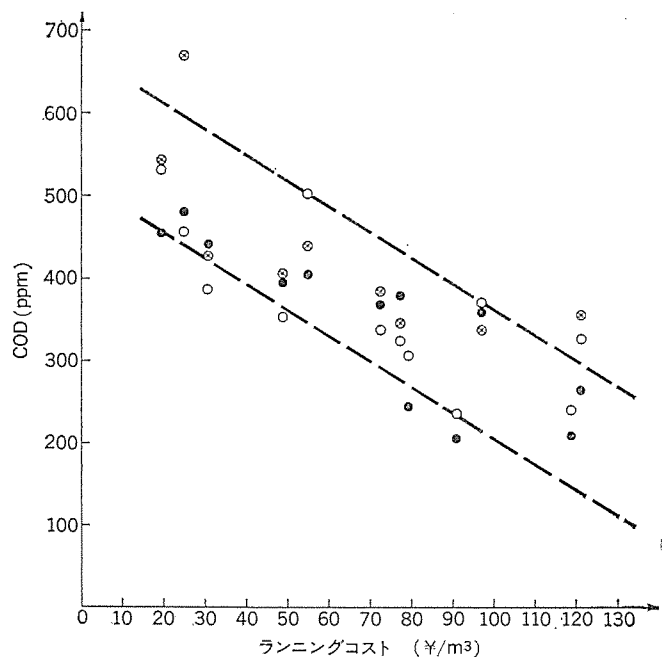


図 10. ランニングコストと残留 COD の関係

5. 電気浮上処理装置

電気浮上処理装置の基本フローは図 11. に示すように前段処理として薬品処理するフロッキュレータ部と、電気分解処理を行う電気浮上槽から構成される。図 12. は、3,000 m³/d の処理能力をもつ水産加工排水用電気浮上処理装置 DF-150 形の外観である。表 4. は、DF-150 形処理装置の基本仕様である。

図 11. に示す電気浮上処理装置の基本フローに従ってその処理方式を次に説明する。

前段処理では被処理水に無機凝集剤、有機凝集剤等の薬品を注入し、被処理水中の汚濁物質を凝集せしめ、フロックを形成させる。フロックの浮遊した被処理水は電気浮上槽に送られ、電解浮上室下部に設置された陽極、陰極ともに特殊な不溶性電極材料からなる電解部で直流電気分解を受ける、ここで陽極から酸素ガス、陰極から水素ガスの微細電解ガス気泡を析出させ、前段処理にて生成せしめたフロックと会合させる。次いで被処理水は電解浮上室を上昇し、浮上分離室に導かれる、フロックはスカムとして浮上し、スキームによってかき取られる。かき取られたスカムは飼料又は肥料として利用される場合がある。

一方、電解浮上室における被処理水の電気分解は前述のフロック浮上用微細電解ガス気泡を発生させる作用のほかに、前段処理で処理しえなかった汚濁物質を陽極近傍では電解酸化を、陰極近傍付近では電解還元作用をする。また、単分子コロイドやミセルコロイド等のゼータ電位をもった汚濁物質は、直流電流の通電によって分散性が弱められ凝集性が改善され処理効果を向上させる作用がある。

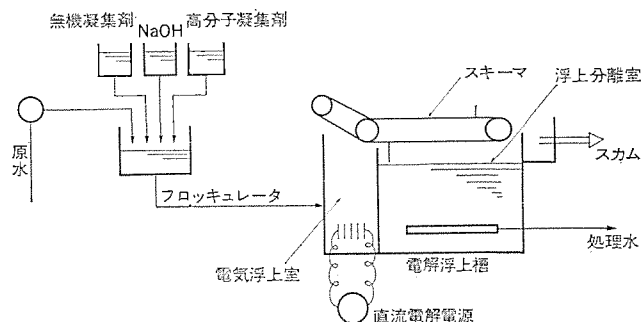


図 11. 電気浮上処理フロー図

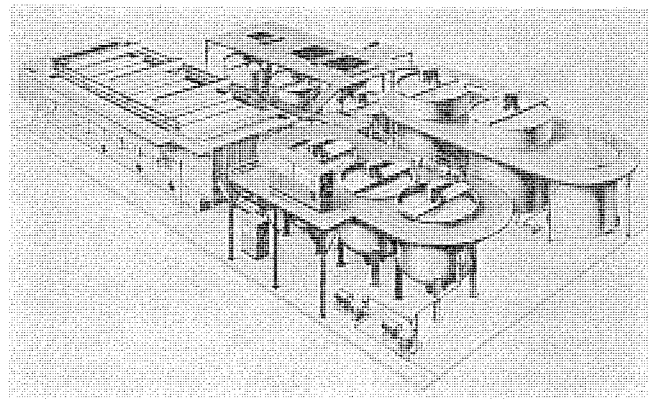


図 12. 3,000 m³/d 電気浮上処理装置 (DF-150 形) の設置例

表 4. 電気浮上処理装置 (DF-150 形) の基本仕様

| | |
|-------------------|----------------------|
| 処 理 水 量 | 150 m³/h 3,000 m³/d |
| 浮上ガス発生直流電源容量 | 最大 3,000 A |
| 電 気 浮 上 装 置 | DF-150 形 1 式 |
| pH 調 整 槽 | 12 m³ No. 1 1 台 |
| | 12 m³ No. 2 1 台 |
| フ レ キ ュ レ ー タ | 12 m³ 1 台 |
| 塩 酸 タ ン ク | 15 m³ 1 台 |
| 高 分 子 溶 解 槽 | 25 m³ 2 台 |
| 食 塩 溶 解 槽 | 6 m³ 2 台 |
| か せ い ソ ー ダ 溶 解 槽 | 6 m³ 1 台 |
| ボ ン ブ | 1 式 |
| 攪 拌 機 | |
| 計 装 | 1 式 |
| 集 中 操 作 盤 | |
| プ ラ ン ト 床 面 積 | 12 m × 38 m = 456 m² |

6. 水溶性電極による電解特性

6.1 電解ガス気泡の大きさ

電解ガス気泡の大きさは、電極面に析出した気泡が電極面に付着しようとする付着力と、電極面から分離浮上しようとする浮上力によって決まり、気泡の大きさは一般に

$$\text{H}_2 \text{ ガス} \quad 10 \sim 20 \mu$$

$$\text{O}_2 \text{ ガス} \quad 20 \sim 30 \mu$$

とされている。被処理水の温度が高い場合でも電解ガス気泡の大きさはあまり変わらず一定であるため、被処理水の処理効果は安定し良好な処理水をうることができる。

6.2 電解ガス発生量

不溶性電極を用いた電解において発生するガス量は

$$\text{陽極側 (0°C)} \quad \text{O}_2 \text{ ガス} \quad 3.5 \text{ cc/A} \cdot \text{分}$$

$$\text{陰極側 (0°C)} \quad \text{H}_2 \text{ ガス} \quad 6.95 \text{ cc/A} \cdot \text{分}$$

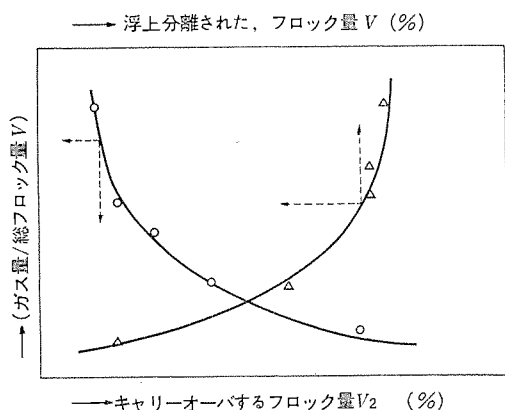
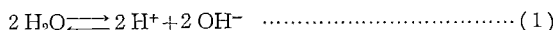


図 13. 気泡のフロク除去に与える効果

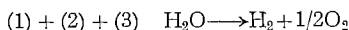
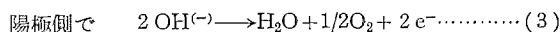
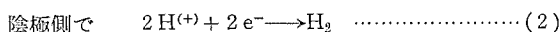
となり、電解電流 A を調整するだけで容易に電解浮上ガスを制御することができる。

6.3 電解印加電圧

水は式 (1) のように解離している。



これを不溶性電極によって電解した場合



$$\Delta G = -nFE \quad n: \text{反応電子数}$$

$$E: \text{理論分解電圧}$$

$$F: \text{Faraday 常数}$$

となり理論分解電圧 E は

$$E = 1.2 \text{ V}$$

となる。理論的にはこのように非常に少ない分解電圧で H_2 、 O_2 ガスを発生させる。しかし、実際の被処理水においては比抵抗が大きく、また濃度分極の生成、適正な電極間げき (隙) の保持、配線抵抗等の影響によって 5~15 V の槽電圧を印加する必要がある。

6.4 浮上ガス量と処理性能

「前段処理で生成させたフロクにガス気泡を付着させて被処理水中からフロクを分離する」という固液分離の基本原理解は電気浮上処理法においても、加圧浮上処理法においても同様のことである。しかし、処理水中にキャリアオーバーする微フロクの量はガス量に大きな影響を受ける。図 13. に示すようにキャリアオーバーするフロク量 V_2 と、浮上分離されるフロク量 V_1 の関係は総フロク量 V にたいするガス量の比によってきまる。

電気浮上処理法の場合、このガス量は、前項で記述したように、電流操作だけによって容易に、かつ、多量に得ることができるので、キャリアオーバーする微フロク量 V_2 は極少にすることができるため良好な処理結果を得ることができる。

6.5 気泡の浮上速度に与える水温の影響

電解ガス気泡の浮上速度はストークスの式にしたがい、ガス気泡径に比例して増加する。気泡の浮上速度が大きいと言うことは被処理水中で攪拌作用をもたらし、生長したフロクは破壊され微フロクとなる。また、気泡とフロクの付着会合が行われにくく、キャリアオーバーする微フロクが増加し処理水質は著しく悪くなる。

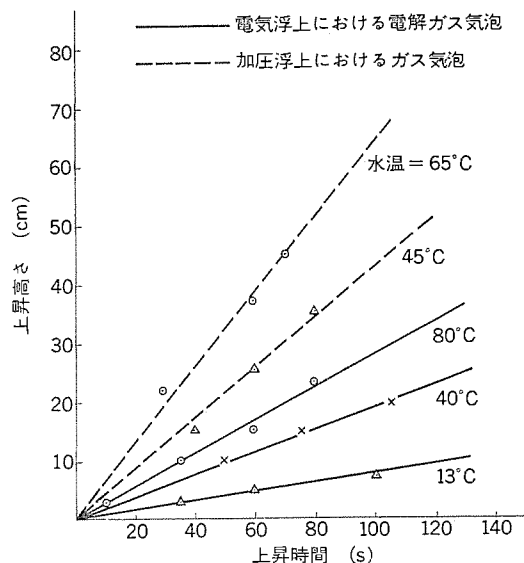


図 14. 微細気泡の上昇速度

図 14. に微細ガス気泡の浮上速さに与える被処理水温の影響を示す。実線が電気浮上処理における気泡の浮上速さを示し、加圧浮上の場合を破線で示す。加圧浮上法の場合、加圧水から析出した気泡が温度の高い被処理水に急激にさらされるため、気泡は膨脹し大きな浮上速さで上昇するが、電気浮上法における気泡の大きさは、気泡が電極面に対する付着力とはく (剝) 離浮上力だけによって決まるため、水温にはほとんど影響されず気泡の浮上速さは一定し被処理水にたいする攪拌作用もなく、フロクと気泡の会合が安定し非常に良好な処理水を得ることができる。水産加工排水を熱変性凝集処理した場合の排水の温度は 80°C 以上あるため、電気浮上法によるフロクの浮分離処理が最も好ましい。

7. む す び

電気浮上処理法の水産加工排水処理への適用は昨今の公害問題に端を発して適用したものであるが、電気浮上法による排水処理が従来の加圧浮上法や凝集沈殿法に比べ、優れていることが各界から認められ、当社でも多数の納入実績をあげることができた。

水産加工排水の電気浮上処理法は、排水の処理効果が優れているばかりでなく蛋白質の回収にも有効な手段であるが、処理水質として一般水質基準を満足するためには本法単独で十分でない場合が多い。このような場合、後段処理技術として生物処理、活性炭吸着処理等吸着処理技術との組合せ処理が必要である。

特に一般水質基準を満足するための問題となる汚濁成分は $\text{I}+\text{K}$ 成分が主であると考えられる。

最後に本稿が排水処理装置の選択に何らかの役に立てば幸いである。

参 考 文 献

- (1) 土屋：水産化学，恒社厚生閣
- (2) 増田，石橋，坂田：佐賀県工試報
- (3) 大森：アクリル酸とそのポリマー (1)，昭光堂

入換用DE11形液体式ディーゼル機関車用自動操縦装置

寺戸 浩二*・永瀬和彦*・六藤孝雄**・森原健司**・島田友二**

1. ま え が き

国鉄では、貨物輸送近代化の一環として、全国貨物操車場網の整備、及び貨物操車場作業の自動化を進めているが、その一つとして、今回、新たに武蔵野操車場が建設され、貨物列車分解・組成を自動処理する新しいシステムを開発した。

この操車場の入換機として使用される SLC (Shunting Locomotive wireless remote Control) 付 DE 11 形ディーゼル機関車は、新しい自動操縦装置 (ATO) をとう載し、貨車組成順序や散転状況を照査しつつ無線で伝送される地上基地局からの最適な走行速度・走行距離等の指令に従って自動運転する機能を有している。

SLC は、我が国での実用化第 1 号機として昭和 49 年 5 月から武蔵野操車場一部開業に伴って入換作業に使用されてきたが、地上側との協調性の向上、貨車分解処理両数向上等の要求に答え、今までの営業線でのデータを基に新方式の高性能入換機関車用 ATO の開発を完了した。ここでは、新方式 ATO の開発経緯・制御概要・構成・現車試験結果等について述べる。

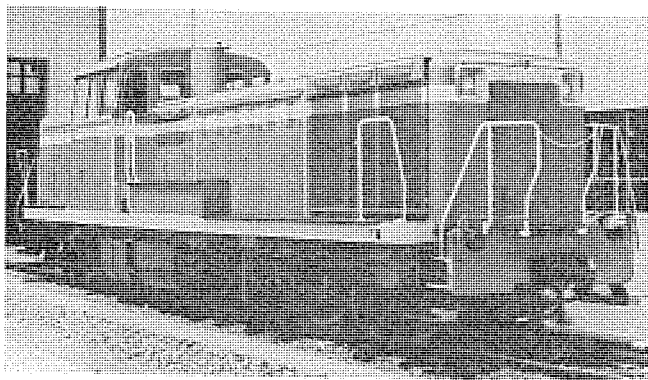


図 1. ATO とう載の DE 11 形ディーゼル機関車

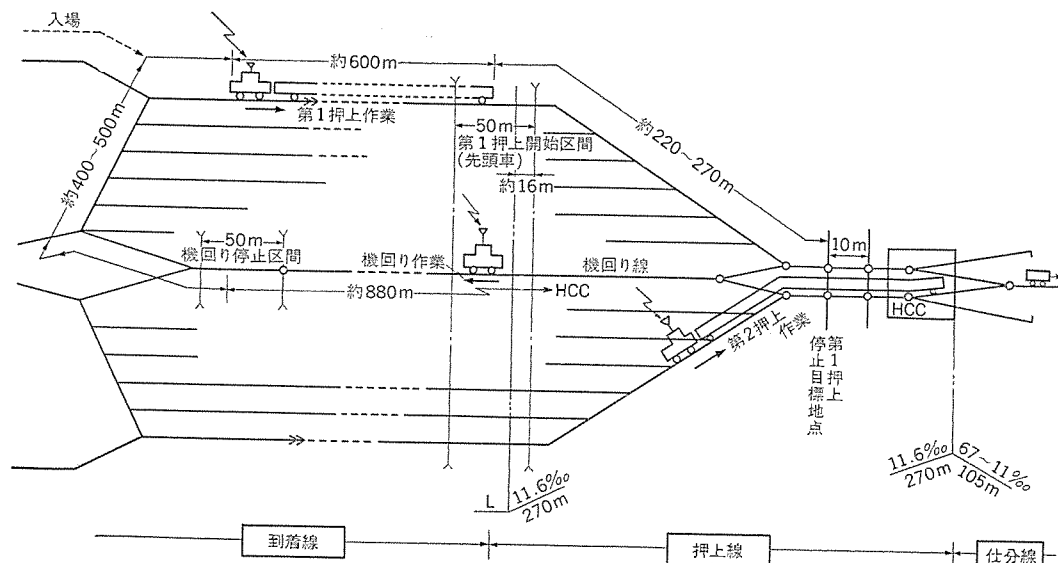


図 2. 武蔵野 ハンパード 簡略平面図

2. 入換機関車の自動操縦システム (SLC)

SLC は、従来、人手によって行われていたハンパでの貨物列車の押上げ、あるいは S 形矢羽根線での突放し制御などの入換作業を自動化したものであるが、今回の開発の特長は、単に自動化するにとどまらず、押上線での定速追従精度に見られるように、人間の操作では到底制御できない領域を実用機として可能にすることにあった。武蔵野操車場では、SLC によって下記の作業を行うことができるが、その作業概要を図 2. に示す。

(1) 第 1 押上作業 (到着列車転送制御)

ハンパ (押上線) で車両を散転中、次の散転車両を他の入換機でハンパ付近に接近待機させる距離転送制御であり、車両散転作業の間合いを短縮してハンパ作業の使用効率を高める。

(2) 第 2 押上作業 (定速運転制御)

ハンパでの押上速度を分解貨車の行先番線及び両数に応じて最適速度に制御する定速運転制御である。

(3) 機回り作業 (距離転送制御)

第 2 押上作業終了後、押上機関車を次の散転車両付近まで退行させる距離転送制御であり、車両散転作業の間合いを短縮してハンパ作業の使用効率を高める。

(4) S 形矢羽根作業 (突放し制御及び距離転送制御)

一定速度まで加速し、その速度に達すれば、機関車に常用最大ブレーキを掛け、分解貨車だけを自由走行させて主に駅別分解組成作業を行う。また、突放し作業区間がなくなれば、一定距離退行転送制御も行つて突放し間合いを最適にし、分解作業時間を短縮する。

3. 新形 SLC の開発経緯及び開発項目

昭和 49 年 5 月武蔵野操車場一部開業に伴い、SLC 1 号機が入換機

として投入されて所期の目的を達成したが、将来の操車場網の整備などに伴う貨車分解処理両数を増加するときに現有の SLC の性能そのものが、操車場の貨車分解処理能力を決定づけることが分かった。そのため、今までの営業線でのデータを基に ATO と機関車及び地上側との協調性、貨車分解処理能力等を改めて見直し、今後の量産機を目指して新しい SLC の開発に着手した。なお、今回の開発項目と内容とは、下記のとおりである。

3.1 貨車分解処理能力の向上

処理能力を向上させることは、ハンプ押上時の押上速度を高めることにあるが、これは、散転貨車間の分解時限の短縮となり、貨車間の再結合防止、ポイント切替時間の確保などより、押上速度の定速追従精度の向上を必要とする。ちなみに、1号機の追従精度は、目標速度1～5 km/hに対して $\pm 0.3 \sim 0.7$ km/hであったが、今回開発するSLCの追従精度は目標速度1～5 km/hに対して ± 0.2 km/hと厳しい精度が要望された。これに対してシミュレーション手法などによって新しい制御方式の開発を始め、下記のような対策を併せて行った。

- (1) 機関車エンジンノッチ数を14→27ノッチに増した。
- (2) 軽荷重時にトルクコンバータの速段切換制御を採用した。
- (3) 地上からの荷重情報の精度を上げるため、軸数換算方式を改めて換算重量方式による荷重情報とするとともに、車上での荷重情報補正を行った。
- (4) 台車中継弁を追設してブレーキ応答の改善を図った。等々

3.2 押上能力の向上

最大押上荷重を1,000 tから1,300 tに向上させるに伴い、始動困難・空転等を防ぐために下記の対策を行った。

- (1) 約5 tの死重をとう載し、機関車整備重量を75 tとした。
- (2) 粘着限界に沿って始動するように各ノッチの進段速度プログラムを組んだ。なお、プログラムは、レールの乾湿状態、コンパターメカ特性差、車輪径による補正を行った。
- (3) 始動困難時の強制進段制御を採用するとともに、増粘着のために強制散砂制御を併せて行った。

3.3 その他

- (1) 伝送部の応答性の向上
- (2) 定点停止精度の向上
- (3) フェイルセーフ機能の充実

4. ATO の構成及び機能

4.1 構成

ATO装置の構成及び外観を図3.及び図4.に示した。

4.2 機能

- (1) 定速運転制御(伝送時の定速運転及びハンプでの押上げ)
- 次に示す、14種類の速度での定速運転が可能である。

〔第2押上時指令〕 1.0, 1.4, 2.3, 2.7, 3.2, 4.0, 5.0 (km/h)

〔高速指令〕 2.5, 5, 10, 15, 20, 25, 35 (km/h)

- (2) 定距離転送(定点停止)制御(操車場内での移動)

現地点より起算して次の7種類の距離の移動が可能である。

10, 20, 40, 60, 70, 200, 726 (m)

- (3) 突放し制御

平面ヤードでの貨物列車の分解・組成作業で、武蔵野操車場では8 km/hまで加速し、常用最大ブレーキを指令している。

- (4) 車内信号表示

武蔵野操車場では、ATOによる走行制御機能が故障したとき、手動扱いによって操車場作業を円滑に行うことができるように、入換合図器を車上に設備し、その合図器の制御をYACS (Yard Automatic Control System) からATOを経由して行っている。

- (5) その他

警笛制御、力行及びブレーキ音声制御、単打ベル制御、空転・滑走再粘着制御、制御動作モニタ、トルクコンバータ速段切換強制介入制御、逆転器制御、砂まき制御、転送防止制御、目標距離・速度表示、車輪

