

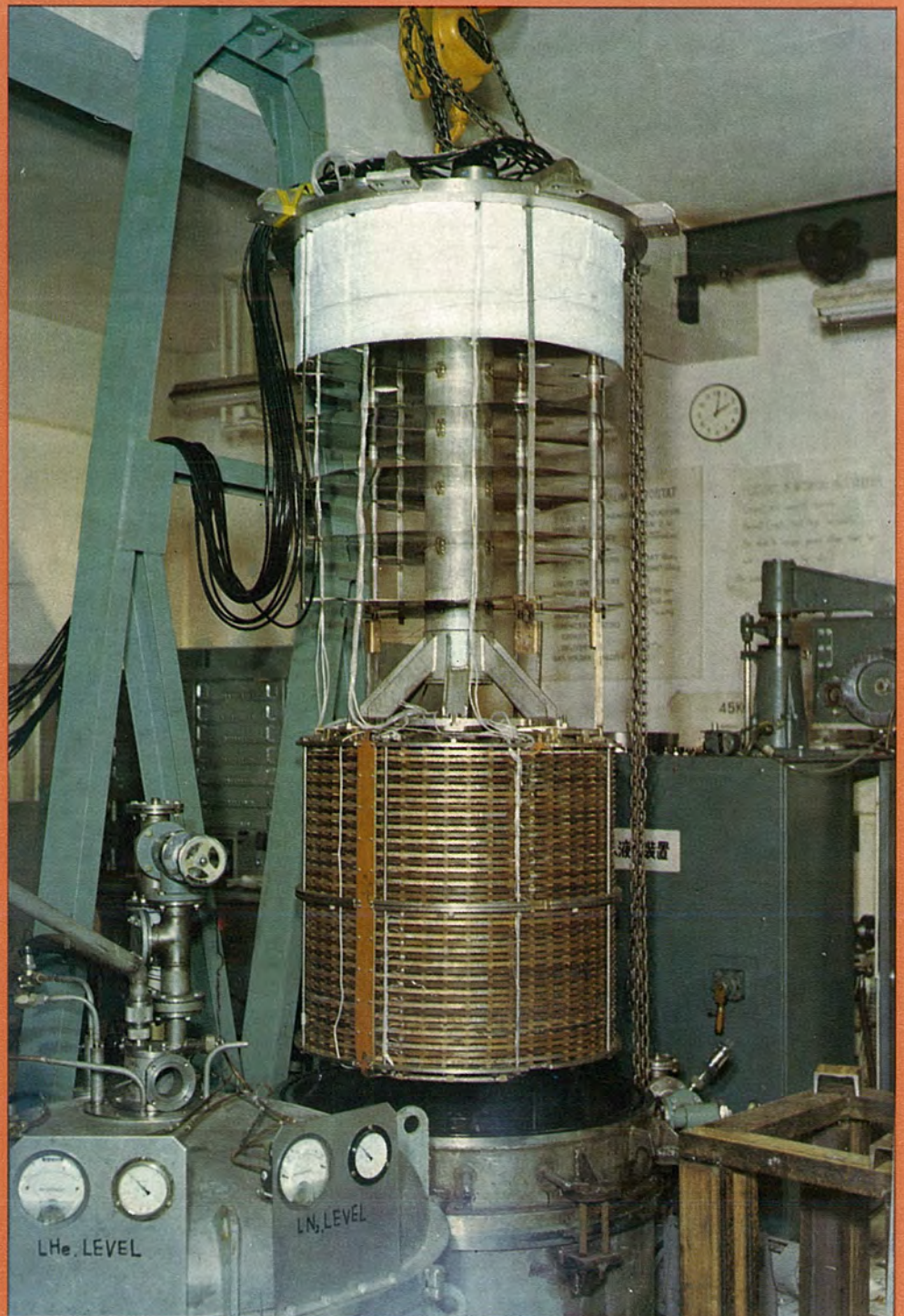
MITSUBISHI DENKI GIHO 三菱電機技報

Vol.43 December 1969

MHD 発電特集

12

MHD発電研究用75キロガウス大形超電導電磁石



未来を開発する





MHD 発電特集

目次

《特集論文》

MHD 発電開発の現状	伏見光造	1581
MHD 発電用超電導磁界装置	明石克寛・荻野 治・岩本雅民・佐藤 隆	1589
70 kG 超電導ケーブルの開発研究	石原克己・橋本康男・田口 修・小島英則・小俣虎之助・田中光雄・平田郁之・菅原 宏	1599
75 kG 大形高磁界超電導電磁石(I)—その設計と製作—	岩本雅民・佐藤 隆・平田郁之・山田忠利・蓬来 勝・藤原健三	1607
75 kG 大形高磁界超電導電磁石(II)—運転試験—	荻野 治・神頭徳治・岩本雅民・佐藤 隆・山田忠利・田中光雄・平田郁之	1615
45 kG 超電導電磁石冷却系(I)—計画設計および製作—	荻野 治・森口哲雄・相良泰一・中間清孝	1621
45 kG 超電導電磁石冷却系(II)—据付および運転試験—	荻野 治・森口哲雄・尾原昭徳・坂東修三・山口 進	1629
セミホット壁 MHD 発電ダクトに関する研究	池田 茂・是永定美・森川鉄也	1636
Ti-Nb-Ta 合金の高磁界超電導特性	田中光雄・小俣虎之助・橋本康男・石原克己	1642

《普通論文》

MELCOM-3100 ディスクオペレーティングシステム(2)—データ管理—	三井大三郎・魚田勝臣・広沢嘉教・新田俊晴	1649
電鍍電極による放電加工	加藤 強・片寄文隆	1655
MELDAS-1120 形 A 制御弁自動試験装置	中司修慈・桑田 博・篠田東吾・岸浪清二郎	1664
当社における電力機器の耐震強度の研究状況	志村 勲・高橋康英・篠原資直・奥津尚宏	1675
モールド絶縁材料	寺谷 宏・福島二郎・田嶋尚志・伊藤喜代之	1683
自動検針システム	武田克己・室田 慎・前田良雄・杉山康夫	1691

《技術講座》

システム理論(V)—数値計画と制御—	田村坦之	1696
--------------------	------	------

《技術解説》

パネルディスプレイの各種方式	吉澤達夫・伊吹順章	1704
----------------	-----------	------

《新製品紹介》

LBH 形無励磁作動式電磁ブレーキシリーズ化完成・住宅向け新形石油温水機発売	1715
--	------

《ニュースフラッシュ》

三菱電解加工機ダイヤシムカ MC-100 V-B 製品発表・1,800 V, 100 A, 30 μ s の高圧大容量高速スイッチング用サイリスタを開発 ・自動車の安全性および性能向上を図る各種エレクトロニクス装置を開発	1717
---	------

《総目次》

1723

《表紙》

MHD 発電研究用 75 キロガウス大形超電導電磁石

工業技術院大形プロジェクト「MHD 発電」の委託研究によって開発し、目標を上回る 75 キロガウスの高磁界の発生に成功した大形超電導電磁石で磁界の強さと大きさの点で国内はもとより世界でも例の少ない画期的なものである。

外径 800 mm, 内径 100 mm, 高さ 810 mm, 重量 1,600 kg のバンケーキ形で、超電導線には当社で開発された安定化 Ti-Nb-Ta 三元合金線約 120 km が使用されている。超電導励磁は液体ヘリウム中に超電導電磁石を浸した状態で行なわれ、励磁電流が 800 A のとき 75 キロガウスの高磁界が安定に発生できることが確認された。





SPECIAL EDITION FOR MHD POWER GENERATION

CONTENTS

SPECIALLY COLLECTED PAPERS

MHD Power Generation and Its Present State.....	K. Fushimi.....	1581
Superconducting Magnet for MHD Power Generation.....	K. Akashi • O. Ogino • M. Iwamoto • T. Satō.....	1589
Development of Composite Superconductors for 70 kG Magnet		
.....K. Ishihara • Y. Hashimoto • O. Taguchi • H. Kojima • T. Komata • M. Tanaka • I. Hirata • H. Sugahara.....		1599
75 kG High Field Large Superconductive Magnet Part I —Design and Construction—		
.....M. Iwamoto • T. Satō • I. Hirata • T. Yamada • M. Hōrai • K. Fujiwara.....		1607
75 kG High Field Large Superconductive Magnet Part II —Its Operation and Test Results—		
.....O. Ogino • N. Kanto • M. Iwamoto • T. Satō • T. Yamada • M. Tanaka • I. Hirata.....		1615
Helium Refrigeration System for 45 kG Superconductive Magnet Part I —Its Design and Construction—		
.....O. Ogino • T. Moriguchi • Y. Sagara • K. Nakama.....		1621
Helium Refrigeration System for 45 kG Superconductive Magnet Part II —Its Installation and Operation—		
.....O. Ogino • J. Moriguchi • A. Ohara • S. Bandou • S. Yamaguchi.....		1629
Study on a Semi-Hot Wall Duct for MHD Generators.....	S. Ikeda • S. Korenaga • T. Morikawa.....	1636
Superconducting Characteristics at High Magnetic Field in Ti-Nb-Ta Alloys		
.....M. Tanaka • T. Komata • Y. Hashimoto • K. Ishihara.....		1642

TECHNICAL PAPERS

MELCOM-3100 Disk Operating Systems (Part 2) —Data Management—		
.....D. Mitsui • K. Uota • Y. Hirosawa • T. Nitta.....		1649
Electric-Discharge Machining with Electroformed Copper Electrode.....	T. Kato • F. Katayose.....	1655
Automatic Test Rack for Type A Air Control Valves.....	S. Nakatsuka • H. Kuwata • T. Shinoda • S. Kishinami.....	1664
Recent Research on Electrical Equipment Strength against Earthquake		
.....I. Shimura • Y. Takahashi • Y. Shinohara • N. Okutsu.....		1675
Casting and Molding Materials for Electrical Insulation.....	H. Teratani • J. Fukusima • H. Tajima • K. Ito.....	1683
Automatic Metering System.....	K. Takeda • S. Murota • Y. Maeda • Y. Sugiyama.....	1691

TECHNICAL LECTURE

Mathematical System Theory (V) —Mathematical Programming and Control—.....	H. Tamura.....	1696
--	----------------	------

TECHNICAL ELUCIDATION

A Review of Some Panel Display Systems.....	M. Yoshizawa • S. Ibuki.....	1704
---	------------------------------	------

NEW PRODUCTS

		1715
--	--	------

NEWS FLASH

		1717
--	--	------

GENERAL CONTENTS

		1723
--	--	------

COVER :

75 Kilogauss Superconducting Magnet for the Investigation of MHD Power Generation

Illustrated is a large superconducting magnet developed in a large R&D project "MHD power generation" entrusted by the Agency of Industrial Science & Technology. Being successful in producing high magnetic field of 75 kilogauss that exceed the target value, it is an epochal unit seldom found domestic and abroad in the point of the magnetic field intensity and size. It is of piled-up pancake type with an outer diameter of 800 mm, inner diameter of 100 mm and weight of 1,600 kg. Superconducting wires used for the magnet, being 120 km long, are made of stabilized Ti-Nb-Ta ternary alloy developed by the Company. Energization of the magnet is made in a state of submerging it in liquid helium bath. It has been certified that stabilized high magnetic field of 75 kilogauss is produced when exciting current is 800 A.

UDC 537.52:621.311.001.5

MHD発電開発の現状

伏見光造

三菱電機技報 Vol. 43・No. 12・P 1581～1588

MHD発電のうち、おもに化石燃料を熱源とするものについて、発電の原理、発電機の形式および発電機内で生ずる現象について解説する。

MHD発電機が実用される場合の主要な形式であると予想されているMHD—汽力の組み合わせ発電所につき、それを構成する各要素と系全体の構成についての研究開発の現状と問題点を述べる。

最後に、世界各国におけるMHD発電開発の状況をアメリカ・ソビエトおよびわが国を主体に述べる。わが国については、大形プロジェクトによる開発の現状に重点を置いて報告する。



UDC 621.318.34:537.312.62:621.59

MHD発電用超電導磁界装置

明石克寛・荻野 治・岩本雅民・佐藤 隆

三菱電機技報 Vol. 43・No. 12・P 1589～1598

MHD発電機に適用する超電導電磁石を紹介し、実用化の面から再検討する必要を述べている。MHD発電に応用するための超電導線材、くら形超電導電磁石および冷却系を論じ、さらに将来の大形化に対する新しい開発テーマの一つとして、S I形超電導電磁石を採り上げ、100kW発電機に適用した場合の諸元例を示した。



UDC 537.312.62:621.315.2

70kG超電導ケーブルの開発研究

石原克己・橋本康男・田口 修・小島英則・小保虎之助・田中光雄・平田郁之・菅原 宏

三菱電機技報 Vol. 43・No. 12・P 1599～1606

MHD発電機の効率を高めるためには、少なくとも70kG程度の高磁界が必要であるといわれている。このため工業技術院MHD大形プロジェクト研究の一つに、70kG超電導ケーブルおよび電磁石の開発研究が取り上げられ、当社はこの研究を受託した。

本研究で開発された超電導ケーブルは、高磁界用のTi-Nb-Ta系超電導線と高純度の無酸素銅を複合したはんだ埋め込み形ケーブルである。この超電導ケーブルは80kGの磁界中で1,150Aの臨界電流を有し、これを用いて製作した超電導電磁石により、75kGという高磁場の発生に成功した。本文では、70kG超電導ケーブルの製法および特性について研究した結果を述べる。



UDC 621.318.34:537.312.62

75キロガウス大形高磁界超電導電磁石(I)—その設計と製作—

岩本雅民・佐藤 隆・平田郁之・山田忠利・蓬来 勝・藤原健三

三菱電機技報 Vol. 43・No. 12・P 1607～1614

75キロガウス大形高磁界超電導電磁石の開発に成功した。当電磁石は当社の中央研究所、神戸製作所、相模原製作所の協同で開発したものである。励磁試験の結果、内径100mmの空間に75キロガウスの高磁場を安定に発生させることに成功した。当電磁石は内径100mm、外径800mm、高さ800mm、重量1.6トン、の大きなパンケーキ形超電導電磁石であり、世界でも有数の大形超電導電磁石である。当超電導電磁石の概要および設計、製作について述べた。



UDC 621.318.34:537.312.62:621.59

75キロガウス大形高磁界超電導電磁石(II)—運転・試験—

荻野 治・神頭徳治・岩本雅民・佐藤 隆・山田忠利・田中光雄・平田郁之

三菱電機技報 Vol. 43・No. 12・P 1615～1620

75キロガウス大形超電導電磁石の安定かつ安全な励磁運転に成功した。この励磁運転試験の成功により超電導線材の製作技術、超電導電磁石の設計、製作技術、冷却技術、励磁制御技術等の優秀性がここに実証された。75キロガウス大形超電導電磁石の励磁試験に関して、冷却装置、冷却方法、励磁制御装置、制御方法、試験方法、およびその結果について大要を記し、なんのトラブルもなく所期の計画とおり試験が遂行されたことを述べる。



UDC 621.59

45キロガウス超電導電磁石冷却系(I)—計画設計および製作—

荻野 治・森口哲雄・相良泰一・中間清孝

三菱電機技報 Vol. 43・No. 12・P 1621～1628

工業技術院の大形プロジェクト「MHD発電」の委託研究により開発した45キロガウス超電導電磁石冷却系の計画設計および製作に関する報告である。使用するヘリウム液化装置は28t/hの液化能力・冷凍機は20°Kにおいて400ワットの冷凍能力を持つ。この冷却系によって、重量12tonの電磁石を約100時間で超電導状態にすることができる。冷却方式に20°K予冷形クローズドループ方式を用いているので、ヘリウムガスの消耗がなく経済的な運転が可能である。



UDC 621.59

45キロガウス超電導電磁石冷却系(II)

—据付および運転試験—

荻野 治・森口哲雄・尾原昭徳・坂東修三・山口 進

三菱電機技報 Vol. 43・No. 12・P 1629～1635

MHD発電の研究開発の一環として45キロガウスくら形超電導電磁石の運転試験が、電気試験所において行なわれ、目標磁界を上回る47キロガウスを発生して無事完了した。この電磁石の極低温冷却には、20°K予冷形クローズドループ方式の本冷却系が実用され、電磁石の予冷、ヘリウムの連続液化供給、蒸発ヘリウムガスの回収貯蔵および液化などの所期の特性が確認され、運転操作に対する問題点をつかむことができた。ここに電磁石の予冷に用いた20°K冷却系の特性試験、試験棟への据付調整および運転試験について述べる。



UDC 537.52:621.311.001.5

セミホット壁MHD発電ダクトに関する研究

池田 茂・是永定美・森川鉄也

三菱電機技報 Vol. 43・No. 12・P 1636～1641

MHD発電ダクトは、MHD発電プラントの構成機器のなかで、開発上最も多くの技術的問題を有しているものの一つである。現在、実用機には水冷壁発電ダクトとセミホット壁発電ダクトの2種類が提案され、それぞれその開発研究が行なわれている。しかしいずれの発電ダクトも多くの問題を有しており、実用化までにはまだかなりの研究が必要である。

本論文は、これらの発電ダクトの問題点を明らかにするとともに、その一解決策として新しい構成法によるセミホット壁発電ダクトを提案し、実験的な考察を加えている。



UDC 537. 312. 62

Ti-Nb-Ta合金の高磁界超電導特性

田中光雄・小俣虎之助・橋本康男・石原克己

三菱電機技報 Vol. 43. No. 12・P 1642～1646

超電導マグネットを用いて磁界を発生しようとする場合、50～60kG、程度までは合金系超電導線を用い、それ以上の高磁界に対しては化合物系超電導材料を用いるのが普通である。しかし、化合物超電導材料は高価であるので、できるならば、さらに高磁界まで合金超電導材料でカバーすることが望ましい。

当社で開発に成功したTi-Nb-Ta合金は、合金超電導材料中では最高の臨界磁界を持つことが知られているが、われわれはこの合金の臨界磁界特性と、80 kGまでの臨界電流特性について調べ、この合金が高磁界での使用に耐えるものであることを確認した。○ 本文ではこの結果について述べる。

UDC 681. 3. 007. 3

MELCOM-3100 ディスク オペレーティング システム(2) —データ管理—

三井大三郎・魚田勝臣・広沢嘉教・新田俊晴

三菱電機技報 Vol. 43・No. 12・P 1649～1654

最近、経営情報システム(MIS)に関する研究が盛んに行なわれており、その中心的な課題のひとつに情報の集中化がとりあげられている。このような情報の集中化を実現するのはいうまでもなくユーザの応用プログラムであるが、これの具体化のためにはデータ管理を中心とするオペレーティング・システムの諸機能によらなければならない。

ここでは、MIS的なデータ管理を主要目標のひとつとして設計されたMARK-IIIオペレーティング・システムのデータ管理についてディスクを中心とした長点を○ 記述する。

UDC 621.9.047.7

電鍍電極による放電加工

加藤 強・片寄文隆

三菱電機技報 Vol. 43・No. 12・P 1655～1663

放電加工法によって型加工を行なう場合、電極をいかに容易にそして寸法精度の良好なものを製作するかということが、大きな技術的問題としてとりあげられる。

この問題を解決するため、われわれは銅電鍍電極を用いた放電加工法に着目し、非常に良好な結果を得た。この論文では放電加工用銅電鍍電極の製法とそれを用いた放電加工法について述べる。また、応用例として、絞り形、シェルモールド形、ゴム成形形、プラスチックモールド形、および分割電鍍電極を用いたマルチパワー回路方○ 式による分割放電加工例についても述べ、今後、電鍍電極を用いた放電加工を行なうための参考に供する。

UDC 625. 2 -592.004. 51

MELDAS-1120形 A制御弁自動試験装置

中司修慈・桑田 博・篠田東吾・岸浪清二郎

三菱電機技報 Vol. 43・No. 12・P 1664～1674

従来列車用ブレーキの空気制御弁の検査は手動操作により行なわれていたが、この方法では検査員の個人差をのがれることができず、したがって一様な性能の合格品を得ることが困難であった。

本自動試験装置はあらかじめプログラムされたシーケンスに従って、自動的にすべての試験を行なうので、上記のような個人差のほころひがなく、性能に対する信頼性を増し、試験に要する経費を節減するものである。

UDC 621. 31-752

当社における電力機器の耐震強度の研究状況

志村 勲・高橋康英・篠原資直・奥津尚宏

三菱電機技報 Vol. 43・No. 12・P 1675～1682

送電系統の超々高圧化による機器の地上高の増大や、変電施設のコンパクト化による複雑な機器の出現などは、電力機器の耐震強度を大きな問題として提起している。一方、建築業界は超高層ビル化の時代を迎えて、耐震強度の動的検討が盛んに行なわれている。

当社ではいち早く電力機器の耐震強度の研究に着手し、新しい試みを行なってきた。中でも、ディジタルコンピュータによる構造物一般の応答計算と電油サーボ形大形加振機による実体の任意波形加振は独自なものであり、動的検討法に寄与するところ大で○ あった。この論文では、当社で行なった各種の耐震強度の検討法を紹介し、その成果の一端を報告する。

UDC 621. 315. 6:678. 02

モールド絶縁材料

寺谷 宏・福島二郎・田嶋尚志・伊藤喜代之

三菱電機技報 Vol. 43・No. 12・P 1683～1690

電気機器の絶縁には種々の材料が種々の形態で使用されているが、機器の小形化、保守点検作業の軽減などの面から、固体絶縁料による絶縁、接着、被覆等を兼ねた一体化構造の絶縁処理方式、すなわちモールド絶縁の採用が増加しつつある。機器の性能向上にともない、モールド絶縁材料として要求される性質もきびしくなっている。ここでは、モールド絶縁材料開発にたいする考え方と、エポキシ注形樹脂、エチレンプロピレンゴムを中心に最近の動向および問題点について述べた。○

UDC 621. 316. 78:621/5

自動検針システム

武田克己・室田 慎・前田良雄・杉山康夫

三菱電機技報 Vol. 43・No. 12・P 1691～1695

電力・ガス・水道の各事業を対象とした自動検針の必要性和利点を述べ、現状の検針業務を部分的に改良する方法との比較を行なう。次にシステムとしての問題点を明らかにする。すなわち

- (1) システム構成
- (2) 伝送路……専用線・電話線・配電線
- (3) メータの発信機構

の三つである。第3に以上の条件をふまえた上で試作した装置の概要につき述べる。主たる仕様は(1)中継式(2)専用線マグネットとリードスイッチの組み合わせによる発信機構で○ ある。伝送路に電話線・配電線を使う方法、情報発生源が非常に多いのでそれらをいかにうまくまとめるか、メータから信号をとり出す方法等解決すべき問題は多い。

UDC 515.91

システム理論(V) —数理解計画と制御—

田村坦之

三菱電機技報 Vol. 43・No. 12・P 1696～1703

システム理論講座の一環として、本文ではシステムの最適化理論のtopicsをとりあげて解説する。

まず、従来ORの理論分野で発達してきた数理解画法と、制御の分野で発達してきた最適制御理論の橋わたしの役を果たす関数空間における数理解画法の中で、応用上特に重要と思われる双対性の定理を説明すると同時に、この定理の応用例をいくつかひろって解説する。

次に繰返し法による最適化のアルゴリズムのtopicsとして、最大傾斜法と共役傾斜法、それに大規模シ○ ステムの最適化を図る分解原理とマルチレベル法を解説する。

UDC 621.397.62

パネル ディスプレイの各種方式

吉沢達夫・伊吹順章

三菱電機技報 Vol. 43・No. 12・P 1704～1713

パネル ディスプレイの各種方式について現在知られている10方式を取上げその原理、特長、欠点などについて述べた。すなわち、真性EL、注入形EL、フランツケルディシュ効果、プラズマ、電気化学的效果、ヘラバタイト、放電液晶、電球配列、強誘電体の電界による偏向をそれぞれ利用した方式である。このうち真性EL、注入形EL、プラズマ、液晶の各方式がとくに注目され、各社でそれぞれの立場で検討されている。またパネル ディスプレイ装置を完成するために必要な関連技術、たとえばパネル ディスプレイのクロストーク効果、安価なスキャンニング方式についても現在知られている範囲で述べた。

MHD 発電開発の現状

伏見 光造*

MHD Power Generation and the Present State

Electro-Technical Laboratory Kozo FUSHIMI

This article describes the principle of the MHD power generation, the types of generators in use and phenomena presented in side of generators in connection with the ones using fossil fuel as a source of heat among the equipment in general.

Elucidation is made, regarding a power plant in the combination of MHD and steam power anticipated as a principal type when MHD is put into practical use, on the present of the study and development of each component element and constitution of the whole system together with a number of problems being posed with them.

Lastly the situations of the development of MHD generation in various countries in the world is explained with America, Soviet and Japan as chief points of discussion. As for Japan, report is made on the present state of the development in reference to a large sized project as an essential topic.

1. ま え が き

MHD 発電は昭和35年ころから世界の各国で競ってその研究が開始された。高速度のプラズマ流から直接電気を取り出すという新しい発想と、十～百万kWの壮大な発電機が作り得ることは各国の科学・技術者の意欲を強くかり立てたことである。

またMHD発電機は、これを火力発電系と組み合わせることによって50～55%の全熱効率が得られ、在来形式の火力発電所の効率に比べ大きな飛躍を可能とする。昭和40年においてわが国の火力発電所による電力供給量が1,000億kWhであったのに対し、同50年には2,700億kWhの供給が期待されている。電力需要がこのように傾向で増大するとき、すでに現在燃料の約70%を輸入しているわが国にとって、MHD発電は経済的にもまた大きな魅力あるテーマである。

ご承知のように、MHD発電方式の開発研究は昭和41年通産省の大形工業技術開発制度、いわゆる大形プロジェクトが発足するとともにまずその一テーマとして取り上げられた。このことは、うえに述べたMHD発電の意義の重要性が通産省の立場から認められたものとして大いに喜ばしい。

わが国においても、かつて何種類かの独創的な工業製品の誕生を見た。しかしそれらは主として簡単な部品や単一の材料であって、「日本人はすでにでき上がった製品の改良にはすぐれているが、複雑かつ大形の装置の開発の例がない」といわれてきた。大形プロジェクトはそのような世評に対する一つの挑戦である点に大きな意味がある。とくにMHD発電は各国ともに開発途上にあり、最も大形プロジェクトらしいテーマといえよう。

MHD発電の大形プロジェクトもいよいよ後半にはいった。この計画の成否はその直接の目的であるわが国の電力需給問題に大きく影響するであろうが、それが大形開発研究としてわが国初めての試みともいえるだけに、研究開発全般の今後の動向にも大きな指針となろう。大げさにいえば、わが国という土壌が大形開発の育成に適するか否かを定めるTest caseとも言えるのである。

2. MHD 発電とは

2.1 定義と種類

導電性を持った流体の磁界中での振舞いを研究する分野は Ma-

gneto hydrodynamics と称されるが、MHD の名称はそれに由来する。つまりMHD発電は導電性流体と磁界の相互作用による発電をいう。流体として、液体金属(ナトリウム、カリウムなど)とプラズマが考えられており、電解液は実用性に乏しいようである。

プラズマには、火力発電用として石炭・石油の燃焼ガスをベースとするものと、アルゴンやヘリウムをベースとするものがあり、いずれもカリウムKかセシウムCsを添加して、これらアルカリ金属の電離によってプラズマが作られる。後者ではちょうどけい光灯内のプラズマのように、比較的低いガス温度において高いエネルギーの電子による電離を利用して、つまり非平衡状態(電子と気体分子が熱平衡にない)のプラズマを作って発電に用いる方法が研究されている。

非平衡プラズマと液体金属とはおもに原子炉を熱源とするMHD発電への利用が考えられている。この場合、流体は閉じたループ中を循環しながら加速(加熱)と発電を繰返す方法が採られ、クローズサイクル方式と呼ばれる。化石燃料のものは使用後のガスは大気へ放出され、オープンサイクル方式と称される。大形プロジェクトではオープンサイクルが研究の対象となっているので、以下には主としてこの方式について述べる。

2.2 原理

2.2.1 発電の原理

在来の直流発電機の種類に単極機と称されるものがあり、その一つの形式に図2.1のような円筒形発電機がある。これでは銅製の円筒に対し同図の点線で示すように、その半径方向に磁界Bを加え

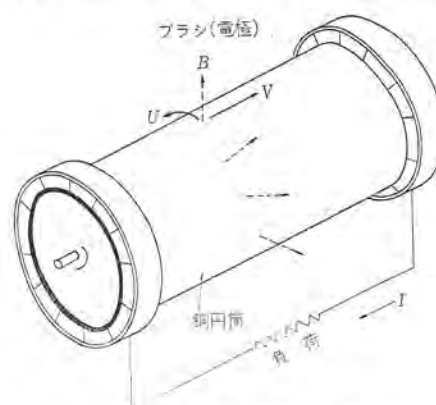


図 2.1 円筒形単極発電機
Cylindrical type single pole generator.

る。円筒を周辺速度 u で回転させるとき、ファラデーの法則（フレミングの右手の法則）による起電力 V をブラシを介して取り出すことができる。この導体の回転運動を（磁界もろとも）直線状に展開し、銅帯のわ代りにプラズマを間断なく流せば MHD 発電機となる。つまり MHD 発電機は直線状の単極発電機であるといえる。簡単に計算されるように、このような発電機の出力密度（導体単位体積当たりの出力）は導体の導電率、導体速度の 2 乗、磁束密度の 2 乗の積に比例する。

この際(1)直線化すれば、導体が発電部分へ出入する個所において損失が生ずる、(2)導体がプラズマであるための問題が生まれてくる。(1)の端部損失については、発電機が細長くなればその比率は少なくなるし、流体中に絶縁板をおいて環状電流を減少させるなどの手段もある。(2)については 2.2.3 項に述べる。

2.2.2 プラズマの電気伝導

気体を十分高温にすると電離（いわゆる熱電離）するに至る。電離した気体に電界を加えると、電子は中性分子との衝突、陽イオンや他の電子の静電力によってその動きを妨げられながら、全体として電界方向に定常的な速度で移動するので、プラズマは電気伝導性を持つ。この際、導電率は単位体積当たりの電子の個数に比例し、電子の中性分子や荷電粒子との実効的な衝突断面積に逆比例する。陽イオンは電子に比べて電界による加速が著しく少ないので電気伝導に直接与えることは少ないが、電子の空間電荷効果を中和することにより導電性に寄与する。

化石燃料の燃焼ガスの実用的な到達温度 2,500°K 程度においてある程度の電離を行なうものに K や Cs がある。これらは普通 K_2CO_3 、 K_2SO_4 などの形でガス中に投入される（これをシードするという）。そのようなガスの導電率 σ と温度の関係の一例を図 2.2 に示す。

一見、シード物質の投入量を多くすれば σ が増すと考えられるが、

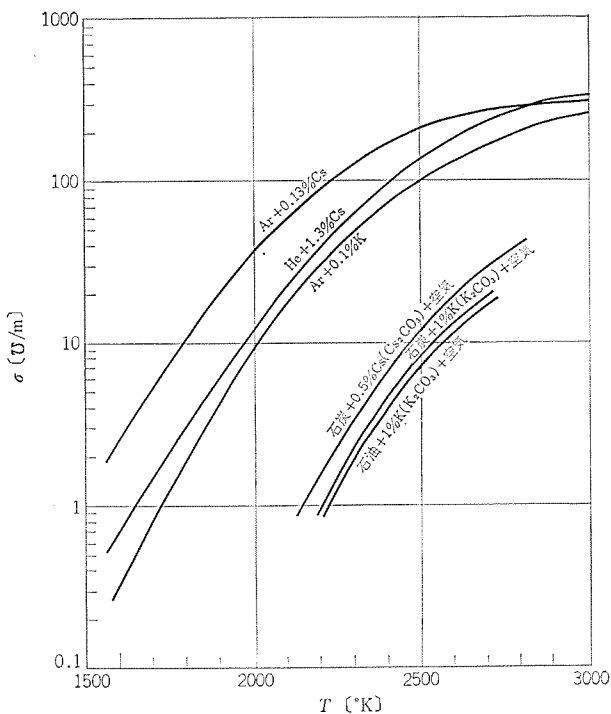


図 2.2 MHD 発電用高温ガスの熱平衡導電率の計算例（1 気圧）

Calculation example of thermally balanced conductivity of high temperature gas for MHD generation.

実際には(1) K 原子や Cs 原子*の衝突断面積が大きいので電子の個数は増しても移動速度が下がる。(2) K_2CO_3 などが分解して K 原子になるためのエネルギーが必要なので、同じ条件（燃料の種類や燃焼用空気の温度・圧力）での燃焼ガス温度が低くなる。などの点で必ずしも有利でない。さらに(3)シード物質の回収が 100%行なわれないときは未回収分の価格が電力費にはね返ってくる（特に Cs は高い）ことがあって、普通 K や Cs の重量比が 1% 程度となるようにシードされる。

図 2.2 に見られるように、このようなプラズマの導電率はおおよそ、2,000~2,200°K 以下では急速に低下する。したがって MHD 発電機の使用温度の下限は大体これらの値までで**、燃焼ガスがその温度でなお有している熱量は普通、燃焼用の空気加熱（これが十分に行なえぬと燃焼ガス温度が上がらず MHD 発電はできない）と汽力発電系の熱源に用いて発電所の全熱効率を上げる方法がとられる（図 3.1 参照）。

2.2.3 発電機内の導電現象

磁界 B を、これに垂直な方向に速度 u をもって横切ろうとする電子は磁界にとらえられ、磁力線を中心に半径 $r \propto u/B$ 、角周波数 $\omega_e \propto B$ の回転運動を行なう。次に、均一な磁界中にある電子が磁界と垂直方向から電界や重力のような均一な力を受けると、この力による動きと上記の回転運動が合成され、図 2.3 のように磁界と力の双方に垂直な方向に動く。

以上は他の粒子との衝突のない場合であるが、MHD 発電機内では電子はガス分子の衝突ごとくばらばらの力を受ける。それらの力は平均するとガス流方向に働くので、電子は図 2.3 の方向（発電機の電極がある方向）への動きをも持つが、同図のような幾何学的な軌跡は分子との衝突ごとに乱され、流れ方向へも押し流されることになろう。このような電子の動きの平均的なものを表わす量として、上記の回転運動の周波数 ω_e と、電子が他の粒子と衝突してから次に衝突するまでの平均時間、つまり電子が自由に運動できる時間の平均値 τ_e との積が考えられる。

たとえば、ある ω_e を持つ条件において、 τ_e が大きい場合には、電子の動きは図 2.3 の場合に近く、 τ_e がごく小さければ電子は電極方向に向いながらも下流のほうにも大きく流されることになろう。さらに発電機内では電極方向の電界がある。それは負荷電流と負荷抵抗の積で与えられる電圧が電極間に加わるからである。電界により、電子はちょうど図 2.3 を 90 度回転した状態のように流れ方向への加速を受ける。

* ガス中の K や Cs 原子のうち、電離しているのは 1% 程度で、陽イオン状態にあるものより原子状態のものははるかに多い。

** MHD 発電機の最低ガス温度を何度にするかは、発電所の経済性を考慮して決められる。

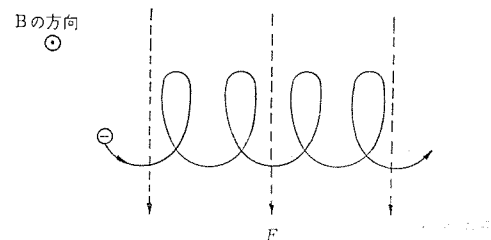


図 2.3 均一な力 F とこれに垂直な磁界 B の作用を受ける電子の運動（力 F の代りに電界が作用するときは F と逆方向の電界のときに電子は同じ方向に動く）
Motion of electrons subjected by uniform force F and magnetic field B vertical to F .

陽イオンは電極方向にほとんど動かずに流れに乗って移動するものとする、上記の二つの原因による力を受けて電子は一般には図 2.4 のように、流れ方向と電極方向の動きを持つことになろう。その場合、電子と陽イオンの流れ方向における位置の差は $\omega_e \tau_e$ の大きいほど大きく、かつ電極間電界の小さいほど（最も小さいのは負荷が短絡された状態である）大きくなるものと考えられる。

このように、MHD 発電機では負荷電流をとることによって流れ方向に電荷分離を生じ、それに応じた流れ方向の電界が発生する。この電界をホール電界と称し、 $\omega_e \tau_e$ をホール係数と呼ぶ。ホール係数は一般に粒子密度と粒子の電子との衝突断面積が小さいほど、また磁界が強ければ強いほど大きくなる。

プラズマを導体とする発電機のもう一つの問題点は、電極とプラズマ間の電流の授受の点にある。特に陰極に安定な電子放射の必要なのが後述の電極問題をやっかいなものとしている。

2.3 MHD 発電機の形式と動作

現在、実験に供されている発電機のほとんどは図 2.5 のような形式のものである。同図(a)の形ではホール電圧を電極が短絡してホール電流が流れ損失を増す。普通は(b)~(d)のように電極を多数に分割して使われる。(b)はファラデー起電力を利用するもの、(c)はファラデー起電力を短絡してホール電流を用いるもの、(d)は両者の中間形と見られる。実験用発電機のチャネルの実例については森川氏ほかの論文を参照されたい。

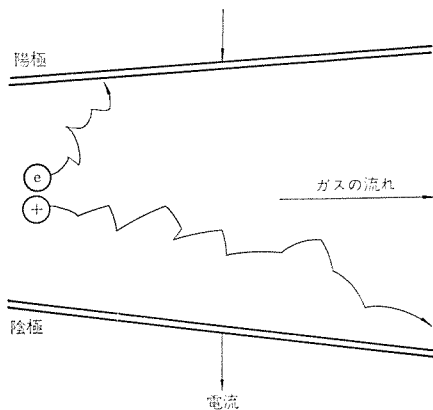


図 2.4 MHD プラズマ中の電子と陽イオンの動き
(磁界は紙面に垂直にある)
Action of electrons and cation in MHD plasma.

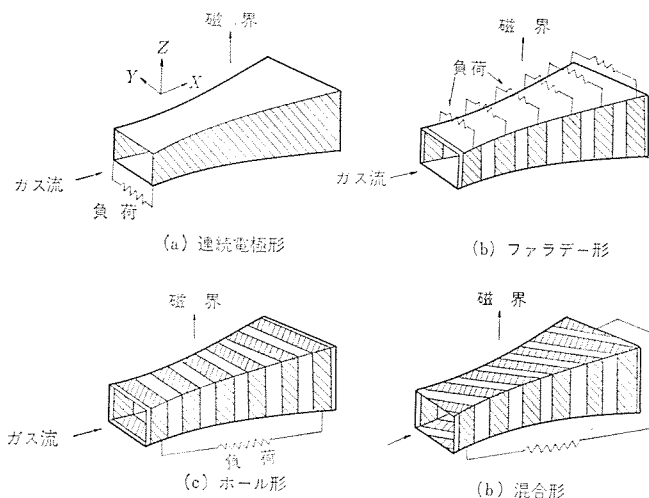


図 2.5 MHD 発電機の形式
Form of MHD generator.

たとえばファラデー発電機において出力を取り出すと、ガス流と直角方向にプラズマ中を流れる負荷電流と磁界の相互作用により、フレミングの左手の法則に従ってガス流を押し戻そうとする力が働く。ガス流はこの力に抗して仕事をする（発電する）わけであるが、これは普通のカスタム発電機におけるのと似た現象である。後者では発電機電流と磁界の間の力により回転子に逆トルクが生じ、これがタービン翼を介してガス流への抗力として働く。このように MHD 発電機は直接発電方式ではあるが、従来のカスタムと発電機の動作が一個所で同時に行なわれているものとも考えられる。

3. MHD 一気力発電所とその技術上の問題点

MHD 発電機には、単独でピーク負荷用または特殊な電源（4 章参照）に用いる試みもある。しかし開発のおもな目的は、図 3.1 にその基本形式を示すように、気力発電系と組み合わせて高い効率の火力発電所とすることにあると思われる。以下にこの種の発電所の開発の現状と問題点を述べる。

3.1 発電所を構成する各装置

3.1.1 燃焼器

3,000°K に近い燃焼ガスを取り扱うので、特に高い熱負荷で使用して壁面への熱損失を下げる必要がある。出力約 1,000 MW の発電所では約 750 kg/s の燃焼ガスが処理される。このような大容量の高負荷燃焼器についての経験がないので、漸進的手段として比較的小形の燃焼器を数個組み合わせる方法も考えられる。大形のガスタービン用燃焼器の技術の延長やジェットエンジンの燃焼器の技術の採用が考え

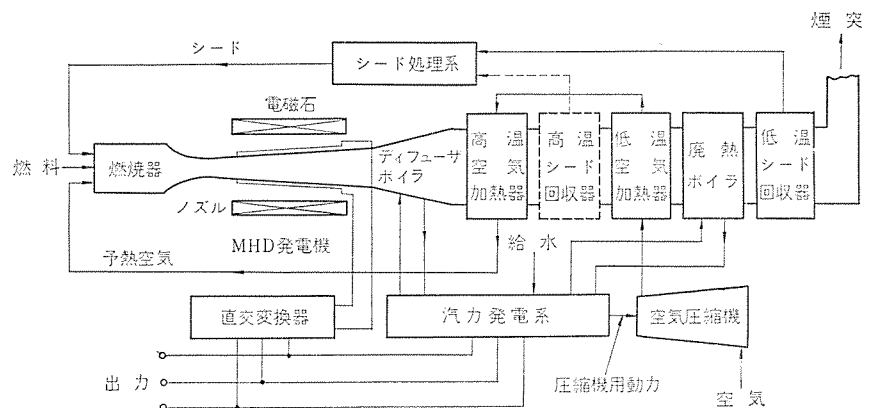


図 3.1 MHD-気力発電所の構成
Composition of MHD-steam generating plant.

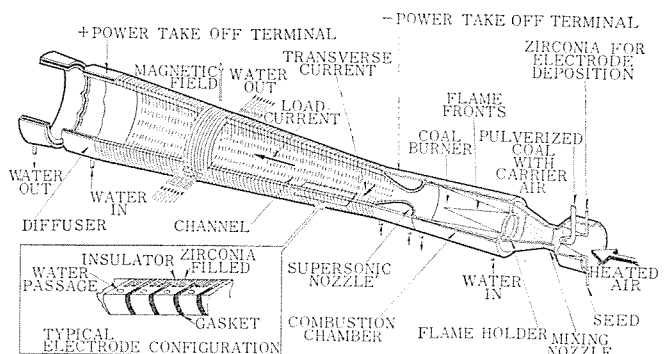


図 3.2 石炭燃焼のホール発電機 (AVCO)
Hall generator of coal combustion.

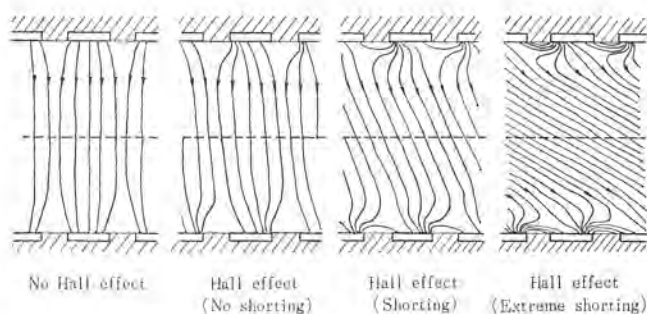


図 3.3 ホール効果による電流の集中
Concentration of current due to Hall effect.

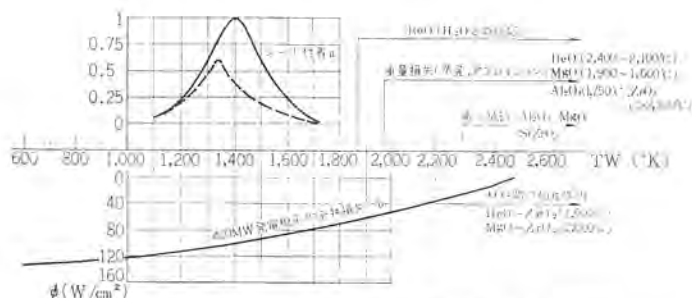


図 3.4 発電チャネル壁面に見られる諸現象と壁温の関係
Relation between various phenomena seen on the wall face of generating channel and wall temperature.

られる。図 3.2 は後者の一例で、燃焼器から電極の消耗を補給するアイデアが併用されている。

燃焼室の内壁には耐火物製と水冷金属壁とがあるが、ふく射損失が熱伝達損失に比べてかなり大きいので、前者を用いても熱損失を大きく下げることがむずかしい。

3.1.2 ノズル

燃焼ガスはここで 1,000 m/s 程度に加速される^{*}。流速とガス温度が高いので熱損失が大きく壁面の損傷 (abrasion) も大きい。端部損失に対する考慮も必要である。

3.1.3 発電チャネル

(a) 発電機の形式

図 2.5 に示した各形式の損失は次のとおりである。

ファラデー形は比較的多く実験機に採用されている。電極が無限に分割されているのが理想的であるが、現実には電極は有限の幅を持つ。その場合、ホール電界の影響のため $\omega_e \tau_e$ の増大とともに電極の一端に強く集中し (図 3.3)、プラズマの実効的な導電率が磁界のない場合の値 (図 2.2 の値) より減少する。この現象は他種の発電機でも起きるわけであるが、ファラデー形ではとくに問題となる。その一つの理由は、電極幅を小さくすることは相互に絶縁された多数の負荷を必要とすることになり、実用上限界を生ずることである。

商用 (交流) の発電所に用いられたファラデー発電機は、サイリスタ変換回路を経て、多数の一次巻線を有する変圧器を介して送電線につながる。幸か不幸か現在のサイリスタ 1 個の取り扱える電力はあまり大きくないので、負荷がある程度の数に分割されていることが、特に変換系を複雑化するものとはいえないようである。このような多巻線変圧器を含む変換系が安定に動作することはソ連の V-02 発電機で実証されている。

^{*} 流速には最適値がある。これをむやみにましても、電電力は増すが出力はかえってへる。それは、ガス流としての運動エネルギーを大きくすることはガスの熱エネルギー (ガス温度) の低下をきたし導電率が下がるからである。

ホールおよび混合形もかなり実験されており、前者には出力 20 MW のものもある。これらは出力端子が 1 対で済み構造も比較的簡単となるが、設計および運転条件に対する制約が大きい。たとえば流れ方向において導電率 σ があまり変化しない条件が必要で、かりに σ が一部で低下すると出力の低下が大きい (ファラデー型ではその部分の電極対の出力低下のみで済む)。

一般にホール型は理想的なファラデー形に比べて出力密度が低いが、 $\omega_e \tau_e$ の大きいときにはその差は小さい。逆に $\omega_e \tau_e$ の大きいときの現実のファラデー発電機は、先に述べた実効導電率低下の影響が大きい。そこでごく大まかな話ではあるが、たとえば 10 またはそれに近い $\omega_e \tau_e$ ではホールが、1 に近い場合はファラデーが、中間の $\omega_e \tau_e$ では混合形の発電機が有利であるという。

(b) 構造

(i) 絶縁壁 発電機の壁面に見られる現象のおおよその関係を図 3.4 に示す。同図から推定されるように、現在の耐火物をプラズマ温度に近い温度で用いる、いわゆる hot wall は実現しがたい。また壁面をシード物質が液状で付着する温度範囲 (K_2SO_4 で 1,300 ~ 1,600°K) で使用することは壁の絶縁性が著しく低下するので好ましくない。したがってこの範囲の上側に壁温を保つ semi-hot wall か、下側で使う cold wall に可能性が求められている。

前者では Al_2O_3 , MgO などの耐火物を裏面から冷却したものが、後者ではこれらの耐火物をさらに強く冷却したものか、金属の小ブロックを相互に絶縁して壁全体として絶縁性をもたせたいいわゆる peg-wall が用いられる。cold wall のほうがプラズマ流に対して概してじょうぶであるが、当然熱損失が大きい。

このほか、壁面に沿って低温のガス (たとえば空気) を送り込み、その被膜によって壁を保護する手段も考えられている。

(ii) 電極 電極は絶縁壁と同じく高温高速の燃焼ガス流に耐える性質のほか、プラズマとの電流の授受に適した性質、特に陰極には十分な電子放射性が要求される。たとえば水冷金属の陰極においても、電子放射を行なうために陰極点、つまり高温の輝点が発生してその部分の蒸発・消耗は避けがたい。そのために水冷金属電極では数百時間が寿命の限度となろう。

金属以外にも ZrO_2 , ZrB_2 , $LaCrO_3$, CeO_2 , SiC など多種多様の高融点材料が試みられている。しかし目下のところ、決定的な材料は見当らず、MHD 発電開発の最大の難点は電極にあるといえよう。研究の進行とともにその寿命も延びてきているが、当面の目標はソ連で建設中の V-25 発電機におけるように、1,000 時間の程度である。

電極の開発には材料自身の研究と併行してその使用法の検討も必要である。たとえば電極の消耗分を適宜補給するのの一方法であり、その具体例には図 3.2 に示した手段がある。これでは ZrO_2 電極を表面がねばねばする程度の温度で使用し、燃焼器から送った ZrO_2 粉がその表面に付着することを利用して 200 時間の寿命を得た。また適当な高融点金属が不活性ガス中では、アークの電極として長寿命を保つことを利用するものもある。この場合図 3.5 のように、MHD 発電機としての 1 個の電極は不活性ガスで保護された数対の電極よりなり、それらの間に点じたアークが MHD 電極の用をする。

3.1.4 超電導磁石

5 T 程度の磁界を作るものが実用されよう。それは、この程度の磁界の発電機を用いて熱効率 50 % 以上の発電所が可能と予想される (表 3.2 参照) ことと、さらに強磁界を採用しても、たとえば $\omega_e \tau_e$ の増大にもとづく種々のトラブルにより熱効率の飛躍的な上昇が

予期しがたいように、コイル 価格がばく大なものになるおそれがあるためである。

MHD 用としてすでに表 3. 1 のように、かなり大形のものが試作されている (なお、同表最下段のコイルは試運転を終えた)。現在のおもな目標はコイル 価格の低減とヘリウム 液化機の信頼性の向上であろう。

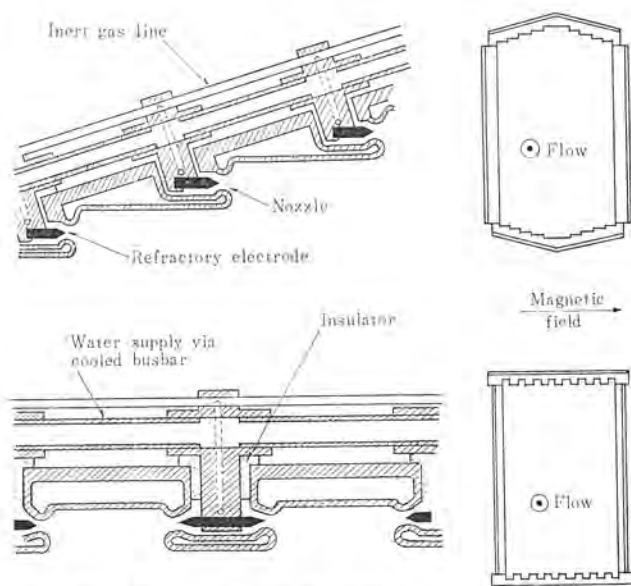


図 3. 5 アーク電極 (右側は発電チャネルの断面全体を、左側は電極部分の詳細を示す)
Arc electrode.

3. 1. 5 ディフューザ

発電機出口のガス圧力の快復というディフューザ本来の仕事のほか、発電機出口のガス温度 (たとえば 2,300°K) を高温空気加熱器入口の値 (たとえば 1,900°K) まで効率よく下げる任務がある。適当なボイラ構造と組み合わせたディフューザの開発が必要であろう。

3. 1. 6 空気加熱器

燃焼用の空気は 1,000°K 程度までは隔壁形熱交換器で、それ以上 1,700°K くらいまでは蓄熱形によって加熱されることになる。この程度の加熱空気が用い得れば十分な火炎温度が達成され、50 % を越える熱効率の発電所が可能となる。

蓄熱形空気加熱器としては、シード物質に対する安定性の点から MgO 耐火物を蓄熱体とするものが用いられよう。蓄熱体はたとえばペルと称する小さな球の形で使用される。現在、固定層と称して、蓄熱体を収めた塔を数基建設してそれらの中の 1 基が空気を加熱しており、残りの内の 1 基において燃焼ガスが蓄熱体を加熱しているように、これらを順次切り換える方法が開発されている。

固定層方式では広い敷地面積と多量の蓄熱体を要するので、流動層蓄熱式も研究されている。この方式では蓄熱器は上下 2 室に分かれた 1 基のもので済む。上室内で燃焼ガスによって加熱された蓄熱体が適宜下室に落下してそこで空気を加熱するものである。空気加熱を終えた蓄熱体は適当な外部回路を通して上室へ帰される。

固定層蓄熱塔のもう一つの問題点はシード物質による目づまりである。K₂SO₄ を例にとると、1,600°K 程度から燃焼ガス中に小さな液滴として折出しはじめ、約 1,300°K 以下になると固化する。この過程が一つの蓄熱塔内で行なわれると目づまりの原因となる。

表 3. 1 ガス流と直角に磁界を加える形式の超電導コイルのおもなもの (Stehly 氏による)
Principal superconductive coils in a type in which magnetic field is perpendicular to gas flow.

	Remarks	Length of uniform field (m)	Length (m)	Bore	Field (T)	Energy (MJ)	Overall current density A/cm ²	Conductor	Conductor current density A/cm ²	Conductor weight (kg)	Total magnet weight (kg)
Project Argas Julich	Race track pair Beginning construction	1.4	2	25 cm × 18.5 cm room temp	4	2	15,000	Copper and Nb-Ti composite 1.42 × 2.92 mm with 15 cores	24,000	550	1,100
Rutherford Lab. Bending Magnet	Beginning construction	1.4	2	17 cm room temp.	4	1.1	7,260	Copper and Nb-Ti composite 3.8 mm dia. with 32 cores	14,800	770	2,180
Lawrence Rad. Lab. Livermore	Insulated, tightly wound		2.75	100 cm room temp.	.95	1.3	8,000	Cable-19 strands 16 strands Cu .61 mm, 3 strands S.C. .61 mm with .51 mm core		1,200	3,400
Union Carbide Corp-Linde	Plasma sprayed Nb ₃ Sn		1.04	21 cm cold	1.2	.05	3,300	Plasma sprayed Nb ₃ Sn			
Argonne National Lab. Bending Magnet	Undergoing preliminary test	.61	.86	12.5 cm room temp.	3	.11	10,000	Copper and Nb-Ti composite with 15 cores 1.27 mm × 3.18 mm	12,400	70	
AVCO model MHD Magnet	Final configuration	1.2	3.05	30.5 cm cold	3.7	3.9	3,270	9 strands .254 mm Nb Zr imbedded in Cu 12.7 mm × 1 mm	5,900	2,180	7,150
AVCO model MHD Magnet	Preliminary test		3.05	59.5 cm cold	.94	.3	7,200	9 strands .254 mm Nb Zr imbedded in Cu 12.7 mm × 1 mm	13,000		
Electro-Technical Laboratory Japan	Preliminary test	.2	.90	27 cm	1.4	.13	5,400	4 strands Nb Zr .25 mm dia. imbedded in Cu 6.35 mm × 1 mm	10,800		600
Electro-Technical Laboratory Japan	Final configuration (not yet completed)	.2	.90	29 cm	2	.26		4 strands NbZr .25 mm dia. imbedded in Cu 6.35 mm × 1 mm			1,200
Electro-Technical Laboratory Hitachi, Mitsubishi	Beginning construction	.6	1.90	25 cm room temp.	4.5	6	3,200	Nb-Ti-Zr superconductor stabilized with copper 7 mm × 1.6 mm	5,350	2,700	7,000

表 3.2 MHD 式火力発電所の試算例
Calculation example of MHD type thermal power plant

国 別		BBC (スイス)	ENELおよび E&F (フランス)	Westing- house (米)	大 プ ロ ジ ェ ク ト (日)	
項 目						
総 合 効 率 (%)		45.9	50.2	50.4	50.3	
全 出 力 (MW) (内 MHD 部分)		459 (128)	1,004 (559)	793 (394)	1,016 (588)	
燃 焼		重油+空気	重油+空気	石炭+空気	重油+空気	
シ ー ド		K ₂ SO ₄ (0.375%)	K ₂ SO ₄ (1%)	Cs ₂ CO ₃	K ₂ SO ₄ (1%)	
空気加熱温度 (°C)		836	1,327	965	1,300 [*]	
燃 焼 器 内 ス	温度 (°C)	2,310	2,480	2,372	2,542	
	圧力(ata)	2.6	5.0	4.6	5.5	
発 電 チ ャ ン ネ ル 内 の ガ ス	温度 (°C)	入口	2,150	2,350	2,240	2,358
		出口	1,910	1,803	1,869	1,941
	流速 (m/s)	入口	860	800	750	1,027
		出口	700	800	567	935
磁 束 密 度 (T)		5	6	6	5	

* 補助燃焼器を用い、1,500°C まで加熱して燃焼器に導く

逆に、蓄熱塔をシード物質が常に液相である条件で運転すれば、ペブルに付着したシードを塔の下部から流し出す、つまりシード回収を熱交換と同時にこなうことができる。

3.1.7 シード回収

シード物質はなるべく多く回収して再使用することが、経済的にも公害の点からも必要である。回収はシード物質が液状で折出した時点だけで多く行なわれること（高温回収）が好ましい。これには上記のペブルへの付着やサイクロン分離器などが利用されることになる。低温の燃焼ガス中に微粉状態で浮遊しているシードは、たとえば電気収じん器により99%以上の回収ができるものと見られている。

たとえばシードをK₂CO₃の形で投入すると、重油中のいおうはほとんどK₂SO₄の形でシードとともに排出される。したがって回収したシードを処理し、K₂SO₄をK₂CO₃に変えて再使用できれば脱硫を同時に行ない得る利点を生ずる。ただし、処理の際には重油中に含まれるバジウム等の排除も行なわないと、これらが再投入されてシード中に蓄積すると、混合物の融点や粘性が純粋のシード物質のそれと異なってきて高温回収をむずかしくする。

3.2 発電所の構成

3.2.1 設計研究

発電所全体の最適構成の検討も必要である。各構成要素の開発の実情に即し、各装置の性能として実現の可能性のある数値を採用することによりMHD—汽力発電所の有用性が明確になる。また装置単独の研究からは指摘されぬ問題、たとえば燃焼器や発電チャネルなどの冷却水（図3.1では冷却水系は省略）の持つ熱量の活用法などの新しい問題を提起する（在来の発電所にも類似の問題はあるが、MHD発電所では特に重要である）。

構成の研究はさらに、個々の要素の性能が全発電所の効率にどのように影響するかを明らかにして、各装置の開発の方向に大きな指針を与える。もちろん経済性も合わせて検討されることが望ましい。

表3.2は各国で行なわれたこのような試算の一例である。

3.2.2 実験用発電所

構成要素の開発がある段階に達したとき、当然その総合運転試験が望まれる。発電所自体の運転研究のほか、電力系統との関係も十分に検討される必要がある。現在、このような総合設備らしいものはまだ世界になく、1970年に運転にはいるソ連のV-25設備の成果が期待されている。

4. 各国の開発状況

4.1 概況

MHD発電の研究は、1959年アメリカのAVCO社における出力約10kW、数秒間の実験がきっかけとなって世界各国で始められたが、その後7～8年間の開発はほぼ順調であったといえる。実験用発電機も出力最大のもは30MWを越え、連続運転時間では、200時間に及ぶ装置ができた（いずれもAVCO社）。

その間、当初採用を予定された鉄心、銅コイルの磁界装置の電力消費が問題となり、MHDの前途が危ぶまれたこともあった。しかしこの問題は超電導磁石の出現により原則的には解決をみた。空気加熱器においても、当初は2,200°K程度の空気発生が期待され、その実現が絶望視された時期もあった。超電導強磁界装置採用の可能性は、空気加熱温度を在来の蓄熱型熱交換器の技術の延長で可能な領域に引き降し^{*}、この問題の解をも与えたのである。

もちろん、超電導磁石や空気加熱器の開発にはそれぞれの困難があるが、ともかくMHDの開発は難問に出あうごとにその解決の方向を見出して生長をとげてきた。しかし、開発の進行とともに実験設備したがって研究の予算も大形化し、最近の2～3年間、アメリカでさえ開発がやや停滞した感があった。2年前、イギリスは開発の中止を表明した。CERL（中央電力庁の研究所）が熱入力200MWという大形装置の建設を終えた直後のことである。原因は経済的なものであって、MHDの前途に悲観的な材料が研究の結果生じたというわけではなく、今後は基礎的な問題に取り組むということである。

フランスは大形装置こそ持たないが、特に壁や電極材料の研究に着実に業績をあげ、世界のMHD研究に大きな貢献をしてきた。しかしおそらく1969年をもって総合的な研究は一応中止されるものとみられている。

他方、西ドイツでは従来平衡プラズマMHD発電にのみ研究が集中されてきたが、最近オープンサイクル形の開発も手がけることになり、熱入力30MWの装置（電気試験所第2号機と同程度かやや大きい発電機となる）を建設するという。このあたり、MHDの開発はやはり国の経済力によっているという感じがする。以下に目下開発を継続している、米ソとわが国の概要を述べる。

4.2 アメリカ

前項のはじめに述べたように、MHD開発の歴史はこの国ではじまり、その後もこの国、特にKantrowitzをリーダーとするAVCO社のMHD研究上の業績は大きい。同社は出力32MWのmk.V発電機を作り、約3年前出力30MWの実験用発電所の計画を発表したが、この計画はその後実行に移されていない。

しかし、MHD発電機自体が燃焼器・発電チャネル・磁界装置のみよりなる簡単なもので安価に作れる可能性を持つが、この利点を活用する試みは続けられている。その一例は米空軍の研究所において超高速風洞の電源に用いようとするもので、すでに図4.1のよう

* ごく大ざっぱにいうと、同じMHD出力を得るのに磁界が1T強くなると空気予熱温度は150°C低くて済む。

な出力 20 MW のホール発電機が AVCO 社によって試作されている。この試みは LORHO 計画と呼ばれ、次の段階には 600 MW の発電機が計画されているという。また New England の電力会社が、ピーク負荷用の 225 MW の MHD 発電機の検討を同社に依頼しており、MHD は実用へのステップを踏みつつある。

1968 年 6 月、大統領の科学技術顧問が MHD 発電を国家的見地から開発すべき旨の提案を行なったように、アメリカでは MHD の意義がふたたび認識されようとしている。その一つの理由は公害、特に熱公害である。わが国でも火力発電所の廃熱による海水の温度上昇が問題となることがあると聞くが、内陸に発電所の多いアメリカでは特にこのような問題は大きいと考えられる。MHD—火力発電所は熱効率の高い点に注目されていたが、今では熱効率の高いこと自体よりも、それに伴う廃熱の少なさが評価されているのである（新鋭火力の熱効率 40 % と MHD 式の 50 % との差は少ないようであるが、たとえば出力を 1,000 MW と同一に採った場合、前者の廃熱は後者の 1.5 倍と大きい）。／。

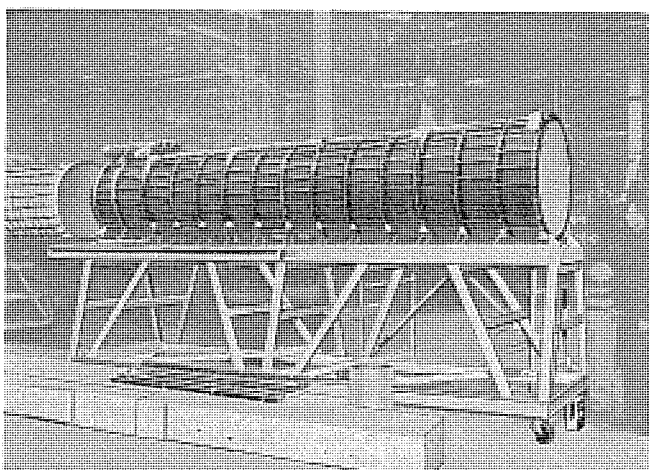


図 4.1 LORHO 計画の 20 MW ホール 発電機
20 MW Hall generator of LORHO project.

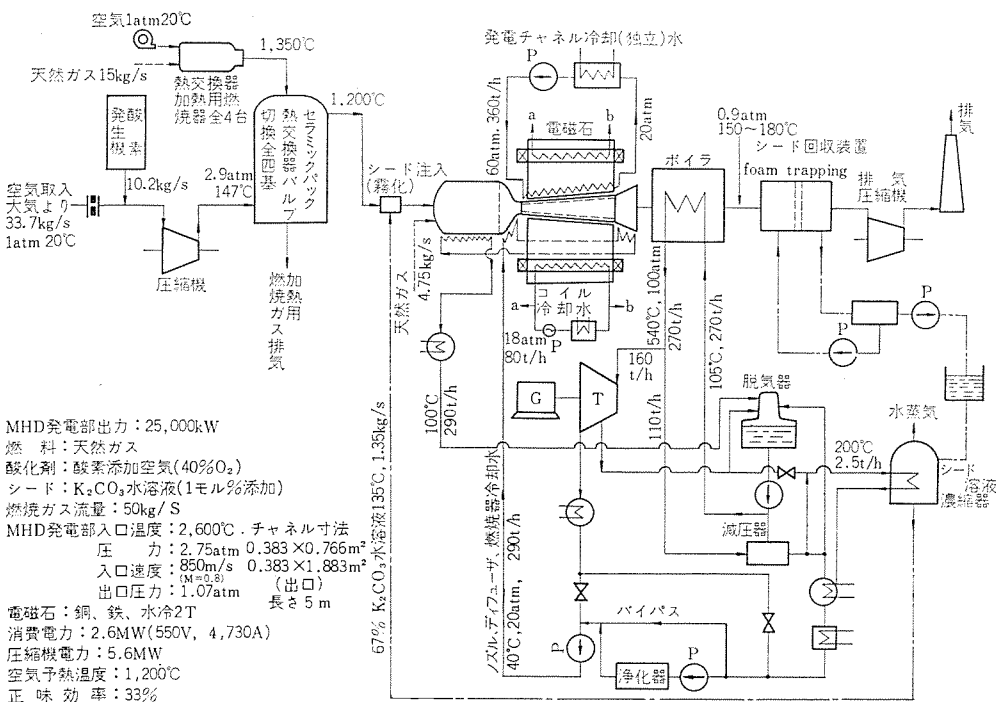


図 4.2 ソビエトの U-25 発電設備の構成
Composition of U-25 generating equipment in Soviet.

1969 年 6 月、ふたたび大統領の科学技術顧問室(Executive Office of the President) は石炭燃焼の MHD 式中央発電所の開発の必要性を述べ、年間 200 万ドルの政府出費を提案した。あるいは明年度からでも再び活発な開発が再開されることになるだろう。

4.3 ソビエト

ソビエトの MHD 発電開発はアメリカに比べて遅くスタートした。しかし近年この分野に投入された研究者と経費は大変なものと思われ、その一端は MHD 発電に関する国際会議に提出される多数の論文からうかがい知れる。最近シベリアで発見されたばく大な埋蔵量の天然ガスの有効利用が MHD 開発の大義名分となつてはいるが、宇宙開発の場合に似た「追いつけ追い越せ」ムードさえ感じられる。天然ガスを燃料とする点はアメリカの場合の石炭やわが国の重油燃焼を目的とするものに比べて、燃焼器や空気加熱器の開発をかなり楽にしているようである。

実験用発電機としては、たとえば 2, 3 年前から高温研究所と電力・電化省とが共同して運転している U-02 がある。この発電機は発電部寸法が 8×30×300 cm と大きい割に出力が少ないが、1 週間の連続運転が可能といわれ、特にその出力を交流に変換してモスクワの電力系統につないだ経験を持つ。わずか 40 kW の送電ではあるが、世界最初の試みとして評価されるべきものである。

次期の計画は図 4.2 に示すような、MHD 出力 25 MW、汽力部 50 MW の実験設備 U-25 であつて、1970 年に運転に入るといわれる。空気加熱器に在来の製鉄所の熱風炉用蓄熱体を用いている点(発生空気温度が低いので酸素を添加して高い火炎温度を得ている)、空気加熱器の加熱を MHD 排気によらず別の熱源で行なう点、シード回収を水シャワーで行なう点など、ソ連の漸進的な研究態度と、個々の部品の開発よりも総合的な系としての特性の研究を重視する考え方がうかがわれる。この装置の成否は世界の MHD 開発の今後の動向に大きく影響するものとして注目される。

4.3 日本

わが国の MHD 発電の研究開発は、諸外国とほぼ同じく昭和 35 年ころから始まり、大学、メーカーや国立の研究所に実験設備が作られた。最初のうちはそれぞれ独自の方針のもとに研究が行なわれていたが、昭和 41 年度からいわゆる大形プロジェクト制度が発足し、MHD 発電は国家的な規模の研究体制のもとに開発されることになった。もちろん、それぞれの研究所や大学独自の方針と予算による研究も行なわれているが、ここでは大形プロジェクト(国の予算)による開発の現状を述べることにする。

このプロジェクトはかなりの規模を持った実験用発電所の建設のための基礎資料を得ることを目的として、表 4.1 のようなスケジュールを想定して実施されている。このうち開発費と称されるものは官庁の研究所の研究費であり、委託費はメーカーなどに研究をお願いしている項目にあてら

表 4.1 MHD 発電長期研究開発計画図
Planning diagram of long range study and development of MHD generation.



れる費用である。最近の分担は表 4.2 のようになっているが、以下にそれぞれの項目について簡単に現状を述べる。

開発費のうち、(1)と(2)は発電機本体に関するもので、短時間大出力の発電機による発電現象の研究と長時間小出力の発電機でチャネルの材料・構造を研究する、いわゆる 2 軸法が採られている。(3)と(4)の材料研究では、前者では ZrO_2 , ZrB_2 , $LaCrO_3$, $LaAlO_3$ などが、後者では Sr や Ca のジルコネートが研究されている。(5)では小形 MHD 発電機用の超電導磁石の試作と運転が、また大形電磁石製作のための基礎研究が行なわれている。前者はすでに MHD 発電機との組み合わせ運転が始まっているが、これはおそらく世界最初の試みであろう。

委託費の(1)では 3.1.6 項に述べた高・低温の空気加熱器が検討されている。また粒子落下式と称するのは一種の流動層熱交換器である。これは蓄熱形熱交換器の研究開発の項目に含まれている回転式(ユングストローム形の改良形)と同様、固定層形の温度領域の下部の温度域を代行して分担し、固定層のみでは膨大なものとなる蓄熱塔群を小形化する可能性をもつ。(2)では 3.1.7 項のシードの高・低温回収を再生処理法が開発中である。(3)では、開発費における絶縁材料が比較的新しい耐火物であるのに対し、 MgO などの在来の耐火物の改良研究に主眼が置かれている。(4)は MHD 用の、(5)はツレノイド形の大形強磁界磁石の試作研究で、このほどいずれも試運転を終えた。(4)は MHD 用としては世界最大の規模を持つ。(6)は大形超電導コイル用の構造材料の、また(7)はその電源の研究で、超電導現象を利用した低損失直流電源が開発されている。(8)は大形コイル用の液体ヘリウム供給系の研究、(9)の内容と成果の一端については 3.2.1 項に述べた。

大形プロジェクトの制度も研究の成果も、まだ十分満足すべきものとはいえない。しかし、日本の技術を高く評価するむきもあり、たとえば New York Times 紙 (May 18, '69) のように「このままで

表 4.2 MHD 発電研究開発の分担
Share of study and development of MHD generation.

区分	研究項目	研究実施機関一覧表
研究費	(1) 1,000kW 級 MHD 発電機の運転試験および改造	工業技術院 電気試験所
	(2) 長時間運転用 MHD 発電機の運転試験	工業技術院 電気試験所
	(3) MHD 発電機用電極材料の研究開発	工業技術院 電気試験所
	(4) MHD 発電機用耐熱絶縁材料の研究開発	工業技術院 大阪工業技術試験所
	(5) 超電導磁石の研究開発	工業技術院 電気試験所
研究費	(1) MHD 発電機用熱交換器の研究開発	東京芝浦電気(株)および日本特殊鋼(株)
	(2) シード回収法の研究	(株)日立製作所
	(3) 発電機ダクト用高性能耐熱絶縁材料の試験研究	旭硝子(株)
	(4) 45キログauss 超電導磁石の試作研究、運転研究	(株)日立製作所および三菱電機(株)
	(5) 70キログauss 超電導磁石の研究開発	三菱電機(株)
	(6) 高磁界極低温領域に用いられる構造材料の研究	東京芝浦電気(株)
	(7) 超電導磁石用大電流電源装置の研究開発	東京芝浦電気(株)
	(8) 大形ヘリウム圧縮機系の研究	(株)神戸製鋼所
	(9) MHD 発電プラントの熱計算に関する研究	社団法人 電気協同研究会

は、将来の MHD 発電機は Made in Japan か U. S. S. R. のマーク付きのものになろう。」という警告の記事も見受けられる。かなりおもしろい文句ではあるが、少なくともわが国の MHD 研究が世界の MHD 関係者の注目を集めていることは間違いないであろう。

5. む す び

MHD 発電機の研究開発はかなり順調に進んできたが、現在の運転可能時間は 1,000 時間を目標とする程度にとどまっている。しかし、電力需要に土・日曜日の休閑期間があることを考慮すれば、1,000 時間の運転可能な装置はベースロード用発電所として必ずしも不十分ではない。すなわち交換部品が安価でかつ交換が短時間に行なえれば、1 か月以上確実に運転し得る発電機はすでに実用機の範囲に入り得るものとも考えられる。

当初、高い熱効率の大出力発電所として注目された MHD の発電所は、最近大気汚染と熱的との双方の公害の軽減に役立つものとして新たな関心を持たれるに至った。1980 年代に MHD 発電所が電力供給上ある程度の分担を行なうに至ると予想するむきもあるが、上記のように、経済的な利点にさらに社会的要請が MHD 開発を加速する情勢も見えはじめている。その実用化は案外近いところにあるのかも知れない。

MHD 発電用超電導磁界装置

明石 克寛*・荻野 治*・岩本 雅民**・佐藤 隆**

Superconductive Magnet for MHD Power Generation

Central Research Laboratory Katsuhiro AKASHI・Osamu OGINO
Masatami IWAMOTO・Takashi SATO

The MHD power generator has been in the limelight for these years. To put it into practical use a superconductive magnet is indispensable. This article introduces the magnet and elucidates the necessity of making reexamination of it from the viewpoint of bringing it into literally practical application. Description is further made on superconductors, saddle shaped superconductive magnets and cooling systems for the application to the problem of the MHD power generation. Herein is taken up type SI superconductive magnet as a theme of new development for turning the equipment and shown various examples of factors when the magnet is applied to a one million kW generator.

1. ま え が き

超電導は、約半世紀以前 1908 年に オランダの K. H. オンネス によって発見された。一般の金属は温度の低下とともに電気抵抗が減少するが絶対零度 (-273°C) 付近で飽和し、有限の残留抵抗を示す。ところがある種の超電導体、たとえば水銀では有限の温度で電気抵抗を失ない、完全反磁性をもゼロになることが知られており、これが超電導現象今世紀はじめの低温物性の中心課題の一つであったが、極低温の生成が困難であったためその発展は 50 年代にもちこされた。しかし今では超電導を示す金属として約 1,000 種にのぼる金属が知られており、近年になって Nb_3Sn , Nb-Zr , Nb-Ti , Ti-Nb-Ta , Nb-Zr-Ti のような機械装置等もすぐれ、電磁石の巻線としても実用しうるような良い電気特性の合金や金属内化合物が開発されはじめた。このような電磁石が超電導電磁石 (Superconducting Magnet)⁽¹⁾ と呼ばれるもので、その特長は次のようにまとめることができる。

(1) 巻線の電気抵抗がゼロであるから電流を流しても抵抗による電力損失がない。すなわち励磁電力が不要となる。

(2) 銅線に比べ 100~1,000 倍の高い電流密度で電流を流すことができる。(電流は抵抗でなく発生磁場に制限される) したがって非常にコンパクト・軽量になる。

(3) 強い磁界を発生できる。通常の電磁石では実用上たかだか 10~20 kGauss 程度であるが、超電導電磁石では 200~300 kGauss による超高磁場の生成が可能である。

もちろん超電導は極低温領域でおこる現象であるから、超電導で作った巻線に通電するためには、巻線を極低温に冷却する必要がある。超電導現象がおこる温度は 10~20°K 以下であり、冷却媒体として実用に耐える唯一のものはヘリウム (沸点 4.2°K) であって、これを液化して液浸状態で電磁石を作動させることが広く行なわれるようになった。ヘリウム液化技術も最近 10 年の間に急速にすすみ、実験室規模から今では工業的な分野にまで進出しはじめたような極低温技術 (Cryogenics) の進ちょく (捗) にささえられて、新時代の実用磁界装置として登場するようになったのである。

この超電導電磁石は、大きい空間に強い磁界を経済的に発生する手段を提供するので、従来実現のむずかしかった新しい電気機械に

応用する試みが次々と開始された。その開発拡大の範囲は非常に広範に及んでおり、たとえば

MHD 発電機,	超電導 モータ
超電導 エネルギー 蓄積器,	超電導発電機
核融合	電磁推進装置
メーザ 通信装置	磁気的治療装置
超高速鉄道, 大形加速器, 磁気選鉱,	

超電導 ジャイロスコープ, 超電導軸受, 電子顕微鏡 レンズ, NMR, ESR など枚挙にいとまがないほどである。

ここでは MHD 発電用の超電導磁界装置に議論をしばることとする。MHD 発電は導電性の高温ガスを磁界中に高流速で流して、高温ガスの熱エネルギーを直接電気エネルギーに変える直接発電の一つの形式で、原子力発電と並んで大容量発電の将来の方法の一つとして期待されている。図 1.1 は MHD 発電機の原理図で高温ガス (一般には導電性流体) を流すと、直角の方向に加えられた磁界 B の中を磁界の方向と直角にファラデーの右手の法則によって $u \times B$, つまり流れと磁場の方向に直角の向きに起電力が発生し、電気出力が電極から取り出される。高温ガスは石炭、石油、天然ガスなどの空気 (あるいは酸素) による燃焼によって得られ、これから直接電力を得るので直接発電と呼ばれる。このような MHD 発電装置の出力は次式で表わされる。

$$P = \sigma (uB)^2 \times V(W) \quad \dots\dots\dots (1.1)$$

ここで、 σ は燃焼ガスの導電率、 u は流速、 B は磁界、 V は発電ダクトの有効体積である。この中で燃焼ガスの導電率は耐圧材料の制限もあってあまり大きくならず通常金属の 100 万~1,000 万分の 1

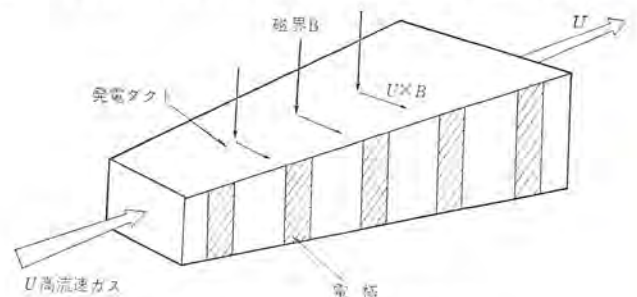


図 1.1 MHD 発電機の原理
Principle of MHD generator.

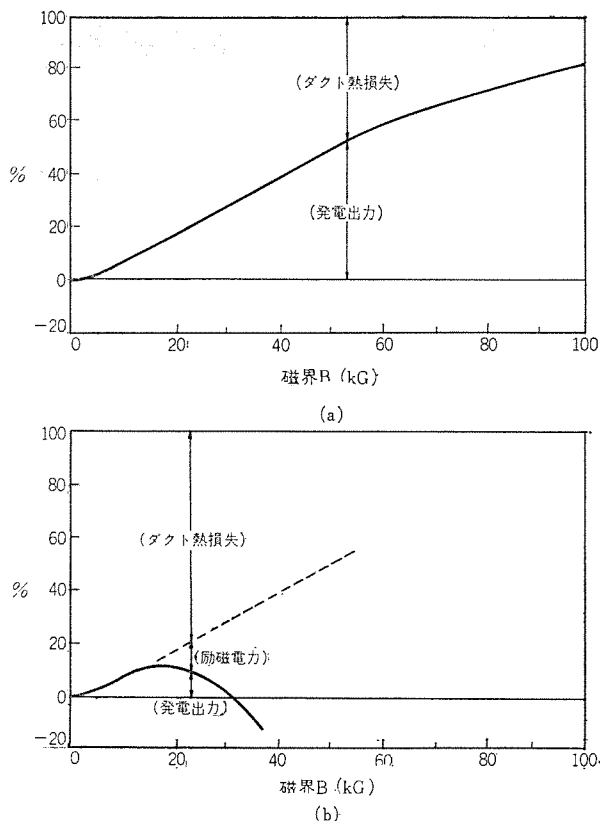


図 1.2 MHD 発電機における発電ダクト熱損失、励磁電力損失、発電出力と界磁の強さ B との関係
ただしダクト入口の熱流束を 20 MW、出口のそれを 9 MW としている。
Dependence of duct heat loss, magnet power and output power of MHD generator on magnetic field strength.

程度である。したがって実用規模の MHD 発電機では、大きな電気出力を得るためには強い磁界 B を大きな容積 V に発生する電磁石が必要になる。

式 (1.1) からわかるように MHD 発電機の出力は磁界の強さ B の 2 乗に比例するが、磁界装置として銅鉄製の通常の電磁石を用いると、その消費電力 (励磁電力損) も B の 2 乗に比例して増加することが知られている。一方、一定出力の MHD 発電機を設計する場合について考えると、磁界 B を強くすると発電ダクトは小さくてよく、ダクトの長さが短くてよい、高温ガスから発電ダクトの壁に対して伝熱による熱損失があるから、磁界 B を強くすることは、この熱損失 (ダクト熱損失) を減らす傾向がある。

Z. J. J. Stekly らは界磁装置として、(1) 常温の銅—鉄電磁石、(2) 低温運転の電磁石 (ナトリウムおよびカリウム使用)、(3) 超電導電磁石を使用した場合について、発電ダクトにおける熱損失・励磁電力損失・発電出力について磁界 B との関係を検討している⁽³⁾。ここでは、簡単にするために銅鉄電磁石と超電導電磁石を使用した場合の結果を引用する。

図 1.2 (a) は、超電導界磁装置を使用した場合の発電ダクト内の熱エネルギー変換率を示すもので、横軸に界磁装置の磁界の強さ B を、たて軸にパーセントをとっている。この場合、超電導であるから励磁電力損失あるいはその関係の補機の消費電力は無視できるほど小さい。発電出力は磁界 B が強くなるほど大きくなり、70 キロガウスの界磁装置を使用すれば、熱入力約 70 % が発電出力になることを示している。実際の発電効率は燃焼器、熱交換器、交直電力変換機などの効率を総合的に組み合わせたものになるが、超電導界磁装置を

用いればかなり良い発電効率が得られそうである。

では、銅と鉄でできた電磁石を界磁装置としてもつ発電ダクトでこのような良い発電効率が期待できるであろうか。答えはきわめて否定的である。図 1.2 (b) はそれを示す検討結果である。磁界の強さ B が小さい領域では、発電出力は増加するかそれともただか 20 キロガウスまでであり、そのときの熱流束に対する発電出力の割合はただか 10 % ほどであり、残りの熱エネルギーはダクトの壁から熱伝達によって失われてしまう。磁界の強さをさらに強くすると、電磁石の励磁損失がいちじるしく増加し、発電出力はかえって減少しはじめ、約 30 キロガウスでは、熱流束に対し損失分が大きくなって、発電出力は計算上マイナスとなり正味の電気エネルギーは取り出せない。

以上の議論から、MHD 発電機の高い発電効率は、超電導界磁装置によってはじめて達成されるということもできるであろう。これは、MHD 発電機が今までのタービン発電機や水力発電機に比べ、本質的に強い磁界と大きな磁界容積を必要とするからで、結局作動流体としての燃焼ガスの導電が小さい (金属に比べ 100 万～1,000 万分の 1) ところに帰因する。

MHD 発電機の磁界装置として磁界の強さはどのくらいのものがよいであろうか。この問題については、MHD 発電プラント全体の熱効率、建設費などの点から 2, 3 の機関、委員会など種々詳細な検討が進行中であり、最終的にはその結論を待たねばならないが、大ざっぱにいうと図 1.2 (a) に示すように発電プラントの熱効率の点からみて 60 キロガウス以上の磁界が必要になると思われる。磁界がある程度以上強くなると燃焼ガス中のイオンだけが磁界に拘束されるイオンスリップ現象がおこり、磁界を強めた効果が相殺されるようになる。普通の燃焼ガスではこのようなイオンスリップをおこす磁界は、100～300 キロガウスといわれている。これはあくまで原理的な上限値と考えるべきで、MHD 発電プラントとして実用上必要な超電導界磁装置に要求される最適磁界の強さは、60～100 キロガウスとみてよいであろう。(MHD 発電の詳細な議論は、第一論文参照)

2. MHD 発電プラントにおける超電導磁界装置

2.1 開発の経過

MHD 発電プラントとして、燃料として石油、石炭、天然ガスのいずれを使用するか、あるいは熱サイクルとしてオープンサイクルとするか、クローズドサイクルとするかなどによって、多数の方式のものが考えられる。ここでは、わが国において最も実現性があると考えられる、重油を燃料とするオープンサイクル形 MHD 発電プラントの構想を図 2.1 に示しておく。従来の火力発電プラントとの本質的な差異は、超電導界磁装置を含む発電ダクトの存在であって、これが高い発電効率を得るための中心的機器となっている。

超電導界磁装置は、さらに次の 4 個の機器から構成される。

(1) 超電導電磁石

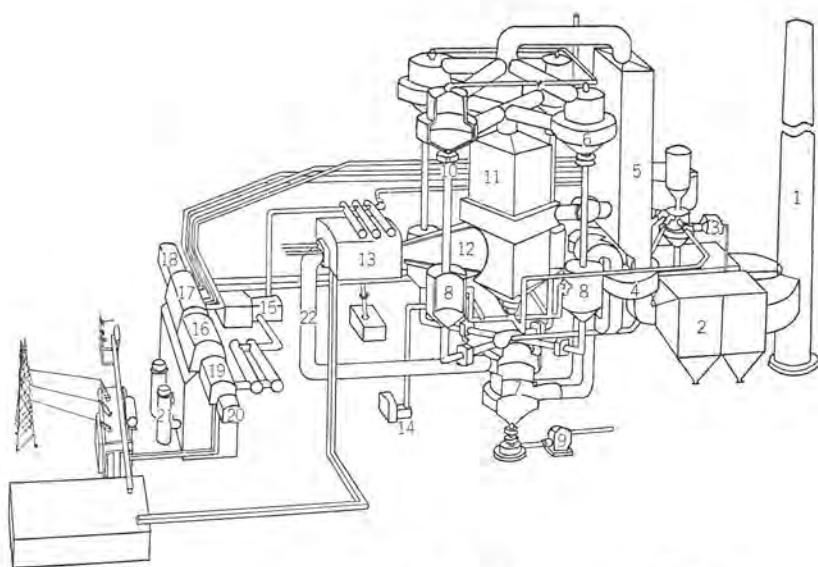
超電導材料を巻線したコイルで、必要な磁界を発生する

(2) クライオスタット

超電導電磁石を内部に収納し、極低温に冷却するための容器・普通液体ヘリウムを内部に貯留し電磁石を 4.2°K に保っておく。MHD 発電ダクトがクライオスタットの内部を貫通する複雑な構造となる。

(3) 冷却系

超電導電磁石を収納したクライオスタットに液体ヘリウムを供給するための装置で、その中心機器はヘリウム液化機である。MHD 発電プラントでは大量の液体ヘリウムを使用するので回収系も含めたクローズ



- | | | |
|--------------|---------------------|------------|
| 1 煙 突 | 9 二次空気予熱器切換弁 | 17 高圧タービン |
| 2 前電集じん器 | 10 二次空気予熱器切換弁 | 18 圧縮器 |
| 3 起動用高熱器 | 11 放射ボイラ | 19 発電機 |
| 4 一次空気予熱器 | 12 拡散筒 | 20 励磁器 |
| 5 ボイラ過熱器 | 13 MHD発電機および超電導界磁装置 | 21 循環水ポンプ |
| 6 二次空気予熱器高温側 | 14 冷却水配管 | 22 スラッグ補給口 |
| 7 二次空気予熱器低温側 | 15 給水ポンプ | 23 空気供給用配管 |
| 8 二次空気予熱器発生室 | 16 低圧タービン | |

図 2.1 MHD 発電プラントの構想図
Plan of MHD power plant.

ドサイクルの冷却システムとなる。

(4) 励磁制御系

超電導電磁石を励磁するための電源でMHD 発電出力の制御とも関連し、特殊性能のものが必要となろう。励磁のための実効電力は超電導であるためほとんど不要であるが、電磁石系は巨大なものになるから大きな無効電力 kVA 容量のものとなる。

実用規模の MHD 発電プラント用超電導電磁界装置の大きさについては、米国 ウェスチングハウス 社の検討結果が参考になる。表 2.1 は 800 MW 発電プラントについて、在来火力発電プラントと石炭専焼の MHD 発電プラントについての建設費を推定比較したものである。この検討は、数年前に実施されたもので超電導電磁石の技術が現在ほど確立されていない時期になされたものであり、現在のわれわれの計算と一致しない点も多少ある。しかし、逆に考えれば超電導電磁界装置の建設費を、この程度に押えなければ在来火力プラントに対抗できる MHD 発電プラントはできないという一種の目安を与えるものとみなすことができる。

MHD 発電機用の超電導電磁界装置の開発は、米国のウェスチングハウス社によって初めて着手された⁽⁴⁾。図 2.2 は、同社の試作した超電導電磁石で内径 110 mmφ、長さ 250 mm 目標磁界 20 kGauss、線材としては当時初めて開発された Nb-Zr 超電導合金線を使用している。これは初期に計画されたもので、当時は超電導電磁石における超電導特性そのものがあまりよく解明されておらず、目標磁界を確保することができなかった。しかし、MHD 発電ダクトと組み合わせる超電導電磁石の原形を与えたものである。

最初の本格的な MHD 発電用超電導電磁界装置の製作は、米国の AVCO 社によって 1965 年に行なわれた。この超電導電磁石は、発電ダクトを通す内径 30.5 cm、長さ 1.22 m の円筒の軸に垂直な方向に 37 kGauss の磁界を発生するものである。この電磁石の開発の成功は当時としては画期的なことで、国内の MHD 研究者に一様に深い感銘を与えた。今から考えれば、この AVCO 社の超電導電磁界装

表 2.1 800 MW の MHD 発電プラントと、在来火力発電プラントの建設費の比較、(単位 100 万ドル)

Comparison of construction costs of 800 MW MHD power plant and ordinary heating power plant. MHD plant is combined with ordinary coal-combustion steam turbine plant.

項 目	在来火力 発電プラ ント	※MHD 発電プラント
Structure & improvement	6.337	5.142
Boiler plant equipment	40.104	44.963
Generator Equipment	18.241	25.222
		MHD Duct 1.000
		Diffuser 0.683
		Foundation 0.300
		Superconducting field equipment 7.940
		Inverter 5.600
		Turbine generator 9.699
Accessory electrical equipment	3.281	2.472
Miscellaneous electrical equipment	0.813	0.813
Switchyard	3.700	1.850
Total	72.476	82.312

※ 石炭専焼で従来の蒸気タービンプラントとの組み合わせ方式

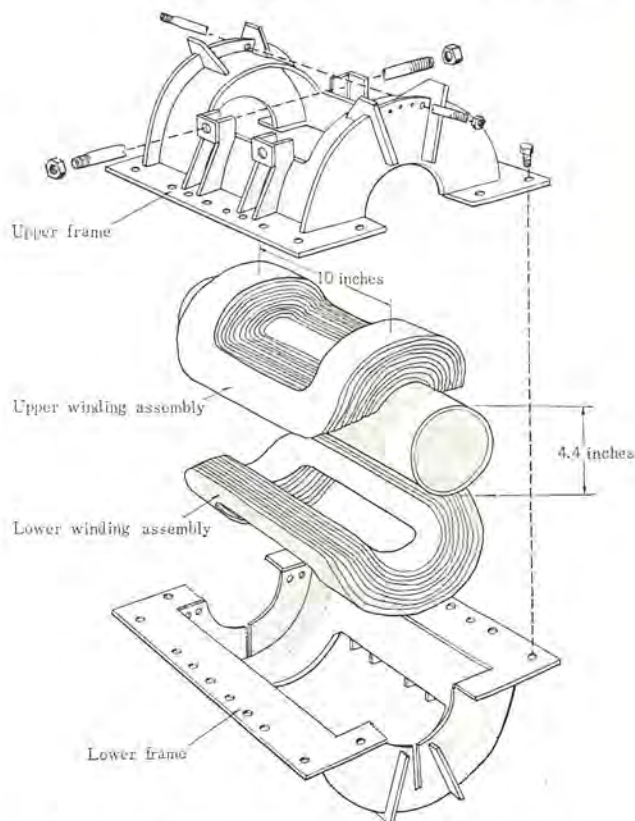


図 2.2 ウェスチングハウス社の試作した MHD 発電機用の超電導電磁石

Superconductive magnet for MHD generator constructed by Westinghouse.