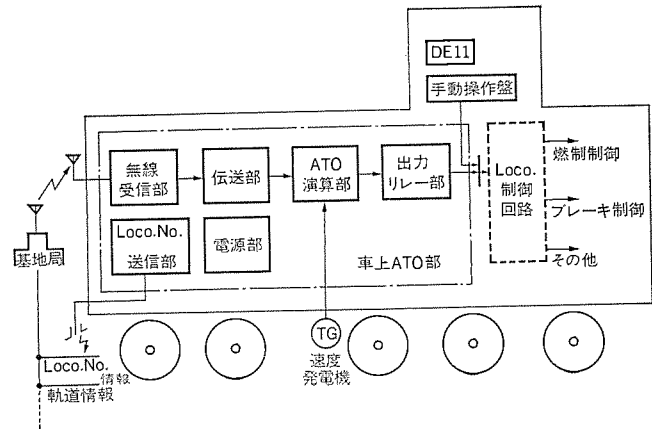
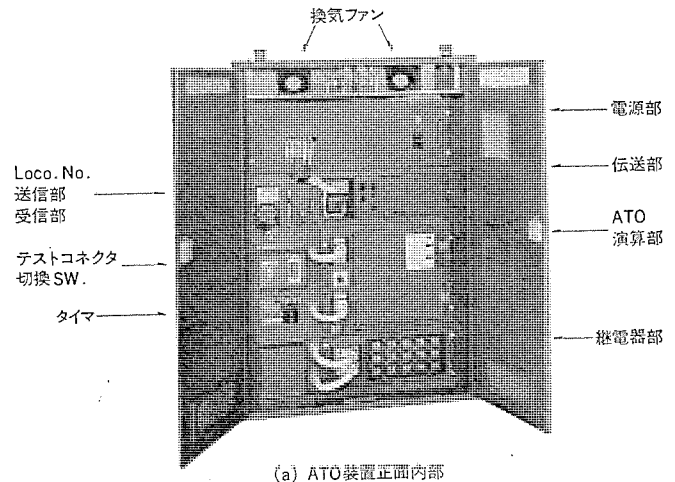
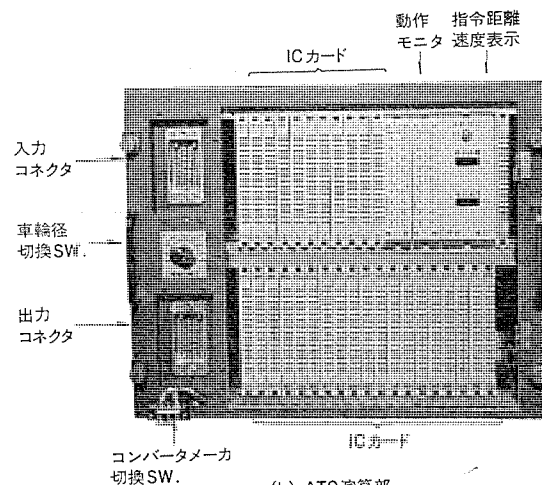


図3. SLCシステムブロック図



(a) ATO装置正面内部



(b) ATO装置外観

図4. ATO装置外観図

径補正、論理故障及びTG断線検出等の機能を有する。

5. ATOの演算及び制御方式

演算はすべて連続周波数デジタル演算方式を採用して安定な制御を行っている。演算素子は、すべてデジタルICを使用し、小形軽量化・無調整化・高信頼度化を図っている。図5.に演算部ブロック図を示す。

5.1 起動加速制御

基地局からの力行指令によって警笛を鳴らして始動を開始するが、始動時の制御には、時限進段方式を採用している。特に、制御上に注意を要することは、11.6%のこう配をもつハンプ押上線での始動

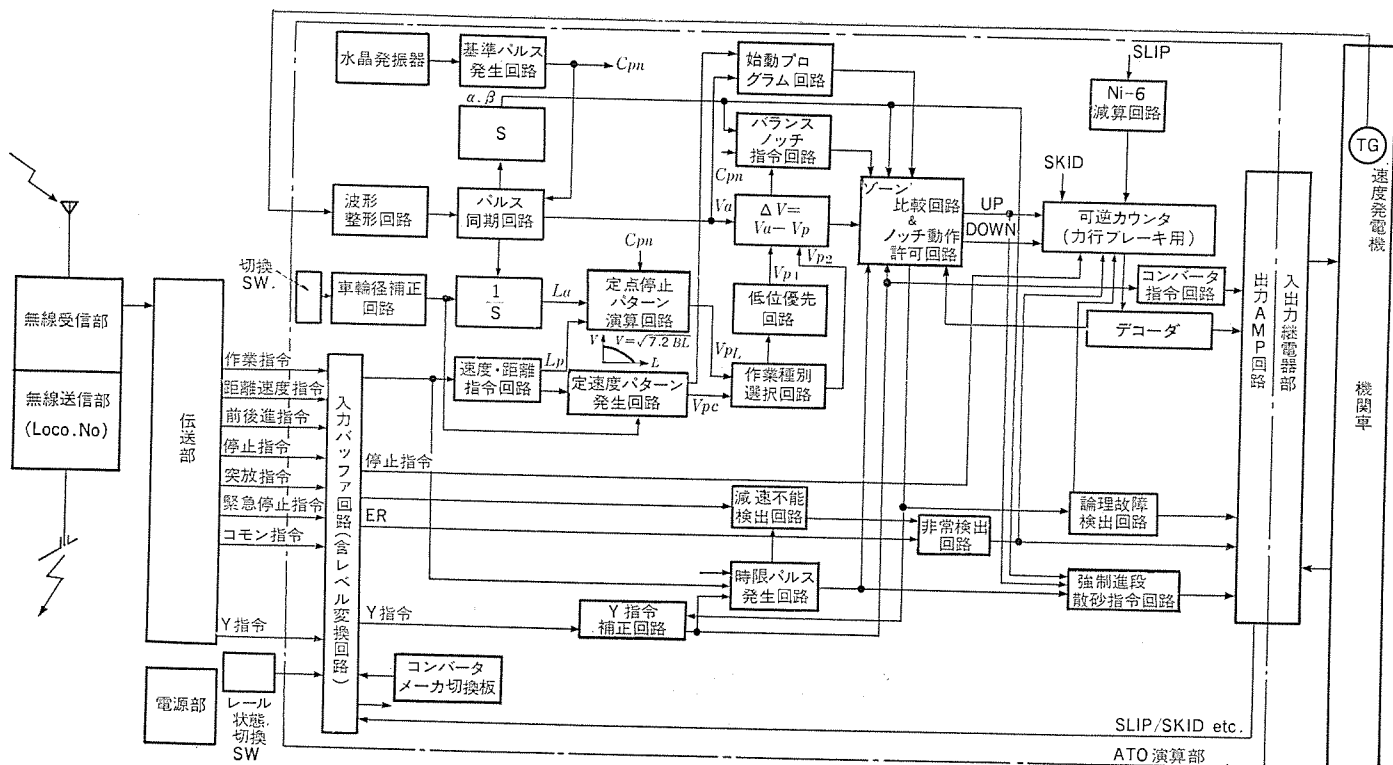


図 5. ATO演算部ブロック図

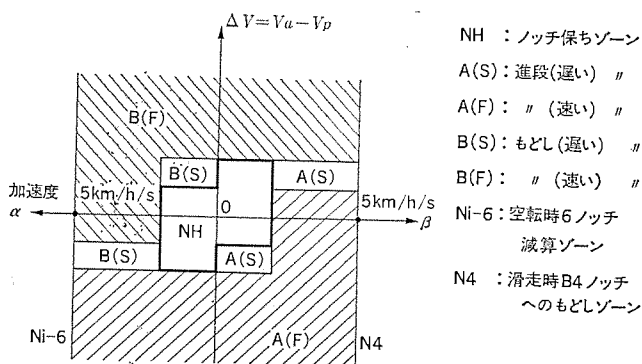


図 6. 定速運転制御パターン (定常時)

時の退行及び空転対策である。

第2押上作業は、この配線上での始動であるので、停止時には転動防止ブレーキを作動させておき、力行指令と同時に、退行防止上でのストールノッチである5～6ノッチまで短時間で進段させるとともに、転動防止ブレーキの解除を遅らせて退行を防いでいる。また、加速ノッチについては、あらかじめ決められた粘着限界内で加速するように進段速度プログラム制御を行っている。なお、始動困難時には、強制進段方式によって進段速度プログラムからの進段指令との先入優先によって始動させているが、強制進段時には空転の可能性があるため、あらかじめ等距離間隔で砂まきし、増粘着制御を行う。

5.2 定速度運転制御

図 6. は、定常状態での制御パターンで、指令速度 V_p と車両速度 V_a との偏差及び加速度が零に収れん(斂)するように燃料弁及びブレーキを制御する。なお、燃料ノッチは切～27ノッチ、ブレーキノッチは0～15ノッチである。ノッチの進段・降段時及ノッチ保ちゾーンは、地上からの荷重情報(Y指令という)によって決めている。しかし、荷重情報は、従来より良くなったものの、換算重量を基礎にして計算しているので誤差が大きい。このため、速度追従性、及びノッチの制御状態によって車上で補正している。一方、ハンプ押上線での定

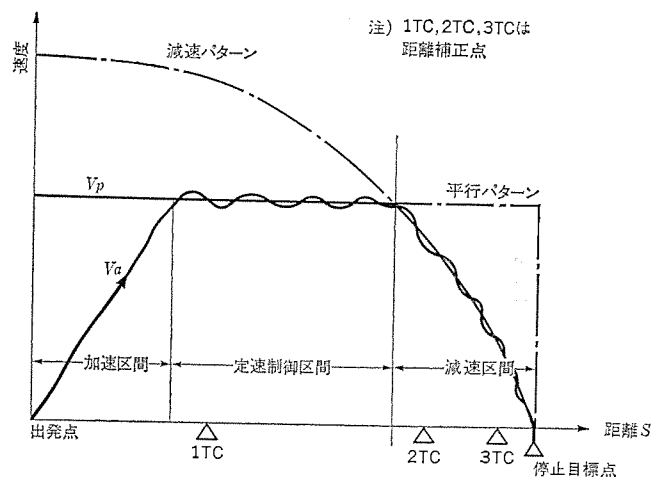


図 7. 定点停止制御方式

速制御は、散転状況によって時々刻々指令速度が変化するため、その指令速度までの過渡状態では、制御ゲインを上げて定常制御パターンへの移行を早めるとともに、移行時の加減速度をもとにしてパルスノッチを演算し、そのノッチへ強制設定して目標速度への追従時間の短縮を行っている。

5.3 定点停止制御

減速パターン V は、残走距離 S (m) の関数として与えられ

$$V = \sqrt{7.2 \beta S} \text{ (km/h)} \dots\dots (\beta: \text{減速度 km/h/s})$$

である。

走行距離は、速度発電機から入力されるので、減速パターンは連続的に演算される。この方式は、図 7. に示すように、距離指令によって決められた定速パターンと、前式で演算された減速パターンとの両方が指令されるが、低位優先回路によって低位パターンに基づいて列車は制御される。実際には減速パターンは15本出力され、すべての減速パターンが、停止点に収斂する可変ゲイン方式により、停止精度の向上を図っている。

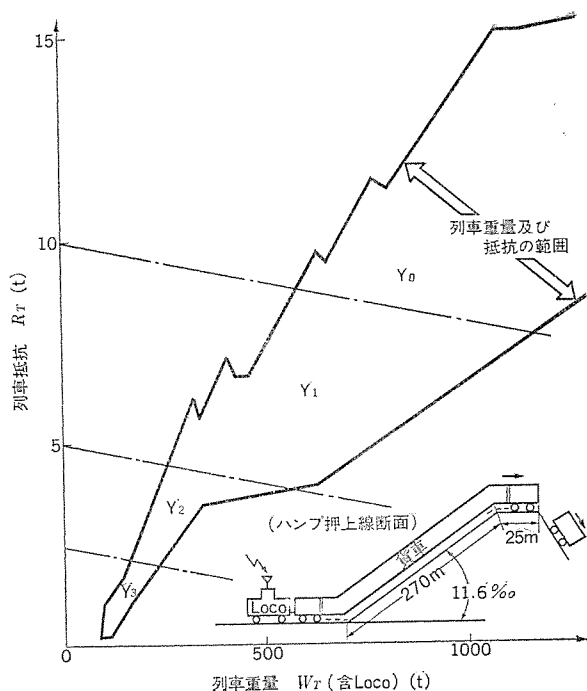


図 8. 列車重量及び列車抵抗の範囲

5.4 その他

(1) トルクコンバータ 速段制御

トルクコンバータは、効率を良くするため通常は、速度に応じて速段を1→2→3速と切換えているが、第2押上作業時軽荷重域の定速追従精度を向上するため、逆にあえて効率の悪い2・3速に強制投入し低加減速力を得る制御を行っている。これは、力行アイドルノッチでも4t近い過大なけん引力があり、軽荷重時に応答が悪く、ノッチ変化時のトルク変化量が過大なブレーキ制御を極力使用しないようにするためである。

(2) 荷重情報(Y指令)による制御

定速追従精度を向上させるには、正確な荷重(列車重量)及び列車抵抗を車上で知る必要がある。しかし、真の荷重を直接計測することは困難であるとともに列車重量及び抵抗は、貨車の種別、貨車の積・空、編成状態の違いにより図8.に示したように大幅に異なる。したがって今までは、1軸当たり荷重8tとして車軸数から列車重量のみを簡易算出していたが、今回は速度追従精度を更に高めるために換算重量に改めるとともに、列車抵抗を含めた式(1)で算出した所要引張り力情報Tを荷重情報として採用した。すなわち列車重量、列車抵抗を貨車の分解情報及び散転状況から地上基地局で計算し、荷重情報として車上ATOに入力し、これによりATOの制御定数を切換える。なお、荷重情報は列車重量及び抵抗の変化比がほぼ等しくなるようY₀~Y₃の4区分信号としてATOに与えられる。

$$\text{所要引張り力情報 } T = \alpha W_T + R_T \quad (1)$$

W_T : 列車重量(換算重量) (t)

α : 定数 (km/h/s)

R_T : 列車抵抗 (t)

6. シミュレーション結果

開発を進めるに当たり、荷重0~1,300tの範囲で定速追従精度±0.2 km/hを得ることが可能であるか。もし得られないとすれば、その要因は何か、という課題を解明する必要性が生じた。この問題では、緩衝器の影響、ブレーキ及び力行ノッチの応答の影響等、種々の条件

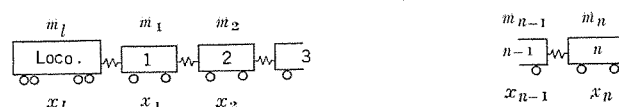


図 9. 貨物列車

についてシミュレーションを中心に検討を進めたが、その概要を以下に説明する。

6.1 貨物列車の過渡応答解析

貨物列車は、力行あるいはブレーキ等の制御を加えたときに過渡現象を生ずるが、このときに機関車の速度応答が問題になる。この過渡現象は、連結器遊間、機関車・貨車間及び貨車同志の緩衝器の非線形特性等により、その運動解析は非常に複雑なものになる。また、ハンパードのような場合には、こう配抵抗の影響も大きい。そこで、この現象をデジタル計算機によってシミュレートした。

図9.のように、機関車が、多数の貨車(n両)を連結している場合の運動方程式は、式(2)で表される。

$$\left. \begin{aligned} m_l \ddot{x}_l &= -R_l - k_{lc}(x_l - x_1) + F_l \\ m_1 \ddot{x}_1 &= -R_{c,1} - k_{cc}(x_1 - x_2) + k_{lc}(x_l - x_1) \\ m_2 \ddot{x}_2 &= -R_{c,2} - k_{cc}(x_2 - x_3) + k_{cc}(x_1 - x_2) \\ &\vdots \\ m_{n-1} \ddot{x}_{n-1} &= -R_{c,n-1} - k_{cc}(x_{n-1} - x_n) + k_{cc}(x_{n-2} - x_{n-1}) \\ m_n \ddot{x}_n &= -R_{c,n} + k_{cc}(x_{n-1} - x_n) \end{aligned} \right\} (2)$$

ここで、 m_l : 機関車の全質量 (t・s²/cm)

m_i : 第i両目の貨車の質量 (t・s²/cm)

x_l : 機関車の変位 (cm)

x_i : 第i両目の貨車への変位 (cm)

k_{lc} : 機関車・貨車間の緩衝器の総合特性 (t/cm)

k_{cc} : 貨車同志の緩衝器の総合特性 (t/cm)

F_l : 機関車の引張り力又はブレーキ力 (t)

R_l : 機関車のこう配及び走行抵抗 (t)

$R_{c,i}$: 第i両目の貨車のこう配及び走行抵抗 (t)

である。なお、列車のこう配及び走行抵抗は、下記の式を用いる。

(1) 列車速度が0~3 km/h のとき

$$R_l = (-1.518 V + 7.0 + R_g) W_l \times 10^{-3} \quad (t)$$

$$R_{c,i} = (-1.131 V + 5.0 + R_g) W_i \times 10^{-3} \quad (t)$$

(2) 列車速度が3 km/h 以上のとき

$$R_l = \{ (2.39 + 0.0165 V + R_g) W_l + 0.0445 V^2 \} \times 10^{-3} \quad (t)$$

$$R_{c,i} = (1.60 + 0.00077 V^2 + R_g) W_i \times 10^{-3} \quad (t)$$

ここに、 V : 列車速度 (km/h)

W_l : 機関車重量 (t)

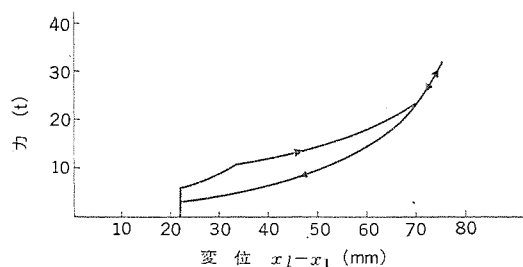
W_i : 第i両目の貨車重量 (t)

R_g : こう配抵抗 (kg/t)

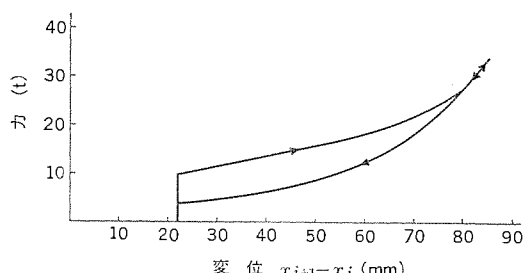
である。また、機関車と貨車間、及び貨車同志の緩衝器特性を図10.に示しておいた。

6.2 過渡応答シミュレーション結果

シミュレーションは、(1) 平たん線、(2) 上り10%こう配の二つの場合について行った。シミュレーション条件は、機関車75t、貨車20t/両で5両連結、及び連結器遊間が最大44mmある場合で、平たん線でのシミュレーション結果を図11.に示す。この図で、初めに機関車速度が直接的に上昇しているのは、連結器遊間があるためで、その後、全貨車を引き出してから(約1.27秒)振動しながら速度を増してゆくのが分かる。



(a) 機関車～貨車間の緩衝器特性



(b) 貨車同士の緩衝器特性

図 10. 緩衝器特性

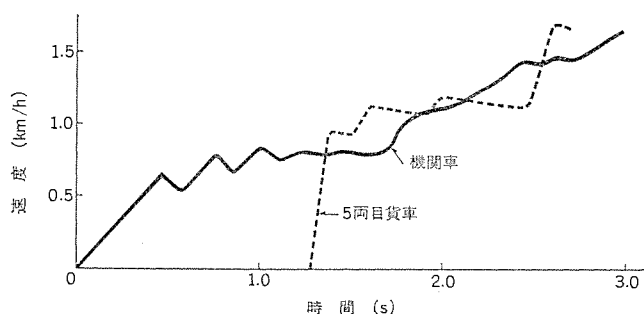


図 11. 平たん線におけるシミュレーション結果

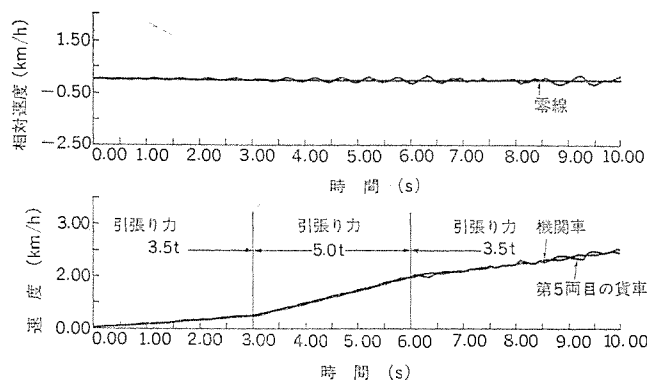


図 12. 上り 10% こう配におけるシミュレーション結果

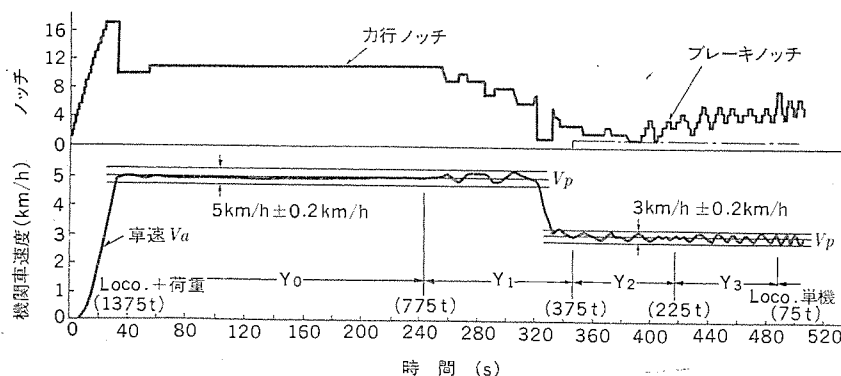


図 13. 定速度運転シミュレーション結果

一方、10%の上りこう配で、列車に停止状態でけん引力 3.5t、3 秒後に 5t、6 秒後に再び 3.5t を与えたときの機関車と 5 両目貨車との速度及び相対速度偏差をシミュレーションによって求めた。その結果を図 12. に示す。この図より、機関車速度は、わずかに振動しているものの、ほぼ線形的に変化し、5 両目貨車との相対速度偏差もわずかである。したがって、列車系を簡単な線形モデルで代表させることができる。

6.3 第2押上作業のシミュレーション結果

前述の結論から、武蔵野操車場の押上線は、11.6%の上りこう配であるので、列車系を簡単な線形モデルで記述し、種々の制御方式について検討を進めた。連結両数 26 両 (50 t/両)、こう配 11.6%の場合についてのシミュレーションの一例を、図 13. に示す。この例は、速度指令 5 km/h で始動し、320 秒後に速度指令を 3 km/h に変化させたときのものである。

7. 現車試験結果

現車試験は、国鉄武蔵野操車場で昭和 50 年 8 月と 12 月との 2 回にわたって営業運転ダイヤで行われ、極めて良好な結果を得た。

7.1 始動加速試験

データを基に、始動加速時の粘着限界による進段速度プログラムは、レール乾燥時の粘着係数を $\mu=0.23$ 、湿潤時を $\mu=0.18$ にしてプログラム化した結果、空転は、ほとんど見られなく効果を上げた。また、強制進段制御機能は、特定番線特定貨車がポイント曲線部で座屈現象を起こし、始動困難な場合などに効果を表した。強制進段時の散砂量を単位距離当たり一定にしたことから、増粘着効果が顕著であった。なお、図 14. に現車で空転発生状態を示した。

7.2 第1押上試験 (高速定速及び定速停止組合せ制御)

図 8. に示すような走行モードであり、距離指令は 726 m → 200 m → 70 m → 20 m が指令され、各軌道区間入口で計 3 回の距離修正が行われる。図 15. に転送時の試験結果を、図 16. に停止精度の現車試験結果を示すが、目標精度 ± 5 m に対して伝送遅れ 2 秒 \pm 1 秒の誤差を含み、全荷重域で ± 3 m 以内という好成績であった。