置は、発電ダクトとの組み合わせや経済性などの点で将来の実用的な MHD 発電プラントに対して、そのまま適用することの困難が次第に明らかになりつつあるが、「AVCO 方式」と呼ばれて、その後長くわが国の開発研究の方向に影響を与えてきた。

図 2.3 は AVCO 社の製作した MHD 発電機界磁装置用の超電

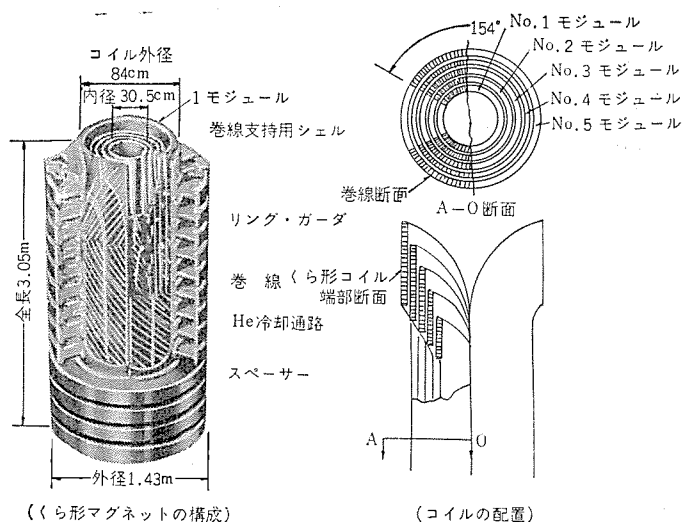


図 2.3 AVCO 社の試作した MHD 発電機用の超電導電磁石

内径	cm	30.5	インダクタンス	H	15
コイル外径	cm	84	超電導線の長さ	m	20,700
マグネット外径 (支持材を含む)	m	1.43	埋込導線の重量	kg	2,170
全長	m	3.05	Nb-Zr 線の重量	kg	75
巻数		4,450	全重量	kg	7,120

図 2.3 AVCO 社の試作した MHD 発電機用の超電導電磁石
Superconductive magnet for MHD generator
constructed by AVCO.

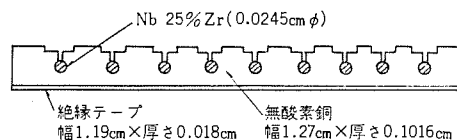


図 2.4 「かしめ」法によって作られた複合超電導線
Composite superconductor imbedded mechanically
in a strip of copper.

導電磁石の構造を示す⁽⁶⁾。巻線は、図 2.4 に示すような銅の中に超電導素線 (Nb-Zr, 直径 0.254 mm) を「かしめ」法によって埋込んだ複合超電導線であって、これは AVCO 社の Z. J. J. Stekly らによって提案になり、この考え方は Argonne National Laboratory の C. Laverick らの考え方とともに、超電導線の特性を安定化する技術として今日までひきつがれている。

この複合超電導線の厚さは 0.102 cm 幅は 1.27 cm である。これをアルミニウムシェルの上にダイボール形に巻線し、この構造のものを 5 対 (No. 1~No. 5 モジュール) 組み合わせてくら形状のコイルとしている。複合超電導線のエッジ面は液体ヘリウムに直接ふれて冷却されるように、導体の上にはさらにプラスチックのスペーサを図のように斜行して巻き、液体ヘリウムの冷却通路としている。

くら形コイルを励磁すると後述するような極端な方向性のある電磁力が働くが、これをささえるためコイルの外周に巨大なアルミニウム製のガーダを設けている。このガーダは、この方式の原理上コイルとともに極低温まで冷却しなければならないが、その重量は全磁石重量の実に 73% にも達し、この方式の電磁石を冷却する場合の大きな重荷となっている。この AVCO 社の超電導磁界装置は、まだ実際の発電ダクトと組み合わせて運転されてはいないが、発電ダクトが縦方向の配置となるように超電導電磁石およびクライオスタットが作られている。この縦形の磁界装置は発電ダクトや燃焼器などに特殊な工夫を要求し、実用的 MHD 発電機用としての一つの困難の原因をなしているが、磁界装置の構造自体は簡単になるのでわが国でも

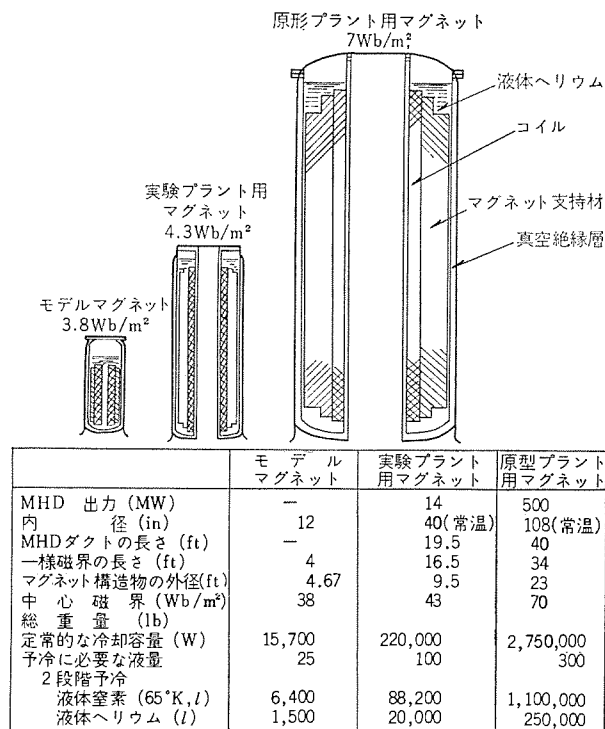


図 2.5 14 MW および 500 MW の MHD 発電機用の
超電導電磁石の計画図 (AVCO 社の計画)

Plan of superconducting magnets for 14 MW and 500 MW
MHD power plants planned by AVCO.

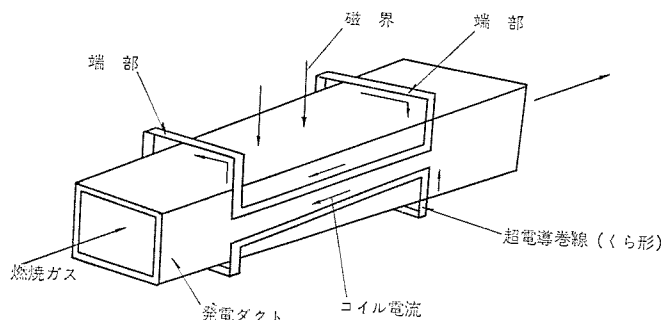


図 2.6 直線形発電方式
Linear MHD generator geometry.

この縦形構造がなお踏しゅうされている。

製作はされなかったが、AVCO 社はその後 14 MW および 500 MW の MHD 発電機用磁界装置の計画を発表した (図 2.5)。

- (1) これは超電導線には多量の銅材を使用し
- (2) 巨大なガーダを液体ヘリウム中に設け
- (3) たて形構造をとる

三つの AVCO 方式の特長をそのまま採用し、500 MW 級まで試算を進めている。しかし、実際には前述のモデルマグネット以外、14 MW 用のものおよび 500 MW 用のものはいずれも建設中止となった。また AVCO 社の試作したモデルマグネットも、ただ超電導電磁石として励磁試験をおこなっただけで、MHD 発電用の超電導磁界装置として発電ダクトや専用冷却系との組み合わせ実験をすることなく終わっている。

2.2 超電導電磁石

2.2.1 発電方式と超電導電磁石

超電導電磁石の作る磁界の方向は、燃焼ガスの流れの方向と垂直に配置されるので、磁界装置と発電ダクトの組み合わせについて次の二つの方式が考えられている⁽⁷⁾。

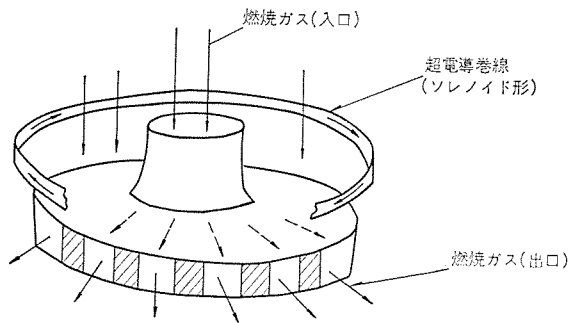


図 2.7 ふく流形発電方式
Radial outflow MHD generator geometry.

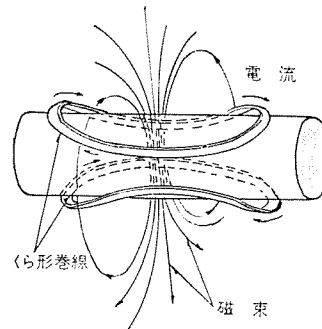


図 2.8 くら形巻線
Saddle type winding configuration.

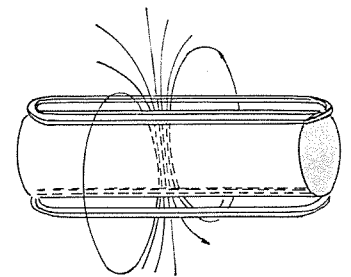


図 2.9 レーストラック形巻線
Race-track type winding configuration.

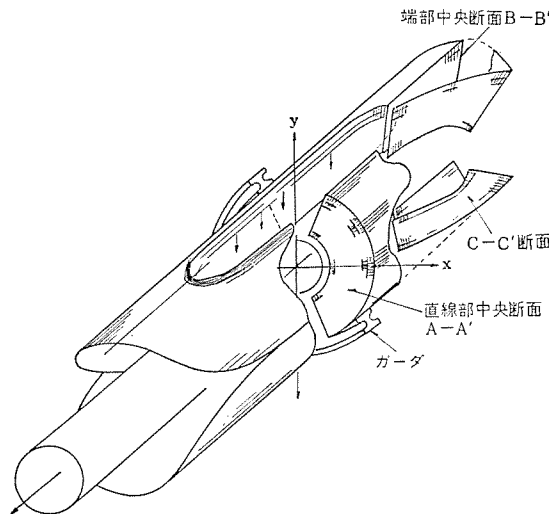


図 2.10 くら形巻線
Practical saddle type winding

(1) 直線形発電方式

図 2.6 のように発電ダクトが直線状に作られ、燃焼ガスも直線的に一方方向に流れる。超電導巻線も発電ダクトの両側に直線的に配置すればよいが、巻線の端部が発電ダクトを横切るところでもり上がるため、くら形超電導電磁石と呼ばれる。

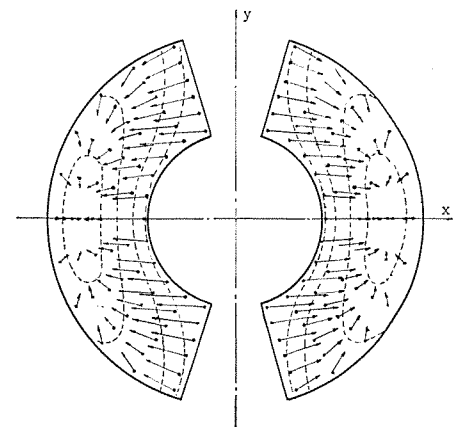
(2) ふく流形発電方式

円板状の発電ダクトの中で燃焼ガスを中心から外側に向かって放射状に流すもので、超電導巻線は単純なソレノイド形になる。図 2.7 にふく流形発電方式の原理図を示す。発電ダクトや燃焼器の構成上のむずかしさから、後者はまだアイデアにとり現在では主として直線形発電方式の開発に努力がはらわれている。

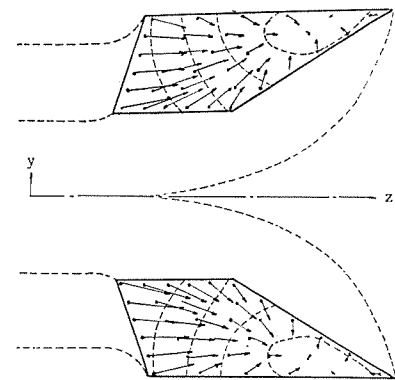
2.2.2 くら形超電導電磁石の巻線形状と電磁力支持

直線形の発電ダクトに使用する超電導電磁石の巻線形状としては、図 2.8 と図 2.9 に示すように (1) 純粋なくら形巻線と (2) レーストラック形巻線の 2 種類が可能である⁽⁶⁾。いずれにせよ、発電ダクトに有効な垂直の磁界を発生するのは、主としてダクトに沿った巻線部分であり、この部分を直線部と呼ぶ。巻線の性質上、ダクトの出口および入口で巻線はダクトを横切らねばならないが、この部分は端部と呼ばれ巻線構造が複雑になり、磁界や電磁力の集中が起こりやすく技術的にも問題の起こりやすい部分である。

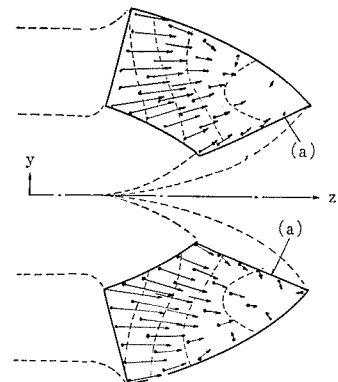
レーストラック形巻線は、端部の盛上がりがなく巻線構造が単純になる。しかし、直線部の巻線が発電ダクトの中心水平面からはなれているために、所要アンペアターンが大きくなり超電導材料が増加する欠点がある。このいずれの方式を採用するかは、線材コスト、巻線コスト、冷却コストなど全体としての比較検討が必要で、わずかに優劣



(a) 直線部中央断面における電磁力分布



(b) 端部における電磁力分布 I



(c) 端部における電磁力分布 II

図 2.11 くら形巻線における電磁力分布
Vectorial distribution of electro-magnetic force in saddle type winding.

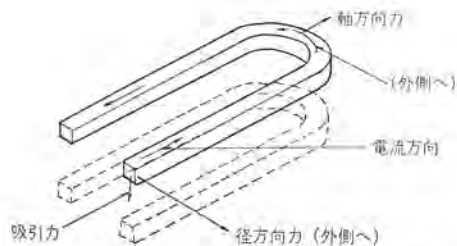


図 2.12 レーストラック形巻線の構造と電磁石
Force picture of race-track type winding.

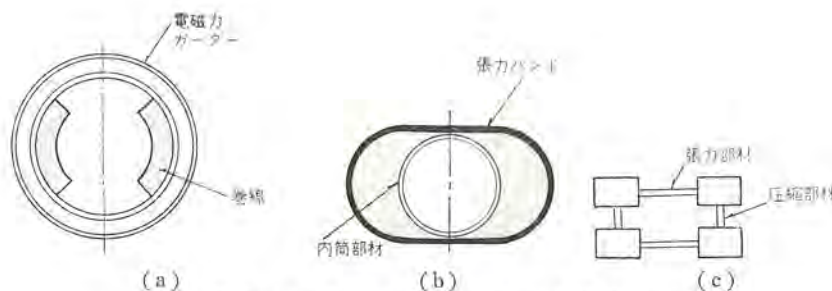


図 2.13 巻線方式と電磁力支持方式
Various types of structural configuration of MHD generator field winding.

はつけにくい。

この種の電磁石巻線上の他の一つの問題は、いかにして電磁力をささえるかという問題である。図 2.10 は、工作を考えたら形巻線の原理的な構造図である⁽⁸⁾。これを励磁すると直線部分が互いに水平方向に離反するような電磁力を発生するが、MHD 発電の基礎実験に用いる数 10 kW の実験プラント用のものでも、この電磁力は直線部の長さ 1 cm 当たり数 10 トンに達し、何らかの支持構造が必要になる。この電磁力の分布はかなり複雑であって、図 2.11 (a) (b) (c) に巻線各部の分布計算の例を示す⁽⁸⁾。レーストラック形巻線の場合には、電磁力の分布は比較的単純であって、図 2.12 に示すように直線部を水平方向に互いに離反する成分と端部に働く軸方向成分、および上下のレーストラックを互いに吸引しようとする成分の三つに分離して取扱うことができる。

この電磁力支持の方法としては、図 2.13 (a) (b) に示すように外筒支持と内筒支持の二つの方式が考えられている⁽⁸⁾。外筒支持方式は巻線の外側に電磁力に十分耐えるリング状のガードを設けるもので、巻線の内部に発生する電磁力はすべて外側に伝達されて、最後に巨大なリング状ガードでささえられる。すでに述べた AVCO 社の 37 キロガウス くら形電磁石はこの方式を採用しているが、この電磁力支持構造材の重量が全電磁石重量の実に 70 % 以上を占めており、建設費や冷却装置に大きな負担を課している。

(b) の内筒支持方式では、巻線の内筒として強固なパイプをもちい巻線の最外周に張力支持帯をおく。電磁力は、一度外部の張力支持帯に伝えられ、内部の内筒には逆に圧縮力が伝達、支持される。アメリカのアルゴンヌ研究所などでは小形のダイポールマグネットにこの方式を採用しており、用途によっては経済的になる場合もある。小規模の MHD 発電機用としては、内筒の厚さが磁界のきき方を減殺して不利になる。しかし 100 万ないし 200 万 kW 程度の大形の MHD 発電機には、検討してみる価値があるかも知れない。

(c) はレーストラック形巻線に対する支持方法で、この場合には単純な耐張力部材と耐圧縮部材に分けて電磁力をささえることができる。

電磁力支持の問題は、MHD 発電ダクトが大形化するほど、また磁界が高くなるほど過酷になり、冷却系も含めた超電導界磁装置の建設を高価にする主要原因となっている。これを逃げる方法としてレース形の巻線方式を採用する動きもあり、また、ソレノイド形の電磁石では電磁力が均一に分布することに着目し、二つのソレノイド形コイルをヘルムホルツ状に組み合わせる方法もソ連などで考えられている。しかし、使用超電導材料を有効に働かせるには、くら形巻線の形式が最も望ましい、この電磁力を支持する新しい方式として、当社によって SI 方式のくら形電磁石が提案されており、最近注目を集めているが、これについては 3 章で触れることにする。

2.3 超電導線材

超電導電磁石の主要構成要素の一つは、巻線に使用される超電導材料であって、今のところ電磁石建設費のかかなりの割合を占める超電導線材は Nb-Ti、Nb-Ti-Ta、Nb₃Sn などの超電導材料を、安定化のための銅あるいはアルミニウムなど、比較的電気抵抗の小さい金属に埋込んだ形で使用される。Nb-Ti、Ti-Nb-Ta、Nb-Zr などの合金系材料の臨界磁界（超電導性を示しうる磁界の限界）は、たかだか 120～130 キロガウスであり、これを使用した電磁石の生成磁場も数 10 キロガウスに制限される。

Nb₃Sm₁Va₃Ga などの化合物系材料は臨界磁場は高くなりうるが、機械的性質が悪く製造、工作にかなりの困難があるので、MHD 発電機用の磁界装置のみならず、一般の超電導磁石についても今のところ圧倒的に合金系のものが賞用されており、図 2.3 に示した AVCO 社のくら形超電導電磁石にも Nb-Zr が使用されている。

常電導材料は超電導特性を電気的、熱的に安定化するために用いられる。最も単純かつ安全側に考えれば、超電導部分の超電導性が何かの原因でやぶれると通常金属の抵抗より大きくなるので焼損の危険がある。そこでその局部だけ常電導部分に電流をシャフトし、超電導部分からふたたび超電導性を回復し問題は起こらない。（超電導の破壊と回復は純粋に統計的なものである⁽⁹⁾）。この考え方が完全安定化の概念で、大形超電導電磁石を設計、製作する場合の最も確実な方法である。ただ超電導材料に比べて著しく多量の銅を付加する必要があり、線材の断面における超電導体の占積率は普通数 % 以下になってしまう。

このほか電磁石巻線には巨大な電磁力が働くので、ある場合にはステンレスなどの線材補強材を使用することもある。とくに Nb₃Sn のような化合物系の材料は、一般にもろいので大形高磁界電磁石に使用する場合に、薄いステンレステープなどの補強材を併用するのが普通である。

図 2.14 におもな複合超電導線材の形式を示す。合金系の材料は機械的性質にすぐれ加工性に富み、いろいろな形状の線材に加工されて使用されており、同図の (a) (b) (c) はその使用例である。(a) は細い丸線であり、金属系の超電導体の表面に銅を被覆している。(b) は、(a) に示した単線と銅線との機械的・電気的特性をよくするためにインチウムなどにティップして固めている。単線ないしより線は比較的小さな超電導磁石に使用されるが、MHD 発電機用の超電導電磁石のような大形のものには、太いものを使用してターン数をへらすのが有利である。

また、すでに述べたように多量の銅を付加して特性を安定化する必要もある。(c) はこのための大形線材で、銅材の中に超電導線が多数本埋込まれた形となっている。埋め込み方法としては、単線を銅材に機械的に接触させる「かしめ法」や「溶接法」、「インゴット

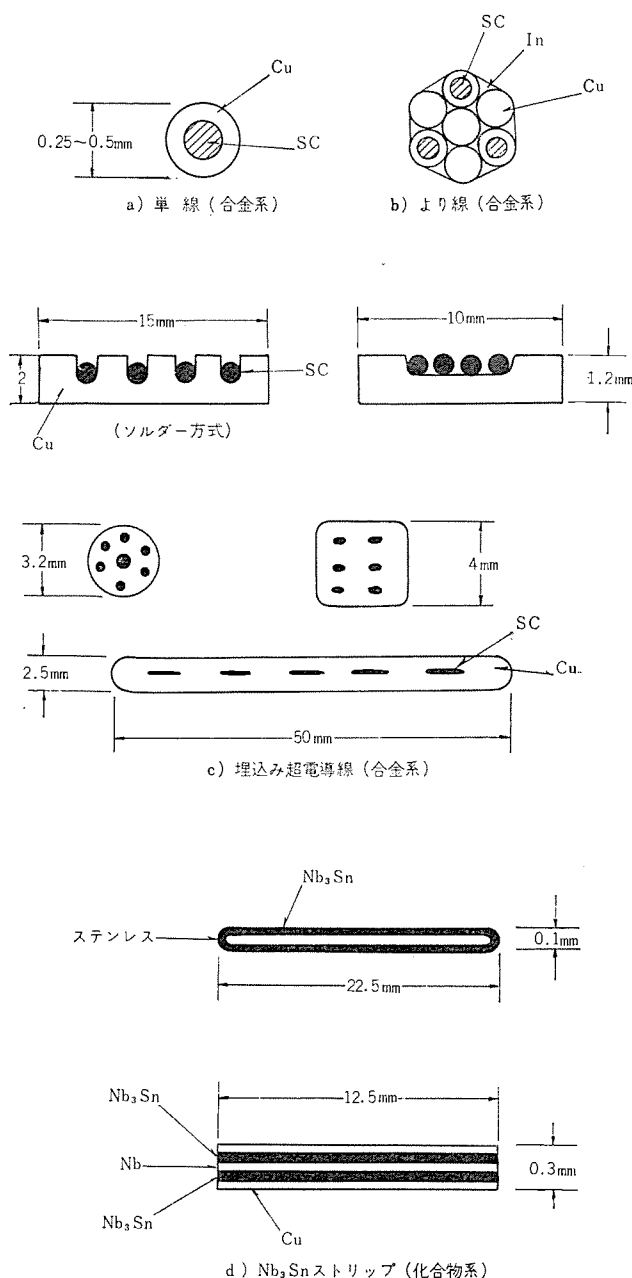


図 2.14 いろいろな超電導線材
Various superconducting wires.

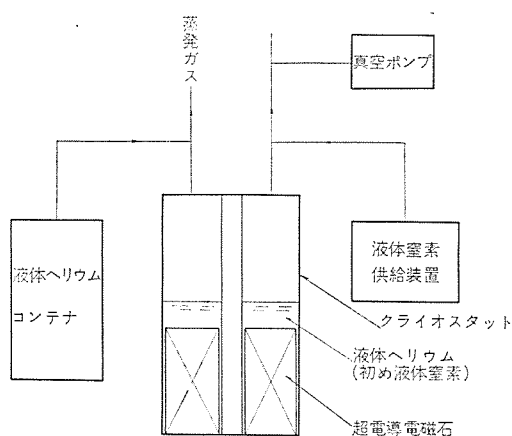


図 2.15 液体ヘリウム注入方式
System showing liquid helium direct cooling
after liquid nitrogen precooling.

の状態から銅と超電導体を組み合わせて加工する方法」などがある。いずれも経済性や信頼性などに一長一短がありケースバイケースで検討採用される。合金系の線材の電流密度は、磁界の強さにもよるが、単線の場合は $200 \sim 300 \text{ A/cm}^2$ 程度で、埋込み式の線材の場合には数 10 A/cm^2 に低下する。

Nb_3Sn は、Nb のシート の表面に Sn を拡散させて形成するか、あるいはステンレス基板上に塩化還元法によって作るなどの方法をとる。 Nb_3Sn は、 $\beta\text{-W}$ 形の結晶構造をもっておりきわめて硬くかつろいので、線材としては図 2.14 (d) に示すような薄いストリップまたはリボン状に作られる。曲げ加工などに難点があり、超電導電磁石に加工するには特別の開発がいる。しかし、図示したもので $100 \sim 1,000 \text{ A/mm}^2$ 程度が得られるので、 100 kG 以上の高磁界電磁石や強い磁界こう配を必要とする特別の場合には電磁石巻線として使用されている。

2.4 冷却系

現在までに開発された超電導電磁石は、今のところすべて液体ヘリウムの蒸発温度（大気圧において -269°C ）で動作させるものであり、MHD 発電機用超電導電磁石のように、連続運転を要する場合には液体ヘリウム生成保持を経済的にかつ確実にこなうことのできる専用冷却系の開発が必要である。つぎに超電導電磁石の冷却系について、冷却方式、予冷、液体ヘリウムの供給について解説する。（ここでは超電導電磁石を単に電磁石と呼ぶ）。

超電導電磁石冷却系の代表的な方式としてつぎの二つがある。

- (1) 液体窒素および液体ヘリウムの注入方式 (図 2.15)
- (2) 20°K 予冷系 クローズドループ方式 (図 2.16)

図 2.15 に示す方式は、クライオスタットに直接液体窒素を注入して約 80°K に冷却したのち、容器にたくわえた液体ヘリウムを直接注入する。この方式に属するものとして、さらに液体ヘリウムを注入したのち、真空ポンプで減圧して電磁石を 67°K まで予冷する方式もある。液体冷媒の直接注入の方式は簡便で設備に費用を要さないもので、従来から小形ものの冷却に用いられている。アメリカの AVCO 社でもこの方法によっているが、液体窒素を完全に排出することが困難であり、また蒸発ヘリウムガスの顕熱の利用が少ないので大量の液体ヘリウムが消費されて経済的でない。

図 2.16 に示す冷却方式は電磁石を 20°K までヘリウムガス予冷系で冷却し、液化機で連続的に液体ヘリウムを生成してコンテナにたくわえクライオスタットに移送する。クライオスタットで蒸発したヘリウムガスは

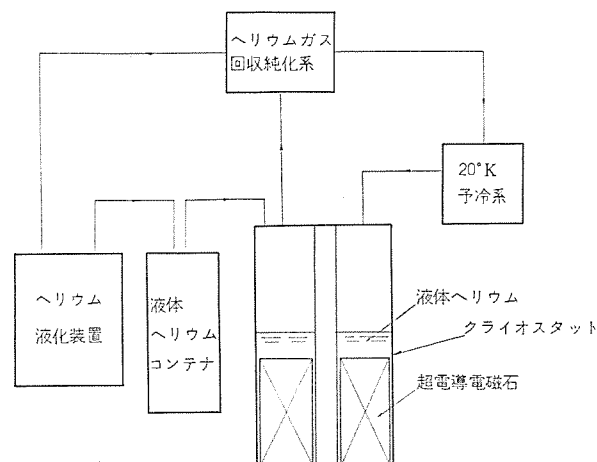


図 2.16 20°K 予冷形クローズドループ方式
 20°K precooling type closed loop system.

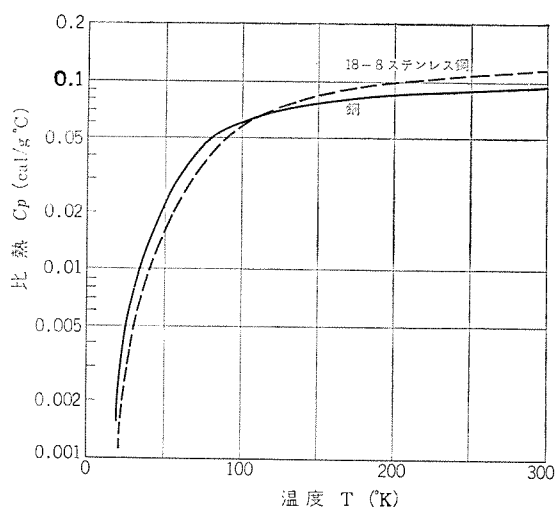


図 2.17 銅およびステンレス鋼の比熱
Specific heats of copper and 18-8 stainless steel

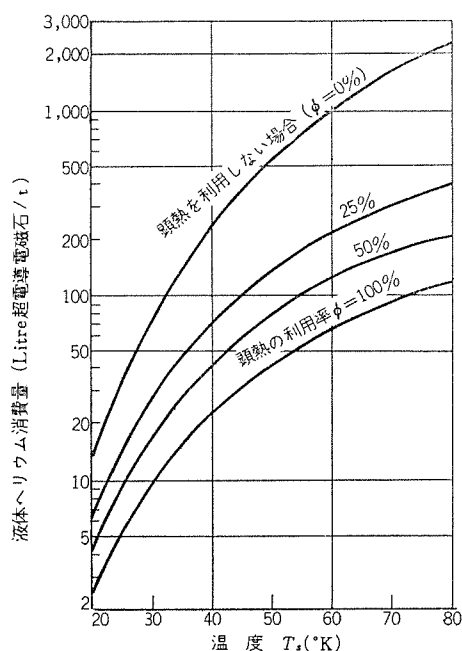


図 2.18 超電導電磁石 (重量1トン) の予冷温度と液体ヘリウム消費量の関係

Consumption quanting of liquid helium vs. precooling temperature of superconductive magnet (weight-ton ratio).

回収して高圧ガス容器に貯蔵し、ふたたび液化系に供給する。この方式は装置の製作に費用がかかるが、液体ヘリウムの供給、蒸発ガスの回収が自動的に行なえるので、長時間の連続運転に適する。また電磁石を 20°K 程度の低温に予冷して熱容量のほとんどを除去するので、冷却に要する液体ヘリウム量を最少にでき、予冷の速度を適当に制御できる。このような利点から今後の超電導電磁石冷却系はこの方式が基本になるものと考えられる。

2.4.1 電磁石の冷却容量

電磁石の構成材料は超電導線、銅材、ステンレス鋼材、アルミニウム材等の金属材料、電気絶縁材および軽量充てん材などからなり、重量のほとんどがステンレス鋼材と銅材で占められている。これらの材料と比熱の温度の関係を図 2.17 に示す。材料の比熱は温度の低下とともに小さくなり、液体窒素温度 (約 80°K) 以下では急激に減少する性質がある。なお電磁石の熱容量の計算では便宜上、比熱およびエンタルピーは銅の値を採用し、電磁石の重量を銅換算重量と称する

ことがあるが、厳密な計算には各温度レベルにおける構成材料それぞれの熱容量の和を用いる。

図 2.18 は銅換算重量 1t の電磁石を温度 T°K から 4.2°K に冷却する場合に消費する液体ヘリウム量を示す。φ は蒸発したヘリウムガスの顕熱を利用する割合を表わす。この結果から液体ヘリウムの蒸発熱だけでなくガスの冷凍を用いることと、予冷温度をできるだけ低く下げることにより、液体ヘリウムの消費が軽減できることがわかる。冷却系の計画では予冷温度を 25°K、顕熱の利用率を 25% として電磁石 1t につき 15l の液体ヘリウムを要すると考えておけばよい。

2.4.2 液体ヘリウムの供給

電磁石の励磁運転時における液体ヘリウムの蒸発は

- (1) クライオスタットへの侵入熱量
- (2) 巻線の接続部のジュール加熱
- (3) パワーリードの熱伝導とジュール熱によるもの

できわめて少なく、定常励磁運転においては本質的に大きな液体ヘリウムの蒸発損失はない。したがってヘリウム液化機の蒸発速度の 1.5 倍程度の液化速度をもたせ、起動時の冷却および異常蒸発時の補給に備えて液体ヘリウムコンテナを準備する。コンテナは液化機の 50~100 時間分の液化量をためる容量のものが適当である。

2.4.3 予冷運転

電磁石の予冷にはヘリウム冷凍機を用い、約 20°K まで冷却するのが理想的である。冷却速度を速くしすぎると電磁石に局部的な温度差ができ、熱収縮による応力が発生し破損のおそれがある。特に常温から 100°K の冷却過程においては、この温度差が大きくなるように、冷凍機のガス流量を調整して冷却速度を制御することが必要である。また冷凍機は、はじめ液体窒素で冷却したヘリウムガスを用いてクライオスタットから出る不純物を吸着除去する機能があるので電磁石の清浄化ができ、電気的特性の維持にも効果がある。

2.4.4 ヘリウムガスの回収

ヘリウムガスは今後の需要の増大に対して生産量が不足となることが明らかである。特にわが国ではすべて輸入に依存しており、高価であるからヘリウムガスを完全に回収する方式によらなければ、電磁石の運転維持ができなくなるおそれがある。ヘリウムガスの回収貯蔵には高圧ガス圧縮機と長尺容器が用いられる。回収ガスには本来空気等の不純物が含まれていないから、高圧ガス圧縮機はオイルフリー形を用いるのが理想的である。ガス貯蔵容量は、液体ヘリウムを完全に蒸発させて回収した容積以上とし、回収用の圧縮機流量はクライオスタットからの最大蒸発速度におけるガス流量の約 2 倍程度が適当である。

3. 実用超電導磁界装置の課題

くら形超電導電磁石の最も困難な問題の一つが、電磁力の支持にあることをすでに述べた。AVCO 社の試作したくら形電磁石では、巻線の外側に巨大な構造材でしめつけているが、この構造材の重量は全電磁石重量の 70% 以上にも達し、電磁石製作を困難にするのみでなく、構造材も超電導巻線とともに極低温に冷却しなければならないので、冷凍、設備が膨大になり、この傾向は発電出力が大きくなってくら形電磁石の口径が大きくなるほど、また発生する磁界が強くなるほど著しくなる。実用 MHD 発電機の目安として 100 万キロワット出力機用の電磁石について考えると、電磁力構造材まで含めた AVCO 方式のくら形電磁石本体の重量は数千トンにも達し、とうてい経済的冷却は期待できない。

そこで、当社では「SI 形くら形超電導電磁石」と呼ぶ新しい方式

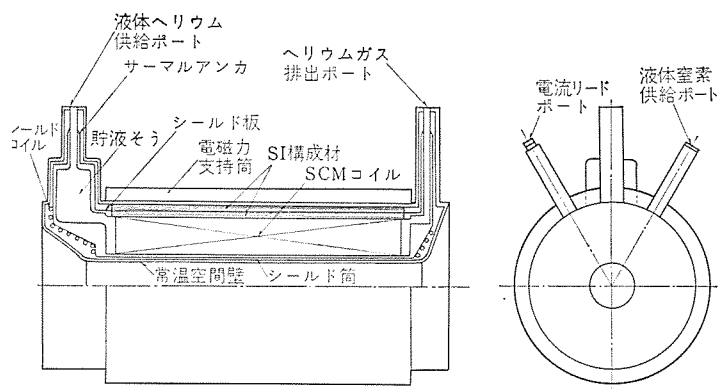


図 3.1 SI 形超電導電磁石の概念図
Schematic layout of super insulation type superconductive magnet.

の磁界装置を考案し開発を進めている。

3.1 SI 形超電導電磁石の開発

SI 形超電導電磁石はコイルの電磁反発力を、多層断熱材 (Multiple Layer Insulation) を介して常温部に置いた構造材で支持する形式で、超電導コイルとクライオスタットが一体化された電磁石である。この形式は電磁力の支持構造材が常温にあるため、液体ヘリウム冷却の負担を軽くするほか、発電機として有利な水平配置が可能となる。

3.1.1 SI 材料

SI (Super Insulation の略で超断熱ともいう) 熱ふく射材 (シールド) と熱絶縁材 (スペーサ) を厚さ 1 インチ について 50~200 枚重ねて真空中で使用すると、熱伝導率が 10^{-6} cal/cm $\cdot$ s $^{\circ}$ C 以下となる多層断熱材およびその施工方法に対するアメリカ LINDE 社の商品名である。シールドにはアルミ蒸着フィルム、スペーサにはガラスペーパー、ガラスマットなどが用いられている。

超電導電磁石に用いる SI 材料は、電磁力を伝達するため弾性が要求されるので適当な圧縮力を加えた状態で使用する。この結果熱伝導率は 10^{-5} ~ 10^{-4} cal/cm $\cdot$ s $^{\circ}$ C となり、本来の超断熱性は失われる。しかしこの値は般用の断熱材と同程度であり良好な断熱材であることには相違ない。また弾性体としても有機材料に近いヤング率をもち、構造材としても使用が可能である。

3.1.2 SI 形構造

SI 形超電導電磁石の原理構造を図 3.1 に示す。超電導コイルは外周が壁に密着した状態で薄肉の液体ヘリウムそう内に納められ、円筒部は 2 層の SI 材で囲まれている。2 層の間には熱しゃへい冷却板がはさまれ、中間温度において外部からの侵入熱量を軽減させる。SI の外周は真空そうの外筒に密着し、さらにその外側を電磁石支持筒で真空そうの外から締付ける構造となっている。クライオスタット端部には、液体ヘリウム供給筒をそう入固定するため液体供給ポートがあり、その下部は液体ヘリウムの貯そうとなっている。

3.2 SI 形超電導磁界装置の特長

SI 方式の特長をまとめてみると次のようになる。

電磁石本体の重量寸法が大幅に縮小され、所要冷却機系が大幅に小形軽減される。

(1) 電磁力支持のための構造材は、常温におかれるので、低温ぜい性を考慮する必要がなくなり高価なステンレス材の使用をまねがれる。普通鋼かあるいは将来にはコンクリートなどの使用の可能性も考えられる。

(2) 常温におかれた鉄補強材は、単に強度部材として働くだけ

表 3.1 100 万 kW MHD 発電機用超電導磁界装置
Superconductive magnet installations for one million kW MHD power generation.

電 磁 石	コイル内径	5 m
	外径	5.4 m
	長さ	25 m
	発生磁界	50 キロガウス
	励磁電流	10,000 A
磁	クライオスタット 外径	6.8 m
	長さ	30 m
	電磁石 外径	13 m
石	線材	Nb-Ti 系 Composite conductor
	低温部重量	250 トン
	総重量	3,000 トン
冷 却 系	ヘリウム液化機	500 t/h $\times$ 2 基
	ヘリウムコンテナ	7,500 t/h $\times$ 2 基
	回収系容量	500 Nm ³ /h
	予冷所要時間	1 週間
	窒素液化機容量	30,000 t/h $\times$ 2 基

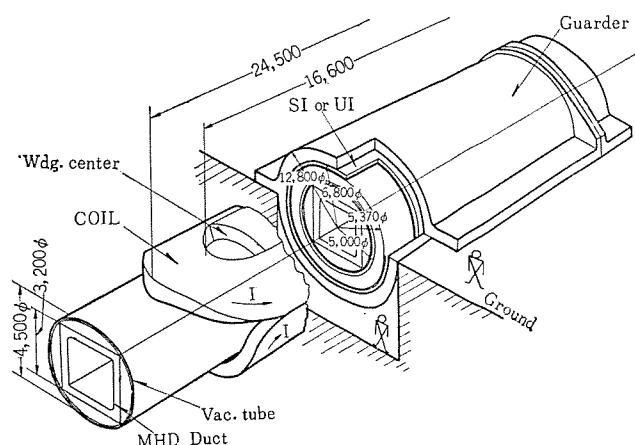


図 3.2 100 万 kW MHD 発電機用超電導磁界装置
Schematic layout of superconductive field installative for MHD generator.

でなく、鉄心として働き磁界を強めるとともに、外側のまれ磁束をシールドする働きがあり、発電所内の機器配置上にもきわめて有利になる。

(3) よこ置き形のくら形磁界装置に適している。したがって燃焼系や発電ダクトを上下方向に配置する必要がなく、MHD 発電機の燃焼系やデフューザーなどが著しく単純化される。SI 形の超電導電磁石を実現するためには、まず第一は超断熱層の開発、第二はそれにとまうコイル形成法と水平置きのコイルにおける液体ヘリウム流路の形成法などの問題を解決しなければならない。

(a) 超断熱層の開発

良好な断熱性と良好な機械力伝達性という一般には互いに矛盾する性質を兼ねそなえた新しい概念の断熱層である。いろいろな構成のものについており、現在かなりの特性のものが得られている。

(b) コイルの構成

また、水平置きのコイルでは AVCO 方式と異なるスペーサ配置・液路の構成が必要となる。これについてはリングスペーサ方式の巻線構造を新しく開発し解決をはかっている。

3.3 100 万 kW MHD 発電機の超電導磁界装置の一例

実用機規模の MHD 発電所の一例として在来火力 30 %, MHD 70 % 100 万キロワットの電気出力のプラントへの適用を予想した SI 形くら形超電導電磁石を図 3.2 に示す。発電ダクトは 3 m $\times$ 3 m の正方形の断面をもっており、有効発電部の長さは 15 m となる。Nb-Ti 系の埋め込み形複合超電導線を約 200 トン巻線し、発電ダクト

に50キロガウスの磁界を発生する。コイルの巻きわくなどを含む冷却すべき重量は250トンであり、超断熱層を介して常温におかれる構造材の重量は約3,000トンくらいになる。表3.1はこの電磁石の主要諸元をまとめたものである。

4. む す び

超電導電磁石はMHD発電の実用化のために不可欠なものである。予備的MHD発電実験のための超電導電磁石はすでに十分製作できる技術段階にはいり、2～3の試作がおこなわれている。しかし、MHD発電テストプラントさらには大規模な実用MHD発電プラント用の超電導磁界装置は、現在までの試作機に比べるとけた違いに大きいものであり、超電導電磁石の蓄積エネルギーの観点から比較しても、現在までの試作機の1,000倍以上の大形の電磁石を開発しなければならなくなる。このような状況を想像すると、今まで試作されたAVCO方式のままでは、電磁石重量が過大となり、技術的にも経済的にも実現が至難となる可能性がある。これを乗り越えるための一つの試みとして新しい方式「SI方式」の開発が急がれる。超電導電磁石の開発はほんの数年間のことであるが、その間の技術進歩は実にめざましいものがある。今後そのテンポが持続するものとすれば、実用MHD発電プラント用の経済的で信頼性の高い超電導磁界装置が実現するの間違い先のことではないと期待される。

参 考 文 献

- (1) 岩本, 佐藤, 金関: 三菱電機技報, 41, No. 12 (昭42)
- (2) 明石, 萩野, 神頭: 三菱電機技報, 36, No. 7 (昭37)
- (3) Z. J. J. Stekly: AVCO Research Report, p. 119 (Nov, 1961)
- (4) W. A. Stewart, D. T. Beecher, R. E. Kothmann, H. W. Szymanowski: Westinghouse Research Laboratories Scientific Paper 63-118-283-P1 (1963)
- (5) Z. J. J. Stekly, A. M. Hatch, J. L. Zar, W. N. Latham, C. Borchert, A. El Bindari, R. E. Bernert, T. A. de Winter: Meeting of International Institute of Refrigeration Commission I, Boulder, Colorado (June 1966)
- (6) Z. J. J. Stekly: Proceedings of a symposium (Electricity from MHD), Warsaw (July 1968)
- (7) G. W. Sutton: The theory of magneto hydrodynamic power generators, General Electric (1962)
- (8) 岩本, 佐藤: 電気学会超電導電磁機器専門委員会資料 (昭41)
- (9) 佐藤, 岩本: 第2回低温工学研究発表会 S-15 (昭43)

70kG 超電導ケーブルの開発研究

石原 克己*・橋本 康男*・田口 修*・小島 英則*
小俣虎之助**・田中 光雄***・平田 郁之***・菅原 宏***

Development of Composite Superconductors for 70kG Magnet

Sagami Works Katsumi ISHIHARA・Yasuo HASHIMOTO
Osamu TAGUCHI・Hidenori KOJIMA
Central Research Laboratory Toranosuke KOMATA・Mitsuo TANAKA
Ikuyuki HIRATA・Hiroshi SUGAHARA

It is said that a high magnetic field at least to the extent of 70 kG is necessary to raise the efficiency of MHD power generation. For this reason study and development on 70 kG composite superconductors and electromagnet are taken up as one of themes in the research of MHD national project of the Agency of Industrial Science & Technology and Mitsubishi is intrusted of this undertaking. Superconductive cables developed in this research are of composite and solder imbeded type made of Ti-Nb-Ta alloys super-conductors for high magnetic field and oxygen-free copper. The composite superconductor is good for flowing 1,150 A critical current in an 80 kG field. With a superconductive magnet made of this conductor, it is successful to produce such a high magnetic field as 75 kG.

This article describes how to manufacture a 70 kG composite super-conductors and the result of study on its characteristics.

1. ま え が き

MHD 発電を経済的に実現させるためには、できるだけ高い磁界を用いて発電効率を高めることが必要である。一方 MHD 発電機の磁界発生装置に用いられる超電導電磁石は、発生磁界の増加に伴いコストが飛躍的に増大するため、MHD 発電プラント全体の経済性を考えた場合、最も妥当な磁界の強さは 70 kG 程度であるとされている。このような観点から、工業技術院の MHD 大形プロジェクト委託研究の一つに、70 kG 超電導線材および 70 kG 超電導電磁石装置の研究開発が取り上げられ、当社は昭和 42 年および 43 年の両年度にわたってこれらの研究を受託した。

当社はさきに独自の超電導合金として Ti-Nb-Ta 系超電導線の開発に成功したが、この材料は合金系超電導材料のなかでは最も高い臨界磁場を有しており、高磁界用の超電導線として有望である⁽¹⁾。昭和 42 年度の委託研究においてはこの Ti-Nb-Ta 系超電導線の組成比と熱処理条件について検討を行ない、80 kG の磁界中で 4×10^4 A/cm² 以上の臨界電流密度を有する超電導線の開発に成功した。ひきつづき 43 年度の委託研究では、42 年度の研究成果である高磁界用超電導素線と当社独自の方式であるはんだ埋め込み形超電導ケーブルの製造技術を組み合わせて、70 kG 用超電導ケーブルを開発した。

このケーブルは、コイル内径 100 mm、コイル外径約 800 mm、コイル長約 800 mm、総重量約 2 トン、中心発生磁界 70 kG という大形のパンケーキ形超電導電磁石の研究に使用された。総合試験の結果、この電磁石は目標磁界をはるかに越え、中心磁界で 75 kG 以上の高磁界をきわめて安定に発生することに成功し、超電導ケーブルの優秀性が証明された。

本文では、MHD 大形プロジェクト委託研究の一環として実施した 70 kG 用超電導素線および超電導ケーブルの製法と特性について述べる。

2. 超電導ケーブルの仕様

MHD 発電機などに使用される大形超電導電磁石では、超電導線と大量の銅を複合したいわゆる安定化超電導ケーブルが使用される⁽²⁾。超電導線と銅を複合した安定化ケーブルではコイル電流が超電導線の臨界電流を越えた場合、銅が電流のバイパス回路の役割りを果たす。銅の量が十分多くかつ銅が高純度であれば、銅を流れる電流による発熱はごく微小である。一方液体ヘリウムによる冷却効果は銅によって著しく改善されるので、コイルに臨界電流以上の電流が流れても急激な超電導破壊が起らず、電圧が徐々に現われるのみである。この電圧を検知し直ちにコイル電流を下げると電磁石はふたたび超電導状態に復帰し、正常な運転が可能となる。これが完全安定化コイルの考え方である。

完全安定化超電導ケーブルとしては、多数の銅線と超電導線をより合わせてインジウムはんだで接着した方式のケーブルや、みぞのある銅テープに超電導線を入れて機械的にかしめつけた方式のケーブル、あるいは銅の中に数本の超電導線を埋め込んで銅と超電導線を同時に加工したタイプのケーブルなどが開発されており、それぞれ大形の電磁石に適用された例がある⁽³⁾⁽⁴⁾。しかしこれらの超電導ケーブルは、特性の信頼性、電磁石への適応性あるいは経済性などの面で、それぞれ一長一短があり、どのタイプの超電導ケーブルが最もすぐれているかという判定を下すことは困難である。

この研究で採用した超電導ケーブルは当社独自の方式によるもので、銅帯と超電導線をはんだ合金で接合した平角状のいわゆるはんだ埋め込みケーブルである。はんだ埋め込み超電導ケーブルの第一の特長としては、超電導素線に断線や線径の不均一がないため、特性上の信頼性が大きいことがあげられる。第二の特長として、超電導素線と銅帯がはんだ合金によって密着しているため、電気的熱的接触が良く、すぐれた安定性を示すことが考えられる。さらにははんだ埋め込みケーブルでは断面の形状を任意に変えることが可能で、その

表 2.1 超電導ケーブルの仕様
Specification of composite superconductors.

	80 kG 用	55 kG 用
適 用	コイル内層	コイル外層
断 面 寸 法	2 mm×15 mm	1.4 mm×10 mm
単 一 長	100 m	200 m
超 電 導 素 線	Ti-35 Nb-5 Ta 線 0.68 mmφ×10 本	Ti-25 Nb-5 Ta 線 0.43 mmφ×10 本
電 流 容 量	80 kG で 900 A	55 kG で 900 A

ためどのような種類の電磁石にも適用することができる。このようなはんだ埋め込みケーブルは、多くのすぐれた特長を有している。

一方金属には、極低温で強い磁界を与えると電気抵抗が増加するという、磁気抵抗効果がある。高純度の銅では磁気抵抗効果がかなり著しく、超電導ケーブルの完全安定化に必要な銅の量は、ほぼ磁界の強さに比例して増加する。70 kG 程度の高磁界の電磁石になると銅の磁気抵抗は後に述べるように無視できない値となり、完全安定化方式を採用するには、非常に太い銅帯を使用しなければならない。そのため超電導電磁石はますます巨大化し、MHD 発電の経済性という観点からみるとゆゆしい問題となる。

そこで本研究では、超電導電磁石をできるだけコンパクトにする目的で、準安定化方式という新しい試みを取り上げた。すなわちケーブルに使用する銅の量は、超電導線の臨界電流デグラデーションを防止するに必要な最小限度に減少させ、電磁石の安全性は励磁方法によって確保しようとする試みである。この方法により、銅の使用量は著しく減少させることができる。さらに電磁石の内層部と外層部で磁界の強さが異なることを考慮に入れると、磁気抵抗効果により、安定化に必要な銅の量は外層部のほうが内層部より少なくてよい。したがって電磁石を内層部と外層部に分割すれば、外層コイルに使用される超電導ケーブルは内層コイル用のケーブルより細くてよく、電磁石をコンパクト化するに有効な手段となる。

本研究における 70 kG パンケーキ形電磁石では、準安定 2 分割方式を採用し、内層の高磁界部分には 80 kG 用超電導ケーブルを使用し、外層の低磁界部分には 55 kG 用超電導ケーブルを使用した。80 kG 用および 55 kG 用ケーブルの仕様は、表 2.1 に示すとおりである。

70 kG の中心発生磁界を得るための電磁石の設計電流値は約 800 A で、電磁石内面における磁界の最高値は計算上約 73 kG である。これに対し 80 kG 用および 55 kG 用ケーブルの電流容量の目標値は、80 kG および 55 kG でそれぞれ 900 A とし、コイルの設計電流に対し若干の余裕を見込んだ計画にした。また、80 kG 用ケーブルには、高磁界で臨界電流の大きい Ti-35 Nb-5 Ta の合金線を使用し、55 kG 用ケーブルには、低磁界で臨界電流の大きい Ti-25 Nb-5 Ta 合金線を使用した。超電導素線の線径は、80 kG 用が 0.68 mm、55 kG 用が 0.43 mm であるが、この線径は素線の熱処理条件および臨界電流のサイズ効果を検討して定めた値である。

3. 超電導素線

3.1 超電導素線の製法

Ti-Nb-Ta 系超電導合金線の製造工程の概略は図 3.1 に示すとおりである。

原材料の Ti, Nb, Ta を所定の割合で混合し、アルゴン ふん囲気中で非消耗 アーク溶解したのち電子ビーム溶解する。電子ビーム溶解したインゴットは酸化防止のためステンレス容器に真空封入し、熱間で加工する。熱間加工の温度は約 1,000°C である。熱間加工後ステン

スの皮をむき、冷間でスエーピング加工および銅被覆伸線加工を行い、所定の線径に仕上げる。最後に真空中で熱処理を行ない臨界電流を向上させる。

超電導線の臨界電流特性は、線の加工条件や熱処理条件によって著しく変化するが、特性を左右する最も基本的要因が組成比であることは言うまでもない。すなわち超電導合金の組成比が変わると臨界温度 (T_c) や臨界磁場 (H_c) が変化する。 H_c が低い組成の合金は、どのような熱処理を施しても高磁界における臨界電流値を大きくするのは困難である。たとえば 80 kG 用に選んだ Ti-35 at % Nb-5 at % Ta 合金は、 H_c が約 125 kG で合金系超電導材料のなかでは最も高い H_c を有している。このような H_c の高い組成の合金に適切な熱処理を施すと、高磁界で大きい臨界電流を得ることができる。55 kG 用に選んだ Ti-25 at % Nb-5 at % Ta 合金は、 H_c が約 110 kG で 60 kG 以下の比較的低磁界では大きい臨界電流を得ることができるが、磁界の高い領域ではあまり大きい電流値は望めない。

Ti-Nb-Ta 系超電導合金は、融点が高くかつ非常に酸化しやすい性質をもっているため、その溶解には電子ビーム溶解が適している。一方高真空中で電子ビーム溶解を行なうと蒸気圧の高い Ti が蒸発しやすく、そのためにインゴットの組成比を均一に保つことがむずかしい。均質な組成のインゴットを得るには、溶解条件を一定に保つとともに電子ビーム溶解に先立ち不活性ガス中で原材料をアーク溶解し、できるだけ均一に合金化しておくことが必要である。

図 3.2 は電子ビーム溶解炉の外観写真であり、図 3.3 は電子ビーム溶解した Ti-Nb-Ta 合金インゴットの一例を示したものである。図 3.4 は Ti-25 Nb-5 Ta の合金インゴット断面における組成比の変化



図 3.1 Ti-Nb-Ta 系超電導線の製造工程
Manufacturing process of superconducting Ti-Nb-Ta alloy wires.

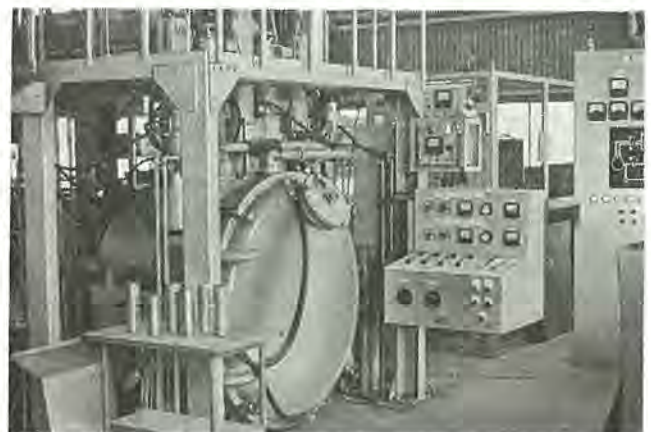


図 3.2 電子ビーム溶解炉
Electron beam furnace.



図 3.3 電子ビーム溶解した Ti-Nb-Ta 合金のインゴット
Ingot of Ti-Nb-Ta alloy melted in an electron beam furnace.



(a) Ti と Ta



(b) Nb と Ta

図 3.4 Ti-Nb-Ta 合金インゴットの XMA 試験
XMA tests in ingot of Ti-Nb-Ta alloy.



図 3.5 超電導線 (55 kG ケーブル用)
Superconducting wires (for 55 kG cables).

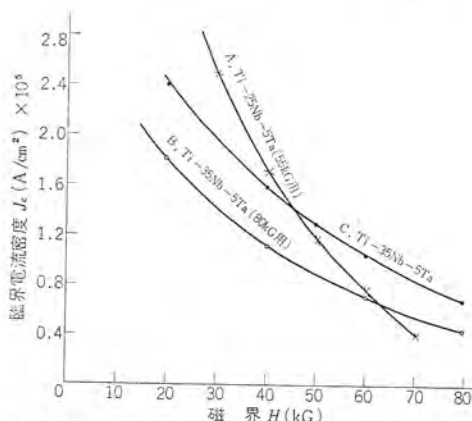


図 3.6 Ti-Nb-Ta 系超電導線の $H-J_c$ 特性
 $H-J_c$ curves of superconducting Ti-Nb-Ta wires.

を、X 線マイクロアナライザで試験した結果の一例を示す。図 3.4 の (a) は Ti と Ta の濃度変化を示し、(b) は Nb と Ta の濃度変化を示す。(a)、(b) いずれにおいても組成の不均一は認められず、インゴットの組成が均一であることがわかる。図 3.5 は 55 kG 用超電導素線の写真である。

3.2 超電導素線の臨界電流

(1) 熱処理と臨界電流

Ti-Nb-Ta 系超電導合金は析出硬化形の合金であるため、熱処理によって析出相をコントロールすることにより、著しく臨界電流密度を増すことができる⁽¹⁾。本研究では、80 kG 用の Ti-35 Nb-5 Ta 線および 55 kG 用の Ti-25 Nb-5 Ta 線について、まず直径 0.25 mm の試料を作り、熱処理条件の検討を行なった。

図 3.6 は 80 kG 用素線および 55 kG 用素線について測定した、臨界電流密度—磁界特性 ($H-J_c$ 特性) の一例を示す。図 3.6 の A および B の曲線は、それぞれ 80 kG および 55 kG 用素線について、42 年度の委託研究で検討することができた範囲の最高特性を示す。曲線 C はその後の研究でさらに特性が改良されたもので、80 kG で 7×10^4 A/cm² という高い J_c を示している。図 3.6 の曲線 A は、Ti-35 Nb-5 Ta の線を 350°C で中時間熱処理したもので、曲線 B は Ti-25 Nb-5 Ta 線を同じ 350°C で長時間熱処理したものである。

このように Ti-Nb-Ta 系合金では、 $\alpha \rightarrow \beta$ 変態温度より幾分低い温度で熱処理することにより臨界電流密度が向上することがわかった。また高磁界における臨界電流を向上させるには、 H_c の高い組成の合金線を比較的短い時間熱処理すると好結果が得られ、60 kG 以下の比較的低磁界における臨界電流を向上させるには、Ti 含有量の多い合金線を長時間熱処理するとよいことが明らかにされた。

(2) 臨界電流のサイズ効果

超電導線の臨界電流密度は一般的に線径が小さくなると増加し、線径が大きくなると減少する傾向がある。これがいわゆる臨界電流のサイズ効果と呼ばれている現象である⁽⁵⁾。臨界電流のサイズ効果の観点から考慮すると、超電導ケーブルにはできるだけ細い線を多数埋め込むことが望ましい。一方ケーブルを製造する立場からみると、ある程度太い素線を埋め込むほうが容易である。

本研究ではケーブル製造上の容易さを考慮して、80 kG 用および 55 kG 用とも、埋め込む素線の本数は 10 本にした。ケーブルの電流容量は 80 kG および 55 kG で 900 A であるから、素線 1 本当たりの臨界電流値は、それぞれ 80 kG および 55 kG で 90 A 以上でなければならない。直径 0.25 mm の超電導線の臨界電流密度は図 3.6 に示したとおりであるが、サイズ効果があるためこの値から直ちに 90 A の臨界電流を得るために必要な線径を求めることはできない。そこで 80 kG 用および 55 kG 用素線について、線径の異なる数種の試料を作り、同一条件で熱処理したのち臨界電流を測定した。

図 3.7 は各試料について測定した $H-J_c$ 特性から、80 kG 用および 55 kG 用素線のサイズ効果すなわち臨界電流密度と線径の関係を求めた結果を示す。臨界電流密度は線径が大きくなると減少する傾向を示し、臨界電流値は線径の 1.6 ないし 1.7 乗に比例していることがわかった。この実験結果から 80 kG および 55 kG で 90 A の臨界電流値を有する素線の径を推定すると、80 kG 用素線が約 0.6 mm、55 kG 用素線が約 0.4 mm になる。しかし実際に製作した素線の径は、安全率を見込んでこの値より大きくし、80 kG 用素線を 0.68 mm に 55 kG 用素線を 0.43 mm にした。なお銅被覆層を含む超電導線の径は 80 kG 用が 0.9 mm、55 kG 用が 0.57 mm である。

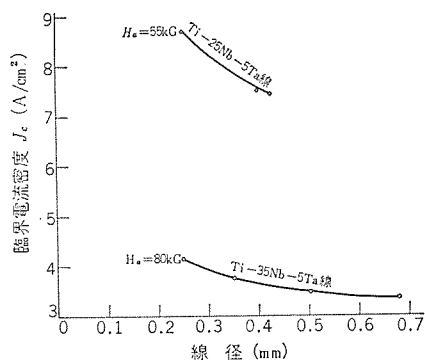


図 3.7 Ti-Nb-Ta 系超電導線の臨界電流 サイズ効果
Size effects in critical currents of superconducting Ti-Nb-Ta wires.

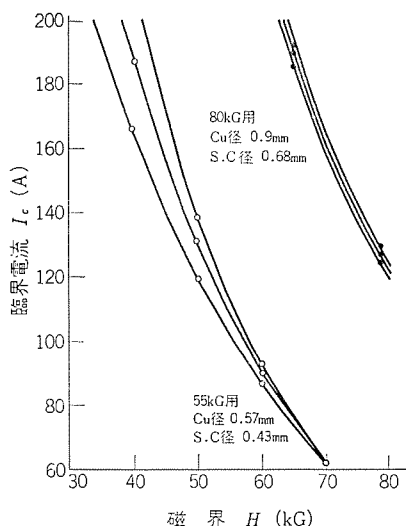


図 3.8 超電導素線の $H-I_c$ 特性
 $H-I_c$ curves of superconducting wires for composite conductors.

図 3.8 は 80 kG 用素線および 55 kG 用素線の臨界電流—磁界特性 ($H-I_c$ 特性) を示す。80 kG 用素線の 80 kG における I_c の値は約 120 A で、55 kG 用素線の 55 kG における I_c の値は約 100 A であり、いずれも目標値の 90 A を超過している。

4. 超電導ケーブル

4.1 ケーブル寸法

本委託研究で製作した超電導ケーブルは、図 4.1 に示すような断面構造のはんだ埋め込みケーブルである。80 kG 用ケーブルは、 2×15 mm の平角銅帯に幅 10 mm、深さ 1 mm のみぞを作り、80 kG 用素線 10 本をはんだ法で埋め込んだ。55 kG 用ケーブルは、 1.4×10 mm の平角銅帯に幅 6 mm、深さ 0.6 mm のみぞを作り 55 kG 用素線 10 本を入れてはんだで接合した。ケーブルの単一長は、80 kG 用が 100 m、55 kG 用が 200 m である。この値は一つのパンケーキコイルに要するケーブル長、すなわち 80 kG 用約 40 m、55 kG 用約 185 m を基準にして定めたものである。ケーブルの製作数量は 80 kG 用が 1.6 km ($100 \text{ m} \times 16$ 本)、55 kG 用が 9.2 km ($200 \text{ m} \times 46$ 本) であった。

4.2 ケーブル構成材料

ケーブルを構成する素材は、超電導素線、銅帯およびはんだ合金である。超電導素線についてはすでに述べたとおりである。

超電導ケーブルに使用する銅帯は、極低温でできるかぎり電気抵抗が小さいことが要求されるので、工業的に入手できる最も良質の無

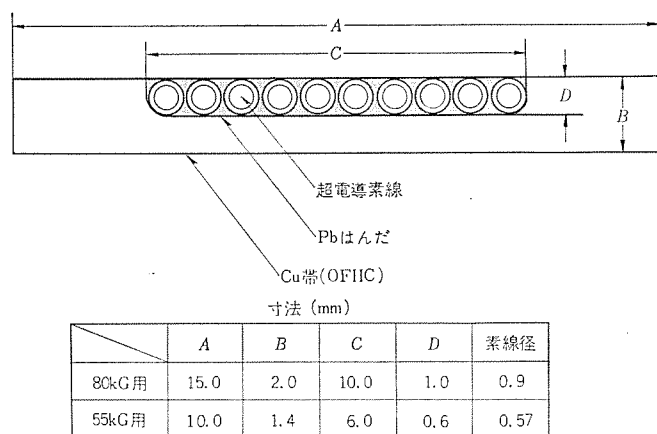


図 4.1 超電導ケーブルの断面形状
Shape of transverse section of composite superconductor.

酸素銅 OFHC を使用した。銅帯は図 4.1 に示した寸法にみぞ加工したのち、500°C で十分焼鈍して使用した。

はんだ合金はケーブル製造上の問題、コイル工作上の問題ならびにコイル運転上の問題などを考慮して、鉛を主成分とした Pb-30 Sn はんだを選んだ。ケーブル製作上の問題としては、まず超電導素線の熱処理温度、すなわち 350°C より低い温度ではんだ付けできることが要求される。コイル工作上の問題としては、コイル加工に際して超電導素線と銅帯が剥離しないよう、十分な接合強度をもつことが必要である。また超電導ケーブルは絶縁処理を行なうが、絶縁物を重合させるに必要な温度、すなわち 120 ないし 160°C の温度で十分な接合強度を保っていなければならない。コイル運転上の問題としては、極低温における強度と展性が十分でなければならない。たとえば Sn 系のはんだを低温で長時間使用すると、Sn の変態によるぜい性が起こらないという保証はない。Pb の多い Pb-30 Sn はんだではこのような可能性はないと考えられている。

上記のような問題を考慮した場合、超電導ケーブルに使用するはんだとしては Pb-30 Sn 合金が最も適当である。はんだ合金はケーブル埋め込みに際し連続的に供給できるように、フラックス入りのテープを使用した。80 kG 用ケーブルのはんだテープは厚さ 0.5 mm、幅 9 mm で、55 kG 用ケーブルのはんだテープは厚さ 0.4 mm、幅 5 mm である。

4.3 はんだ埋め込みケーブルの製法

はんだ埋め込みケーブルの製作工程の概略を図 4.2 に示す。すなわち超電導素線、みぞ加工した銅帯およびはんだテープを素材としてケーブル埋め込み装置に供給し、加熱、冷却操作を行なって素線と銅帯をはんだ付けする。埋め込みの終わったケーブルは表面仕上げと外観検査を行なって専用の巻きわくに巻き取る。完成した超電導ケーブルは厳重に荷造りして絶縁工場へ発送される。

図 4.3 は本研究のために試作したケーブル埋め込み装置の構成を示す概略図である。

ケーブル埋め込み作業はつぎの順序で行なう。まず所定の長さより約 10 m 長い銅帯を巻きわくに巻き、ケーブル埋め込み装置に取り付ける。銅帯はガイドロールと加熱炉を通して最終巻きわくに達し、張力を加えて張る。つぎに 10 本の超電導素線をブレーキロールおよびガイド穴を通して加熱炉の中へ導き、銅帯のみぞの中に交差しないようにして並べ、一端をはんだで仮りづけしておく。つぎにはんだテープを素線と銅帯の間にはさむ。以上が埋め込み作業の準備段階である。

素材のセットが完了すると加熱炉に不活性ガスを流し、ヒータに通

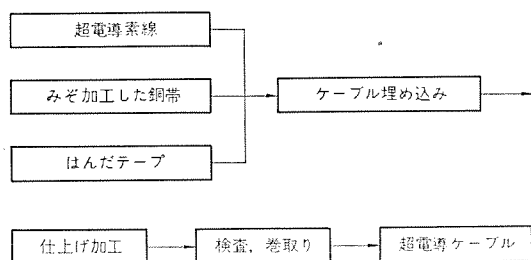


図 4.2 超電導ケーブルの製造工程
Manufacturing process of composite superconductor.

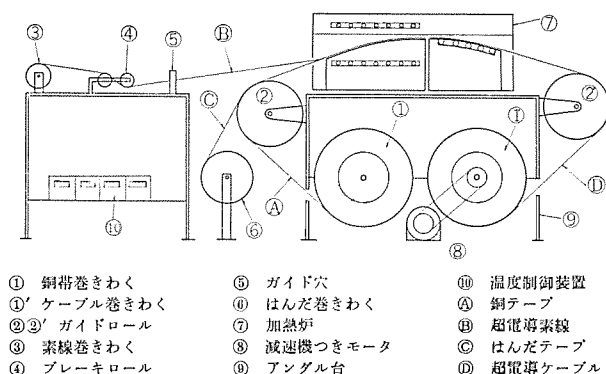


図 4.3 超電導ケーブル埋め込み装置の概略図
Schematic diagram of embedding equipment of composite superconductor.

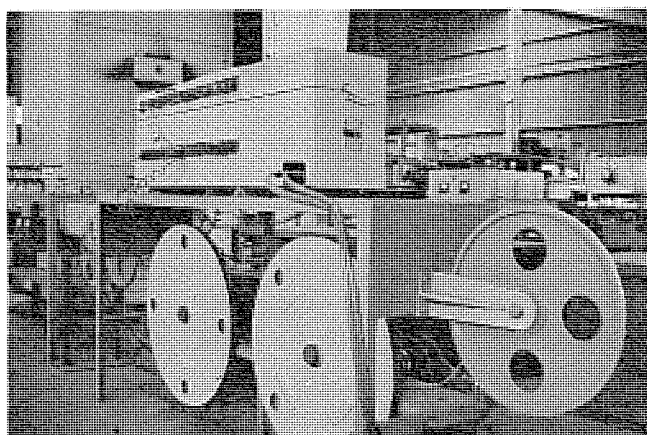


図 4.4 超電導ケーブル埋め込み装置
Embedding equipment of composite superconductor.

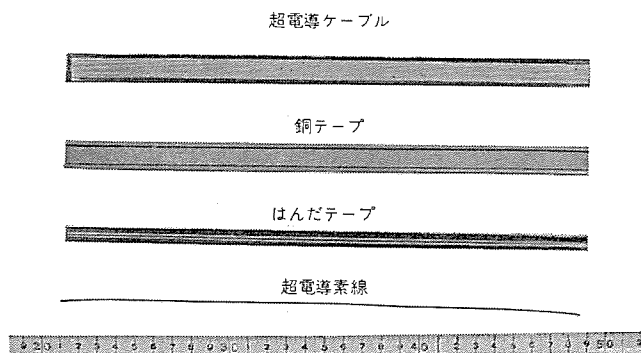
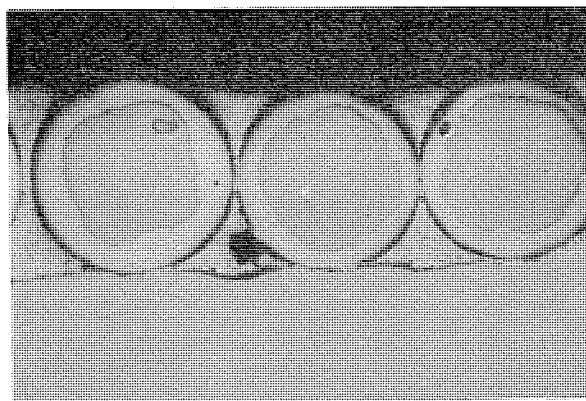
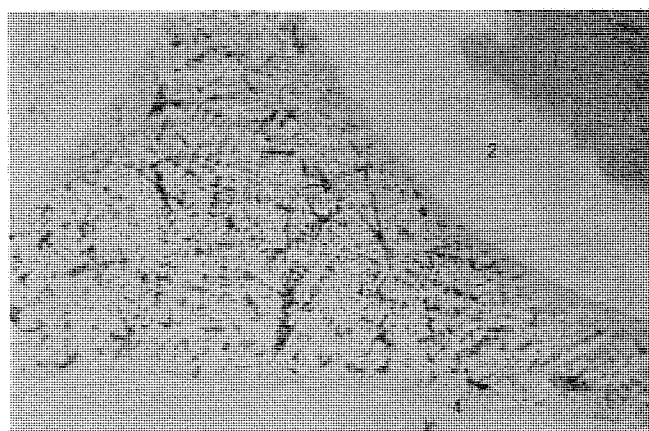


図 4.5 80 kG 用超電導ケーブル
Composite superconductor for 80 kG.

電して加熱する。炉内の温度が 300°C になると、ケーブル巻き取りわくを駆動させて接着作業を行なう。加熱炉内の加熱部は曲面をしており、この面に沿って銅帯と超電導素線が張られているので銅の面と素線はほぼ完全に密接し、その上を溶けたはんだ合金がおおうの



(a) $\times 44$



(b) $\times 200$

- | | |
|----------|----------|
| 1. 超電導素線 | 3. はんだ合金 |
| 2. 被覆銅 | 4. 銅帯 |

図 4.6 超電導ケーブル断面の顕微鏡組織
Micrographs of transverse section of composite superconductor for 55 kG.

で良好な接着が得られる。加熱されはんだが溶融した状態の複合体が冷却部へくると、冷却部の表面が加熱部の面と同一曲面上にあるので複合体はそのままの状態に冷却され、はんだが凝固して超電導ケーブルができて上がる。ケーブルの送り速度は装置の加熱冷却の容量と複合体の熱容量で決定される。この装置では、80 kG 用ケーブルに対し約 1 m/min 、55 kG 用ケーブルに対しては約 1.5 m/min の速度が適当であった。図 4.4 はケーブル埋め込み装置の外観写真である。

4.4 はんだ埋め込みケーブル

図 4.5 に 80 kG 用ケーブルの外観写真を示す。写真は上から超電導ケーブル、銅帯、はんだテープおよび素線の順に示されている。

図 4.6 は 55 kG 用ケーブルの断面の顕微鏡写真で (a) は断面の一部を示し、(b) は超電導素線と銅帯がはんだ合金を介して強固に接合されていることを示す高倍率の写真である。

5. 超電導ケーブルの特性

5.1 ケーブルの臨界電流

ケーブルの臨界電流—磁界特性の測定は、55 kG ケーブルでは製作した超電導ケーブルから短い試料を取り、測定を行なった。80 kG ケーブルでは測定装置の都合上、素線の特性より推定した。図 5.1 は 80 kG 用ケーブルおよび 55 kG 用ケーブルについて、臨界電流—磁界特性を示す。55 kG 用ケーブルの臨界電流値は 55 kG で $1,000\text{ A}$ であった。この値はコイル電流の設計値はもちろん、ケーブル電流の目標値 900 A を十分越えており、ケーブル製作過程で特性変化が起こっていない。

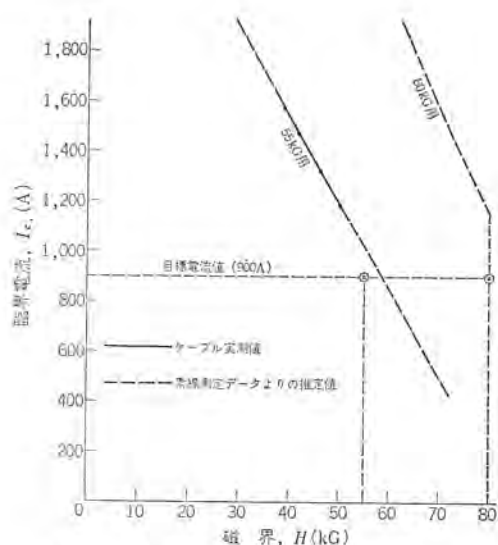


図 5.1 超電導ケーブルの $H-I_c$ 特性
 $H-I_c$ curves of composite superconductors.

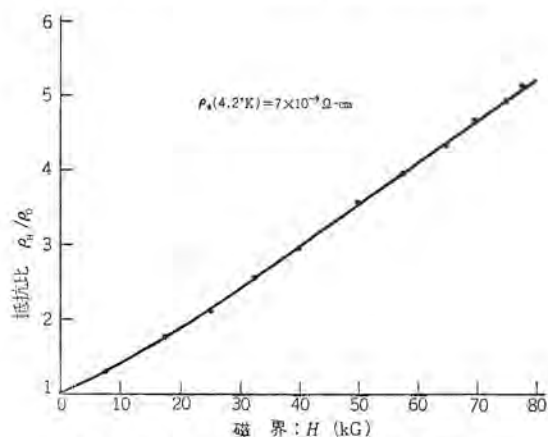


図 5.2 銅 (OFHC) の 4.2°K における磁気抵抗
Magnetoresistance of OFHC brand copper at 4.2°K.

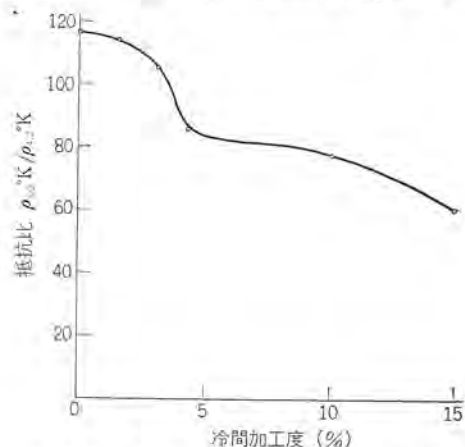


図 5.3 冷間加工による銅の抵抗変化
Variation in electric resistance of copper with cold working.

ないことが明らかにされた。

5.2 銅の低温特性

(1) 安定化パラメータ

超電導電磁石の安定化を示すパラメータとして、つぎの実験式が知られている⁽⁶⁾。

$$\alpha = \frac{I^2 R}{(h \Delta T_0) S}$$

ここに I は電流値, R は正常金属つまり銅の 4.2°K における抵抗

値である。したがって $I^2 R$ は超電導破壊が生じたときの導体からの発熱量である。 $h \Delta T_0$ は液体ヘリウムに接触したコイル面が、いわゆる nucleate boiling によって冷却される場合の単位面積当たりの最大熱放出力である。 S は単位長さ当たりの冷却面積を示すので、 $(h \Delta T_0) S$ は液体ヘリウムの冷却能力を意味する。 α は安定化パラメータであり、 $\alpha < 1$ が完全安定化、 $\alpha > 1$ が非安定を意味する。 $\alpha < 1$ であることは液体ヘリウムによる冷却がコイルの発熱より大きいことを示し、電磁石に臨界電流以上の電流が流れても、冷却が十分であるため急激な超電導破壊は起こらない。 $\alpha > 1$ であることは液体ヘリウムによる冷却よりコイルの発熱が大きいことを示し、この場合はコイルの温度が急激に上昇して、超電導破壊を起こす可能性がある。

上式において $h \Delta T_0$ を一定とすると、電磁石をより安定にするためには冷却面積 S を大きくすること、銅の抵抗 R を小さくする以外に方法はない。このように銅の極低温における抵抗値は、超電導電磁石の安定化にとって重要な意味をもつ。

(2) 銅の電気抵抗

一般に金属の電気抵抗は温度の低下とともに減少する。極低温になると、常温で電気抵抗のおもな原因となっている原子の格子振動は、電気抵抗に寄与しなくなり、金属に含まれる不純物原子と格子欠陥が電気抵抗の原因となる。したがってよく焼鈍された高純度金属の極低温における抵抗値は非常に小さくなることが知られている。

この研究で使用した銅帯の 4.2°K における比抵抗値は、 $7 \times 10^{-9} \Omega \cdot \text{cm}$ で、常温 (300°K) と 4.2°K における抵抗比の測定結果は $\rho_{300^\circ\text{K}}/\rho_{4.2^\circ\text{K}} = 244$ であった。通常市販されている無酸素銅の常温と 4.2°K における抵抗比は 200 前後であるから、超電導ケーブルに使用した銅はかなりすぐれた特性をもっていることがわかる。

極低温では金属に強い磁界が加わると電気抵抗が増すことが知られている。これが磁気抵抗効果であって、高磁界の超電導電磁石では問題になる。図 5.2 はケーブルに使用した銅帯の 4.2°K における磁気抵抗を測定した結果を示す。測定に用いた試料は、ケーブル用銅帯を厚さ 0.22 mm に圧延し、幅 1.52 mm に切断して 500°C で 2 時間焼鈍した。試料はコイル状に数回巻き、超電導コイルで磁界を印加して抵抗測定を行なった。

図 5.2 の測定結果によると銅の抵抗値は磁界の強さにほぼ比例して増すことが示されており、80 kG では磁界が 0 の場合の約 5 倍の抵抗が生じることがわかった。したがって磁界が高くなるほど超電導電磁石の安定化に必要な銅の量を増加させなければならない。図 5.2 のデータから 80 kG と 55 kG における銅の抵抗を比較すると、 $\rho_{80 \text{ kG}}/\rho_{55 \text{ kG}} \approx 1.4$ となる。80 kG 用ケーブルの断面寸法は $2 \times 15 \text{ mm}$ で、55 kG 用は $1.4 \times 10 \text{ mm}$ であるから、両ケーブルの断面積の比は約 2.1 である。したがって磁気抵抗の点からのみ比較すると 80 kG ケーブルのほうが高い安定性をもつことが推定される。

図 5.3 は電気銅を用いて測定した常温と 4.2°K における銅の抵抗比と冷間加工度の関係を示す。 $\rho_{300^\circ\text{K}}/\rho_{4.2^\circ\text{K}}$ の値は冷間加工度が増すにしたがって低下しているが、加工度 3% 以下であれば加工による抵抗値の増加は 10% 以内であり、あまり問題にならないことがわかる。80 kG 用ケーブルの最小曲げ半径は 60 mm であるからコイル加工の際受ける冷間加工度は 2% 以下となり、これによる抵抗増加はわずかである。外層コイルに使用される 55 kG ケーブルでは、最小曲げ半径が 200 mm で、コイル加工の際受ける冷間加工度は 0.5% 以下となりまったく問題にしないでよい。

超電導ケーブルに使用される銅の抵抗値は、電磁石の安定性に影響

表 5.1 はんだおよびはんだ接合部の低温における機械的性質
Mechanical properties of solder and soldered joint at low temperature.

	温 度	引 張 り 強 さ kg/mm ²	伸 び %
Pb-30 Sn 合金	常 温	3.20	216
	77°K	8.54	7.8
はんだ 接 合 部	常 温	9.06	—
	77°K	13.08	—

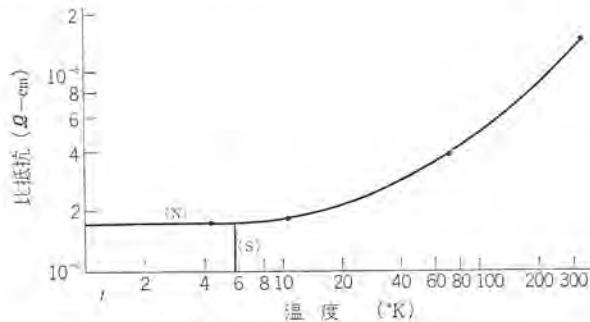


図 5.4 Pb-30 Sn はんだの低温における電気抵抗
Electric resistance of Pb-30 Sn solder at low temperature

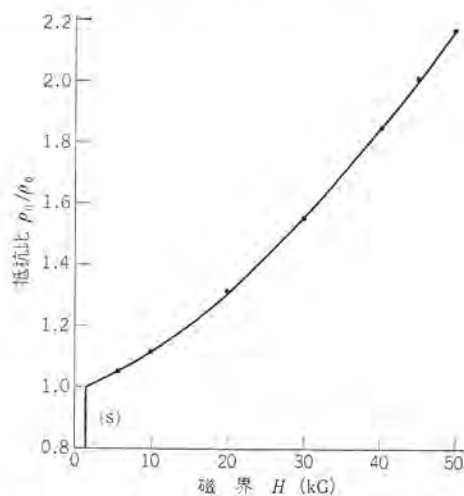


図 5.5 Pb はんだの 4.2°K における磁気抵抗
Magnetic resistance of Pb-solder at 4.2°K.

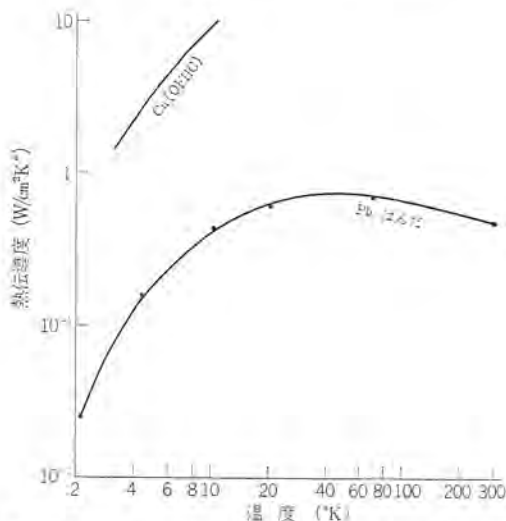


図 5.6 銅および Pb はんだの低温における熱伝導度
Thermal conductivities of copper and Pb solder at low temperature.

を及ぼす大きな因子であるが、使用した銅は抵抗値が十分小さく、かつ磁気抵抗や加工硬化による銅の抵抗増加の問題についても十分考慮を払ったので、ケーブルの製作上の問題で安定性に悪い影響を与える要素はないと考えられる。

5.3 はんだの低温特性

はんだを超電導ケーブルに適用するに当たっては、はんだ合金および接合部の極低温における性質について十分検討しておく必要がある。すなわちその第一の問題は低温ぜい性であり、第二の問題は安定化に対する影響である。以下ははんだ合金および接合部の低温における機械的強度、電気抵抗および熱伝導の問題について検討した結果を述べる。

(1) はんだの機械的性質

表 5.1 は超電導ケーブルに使用した Pb-30 Sn はんだ合金 およびその接合部の常温ならびに 77°K における引張り試験の結果を示す。はんだ合金の引張り試験には直径 10 mm の丸棒試片を用いた。接合部の引張り試験は直径 15 mm、長さ 300 mm の電気銅の丸棒を突合わせ接合した試片を用いた。Pb-30 Sn 合金の引張り強さは、常温では 3.2 kg/mm² で比較的弱いのが、77°K では 8.54 kg/mm² の引張り強さを示し、常温の約 2.5 倍の強度を有していることがわかった。またこのはんだ合金は 77°K で 7.8 % の伸びを示し、極低温で十分な展性をもち、低温ぜい性のおそれがないことが明らかにされた。突合わせ接合した試片では、常温においても 77°K においても、はんだ合金自体より若干高い強度を示した。

(2) はんだの電気抵抗

図 5.4 は Pb-30 Sn はんだの電気抵抗と温度の関係を示す。Pb はんだの極低温における比抵抗は、常温の値の約 1/10 に低下することが示されている。Pb はんだの抵抗値は銅に比較するとかなり大であるが、はんだ接合部の接触抵抗は、はんだ層の厚さを十分薄くすれば銅と銅の接触抵抗より小さくなることが知られており⁽⁷⁾、超電導ケーブルの安定化に対してはほとんど影響を与えないと考えられる。

図 5.5 は Pb-30 Sn はんだ合金の 4.2°K における磁気抵抗を示す。Pb はんだでは図 5.2 に示した銅に比較して、電気抵抗の磁場依存性が若干小さいことがわかった。

(3) はんだ接合部の熱伝達

図 5.6 に無酸素銅 OFHC および Pb-30 Sn はんだの熱伝導度と

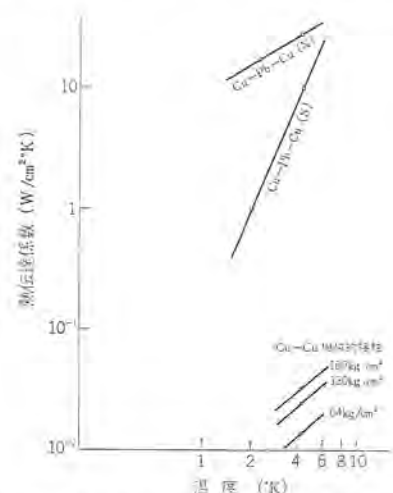


図 5.7 はんだ接合部の低温における熱伝達係数
Thermal conductivity of soldered joint at low temperature.

温度の関係を示した。4.2°K における Pb はんだの熱伝導率は銅の約 1/10 であるが、はんだ接着層の厚さからみて、はんだ層の熱伝導率は実際上問題にならない。

一方はんだ接合物の極低温における熱伝達係数は、図 5.7 に示したように銅と銅の機械的接触に比較してはるかに大きい値を示すことが知られている⁽⁸⁾⁽⁹⁾。これははんだ埋め込みケーブルが、液体ヘリウムによる冷却効果の点ですぐれた性質をもつことを示し、安定性の高いすぐれた超電導ケーブルであるということができよう。パンケーキ形電磁石の励磁試験で目標磁界の 70 kG を越え、800 A のコイル電流で 75 kG の中心磁界を安定に発生することに成功した事実は、本研究で製作したはんだ埋め込みケーブルが、準安定とはいえ安定性の高い超電導ケーブルであることを証明した。

6. む す び

MHD 大形プロジェクト研究の一環として、高磁界用超電導ケーブルの研究開発を行なった。開発した超電導ケーブルは、10 本の超電導線を銅帯の溝に入れ、はんだで接合したいわゆるはんだ埋め込みケーブルで、80 kG 用および 55 kG 用の 2 種類である。80 kG 用ケーブルには高磁界で臨界電流密度の大きい、Ti-35 Nb-5 Ta 超電導線を用い、55 kG 用ケーブルには低磁界で特性のすぐれた Ti-25 Nb-5 Ta 超電導線を使用した。ケーブルの目標臨界電流値は、80 kG および 55 kG でそれぞれ 900 A であるが、より高い臨界電流値を得るために素線の熱処理条件およびサイズ効果について検討した結果、80 kG ケーブルでは 1,150 A、55 kG ケーブルでは 1,000 A という目標よりはるかに大きい臨界電流を有するケーブルの開発に成功した。

また高磁界用超電導電磁石をできるだけ小形化する目的で、従来の完全安定化方式に代わり準安定化方式という新しい試みを採用した。これは超電導ケーブルの銅を臨界電流のデグラデーションが起こらない程度に減らし、電磁石の励磁法によってコイルの安全性を確保しようとする試みである。このためケーブルに使用した銅テープは常温と 4.2°K の抵抗比が 244 という、非常に良質の無酸素銅 OFHC を使

用し、磁気抵抗や冷間加工による銅の抵抗増加についても十分考慮を払ってケーブルを製作した。ケーブルに用いたはんだ合金は、低温ぜい性のおそれのない Pb 系のはんだを選んだ。はんだ接合部の 4.2°K における電気抵抗ならびに液体ヘリウム中における熱伝達係数について検討した結果、銅と銅が機械的に接触している場合よりもすぐれた値を示すことがわかり、安定化の点ではんだ埋め込みケーブルがきわめてすぐれていることが明らかにされた。

本研究では 80 kG 用ケーブル 1.6 km、55 kG 用ケーブル 9.2 km を試作したが、製造法に関するトラブルはまったくなく、はんだ埋め込みケーブルが経済的であることが確認された。試作した超電導ケーブルは、内径 100 mm、重量約 2 トンの大形パンケーキ電磁石に組み立てられ各種の試験を行なった。その結果目標の中心発生磁界 70 kG を軽く越え、75 kG の高磁界を安定に発生することができ、超電導ケーブルの優秀性が立証された。

終わりに本研究の遂行にあたり、全面的な協力をいただいた関係各位に深甚の謝意を表わす次第である。なお本研究は工業技術院の委託研究として実施されたものであることを付記しておく。

参 考 文 献

- (1) 小俣, 石原, 橋本: 三菱電機技報, 41, No. 6, 745 (昭 42)
- (2) A. R. Kautrowitz, Z. J. J. Stekly: Appl. Phys. Lett., 6, Feb., 56 (1965)
- (3) C. Laverick, et al.: Rev. Sci. Instrum., 36, 825 (1965)
- (4) Z. J. J. Stekly: IEEE Trans. on Magnetism, 2, No. 3, 319 (1966)
- (5) A. D. McInturff: J. Appl. Phys., 38, No. 2, 524 (1967)
- (6) C. N. Whetstone, et al.: IEEE Trans. on Magnetism, 2, No. 3, 307 (1966)
- (7) E. J. Lucas, et al.: Advances in Cryo. Eng., 113 (1964)
- (8) L. J. Challis, et al.: Proc. Phys. Soc., 83, (1964)
- (9) R. Berman: J. Appl. Phys., 27, (1956)

75 キロガウス大形高磁界超電導電磁石 (I) —その設計と製作—

岩本 雅民*・佐藤 隆**・平田 郁之**・山田 忠利**・蓬 来 勝***・藤原 健三***

75 Kilogauss High Field Large Superconductive Magnet (I) —Design and Construction—

Central Research Laboratory Masatami IWAMOTO・Takashi SATÔ
Ikuyuki HIRATA・Tadatoshi YAMADA
Kobe Works Masaru HORAI・Kenzo FUJIWARA

A 75 kilogauss high field large superconductive magnet has been developed with success as a result of joint efforts of the Central Research Laboratory, Kobe Works and Sagami Works of the Mitsubishi Electric Corporation. Magnetizing tests of it have revealed a high magnetic field of 75 kilogauss has been produced with steadiness in a space of 100 mm in diameter. The magnet is of a pancake shape having an internal diameter of 100 mm, an external diameter of 800 mm, a height of 880 mm and weight of 1.6 tons, being one of the greatest superconductive magnets in the world.