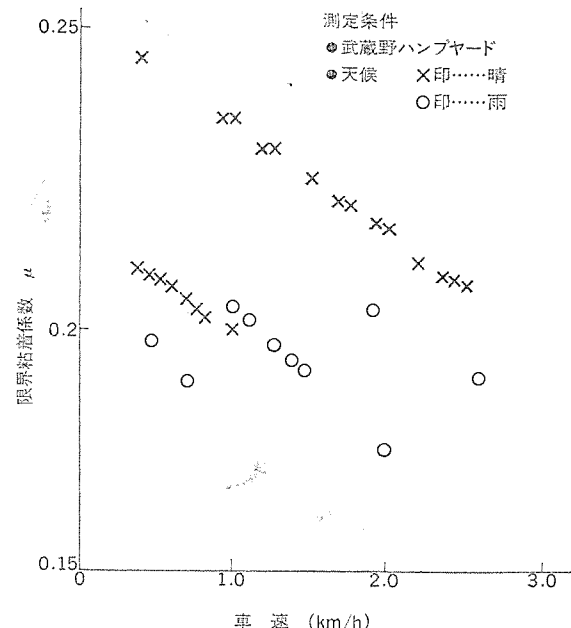


図 14. 現車試験による空転発生状態

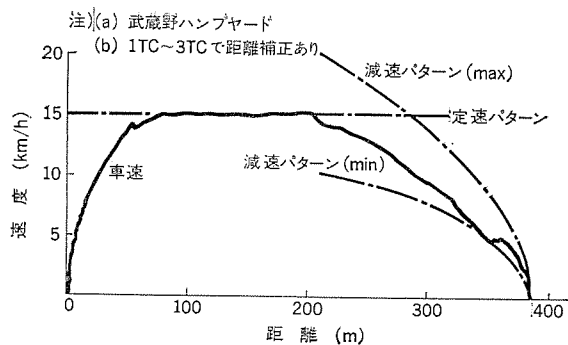


図 15. 第1押上時現車試験結果

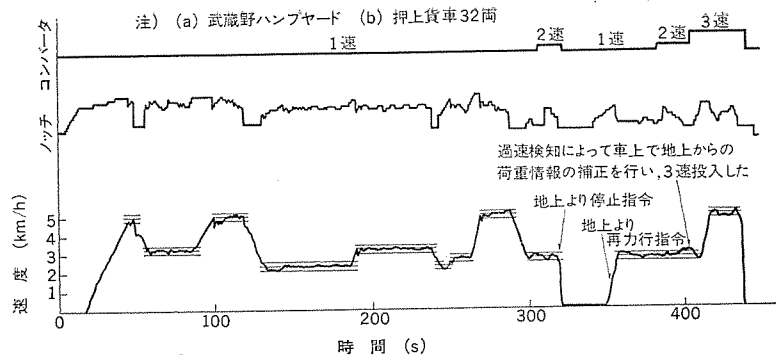


図 18. 第2押上時現車試験結果

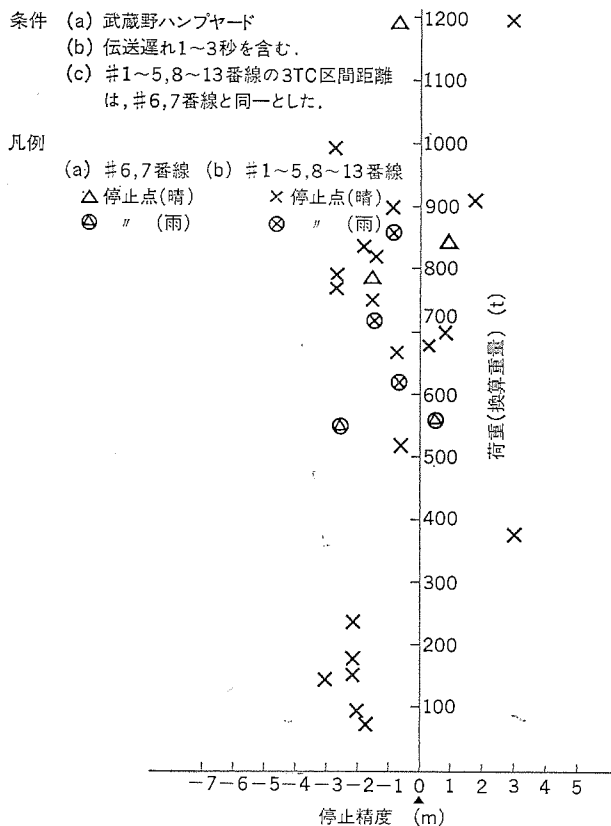


図 16. 第1押上停止精度現車試験結果

7.3 第2押上試験 (定速運転制御)

調整の過程において荷重情報区分、トルクコンバータ速段切換時の合成トルク・ブレーキ力等が計画どおりでなかったという問題もあったが、図 17. 及び図 18. に試験結果を示すように、全荷重域において定速追従精度 $\pm 0.2 \text{ km/h}$ という目標に対して極めて良好な結果を得ることができた。なお、速度指令変化時の追従加減速度も、仕様どおりに 0.2 km/h/s 以上の性能を確認した。

8. む す び

武蔵野操車場での SLC システムは、貨物輸送の重要拠点である操車場での貨車の散転分解作業を自動化するという、我が国最初の試みである。操車場全体を自動化する YACS システムとの結合に伴い、SLC の性能が操車場の処理能力を左右することから、ATO に高精度の速度制御仕様が生まれ、また実用機としての耐環境性・高信頼性が必要になり、性能改善と実用性との両面から技術的に問題を解決することになったが、昭和 49 年の暮れに設計に着手して以来、約 1 年という短期間にすべての仕様の十分に満足する ATO の開発を成功のうちに完了した。既納品もこの方式に置き換えられ、昭和 50 年 3 月からの全面開業を迎え、現在極めて好評裏に使用中である。今後、実用機としての長期にわたる性能確認が行なわれることを期待するところである。終わりにのぞみ、終始ご指導・ご協力をいただいた日本国有鉄道大宮工場、同じく武蔵野機関区、その他の関係各位の方々に厚くお礼申し上げる次第である。

(昭和 51-6-2 受付)

参 考 文 献

- (1) 永瀬, 山崎, 森原ほか: 鉄道におけるサイバネティクス利用国内シンポジウム第 11 回論文集 (423), 日本鉄道サイバネティクス協議会 (昭 49)
- (2) 永瀬, 森, 山崎, 森原ほか: 鉄道におけるサイバネティクス利用国内シンポジウム第 12 回論文集 (414), 日本鉄道サイバネティクス協議会 (昭 50)
- (3) 遊佐, 岩村ほか: 国鉄郡山操車場自動化システム, 三菱電機技報, 41, 9 (昭 42)

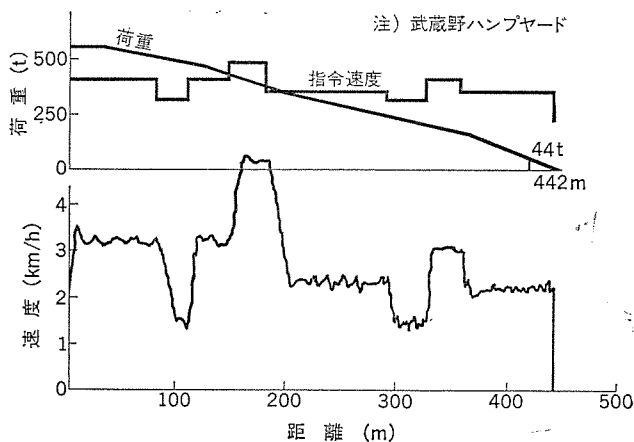


図 17. 第2押上時現車試験結果

コミュニケーションプロセッサ・タイプ2

松永 宏*・松田主税*・中塚茂雄*・田中雄三*

1. ま え が き

計算機網における通信処理装置 (Communication Processor 以後 CP と略称する) には種々のものがあり、網の構成、転送情報の形態、伝送経路、ホスト計算機又は端末装置とのインタフェース方式等によって使い分けられる。

これらの CP が使われるシステムのいかにかわらず、CP に対して共通的に求められる特性は、ソフトウェアとハードウェア両面における信頼性、拡張性、柔軟性、高速度高能率、及び保守性である。更に CP の制御方式やハードウェアのできる限り多くの部分が標準化されている事が望ましい。

そのような CP を実現するには、現在、標準的な基本システムとして供給され、装置としても安定成熟している汎用ミニコンをベースとして構成するのが適切である。その際、次の事項が問題となる。

- (1) 汎用ミニコンに内蔵される計算機網制御プログラムのあるべき姿。
- (2) CP とホスト計算機とのインタフェース、CP と網の間の、インタフェース、CP と端末装置群とのインタフェース、CP 相互間のインタフェースの、ソフトウェアとハードウェア両面から考えてあるべき姿。
- (3) また、それによって、CP がどの範囲のサービス特性、性能を維持できるか。

元来、計算機網は、資源 (装置、プログラム、データ) 共用を目的とし、かつ網構成の変更とシステムの成長が容易である事を前提としている。したがって、網のノードに位置する CP の特性と、CP と他の網構成要素間のインタフェース設定は必然的に重要な問題となる。本論では、これらの課題を考察し、試作開発した CP の概要と特性を述べる。

2. CP の位置付けと役割

計算機網の模式的な構成を図 1. に示す。CP の利用形態には、ホスト計算機に代わってデータ通信に関するすべての処理を担うフロントエンドプロセッサ (FEP)、多数個の端末群を集中して制御してデータ集配信を行うリモートコンセントレータ (RC)、計算機網のノードに置かれてデータ転送の際の経路決定とフロー制御と網管理などを行うノードプロセッサ (NP) がある。

CP の役割は中継機能と終端機能と物理的装置制御機能の三つに類別される。中継機能は、伝送電文に付いているあて先情報を見てチャンネル又は回線経由の電文転送を行う事が主課題である。終端機能は、その CP にチャンネル経由で直接に接続されている主計算機と端末装置を制御するために、電文のフォーマットを整え (編集、分割)、回線側のデータ伝送速度と主計算機又は端末装置側のデータ利用速度の間の整合をとる事が主課題である。物理的装置制御機能は、回線又は端末装置の始動・停止と入出力制御が主課題である。

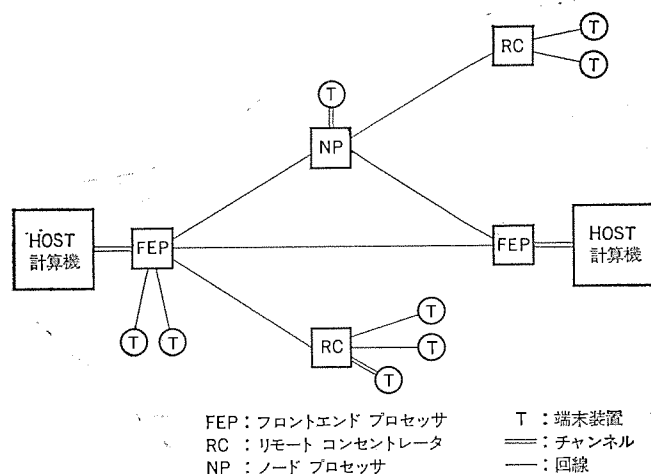


図 1. 電子計算機網

3. CP に要請される特性

前述の利用形態のいかにかわらず、CP には以下に列記する特性が要求される。

- (1) 柔軟性、すなわち、網の構成、端末装置の構成に変更があった際に、ハードウェアやプログラムの改造なしに容易に対応できる事。例えば回線の種別、伝送速度、同期方式、使用コード、伝送制御手順等が、システムパラメータとして設定できる事。
- (2) 実時間処理向きの入出力制御方式、すなわち、データ通信向きの入出力制御が可能である事。特に割込制御が高速で容易である事。
- (3) 文字系列の処理に最適な命令の集合がある事。
- (4) 主記憶装置の容量が十分大きく、大容量外部記憶装置を付加できる事。
- (5) か (稼) 動率が高く、冗長性を持つシステム構成が可能な事。例えば 2 重系構成とその切換機能を備えている事。
- (6) 実時間処理用のオペレーティングシステムを有し、多数の競合する優先権構造の処理を適切にさばく事。
- (7) パッケージ化された通信制御用ソフトウェアを有し、回線制御、端末制御、網管理、バッファ管理、待行列管理を行う事。
- (8) 回線監視、オンラインテスト、異常事態からの回復機能、及びトラヒックと誤りの統計を採る機能を有する事。

1 章で述べたように、CP は汎用ミニコンをベースにして構成するのが適当である。我々は汎用ミニコンに、上記 (1) ~ (8) の要請を満たすように通信制御装置、計算機結合装置等を接続し、かつプログラム開発を行う必要がある。

4. CP タイプ 1, タイプ 2, タイプ 3

2 章で記述した CP の利用形態と、3 章で記述した CP に対する要請を満たす目的で当社では CP タイプ 1, 2, 3 が開発されている。3 種の CP の利用形態との対応は図 2. に示すようになる。ただしこの対応は絶対的なものではない。表 1. に 3 種の CP の特性を示す。

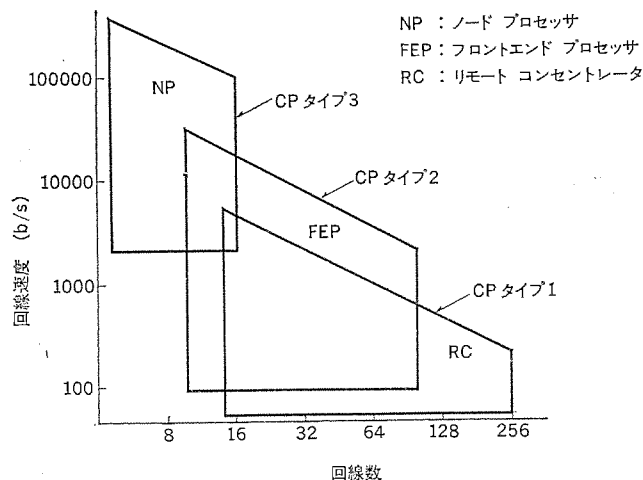


図 2. CP タイプ 1, 2, 3 の適用分野

表 1. CP タイプ 1, 2, 3 の特性一覧

| 項 目 | CP タイプ 1 | CP タイプ 2 | CP タイプ 3 | 単位, 備考 |
|--------|---|---|----------------------------|----------------|
| 収容回線数 | 256 | 96 | 16 | 回線 |
| 全転送速度 | 5 | 20 | 100 | K-Byte/s |
| 収容回線種別 | 公衆通信回線 特定通信回線 | 同 左 | 特定通信回線 | |
| 伝送速度 | 50~9,600 | 50~48,000 | 2,400~240,000 | bit/s |
| モード | 調歩式 同期式 | 同 左 | | |
| 制御手順 | ベーシックポーリング JIS-ベーシック BSC | ベーシックポーリング JIS-ベーシック BSC HDLC | 同期式 HDLC | |
| 利用形態 | フロントエンドプロセッサ リモートコンセントレータ | フロントエンドプロセッサ リモートコンセントレータ IMP/TIP | フロントエンドプロセッサ IMP/TIP | |
| 記憶容量 | 256 | 同 左 | 同 左 | K-Byte/s |
| 機能 | パリティチェック コード変換 制御文字の識別 ブロックチェック データリンク制御 エラーリカバリ バッファの動的割付 メッセージブロックの編集 チェックポイント/リスト 診断 統計データ収集 | MPX-CCU NCP | なし なし MPX-CCU NCP | (水平パリティ巡回冗長符号) |

BSC : Binary Synchronous Communication
HDLC : High-level Data Link Control

CP タイプ 1 と タイプ 2 は既に開発完了, CP タイプ 3 は現在開発中である。

以下の章では, CP タイプ 2 の構成を説明し, 3 章で記述した要請をどのようにして実現しているかについて述べる。

5. CP タイプ 2 の構成

CP タイプ 2 (以後 CP 2 と略称する) は, 汎用ミニコン《MELCOM》70 (以後 M 70 と略称する) と多重通信制御装置 (以後 MPX-CCU と略称する) とから構成される。図 4. にその構成図を, 図 5. に機能ブロック図を, 図 6. に M 70 内蔵の網制御プログラム (Network Control Program, 以後 NCP と略称する) の構成図を示す。

5.1 機能分担

図 5. 機能ブロック図に示すとおり, CP 2 は M 70 と MPX-CCU とから構成される。おのおのが分担する機能は表 2. に示すとおりであり, 一言にしていえば「M 70 内蔵の NCP はメッセージ又は伝送ブロック単位 of データを扱い, MPX-CCU は文字単位以下のデータを

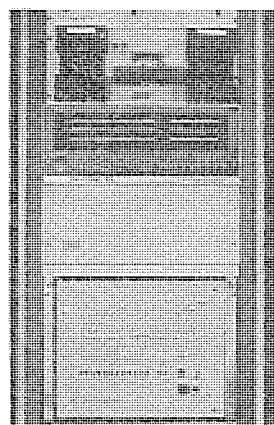


図 3. CP タイプ 2

上段 通信制御処理装置 (MELCOM 70)
中段 MELCOM 70 増設 シャーシ
下段 多重通信制御装置 (試作機)

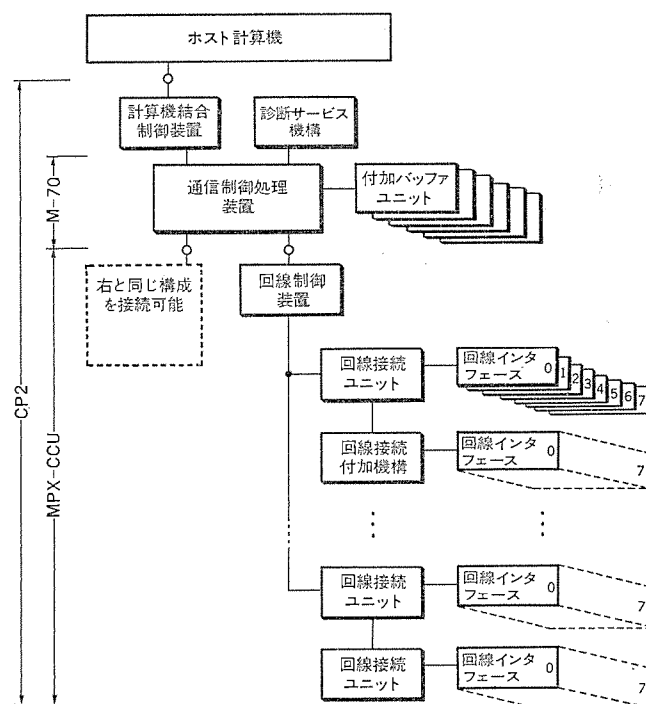
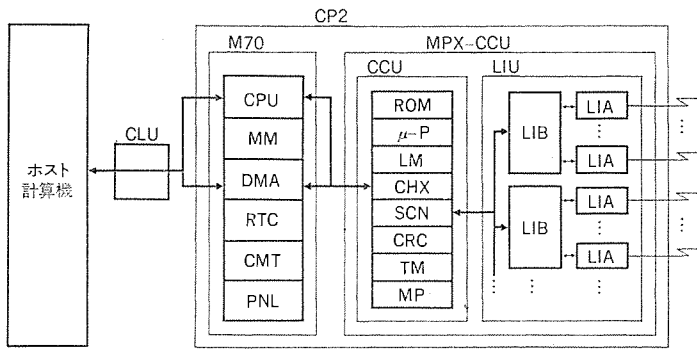


図 4. CP タイプ 2 のハードウェア構成

表 2. 機能分担

| 構成要素 | 分 担 機 能 |
|-------------|---|
| M 70 内の NCP | <ol style="list-style-type: none"> 1. 回線種別, 使用コード, 伝送制御手順の種別を初期設定 2. ホスト計算機と CP 2 の間のデータ転送制御 3. メッセージブロックの編集 4. バッファ領域の管理 5. 伝送制御手順を実行 6. エラー リカバリ 7. チェックポイント/リスタート 8. MPX-CCU, 回線, 端末装置の診断 9. トラフィック, エラー等の統計データ収集 |
| MPX-CCU | <ol style="list-style-type: none"> 1. マルチプレクサ チャンネルの機能 データ多重化, コマンド チェーン, データ チェーン, 割込制御 2. 送・受信データの転送 (DMA 経由) 3. 伝送制御文字の検出 過監視シーケンスの抽出 4. エラー チェック (VRC, LRC, CRC) 5. 直・並列変換 6. HDLC 回線収容機能 '0' 送入・除去, フラグとアポートとアイドルの検出 7. レベル変換 8. モデム制御, 監視 |



CLU : 計算機結合制御装置
 CP2 : 通信処理装置モデル 2
 M70 : ミニコン (MELCOM) 70
 CPU : 中央処理装置
 MM : メインメモリ
 DMA : ダイレクトメモリアクセス・チャンネル
 RTC : リアルタイムクロック
 CMT : カセット磁気テープ装置
 PNL : メンテナンスパネル
 MPX-CCU : 多重通信制御装置
 CCU : 通信制御装置
 ROM : リードオンリメモリ
 μ-P : マイクロプロセッサ
 LM : ローカルメモリ
 CHX : チャンネルアダプタ
 SCN : 回線走査部
 CRC : CRC計算回路
 TM : タイマ
 MP : メンテナンスパネル
 LIU : 回線接続装置
 LIB : 回線インタフェースベース
 LIA : 回線インタフェースアダプタ

図 5. CP タイプ 2 の機能ブロック図

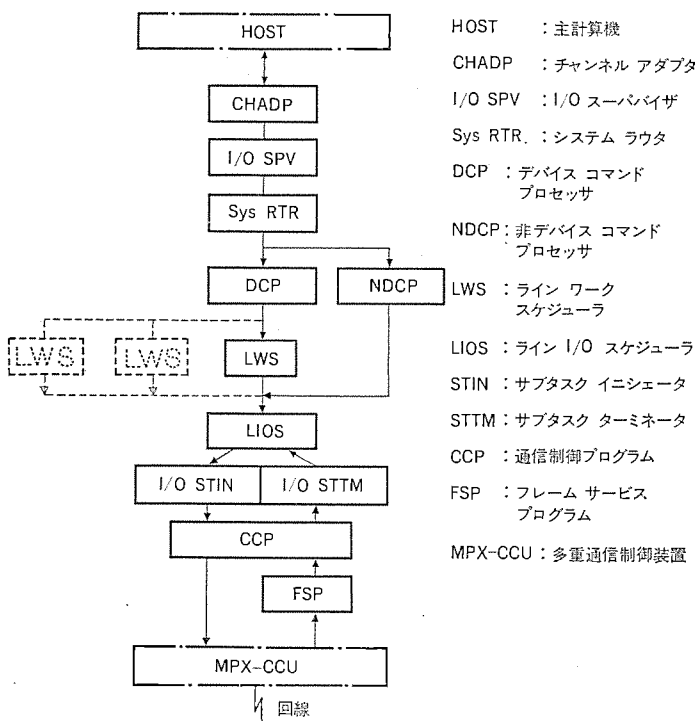


図 6. 網制御プログラム (NCP)

扱う」である。

5.2 CP 2 の装置構成

CP 2 を構成する時のベースとなっている M 70 で特筆すべき点は、主記憶装置 (MM) の容量が最大 256 キロバイトまで増設可能な点と、割込情報を MPX-CCU が M 70 主記憶装置内の特定領域に直接書込んで割込情報待行列を作る点と、計算機結合制御装置 (CLU) を経由してホスト計算機と結合されている点である。他は汎用のミニコンの容相をそのまま持っている。