This article gives description on its outlines, design and manufacturing procedure.

1. ま え が き

通産省の MHD 発電に関する大形プロジェクトの一環としてこのたび三菱電機は 75 キロガウス 大形超電導電磁石の研究開発に成功した。高磁界大形超電導電磁石用超電導線材の開発からこのたびの電磁石の完成に至るまで中央研究所、神戸製作所、相模原製作所、長崎製作所を中心として研究開発に当たり、試験の結果 75 キロガウスの強磁界を発生する大形超電導電磁石の開発に成功したものである。当超電導電磁石は内径 100 mm の空間に 75 キロガウスを発生する。同時に内径 400 mm の空間に 55 キロガウスの磁界を発生する。外径が約 800 mm、高さが約 880 mm、重量が 1.6 トンのパンケーキ形であり、この形のものとしては日本最大、世界有数の大形超電導電磁石である。この完成によって日本における大形超電導電磁石製作技術は大きく向上したと言っても過言ではなからう。それではこのような大形超電導電磁石製作技術は今後の工業分野にいかなる意味を持つのだろうか。

現在世界各国で研究開発が進められている MHD 発電においては、その実用化のために磁界装置として損失がない大形超電導電磁石は必要不可欠である。また大形超電導電磁石の技術は単に MHD 分野における技術進歩にとどまらず他の応用分野はきわめて広い。高エネルギー物理やプラズマ物理の分野⁽¹⁾⁽²⁾においては超電導電磁石はあわ(泡)箱、加速器、核融合実験用プラズマ閉じ込め装置等種々の分野で必要とされる。従来の銅鉄電磁石では得られなかった広い空間における高磁場が大形超電導電磁石の出現により得られるようになった現在、今後それを使つての新たな局面の打開が期待されている。

その他電動機⁽³⁾、大容量化の一途をたどる発電機等に大形超電導電磁石を使用することにより小形、大容量化の実現も夢でないといわれている。また飛行機並のスピードで走る近い将来の浮上超高速列車⁽⁴⁾、MHD 推進により水中を走る高速タンカー等の実現への応用も考えられている⁽⁵⁾。現在このような新技術の胎動期にあり世界各国で研究が進められている。

このたびの 75 キロガウス 大形超電導電磁石の完成はこれらの新技術実現への第一歩を踏み出したことになり、その意義はきわめて大

きいものといえる。本論文では、75 キロガウス 大形超電導電磁石装置の概要と、この超電導電磁石部の設計・製作・組立について述べる。運転試験結果については別の論文で報告する⁽⁶⁾。

2. 装置の概要

75 キロガウス 大形超電導電磁石装置は大別して次の三つの装置から構成されている。

- (1) 超電導電磁石本体
- (2) 励磁制御装置
- (2) 冷却装置

超電導電磁石に関しては以下の章で詳しく述べるが、約 -269°C の液体ヘリウムのはいったクライオスタット(極低温容器)中で運転され、直流 800 A で励磁することにより内径 100 mm の空間に 75 キロガウスの高磁界を発生させることができる。ちなみに当超電導電磁石の諸元は外径約 800 mm、高さ約 880 mm、重量 1.6 トンである。励磁制御装置、冷却装置、については「75 キロガウス 大形超電導電磁石の試験」⁽⁶⁾の項で詳しく述べてあるが、概略を示すと励磁電源は直流で $8\text{ V} \times 1,000\text{ A}$ の容量、 10^{-4} の安定度を持つ。超電導電磁石の保護装置としては 15 個のディテクター(超電導破壊自動検出装置)および 3 個のコイル保護用並列抵抗を備えている。

冷却装置としては超電導電磁石試験用クライオスタット、電磁石を -250°C 近傍まで冷却する冷凍機、液体ヘリウムを作る液化機、液体ヘリウムを貯めておく 500 l 液体ヘリウムコンテナ、その他これらに付属する多くの機器を備えている。これらの多数の機器がどのように組み合わされて 75 キロガウス 大形超電導電磁石装置を形成しているかその構成図を図 2. 1 に示す。当大形超電導マグネット本体の写真を図 2. 2 に示す。

以上のほかに超電導電磁石には多くの温度測定用熱電対、カーボン抵抗、磁場測定用ホール素子、電圧タップ等が取り付けられている。前 4 者は図 2. 1 中に示されている研究計測デスクにまとめられており超電導電磁石の温度、発生磁界を測定監視できるようになっている。また電圧タップは同図中のディテクターにまとめられており、コイルの各部分の発生電圧を絶えず監視し、自動的にまた手動によって 2 重

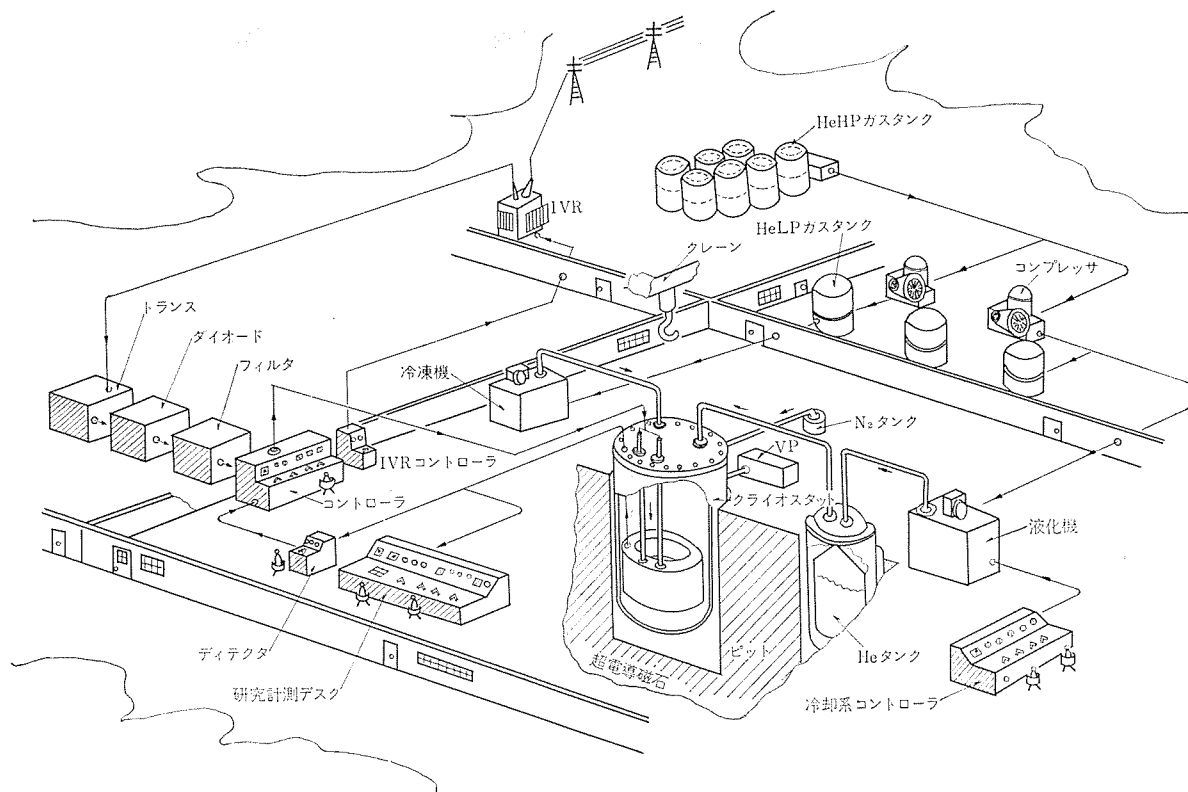


図 2.1 75 kG 大形超電導電磁石装置構成
Diagram of 75 kG large superconductive magnet system.

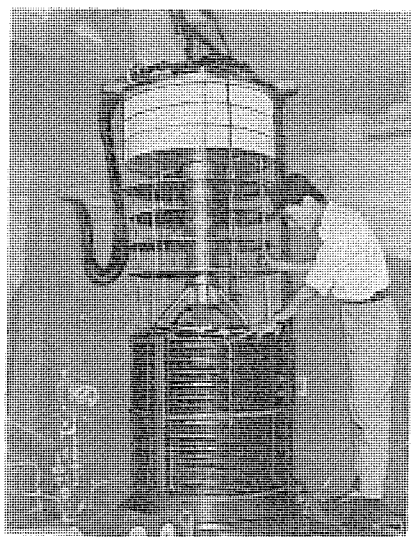


図 2.2 75 kG 大形超電導電磁石
75 kG Pancake type large superconductive magnet.

に電磁石が超電導状態であるか否かを確認して超電導電磁石の安全確実な励磁を行なうようになっている。電源関係はコントローラで冷却関係は冷却系コントローラで制御するようになっている。以上の4個の主要制御部の相互連絡により75 kG 大形超電導電磁石は励磁運転されたのである。

3. 超電導コイルの基本設計

3.1 準安定化超電導コイルの概念と設計方針

完全安定化コイル方式はアメリカのアルゴンヌ研究所などの大形超電導電磁石の設計製作で採用⁽¹⁾されており、最も安全確実な方式と認められている。しかしこの場合、コイルの平均電流密度を著しく小さくとる必要がある。実用超電導電磁石としてはできるかぎり設計電

流密度を高くして、コイルを小形軽量化する必要がある。このためには完全安定化理論の与える限界以上のコイル電流で設計しなければならないが、この場合外部的ないし内部的なじょう乱によって、使用線材の臨界電流で遷移する危険性がある。これがデグラデーション現象とよばれ大形超電導電磁石の設計上最大の問題であった。

複合超電導線の電圧 V - 電流 I 特性は、一般に図 3.1 のようになる。完全安定化領域 ($0 < I < I_c$) では超電導 ($V=0$) の状態のみであるのに対し、準安定化領域 ($I_c < I < I_{c0}$) では、超電導と常電導の2種類の状態が存在する。準安定化領域における超電導状態から常電導状態に遷移する(超電導消失)可能性は、(1) 複合超電導線の銅量、(2) 冷却条件、(3) じょう乱の大きさの3条件の関数であることがわかっている⁽⁸⁾。じょう乱としては外的なもの(機械的・電氣的・熱的じょう乱)と内的なもの(Flux jump, Flux flow など)の両方を考えなければならない。この三つの条件に関する基礎データをもとに、準安定化領域で安全に設計されたコイルを準安定化超電導コイルと呼ぶ。以上の考え方を基本とし、ここでは以下の方針によってコイルを設計した。

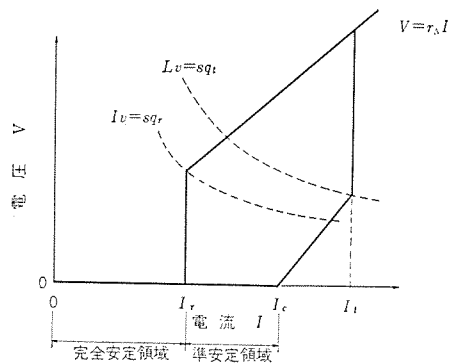
(1) コイル設計電流値は、完全安定化の概念で与えられる電流限界よりも大きくとる。

(2) 複合超電導体に付加する銅量は、発生しうる最大じょう乱の下で、準安定化領域でも SN 遷移しないために必要な銅量とし、冷却条件もこれに対応して決める。

(3) 銅量を決める他の要素として、SN 遷移しても制御系の操作によって焼損防止できるという条件をとる。

(4) 精密な励磁制御により、外部じょう乱を最小限にとどめる。

(5) 誤って臨界電流以上の通電をおこった場合も、精密な励磁制御によって、準安定化領域において存在するわずかの可逆的 $V-I$ 特性領域でいち早く検出し、適切な処置をとる。



I : 電 流 (A)
 V : 電 圧 (V/cm)
 q_t : 液体ヘリウムの核沸騰における熱伝達率の上限 ($\sim 0.9 \text{ W/cm}^2$)
 q_r : 液体ヘリウムの核沸騰に復帰する熱伝達率 ($\sim 0.6 \text{ W/cm}^2$)
 r_N : 常電導体抵抗 (Ω/cm)
 I_C : 臨界電流
 $I_r = \sqrt{sq_r/r_N}$
 $I_t = \frac{I_{st}}{2} + \sqrt{\frac{sq_t}{r_N} + \left(\frac{I_{st}}{2}\right)^2}$
 I_{st} : 核膜沸騰遷移時における超電導電流 ($I_{st} \leq I_C$)

図 3.1 準安定化の概念 (V-I 特性)
Conception of quasi-stabilization (voltage-current characteristics).

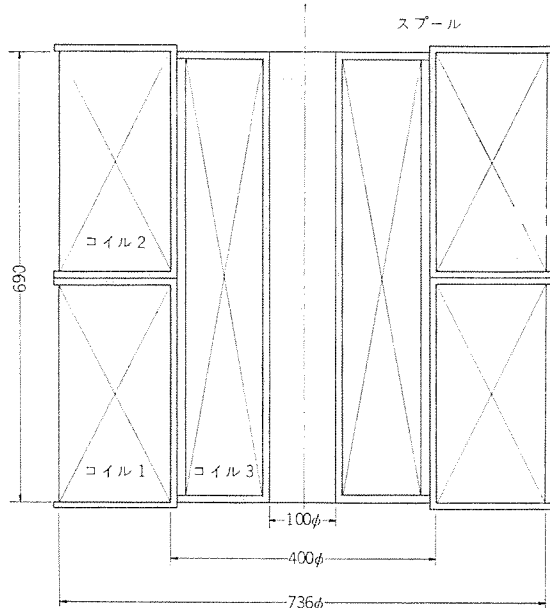


図 3.2 コイル構成
Schematic layout of each coil.

本超電導磁石の複合超電導線の寸法・特性およびコイル構成、励磁制御系は、今までに得られている基礎データをもとに上記の方針によってシステム的に設計されたものである。

3.2 コイル構成

コイルは図 3.2 に示すようにコイル 1, コイル 2, コイル 3, の 3 個のコイルから構成されている。コイル 1, 2 とコイル 3 は別々に励磁できるようにになっており、結局外側コイル (コイル 1, 2) と内側コイル (コイル 3) の 2 ブロックから成り内径 100 mm の空間に 75 キログauss の磁界を発生させることができる。また外側コイルのみを励磁することにより内径 400 mm の空間に 55 キログauss の磁界を発生させることができる。コイル形式はパンケーキ形であり Ti-Nb-Ta と銅の安定化複合超電導線⁽⁷⁾を巻いたパンケーキコイルをコイル 1 に 22 個, コイル 2 に 22 個, コイル 3 に 30 個, 積み重ねた合計 74 個のパンケーキコイルにより形成されている。

当超電導コイルの諸元を列挙すると次のようになる。

巻線材 Nb-Ti-Ta, OFHC, 複合超電導線 (Soldered)
 導体寸法 外側コイル (コイル 1, 2) 1.4 mm 厚×10 mm 幅

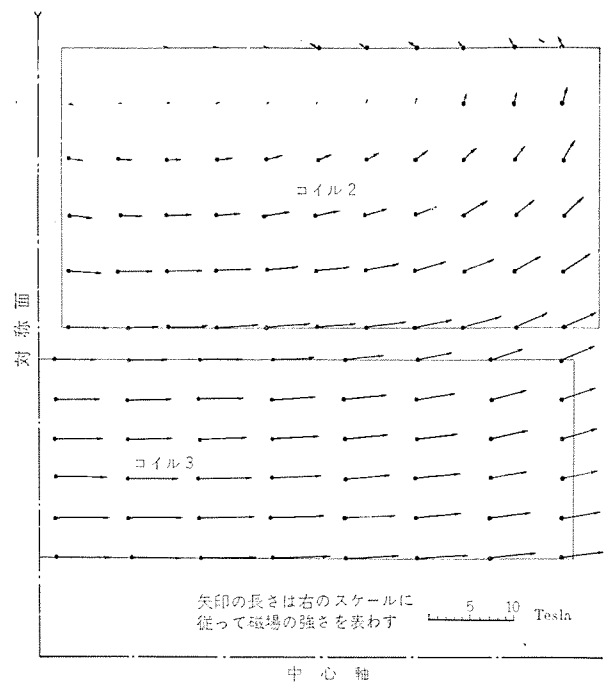


図 3.3 75 キログauss 超電導磁石磁界分布のベクトル図
Vectorial distribution of magnetic field.

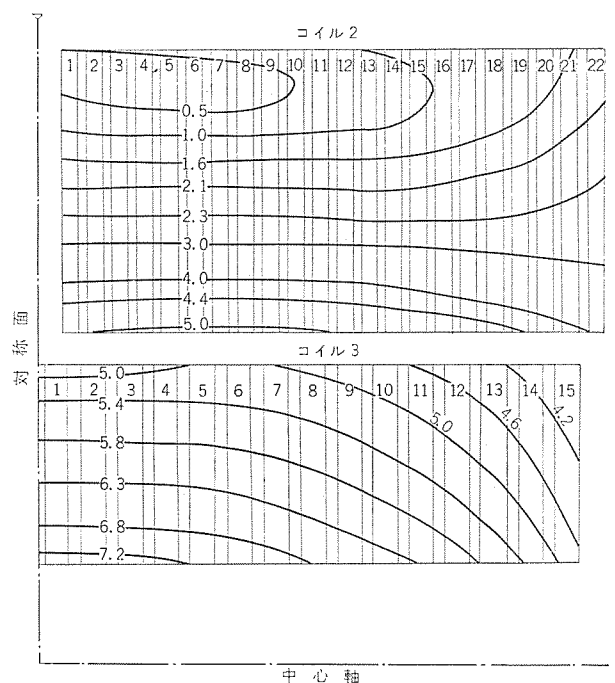


図 3.4 75 キログauss 超電導磁石の等磁束密度線図
Lines of constant magnetic field intensity.

内側コイル (コイル 3)		2.0 mm 厚×15 mm 幅
巻線形式	フラットワイズ 巻 パンケーキ	
ターン/パンケーキ	外側コイル	104
	内側コイル	53
パンケーキ数	外側コイル	22×2
	内側コイル	30
	合 計	74
全 ターン 数	外側コイル	約 4,600
	内側コイル	約 1,600
	全 体	6,200
全常温抵抗	13 Ω	

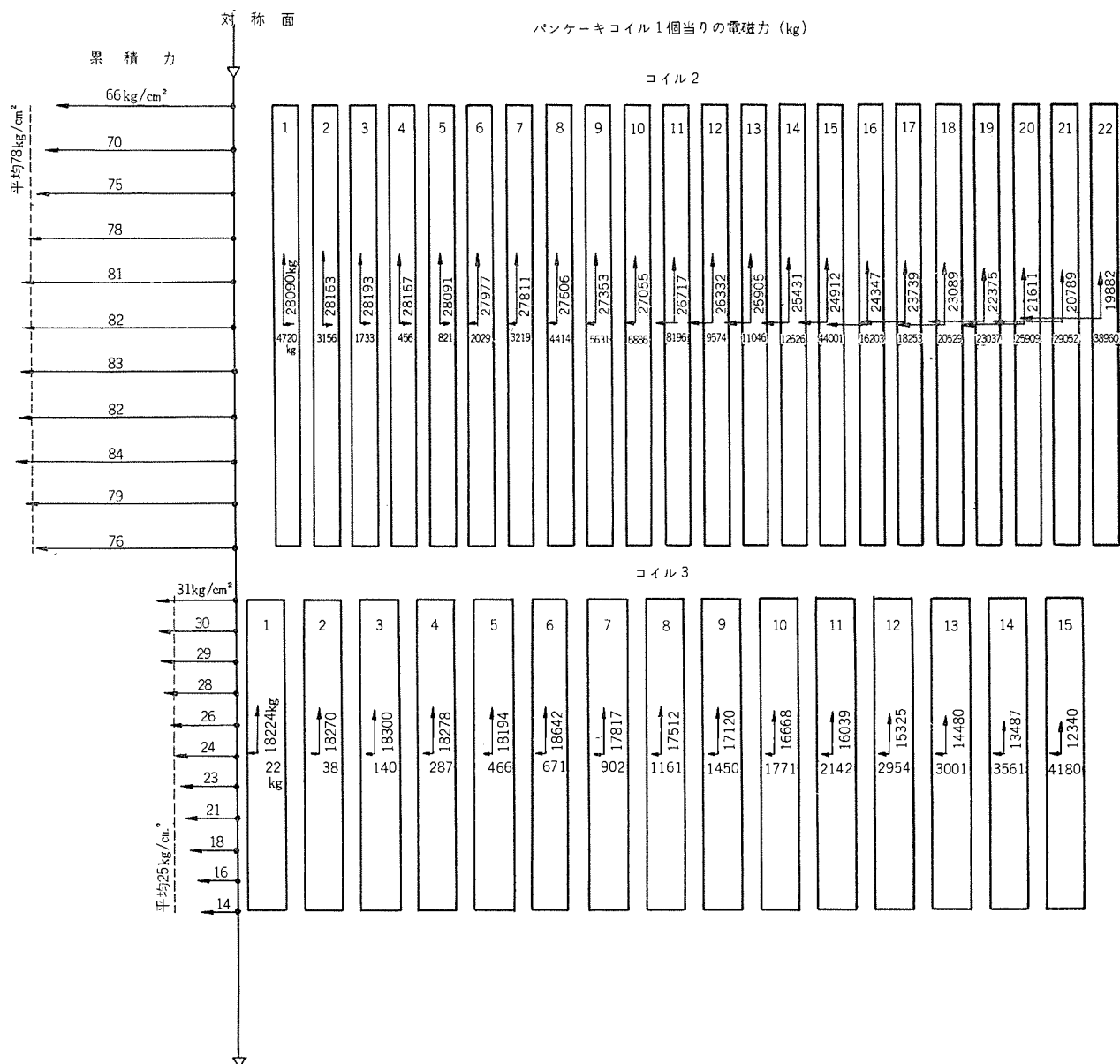


図 3.5 75 キロガウス 超電導 マグネット の電磁力分布
Distribution of magnetic force.

励磁電流 直流 800 A

導体における平均電流密度 外側コイル 約 60 A/mm²
内側コイル 約 30 A/mm²

全導体重量 1.3 t

全重量 1.6 t

パワーリード線 3 ユニット

3.3 磁界分布

当コイルは電流値 800 A で中心に 75 キロガウスの磁界を発生することができるが、コイルの任意の点における磁束密度の計算結果をベクトル図で図 3.3 に示す。また等磁束密度線図を図 3.4 に示す。

これらの図は Biot-Savart 法により計算した結果によるものである。超電導線はその線材固有のある定まった磁界（臨界磁界）以上の磁界中では超電導性はこわれ大きな抵抗を有するようになる。したがって上記の計算結果に基づいて線材の特性、各パンケーキの配置等に細心の注意が払われている。

3.4 電磁力分布

この超電導コイルは高磁界、大電流で設計されている。したがって $F=I \times B$ (F は電磁力, I は電流, B は磁束密度) で表わされる電磁力は非常に大きい値となるから、コイルの設計には強度的な面にも非常に注意を払わなければならない。当コイルの各部分に働く電磁力分布の計算値を図 3.5 に示す。電磁力はコイルを外部に押し広げようとする半径方向の成分と、コイルを中心を通る軸に垂直な平面に押しつけようとする軸方向の成分の 2 成分から成っており、半径方向の成分はコイル 1, 2 においてはその合計がともに約 560 トン、コイル 3 においては 250 トンにもなる。この力にはコイル自身が耐えるように設計されている。また中心を通る軸に垂直な面には外側コイルでは約 250 トン、内側コイルでは約 23 トンの圧縮力が働くがこれに耐えるようにコイル間スパーサー、巻きわく等の材料、形状に工夫をしなければならない。

4. コイルの構造設計と工作

超電導電磁石の製作については、昭和 42 年国産第 1 号の 60 キロガ

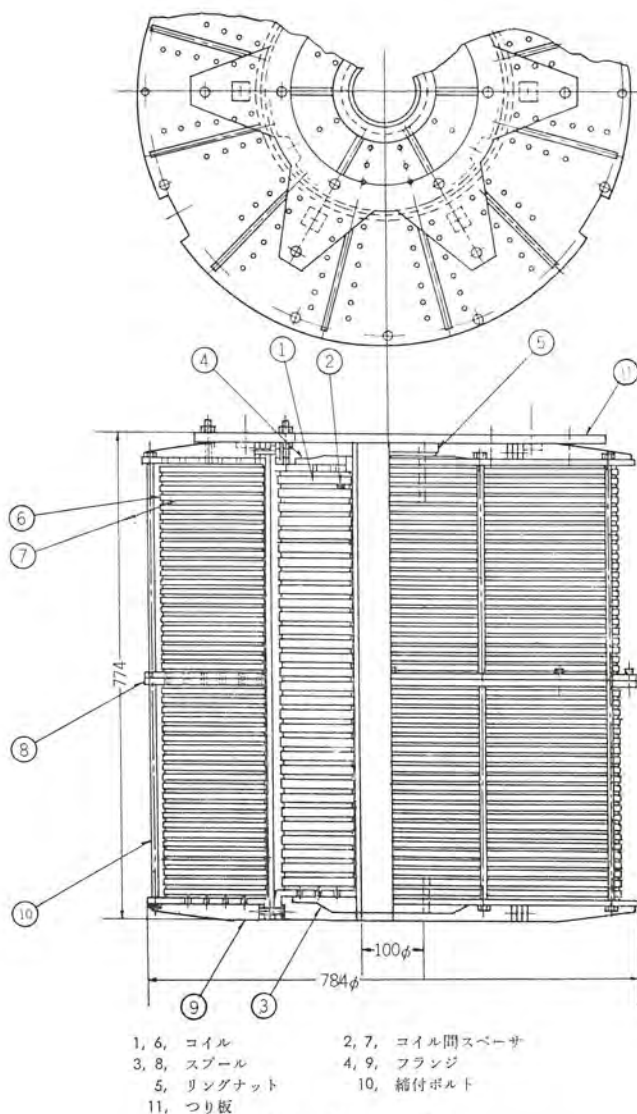


図 4.1 外形図
Outline of coil assembly.

ウスソレノイドコイル完成以来、小形ソレノイドコイルはもとより、化合物超電導テープを用いた荷電粒子収束用 Q マグネットなどを含め数多くのコイルを納入し好評を得ている。しかし今回製作したコイルは最大級の大形パンケーキ状コイルで、その構造設計および工作法に関して当初から多くの課題が提起された。おもな問題点として下記があげられる。

- (1) コイルターン間の絶縁材料の選定と巻線方法
- (2) ユニットコイル間のスペーサの選定と工作
- (3) 電磁力に対するコイル支持構造と組立方法

スプール、フランジなどの構造材料は、予冷時間を短縮する意味から、より軽量なものが望ましく、綿密な強度計算を行ない軽量化に努めた。また強大な電磁力と極低温時に諸材料間に発生する熱収縮力に耐える強固な構造を実現するためには、各ユニットの均質な工作が前提となるので、きびしい品質管理を実施した。

図 4.1 はこの電磁石の外形図である。以下工作順に概要を述べる。

4.1 巻線

巻線に先立って、まずターン間絶縁材料を決めなければならない。この絶縁材料の厚みは、コイル巻数すなわち中心発生磁界の大小に直接影響する寸法であり、薄い絶縁物のテープを採用した。このよう

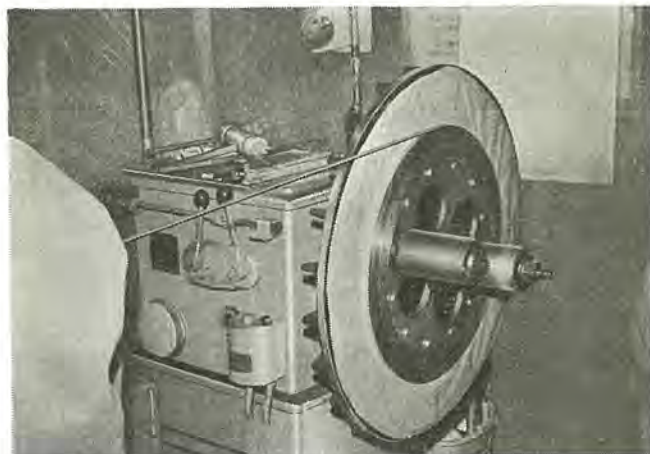


図 4.2 巻線作業 Winding work.



図 4.3 ターン間短絡試験
Inspection of layer short circuit.

に薄いターン間絶縁材料にあっては、ターン間短絡防止の面からはその幅寸法を導体よりいくぶん広くすることが望ましいが、これを巻線後加熱硬化した場合、絶縁テープに含浸したワニスがコイル表面をおおうようにはみ出し、冷却効果の面からは好ましくない。この両面から試作検討を重ね、超電導ケーブルの面取りなどを考慮してターン間絶縁材料の幅については十分な検討のうえ決定した。またターン間絶縁材料に含浸させるべきワニス量についても事前に数多くの試作コイルを製作し検討を重ねた。コイルは巻型を使用しパンケーキ状に巻き上げたターン間絶縁材料としてきわめて薄いものを用いたため、巻線時に銅粉またはその他導電性のじんあい(塵埃)を巻き込んだ場合、ターン間絶縁耐圧の低下につながるおそれがある。これを防ぐため巻線および組立作業は終始防じん作業場で行ない、巻線時には数ターンごとにターン間の電圧ドロップを測定し、異常のないことを確認しながら巻き上げていった。(図 4.2, 図 4.3)

こうして巻き上がったコイルは巻型を利用し所定の寸法までボルトで締め上げ、乾燥炉中に数時間放置してターン間絶縁材含浸ワニスを完全硬化し、強固なパンケーキコイルに成形した。成形したパンケーキコイルは、2 個づつサージコンパリジョンテスターによって再度ターン間短絡の有無を確認し、完全にミスのないユニットコイルを完成した。

4.2 コイル本体組立

成形したパンケーキコイルをスプールに組み込むに先立って、コイル間のギャップを維持するためのスペーサを決め、これをどのように固定するかを検討しなければならない。スペーサがコイルと接する面の増加はそのまま冷却面積の減少となり、スペーサの幅は狭く、長さは短

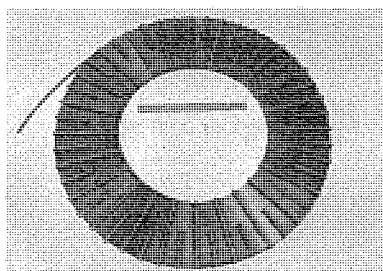


図 4.4 成形コイル Finished unit coil.

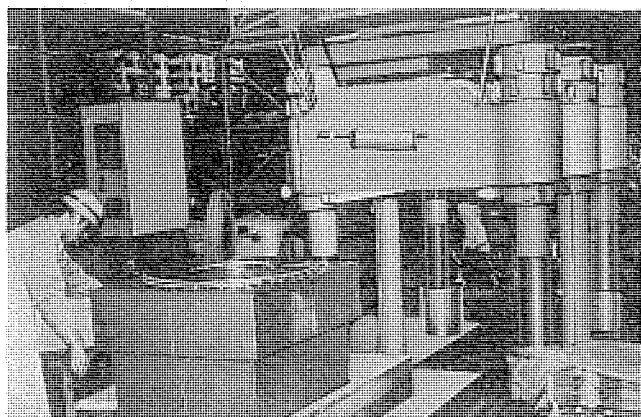


図 4.5 加圧試験 Pressure test.

く本数は少ないほうが好ましい。しかしこれらは電磁力による導体とスペーサ間の面圧、および導体に両端固定はりとして生ずる曲げ応力からおのずと制約を受け、計算の結果長短2種類のエポキシ系部材を数本放射状に配置した。このスペーサ絶縁材および固定法の選定にあたっては、極低温において強大な電磁力に耐えうる強度を持ち、また導体との熱収縮率の相違によるはく(剝)離のない材料を開発すべく数種類の絶縁材料を実物大コイルにスペーサを固定し、低温で繰り返し劣化試験を行ない、またその後実際に発生する電磁力に等しい力でプレスし、なおかつはく離のないものを採用した。(図 4.4, 図 4.5)

またコイル間スペーサは単にコイル間ギャップを維持するためのものではなく、各ユニットコイル間の磁界中心の不一致によって生じる電磁力にも耐え、コイルの移動を防ぐ構造材としての機能をも持たせている。冷却時および運転時のコイル表面温度測定用熱電対および抵抗温度計、ならびにユニットコイルの電圧ドロップ測定用リード線などはスペーサ固定と同時に埋め込んで固定した。

スペーサはり付けを完了したコイルはその表面を清掃し、2個のユニットコイルを心合わせして別途製作した内側わたり線で接続した。わたり線の接続には溶接法を用いた。はんだかごの温度は高いほど溶接のまわりが早く作業が容易であるが、超電導線およびターン間絶縁材に悪影響を及ぼすため、常に一定温度で作業するよう温度管理を行なった。

さてこのようにしてでき上がったダブルパンケーキコイルをいよいよスプールに組み込むわけであるが、用意されたスプールおよびフランジは軽量かつ強固に設計製作され、また冷却時にHeガスがコイル全体に均一にゆきわたり、一様に温度が下がるように数多くのHeガス通路用の穴がけられている。

ダブルパンケーキコイルはスプールに組み込まれた後外側わたり線でおの接続しコイルブロックとして組み上げられた。こうして組み上げたコイルにフランジを取り付け油圧プレスで加圧後ボルト締めした。この

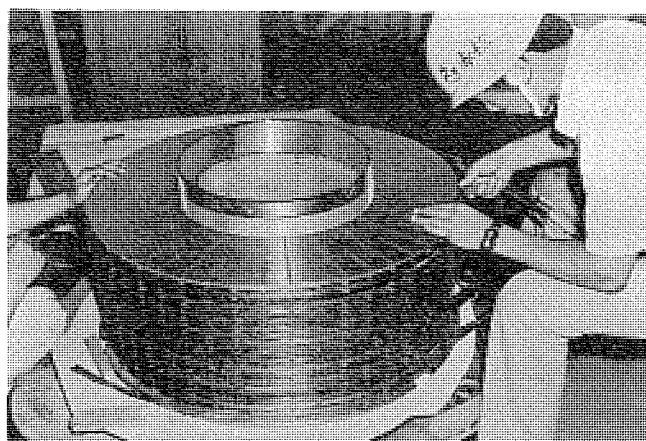


図 4.6 組立 Assembly work (outside coil).



図 4.7 組立 Assembly work (inside coil).

加圧によってコイル内の不要なすきを完全に取り除くことができた。またボルト締め付け力は、極低温におけるコイル、スプールおよびボルトの熱収縮の差によって発生する応力を考え、トルクレンチを用いて均一に締め上げた。この3個のコイルブロックはフランジでボルト締め結合し、各コイルブロックから引き出したパワーリードは上部フランジ面で結線を行なった。(図 4.6, 図 4.7, 図 4.8)

4.3 常温試験

コイル製作にあたって各工程の間には必ず試験・検査を実施し、確認しながら組み立てていった。以下実施した試験検査項目について述べる。

(1) コイル単体試験

- (a) 寸法測定 コイル内径、外径およびコイル間スペーサを含むコイル厚さの測定
- (b) 重量測定
- (c) 電気抵抗測定
- (d) ターン間短絡試験 巻線時には微小直流電流を通電し、ターンの電圧ドロップを測定しターン間短絡の有無を確認した。また、巻線完了硬化後にはサージコンパリジョンテスターでターンの短絡試験を行なった。

(e) 外観検査 コイル冷却面へのウレタンのはみ出しや、油ほこりなどがいないことおよびスペーサの接着を確認した。

(2) 組立最終試験



図 4.8 組立
Final assembly work.

- (a) 電気抵抗測定 ダブルブリッジで各コイルブロックの抵抗を測定し、最後に全シリーズ抵抗を測定した。
- (b) 絶縁抵抗測定, 10 MΩ のデータを得た。
- (c) 対地耐圧試験 AC 60 Hz, 100 V 30 秒, 150 V 30 秒, 200 V 60 秒を連続印加して絶縁破壊は起こらないことを確認した。
- (d) ターン間短絡試験 ダブルパンケーキコイル2個単位にサージコンパレリジョンテスターで試験し、ターン間短絡の有無を判定した。
- (e) 重量測定
- (f) 結線および断線チェック
- (g) 組立完成寸法測定

以上のように設計から完成までの数多くの実験と、各工作過程におけるきびしい品質管理の実施によって、励磁試験完了後の検査においてなんら異常は認められなかった。今回のこの貴重な経験は今後のさらに大形の超電導電磁石の製作に生かされるであろう。

5. 大電流リード線

この超電導電磁石は3個のコイルから構成されており、その電気結線を図 5.1 に示す。主励磁リード線 I, II は全コイル巻線の両端に結線され、全コイルを直列に励磁するためのものである。今回の励磁試験ではこの主励磁リードのみを使用して試験した。補助リード線はコイル1, 2 とコイル3の間に配置し、将来の実験でコイル間の電流分配を変えるためのもので、今回の実験には使用しない。アースリードはインダクタンス的にみたコイル巻線の中心に配置してあり、接地用に使用されている。

リード線本体として、すでに開発済み⁽⁹⁾のガス冷却形大電流リード線を適用した。リード導体は高純度の銅でできており、その表面には2重コイル形の熱交換器を設け、その部分にクライオスタットから蒸発

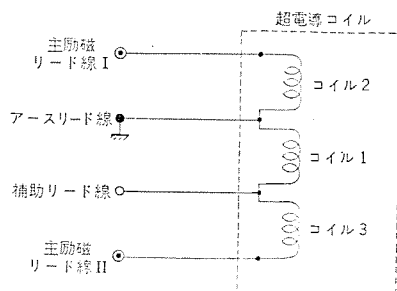


図 5.1 コイルの電流結線と大電流リード線
Current connecting line of coil and heavy current lead wire.

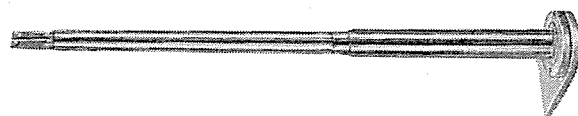


図 5.2 ガス冷却形大電流リード線, 定格電流 800 A
Gas cooled type heavy current lead wire, rated current 800 A.

表 5.1 使用した電流リード線
Lead wire used.

リード線	方式	電流容量	ユニット数
主励磁リード線	ガス冷却形	800 A	2
補助リード線	ガス冷却形	400 A	1
アースリード	非冷却形	800 A (短時間)	1

した冷たいヘリウムガスで冷却する方式である。なお本方式のリード線の通電時の浸入熱量 Q_L は、電流を I として

$$Q_L = 1.4 \times 10^{-3} I (W)$$

で与えられることがわかっている。

表 5.1 に使用した電流リードをまとめておく、アースリード線は5φの真ちゅう材を使用しており特別な熱交換器は設けていない。図 5.2 は主励磁リード用として使用した。800 A の容量をもつものである。

6. 電磁石の組み立て

図 6.1 は、クライオスタットに組み込むために、フランジサポート系と組

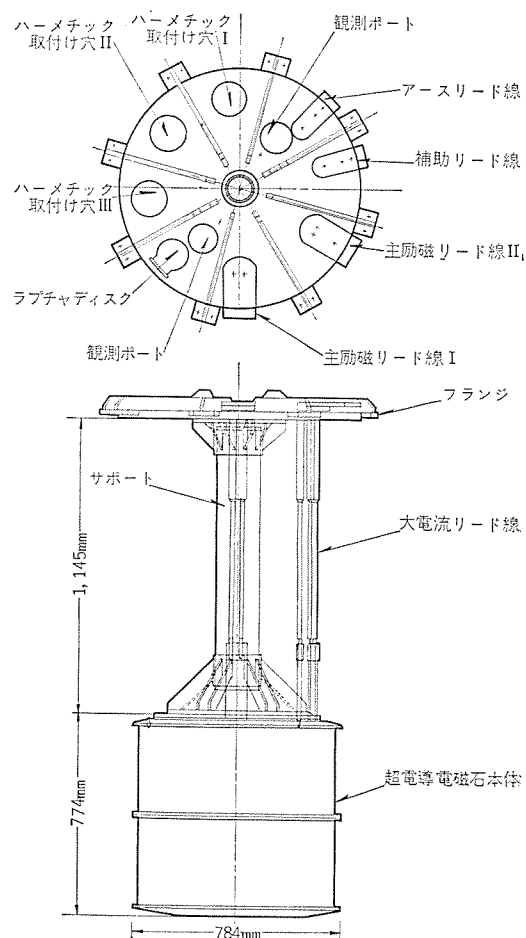


図 6.1 75キロガウス超電導電磁石の組立
Construction of 75 kilogauss superconducting magnet.

み立てた構造を示すものである。実際の組み立ては次の手順で実施された。

- (a) サポートとフランジの固定
- (b) 電磁石本体とサポートの固定
- (c) 大電流リード線の取付けおよび結線
- (d) 測定プローブおよびケーブルの取付け結線

フランジは、クライオスタットの上部気密・真空フランジを兼ねるものであり、大電流リード線取付け穴4個所、測定ケーブル引出し用ハーメチック端子取付け穴3ユニット、低温冷却・ヘリウム供給用配管取付け穴1個所、ラプチャディスク取付け穴1個所を有する。サポートはステンレス製の円筒で電磁石の荷重0.3トンをささえると同時に、電磁石に横方向に働く偏心荷重0.3トンに耐える構造のものである。この偏心荷重はクライオスタット周辺の鉄製機器の非対象な配置にもとづく電磁的吸引力である。

測定ケーブルはすべてハーメチック端子を用いクライオスタット外部に引出した。測定プローブ中おもなものは次のとおりである。

- (a) コイル電圧分布測定プローブ 80個所
 - (b) 磁界測定プローブ(ホール効果素子) 10個所
 - (c) 冷却温度測定プローブ(熱電対) 10個所
 - (d) コイル微小温度変化測定プローブ(カーボンレジスタ) 10個所
- 組み立てられたコイルの外観を図2.2に示した。

7. む す び

この75キログauss超電導電磁石は、発生磁界、大きさなどの点で国内はもとより世界でも製作例の少ないものである。したがってその開発には未知の技術問題がいくつか存在したが、広範な基礎研究・

予備試験研究によって解決され完成することができた。試験については別の論文⁽⁷⁾で詳しく述べるが、励磁電流800Aで75キログaussを安定に発生できた。この電磁石の開発成功によって日本の超電導の技術が世界のトップクラスに達したことが証明されたものといえよう。また今後の超電導電気機器の開発に大きな足がかりを与えるものであろう。

本委託研究の実施に際し、数々のご援助をいただいた通産省工業技術院の方々、電気試験所機器部およびワーキンググループの方々に対し深謝いたします。(昭和44-10-20受付)

参 考 文 献

- (1) J. Purcell, Gerald C. Van Tilbing : How largest Superconducting Magnet Was Built, *Insulation*, March (1969)
- (2) J. File, G. D. Martin, R. G. Mills, and J. L. Upham : Stabilized, Levitated Superconducting Rings, *Journal of Applied Physics*, 39, No. 6, May (1968)
- (3) Homopolar Motor with Superconducting Windings, *Electrical Review*, 9 February (1968)
- (4) Supermagnetism supports a train at airliner speed, *Product Engineering*, January 16 (1967)
- (5) S. Way : Electromagnetic Propulsion for Cargo Submarines, *Journal of Hydronautics*, 2, No. 2, April (1968)
- (6) 萩野ほか : 三菱電機技報 43, 12 (昭44)
- (7) 小俣ほか : 三菱電機技報 43, 12 (昭44)
- (8) 佐藤, 岩本 : 第2回低温工学研究発表会 S-15 (昭43)
- (9) 佐藤, 岩本, 山田 : 第4回低温工学研究発表会 S-8 (昭44)

75 キロガウス大形高磁界超電導電磁石 (II) — 運転試験 —

荻野 治*・神頭 徳治*・佐藤 隆*・山田 忠利*
田中 光雄*・平田 郁之*・岩本 雅民**75 Kilogauss High Field Large Superconductive Magnet
Part II — Its operation and test resultsCentral Research Laboratory Osamu OGINO・Noriharu KANTO・Takashi SATOW
Tadatoshiki YAMADA・Mitsuo TANAKA
Ikuyuki HIRATA・Masatami IWAMOTO

Success has been achieved for steady and safe magnetic operation of a 75 kG large superconductive magnet. This successful test operation has proved the excellence of productive technique of superconductive materials and also of design and building technique, cryogenic technique and magnet control technique in connection with the superconductive magnet. This article covers brief description of a cryogenic system and method, a magnet control device, a control method, a testing method and their results in reference to the test on the 75 kG large superconductive magnet. All the proceedings have been carried out as planned previously and no trouble has been met with.