MPX-CCU は 2 個の機能ブロックに大別される。すなわち通信制御装置 (CCU) と回線接続装置 (LIU) である。CCU はすべての回線を周期的に走査して表 2. で記述する機能を全回線に対し共通に

提供する。LIU は最大 96 回線までの回線インタフェースアダプタ (LIA) を収容し、16 回線単位で増減できる。

CCU の制御方式には、ワイヤードロジックに代えてマイクロプログラム制御方式を採用している。その理由は次の 2 点にある。第 1 にハードウェア設計が見通しよく容易にできる。第 2 に表 1. に挙げたように多様な回線制御を行うワイヤードロジックの設計は極めて困難と思われる。

マイクロプログラム制御にした結果、速度は多少犠牲になった。表 1. に記した全転送速度の値 (20 キロバイト/秒) は、1 バイトの処理を行うマイクロルーチンと、割込やデータチェーンを行うマイクロルーチンの走行ステップ数から求めた値である。なお、1 個のマイクロ命令は 56 ビットから成る横幅の広い方式 (水平形) を採用、マシンサイクルタイムは 0.8 μs である。

マイクロプログラムを格納するリードオンリメモリ (ROM) の最大容量は 3 キロワードである。試作 CP 2 用に開発したマイクロプログラムはただ 1 個の伝送制御手順 (HDLC) に適用するマイクロルーチンを収容しているが、約 0.5 キロワードを占めた。そのうち約 0.3 キロワードはチャンネル制御に使われ、伝送制御手順に依存する部分は約 0.2 キロワードである。

5.3 2 重系構成

図 7. に示すように、回線接続ユニット以下は 2 重系回線接続付加機構を用いて 2 台の回線制御装置に接続されて、いずれか一方から制御を受ける構成にできる。

5.4 CP 2 の網制御プログラム (NCP)

CP 2 の NCP は、図 6. に示す 11 個のブロックから構成される。これらは 3 種に大別される。

(1) スーパーバイザ: I/O SPV, Sys RTR, DCP, NDCP, LIOS, I/O STIN, I/O STTM から成り、電文ブロックの待行列管理、タスクの始動・停止の制御及び割込制御を行う。

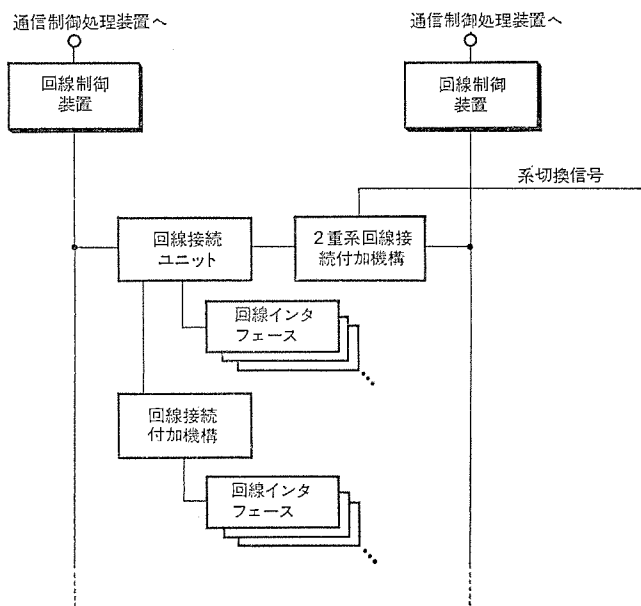


図 7. 2重系構成

(2) チャンネルアダプタ：スーパーバイザの下で働き、主計算機とCP 2の間の情報交換を行う。

(3) 通信制御：LWS, CCP, FSP から成る。回線の種別（交換回線/専用線）と伝送制御手順で決まるラインワークスケジュール（LWS）がスーパーバイザの下で働き回線の制御を行う。

スーパーバイザはCP専用として開発され、CPモデル1, 2, 3に共通である。

なおNCPの詳細に関しては稿を改めて報告する予定である。

5.5 伝送制御手順

計算機や端末装置が回線を経由して情報交換を行う際に従わなくてはならない規則として伝送制御手順があり、使用されるコード、電文のフォーマット、電文とそれに対する応答電文、エラー検出法と回復手順に関して規定している。

伝送制御手順には国際的に標準化されたもの、それに基づいて国内で標準化されたもの、電算機・通信機器メーカーが決めたもの、国鉄や航空会社等の企業が決めたもの等多種ある。これらは2種に大別される。

(1) ベーシック形：JIS-基本モード伝送制御手順に代表されるものであって、伝送情報は文字と呼ばれる数ビット（5～8）を単位にして組立てられる。すべての伝送制御機能は数個（10個前後）の伝送制御文字を用いて遂行される。

遠隔端末装置を制御する場合に適している手順であり、代表的な例として、JIS-基本モード、IBM-2進同期伝送（BSC）、NUK-ME LCO標準化伝送制御手順がある。

(2) ハイレベルデータリンク制御手順：ISOによる国際標準化がほぼ完了し、国内における標準化も開始された伝送制御手順である。伝送情報はフレームと呼ばれる任意ビット数を単位にして組立てられる。伝送制御機能は各フレームの先頭の数ビット（普通16ビット）を用いて遂行される。

伝送情報のビットパターンに制約がなく、両方向同時伝送が効率よく行えるので、計算機網の手順として適している。

CP 2には両者を収容する必要がある。まず試作機においてハイレベルデータリンク制御手順（以後HDLCと略称する）を収容した。製品化段階でベーシック形をも収容した。ベーシック形の中での各手順の相異点は伝送制御文字群の相異という形で現される。したがってそれらの相異点を伝送制御文字参照テーブルの中に吸収させ共通のプログラムを使って制御するようにしている。

6. CP 2 の特性

5章で述べた事からわかるとおり、CP 2は3章で列挙した特性のほとんどすべてを満たしている。

更に、CPタイプ1, 2, 3はハードウェアとソフトウェアの一部分に同一のものを用いることができる。すなわち

- (1) 網制御プログラム（NCP）は、タイプ1, 2, 3に共通である。
- (2) タイプ1とタイプ2は、図4.で示したハードウェア構成のうち、回線接続ユニット以下に同じハードウェアを用いる。
- (3) タイプ2とタイプ3は、図5.で示した機能ブロック図の通信制御装置の中のマイクロプロセッサ（μP）は同一である。したがってマイクロプログラム作成のサポートシステム（例えば、アセンブラ、ROMシミュレータ）を共用できる。

7. む す び

最近、IBM社からシステムネットワークアーキテクチャ（SNA）が発表された。また電信電話公社から新データ網の構想が発表された。これらを契機に計算機網の利用は今後ますます発展するであろう。本論で紹介した通信処理装置は、計算機網の構成要素のひとつである。このようなシステム又は装置に関する今後の検討課題は、NCPの機能の高度化、例えば、通信規約（プロトコル）、データ保護、分散した機能の有効な制御方式、及びインタフェースメッセージプロセッサ（IMP）の開発とそれに伴う技術、例えばフロー制御、ルート決定法等の研究である。我々はこれらの課題に重点を置いて計算機網構築技術の確立を目指している。

なお、この研究開発を行うに当たり種々協力をいただいた関係各位に感謝いたします。

参 考 文 献

- (1) C. B. Newport and J. Ryzlak : Communication Processors, Proc. of the IEEE, 60, No. 11, November, p. 1321 (1972)
- (2) F. E. Heart, et al. : The interface message processor for the ARPA computer network, Proc. of AFIPS SJCC, p. 551 (1970)
- (3) S. S. Husson : Microprogramming, Principles and Practices, Prentice-Hall (1970)
- (4) ISO/DIS 3309 Data Communication-Hight-level data link control procedures-Frame Structure.
- (5) 松田ほか：ハイレベルデータリンク制御システム，三菱電機技報，48，No. 6（昭49）

車両用シリコン油入ポリアミド絶縁変圧器

桑原 宏*・潮見尚暢*・鶴田敬二*・児玉俊英*・今福誠司*

1. ま え が き

我が国の電車用変圧器については、昭和47年以降、それまで使用してきたPCB不燃性油が、公害問題より製造中止になり、それに代わるシリコン油入変圧器の開発が行われてきた。これらは、昭和49年からの量産形A種シリコン油入変圧器の納入開始をもって、ほぼ開発が完了した。

しかし、全国新幹線網などの将来の高速大容量電車にあっては、その主変圧器の重量・寸法の一層の低減が強く要求されており、現在では、上記シリコン油入A種絶縁の段階より更に進めてシリコン油の耐熱性を有効に生かすとともに、新たにポリアミド絶縁物を採用して、温度上昇を従来より約50%増大させ得る特別A種絶縁変圧器が検討されている。

この新絶縁方式については、961系試作電車用TM920形主変圧器などに一部製作の実績はあるが、ポリアミド紙の適用方法や絶縁特性などに改善すべき点があり、また温度限界についても、更に詳細を追求すべき点があった。

当社では、これらのシリコン油入ポリアミド絶縁に関する各種基礎実験・モデル実験を行い、更に実モデル変圧器の試作・詳細試験を実施したので、その成果の概要を紹介する。

2. ポリアミド紙及びシリコン油の耐熱性

シリコン油+ポリアミド紙という特別A種絶縁を採用するに当たって問題になるのは、絶縁特性と温度限界である。ところで、シリコン油は、不燃性油の代替品として昭和48年以来使用されており、その特性についても多くが既に発表されている⁽¹⁾⁽²⁾。また、シリコン油+ポリアミド紙という絶縁構成のものも、日本国有鉄道納めTM920、TM201X形主変圧器を実車試験用として製作し⁽³⁾、定常的な特性についてはよく知られているところであるが、ここでは、更にこの絶縁構成で種々の検討を重ね、絶縁特性及び温度特性を追求した結果をまとめた。

2.1 ポリアミド紙及びシリコン油の加熱減量特性

まず、ポリアミド紙及びシリコン油の加熱劣化特性を表すものとして、

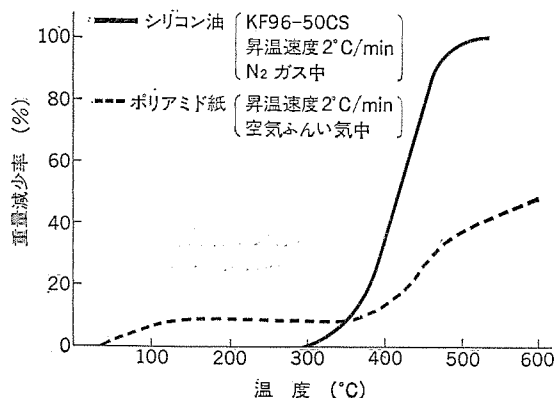


図1. ポリアミド紙及びシリコン油の加熱減量特性

図1. にポリアミド紙とシリコン油との短時間加熱減量特性を示す。これによれば、ポリアミド紙では350°Cを、シリコン油では300°Cを超えると、急激に重量減少が起こり、熱分解が急速に進行することが分かる。

2.2 シリコン油浸ポリアミド紙の加水分解特性

ポリアミド紙については、水分が存在すると、加水分解を起こして強度が低下することが知られているが⁽⁴⁾、図2. にポリアミド紙に含有されている初期水分量をパラメータとした場合の加熱温度と、ポリアミド紙の破綻強度半減時間を示す。ただし、シリコン油には脱気・脱水処理が行われている。これによれば、水分量が多ければ、比較的低い温度で強度が低下することが認められ、製作途上においては十分に水分管理を行わなければならない。また、絶乾ポリアミド紙+シリコン油の加熱劣化特性についても、既に6,400時間までの結果は発表されているが⁽²⁾、その後、11,200時間まで継続して行った結果、加熱温度が220°C以下では、ポリアミド紙、シリコン油のいずれの特性も6,400時間までのときとほとんど変わりがなかった。

2.3 シリコン油浸ポリアミド紙の温度とAC破壊電圧との関係

シリコン油浸ポリアミド紙の電気的特性についても、常温時についてはよく知られているが、やはり特別A種ということで水分0.2%以下における高温時での破壊電圧特性を図3. に示す。これによれば、200°Cを超えると急激に破壊電圧が下がり出すことが分かる。なお、参考としてシリコン油浸プレスボード、2号油浸プレスボードの値についても併記しておいた。

以上のように、シリコン油浸ポリアミド紙の高温時の特性について述べたが、従来においては、シリコン油浸絶縁の耐熱性については、シリコン油が熱分解して揮発性低分子のD₃、D₄を生じ、蒸発量の増加とともに引火点が低下することに注目していた⁽⁶⁾。しかしながら、2.2節に示したように、ポリアミド紙が吸湿して加水分解を生じ、耐熱性が低下することが分かり、更に特別A種ということで100°C以上で使用するために水分の気化ということもあり、水分の管理とい

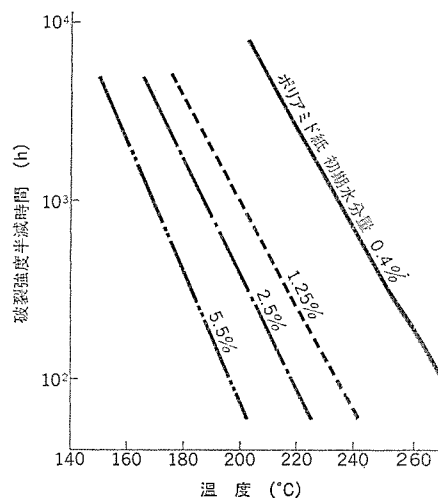


図2. 吸湿ポリアミド紙の温度-破綻強度半減時間特性

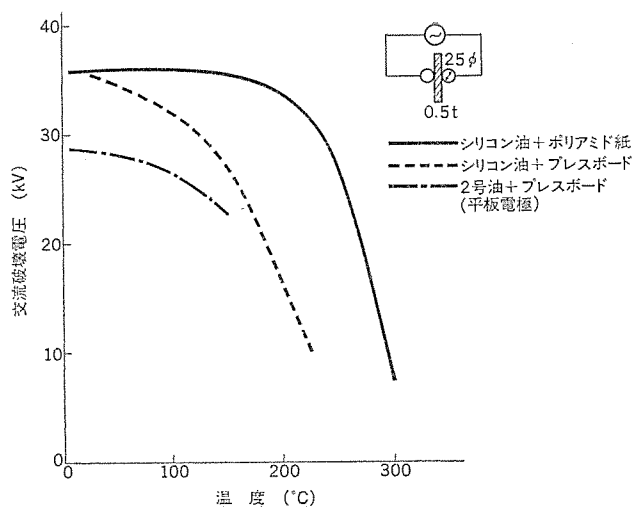


図 3. シリコン油浸ポリアミド紙の高温交流破壊電圧特性

う面が大きくクローズアップされてきた。ところで、実器モデル製作の結果、ポリアミド紙は吸湿が早いにもかかわらず、吸湿量は、加水分解に対して全く問題のない値であると同時に、気化による部分放電開始電位傾度も、ヒートサイクルを繰り返すことによって上昇することが確認され、問題はないと思われるが、現在ポリアミド紙の水分量については、シリコン油中での水分平衡、及びヒートサイクルによる水分移動ということも併せて更に追求中である。

3. 温度限界の設定

シリコン油+ポリアミド絶縁という特別A種絶縁を採用する場合、その温度限界をいかに設定すれば良いかが問題になるが、ここでは、2章で述べた基礎データ、及び既に発表済みのデータ⁽¹⁾⁽⁵⁾より、いかに温度限界を設定したかについて述べる。

図 4. にシリコン油の引火点と蒸発量との関係、図 5. に蒸発量が 1.5% に達するまでの温度-時間特性を示す。図 4. より、蒸発量が 1~1.5% を超えると引火点が急激に下がり出すことが分かる。ところで、A種絶縁車両用変圧器は、JEC-168 より高い温度上昇限度で使用しており、この熱劣化寿命を JEC-168 の考えに沿って計算してみると、JEC-168 に示された標準使用状態での期待寿命を 30 年とすると、車両用変圧器の場合には、5.3 年=46,500 時間となる。これと、蒸発量 1.5% という関係から図 5. より温度を求めると、ほぼ 165°C ということになる。一方、ポリアミド紙の加水分解という面からみると、165°C で寿命 5.3 年を保つには、ポリアミド紙の含有水分量は、ほぼ 1% 以下でなければならないことになり、この 1%

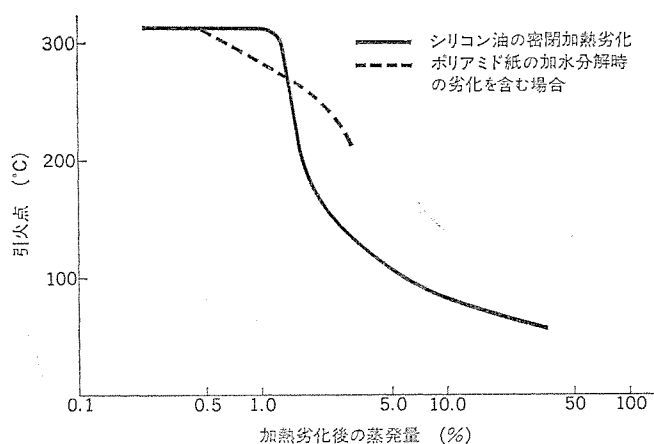


図 4. シリコン油の蒸発量-引火点特性

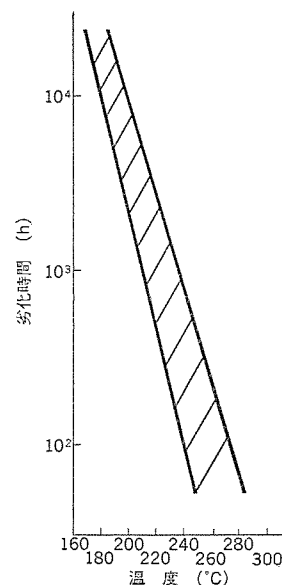


図 5. 蒸発量 1.5% になるまでの温度-劣化時間特性

という値は、工作上に問題のない値と考えられるが、製作に当たっては十分に管理しなければならない。以上のことから、巻線温度上昇限度は次のとおりになる。

165°C (巻線最高温度)

— 15°C (巻線最高と平均温度との差)

— 25°C (基準周囲温度)

125 deg (巻線平均温度上昇限度—抵抗法—)

ここで、巻線最高と平均温度との差であるが、これについては、巻線冷却構造条件によって異なるが、従来から推定している値として一応 15°C とした。

次に、短時間過負荷に対応する温度限度であるが、これについては図 1. のシリコン油とポリアミド紙との短時間加熱減量特性、及び図 3. のシリコン油浸ポリアミド紙の高温破壊電圧特性より 250°C 以下とした。外部短絡時の巻線許容温度については、絶縁物以外に銅線などの強度についても検討しなければならないが、JEC-168 での B 種規格値を準用して短絡終わりににおける巻線の温度限度を 350°C とする。なお、短絡による温度上昇が、保護システムの短絡継続時間からして 100°C 程度であると考えられるので、これからも短時間過負荷時の温度を 250°C 程度に抑えなければならないことになる。

次に、油の温度上昇限度であるが、これについても、冷却構造上から巻線平均温度と油温度差の最適値が決められるものと考えられるが、従来の変圧器での考え方を適用するものとして温度差を 40°C と考えた。すなわち

125 deg (巻線平均温度上昇)

— 40 deg (巻線平均-油温度差)

85 deg (油温度上昇限度)

なお、ベアリングの寿命特性からも、ほぼこれと同じ温度上昇限度と考えられる。次に、寿命半減温度差であるが、これは図 2. のシリコン油中での吸湿ポリアミド紙の破裂強度半減時間特性、及び図 5. のシリコン油の蒸発量が 1.5% になるまでの劣化特性より約 10°C と考えられる。これらの結果を、他の規格による温度上昇限度と比較すると、表 1. のようになる。

以上の温度上昇限度は、主として熱劣化を中心に考えており、そのほかに部品及び機械的強度上からの温度限度もある。部品関係については、シリコン油使用ということでは既に発表済み⁽¹⁾であり、そ

表 1. 各種変圧器の温度上昇限度比較

| | 一般用変圧器 (JEC-168) | 車両用変圧器 (JRS・15302-1) | ポリアミド紙 +シリコン油 |
|-----------------|---------------------|-------------------------|------------------|
| 標準寿命温度 (°C) | 95 | 120 | 165 |
| 巻線平均温度上昇 (deg) | 60 | 85 | 125 |
| 巻線最高-平均温度差 (°C) | 10 | 10 | 15 |
| 短時間許容温度 (°C) | 150 | 160 | 250 |
| 寿命半減温度 (°C) | 6 | 6 | 10 |
| 油温度上昇限度 (deg) | 55 | 65 | 85 |

注) 車両用変圧器 (JRS・15302-1) の温度上昇限度は、耐熱処理紙使用の場合である。

の他、特別A種ということでも開発は完了しているが、保守・点検等も含めて考えなければならず、本体の熱的寿命と協調をとってあげばよいと考えられる。

ここで、車両用変圧器の温度上昇に対する考え方の特徴について触れると、車両用変圧器では、他の変圧器より巻線平均-油温度差、巻線最高-平均の温度差を問題にすることである。すなわち、車両用変圧器では、負荷変動が短時間で非常に大きく起こることである。この負荷変動を把握することは非常に困難で、現在では、走行モデルを設定し、走行シミュレーションを行って変圧器の最適容量を追求している⁽⁵⁾⁽⁶⁾。この走行シミュレーションでは、巻線最高-平均温度差、巻線平均-油温度差、及び短時間過負荷時の最高点温度を主として計算しており、これらに必要な温度上昇値・時定数・負荷電流との相関が、十分な精度で必要とされる。このように、車両用変圧器では、軽量化という面から負荷変動に対応した最適容量を算出するため、温度上昇の諸定数に関しては、他の一般の変圧器よりも厳密に追求されている。

4. 実器モデル変圧器の試作

さきに、シリコン油浸ポリアミド絶縁の温度限度を絶縁物そのものの基礎データより求めてきたが、それと並行して実器サイズモデルを含め、いわゆるハードの各種技術要素の開発・試験を行っており、その内容について説明する。

4.1 実器モデル変圧器の概要

まず、実器モデル変圧器は、現在計画されている全国新幹線網用電車に必要な定格にほぼ近いと思われる仕様とし、日本国有鉄道規格に準ずるほか、表 2. に示す仕様のもとに製作された。特徴としては、外形鉄フォームフィットタンク構造はよく知られているところであり、シリコン油浸ポリアミド絶縁についても、既に TM 920 形主変圧器⁽³⁾等で紹介済みであるので、TM 920 形と比べての特徴、及び特殊試験を行えるようにした変圧器としての特徴を示す。

(1) 2次巻線は、6 不等分割とし、そのインピーダンス特性をリニアなものにした。

(2) 主絶縁部には、ノーマックス (ポリアミド紙の商品名) #410 と比べて油浸性の良いノーマックス #411 の成形品を用いて部分放電特性を良好にした。

(3) 静電しゃへい板の内当てシールドには、特殊接着剤とノーマックス #411 成形品とを用い、やはり部分放電特性を良くしてある。

(4) 各種試験が実施できるように、表 3. に示すようにそれぞれの試験計画に適した装置などを施してある。

表 2. 実器モデル変圧器の仕様概略

| | |
|------------|---|
| 形 式 | 連続定格, 外形鉄, 送油風冷式, シリコン油入, 無圧密封式 |
| 相 数, 周 波 数 | 単相, 50/60 Hz 共用 |
| 容量, 電圧, 電流 | 1 次; 2,530 kVA, 25,000 V, 101 A 2 次; 2,180 kVA, 518 V×4, 840 A 259 V×2, 840 A 3 次; 350 kVA, 925 V, 378 A |
| 絶縁階級, 試験電圧 | 1 次線路側; 車両用 30 号 AC 70 kV 1 分 インパルス 175 kV 1 次接地側; 車両用 1 号 AC 4 kV 1 分 2 次側; 車両用 3 号 AC 10 kV 1 分 3 次側; 車両用 1 号 AC 4 kV 1 分 |
| 絶 縁 種 別 | 特別 A 種 ポリアミド絶縁物使用 |
| 温度上昇限度 | 巻線 125 deg(C)一抵抗法 油 85 deg(C)一温度計法 基準周囲温度 25°C |
| 循環油量, 風量 | 700 l/min, 90 m³/min |

表 3. 試験内容及び装置

| 項 目 | 内 容 |
|----------------------|--|
| (1) 局部温度上昇及び局部熱時定数測定 | i) 1 次, 2 次巻線 ii) 静電しゃへい板 iii) 油各部 iv) 鉄心 v) タングウエッジ vi) 内当てシールド 合計 60 点熱電対で測定 |
| (2) 油流分布測定 | i) 鉄心-タンク間 ii) コイル間ダクト |
| (3) 小容量巻線の短絡強度試験 | i) 1/10 容量巻線 主方向機械力 垂直方向 " } ストレインゲージ, 加速度計使用 ii) タンク発生ひずみ [i), ii) の全測定点数は 24 点] |
| (4) 一般特性試験 | JEC-168, JRS-15302-1 による |
| (5) 長期課電特性試験 | 部分放電特性, 油特性, 油ポンプ (ベアリング) のチェック |

注) 巻線各部温度上昇測定用熱電対取付状況, 短絡機械力測定用ストレインゲージ・加速度計取付状況を図 6., 7. に示す

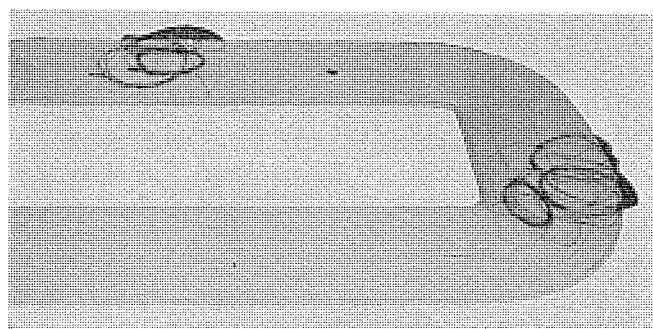


図 6. 熱電対取付状況

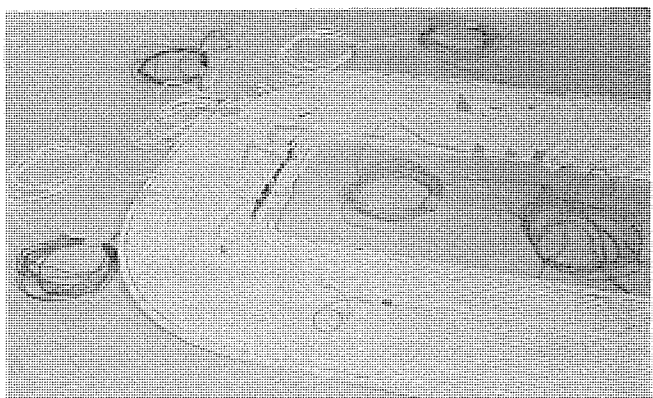


図 7. ストレインゲージ・加速度計取付状況

表 4. ノーメックス紙の適用区分

| 使 用 場 所 | 適 用 材 料 |
|------------------|-------------------|
| 素 線 絶 縁 | ノーメックス #410 |
| チャンネル, アングル | ノーメックス #411 成形品 |
| 内 当 て シ ー ル ド | " |
| 静 電 し ゃ へ い 板 | " |
| ス ペ ー サ, ワ ッ シ ャ | " |
| ス ペ ー サ 台 紙 | ノーメックス #410 |
| リ ー ド 絶 縁 | ノーメックス #410 グレーブ紙 |

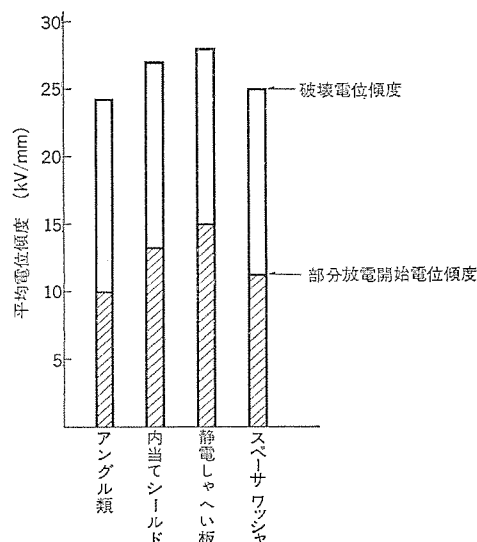


図 8. ノーメックス #411 成形品のシリコン油中における部分放電開始及び破壊電位傾度

(5) 特別A種絶縁物の使用等により、従来品と比較して 85% に重量を軽減した。

4.2 ポリアミド紙の適用法

ポリアミド紙には、商品名をノーメックスと称して #410, #411 等があり、このうちの #410 は、表面が カレンダ 処理されており、層に対して直角な方向の油浸性が #411 と比べて劣り、含浸時間が長いために厚手のものを使用した場合に未含浸部が残る、低い電圧で部分放電を生ずる恐れがある。一方、素線絶縁には、機械巻き時の引張り強度及び絶縁耐力の面から #410 を用いる必要がある。また、スペーサ・ワッシャ等は、油浸性ととも機械的にも強度がなければならない。

以上のような点にかんがみてノーメックス絶縁紙の適用区分を表 4. に示すようにした。これらの使用材料及び成形品のうち、ここでは特に成形品の絶縁特性について図 8. に示す。ただし、電位傾度は試料の厚みで除した平均電位傾度とし、部分放電開始電位傾度は放電電荷量 10 pc をもって開始とした。

4.3 試験結果

4.3.1 温度上昇試験

車両用変圧器では、大きな負荷変動に対応した最適容量を追求する際のシミュレーションで、巻線平均-油温度差、巻線最高-平均温度差の正確な値を知る必要がありと同時に、特別A種ということで電流密度を上げたり、冷却ダクトを縮小する場合にその最適値を知る必要がある。そこで、実器モデルで各部の温度を測定するとともに、別途に巻線冷却モデルを製作して温度上昇を検討し、計算によって従来より精度良く求めるための基礎データにしようとした。

図 9. に、代表的な二つの巻線の電流密度を変えた場合の温度上

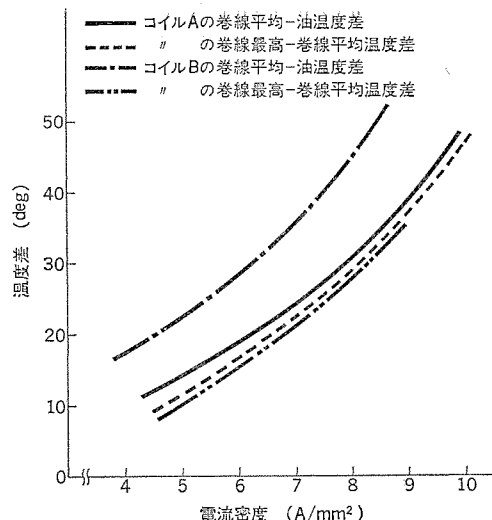


図 9. 電流密度-温度上昇特性 (実器モデル)

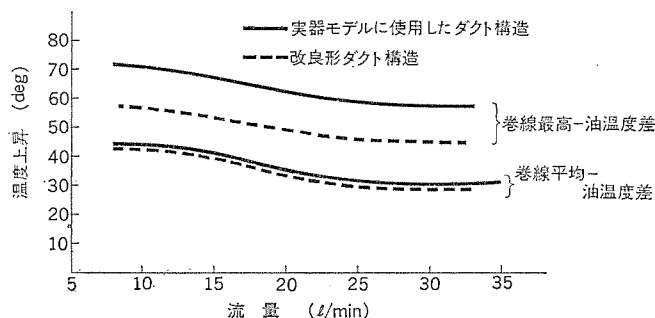


図 10. 流量-温度上昇特性 (巻線冷却モデル)

昇値を示す。これによれば、巻線の冷却面積が異なっているために巻線平均-油温度差は変わっているが、巻線最高-平均温度差はあまり変わらない。これは、巻線最高温度が単なる冷却面積より、ダクト構造や素線の電流密度の影響を大きく受けるものと考えられる。ところで、温度上昇を設計するに際しては、巻線平均温度上昇、巻線平均-油温度差を基本に設計した場合に巻線最高-平均温度差が、規定値以内であることが望ましい。したがって、巻線最高-平均温度差を下げるために、冷却ダクト構造を改良することが有効な手段であり、主として巻線冷却モデルによって検討した結果、図 10. のように温度差は半分程度に改善された。また、巻線最高温度は、平均温度上昇にはほとんど寄与しない程度のものであることが確認された。更に、巻線冷却モデルでは、種々のダクト構造における発生損失と温度上昇、流量と温度上昇特性等を測定し、改良形ダクト構造を採用することで各温度上昇設定値を満足する最適設計基準を求めた。

次に、やはり走行シミュレーションに関係のある熱時定数、発生損失と温度上昇との関係についてであるが、時定数については、巻線各部、平均のいずれも油に対して温度差に比例し、式(1)とよく一致した結果が得られた。

$$T = \frac{M \cdot C}{W} \cdot \Delta\theta \quad \dots\dots\dots (1)$$

T : 時定数 W : 発生損失 M : 銅重量
 $\Delta\theta$: 温度差 C : 比熱

また、発生損失と温度上昇については、温度上昇 \propto (発生損失)^b という、JEC-168 に規定されている関係を用いて b を求めた結果は、次のようであった。

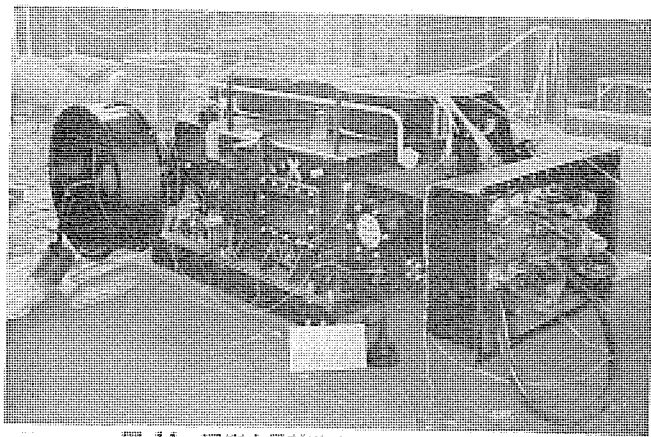


図 11. 温度上昇試験中の実器モデル変圧器

油温度上昇： $b=1.0$ 巻線平均-油温度差： $b=0.8$]

なお、熱電対による各部の関係も多少のばらつきはあるが、ほぼ同様であった。これらの値については、従来使用していた値と、走行シミュレーションによるものと大きな差がないことが確認された。

以上に述べたように、実器モデル変圧器試験、巻線冷却モデルによる各種試験により、油流分布の計算法も含め、より精度の高い温度計算法を確立するとともに、最適温度上昇設計法を確立した。その他、静電しゃへい板・鉄心等の温度上昇は、全く問題のない値であった。図 11. は、温度上昇試験中の実器モデル変圧器を示す。

4. 3. 2 部分放電特性

従来、ポリアミド紙使用のシリコン油絶縁変圧器では、ノーマックス #410 の含浸性の面から部分放電特性が問題になっていたが、表 4. に示したような適用法を採用して実器モデル変圧器を試作し、良好な特性を得た。部分放電電荷量については、42 kV で 30 pc 以下、実際の運転時最高電圧 30 kV では、外部雑音レベル以下であった。

その他、部分放電試験は、常温と高温、ポンプ運転と停止、耐圧試験前後等について行ったが、ほとんど変化のない値を示した。したがって、部分放電で判断する限り、絶縁紙の含浸状態が試験当初より良好であったと考えられる。

4. 3. 3 短絡機械力検証試験

多巻線変圧器では、小容量巻線の機械力が問題になるため、実器モデル変圧器において 6 不等分割にした場合の 1/10 容量巻線の短絡時の機械力を検証するとともに、新しく開発したスパーサや、素線絶縁紙の弾性率等を考慮した複合はり(梁)計算法による計算結果と比較した。測定結果は、1/10 容量巻線でも、100% 短絡電流に対して異常は認められなかったと同時に、複合梁計算法による計算が実測と非常によく一致することが分かった。

4. 3. 4 実器モデル変圧器の長期課電試験

今回の実器モデル変圧器では、他のモデル試験も併せて満足できる結果が得られたが、更に長期的な絶縁特性の検証を行うため、現在、50 年夏より約 1 年間の予定で長期課電試験に入っている(図 12.)。試験条件は、1 次ライン端電圧約 40 kV、油ポンプ運転、フロフ停止で、油温度上昇は約 65 deg である。試験中、約 2 か月に一度ずつ部分放電電荷量の測定、油ポンプの点検等を行っている。既に数回測定されているが、部分放電電荷量は、当初より徐々に低下する傾向を示している。

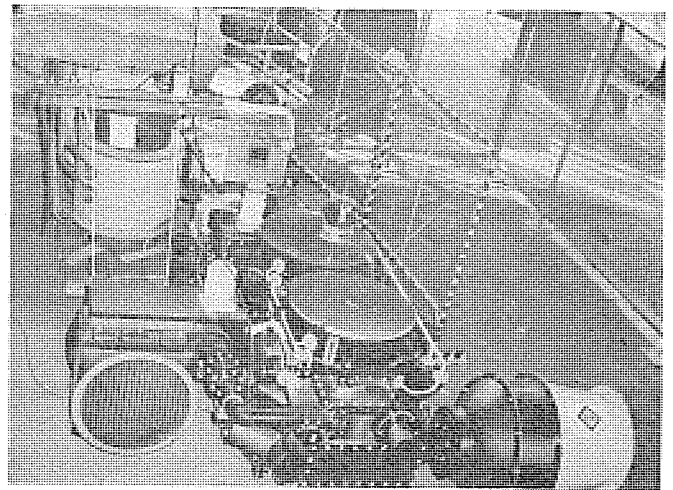


図 12. 実器モデル変圧器の長期課電試験状況

4. 3. 5 その他の試験

この実器モデル変圧器では、前述の試験以外に、耐圧試験を含む一般特性試験、ノーマックスの吸湿水分量、サージ移行率等の測定を行ったが、一般特性についてはすべて良好な結果が得られ、ポリアミド紙の加水分解及び部分放電が問題になっているノーマックス紙の初期水分量も、組立完了時点で 0.6% 以下と、良好な結果が得られた。また、サージ移行量測定についても、静電しゃへい板の効果、フィルタの効果等の試験を行ったが、いずれも満足できる結果が得られた。

5. む す び

以上、軽量化を目指したシリコン油入ポリアミド絶縁方式の耐熱性、温度限界、ポリアミド紙の適用方法などについて当社で実施した各種実験の内容、及びその成果を説明した。

これらの結果、材料、特にポリアミド成形品の特性・加工性の向上を実現するとともに、特別A種絶縁変圧器の設計技術の確立と、特性計算精度の向上が達成できた。

また、実モデル変圧器を中心とする実器サイズモデルの試作、及び長期課電などの各種試験の実施により、今後の生産体制を確立するとともに、信頼性に対しても十分な自信を得たと考えている。

最後に、これらの開発に際して、日本国有鉄道車両設計事務所、鉄道技術研究所を初め、社内の各関係各位に多大のご協力を得たことを深く感謝する次第である。

参 考 文 献

- (1) 南角ほか：三菱電機技報 49, No. 3 (昭 50)
- (2) 桑原ほか：三菱電機技報 49, No. 3 (昭 50)
- (3) 永岡ほか：三菱電機技報 47, No. 12 (昭 48)
- (4) 桑原、鶴田、児玉：昭 51 電気学会全国大会
- (5) 鶴田、児玉：昭 49 電気四学会連合大会 No. 77
- (6) 北川、河村、久山：三菱電機技報 39, No. 2 (昭 40)
- (7) 桑原ほか：昭 49 電気学会全国大会 No. 311, 312, 313, 314, 316
- (8) 桑原ほか：昭 50 電気学会全国大会 No. 331, 372
- (9) 桑原、宗村、潮見：電気学会誌 50-A 40 (昭 50)

超音波によるスポット溶接のインプロセス検査

奥田 滝夫*・稲田 幹夫*・西川 正一*・松山 宏**・田中 洋次**

1. ま え が き

製品の接合部の信頼性を向上させるためには、溶接条件裕度の広い溶接法を選択すること、接合部の検査法を確立することが必要である。また、製品個々の信頼性を考えると、検査法は抜取検査的なものではなく、非破壊で全数検査できることが望ましい。スポット溶接は1分間に10点以上の溶接ができる高速自動溶接法であるが、現在一部で実用化されているオフラインでの超音波検査では、検査工程に多大の時間を要し、全体的にみた作業能率は低下することになる。したがって、作業能率を考慮すると、非破壊検査が溶接中（インプロセス）でできることが望ましい。

本文では、スポット溶接における品質管理の考え方及びこれまでに開発された種々の品質管理装置の特徴と現状を解説するとともに、このたび開発した一つの探触子を用いた透過法による、スポット溶接のインプロセス非破壊検査法について述べる。

2. スポット溶接の品質管理と管理装置の現状

スポット溶接は周知のように、1対の電極で被溶接材を加圧し、溶接電流を通じて、 RI^2T （ R ：抵抗、 I ：電流、 T ：通電時間）なるジュール発熱により溶融して接合する方法である。最近のスポット溶接機は、足踏スイッチを押すだけで一連の溶接工程が自動的に行われ、溶接条件もすべてダイヤルなどで設定される。したがって、スポット溶接は作業者の熟練度に左右される要素がほとんどない自動溶接であり、アーク溶接に比べて溶接条件の管理で比較的容易に品質管理ができる溶接法であるといえる。表1.はスポット溶接の溶接結果に影響

表1. 溶接結果に影響を及ぼす主因子

| | |
|----------------|----------------------|
| 溶接結果に影響を及ぼす主因子 | 被溶接材……材質、寸法、表面状態、なじみ |
| | 溶接条件……溶接電流、通電時間、加圧力 |
| | 電 極……材質、先端形状、冷却水量 |

を及ぼす主因子を列挙したものであるが、単純な形状の軟鋼板のスポット溶接では、溶接条件の再現性の向上、すなわち溶接電流、通電時間及び加圧力の3大条件を常に設定された値に保つことと、電極の管理を厳重に行うことにより、かなりの精度で品質の管理が可能である。3大条件のうち加圧力と通電時間は、最近の溶接機ではほとんど変動することがないので、溶接条件の再現性の確保は、電源電圧の変動などに基因する溶接電流の変動の管理が主体となるが、最近のエレクトロニクスの進歩により、電流の管理限界を設定できる信頼性の高い溶接電流計が容易に入手できる状況にあるので、電流の管理は比較的簡単にできる。電極の管理については、予備実験で標準打点回数を求めておき、定期的にチップドレス又は交換を行う必要がある。単純な形状の軟鋼板のスポット溶接は、これだけの管理で溶接不良率を1%以下に押さえることは、さほど困難ではない。

複雑な形状の構造物や表面処理鋼板のスポット溶接については、上述のような品質管理では不十分である場合が多い。なぜなら、上述

の品質管理では全溶接電流の管理を行っているが、ジュール発熱による単位体積当たりの発熱量は $\rho\delta^2T$ （ ρ ：固有抵抗、 δ ：電流密度、 T ：通電時間）であり、溶接電流を一定に保っても、板のなじみの良否、電極の当たり面の変動や表面状態によって、通電路が変化し、電流密度が変化するためである。したがって、このような場合には、後述の直接的品質管理装置を用いて品質管理する必要がある。

複雑な形状の薄板構造物の安全確保にとられている一つの手段は、必要最少点数より多く打点することである。自動車では約3,000点/台、鉄道車両では約10,000点/台のスポット点数があるが、1点1点の品質が保証されれば、これらの打点数はかなり減るはずである。また、航空機においてもスポット溶接が広く利用されているが、例えば翼のように高度の信頼性が要求される部材は、いまだにリベットで接合されている。このことはアルミニウム材のスポット溶接の信頼性の低さ、いいかえれば優れた検査法がないということに基づくものであり、優れた非破壊検査法が確立されれば、更に強度上重要な部材への適用が進むものと思われる。

次に品質管理装置の現状について述べる。現在実用化あるいは開発中の品質管理装置を分類すると、表2.のようになる。間接的品質管理装置は、溶接電流と通電時間あるいはその組合せを管理することによって、溶接結果を間接的に管理するものである。溶接電流計には電流の最大値 I_m を指示するものと、実効値を演算して表示するものがあるが、スポット溶接の電流は図1.のように位相制御されており、最大値と実効値とは比例しないので、入熱の管理の目的には実効値演算形のほうが好ましい。実効値演算形の簡易形とし

表2. スポット溶接の品質管理装置の分類

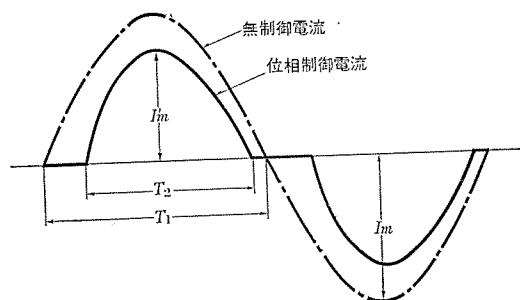
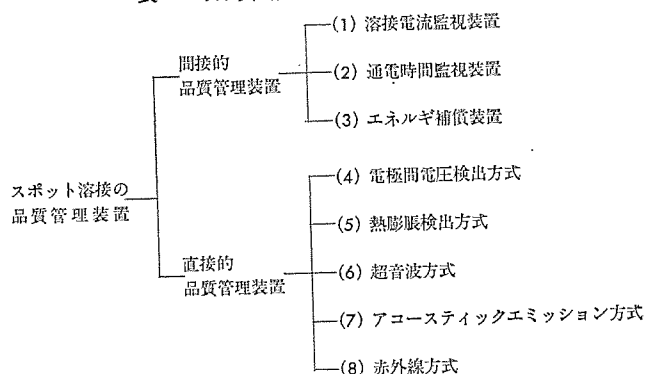


図1. スポット溶接の電流波形

て、 $\frac{I_m}{\sqrt{2}}\sqrt{\frac{T_2}{T_1}}$ を演算するものが最近開発されているが、生産現場で使用する場合には精度的にもこの方式で十分である。いずれの電流計にも溶接電流の上限と下限の設定器がついており、この範囲をはずれると、ラップあるいはブザーで警告することにより、電流の監視ができるようになっていいる。