1. ま え が き

75 キロガウス大形超電導電磁石は、本誌の他の稿で報告されている数多くの各セクションの研究検討の結果を総合結果としてはじめて完成されたものである。本文ではこの電磁石を液体ヘリウム温度に冷却して励磁し、実際に75キロガウスの磁界を安定に発生させた試験についてその概要を述べる。これに先立って、この成功に至るまでになされた各セクションの研究概要を以下に箇条書で報告する。

(1) 超電導素線は一部70キロガウス以上の高磁界にさらされるので、80キロガウスに耐える素線の開発とこの素線と銅ケーブルとはんだ法で構成する方法、さらに巨大な電磁力と電磁界の下での超電導素線、銅ケーブル、はんだおよび複合線の特性の検討。

(2) 構造材、スペーサ材などに使用される通常金属や強化プラスチックおよび絶縁材の極低温の特性とそれらの構成方法。

(3) 低温にしたときの各構成材の膨脹係数の差による熱応力発生の問題。

(4) 安定かつ安全に通電するための運転方法および電源、制御系の検討。

(5) 重量1.6 tにおよぶ電磁石を長時間、経済的に極低温に保持する技術および系外よりの熱流入の検討。

以上の諸研究の総合結果を示すものが励磁試験である。試験にあたっては、この大形超電導電磁石が安定かつ安全に運転されることを確認するために、(a) 冷却効率および冷却速度、(b) 励磁電流と異常電圧の発生、(c) 各部の温度と磁界、(d) 外部よりの侵入熱量、等の測定を実施した。試験の結果75キロガウスの高磁界を何の問題もなく安全に発生させることに成功し、前述の諸問題が解決されたことが実証された。以下にこの大形超電導電磁石の励磁試験について、その試験装置の概要、試験方法、試験結果について述べる。

2. 冷 却 系

2.1 冷却系の構成

超電導電磁石を室温から4.2°Kまで冷却する方法として、Heガス冷凍機により電磁石を30°Kに予冷した後、液体ヘリウムを供給して電磁石を超電導状態とする冷却方法を用いた。冷却系は液体ヘリウムの貯蔵容量500 l、予冷装置の冷凍能力は30°Kにおいて60 Wで、冷凍系、液化系およびHeガス回収系より構成される。図2.1は冷却系の構成を示す系統図である。

冷却すべき電磁石は冷凍系のクライオスタットに収納されて、冷凍機と低温配管で形成されたクローズド・ループ方式により冷凍が供給され、液体ヘリウムは移送管により、コンテナからクライオスタットに供給される。クライオスタットとコンテナから蒸発したHeガスは回収系に導かれ、ポンプに貯蔵してふたたび液化に使用される。

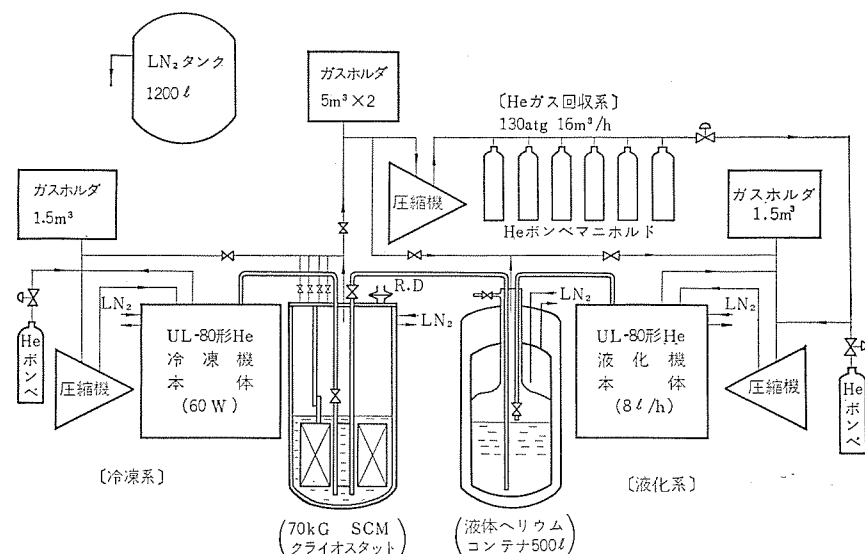


図 2.1 75 kG 超電導電磁石冷却系構成
Cryogenic system of the 75 kG superconductive magnet

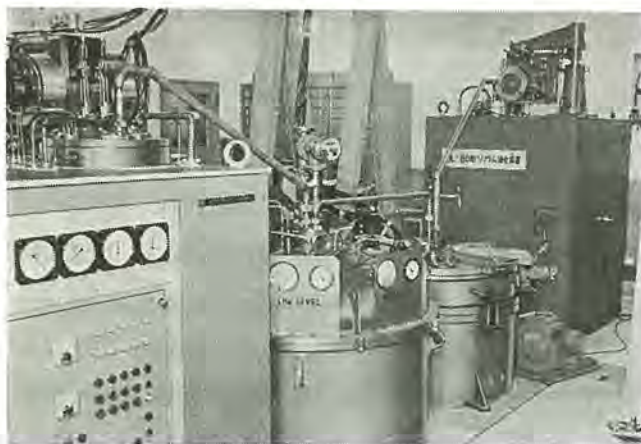


図 2.2 冷却系の全景
Full view of the cryogenic system.

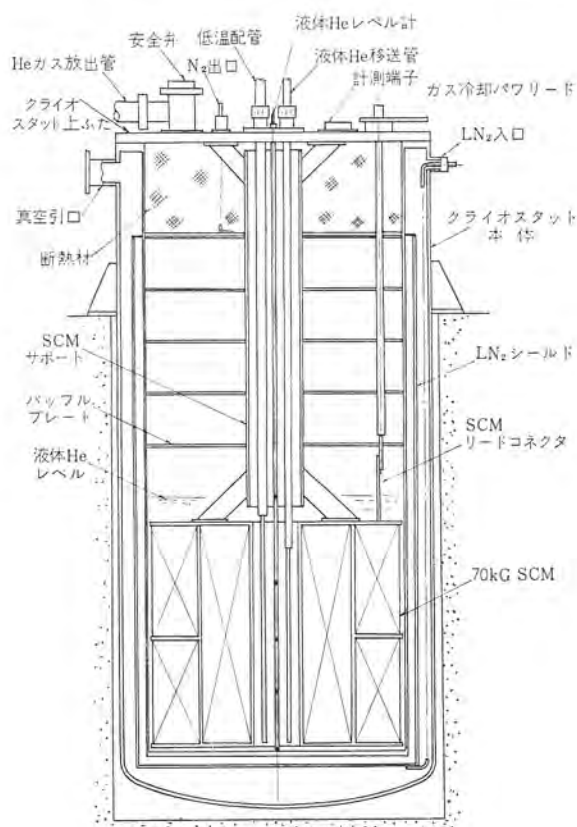


図 2.3 クライオスタットの構造
Outline drawing of the cryostat.

図 2.2 は冷却系の設置状況である。右から冷凍機、クライオスタット、液体ヘリウムコンテナおよびヘリウム液化装置が配置され、これらが低温配管によって結ばれている。

2.2 クライオスタット

重量 1.6 t の超電導電磁石を計画どおり冷却し励磁試験を確実に遂行するため、クライオスタットの設計上とくに重視した問題は、電磁石の支持方法と侵入熱量の軽減である。

クライオスタットの構造を図 2.3 に示す。形式は高真空断熱と液体窒素冷却シールドを併用した内径 800、外径 900、高さ 2,000 の液体ヘリウムデューフである。電磁石を支持する方法は上ふた（蓋）、サポートおよび電磁石を一体化して組込後クライオスタットの外筒で全重量を支持する構造にした。サポートは熱侵入を軽減するためステンレスパイプを採用し、また設計上、励磁試験時にパンケーキコイル構成上の偏心により



図 2.4 クライオスタット
Cryostat.



図 2.5 低温配管
Transfer tube.

電磁石に働く電磁力（水平荷重）に耐える構造にした。サポートの強度は電磁力による水平荷重が 300 kg 働いたとき曲げ応力 6 kg/mm^2 、たわみ 0.3 mm 以下である。

侵入熱量に対してはクライオスタット上部にポリスチロフォームによる断熱層を設けて、He ガスの対流を防止した。さらに液体窒素冷却シールド板およびバッフルプレートを設置し、ふく射による侵入熱を極力小さくした。またヘリウムそう、低温配管および液体ヘリウム移送管などはステンレス薄肉パイプを使用して伝導による侵入熱量の軽減を計った。電磁石励磁用のパワリードは、液体ヘリウムの蒸発ガスの全量を流して伝導と発熱による熱損失を回収するガス冷却式で、単体試験の性能に基づき設計したものである。

冷却系計画の基準としてクライオスタットへの侵入熱量を求めると 5.3 W で液体ヘリウムの蒸発量に換算すると 7.4 l/h となる。内訳は伝導による熱量 1.8 W、ふく射による熱量 0.7 W、パワリード 2.8 W である。クライオスタットでの液体ヘリウム張込量は電磁石部 180 l に励磁試験中の蒸発量 70 l を見込んで約 250 l とした。液体ヘリウムに注入時の液面測定には、カーボン抵抗式レベル計を用い電磁石の空心部に取付けた。電磁石組込後のクライオスタットの外観を図 2.4 に示す。

クライオスタットの保護装置としては液体ヘリウムの大量蒸発による内圧上昇に備えて 0.8 atg で動作する破壊円板式安全弁と遠隔式手動緊急放気弁よりなる安全装置を設けた。真空装置は油拡散ポンプ 120 l/s とロータリポンプ 300 l/min を使用し、断熱真空そのの真空度を 10^{-5} torr 以下の高真空を維持できるようになっている。

2.3 冷凍機

超電導電磁石冷却用の冷凍機は、当初の標準機である VL-80 形ヘリウム液化装置を一部改造したもので、液体窒素による予冷と膨張エンジン 2 段による冷却方式が用いられている。冷却運転は 300°K から 120°K までは液体窒素による予冷をおもに利用し（液体窒素で冷却したヘリウムガスを循環させる）、120°K から 30°K までは膨張エンジンの冷凍を用いて冷却を加速し比較的短時間に所定の温度まで冷却できる。

実際に冷凍機からクライオスタットへの冷凍の供給は、図 2.5 に示す高真空断熱構造の低温配管により低温 He ガスをクライオスタット底部へ導き、電磁石の各巻線間を通過して電磁石を冷却し、これを圧縮機に戻すクローズドサイクルによって行なわれる。



図 2.6 液体ヘリウムコンテナ
Liquid helium container.

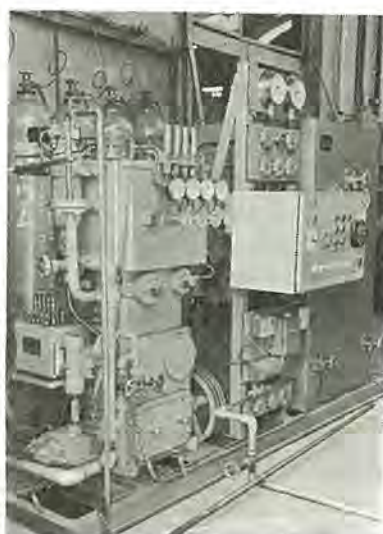


図 2.7 He ガス回収系
Helium gas recovery system.

2.4 液体ヘリウム供給系

本系は UL-80 形 He 液化装置と液体ヘリウムコンテナを外部 JT 低温配管で接続して長期間連続液化運転を可能にしたもので、液体ヘリウムを貯液してクライオスタットへ供給する機能をもっている。図 2.6 にその外観を示すように UL 80 形 He 液化装置、液体ヘリウムコンテナ、低温配管より構成されている。

He 液化装置は純化そう 2 台を用いた再生切替方式によって長時間の連続運転ができ、単体特性は圧力 16 atg、エンジン回転数 400 rpm (モータ駆動再生式) の動作状態で 8 l/h の液化能力をもっている。液体ヘリウムコンテナは液体窒素シールド式、活性炭吸着そう内蔵の高真空断熱方式で、液体ヘリウムの貯蔵容量は 500 l である。図 2.6 に外観を示す。液体ヘリウム供給用の移送管は高真空断熱を施しており、毎時 10~100 l の割合で供給量の調節ができる。ヘリウムそうの内圧上昇に対しては 0.5 atg で動作する電磁放出弁、0.7 atg で動作するリリーフ弁の二重安全装置を備えている。

低温配管(図 2.4 に外観を示す)は、液化機とコンテナに連結して高圧低温の He ガスをコンテナ内部に導入し、ジュールトムソン膨張を行なわせて液化する機能をもち全長を短くし、高真空断熱により液体

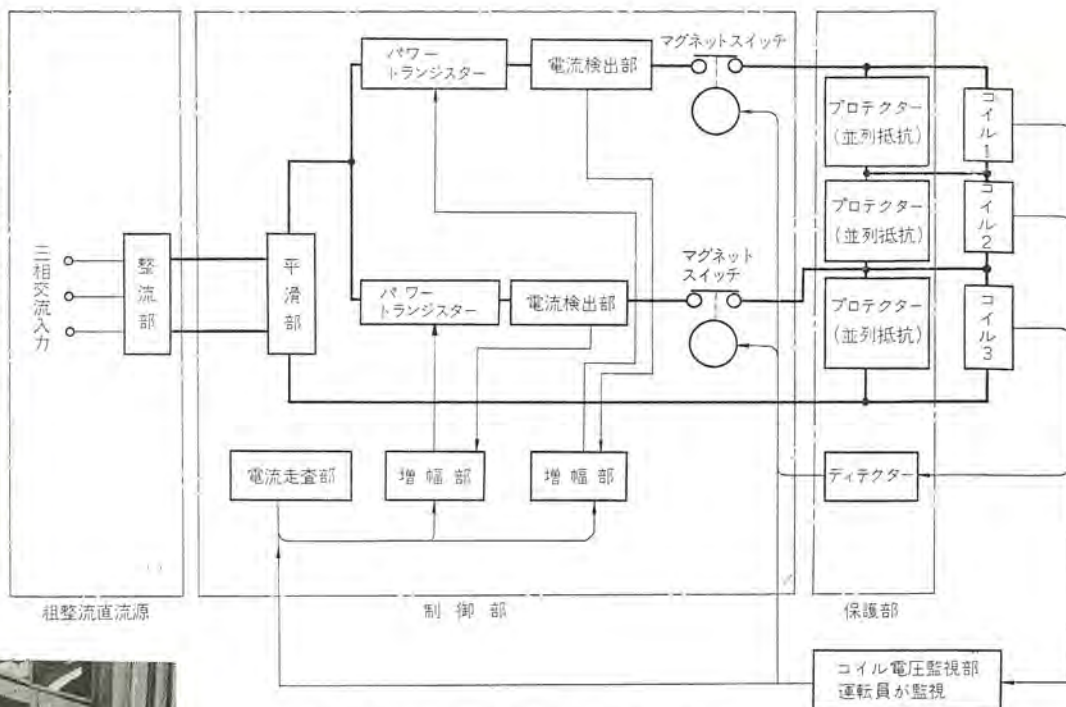


図 3.1 励磁制御装置ブロック図
Block diagram of power source and control system.

ヘリウムの損失が 1 l/h 以下になるように設計されている。

2.5 He ガス回収系

本系は液体ヘリウム移送時あるいは励磁試験における蒸発 He ガスを回収貯蔵して、冷凍液化系へ供給する機器を備えている。図 2.7 に示す当社製 PU-8 形 He 回収純化ユニットを基礎に回収ガスホルダおよび高圧貯蔵ポンプより構成されている。蒸発ガスはまず一度回収ガスホルダに回収してから圧縮機により 150 atg まで昇圧し、高圧ポンプに充てん貯蔵する。この回収貯蔵ガスは適宜液化系に供給してふたたび液体ヘリウムの生成に使用する。

回収ガスホルダは大気圧で 10 m³ の貯蔵容積があり、圧縮機の処理流量は毎時 16 m³ の能力がある。したがって励磁時において最大毎時 20 l の液体ヘリウムの蒸発ガスを完全回収できる。回収系と液化系および冷凍系は、完全なクロードシステムになっているので、回収ガス中への不純物の混入は皆無で純化そうによるガス精製操作が省略でき取扱いが非常に簡単となる。

3. 励磁制御装置

3.1 方式

超電導電磁石の励磁の際には、コイルに常電導部分が発生しはじめているかどうかということを経えずチェックしながら励磁する必要がある。常電導部分が広がっているにもかかわらず通電を続けると、常電導部分の抵抗によるジュール熱でコイルが焼け切れてしまう。もちろんこのような危険を避けるために後述の保護装置を設けているが、できうるかぎり早く処置しなければならない。そのため励磁は階段状に行ない電流を一定値に保持している間に、パンケーキコイル数個づつの抵抗性電圧を監視し超電導を確認しながら励磁する方式を採用した。また電源の安定度が悪いと超電導破壊の原因となるため高い安定度が必要である。

以上のような諸条件を満たすような電源を製作した。

形式 粗整流直流源を入力とした分割励磁用安定化制御装置。トランジスタ式、自動的多段励磁方式。

出力 主出力端子 700/800/900/1,000 A
補助出力端子 300/200/100/0 A
安定度 0.01 %/h

コイルが超電導破壊を起こした場合、直ちにそれを検出して電流しゃ断を行ないコイル内部にたくわえられているエネルギーを外部に吸収してコイルを保護する必要がある。この保護装置が検出器（ディテクター）と並列抵抗である。検出器は数個のパンケーキコイルに対して1個づつ取り付けられており（合計15個）、どの検出器がある設定値以上の電圧を検出しても自動的に電流しゃ断を行なうようになっている。並列抵抗はコイルと並列に結合されており超電導破壊を起こした際、電流しゃ断を行なった際等にエネルギーをコイル中で消費させずに並列抵抗中で消費させることにより、コイルの損傷と液体ヘリウムの蒸発を防ぐものである。

3.2 構成

3.1節で述べた励磁制御装置のブロック図を図3.1に示す。

ブロック図でわかるように、励磁制御装置は大きく分けて粗整流直流源と制御部と保護部の三つから構成されている直流源は粗整流直流源で低圧大電流の三相交流を整流し、さらに制御部の平滑回路を通してリップルを除く。その後電流検出部からフィードバックのかかったパワーランジスタにより電流制御が行なわれる。コイル1, 2, 3の各パンケーキコイルから電圧タップをとり出し、それをディテクターにいわれ絶えず自動的に各パンケーキコイルの発生電圧を検出し、発生電圧が設定値以上になると自動的にマグネットスイッチが動作し電流しゃ断を行なう。電流しゃ断が行なわれるとプロテクタによりコイル1, 2, 3の中に蓄えられていたエネルギーが吸収される。

以上のような自動制御に加えてコイル電圧監視部では、運転員がディテクターにはいつている各パンケーキコイルの電圧を監視しており、わずかの異常でも見い出せば手動で電流上昇停止、電流減少開始、電流しゃ断等の操作を行なうしくみになっている。

4. 試験

4.1 冷却試験

4.1.1 冷却方法

超電導電磁石の冷却とはコンテナに貯液した液体ヘリウムをクライオスタットに注入して、冷凍機により予冷された電磁石を4.2°Kに冷却し、電磁石全体を液体ヘリウム中に浸して励磁試験の実施を可能な状態にすることである。

実際の試験は次の順序で行なわれる。冷凍系と液化系を同時に起動して電磁石の予冷とヘリウムの液化を平行に行なう。そして電磁石の温度が平均30°K以下、液体ヘリウム貯液量400 l以上に達すると冷凍系を停止し、液体ヘリウムの注入を開始する。以後電磁石が4.2°Kに冷され、クライオスタット内に液体ヘリウムがたまって規定液面に達するまで液の供給をつづける。この間の蒸発ヘリウムガスは回収系に導入貯蔵して液化系に再使用される。

規定液面まで液体ヘリウムがたまると、液の注入を停止して励磁試験を開始する。この間液化系はクライオスタットへ液の補給ができるよう、コンテナへの液化運転を続行する。

4.1.2 計測関係

冷却系の運転に必要な計装は冷凍機、液化機、回収純化ユニットに計測制御装置および保護警報装置を完備し、長期間の連続運転が容易にできるようにした。以下に電磁石の冷却試験で準備した計測器について述べる。

超電導電磁石を液体ヘリウム温度まで冷却する際の電磁石内の温度分布を測定するために、銅—コンスタンタン熱電対を26対配置した。さらに、超電導電磁石が常電導遷移したときの複合超電導線の温度上昇を測定するためにカーボン抵抗温度計6個を電磁石内に配置した。

今回の実験のように大形の超電導電磁石では冷却時に大きな温度こう配が電磁石内に発生することが考えられる。すなわち、超電導電磁石は銅やステンレス鋼などの金属とガラス繊維強化プラスチックなどによって構成されるが、ステンレス鋼の低温における熱伝導率は銅の数百分の1、プラスチックの熱伝導率はステンレス鋼の数百分の1であるから、マグネット内部に温度差が生じやすい。これらの構成材は熱収縮率が異なるから、大きな温度差が生ずると熱ひずみによる応力が複合超電導線にかかり好ましくない。このため、電磁石内の温度こう配を測定しながら冷却する必要がある。内側および外層コイルの最上部、中央部、最下部のパンケーキコイルの表面にそれぞれ1対ずつ計6対を、ステンレス製巻わくの表面に8対を取付けた。さらに、電磁石からクライオスタット上ぶたまでの温度こう配を測定するために6対、パワーリードの温度測定に6対をそれぞれ取付けた。

一方、超電導電磁石が常電導遷移を起こしたときのコイル温度は10~20°Kに上昇することが予想される。銅—コンスタンタン熱電対は30°K以下の温度では感度が悪く、測定が困難であるから、この温度領域で感度の良いカーボン抵抗温度計を用いた。最も高い磁界におかれるパンケーキ4個の表面に6個のカーボン抵抗温度計を取付けてコイル温度を測定した。クライオスタットの液体ヘリウムレベル計はカーボン抵抗素子を使用しており、液体ヘリウム移送時の液面変化を正確に測定できる。一方液体ヘリウムの供給量の測定はコンテナの液面計（差圧式）が用いられ、液体ヘリウムの蒸発量はHeガス回収系のガスホルダのレベル変化より測定できる。その他励磁試験に必要なクライオスタットの内圧監視用圧力計と断熱真空度測定用真空計を備えている。計測器の仕様を表4.1に示す。

4.1.3 試験経過

超電導電磁石の冷却から励磁に至るまでの経過をつぎにのべる。

表 4.1 計測器一覧
Instrumentation.

名 称	形 式	仕 様
温 度 計	熱 電 対	300~4.2°K
レ ベ ル 計	カーボン抵抗	0~500 mm
圧 力 計	ブルトン管	0~2 kg/cm ²
真 空 計	冷 陰 極	10 ⁻³ ~10 ⁻⁹ torr

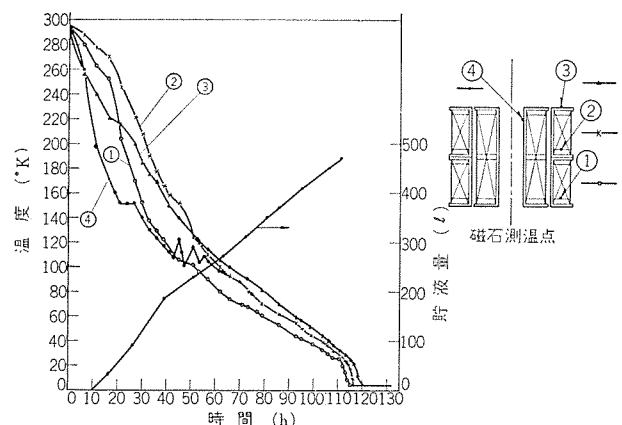
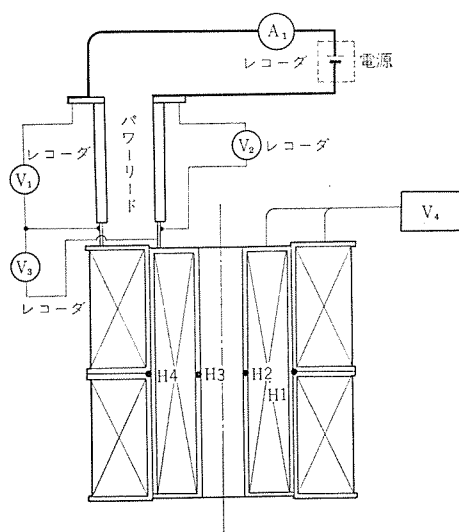


図 4.1 磁石の冷却特性および液体ヘリウム貯液量
Cooldown characteristics of magnet and contained liquid helium.

表 4.2 冷却特性
Cooldown characteristics.

磁石重量	1,600 kg
冷却時間 (300°K から 30°K まで)	110 h
液注入量	370 l
貯液量	260 l
液注入時間	10 h
冷却液量 (30°K から 4.2°K まで)	80 l
液蒸発量	30 l



A1 : 励磁電流測定用メーターおよびレコーダー
V1, 2 : パワーリード線における電圧降下測定用レコーダー
V3 : コイル電圧測定用メーターおよびレコーダー
H1~4, ホール素子
V4 : 各パンケーキコイル電圧測定用メーター

図 4.2 測定装置ブロック図
Diagram of measurement system of coil.

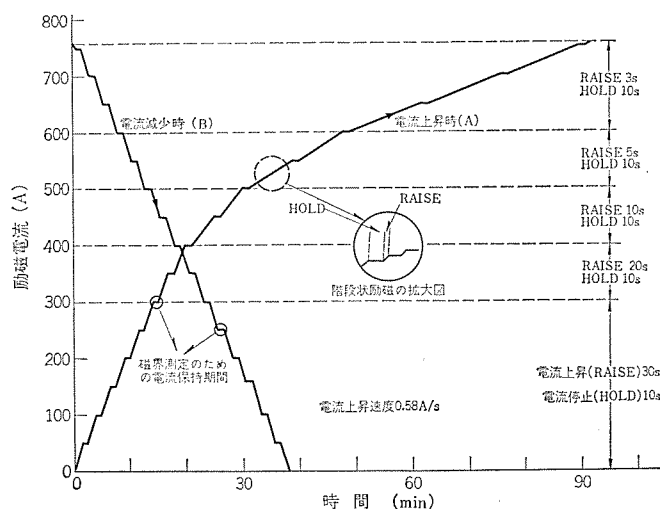


図 4.3 励磁方式
Method of excitation of the magnet.

まず真空装置の作動，ガス入れ換えなどの準備後，冷凍系と液化系を同時に起動して試験を開始した。液化系は10時間後に液体ヘリウムが生成が始まり80時間後，電磁石の冷却と貯液に必要な液体ヘリウム400 lをコンテナに貯りゅう(溜)した。冷凍系は起動後20時間はおもに液体窒素の冷凍を利用した冷却運転を行ない，以後膨張エンジンと協同して90時間後に電磁石の平均温度30°Kに到達した。図4.1に電磁石各部の温度降下状態を示す。この冷却期間で最も冷却の遅い電磁石中央部と電磁石下部との温度差は約50°Kであった。つづいて4.2°Kまでの冷却は冷凍機を停止して液体ヘリウムを注

入し，その蒸発の潜熱を利用した。液体ヘリウムの注入は110時間後に開始した。初め平均20 l/hの割合で行ない，約4時間後クライオスタット底部に液がたまりはじめた。その後平均48 l/hの割合で注入し液注入開始後約10時間で規定液面に達し，励磁試験を開始した。

励磁時の電流値の段階的增加に対して，クライオスタット圧力，真空そう真空度を監視したがまったく異状は見られなかった。励磁電流最大時における液体ヘリウムの蒸発損失は6 l/hでパワーリードを通して全量を回収系へ回収した。2回目の励磁試験に備え，液体ヘリウム100 l補給して規定液面を保った。

4.1.4 試験結果

冷却試験の結果，電磁石の冷却所要時間120 h，液体ヘリウム生成量合計550 lとなり，冷凍系および液化系の性能がほぼ予定どおり発揮されたことを確認した。

液体ヘリウム使用実績はつぎのとおりである。

クライオスタットの規定液面まで移送する間に使用した液体ヘリウムの量は370 lで，このうち260 lがクライオスタットにたまり，ほぼ計画どおりに液体ヘリウムの供給が行なわれた。液体ヘリウムの蒸発量は液体ヘリウム移送時に5 l/h，規定液面に到達後は4 l/h，励磁試験時は最大6 l/hであり，計画値の7.4 l/h以下になった。この差はパワーリードの損失が単体試験のときよりも減ったことによると思われる。冷却試験の特性をとりまとめ表4.2に示す。

4.1.5 検討

本冷却系の開発，試験を通じ，大形超電導電磁石の冷却に関する問題点を見出し，その大部分については解決されたことを確認した。以下におもなものを列挙する。

(1) 高性能小形ヘリウム液化装置による大容量コンテナの連続液化方式の確実性が立証された。

(2) クライオスタットへの侵入熱量の評価が正確であった。

(3) 小形冷凍機による磁石の最適予冷方法を確立した。

(4) 各低温配管の製作が完全であった。

4.2 励磁試験

4.2.1 測定項目

励磁試験で測定したものは次のようなものである。(a) 励磁電流，(b) 発生磁界，(c) コイル電圧(全コイル電圧，各パンケーキコイルの電圧等)，(d) パワーリード線における電圧降下。

これらの測定位置，構成図を図4.2に示す。測定器類は超電導電磁石の発生磁界の影響を受けないように電磁石から5 m以上離れた位置にすべて配置した。

4.2.2 測定状況および結果

コイルの励磁電流は，シャント付きの0.5級携帯用電流計で測定した。励磁中にコイルにどのような電圧が発生するかを観測，監視し，異常事態に速やかに対処できるように，パンケーキ4~6個ずつを一まとめにした電圧を，0.01~5 Vのダイヤル切換式多レンジ電圧計合計15台を用いて測定した。またこのほか各コイル両端の電圧や，適宜必要な個所の電圧を測定するための高感度電子管式電圧計も合計10台用意した。

発生磁界は，シーメンス社のRHY 17形ホール素子を用いて測定を行なった。この素子はInAsが使われており，極低温用に開発されたもので，温度変化によるゼロ電圧や感度の変化はほとんどない。ホール素子には定電流安定化電源により20 mAの電流を流し，ホール電圧は電子管式電圧計により観測した。素子の校正は，4.2°Kにおいては小形超電導マグネットによって80 kGまで行ない，また常

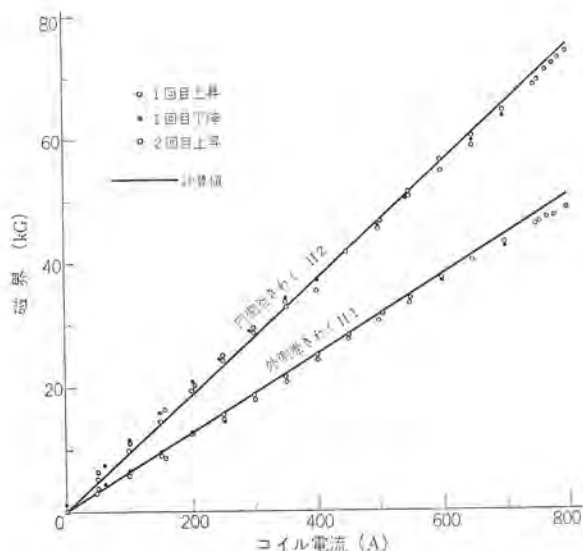


図 4.4 発生磁場と励磁電流
Magnetic flux density vs exciting current.



図 4.5 75 キロガウスの磁力を受けたクレーンの鎖
Photograph showing the strength of magnet force
by 75 kilogausses superconductive magnet.

温においては通常の銅鉄マグネットを用い、NMR 磁場計により校正した。

励磁はパンケーキ数個ごとの電圧を絶えず監視して、電圧発生のないことを確認しながら 0.58 A/s の電流上昇度にて階段状に行なった。電流減少時は 2 倍の速度 (1.16 A/s) で零まで減少させた。なおこの場合は階段状の動作は行なわなかった。図 4.3 に励磁方式のシーケンスを示す。第 1 回目励磁実験では図 4.3 に示されているとおりの励磁方式で 755 A (中心に 7 万 ガウスの磁界を発生する。ただしこれは計算値である) までの励磁を行なった。755 A 通電のまま 52 分間放置した。第 1 回目の励磁では約 3 万 ガウスまでは外側コイルに小さなフラックスジャンプが何度も観測された。それ以上ではほとんど観測されなかった。内側コイルではほとんどフラックスジャンプはみられなかった。2 回目の励磁試験においては 755 A までは図 4.3 (A) に示した励磁方式をとり、755 A 以上については電流上昇速度を 0.39 A/s に下げて、電流上昇時間 3 秒、停止時間 10 秒の階段励磁

方式を採用して 800 A (計算中心磁界 75 キロガウス) の励磁に成功した。800 A 通電のまま 40 分間放置後、図 4.3 (B) の方式で電流を下げた。2 回目の励磁中はほとんどフラックスジャンプはみられなかった。

図 4.4 にホール素子を使って測定した発生磁界と励磁電流の関係を示す。75 キロガウスの磁界を発生した状態ではクライオスタット近傍の鉄類は強く磁化され、クライオスタットのほうに引きつけられた。図 4.5 にクレーンの鎖が引かれているところを示す (蓄積エネルギー 約 2 MJ)。この写真からもこの超電導電磁石のエネルギーがいかに大きいかわかる。800 A 通電時における超電導コイル両端に発生した電圧は ± 1 mV であった。これは電源のわずかな変動によるもの、超電導線の接続抵抗によるもの等と思われる。

励磁中の誘導性電圧はコイル両端で約 3.5 ボルトであった。このことからコイルのインダクタンスは約 6 ヘンリーと計算される。パワーリードにおける電圧降下は 700 A 通電時で、プラス側、マイナス側の 2 本分合計で数十 mV であった。クライオスタット内の蒸発したヘリウムガスは、すべてパワーリードの熱交換器を通して回収したため、パワーリードがよく冷却されその抵抗値が低下してパワーリード中における発熱が大幅に減少した。この結果クライオスタットへの侵入熱量は最小にすることができた。

液体ヘリウムの蒸発量については、4.1.4 項に述べるように最大 6 l/h で済み、さらに励磁運転においても液体ヘリウムの蒸発を増加させるようなトラブルはまったく起こらなかった。発生磁界は図 4.4 に示すように計算値とよく一致しており、すべて初期の計画どおりの結果をうることができた。

常温復帰後精密な構造検査を行なったがなんらの異常も認められずきわめて良好な状態で励磁試験が行なわれたことが確認できた。

5. む す び

75 キロガウスの高磁界を安定かつ安全に発生させることの成功により、当超電導電磁石のコイルに使用された全長 12 万メートルに及ぶ超電導素線 (製造長 18 万メートル) の特性が保証され、溶接法による当社の複合超電導線製作技術の優秀性が立証された。また超電導電磁石の構成法、安定運転および制御法、冷却法、製造技術と品質管理法、等の総合技術に対する信頼性を高めることができた。

超電導機器はますます大形化、高磁界化の一途をたどる情勢にあるが、超電導線材、電磁石製作技術、等すべて国内技術で世界第一級の大形超電導電磁石が完成された意義はまことに大きい。

今後ますます増大する超電導機器の供給は外国に依存することなくすべて国産でまかなえることが実証されたことになり、わが国の今後の超電導技術の発展が期待できよう。終わりに、本委託研究を実施するにあたって終始数々のご援助をいただいた通産省工業技術院大形プロジェクト担当の方々、電気試験所機器研究部およびワーキンググループの方々に対し厚く感謝の意を示します。

(昭和 44-10-17 受付)

45 キロ Gauss 超電導電磁石冷却系 (I) —計画設計および製作—

萩野 治*・森口 哲雄*・相良 泰一**・中間 清孝**

Helium Refrigeration System for 45 Kilogauss Superconductive Magnet Part 1. —Its Design and Construction—

Central Research Laboratory Osamu OGINO・Tetsuo MORIGUCHI
Nagasaki Works Yasukazu SAGARA・Kiyotaka NAKAMA

A report is made herein about a plan, design and manufacture of a 45 kilogauss superconductive magnet refrigerating system developed by us for the entrusted study on "MHD power generation", a large scale project of the Agency of Industrial Science and Technology. A helium liquefier used in this system has a liquefaction capacity of 28 l/h and a helium refrigerator has a refrigeration capacity of 400 watts at temperature of 20°K. With this refrigeration system it is possible to make a magnet weighing 12 tons in a superconductive state in about 100 hours. The refrigerating system employs a 20°K precooling type closed loop system, with which there is almost no helium consumption and economical operation is assured.

1. ま え が き

MHD 発電の研究開発が工業技術院の大形プロジェクトとして取り上げられ、熱交換器・超電導電磁石・コード回収装置・燃焼器・発電ダクトなど多くの構成機器の研究開発が積極的に進められている。中でも超電導電磁石は MHD 発電プラントの高い効率を確保するうえに必要な高磁界発生装置として重要な設備であり、MHD 発電への応用面の拡大が、超電導材料の製造技術から超電導コイルの構成技術まで著しい進歩をうながし、現在ではプロトタイプの超電導電磁石を完成する域に達したと考えられる。

一方超電導電磁石は現在の段階では、大量の液体ヘリウムを用いて極低温に冷却して励磁運転をすることが必要であり、MHD 発電に使用する高磁界装置として経済性と信頼性を確立するためには、超電導電磁石を収納するクライオスタットを含めて、液体ヘリウム冷却系とのバランスのとれた最適化を行なう必要がある。さらに

- (1) 超電導電磁石の冷却効率の向上
- (2) 超電導線以外の補助的構造材料の大幅な削減
- (3) 液体ヘリウム供給系の大容量化
- (4) 短時間起動のための予冷方式
- (5) ヘリウムガスの完全回収

などの問題について、なおいっそうの研究開発を進めていくことが要求される。

ここにあげた問題のうち(1)および(2)は超電導電磁石自身の問題であるが、冷却系の立場からいえば被冷却体の重量、液体ヘリウム所要充てん量および蒸発量を減らし、冷却系の大容量化を押える努力に結びつくものである。他方(3)以下の問題については、適当な規模をもった冷却系の開発をとりあげることによって実用性を確めることができる。

昭和42年の委託研究としてプラズマ流路 36 cm²、発電部の長さ 60 cm の発電ダクトに組み合わせて 45 キロ Gauss の磁界を発生させることができるくら(鞍)形超電導電磁石の開発が計画され、ここに銅換算重量 12 t という現在における最大級の超電導電磁石を冷却する機会を持つことができた。この委託研究において当社では、将来の大形超電導電磁石の冷却系に適用できる 20°K 予冷形クローズドループ方

式を計画し、液体ヘリウム供給系、20°K 冷却系、ヘリウムガス回収純化系の試作研究および超電導電磁石の冷却運転を担当した。

ここでは超電導電磁石およびクライオスタットから与えられた冷却容量を効率よく冷却し、励磁運転に必要な液体ヘリウムを供給する方法、系統の設計、構成機器の製作結果について述べる。

2. 冷却系の計画

冷却系は極低温容器に装置された超電導電磁石を常温から液体ヘリウム温度にまで冷却して所要量の液体ヘリウムをため、さらに超電導電磁石の作動時における蒸発量を補うだけの液体ヘリウムを供給し、クライオスタットから蒸発したヘリウムガスを回収してふたたび液化に使用する装置である。(ここでは超電導電磁石を略して電磁石、極低温容器をクライオスタットと呼ぶことにする)

冷却系の規模は液体ヘリウム温度に冷却すべき重量、冷却起動時間、クライオスタットへの液体ヘリウム充てん量および定常時最大蒸発量によってきまる。特に MHD 発電では有効直径 4 m、有効長 20 m におよぶ非常に大きな空間に数万 Gauss の高磁界を発生させる超電導電磁石が要求されるので、今後ともその重量は増大の一途をたどると考えられる。このような被冷却重量に対して考慮すべきことは、予冷温度と顕熱利用の問題である。

2.1 予冷と顕熱の利用

一般に超電導電磁石を構成する材料はその比熱が温度の低下とともに小さくなる性質があり、液体窒素温度(約 80°K)以下では急激に減少し、液体水素温度(約 20°K)では常温の 1~2% となる。図 2.1 は銅換算重量 1 t の電磁石を温度 $T^{\circ}\text{K}$ から 4.2°K に冷却するに要する液体ヘリウムの消費量を計算した結果を示す。 ϕ は蒸発したヘリウムガスの顕熱の利用効率で式(2.1)で表わすことができる。

$$\phi = \frac{H_2 - H_1}{H_8 - H_1} \quad (2.1)$$

ただし

H_1 : 液体ヘリウムの蒸発温度 θ_1 におけるガスのエンタルピー cal/g

H_8 : 電磁石の温度 T_8 におけるガスのエンタルピー cal/g

H_2 : 電磁石出口のガス温度 θ_2 におけるガスのエンタルピー cal/g

図 2.1 によれば液体ヘリウム蒸発熱だけで冷却した場合、予冷温

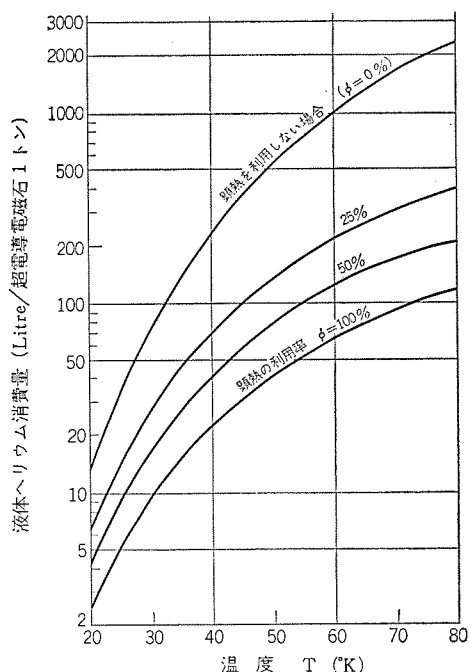


図 2.1 超電導電磁石 (重量1トン) の予冷温度と液体ヘリウム消費量の関係

Consumption quantity of liquid helium vs. precooling temperature of superconducting magnet (weight-ton ratio).

表 2.1 冷媒の特性
Characteristics of coolant.

物 質	沸 点 °K (1 ata)	蒸 発 潜 熱 cal/g (1 ata)	ガスの比熱 (cal/g°K)
ヘ リ ウ ム	4.2	5.0	1.24
窒 素	77.3	47.8	0.25

表 2.2 超電導電磁石およびクライオスタットの仕様
Specification of superconductive magnet and cryostat.

1. 磁界発生用超電導電磁石	
形 式	縦形くら形コイル
中心 磁束密度	45 キロガウス
重 量	12 t (銅換算重量)
2. クライオスタット	
形 式	中心部に常温空間を有する 縦形同心円筒形
常 温 空 間 径	250 mmφ
正常時液体ヘリウム蒸発量	
非 通 電 時	15 L/h 以下
電 源 励 磁 時	20 L/h 以下
永久電流励磁時	25 L/h 以下
液体ヘリウム張込量 (コイル収納時定格)	1,300 L
クライオスタットの設計圧力	
容器 常 用 圧 力	1.3 ata
耐 圧	2.0 ata
レリーフ弁動作圧力	1.6 ata
クライオスタット使用圧力	
常 用 圧 力	1.1 ata
回収バイパス弁動作圧力	1.4 ata
大気放出レリーフ弁動作圧力	1.6 ata
破壊弁動作圧力	1.8 ata

度 80°K では 2,300 l の液体ヘリウムを消費するが、20°K まで予冷しておけば約 15 l で液体ヘリウム温度まで冷却することができる。液体ヘリウムの消費量からいえば予冷温度はできるだけ低いことが望ましいが、膨張エンジンの動作温度が低くなれば冷凍能力が著しく低

下するので予冷の最終温度は 20°K くらいが適当であろうと思われる。つぎに冷却上問題になるのは液体ヘリウムの顕熱の利用である。表 2.1 はヘリウムおよび窒素の熱的性質を示す。液体ヘリウムの蒸発熱は 5 cal/g と小さいが、ガスの比熱が大きいため 1°C 当たりの顕熱は非常に大きくなる。この性質は図 2.1 に示すように顕熱の利用率を高くして、液体ヘリウムの消費を著しく少なくすることができる。このようにヘリウムによる冷却は液体の蒸発熱だけでなく、ガスの顕熱を大いに利用することが冷却効率を上げるうえにたいせつであることがわかる。

顕熱の利用率は液体ヘリウムの供給速度と電磁石のガス流路によって決まるもので、一般には電磁石の熱伝達面積が非常に大きいから ϕ を 50 % 以上にすることは容易である。しかし流れが一様でなく、特に一部に大きなバイパス路があれば極度に利用率が低下するから流路の構造寸法に注意を要する。

2.2 冷却条件

(1) 被冷却体の仕様

冷却系の設計の基礎となる超電導電磁石、および超電導電磁石収納用クライオスタットの仕様を表 2.2 に示す。超電導電磁石は縦形くら形電磁石で中心磁束密度 45 キロガウス、重量は銅換算 12 t である。クライオスタットは常温空間径が 250 mm、定常時の液体ヘリウム蒸発量は最大 25 l/h と計画されている。また電磁石を収納したときの液体ヘリウムの張込量は 1,300 l である。

(2) 冷却系の設計基準

(a) 起動時間

冷却系の運転開始からクライオスタットに所定の液体ヘリウムを貯液するまでの時間は、120 時間以内を目標とする。

(b) 液体ヘリウムの供給

液体ヘリウムの供給速度は 0~100 l/h の範囲で変えられるようにし、低温自動弁によって液体ヘリウムを連続あるいは間欠的に供給する。

(c) 予冷時の熱交換効率

予冷時における電磁石とヘリウムガスとの間の熱交換効率を次式で定義し η を 0.8 とする。

$$\eta = \frac{\theta_2 - \theta_1}{T - \theta_1} = 0.8 \dots \dots \dots (2.2)$$

ただし

T : 電磁石の平均温度

θ_1 : ヘリウムガス 入口温度

θ_2 : ヘリウムガス 出口温度

この η はさらにヘリウム顕熱の利用率 ϕ と同じ意味をもち、熱交換面積が非常に大きい電磁石では 0.8 は可能な値である。

(d) クライオスタットの出口温度

定常時におけるクライオスタットからの蒸発ガスの回収温度は $-30^\circ \sim -20^\circ \text{C}$ とする。しかし液体ヘリウム注入時は電磁石の冷却のために大量の液体ヘリウムが蒸発することがあるので、回収ガスを常温まで加温する機能をもたせる。

(e) 電磁石の加温

電磁石の運転終了後、3 日以内に 30°C まで加温させることができるようにする。

2.3 冷却方式

(1) 20°K 予冷形 クローズドループ

冷却系の方式および諸元は電磁石の熱容量、予冷温度と液体ヘリ

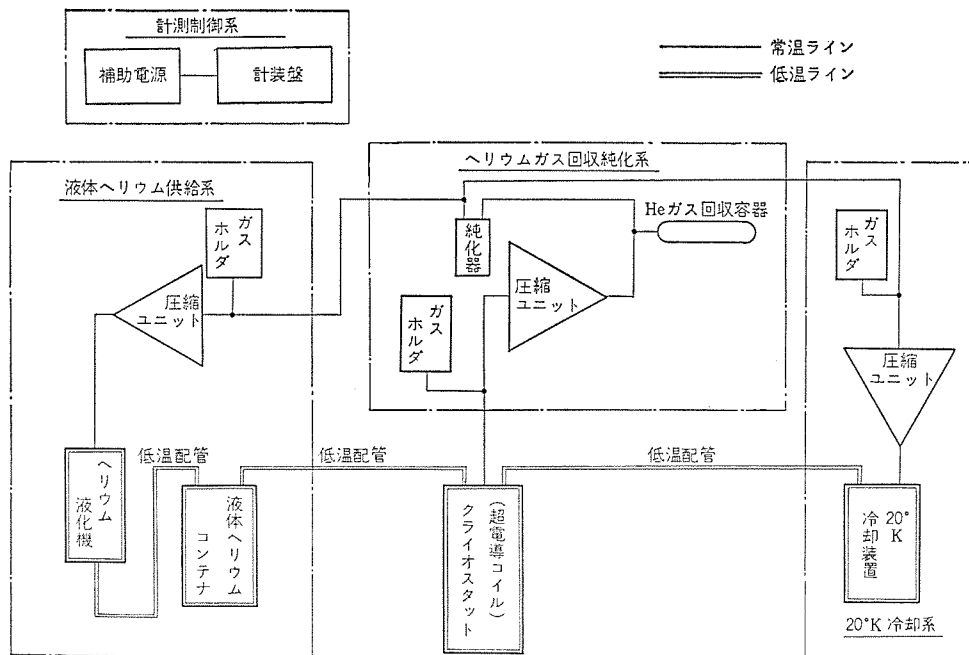


表 2.3 液体ヘリウム供給系の容量
Capacity of liquid helium supply system.