エネルギー補償装置は、溶接機の制御装置に組み込まれて使用されるもので、 $\int_0^T i^2 dt$ が一定になるように通電時間あるいは溶接電流が自動的に制御されるものである。このような制御をすると、電源電圧が40%低下するような条件でも、Aクラスの溶接が保証されることが報告されている⁽¹⁾。

直接的品質管理装置は、何らかの方法で溶接現象と関連性のある変化量を検出し、この検出信号により溶接品質を判定するものである。表1.にあげた主因子及びその他の諸因子の影響を受けた最終結果を直接的に検出する点で、前述の装置よりも信頼性が高いといえる。

直接的品質管理装置のうち、国内で実用化されつつあるものは表2.(4)～(6)である。溶接中の電極間電圧は図2.のように変化するが、AB区間は接触抵抗の変化に基づくもので、初期の大きな接触抵抗はこの期間に消滅する。BC区間は接合部の温度上昇による固有抵抗の増加によるもので、C点付近でナゲットが形成し始め、ナゲットができ始めると通電路が拡大され、C-Dのように電圧が減少する。電極間電圧方式は図の V_m と通電終了時の V_e との変化率 $\frac{V_m - V_e}{V_m}$ と、接合強度に相関関係のあることを利用して、品質の判定を行う方法である。この方法の応用として、電極間電圧と溶接電流から電極間抵抗を演算し、抵抗の変化率を利用するものや、電極間電圧の積分値 $\int_0^T V dt$ を利用したものがある。電極間電圧方式は、リード線をクリップなどで電極チップに取付けるだけで検出できるので

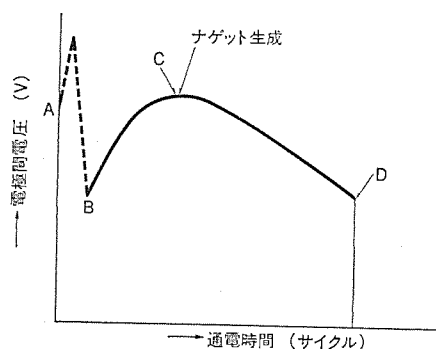


図2. 電極チップ間電圧の時間的変化

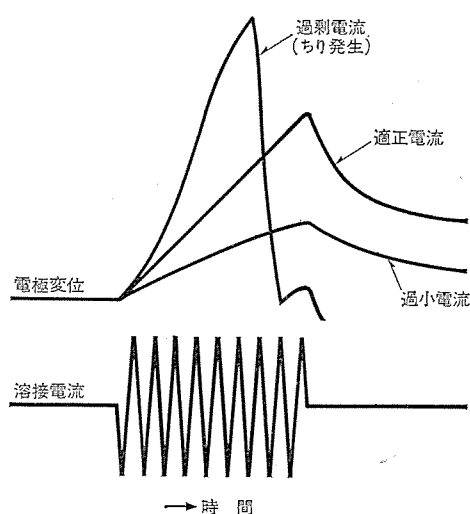


図3. 電極変位の時間的変化

簡便であるが、既溶接点への分流によって影響を受ける欠点がある。

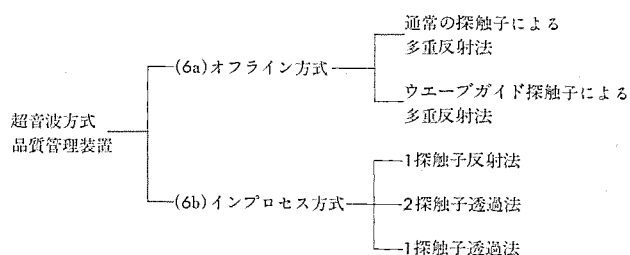
熱膨脹検出方式は、溶接中の被溶接材の熱膨脹に基づく電極の変位を検出する方法で、ナゲットの形成状態により、電極の変化は図3.のように変化する。この変位量の最大値又は変化率によって、接合状態を判定する方法である。この方式は溶接機の腕の剛性の少ないものや、加圧機構のしゅう(摺)動部の摩擦係数の大きなものに適用できない欠点がある。

アコースティックエミッション(A・E)方式は、溶接中の溶融・凝固に伴うA・E信号を利用する方法である。溶融・凝固部が大きいほどA・E発生数が多くなり、A・E発生数を計測することにより、接合状態の良否判定ができることが報告されている⁽²⁾。

赤外線方式は、溶接中に放射する熱線や、電極開放直後の溶接部表面から放射する熱線などの温度を測定するものであるが、諸条件が極めて安定している状態でないと精度が低い。

超音波を利用した方法は、更に表3.のように分類される。(6a)

表3. 超音波方式品質管理装置の分類



は溶接後接合部に探触子を当て、その多重反射波の波形から判定する方法で、素材と柱状晶との超音波の減衰の差を利用したものや、ウエーブガイドを利用した新しい方法が提案されている。しかし、この方法は溶接後に検査工程が必要なことで、判定に一定程度の熟練を要する欠点がある。

これに対し、(6b)は溶接と検査が同時に行えること、特に透過法は以下に詳しく述べるように、溶融現象を直接的に検出でき、信頼性が非常に高いことから、超音波方式の本命と考えられる。

今回開発した方法は、上記透過法のうち1探触子のもので、2探触子法に比べて探触子が1個ですむことと、超音波の変化量が大きく、薄板にまで適用できる点が優れている。以下この方法の詳細について述べる。

3. 1探触子透過法によるインプロセス検査

3.1 1探触子透過法の原理

従来の超音波透過法(2探触子透過法)は、対向する電極にそれぞれ超音波振動子を取付けておき、一方の振動子から超音波を発信し、接合部を通過した透過波を他方の振動子で受信し、その透過量の時間的変化により、接合状態をモニタリングする方法であった⁽⁴⁾。しかし、この方法では消耗品である電極に2個の振動子を装着する必要があり、経済的に不利であるばかりでなく、シリーズ・スポット溶接のように片面から電極を当てるものには適用しにくい欠点がある。更に、この方法では超音波が接合面を1回しか通過しないため、検出信号の変化量が少なく、1.6mm以下の板厚への適用は困難であった。

そこで我々は、一つの探触子によってより信頼性の高い非破壊検査を行う方法について種々検討した結果、次に述べる1探触子透過法を開発した。

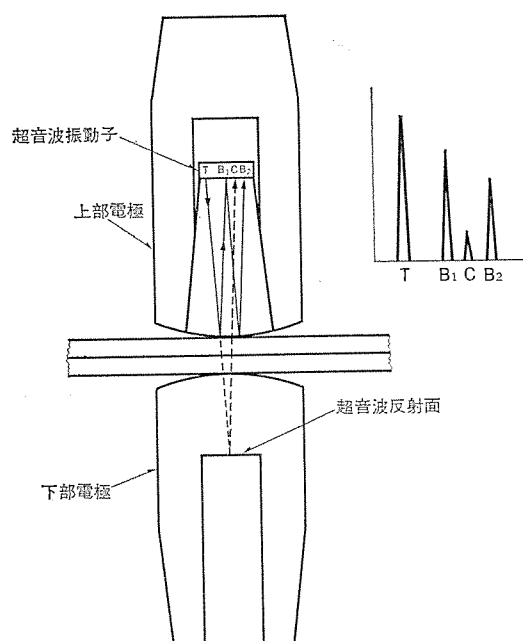


図 4. 1 探触子透過法の原理図

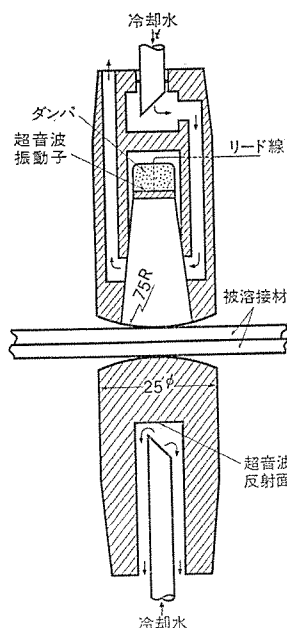


図 5. 電極形状

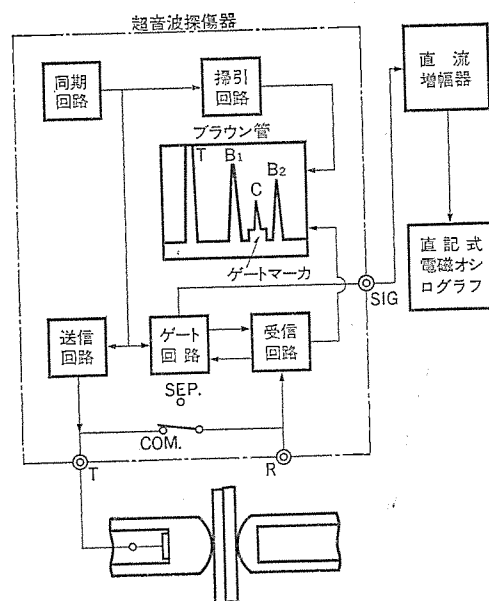


図 6. 測定方法

図 4. はその原理の説明図で、片方の電極に送受信用の振動子を張り付け、他方の電極に超音波を反射する反射面を設けてある。振動子で発信された送信波 (T 波) は、電極内を通過して電極の先端面に達する。この先端面で送信波の一部が反射し、再び振動子の方向に進行するが (B₁ 波)、残りの部分は接合面を通過して、対向電極内に設けられた反射面で反射し、再度接合部を通過して振動子に到達する (C 波)。この C 波は透過法の場合と同じく、接合部を透過する超音波信号であり、しかも接合面を 2 度通過するため、溶融などによる接合部の物性の変化をよく反映した情報源となりうる。したがって、2 探触子透過法よりも精度の高い非破壊検査が、1 探触子で可能になると考えられる。なお、一つの超音波信号の周波数は 2 MHz であるが、この超音波を約 1 kHz の繰り返し周期で間欠的に発信することにより、溶接中の超音波の透過量の時間的変化をアナログ的に取り出すことができる。

ところで、振動子のちょう (貼) 付面 - 電極先端面間の距離と、超音波反射面 - 電極先端面間の距離が等しく、かつ、これらの距離が被溶接材の板厚に比べて大きい場合は (振動子の冷却のため、あまり短くできない)、電極の先端面で 2 度反射して振動子に至る反射波 (B₂ 波) と、上記 C 波が重なり合い、出力信号としては絶対値の大きい B₂ 波が支配的になり、期待する情報が得られない。そこで、超音波反射面 - 電極先端面間の距離を、振動子貼付面 - 電極先端面間の距離より短くすることにより、B₂ 波と C 波の分離をはかった。

3.2 実験装置及び被溶接材

実験に使用した溶接機は、150 kVA の単相交流式 スポット 溶接機で、最大溶接電流 25 kA、最大加圧力 2 t のものである。電極はクロム銅製で、図 5. のように外径 25 φ、先端径 75 R のものを用い、一方の電極に 2 MHz、10 φ の超音波振動子を張り付け、図のような水冷路を設けた。他方の電極には超音波反射面を設け、通常の水冷法により冷却を行った。

溶接中の超音波透過量の測定は、図 6. のように超音波探傷器 (三菱電機製 FD-210 P 形を改造したもの) のゲート回路により、C 波を選定し、その波高値に相当するアナログ出力電圧を直流増幅器で増幅し、直記式電磁オシログラフに記録して行った。

溶接電流及び通電時間の測定は、溶接機の 2 次回路にそう (挿) 入

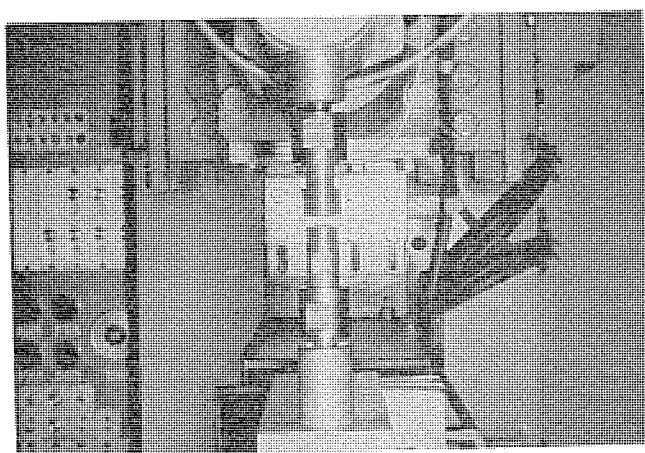


図 7. 超音波振動子を組み込んだ電極の外観

したトroidal コイルの検出信号を積分した後に増幅し、上述の電磁オシログラフで超音波信号と同時に記録して行った。

被溶接材は板厚 1.0~3.2 mm の冷間圧延銅板 (SPCC) を用い、前処理はアルコールで脱脂後、布で清浄する方法をとった。

図 7. は、溶接機に組み込んだ振動子付電極の外観を示したものである。

3.3 実験結果

図 8. は板厚 3.2 mm の被溶接材を、電極加圧力 680 kg、溶接電流 18.5 kA の一定に保って、通電時間を変えて溶接した場合の透過波の波高値と、通電時間の関係及びそれに対応した断面マクロ写真を示している。

溶接電流の通電開始から 10 サイクルまでは、被溶接材と電極及び被溶接材間との溶融面積が増加するため、超音波透過量はこれに対応して増加している。10 サイクルを過ぎると透過量は激減し、13 サイクルで極小値を示した後、通電時間の経過とともに増加する。各通電時間に対応した断面マクロ写真を見ると、極小点に到達する前に溶接電流をシャ断した 12 サイクルのものには、ナゲットが形成されておらず、極小値をわずかに超えた 14 サイクルのときは、小さなナゲットが形成されている。したがって、ナゲット形成の開始点は、超音波透過量が急に減少する過程の途中から、極小点までの間にあることが分

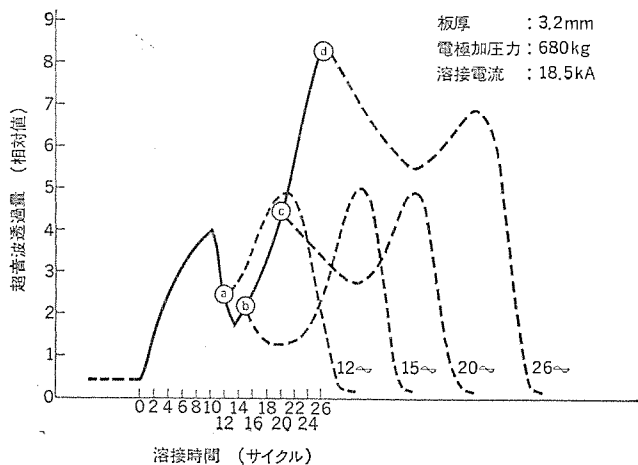
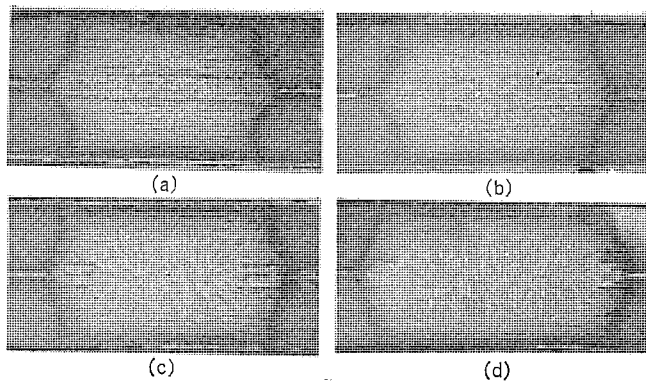


図 8. 通電時間と超音波透過量及び接合状態の関係

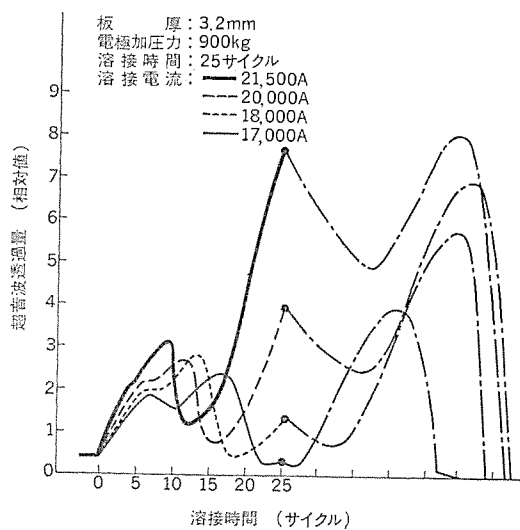


図 9. 溶接電流と超音波透過量の関係

かる。

極小点を経た後の 20, 26 サイクルの試片は、通電時間の増加とともにナゲットが成長して大きくなっているが、これに対応して超音波の透過量は再び増加している。通電時間終了後、溶接部が冷却する過程の透過量の変化は、加熱時と同じような過程を逆行するが、全く同じ過程を経過しない。この理由は、電極と被溶接材の接触面積の変化及び温度の変化速度が、溶接中と冷却時と異なるためである。

図 9. は電極加圧力 900 kg, 溶接時間を 25 サイクルの一定に保って、溶接電流を 17~21.5 kA に変えて溶接した場合の C 波の時間変化を示したものである。溶接電流が大きくなるにしたがって、ナゲットの形成開始点に対応する極小点の位置が短時間側に移行し、通電終了時点における超音波の透過量は、ナゲットの大きさに対応して大きく

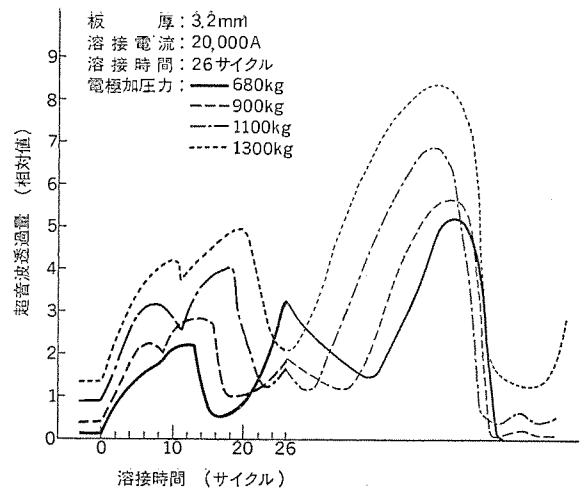


図 10. 加圧力と超音波透過量の関係

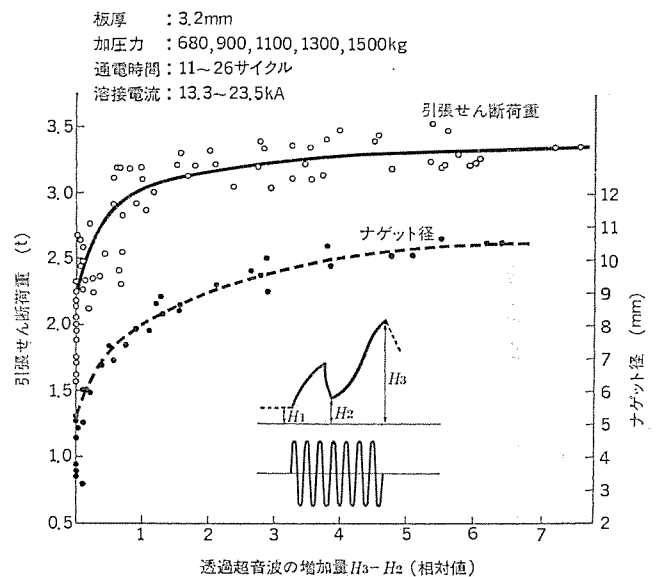


図 11. 超音波透過量の増加量とナゲット径及び引張せん断強度の関係

なっている。

図 10. は溶接電流を 20 kA, 通電時間を 26 サイクルの一定に保って、電極加圧力を 680, 900, 1,100, 1,300 kg に変えて溶接した場合の透過波の時間的変化を示している。圧接時間における透過量は、加圧力に対応して増加し、通電中の極小点を過ぎた後の通電時間終了点における透過波の増加量は、ナゲットの大きさに対応しており加圧力が大きいほど増加量が小さくなっている。

図 11. は板厚 3.2 mm の軟鋼板について、加圧力 680~1,500 kg, 通電時間 11~26 サイクル, 溶接電流 13.3~23.5 kA の範囲で種々に組合せた条件で溶接した場合に得られる C 波の波高値の極小値 H_2 と、通電終了時の波高値 H_3 との偏差 $H_3 - H_2$ とナゲット径及び引張せん断荷重の関係を示している。

図に見られるように、 $H_3 - H_2$ とナゲット径の間には、上記のように広い溶接条件範囲において非常に良い相関関係がある。また、ナゲットの形成開始点は透過量が極小値をとる直前にあり、極小点 ($H_3 - H_2 = 0$) においては、既に 3~4 mm のナゲットが形成されていることが分かる。

R 形の電極では加圧力を増加すると、電極の板への食い込みが大きくなり、電極と板の接触面積が増大するが、上記のような広い加

圧力の範囲で、ナゲット径と H_3-H_2 とに良い相関関係のあることから、電極の消耗によって電極先端面積が変化した場合にも、図 11. の関係が維持されるものと思われる。

超音波透過波の波高値の増加量と引張せん断荷重の関係は、ナゲット径との関係よりもばらついているが、これは組合せた条件の範囲が広いため、強さに寄与するコナボンド部（ナゲットの周囲の圧接部）の接合強さが、溶接条件によって異なるためである。一般にコナボンドはせん断荷重に対しては有効に働くが、引張り荷重に対して非常に弱い。例えば、ナゲットがなくコナボンドだけの接合部でも、せん断試験ではかなりの荷重に耐えるが、引張り試験すると非常に低い荷重で破断する。また、被溶接材の表面状態によっても接合強度は著しく異なる。このように、コナボンドは試験方法や溶接条件によって、その接合強度が著しく変化する性質のものであるから、スポット溶接継手の強度の評価は、あくまでナゲット径に基づいて行われるべきである。

2 探触子法による同様の実験結果と比較すると、1 探触子による方法は、ナゲット径の変化に対する透過量の変化割合が大きくなっており、このことから 1 探触子透過法は、2 探触子による方法よりも更に精度が高く、薄板に適した非破壊検査法であるといえる。

以上は板厚が 3.2 mm の場合であるが、板厚を変化した場合の結果を図 12. に示している。すなわち、図 12. の曲線群は板厚 3.2, 2.3, 1.6 及び 1.0 mm の SPCC 材を、図中に示すおのおの溶接条件（AWS の推奨条件にほぼ一致）で溶接したときに得られる C 波の波高値の時間的変化を表したものである。

図より明らかなように、透過波の波高値は板厚の大小によらず、

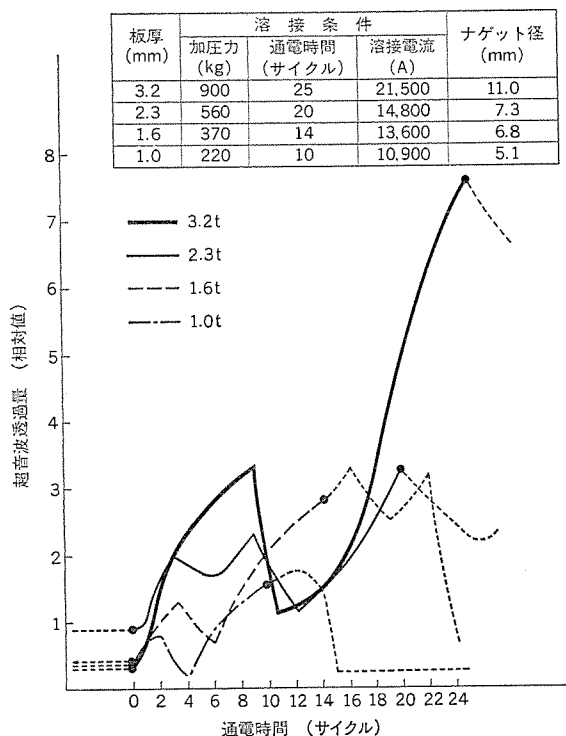


図 12. 種々の板厚における超音波透過量の時間的変化

ほぼ同様の変化をたどり、ナゲットの形成開始点を示す極小点は、板厚の小さいものほど短時間側に移行している。また、通電終了時の波高値も、形成されるナゲットの大きさに対応して変化している。

ここでは 3.2 mm 以下の板厚について報告しているが、図 12. から明らかなように、板厚が大きいほど透過波の変化量が大きくなり、検出が容易になるので、本法の適用できる板厚の上限はないと思われる。

板厚の下限については、ここで使用した電極では 0.8 mm 程度であるが、電極の形状や振動子の発信周波数を変えることにより、更に薄板にも適用できるようになると考えられる。

以上のように、スポット溶接中の超音波透過量は、ナゲットが形成される直後でいったん急激に減少し、その後ナゲットの成長に伴って再び増加するような変化をするのであるが、電極と被溶接材及び被溶接材間の接触面積が、溶接中に時々刻々変化するため、この透過量の変化が被溶接材の溶融現象に基づくものか、あるいは超音波の通路面積の変化によるものかが明らかでない。そこで特殊な装置⁽³⁾と試験片を用いて、超音波の通路面積と探触子から試験片に入る超音波エネルギー量を一定に保って、試験片を通電加熱し、温度上昇に伴う超音波透過量の変化を測定した。その結果、超音波の透過量は、この試験片においても溶融部が形成される直後に急激に減少し、溶融部の増加とともに透過量が増大することが確認された。このことから、スポット溶接中の超音波透過量の変化は、被溶接材の溶融現象に基づくものであることが結論づけられる。

4. む す び

以上のように透過超音波を利用したスポット溶接の非破壊検査は、ナゲットの形成開始点及びその成長過程を直接的にとらえることのできる優れた検査法であるといえる。

また、この方法はインプロセスで検査できるので、溶接後の検査工程を省いて、製造プロセスの合理化がはかれ、更に検出信号を溶接機にフィードバックすることにより、適応制御にも利用できる。

今後この検査法が広く実用化されることにより、スポット溶接が従来の単なる高能率の溶接法から、更に高信頼性を兼ね備えた溶接法として、重要構造物などへ適用拡大されることを望む次第である。

(昭和 51-6-2 受付)

参 考 文 献

- (1) 藤原ほか：点溶接機の電流制御の研究，溶接学会，溶接法研究委員会資料（昭 44）
- (2) 米国 Trodyne 社カタログ：Adaptive Spot Weld Control System (1973)
- (3) 奥田ほか：超音波によるスポット溶接部の非破壊検査，溶接技術，24-3, 84（昭 51）
- (4) G. E. Burbank：Ultrasonic Inprocess Inspection of Resistance Spot Welds, Welding Journal, 44-5, 193 S (1965)
- (5) 中村：スポット溶接部の品質保証およびモニターの現状とその将来，溶接学会誌，44-11, 13（昭 50）

南海電鉄(株)納め8000形AVFチョップ制御電車

成戸昌司*・鉄野治雄*・金田順一郎*・古田俊久*・恵美酒慎一*

1. ま え が き

近年、鉄道業務の近代化に伴い、車両の高性能化・メンテナンスフリー化は、業界の急務として実施されており、その進歩には目を見張らせるものがある。特に、半導体素子の高信頼度化・高圧化によって車両へのエレクトロニクス応用は、ますます浸透しているのが現状である。このような状況のもとで、チョップ制御電車については、その優秀な性能と、エネルギー効率の良さとから地下鉄車両を中心にして実用化が進められ、今後、より一層の普及が期待されている。このチョップ制御の特長を更に向上させるために我々が新しく開発したAVF(自動可変界磁)チョップ制御システムも、既に1年半以上の営業運転実績をもち、その特長である高速回生能力の増大、制御の安定性等の所期の目的を十分に発揮している。この経験を基に、こう配区間を走行する高速郊外電車に適用するため、電機子チョップ制御では我が国初の抑速回生ブレーキを備えたAVFチョップ制御装置を南海電気鉄道(株)高野線の8000形車両用として開発製作、納入した。AVFチョップ制御方式の実用範囲を拡大した、この新方式8000形チョップ電車は、50年11月1日より営業運転に投入されて非常に良好な結果が得られているので、ここにその内容と現車試験結果を併せて報告する。



図1. 8000形AVFチョップ制御電車

2. 特 長

チョップ制御の一般的な特長は、今までにもよく述べられているが、このチョップ制御装置は、こう配区間を走行する高速郊外電車に適用されるため、次のような特長をもっている。

- (1) チョップ制御では、我が国初めての抑速回生ブレーキを備えている。
- (2) AVF制御によって110 km/hからの高速回生運転が可能で、高い回生率を得ることができる。
- (3) フィルタ回路の定数、チョップ周波数の選定、及び主回路配線の方法については、誘導障害を十分に考慮し、その対策を行っている。
- (4) 主電動機4台の開放運転を可能としている。ただしこの時は

AVF₁制御は行わず100%の一定界磁率制御とし回路の簡略化を図っている。

- (5) 大容量逆導通サイリスタ(2,500 V 400 A)を採用して回路の簡略化を図ることにより、高い信頼度はもちろんのこと、メンテナンスフリー化にも配慮している。

- (6) 新形式の駆動装置の採用で主電動機の電機子鉄心の積層長さが大きくでき、860φ車輪の車両に狭軌用としては最大級出力の主電動機を収納した。

- (7) 主電動機の各コイルには、新絶縁システムを採用し、耐熱性・信頼性の向上を図った。

3. 車 両 性 能

50年度新造車のうちの2M2T1編成分にこの方式のチョップ車が採用された。これは、山線こう配区間も走行する高速郊外電車について、将来の車両としての定着をめざして種々の制御方式が検討されたが、電力消費の低減、乗客サービスの向上等の時代の要請に答えるものとして営業線に供されている。

車両性能要目を表1.に、電車性能曲線を図2.に示す。

表1. 車両性能要目

| | |
|---------|------------------------------------|
| 電 気 方 式 | DC 1,500 V 架空線方式 |
| 編 成 | 2 M 2 T |
| 加 速 度 | 2.65 km/h/s (200% 乗車では 2.5 km/h/s) |
| 減 速 度 | 3.7 km/h/s (常用回生最大) |
| 最 高 速 度 | 110 km/h |
| 主 電 動 機 | 155 kW |
| 自重 | 130.5 t/編成 |
| 荷 重 | 定員: 36.3 t/編成 |
| 車 輪 | 860 mm (計算 820 mm) |

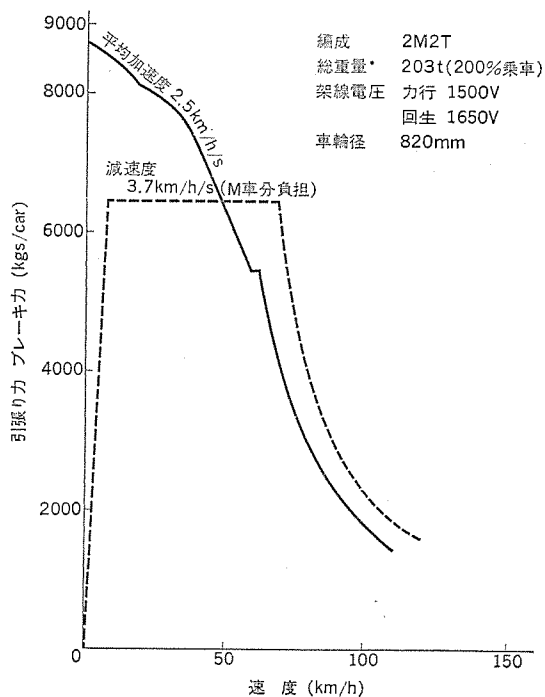


図2. 車両性能曲線

* 伊丹製作所

4. 主電動機及び駆動回路

このチョッパ車では、MT 編成比を 1:1 として運用される場合があること、及び高野線下りでは登りこう配が多いことに加えて在来車並みの車両性能とし、回生性能の向上も図るといった設計のため、狭軌用主電動機としては最大級の容量を有している。この主電動機を台車に収納するために駆動装置は、2 段クラウニングの採用、つ(吊)り装置の改良によって変位の小さい薄形の駆動装置とし、主電動機鉄心積層を大きくしている。

絶縁方式は電機子コイル及び主極コイルは、ポリイミドフィルムとガラステープとを基材とし、補極コイルは、ノメックスとガラステープとを基材とした絶縁構成で、耐熱性・信頼性の向上を図った F 種絶縁である。

主電動機要目は、次のとおりである。

| | |
|---------|--|
| 形 名 | MB-3198-A |
| 形 式 | 直流直巻補極付分割界磁式 |
| 1 時間定格 | 155 kW, 375 V, 460 A, 1,800 rpm (80 % F) |
| 最高試験回転数 | 4,800 rpm |
| 特性曲線 | 図 3. |

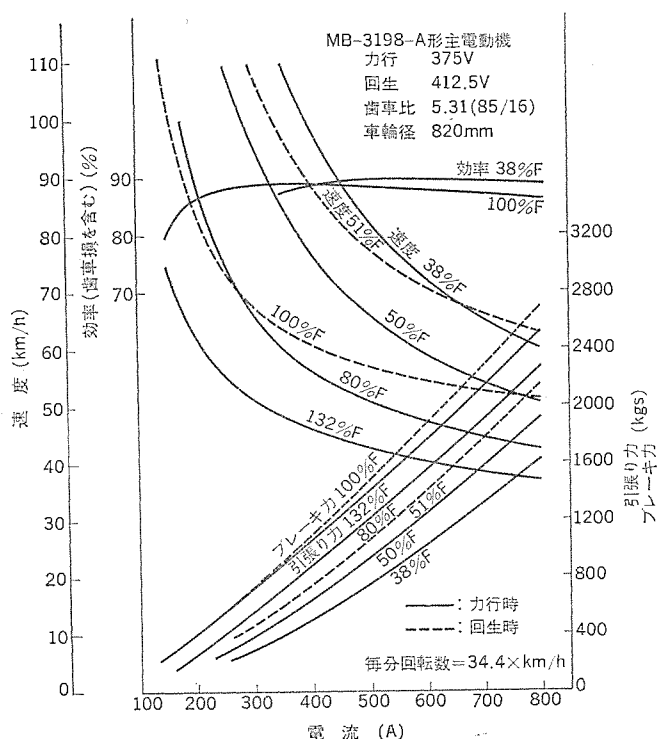


図 3. 主電動機特性曲線

5. AVF チョップ制御装置

5.1 原理と特長

図 4., 5. の主回路簡略つなぎに示すように、従来の直流直巻電動機の界磁巻線を 2 分割し、一方を従来と同様に電機子と直列に接続し、他方を、2 相 2 重に接続されたチョップの断続回路にそう入し、2 組の界磁 F_1 と F_2 の磁束が加算されるように巻いておく。図 4. の力行回路では、 F_2 界磁がフリーホイリングダイオード DF と直列に接続されるので、速度すなわち通流率が增大するにしたがって F_2 界磁が連続的に弱まる。一方の F_1 界磁は、定電流制御で一定であるため、力行では自動的に弱め界磁制御になり、最大通流率つまりチョ

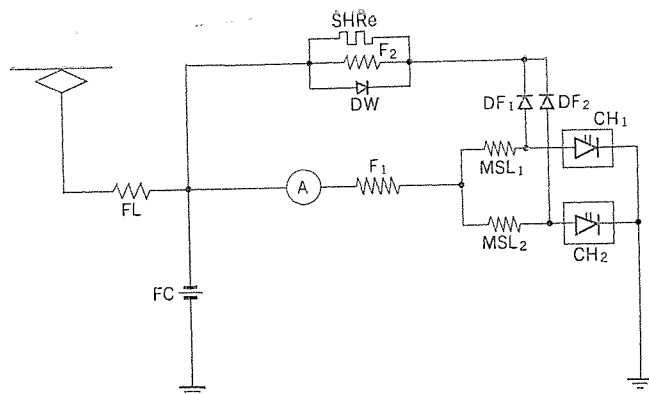


図 4. 力行主回路

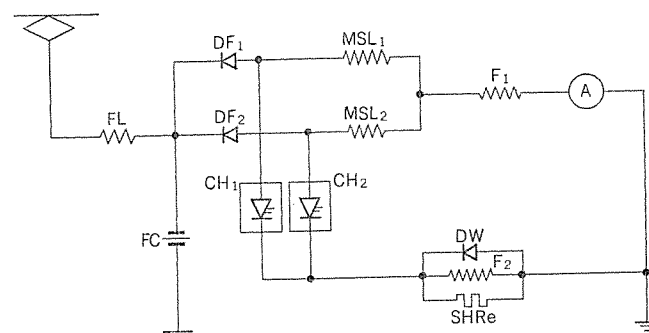


図 5. 回生ブレーキ主回路

ップ短絡に達すると、 F_1 界磁だけの最弱め界磁状態になる。図 5. の回生回路では、 F_2 界磁がチョップ CH と直列に接続されるので、通流率の小さい高速域では、ほぼ F_1 界磁だけの弱め界磁状態であり、速度降下とともに通流率が大きくなると、 F_2 界磁の磁束が増え、自動的に強め界磁制御になる。この場合、定ブレーキ力制御を行うために限流値を速度とともに下げるので、従来の弱め界磁ブレーキ方式と違って回路の電流容量を上げることなく、高速回生能力を増大させることができる。

この AVF 方式の主な特長としては、

- (1) 高速回生能力が増大する。
- (2) 界磁制御が自動的に行われるので、従来のような界磁制御用機器が不要になり、回路が簡略化される。
- (3) 完全な連続制御であるので、簡素で安定な制御系が使用できる。

があげられる。一方、問題点として一般的に考えられるのは、

- (1) サリスタ印加電圧が上昇する。
 - (2) 主電動機界磁巻線の変圧器起電力が大きくなる。
- があげられるが、我々は F_2 界磁を 2 相 2 重の回路にそう入するとともに、分路抵抗を F_2 界磁に並列に接続してこれらを解決している。

なお、AVF 界磁特性についての解析は、参考文献(2)に詳記されているので、ここでは割愛する。

5.2 主回路方式

この装置は、従来より実績のある結合リアクトル式 2 相 2 重チョップ方式にし、AVF 界磁巻線は、変圧器起電力の影響を抑えるため、2 相 2 重効果の出る回路位置にそう入して 8 個直列接続にしてある。そして、AVF 界磁分路抵抗は、サリスタ印加電圧や主電動機変圧器起電力の抑制と、要求される車両性能とから、AVF 界磁分路率

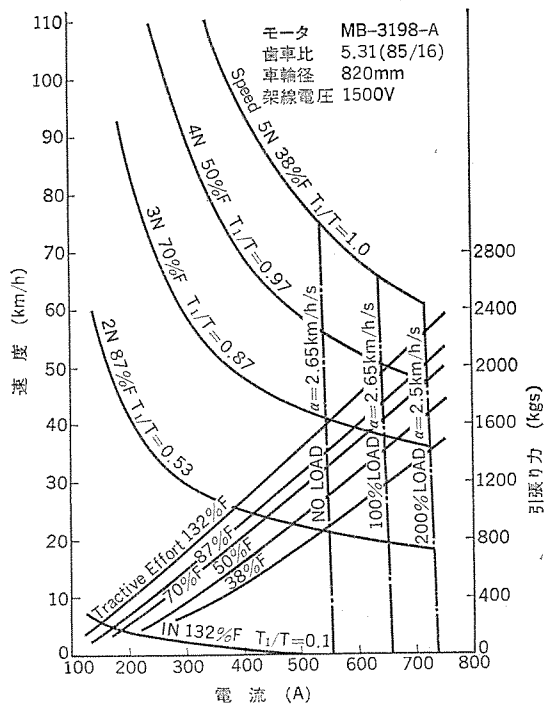


図 6. 力行ノッチ曲線

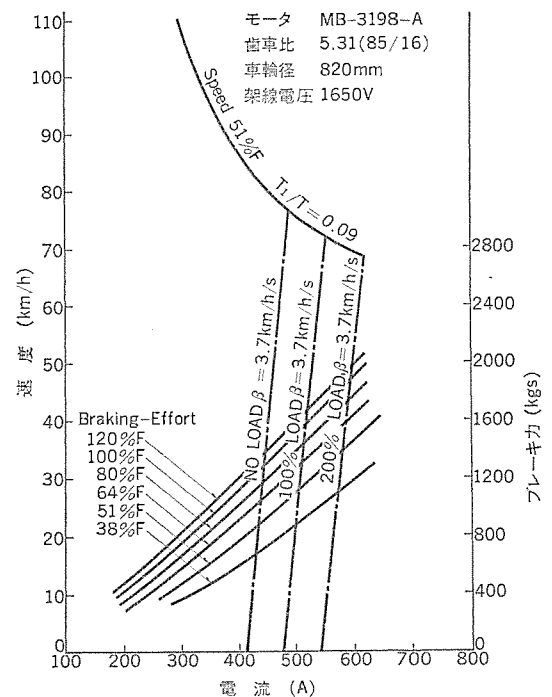


図 7. 回生ブレーキノッチ曲線

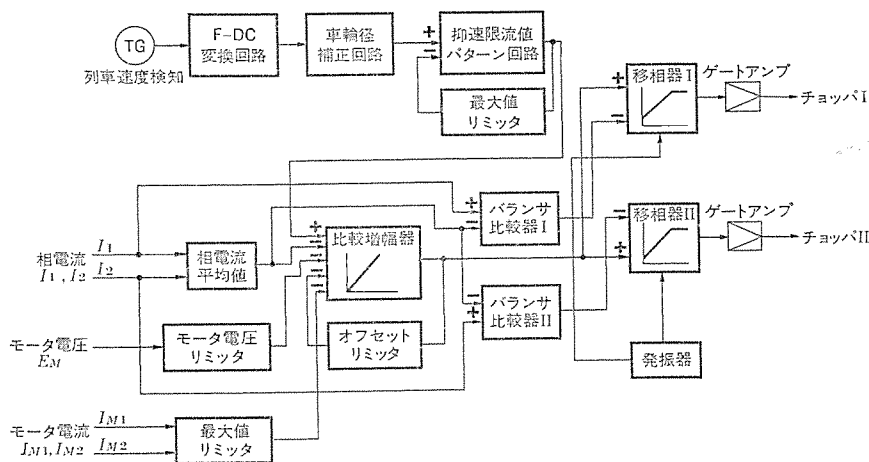


図 8. チョップ抑速回生制御ブロック図

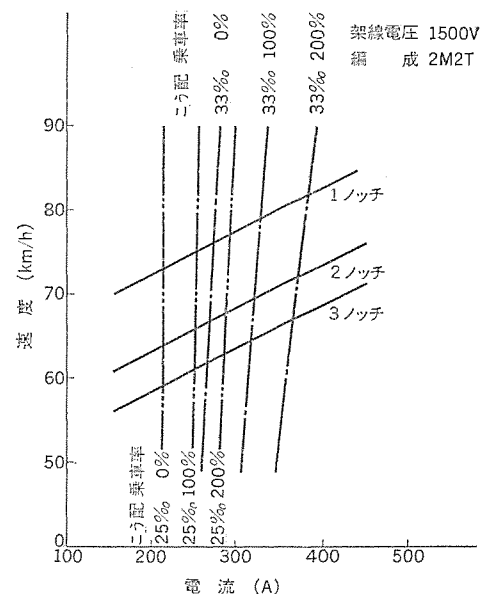


図 9. 抑速回生ブレーキノッチ曲線

が力行 20%，回生 40% となるように分路抵抗値を選定した。

図 6., 7. に力行，回生の ノッチ 曲線を示す。

5.3 制御方式

チョップの合成周波数は，地上側信号機器の動作周波数，特に AFO 軌道回路の動作周波数を避けて 384 Hz とした。

電流制御方式は，定周波平均値制御とし，他の制御方式も従来からの実績に準じている。

5.3.1 抑速回生ブレーキ制御

図 8. に抑速制御ブロック図を示す。各ブロック図の回路構成は，全面的に IC を採用し，部品数を減らすことによって信頼度の向上を図っている。抑速ノッチは，1 ノッチから 3 ノッチまであり，各ノッチ指令によって速度に対応した電流制御が行われる。この制御電流つまり電流パターンは，各こう配区間での許容最高速度が設定されており，抑速運転時のバランス速度が，この許容最高速度以下となるように設定されている。図 9. に 2 M 2 T 編成の場合の抑速回生ブレーキノッチ曲線を示す。

このように，速度に対応した電流パターン方式にしたので，そのパ

ターンの傾きを自由に選定でき，在来のカム車より定速特性の良い抑速制御が可能である。

5.4 チョップ装置

主要要目を表 2. に示す。この装置では，チョップ用としては世界最大級の 2,500 V 400 A の逆導通サイリスタを使用しており，素子数・補助部品数の低減を図るとともに，装置の信頼度を大幅に向上させている。構造については，保守・点検の簡易化を図るために次のような構造にした。

- (1) サイリスタ・ダイオードスタックは，素子が簡単に交換できる一括締付構造を採用した。
- (2) エアフィルタの要素を短時間に交換できる構造にした。
- (3) ゲート制御回路箱は，本体より分離できる構造にし，更に，電源回路部とゲート回路部とをユニット化して保守点検を容易にした。
- (4) ゲート制御部は，高信頼性部品を使用して無調整化を図った。

表 2. チョップ装置要目

| | |
|----------------|------------------------|
| 定 格 電 圧 | DC 1,500 V |
| 定 格 電 流 | 1,500 A (最大) |
| 制 御 方 式 | 定周波平均値制御 |
| 相 数 | 2 相 2 重 |
| 周 波 数 | 192 Hz |
| サイリスタ定格 | 2,500 V |
| 平均順電流 | 400 A/150 A |
| 臨界順電流上昇率 | 300 A/ μ s |
| 臨界順阻止電圧上昇率 | 700 V/ μ s |
| ターンオフ時間 | 40 μ s |
| 0 V Th サイリスタ定格 | 2,500 V 400 A |
| ダイオード定格 | 2,800 V 800 A |
| 素 子 構 成 | 主 サイリスタ 2S 2P 2A |
| | 補 助 サイリスタ 2S 2P 2A |
| | フリーホイリングダイオード 2S 1P 2A |
| | AVF ダイオード 1S 1P 1A |
| | クランピングダイオード 2S 1P 2A |
| | 0 V Th サイリスタ 2S 1P 1A |
| 転 流 方 式 | 直列消弧反発パルス方式 |
| 冷 却 方 式 | 強制風冷式 |
| 素 子 故 障 検 出 | 電圧比較故障表示ランプ付き |
| ゲート制御部 | IC 演算増幅器式 |

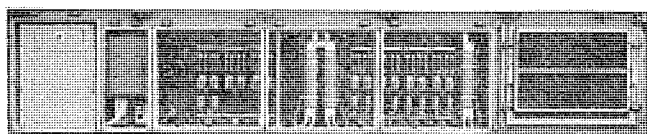


図 10. 【チョップ装置箱

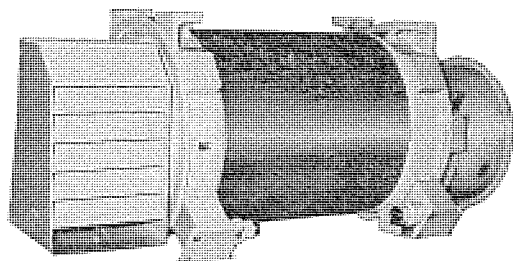


図 11. 主平滑 リアクトル

5.5 結合リアクトル

この AVF チョップ方式も 2 相 2 重方式であり、主平滑リアクトルとして 2 相結合リアクトルを採用した。このチョップ車の最高速度が 110 km/h であることから、高速からの回生運転時における転流失敗に対する主回路機器の保護を考慮し、インダクタンス値は、従来からの製作実績の最大級である 10 mH としてある。

結合リアクトルの要目は、次のとおりである。

形 式
2 相結合リアクトル (空心形)
定 格
10 mH 460 A
(相当たり)
冷却方式
強制風冷式
外 観

図 11.