ヘリウム液化能力	28 l/h
液体ヘリウム初期注入量	100 l
液体ヘリウム貯蔵容量	1,500 l
貯液所要時間	100 時間
液化開始時間	20 時間
液体ヘリウム注入速度	100 l/h
液体ヘリウム移送損失	2 l/h

図 2.2 45 kG 超電導電磁石冷却系
ブロック図
Block diagram of helium refrigeration
for 45 kG superconducting magnet.

ウム消費量、蒸発ヘリウムの顕熱利用および電磁石の冷却条件等を検討した結果、45 kG の電磁石の冷却系に 20°K 予冷形 クローズドループ方式が最も適していると結論した。

この冷却方式はつぎのような特長をもつもので、電磁石の運転試験を最も経済的に実施させることができる。

(a) 電磁石を 20°K 以下に予冷するので冷却に要する液体ヘリウムの消費量がわずかですむ。したがって液体ヘリウムの供給系が小形化できる。

(b) 電磁石の冷却起動が早く、かつ冷却速度を適当に制御できる。

(c) 蒸発したヘリウムガスを回収するので、運転にともなうヘリウムガスの損耗がない。

(d) クローズドループであれば、系外からの不純物の混入が避けられるので冷却系が安定に運転できる。

(e) 液化機を四つの液化ユニットより構成する多気筒方式を用いているため、液化運転に対する信頼度が高い。

(2) 構成および動作

図 2.2 は 45 kG 超電導電磁石冷却系の構成ブロック図を表わしたもので、液体ヘリウム供給系、20°K 冷却系、ヘリウムガス回収純化系および計測制御系の四つの系統から構成されている。液体ヘリウム供給系は電磁石の実験に必要な液体ヘリウムを供給する系でヘリウム液化装置、液体ヘリウムコンテナ、圧縮ユニット、ガスホルダおよび低温配管からなる。20°K 冷却系は電磁石を常温から 20°K まで予冷し、また運転試験後 4°K から常温まで温度を上昇させる系で 20°K 冷却装置、圧縮ユニット、ガスホルダおよび低温配管からなる。

回収純化系はクライオスタットからの蒸発ヘリウムガスを回収して高圧状態で回収容器に貯蔵し、純化して再び液化に使用する系で、ガスホルダ、圧縮ユニット、He ガス回収容器および純化器からなる。計測制御系は各系統の運転制御、および計測する計装と停電時の安全制御、およびヘリウムガスの回収を行なうための補助電源を備える。

冷却系の動作はつぎのとおりである。まずクライオスタットに収納した電磁石を冷却する前に各系統を完全にヘリウムガスで置換する。つぎにヘリウム液化機の液化運転と 20°K 冷却系の電磁石予冷運転を同時に開始する。20°K 冷却系は電磁石の温度が高いときは膨張エンジ

ンの排気量が少ないので、液体窒素蒸発コイルでヘリウムガスを約 80°K に冷却し、クライオスタットに送る。電磁石の温度が 90°K に達すると、膨張エンジンを運転してヘリウムガスの温度を下げこれをクライオスタットに送って電磁石全体が 20°K 以下になるまで冷却する。20°K まで電磁石の温度が下がったとき、液化機で製造貯蔵した液体ヘリウムをコンテナから移送する。電磁石は液体ヘリウムにより 20°K から 4°K まで冷却され、さらに運転試験に必要な液体ヘリウムがクライオスタット内に充てんされて励磁運転の準備が完了する。電磁石の冷却および液体ヘリウムの移送によって蒸発したヘリウムガスは回収純化系に戻って貯蔵、純化され、再び液化に使用される。

2.4 冷却系の容量

(1) 液体ヘリウム供給系

表 2.3 に液体ヘリウム供給系の容量を示す。

ヘリウム液化能力は電磁石の励磁運転時の最大蒸発速度 25 l/h と低温配管の液体ヘリウム移送損失 1 l/h のほかに 2 l/h の余裕を見込んで 28 l/h に設定した。

電磁石を 20°K から 4°K まで冷却に必要な液体ヘリウムの量は顕熱の利用効率によって大きく異なり、実験的に 25～75 % の値をもつことが確かめられている。ここでは ϕ を 25 % と仮定し、図 2.1 から予冷温度 20°K に対する液体ヘリウム消費量を求めると電磁石 1 t 当たり 6.4 l となる。したがって 12 t では約 100 l を見込めばよいことになる。液体ヘリウムの貯蔵容量はクライオスタットの張込量 1,300 l にこの 100 l を加え、さらに液体ヘリウムの移送損失量 100 l を含めて 1,500 l とした。

液化機を起動して液体ヘリウムがたまり始めるまでの時間を 20 時間とし、平均 25 l/h の液化速度で 1,500 l を液化するとすれば 60 時間を要する。さらに液体ヘリウムをクライオスタットに移送したのち、励磁運転の液体ヘリウム 500 l を液化するに要する時間 20 時間を加えると貯液準備時間は合計 100 時間となる。

(2) 20°K 冷却系

電磁石の予冷過程を 2 段階に分けて考える。第 1 段階は電磁石を常温から 90°K に冷却する過程で、冷却に液体窒素の蒸発熱と顕熱を利用する。

図 2.3 は第 1 予冷過程を示す系統図である。

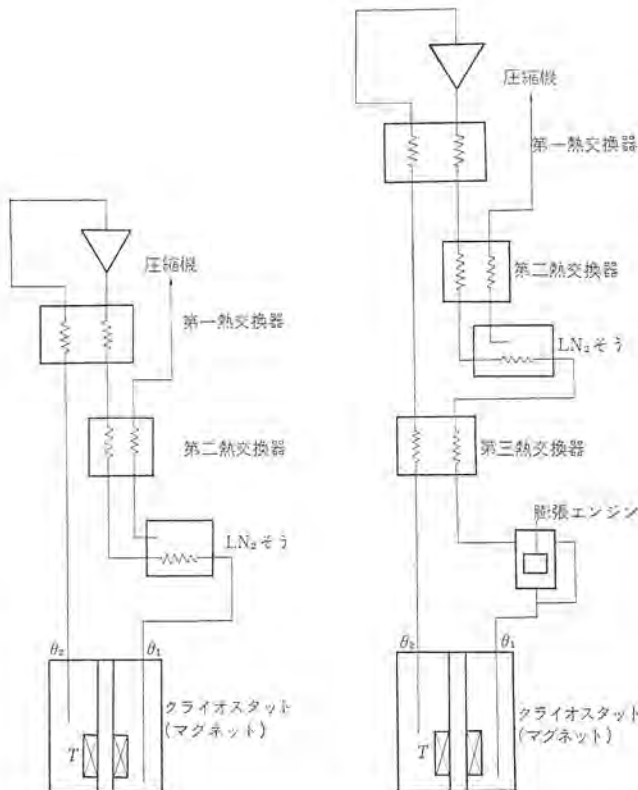


図 2.3 第一予冷過程系統図
Primary cooling diagram.

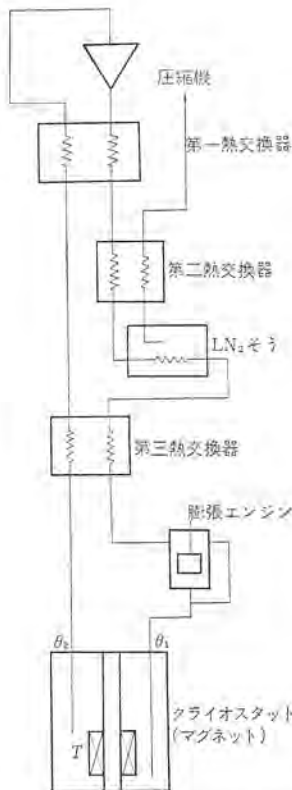


図 2.4 第二予冷過程系統図
Secondary cooling diagram.

表 2.4 超電導電磁石の予冷時間 (h) の計算結果
(重量 12 ton, ガス 入口温度 80°K)

Calculation result of precooling time of superconductive magnet

流 量 W_f (Nm ³ /h)	熱 交 換 率 η	
	1.0	0.8
200	56.0	70.0
300	37.4	46.6
400	28.0	35.0
500	22.4	28.0

表 2.5 20°K 冷却系の 特性計画値
Planned value of characteristics of 20°K cooling system

マグネット予冷能力	15 Tワット (90°K から 20°K までの平均)
ヘリウムガス流量	400 Nm ³ /h (300°K から 90°K までの平均)
マグネット重量 12t に	300°K から 90°K まで冷却……………38時間
対する冷却所要時間	90°K から 20°K まで冷却……………30時間

表 2.6 クライオスタットの動作状態による液体ヘリウムの
蒸発速度と回収ガス流量

Evaporation speed of liquid helium and recovering gas flow quantity according to operation behavior.

クライオスタットの動作状態	液体ヘリウム蒸発速度 (l/h)	回収ガス流量 (Nm ³ /h)
液体ヘリウム注入による予冷時	0~100	0~70
非 通 電 時	15	10.5
通 電 励 磁 時	20	14
永 久 電 流 励 磁 時	25	17.5

ヘリウムガスは圧縮機から吐出され、第1熱交換器を経て冷却器に入り、ここで液体窒素の蒸発熱により80°Kに冷却される。この予冷過程ではクライオスタット（電磁石）に入るガスの温度 θ_1 は一定と考えてよい。電磁石の温度 T_0 から T までわずかな温度差だけ冷却するに要する時間 τ (s)はつぎの式により計算することができる。

$$\tau = \frac{C_m \cdot W_m}{C_f \cdot W_f \cdot \eta} \cdot \ln \frac{T_0 - \theta_1}{T - \theta_1} \quad (2.3)$$

ただし

- C_m : 電磁石の比熱 (cal/g°K)
- C_f : ヘリウムガスの比熱 (cal/g°K)
- W_m : 電磁石の重量 (g)
- W_f : ヘリウムガスの流量 (g/s)
- T_0 : 電磁石の初めの温度 (°K)
- T : τ 時間後の電磁石の温度 (°K)
- θ_1 : クライオスタットに入るガスの温度 (°K)
- η : 電磁石の熱交換効率

である。

2で述べたように電磁石の比熱 C_m が温度によって大きく変化するので、温度差 $T_0 - T$ を小さく分割し、それぞれの温度区間における比熱の平均値を用いる。

表2.4は重量12tの電磁石を300°Kから90°Kに予冷するに要する時間を計算したものである。ただし電磁石に入るガスの温度 θ_1 は80°Kで一定とした。この計算結果によれば、電磁石における第1予冷過程におけるヘリウムガスの平均流量を400 Nm³/h、電磁石における熱交換率を0.8とした場合、38時間で90°Kまで予冷できることがわかる。

図2.4は第2次予冷過程を示す系統図である。電磁石を80°Kのヘリウムガスで冷却していくと90°K近くで冷却速度が低下し、飽和傾向が現われる。そこで第2次予冷過程に入りエンジンを起動させてその低圧排気ガスを電磁石に送る。膨張エンジンは冷却温度を低くするため、再生形の第3熱交換器と組み合わせて使用される。膨張エンジンは低圧排気ガスの最低到達温度 θ_2 を16°Kとし電磁石の20°Kへの冷却を加速するようにした。

電磁石を90°Kから20°Kに予冷するに要する時間は式(2.4)を用いて概算することができる。

$$\tau = \frac{C_m \cdot W_m}{q_R} \cdot \ln \frac{T_0}{T} \quad (2.4)$$

ここに q_R はヘリウムガスが θ_1 (°K)でクライオスタットに入り、電磁石を T (°K)に冷却した後、 θ_2 (°K)で冷却系に戻るときの冷凍係数で電磁石から取去られる熱量（予冷能力） Q_R との間に次式で示す関係がある。

$$Q_R = q_R T = C_f \cdot W_f (\theta_2 - \theta_1) \quad (2.5)$$

C_f : ヘリウムガスの比熱 (cal/g°K)

W_f : 膨張エンジンの排気流量 (g/s)

q_R は20°K冷却系の予冷能力によって決まるが、20°Kから90°Kまでの平均値を15 W/°Kとして、12tの電磁石を90°Kから20°Kまで予冷する場合の所要時間を計算すると30時間となる。この計算に用いた $q_R=15$ W/°Kは、電磁石の最終冷却温度 $T=20$ °Kにおいて予冷能力 Q_R を400ワットに設定した20°K冷却系で容易に得ることができる冷凍係数であって、予冷時間の算定値は十分余裕もった値である。表2.5に20°K冷却系の特性計画値を示す。

(3) ヘリウムガス回収純化系

ヘリウムガスの回収能力はクライオスタットからの蒸発ヘリウムガスの流量によって一義的に決定できる。表 2. 6 はクライオスタットの使用状態による液体ヘリウム蒸発速度、およびガス換算量を表わしたものである。

表 2. 6 から電磁石を 20°K 以下に冷却した後、液体ヘリウムを注入して 4°K まで予冷するとき以外は 20 Nm³/h のガス回収能力があれば十分であることがわかる。したがって回収ガス圧縮機は容量 20 Nm³/h と 60 Nm³/h の 2 基を設置し、予冷時および液体ヘリウムの異常蒸発時に備えて 80 Nm³/h の回収能力を持たせた。また 20 Nm³/h の圧縮機は、無停電電源に切換えることによって停電時にも蒸発ガスを回収することができるようにした。

3. 動作および仕様

冷却系の計画において、液体ヘリウム供給系、20°K 冷却系、回収純化系に必要な機能構成およびその特性を検討し、これらの基本計画を満足させる装置の設計製作を行なった。冷却系を構成する装置の動作、仕様および設計上留意した問題点はつぎのとおりである。

3. 1 液体ヘリウム供給系

図 3. 1 は液体ヘリウム供給系の構成を示す系統図、図 3. 2 は液化筒内の系統を示すブロック図である。

ヘリウム液化機は 4 台の液化筒と 1 台の低温マニホールドおよび 1 本の JT 低温配管よりなり、そのうち液化筒はヘリウムガスを 2 段断熱膨張して 15 ata のヘリウムガスを 13°K まで冷却し、JT 熱交換器によって約 70°K のヘリウムガスとする。このガスを JT 膨張弁で断熱自由膨張させて液化させ、非液化分のヘリウムガスは JT 熱交換器の二次側に戻して一次側のヘリウムガスを冷却させる。

低温マニホールドは、各液化筒内の JT 熱交換器を経て得られた低温高圧ガスを一つにまとめ JT 膨張弁に送りこみ、またコンテナから戻りの低圧低温ガスを各液化筒の JT 熱交換器の二次側に分流させるものである。

移送はコンテナとクライオスタットの圧力差を利用して、低温弁タンクを経由してクライオスタットに供給するようにした。このためコンテナの

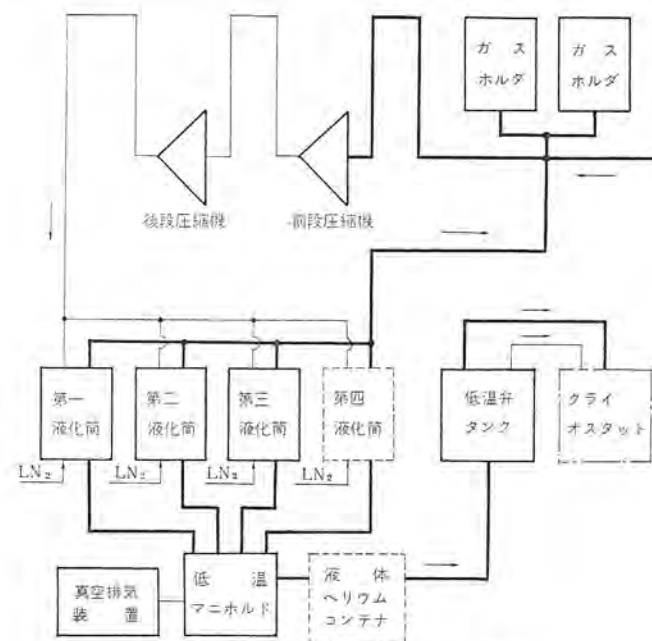


図 3. 1 液体ヘリウム供給系統図
Flow diagram of liquid helium supply system.

圧力を 1.3~1.4 ata, クライオスタットの圧力を 1.1 ata に設定した。

表 3. 1 に液体ヘリウムの供給系の仕様を示す。

液化機は四つの液化筒間の流量の不平衡を防止するために、JT 熱交換器から外部 JT 配管にかけて特殊な流量調節機構を用いた。図 3. 3 に液化機の外観を示す。外形寸法は、幅 700 mm, 奥行 1,500 mm, 高さ 1,800 mm でコンパクトにまとめた。液体ヘリウムコンテナの大きさは、直径 2,000 mm, 高さ 2,500 mm の縦形容器で液体ヘリウムの蒸発損失が 2 %/日以下である。断熱は液体ヘリウムそう(槽)に対して真空液体窒素冷却シールドを用いた。

低温弁タンクはクライオスタットに供給する液体ヘリウムを制御する目的で用いた。断熱真空タンクの内に低温自動弁 2 個と低温手動弁 1 個を納め、熱損失を 0.2 W 以下に抑えるために液体窒素冷却のサーマルアンカとシールドを設けた。図 3. 4 に低温弁タンクの内部構造を示す。

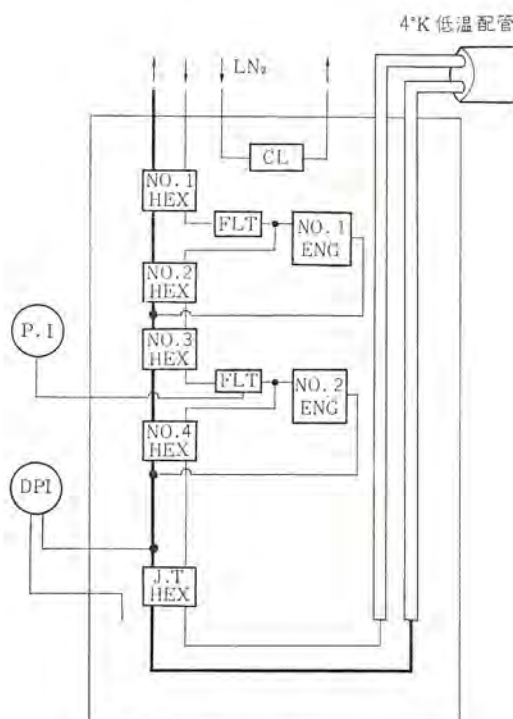


図 3. 2 液化筒系統図
Block diagram of liquefying unit.

表 3. 1 液体ヘリウム供給系の仕様
Specification of liquid helium supply system.

構成機器	数量	形式	仕様
液化機	1 基	4 筒往復動式 外部液化方式	液化能力 28 L/h
圧縮機			
前段圧縮機	1 基	往復動式	流量 500 Nm ³ /h
後段圧縮機	1 基	オイルフリー圧縮機	吐出圧力 17 ata 吸込圧力 1.1 ata
ガスホルダ	2 基	乾式	容量 2 M ³
低温配管	1 式	真空断熱 液体窒素シールド方式	熱損失 0.1 W/m 圧力損失 0.01 kg/cm ² -m
液体ヘリウム コンテナ	1 基	多重ふく射シールド方式 液体窒素シールド方式	容量 1,500 L 液体窒素貯蔵量 90 L 熱損失 2 %/dag
低温弁タンク	1 基	真空断熱 液体窒素シールド	低温手動弁 1 本内蔵 低温自動弁 2 本内蔵 熱損失 0.2 W

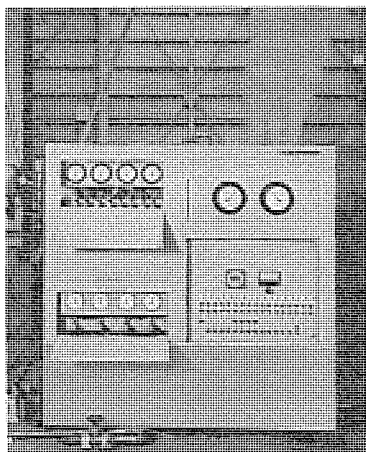


図 3.3 ヘリウム 液化装置
Helium liquefier

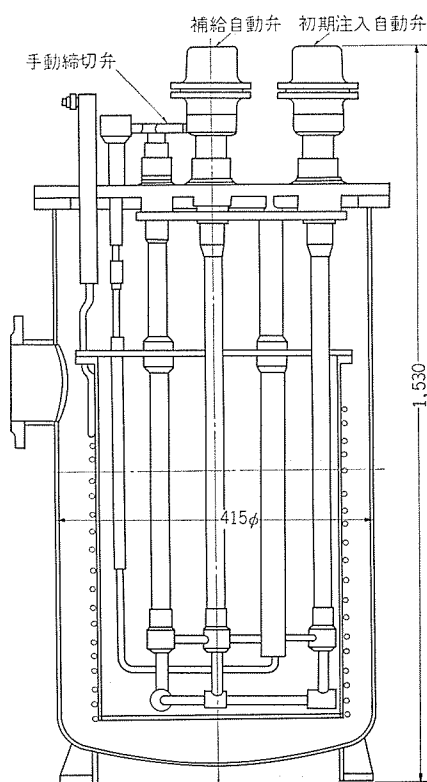


図 3.4 低温弁タンク
Cryogenic valve assembly.

3.2 20°K 冷却系

20°K 冷却系は電磁石をヘリウムガス のふん囲気中で常温から 20°K まで約 80 時間で冷却する機能を持ち、また電磁石実験終了後約 70 時間で液体ヘリウム温度から常温に復帰させるための加温機能を備える。図 3.5 は 20°K 冷却系の系統図、表 3.2 は 20°K 冷却装置の設計諸元を示す。20°K 冷却装置は膨張エンジン 2 基を並列に納めたエンジンそう、2 段の熱交換器と低温手動弁をフランジからつり下げた熱交換器そうおよび液体窒素そうの三つからなる。図 3.6 は 20°K 冷却装置の外観を示す。三つの槽は互いに低温配管で接続されている。

3.3 ヘリウムガス回収純化系

ヘリウムガス 回収純化系の系統図は図 3.7 のとおりである。クライオスタートから蒸発してくるヘリウムガスは、温度レギュレータによって常温に加熱した後、いったんガスホルダにたくわえる。蒸発ガスの回収効力は 2 基の高圧圧縮機によって 20 Nm³/h と 80 Nm³/h が得られ、

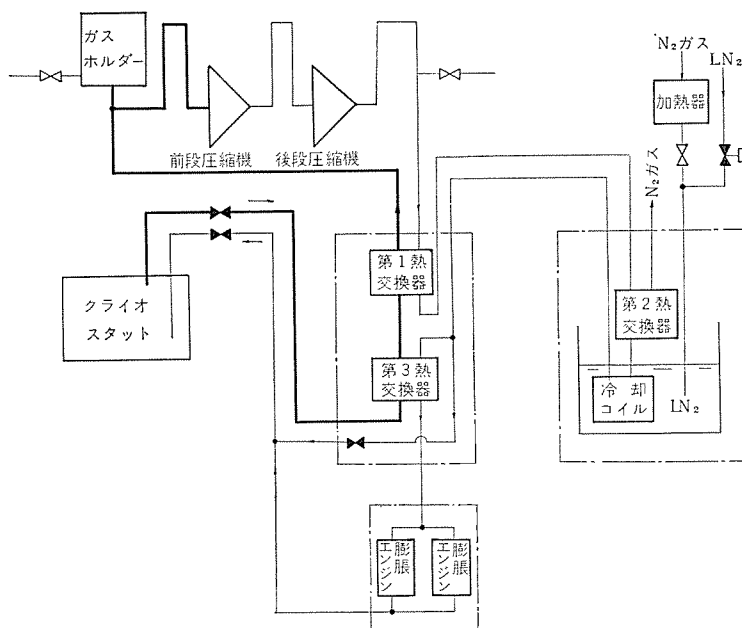


図 3.5 20°K 冷却系系統図
Flow diagram of 20°K precooling system

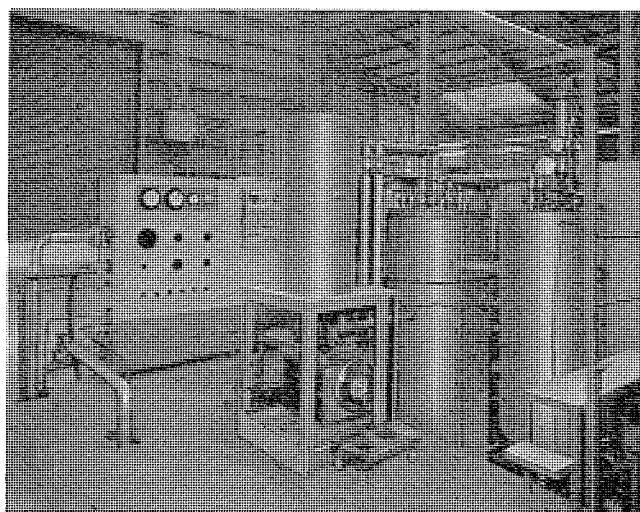


図 3.6 20°K 冷却系の外観
20°K precooling system for superconducting magnet

最高 100 l/h の蒸発ガスを完全に回収することができる。回収容器は最高 130 ata まで圧縮した状態で、液体ヘリウム 1,800 l 以上のガスを貯蔵する高圧ガス容器である。

図 3.8 は油封式ヘリウムガスホルダの構造を示す。ヘリウムガスは油逆流防止管を通してガス室に入り、浮そうを押上げてほぼ大気圧に近い圧力 (200 mm 水柱) でたくわえられる。浮槽の上部にはクライオスタートの異常圧力上昇に対して、レバーで開放する安全弁が取り付けられている。ガスホルダの容量は 10 m³、外形寸法は直径 2.5 m、高さ 7 m である。

高圧容器に充てんされたヘリウムガスは、圧縮機の油などの不純物を含んでいるため、純化そうを通してヘリウム液化系に供給するようにした。純化そうは熱交換器、活性炭吸着そう、液体窒素そう、冷却コイル等からなり、ヘリウムガスを液体窒素の温度に下げ、低温高圧の状態で吸着そうに導入して不純物の除去を行なう。吸着そうを出たヘリウムガスは熱交換器の二次側に導入され、一次側のヘリウムガスを冷却系に供給されるようにした。冷媒の液体窒素は液面自動制御機

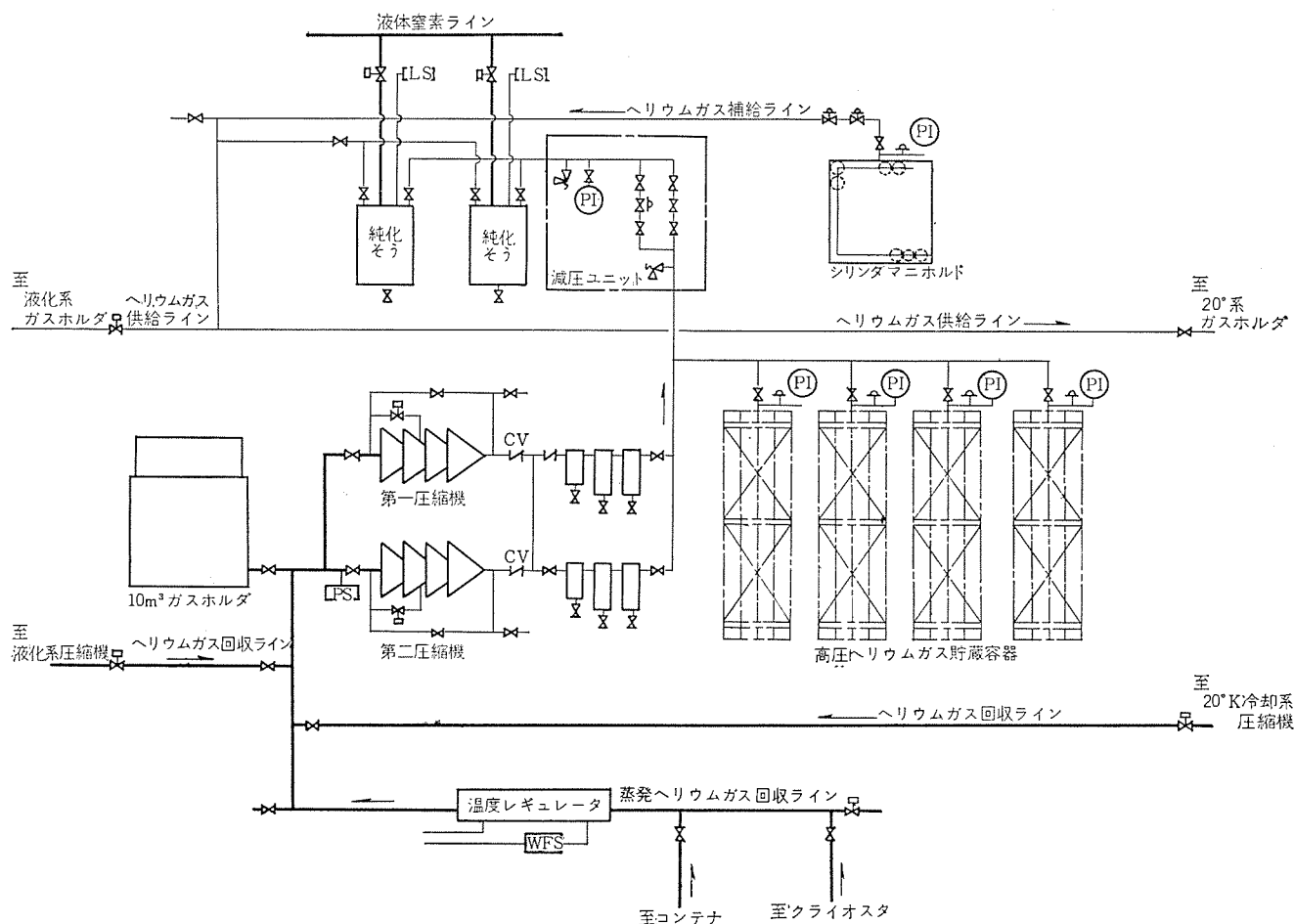


図 3.7 ヘリウムガス回収純化系系統図
Flow diagram of helium gas recovery system.

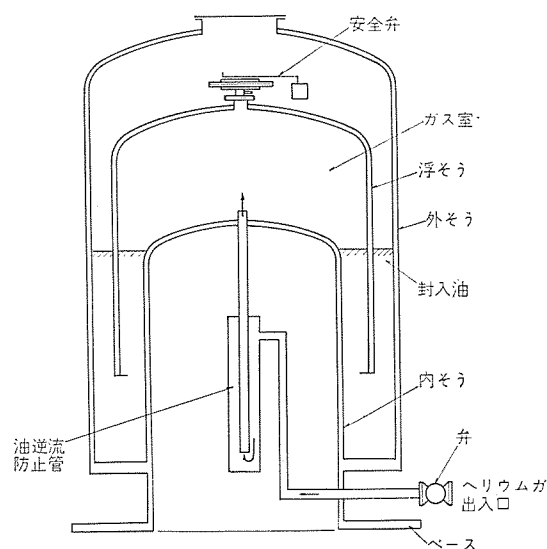


図 3.8 油封式 ガスホルダ 構造図
Oil seal type helium gasholder.

器で一定量保持されるようになっている。表 3.3 に回収純化系構成機器の仕様をとりまとめた。

3.4 付属機器

液化系および 20°K 冷却系の各構成機器間は、保守点検に便利のように取りはずしできる低温配管によって接続した。低温配管は機械の配置から延べ 50 m になり、断熱効率が直接機械の性能に影響

するため特殊な断熱方式を採用した配管にした。すなわち液化系の低温配管は真空断熱と液体窒素の熱シールドによって熱損失を避け、20°K 低温配管は真空断熱と多重ふく射防止板によって断熱をおこなった。また溶接後はヘリウム漏えい検知器でリークテストを行ない、 10^{-8} Acc/s 以下のリーク量であることを確かめ、組立後は X 線透過写真によって配管内部が正常であることを確かめた。図 3.9 はこのような X 線写真の一例である。また冷却-加温の熱振動による材質、特に溶接部の破壊には十分考慮し溶接箇所はすべて Tig 溶接にした。この結果、運転中低温配管内部の真空劣化はみられず、 10^{-6} torr の真空度が維持でき計画値に近い断熱効率を保持することができた。

液体ヘリウムおよび低温ヘリウムガスの流量制御、締切等の操作は低温バルブでおこなった。そのため $1\frac{1}{2}$ "、1"、 $\frac{3}{4}$ "、 $\frac{1}{2}$ " の手動弁、 $\frac{1}{2}$ " の空気作動弁を開発し使用した。手動弁はテフロンパッキン、自動弁は皮革パッキンとし操作中材質の破損のないように考慮した。低温における弁漏れはまったくなく、十分使用に耐えるものを完成することができた。

4. む す び

MHD 発電用大形超電導電磁石の極低温冷却には、クライオスタットを含めた総合的な検討が必要と考えられるが、まず 10 t 級の電磁石の冷却系について、冷却諸元を検討し構成機器の仕様を決定することも将来の大形化に対する目途をつけるうえに重要なことと考えられる。さらに決定した仕様を満たす機器の設計製作を行なうことにより極低温技術の貴重な経験を得ることができる。ここで計画した

表 3.2 20°K 冷却装置の設計諸元
Design factors of 20°K cooling device.

(1) 第一熱交換器		
形 式	式	向流, フイン管コイル形
交 換 熱 量		6.5 kcal/s
一 次 側		
入 口 温 度		300°K
出 口 温 度		85°K
二 次 側		
入 口 温 度		80°K
出 口 温 度		295°K
一 次 側 圧 力 損 失		0.5 kg/cm ²
二 次 側 圧 力 損 失		0.15 kg/cm ²
(2) 第二熱交換器		
形 式	式	向流, 多重コイル形
交 換 熱 量		3 kcal/s
一 次 側		
入 口 温 度		300°K
出 口 温 度		200°K
二 次 側		
入 口 温 度		80°K
出 口 温 度		270°K
一 次 側 圧 力 損 失		0.02 kg/cm ²
二 次 側 圧 力 損 失		0.03 kg/cm ²
(3) 第三熱交換器		
形 式	式	向流, フイン管コイル形
交 換 熱 量		2 kcal/s
一 次 側		
入 口 温 度		85°K
出 口 温 度		25°K
二 次 側		
入 口 温 度		20°K
出 口 温 度		80°K
一 次 側 圧 力 損 失		0.07 kg/cm ²
二 次 側 圧 力 損 失		0.03 kg/cm ²
(4) 膨張エンジン		
ピ ス ト ン 径		76 mmφ
ス ト ロ ー ク		36 mmφ
回 転 数		330 rpm
(5) 液体窒素そう		
液 体 窒 素 容 量		100 l
設 計 圧 力		5 kg/m ² (安全弁動作圧力)
形 式		N ₂ ガス間接加温式
容 量		9 kW 可変
(6) 冷却コイル		
形 式	式	単管液体窒素浸漬
処 理 冷 却 能 力		3.5 kcal/s

問題は(1)電磁石の予冷を 20°K まで行なうこととその所要時間,

表 3.3 ヘリウムガス回収純化系の仕様
Specification of helium gas recovering and purifying system.

回収装置	第一圧縮機	1基	往 復 動 式	吐出圧力 130 ata	
	第二圧縮機	1基	往 復 動 式	吐出圧力 130 ata	
	回 収 ガスホルダ	1基	湿 式 油 封 式	流 量 60 Nm ³ /h 容 量 10 M ³ 動作圧力 200 mmAq 油 量 1,000 l 容 量 353 l×32 耐 圧 150 kg/cm ²	
	長 尺 容 器	32本			
純化装置	純 化 器	2台	液体窒素冷却 活性炭吸着式	純化圧力 16 ata 処理流量 30 Nm ³ /h	純度モニタ付き 2台手動切換



図 3.9 低温配管の X 線写真
X-ray photograph of low temperature helium gas piping

(2) 20°K 以下における液体ヘリウムの注入量と顕熱利用率, (3) 液体ヘリウムの供給系の容量, (4)クライオスタットからの蒸発ガス回収処理などである。ここに紹介した冷却系は次の part II で報告するように, 工場で単体の試験を行なった後, 電気試験所田無分室に据付けられ45 キロ Gauss 超電導電磁石の励磁運転に使用した結果, 液体ヘリウムを約 6,000 l 供給して順調に運転を完了することができた。

終わりにこの計画にあたり, 電気試験所およびワーキンググループの方々からご指導を受けたこと, また研究の遂行にあたって工業技術院をはじめ関係部門の方々から多大のご援助をたまわった。記してここに厚く感謝の意を表する。

45キロ Gauss 超電導電磁石冷却系 (II) —据付および運転試験—

萩野 治*・森口 哲雄*・尾原 昭徳*・坂東 修三**・山口 進***

Helium Refrigeration System for 45 Kilogauss Superconductive Magnet (II) —Its Installation and Operation—

Central Research Laboratory Osamu OGINO・Tetsuo MORIGUCHI・Akinori OHARA

Head Office Shuzô BANDÔ

Nagasaki Works Susumu YAMAGUCHI

An operation test has been conducted at the Electrotechnical Laboratory on a 45 kilogauss saddle shaped superconductive magnet to form a part of study and development of MHD power generation. The test has been completed by producing a field of 47 kilogauss that is above the target. For this very low temperature cooling of the magnet is used a cooling system of 20°K precooling type of closed loop. With this installation anticipated characteristics such as precooling of the magnet, continuous liquefying and supplying of liquid helium, recovering and storing of evaporated helium gas have been confirmed and problems on the operation and handling have been made clear. This article describes a test on the characteristics of the 20°K precooling system for the installation, construction and adjustment of the equipment in the test house and details of the test operation.

1. ま え が き

工業技術院の大形プロジェクト「MHD 発電に関する研究」の委託研究として開発した 45キロ Gauss 超電導電磁石冷却系は、電気試験所田無分室に設置され、電磁石と組み合わせて順調に冷却励磁運転を完了した。この電磁石は MHD 発電用のくら(鞍)形電磁石で、励磁時に発生する電磁石を構造材でささえるため、重量は 10 トンを越え、液体ヘリウム の充てん(填)量が 1,300 l 以上の縦形クライオスタットに収納されている。冷却量はさきに述べた計画のとおりに製作され⁽¹⁾、現地に搬入据付後、電磁石の予冷、液体のヘリウム供給、蒸発ガスの回収貯蔵運転に使用され、所期の目的を達した。

今回の実用試験の結果、大形超電導電磁石を経済的にかつ系統的に運転する方式、安全対策、低温機器の設計方法など冷却系の計画設計に多くの指針を得ることができた。ここでは電磁石の予冷に使用した 20°K 冷却系の特性試験および全冷却系の現地据付調整ならびに電磁石との組み合わせ総合運転試験の概要について述べる。

20°K 冷却系の特性試験

20°K 冷却系はヘリウムガスを冷媒とし、超電導電磁石を常温から 90°K まで冷却する第 1 予冷過程では液体窒素の冷凍を用い、90°K から 20°K に冷却する第 2 予冷過程ではさらに膨張エンジンによって得た冷凍を用いて超電導電磁石を予冷する装置である。

この装置は実機 45 キロ Gauss 超電導電磁石の予冷に使用する前に単独および重量 1 ton の鋼材を冷却する特性試験を行ない、予冷能力と実機の冷却起動時間の関係を求めた。特性試験方法と得られた結果はつぎのとおりである。

2. 1 試験方法

(1) 単独試験

図 2. 1 に示すように、クライオスタットに送り込む冷却ガスの出口と入口を U ベンドの低温配管で接続して単独運転を行ない起動時間を求める。

(2) モデル試験

重量 1 ton の鋼材を試験用クライオスタットに入れて冷却し、20°K 冷

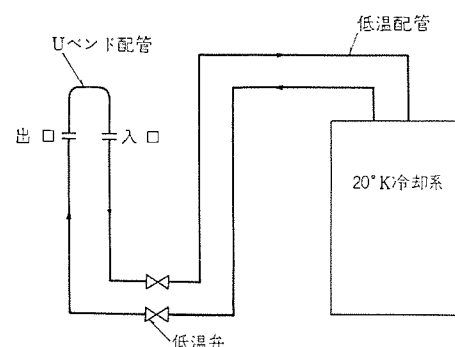


図 2. 1 20°K 冷却系単体運転ブロック図
Block diagram of 20°K precooling system for solo operation.

却系の予冷能力および超電導電磁石(銅換算) 1 ton あたりの起動時間を求める。図 2. 2 は試験用クライオスタットの断面図を示す。モデルは鋼丸棒 22.5 φ 約 200 本をカートリッジに入れたもので上部フランジからヘリウム そう(槽)内につり下げられている。冷却ガスは上部フランジに差し込まれた低温配管からモデルの上部に入り、丸棒配列のすき間を通してカートリッジ下部のベッダに出る。ベッダで集まったガスは中心の管を通してモデル上部に行き系外に出る。

(3) 冷却運転

図 2. 3 は 20°K 冷却系の運転要領を示す系統図である。常温から約 90°K まで冷却する場合は膨張エンジンを停止し、低温弁を開いて液体窒素で冷却したガスを直接モデルに送る。モデルの温度の時間的変化は次式で表わすことができる。

$$\frac{dT}{dt} = -\frac{C_f \cdot W_f}{C_m \cdot W_m} \eta (T - \theta_1) \dots \dots \dots (2.1)$$

ただし C_f : 冷却ガスの比熱

C_m : モデルの比熱

W_f : 冷却ガスの流量

W_m : モデルの重量

T : モデルの平均温度

θ_1 : モデル入口における冷却ガス入口温度

θ_2 : モデル出口における冷却ガス出口温度

η : モデルにおける熱交換効率 $\frac{\theta_2 - \theta_1}{T - \theta_1}$

式(2.1)を解いて、時間 τ を求めると

$$\tau = \frac{C_m \cdot W_m}{C_f \cdot W_f \cdot \eta} \ln \frac{T_0 - \theta_1}{T - \theta_1} \quad (2.2)$$

となる。この式からモデルの温度が T_0 から T になるまでに要する時間が得られ、冷却系の運転条件が同じであれば冷却時間 τ は被冷却体の重量に比例することがわかる。

つぎにモデル温度が90°K以下になったとき、膨張エンジンを起動して冷凍運転を行ない20°K近くまで冷却する。この場合のモデルの

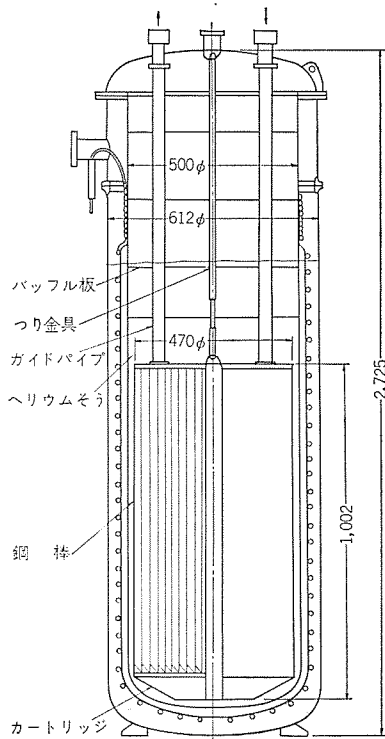


図 2.2 試験用クライオスタットおよびモデル
Cryostat and model for precooling test.

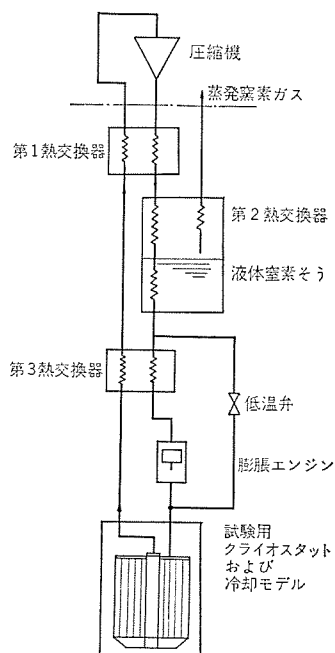


図 2.3 20°K 冷却系 モデル 試験系統図
Flow diagram of pre-cooling system for model test.

温度降下は冷却系から得る冷凍能力 Q_R によって決まる。いま Q_R をモデルの温度 T の関数として実験的に次式で表わす。

$$Q_R = q_m T = C_f \cdot W_f (\theta_2 - \theta_1) \quad (2.3)$$

q_m はヘリウムガスが温度 θ_1 でモデルを冷却したのち、 θ_2 で冷却系に戻るとき、モデルが冷却系から受けた冷凍能力を温度の係数として表わしたものである。モデルの温度降下は次のように求める。すなわち熱平衡から

$$q_m T = -C_m \cdot W_m \frac{dT}{d\tau} \quad (2.4)$$

が成立するから、これを解くと

$$\tau = \frac{C_m \cdot W_m}{q_m} \ln \frac{T_0}{T} \quad (2.5)$$

が得られる。

熱容量 $C_m \cdot W_m$ がわかったモデルを温度 T_0 から T まで冷却する時間 τ を求めておけば、超電導電磁石の冷却時間を容易に計算することができる。

なおこの特性計算ではモデルの比熱が低温で大きく変化するので、温度差 $T_0 - T$ を小さく分割しそれぞれの温度範囲における平均値を用いた。

2.2 試験結果

(1) 単独試験

図2.4に20°K冷却系の単独運転特性を示す。冷却負荷は装置自身の熱容量だけであり、冷却時間は90°Kまでの冷却に0.5時間(第1次予冷)、20°Kまでの冷却(第2次予冷)に1.1時間を要した。冷却温度の最低は約2時間の運転後12°Kとなった。

(2) モデル試験

鋼材1トンモデルとする冷却試験の結果を図2.5に示す。冷却過程においてモデルの上部と下部の間には最大70°Kの温度差が生じた。冷却はモデル上部の温度とモデル下部の温度がほぼ等しくなるまで続けた結果、294°Kから85°Kまで3.2時間、85°Kから20°Kまで2.7時間を要した。

(3) 予冷能力

冷却温度の平衡後の時間を除いて単独およびモデル試験の結果をまとめると表2.1のようになる。冷却負荷として鋼材1tonを用いた場合、冷却時間の増加は第1次予冷で2.3時間、第2次予冷で1.8

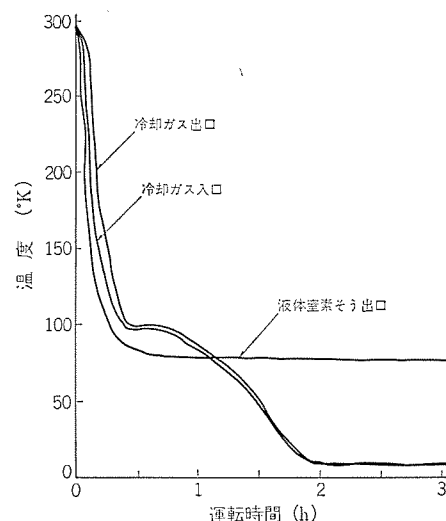


図 2.4 20°K 冷却系の冷却特性(1)単独運転
Cooling down characteristics of 20°K precooling system (1) (solo operation).