5.6 フィルタ装置

フィルタ装置は、フィルタリアクトルとフィルタコンデンサとから構成され、

チョップによる高周波電流成分が架線に流出するのを阻止するためにそう入されており、共振周波数は約 40 Hz に設定されている。

フィルタリアクトル、フィルタコンデンサの要目は、次のとおりである。

| フィルタリアクトル | | フィルタコンデンサ | |
|-----------|------------|-----------|----------------------------|
| 形 式 | 空心リアクトル | 形 式 | オイルコンデンサ |
| 定 格 | 5 mH 800 A | 定 格 | 3,200 μ F |
| 冷却方式 | 強制風冷式 | | (400 μ F \times 8 P) |

5.7 限流リアクトル

限流リアクトルは、回生ブレーキ中のチョップ転流失敗に対して事故電流の立上りを抑制し、主電動機や他の機器を保護するためのものである。

限流リアクトルの要目は、次のとおりである。

| | |
|------|------------|
| 形 式 | 空心形リアクトル |
| 定 格 | 8 mH 450 A |
| 冷却方式 | 強制風冷式 |

6. 試験結果

この AVF チョップ装置を工場試験するに当たり、別途に開発・製作した 8 個電動機駆動の等価試験装置を使用し、各機器も現車と等価な積載配置とし、力行・回生の定常運転試験、特殊試験はもちろんのこと、信号機器とレールとを工場内に設置して誘導障害試験も実施した。この等価試験装置により

(1) 現車試験での調整が少なくなり、現車試験の所要日数を短縮できる。

(2) 従来の工場試験では、2 個あるいは 4 個電動機駆動の等価試験であったので、試験結果に対する等価性が問題になり、現車試験で再確認する必要があったが、この点を解決できる。

ことが可能になった。

このような十分な工場試験を行った後、走行試験を行った結果、再調整することもなく満足すべき性能が短い日程で確認できた。

6.1 力行制御

図 12. に 力行走行試験 オシログラムを示す。AVF 制御であるので、始動時の突入電流も小さく、非常に円滑な始動特性が得られている。

力行時の空転・停電等の特殊試験も実施したが、いずれも良好な結果が得られた。

6.2 回生制御

図 13. に 100 km/h からの回生走行試験 オシログラムを示す。回生では、弱め界磁回生から連続的に界磁を制御できるので、安定な制御

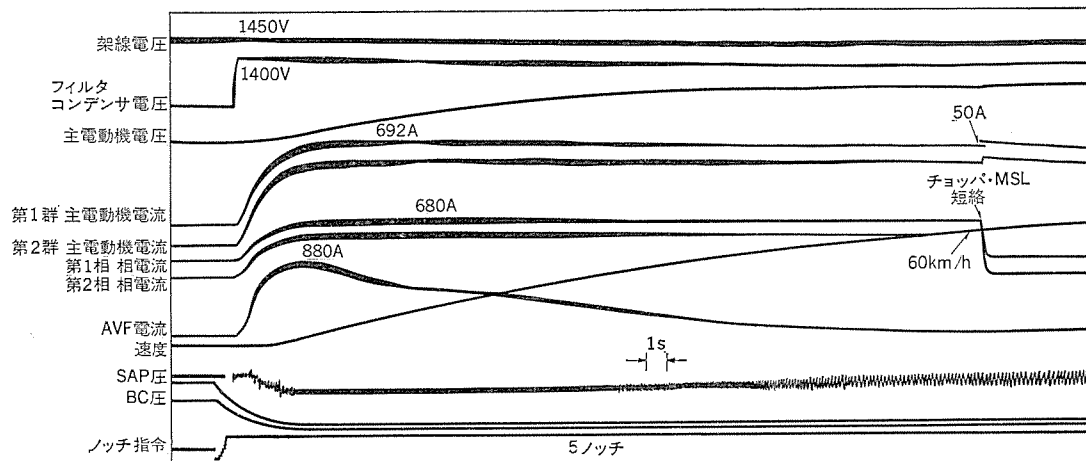


図 12. 力行 オシログラム

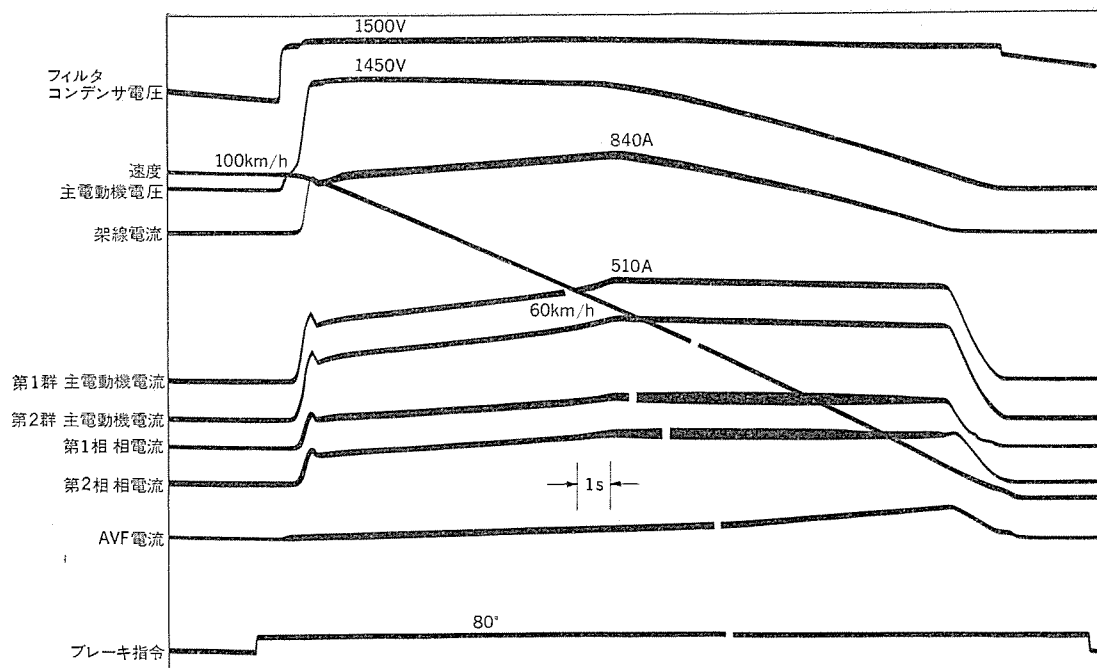


図 13. 回生 ブレーキ オシログラム

編成 2M2T 抑速 3ノッチ こう配 33%

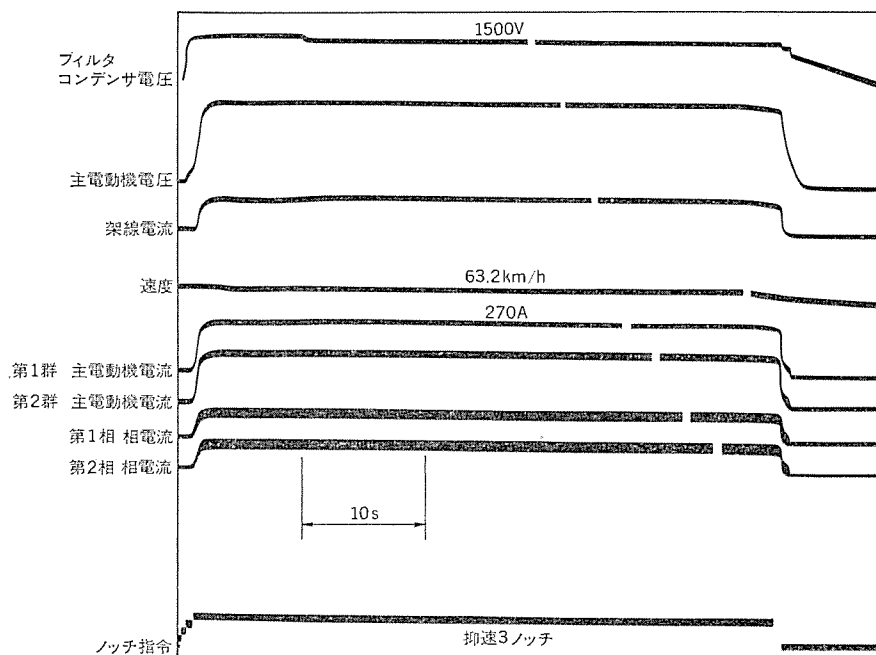


図 14. 抑速回生 ブレーキ オシログラム

特性が得られ、高速回生性能も所期の仕様を満足することが確認された。

無負荷回生・回生負荷変動・回生負荷シャ断・停電等の回生時の特殊試験も実施したが、いずれも予想どおりで異常なかった。

なお、車両性能を決定する通流率-界磁率特性は、解析計算値と実測値とがほぼ一致しており、車両性能も所期の仕様を十分に満足していることが確認できた。

6.3 抑速回生制御

図 14. に抑速回生走行試験 オシログラム を示す。走行条件は、こう配区間 33%，抑速 ノッチ は 3 ノッチ 指令である。バランス 速度は、計算設定値との誤差が約 2 km/h 以内の範囲に入っており、所期の目的

を満足している。

また、抑速回生制動時に問題になる回生負荷が軽減した場合の対策であるが、

- (1) 回生負荷として抵抗器を車両側に設置する。
- (2) 空気ブレーキを作用させる。
- (3) 変電所に回生エネルギーを吸収する装置を設ける。

等が、対策案として検討された。ここで、将来の車両の増備も考慮した経済性の検討、保守面での考慮、積載ス

ペース上の問題から上記 (3) 案にすることが決定された。

6.4 誘導障害試験

誘導障害に対する車両側の対策として、直達ノイズ発生箇所へのシールド板の取付け、ぎ(轢)装配線の配線方法に工夫を施して現車試験が実施された。信号機器は、N形高周波受信器・N形中間受信器・AFO 軌道回路等が供試され、帰線電流の影響、チョップ装置の直達ノイズの影響について、貴重なデータを得ることができた。

7. む す び

以上に述べたように、このチョップ制御車は、営業運転に先立って行った現車試験で所期の車両性能を満足することが確かめられ、信号機器に対する障害も問題なく改善され、冷房付き通勤車として 50 年 11 月 1 日より 1 件のトラブルもなく快調に走り続けている。電力消費量が少ないことが、チョップ装置の大きな特長の一つである

が、回生率の営業運転実績も MT 編成で 26~27% と非常に良好な結果を収めている。

また、今までに集積されたデータとともに、今後の最新技術を基に、近い将来に多編成化された場合の誘導障害の問題についての解明、装置のより一層の小形・軽量化などの各方面からの要求を満足するように検討を続けるつもりである。

最後に、この AVF チョップ制御装置を開発並びに設計・製作及び試験するに当たり、多大なご指導・ご協力をいただいた南海電鉄関係者のかたがたに深く感謝するしだいである。

参 考 文 献

- (1) 芦谷ほか：三菱電機技報，47，No. 9，918 (昭 48)
- (2) 甲木ほか：電気学会電気鉄道研究会，RT-72-6
- (3) 成戸ほか：電気学会全国大会，No. 748，952 (昭 51)

| 登録番号 | 名 称 | 発 明 者 | 登録番号 | 名 称 | 発 明 者 |
|--------|--------------------|-------------------------|--------|--------------------------|--------------------|
| 768319 | 無効電力量計量装置 | 織田利之・桜井五十次 | 770658 | 保護継電装置 | 古谷昭雄 |
| 768320 | 流体のオリフィス装置 | 田中三郎 | 770659 | 温水器 | {野間口有・田畑則一 伊藤利朗 |
| 768321 | 遅延回路 | 佐野善之助 | 770660 | 過負荷保護回路 | 中司浩生 |
| 768322 | スイッチの動作位置微調整装置 | 御厨英喜 | 770661 | 車両用暖房装置 | 野口英男・高橋剛 |
| 768323 | 抵抗体およびその製造法 | {井上武男・石井勇雄 阪本芳昭・金子雅之 | 770662 | 直流断続回路 | 渡辺幸康 |
| 768324 | たわみ板式軸継手 | 重浦淳一 | 770663 | 角度検出方式 | 鷹尾和昭・竹内政和 |
| 768344 | アナログ デジタル 変換装置 | 三井恒夫・倉橋浩一郎 | 770664 | 保護継電装置 | 鈴木健治 |
| 768345 | アナログ デジタル 変換装置 | 三井恒夫・倉橋浩一郎 | 770665 | エレベータ 管理方式 | {板垣晃平・篠崎裕久 竹内照男 |
| 768949 | 園芸施設に於ける冷房方法及びその装置 | {川勝義夫・酒向潔 鈴木学 | 770666 | 可逆駆動制御装置 | 柏原正信・橋爪淳 |
| 770647 | 電解加工装置 | {杉江法雄・斎藤長男 荒井伸治・古池一成 | 770667 | P 型 IIb~VIb 族化合物半導体の製造方法 | 小宮啓義・木村寛 |
| 770648 | 電解加工装置 | 斎藤長男・葉石雄一郎 | 770668 | 環状巻鉄心 | 押上森喬・春原岑生 |
| 770649 | ステップモータ 駆動装置 | 佐藤安俊 | 770669 | 通電時間制御装置 | 志賀正明・西健一 |
| 770650 | 超高周波用磁性材料 | {竹内守久・荒井徹 井戸猛夫・山田幸慶 | 770670 | 絶縁継手 | 井上武男・白沢宗 |
| 770651 | 刷子保持器 | 井上武男・辻政春 | 770671 | 駆動装置 | {梶野幸男・田中武司 篠原芳男 |
| 770652 | 双投形断路器 | 佐々木利彦 | 770672 | 多極回路しゃ断器 | 山本清美・戸田晴久 |
| 770653 | プログラム 制御装置 | {今出昭彦・鳥居健太 金子弘美・石本正明 | 770673 | 回路しゃ断器 | 山本清美・松本良明 |
| 770654 | 冷暖房給湯装置 | 町原義太郎・三ヶ田文彦 | 770674 | エレベータの制御装置 | 高村明・兼松豊 |
| 770655 | 油圧 エレベータの運転制御装置 | 三浦允之・佐々木勝俊 | 770675 | 駆動装置 | {篠原芳男・梶野幸男 田中武司 |
| 770656 | 電波方向探知装置 | 森中明善 | 770676 | 半導体装置及びその製造方法 | 加藤忠雄 |
| 770657 | レーダ方式 | 渡辺優・伊藤信一 | 770677 | 誘導電動機の制御装置 | 篠原芳男・田原武 |

〈次号予定〉 三菱電機技報 Vol. 50 No. 10 制御機器特集

特集論文

- 三菱標準制御器の系列と適用
- 新形電磁開閉器 MS-A シリーズ
- 制御用電磁継電器と限時継電器
- 誘導電動機の保護継電器
- 新形電磁開閉器 MS-A シリーズの応用と適用

普通論文

- Nロケットの電波誘導地上システム
- 電気ホイス軸に生じる衝撃トルク
- 水中自動溶接装置の開発
- ミニコンによる発光分光分析のスペクトル写真解析
- J-FET タイマ用 IC とその応用

三菱電機技報編集委員

| | | | |
|------|-------|------|-------|
| 委員長 | 小原敬助 | 常任委員 | 茶谷三郎 |
| 副委員長 | 松岡治 | “ | 平林庄司 |
| “ | 後藤正之 | 委 員 | 村上卓弥 |
| 常任委員 | 武藤正 | “ | 神谷友清 |
| “ | 佐々木二郎 | “ | 熊本永 |
| “ | 葛野信一 | “ | 橋爪基 |
| “ | 伊原総三郎 | “ | 吉田太郎 |
| “ | 北川和人 | “ | 竹田俊幸 |
| “ | 三矢周夫 | “ | 松村長延 |
| “ | 清田浩 | “ | 藤永敦 |
| “ | 阿部修 | 幹 事 | 本間吉夫 |
| “ | 武田克己 | “ | 三田村和夫 |
| “ | 福家章 | | |

三菱電機技報 50 巻 9 号

昭和51年9月22日 印刷
昭和51年9月25日 発行

定価1部300円(送料別) 無断転載を禁ず

編集兼発行人 本間吉夫
印刷者 高橋武夫
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 (〒100)
株式会社オーム社書店
Tel. (03) 291 局 0912, 振替口座 東京 20018

ニューフラッシュ

我が国で初めて完成 真空スイッチ式負荷時タップ切換器

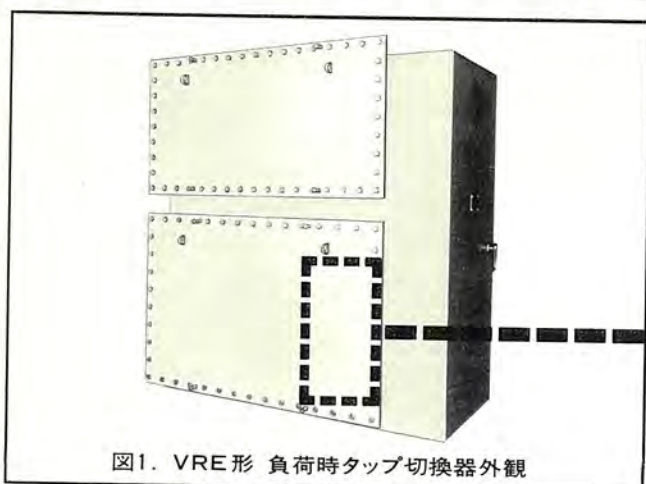


図1. VRE形 負荷時タップ切換器外観

負荷時タップ切換器の電流開閉素子に、しゃ断能力が優れ、接点の寿命が長い真空スイッチを使用すれば、負荷時タップ切換器の性能と保守性が向上します。特に、電気炉あるいは電解炉用など、電力用の20~30倍の切換ひん度や頻繁な過負荷切換えを要求される用途には、その効果が大きく、製品化が強く望まれていました。三菱電機では、このほど我が国で初めて、この真空スイッチを採用した負荷時タップ切換器をアルミ精錬用整流プラントの負荷時電圧調整変圧器用として製作、既に30台を納入しています。ここに、その主な特長と仕様を紹介します。

特長

- 長寿命設計です(当社従来器の5倍以上)
電氣的期待寿命 100万タップ切換
機械的期待寿命 500万タップ切換
- 高いしゃ断性能を発揮します
頻繁な過負荷切換えにも耐える高いしゃ断性能を発揮します。
- 真空スイッチの事故に対する保護システムを完備しています
真空スイッチ式負荷時タップ切換器を製品化する上で難点だった保護システムの実現を、リアクトル式切換方式と真空スイッチモニタリングシステムの採用により解決。真空スイッチが万一真空もれなどでしゃ断失敗をしても、タップ切換器や変圧器は保護されるようになっています。

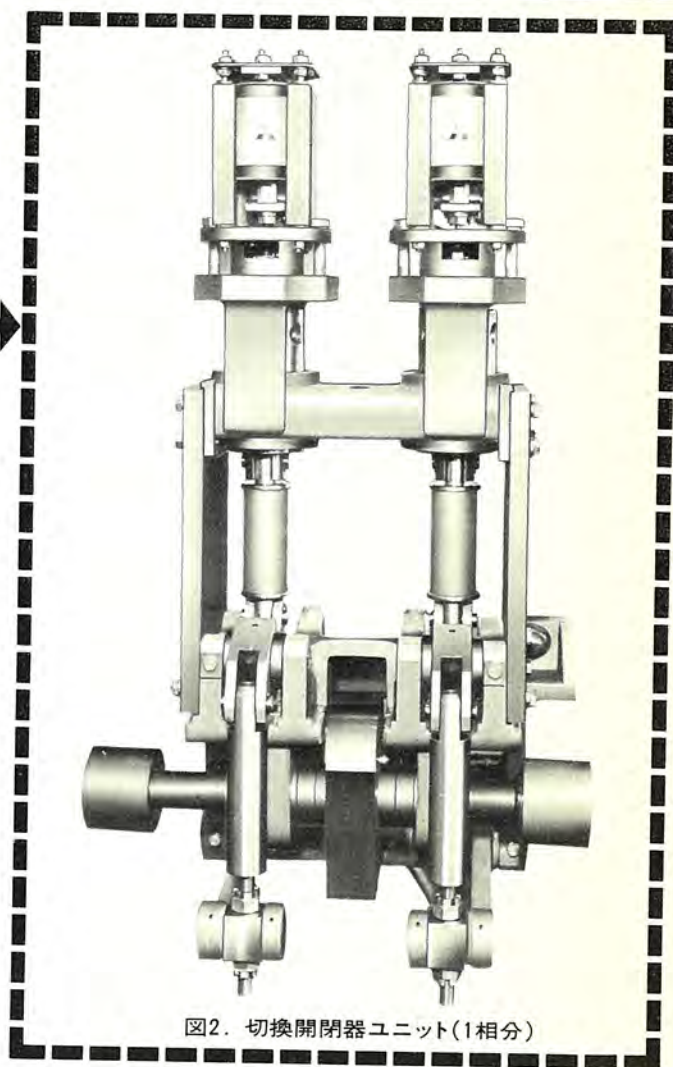


図2. 切換開閉器ユニット(1相分)

- カートリッジ式真空スイッチユニットを採用しました
真空スイッチユニットは、カートリッジ式構造ですから、複雑な調整なしで簡単に取換えられます。

仕様

| 切 換 方 式 | リアクトル式 |
|-----------|------------------------------|
| 定格ステップ電圧 | 400V (タップ選択器の改造によって1800Vまで可) |
| 定格通過電流 | 420A |
| タ ッ プ 点 数 | 33点 |
| 切 換 時 間 | 1.5秒 |