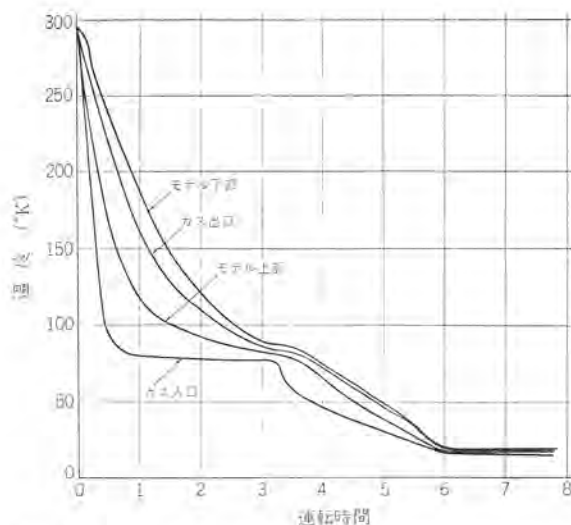


図 2.5 20°K 冷却系冷却特性(2) (鋼材 1 ton の冷却の場合)
Cooling down curves of 20°K precooled system (2) (for carbon steel 1 ton).

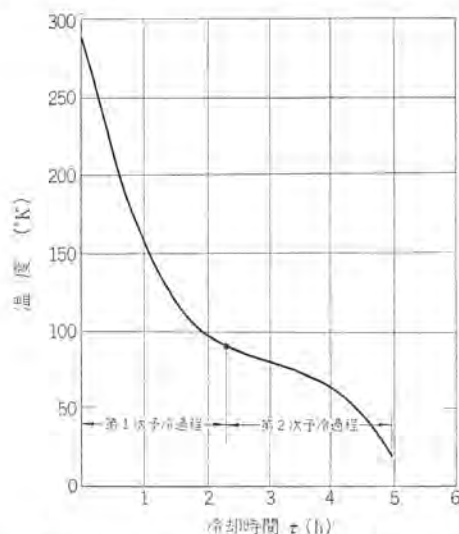


図 2.6 鋼材 1 ton の冷却時間の計算結果
Calculation result of cooling down curve for carbon steel 1 ton.

表 2.1 20°K 冷却系特性試験結果
20°K precooled system test result.

予冷温度	冷却重量	
	なし(準換)	鋼材 1 ton
290°K から 90°K	0.5 h	2.8 h
90°K から 20°K	1.1	2.9
所要時間合計	1.6	5.7

時間の増加となる。

いま式(2.2)および(2.5)式を用いて鋼材 1 ton の場合を計算すると図 2.6 の冷却曲線のようになる。ただし第 1 次予冷時は流量 500 Nm³/h, 熱交換率 $\eta=0.8$, 第 2 次予冷時は予冷能力 $Q=15T(W)$ を用いて計算した。この結果によれば第 1 次予冷は 2.3 時間, 第 2 次予冷は 1.6 時間となり試験結果とかなりよく合うことがわかった。以上の特性試験によって得た結果を用いると, 超電導電磁石(銅換算)重量あたりの冷却時間を求める実験式がつぎのように近似できる。

$$\tau = 4.9W_m + 1.6 \dots \dots \dots (2.6)$$

ただし W_m : 超電導電磁石の重量(t)

τ : 冷却所要時間(h)

である。

3. 据付調整試験

この冷却系は 45 キロガウス 超電導電磁石の液体ヘリウム冷却に使用するため, 電気試験所田無分室に据けられた。以下は据付調整試験の概要である。

3.1 構器の配置

45 kG 超電導電磁石の設置スペースとして 30 m×27 m の建屋が準備された。図 3.1 は建屋内の全体機器配置図である。機器配置スペースは機器の機能, 寸法, 安全性および取扱操作を考慮して決められており, 大別して機械室(圧縮機室), 低温機器室(実験室), 高圧容器室および準備室の四つに分けられる。その他クライオスタットからの蒸発ガスを 1 時貯蔵するための回収ガスホルダ, 液体窒素供給装置, クーリングタワーなどは建屋外に設置した。

実験室に設置した低温機器の配置の決定に際しては, クライオスタットの中心から約 5 m 内には磁性を持つ機器の配置を避けるように計画され, クライオスタット内の超電導電磁石の励磁運転中の強い電磁力によって機器の誤動作, あるいは破損を防止するとともに超電導電磁石に対する影響を除いた。図 3.2 は実験室におけるクライオスタットまわりの機器の配置を示す。電磁石の組込調整とクライオスタットの運転操作を容易にするために, 液体ヘリウム供給系と 20°K 冷却系とをクライオスタットの両側に配置した。この結果クライオスタットと結ぶ低温配管を短くすることができた。

機械室には液体ヘリウム供給系圧縮機 2 台, 20°K 冷却系圧縮機 2 台, 回収系圧縮機 2 台, および補助電源装置などをまとめて設置した。図 3.3 は機械室内における配置を示す。

高圧容器室は周囲を鉄筋コンクリートの壁とし, 補給用ヘリウムガスボンベマホールドおよび回収ガス貯蔵用長尺容器を設置した。図 3.4 は長尺容器の設置状況を示す。建屋外には図 3.5 のように左から, クーリングタワー 液体窒素供給装置 2 基, 一つおいて, 回収系 10 m³ ガスホルダを設置した。

3.2 据付, 配管

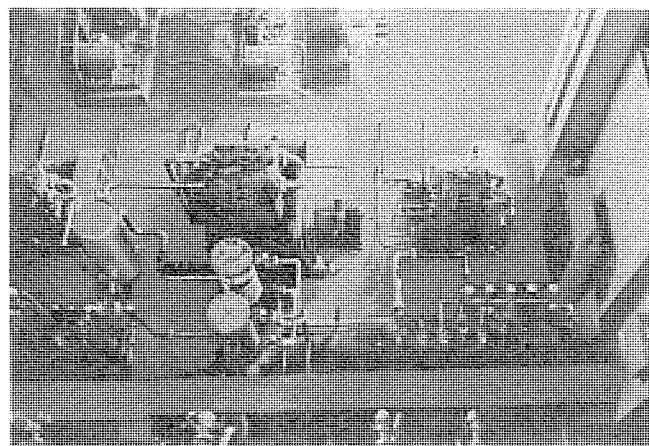
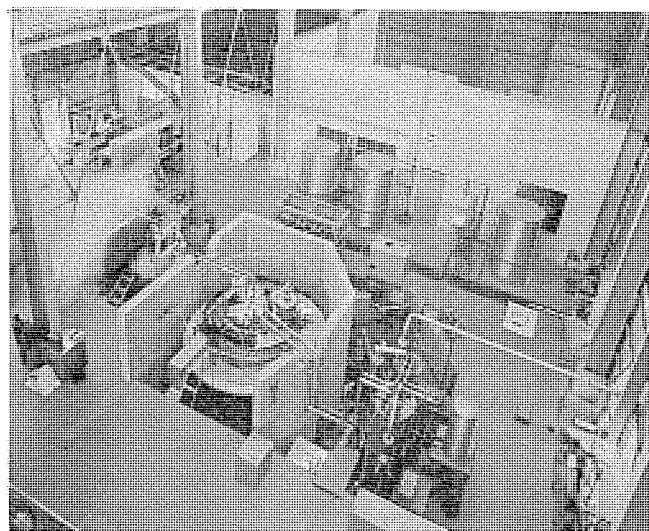
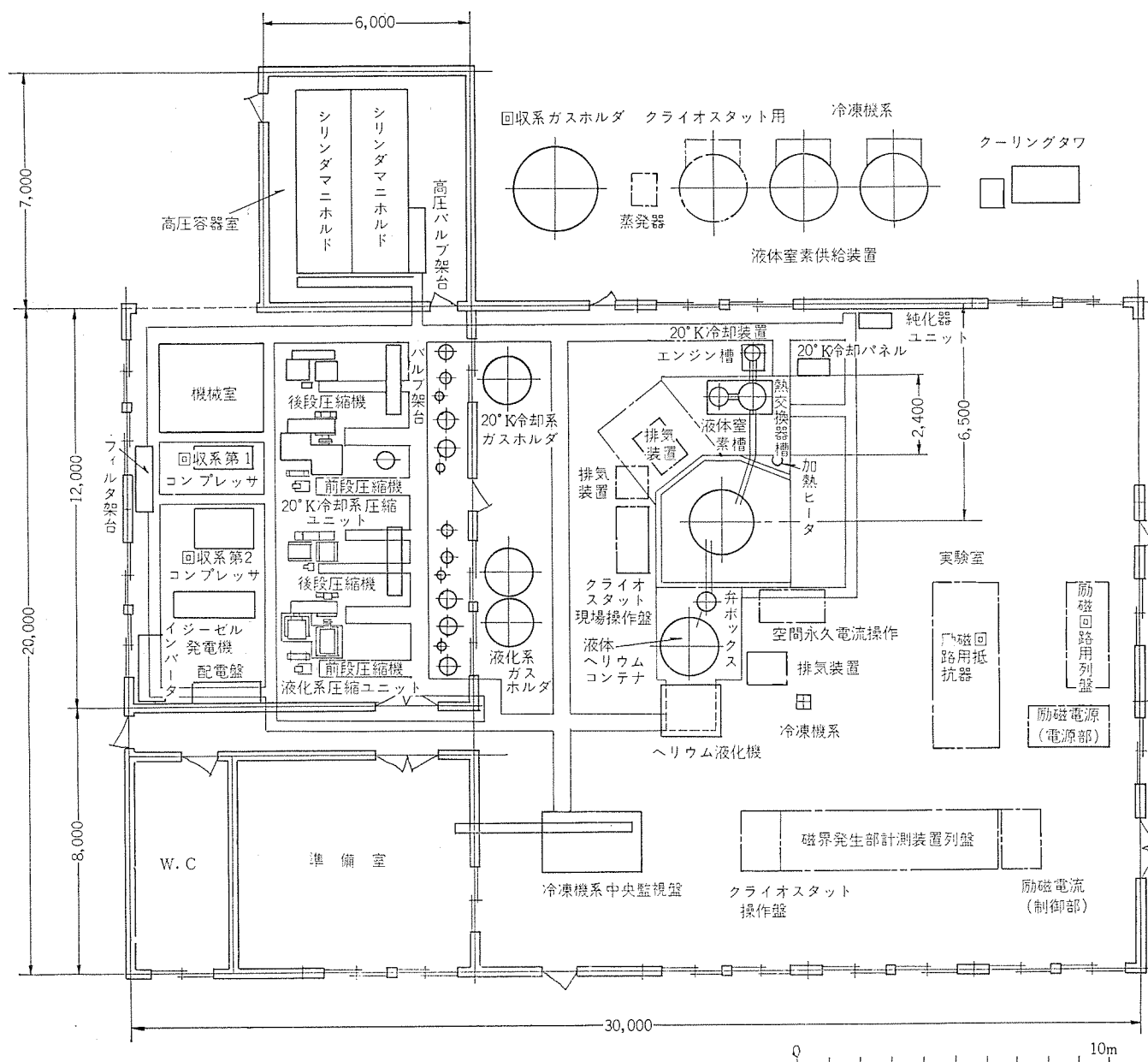
本装置は, 建屋完成をまって機器の据付工事および機器間の配管工事を開始した。据付機器のおもなものは次のとおり。

- (1) 液体ヘリウム供給系および 20°K 冷却系圧縮機
- (2) 回収系圧縮機および補助電源装置
- (3) 回収ガス貯蔵用長尺容器
- (4) 20°K 冷却系本体
- (5) 液体ヘリウム供給系本体および液体ヘリウムコンテナ
- (6) 屋外設置機器

機器の設置は前述のように各機器の機能別にまとめて配置したため, 機器相互間を結ぶ配管は膨大なものとなった。しかし配管は内部を通ず流体に対して最適な材質のものを使用し, ピット内に収納することにより, 実験室のスペースが有効に利用できるようになった。配管の種類は,

- (1) ヘリウムガス系統——ステンレス管および銅管
- (2) 冷却水系統——亜鉛引銅管
- (3) 液体窒素系統——銅管
- (4) 真空系統——ステンレス鋼管および銅管

である。これらの配管工事においては使用する管材の清浄管理および溶接方法の改善をすることにより, 銅管を除き溶接の後処理を簡素化することができた。



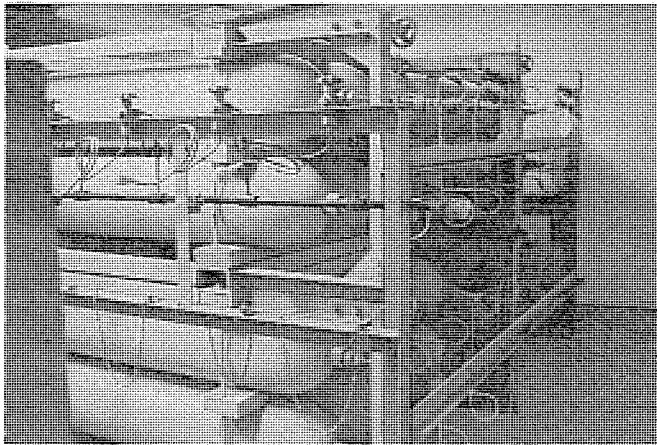


図 3.4 回収 ガス 貯蔵用長尺容器
Recovery gas storage cylinder.

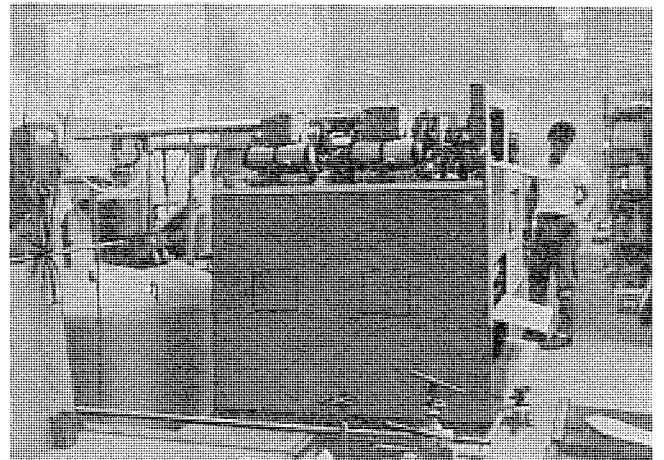


図 3.7 液体ヘリウム供給系
Liquid helium supply system.

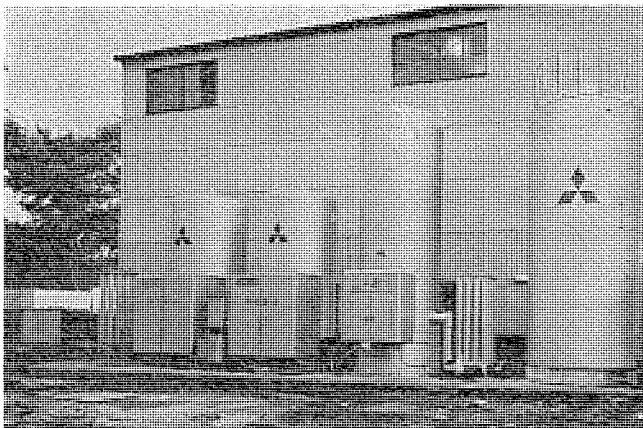


図 3.5 屋外設置機器
Gas-holder and liquid nitrogen storage tanks

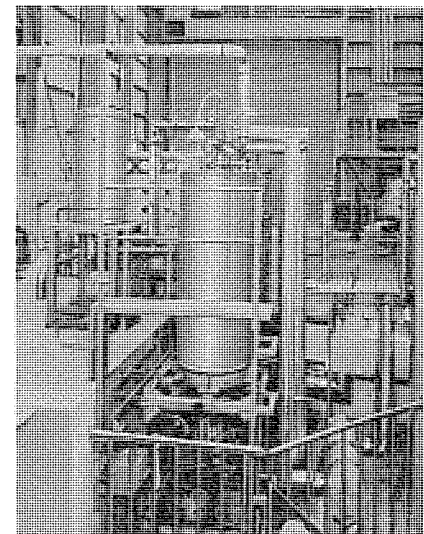


図 3.8 20°K 冷却系本体
20°K precooling system.

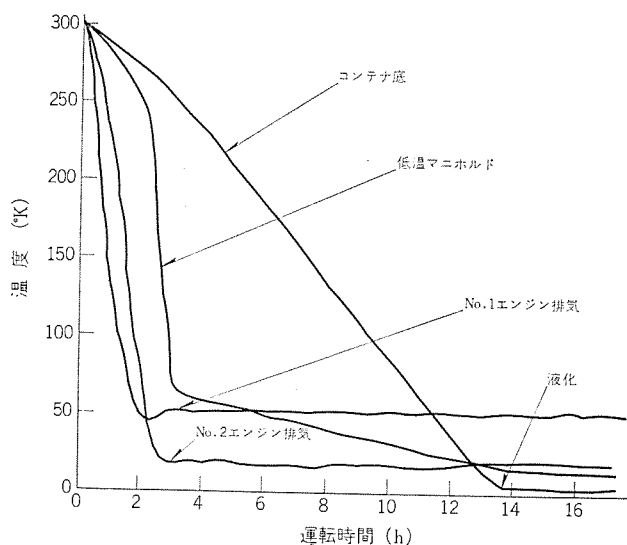


図 3.6 液体ヘリウム供給系起動特性の一例
Typical cooling down data of helium liquefier.

3.3 単体試験

据付工事が正常であることを確認する目的でクライオスタットと接続した総合運転を行なう前に各機器の単体試験を実施した。以下は試験内容とその結果である。

(1) 液体ヘリウム供給系

液体ヘリウム供給系においては起動時間、液化能力、液体ヘリウムコンテナの蒸発試験および低温配管の動作について行なわれた。図 3. 6

は液体ヘリウム供給系の単体試験運転例である。起動時間は14時間以内、液化能力は約 28 l/hr、液体ヘリウムコンテナの蒸発速度は 22 l/day 以下であり、低温配管および低温弁タンクの動作が正常であることが確認された。図 3. 7 は液体ヘリウム供給系の運転状況である。

(2) 20°K 冷却系

20°K 冷却系においては単体試験用 Uベンド 低温配管を使用して無負荷状態での起動試験および熱交換器そう、液体窒素そう、エンジンそうなどの機器相互間の低温配管の動作試験が行なわれた。2 時間以内に 10°K までの温度降下が可能であること、および低温配管の動作が正常であることが確認された。図 3. 8 は 20°K 冷却系の本体を示す。

(3) 回収純化系

回収純化系においては、(a)回収ガスホルダと2台の圧縮機運転中の安全動作および異常時の安全動作、(b)純化器の純化特性試験および再活性試験が行なわれ、正常であることが確認された。

4. 総合運転

超電導電磁石を収納したクライオスタットに低温配管を所定のとおりにつけて気密試験と系統のクリーニング運転を行ない液化系、20°K

冷却系、回収純化系、およびクライオスタットのヘリウム系統がすべて完全にヘリウムガスで置換されたことを確認したのち、液化運転、および予冷運転を開始した。図 4.1 は 45 キログラム 超電導電磁石冷却系のフローシートを示す。

4.1 液体ヘリウムの供給

液化運転においては、本体入口圧力を約 15 atg で運転をおこない液体ヘリウムを生成してクライオスタットに供給した。液体ヘリウムがクライオスタットへ規定量貯液された時点で、本体入口圧力を約 17 atg まで昇圧して液化速度を上げ、マグネットの励磁運転中、十分液体ヘリウムが供給できるようにした。液化機の液化速度は液体ヘリウムコンテナのレベル計、およびガスホルダのレベル計の変化する割合から算出し、最高液化速度、30 l/h を確認した。

運転中は液化機の動作状態を把握するため、第一エンジン 入口圧力、機内圧力、JT 流量、第一、第二エンジン制動モータ電流を監視し、30 分ごとに記録するようにした。液体ヘリウムコンテナからクライオスタットへの液体ヘリウム移送は移送速度を 50 l/h から 600 l/h の範囲でおこなった。液体ヘリウムの注入にあたっては、1 時間ほど約 10 l/h の速度で液体を送り、低温配管が十分冷却されてから液体の本格的な移送をするようにした。移送中に蒸発するヘリウムガスは加熱器を通してガスを常温にし、回収ガスホルダにたくわえ順次回収圧縮機で長尺容器に送り込み高圧状態で貯蔵した。

回収量の時間的変化、クライオスタットへたまっていく液体ヘリウムの量を検討して最適注入速度をきめ、これを 300~350 l/h とした。クライオスタットの液面レベルが上限近くなったときは液体注入速度を 50~60 l/h におとし、液体の飛まつを蒸発ガスと一緒に外に取り出すことのないように注意した。

液体ヘリウムの供給は、クライオスタットの底部と上部の 2 か所からおこない、液面レベルが低いときは底部から供給し、液面のレベルが上昇したとき自動弁にきりかえて上部より供給するようにした。液体ヘリウムの注入速度はバルブの開閉度、およびコンテナとクライオスタットの差圧を変化させておこなった。バルブの開閉にあたっては、スピンドルの回転角度を逐次記録し蒸発ガスの増減を監視しながら操作した。コンテナとクライオスタットの差圧は 0.1~0.2 kg/cm² の範囲でおこなった。

4.2 予冷運転

20°K 冷却系による超電導電磁石の予冷は、まず、LN₂ そうでヘリウムガスを液体窒素温度付近まで冷却し、これをクライオスタットに供給して電磁石の温度を 80°K まで予冷するとともに電磁石の中に含まれている水分等の不純物を凍結させ、膨張エンジンを駆動したとき不

純物によるトラブルが発生しないようにした。

電磁石の温度が 80°K になったとき、入口圧力 5 atg で約 5 時間、膨張エンジンのならし運転をおこない異常のないことを確かめたうえ、20°K までの冷却運転をおこなった。冷却中はマグネットの温度、供給する冷却ガスの温度、クライオスタットの圧力等を計測、監視しながら運転した。図 4.2 はこのときの電磁石の冷却状態を示したものである。

ヘリウムガスの冷却用として液体窒素を使ったが、蒸発したガスの顕熱もヘリウムガスの冷却に使用したため、液体窒素の消費は 2,000 l 以下であり経済的に予冷をおこなうことができた。

超電導電磁石の励磁実験を終了した時点で、20°K 冷却系によって電磁石の温度を常温まで加温した。励磁運転終了後、約 600 l の液体ヘリウムがクライオスタットに残っていたため、20°K 冷却系を運転してヘリウムガスを熱交換器の一次側に送り、蒸発してきたヘリウムガスと熱交換させて温度を下げ、これをクライオスタットに送って徐々に液体ヘリウムを蒸発させた。蒸発したヘリウムガスは熱交換器の二次側を通して一次側のヘリウムガスと熱交換して常温まで上昇させてガスホルダに回収し、余分のガスは回収系のガス貯蔵用長尺容器に回収した。

液体ヘリウムの回収を終了した時点で、LN₂ そうに 150~180°C の窒素ガスを供給して循環ヘリウムガスを加温しクライオスタットに送りこんで加温運転をおこなった。約 50 時間で 4.2°K から 300°K まで温度を上げることができた。図 4.3 は加温運転の状態を示したものである。

4.3 運転結果の検討

本冷却系の実用試験の結果は上記のとおりであったが、ここで運転操作上の問題点について列挙してみる。

(1) 液化機のヘリウムガス

クライオスタットで蒸発したヘリウムガスは回収してふたたび液化に使用するのでヘリウムガスは回収圧縮機の油の蒸気を含みだけで空気成分はまったく含まれない。したがって純化器は油分の除去だけに使用され、簡単に 100% の純化ガスを得ることができた。この結果ヘリウムガス中の不純物による液化機のトラブルはなくなり、機械的な部分を強化すれば般用圧縮機に近い長時間運転が可能になる見通しを得た。また、回収圧縮機をオイルフリー形にすれば純化運転を不要にすることも可能であることがわかった。

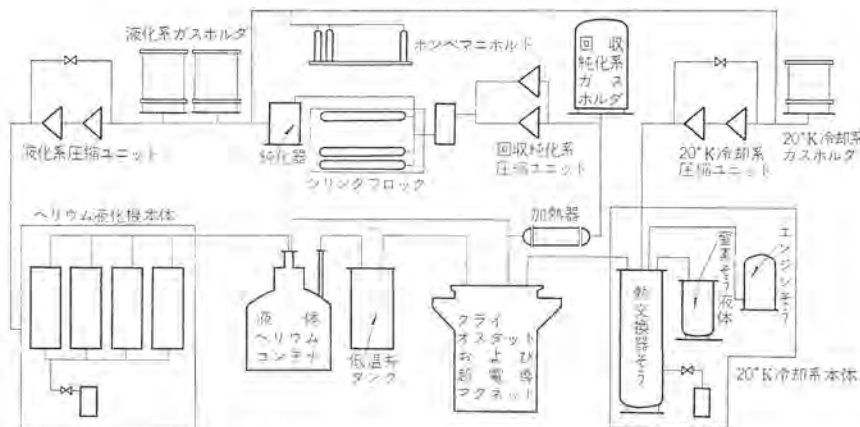


図 4.1 45 kg SCM 冷凍機系フローシート
Flow diagram of helium refrigeration system.

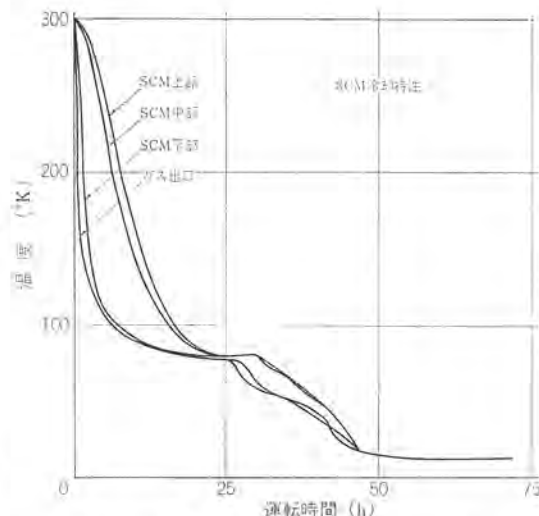


図 4.2 45 キログラム 超電導電磁石の冷却特性
Cooling down characteristic of magnet.

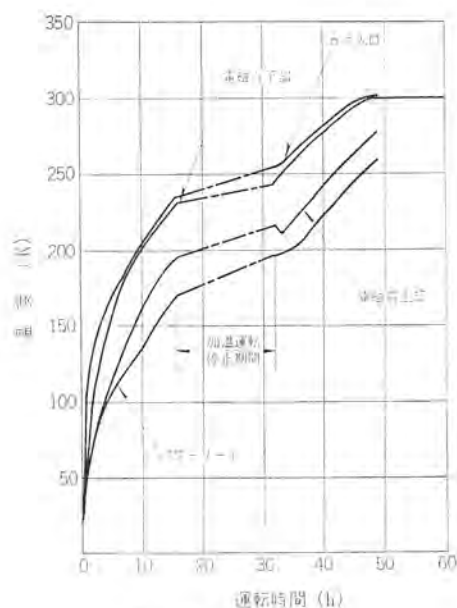


図 4.3 加温運転特性
Warming operation data of magnet.

(2) 液体ヘリウムの補給

液体ヘリウムをコンテナからクライオスタットに供給する場合、低温自動弁を用いて自動的に供給する方法をとったが、低温配管の温度が高いときに弁を開くとはじめに暖まったガスがクライオスタットに流れ込み内圧を上昇させることが起こった。液体ヘリウムの自動補給方法について今後検討の要がある。

(3) クライオスタットのヘリウムガス

クライオスタットのヘリウムガス置換は真空排気を繰返すことによって 99.9% 以上のヘリウムガスに置換できる。しかし電磁石からごくわず

かの吸蔵ガスが徐々に放出されるので、時間の経過とともに純度が低下する。そこで 20°K 冷却系を運転し第一次予冷過程において約 80°K に冷却したヘリウムガスを送り込んで電磁石を冷却し、液体窒素そうにある吸着トラップで不純物を除去する。この結果電磁石における永久電流スイッチの接触面が清浄に維持でき、20°K 予冷方式の特長が発揮された。

(4) 電磁石の予冷速度

電磁石の予冷過程において、その構成材料の熱容量と局所的な冷却流量の相違によって冷却温度が不均一となり、大きな熱応力を生じることが予想される。20°K 冷却系はこの場合冷却ガスの流量を調整して適当な冷却速度を与えることができた。

5. む す び

以上は 45 キロガウス超電導電磁石の冷却運転の概要である。委託研究により開発した冷却系は、電磁石の経済的な運転が可能であることを明らかにし、励磁運転が完了するまでに必要な液体ヘリウムを大量に供給することができた。

今後、大形超電導電磁石はクライオスタットおよび冷却系を含めた小形大容量化の研究が必要であり、建設費、運転費とも低減されて長期間に安定運転ができることが MHD 発電機への実用化の絶対条件となっており、超電導と極低温技術の早急な進歩が期待されている。本冷却系の運転試験にあたっては電気試験所機器部およびワーキンググループの方々から種々指導をいただき、また研究の遂行に対し、工業技術院をはじめ関係部門から多大のご援助をたまわったことを記して、厚く感謝いたします。(昭和 44-10-22 受付)

参 考 文 献

- (1) 荻野ほか：三菱電機技報 43, No. 12 (昭 42)

セミホット壁 MHD 発電ダクトに関する研究

池田 茂*・是永 定美*・森川 鉄也**

Study on a Semi-Hot Wall Duct for MHD Generators

Electro-technical Laboratory Shigeru IKEDA・Sadami KORENAGA
Mitsubishi Electric Corp., Central Res. Laboratory Tetsuya MORIKAWA

Among component apparatus of MHD power plants, MHD generation ducts are one of problems imposing the most numerous questions in the viewpoint of development. At present there are two kinds of ducts are suggested for machines of practical operation ; that is, a water-cooled wall duct and a semi-hot wall duct. Both are respectively studied and developed, but either of them has many problems unsolved and it will be some time before they are put into practical use.

This paper makes clear of questions on these generation ducts, and suggests a semi-hot wall duct based on new constitution practice as one of solution to cope with the situation together with experimental consideration.

1. ま え が き

MHD 発電ダクトは、MHD 発電プラントの構成機器のなかで、開発上最も多くの技術的問題を有しているものの一つである。

現在、実用機には水冷壁発電ダクトおよびセミホット壁発電ダクトが提案され、その開発研究が活発に行なわれている。しかし前者は熱損失がかなり大きいこと、電極での電圧降下が大きく、しかも陰極表面で電流がスポット状に集束して作動ガスの有効導電率が低下すること、絶縁型での漏えい（洩）電流が大きいことなどの欠点があり、また後者は絶縁型および電極を構成するセラミックスの冷却が技術的に困難であること、セラミックスが熱衝撃・熱応力に弱いために発電ダクト壁が破損しやすいことなどの問題がある。

本論文では、これらの発電ダクトの問題点を明らかにするとともに、その一解決策として新しい構成法によるセミホット壁発電ダクトを提案し、実験的な考察を加えている。

2. 発電ダクトの技術的問題点とその解決策

発電ダクトを構成する絶縁壁および電極は、温度・流速がそれぞれ2,200～2,800°K、800～1,000 m/s のシード物質のカリウム、燃料の灰分などきわめて腐食性のはげしい物質を含有する高温高速気流にさらされる。したがって、絶縁壁材料は電気絶縁性、電極材料は導電性、熱電子放射性など、いわゆる電気的特性のほかに、上記の作動ガスに対して耐熱性・耐熱応力性・耐熱衝撃性・耐酸化性・耐食性・耐摩耗性など、多くの過酷な条件に対してすぐれた特性をもつものでなければならない。これまでに、絶縁壁材料としては、MgO、ZrO₂、Al₂O₃、BeO、ThO₂、SrZrO₃ などの耐熱絶縁物質、電極材料としては、ZrB₂、ZrO₂、LaCrO₃ あるいはこれらの複合系などの耐熱導電物質が提案されているが、いずれの材料も実用に耐えるには不十分である。したがって、実用機では発電ダクトの器壁を耐熱材料の許容温度以下に冷却することが必要である。

しかしながら、絶縁壁および電極をそれぞれ薄いセラミックスで構成し、その裏面を冷却して表面温度を1,800°K 前後にする、いわゆるセミホット壁発電ダクトは、セラミックスに大きな温度こう配が発生するために、それを断熱的に使用する場合よりも大きな熱衝撃・熱応力にさらされること、セラミックスと冷却金属板との接触面における熱

抵抗を小さくしなければならないことなどのために、その開発は困難視されている。すなわち、従来のセミホット壁発電ダクトでは、それを構成するセラミックスの冷却は、単にその裏面に冷却金属板を接触させて行なっているにすぎないので、セラミックスと冷却金属板との間の接触抵抗が大きく、とくにMHD発電機の場合には作動ガスが高温高速であるために、壁温が1,800°K のときでも作動ガスから器壁への熱伝達量は1 MW/m² とかなり大きく、上記の温度まで冷却することが困難である。また作動ガスからセラミックスへの熱伝達量、セラミックスの熱伝導率から考えて、セラミックスは厚さ方向に1,500°C/cm というような大きな温度こう配が発生するために、セラミックスは運転の起動停止時における過渡的熱応力のほかに、定常運転時に大きな熱応力を受けるので、それを断熱的に使用する場合よりもき（亀）裂が生じやすく破損することがある。

このような理由から、実用機では絶縁壁および電極をそれぞれ水冷金属壁で構成する、いわゆる水冷壁発電ダクトが提案されている。たとえば四角または六角の銅またはニッケル片を並べ、これらの金属片の間にアルミナセメントをはさみ、相互に絶縁して絶縁壁を構成する方法である。この水冷壁発電ダクトは、たしかに耐久性にはすぐれているが、壁温がかなり低いために、大容量の実用機を想定した場合でもかなりの熱損失を伴うことが予想され、発電プラントの熱効率の低下をまねくこと、作動ガス中に添加されたシード物質のカリウムが、KOH、K₂CO₃、K₂SO₄ などの形で壁面に付着して、金属片間の電気絶縁性を劣化させること、また水冷電極は電極における電圧降下が大きく、しかも電流が陰極でスポット状に集束して、実効的な導電率を低下させることなど多くの欠点があり、実用機への適用にはかなり問題がある。

筆者らは、従来のセミホット壁発電ダクトおよび水冷壁発電ダクトの問題点を解決するために、図2.1に示すような構造の絶縁壁および電極を有する発電ダクトを考えた⁽¹⁾。

水冷壁発電ダクトの欠点をのぞくために、絶縁壁および電極をそれぞれ薄いセラミックスで構成し、しかも従来のセミホット壁発電ダクトの問題点の一つである、セラミックスと冷却金属板との間の接触抵抗を減少させるために、セラミックスを熱伝導率が大きく、セラミックスの裏面温度より高い使用温度を有する接着材で冷却金属板に接着し、セラミックスと冷却金属板との間の空気をなくしている。セラミックスは

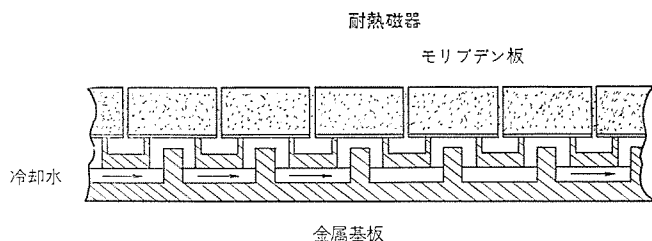


図 2.1 セミホット壁 MHD 発電ダクトの基本構造
Basic construction of semi-hot wall MHD generator duct.

Mo-Mn 金属化法などによって金属化（メタライズ）することができるので、セラミックスは前もってメタライズされ、Au, Ag, Ag-Cu 合金またははんだなどにより冷却金属板に接着されている。またセラミックスの耐熱応力性・耐熱衝撃性は、セラミックスを小片に分割されているので大幅に改善されている。それはセラミックスの耐熱応力性・耐熱衝撃性はセラミックスの代表長さに反比例するからである。

3. セミホット壁発電ダクトの構造

図 2.1 に示すように、絶縁壁および電極を構成するセラミックスはその代表長さを短くするために小片に分割され、それぞれ冷却金属板を介して金属基板上の突起にろう付けされている。セラミックスは前もってメタライズされている。突起はセラミックスと金属基板との熱膨張率の差異によりセラミックスにかかる熱応力、金属基板のひずみを吸収するために設けられている。また同じ理由で、冷却金属板には熱膨張率がセラミックスに比較的近いニッケル合金、モリブデン、コバルトまたは柔軟性に富む銅などの薄板が使用される。これらのセラミックスの間の隙（隙）には高温部に耐熱絶縁セメント、低温部に合成樹脂が充填（填）され、シード物質が内部に浸透して電気絶縁が劣化するのを防いでいる。

本構成法によるセミホット壁発電ダクトの絶縁壁材料・電極材料にはそれぞれ Al_2O_3 、 ZrB_2 が適している。

Al_2O_3 は融点が $2,015^\circ\text{C}$ と他の酸化物磁器に比べて低いが、セミホット壁発電ダクトの壁温である $1,800^\circ\text{K}$ 前後では問題なく、耐熱応力係数も BeO について大きく、機械的特性・化学的安定性・耐摩耗性・メタライズ性も良好で、しかも BeO のように水蒸気と反応しない。

ZrB_2 も ZrO_2 、 LaCrO_3 などの電極材料に比べて耐熱応力係数が大きく、冷却金属板とのろう付けもニッケルメッキを施すことにより可能である。とくに本構成法では電極材料を直接冷却金属板にろう付けし、冷却するとともに電気をとりだすために低温での導電性が要求されるが、 ZrB_2 は ZrO_2 、 LaCrO_3 に比べて低温での導電性が良好で、たとえば常温で $14\ \mu\Omega\text{-cm}$ と比抵抗が非常に小さい。 ZrB_2 は耐酸化性では多少問題があるが、電極表面に生成される酸化物層の主成分は ZrO_2 であり、これは高温では十分導電性を有するために、電極特性を劣化させないことが報告されている。

4. 予備実験

セミホット壁発電ダクトを試作するに先だて、前章で提案した構成法による Al_2O_3 および ZrB_2 の作動ガスに対する耐熱性、耐熱衝撃性、耐熱応力性および耐食性を検討した。

図 4.1 に示すように、試料は試験ダクトに試料表面がダクト壁と同一平面になるまでそう入され作動ガスに照射された。試料はいずれもモリブデン板（厚さ 0.4 mm）を介して取付金具にろう付けされ冷却される。試験ダクトは水冷金属壁で構成され、試料そう入口、ガス

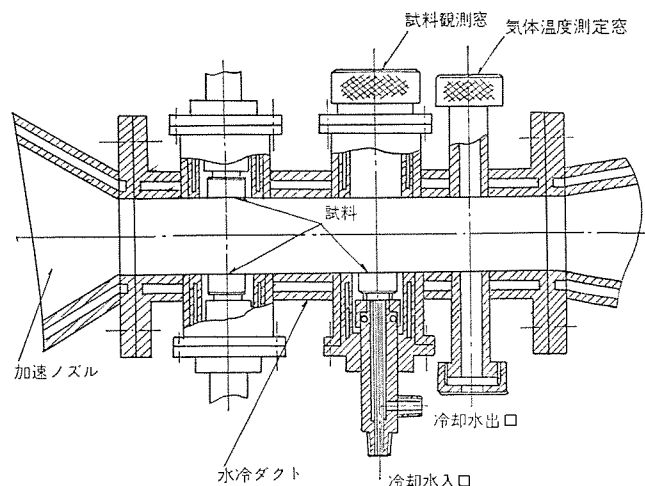


図 4.1 試験ダクトの構造
Construction of test duct.

温度測定窓および試料表面観測窓を備えている。

作動ガスには実用機を模擬するために、 KOH のアルコール溶液をシード材としてカリウム含有率で 1 mol % 添加した軽油-酸素富化空気による燃焼ガスを使用し、試験ダクトにおける作動ガスの温度、流速がそれぞれ $2,850^\circ\text{K}$ 、 $700\ \text{m/s}$ になるように質量流量、酸化剤の N_2/O_2 比をきめている。

セラミックスの耐熱衝撃性および耐熱応力性はセラミックスの耐熱応力係数に比例し、その代表長さに反比例する。セラミックスの耐熱応力係数は純度・気孔率・成形方法・焼成温度・焼成時間など多くの因子に影響されると考えられる。

そこで、各種の Al_2O_3 磁器および ZrB_2 磁器を前述の方法で作動ガスに照射して、その耐熱衝撃性を調べた。試験は試料にできるだけ過酷な熱衝撃を与えるために、燃焼装置のゆるすかぎり起動停止を急激に行ない、停止後冷気流を流して急冷するようにした。試料への熱伝達量は $0.8\sim 1.2\ \text{MW/m}^2$ 、1 回の照射時間は 10 分で、照射回数は最高 8 回であった。試料は照射後 1 回ごとに肉眼で詳細に観察され、クラックの有無、表面状態が調べられた。

Al_2O_3 磁器は、気孔率 0 %、表面寸法が $17\times 17\ \text{mm}$ 以下の試料は 8 回の熱衝撃でも良好な結果を示した。また ZrB_2 磁器は Al_2O_3 磁器より耐熱衝撃性が良好であった。

Al_2O_3 磁器および ZrB_2 磁器の作動ガス、とくに作動ガス中のシード材のカリウムによる耐食性を調べるために、試料を作動ガスに約 10 時間照射し、その形状を肉眼で観察するとともに、組織・成分の変化を顕微鏡、X 線回折法および分光分析により詳細に検討した。

Al_2O_3 への熱伝達量および表面温度はそれぞれ $1\ \text{MW/m}^2$ および $1,900^\circ\text{K}$ の場合、照射後 Al_2O_3 磁器の表面は約 0.5 mm の厚さの部分が灰色に変色していたが、予想されるカリウムによる侵食は、認められなかった。すなわち、カリウムおよびカリウムと Al_2O_3 との化合物である $\text{K}_2\text{O}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{K}_2\text{O}\cdot 11\text{Al}_2\text{O}_3$ などは検出されなかった。

ZrB_2 磁器はすべて表面にもろい酸化物層を形成し、その一部ははがれて表面におうとつ（凹凸）が生じていた。これらの酸化物層の主成分は ZrO_2 であった。

5. 実験装置

図 5.1 および図 5.2 にそれぞれ 1,000 kW 級 MHD 発電機およ

び長時間運転 MHD 発電機を示す。これらはいずれも通商産業省の大型工業技術研究開発制度（大形プロジェクト）の一環として、電気試験所田無分室に建設されたものである。

1,000 kW 級 MHD 発電機は、次の段階である数万 kW 級の大容量 MHD 発電機的设计に必要な MHD 発電特性を得るとともに、発電機の運転経験を修得することを目的としたもので、すでに作動ガスとして軽油-酸素燃焼ガスを使用した場合、質量流量 2.84 kg/s で全出力電流 1,720 A、最大出力 700 kW の発電に成功している⁽²⁾⁽³⁾。そして MHD 発電機的设计に必要な基礎資料を得るとともに、発電ダクトの種々の問題点が明らかにされた。

図 5.1 の実験装置はさらに実用機に近い MHD 発電機の実験ができるように改造されたもので、酸化剤に予熱空気が使用できるようになっている。空気は、運転が短時間であること、任意の N_2/O_2 比にすることができることなどのために、液体酸素貯そう（槽）（容量 3,000 l）および液体窒素貯そう（容量 6,000 l）から温水式気化器を経て純酸素・純窒素を供給し、それらを混合して作成される。

シード材は K_2SO_4 の微粉を軽油に前もって適量を懸濁させ、燃料とともに添加されるようになっている。

空気加熱器は蓄熱型熱交換器で、蓄熱体にはアルミナ磁器ボールが使用されている。蓄熱体の加熱は空気加熱器の上部に設けられたプロパンバーナによって行なわれる。液体酸素および液体窒素は温水式気

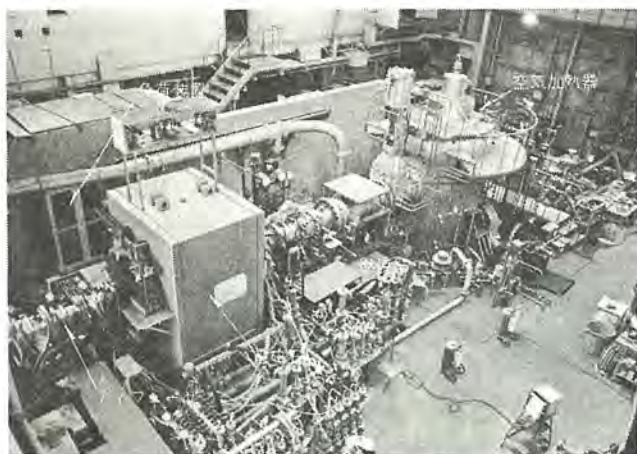


図 5.1 1,000 kW 級 MHD 発電機（電気試験所 Mark-2）の外観
Exterior view of 1,000 kW class MHD generator (E. T. L.-Mark-2).

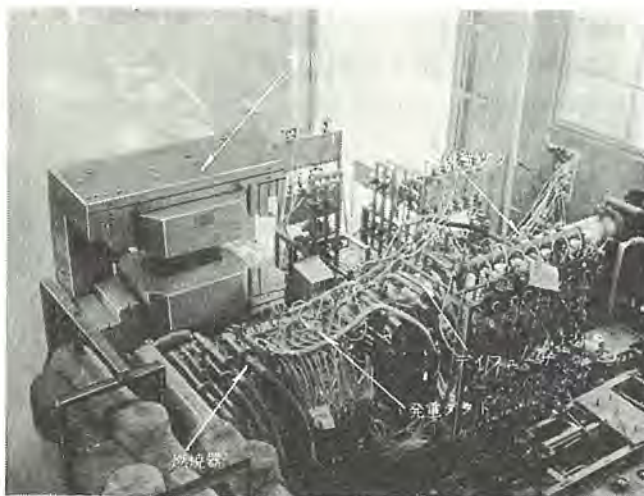


図 5.2 長時間試験用 MHD 発電機の外観
Exterior view of MHD generator for long duration test.

化器で気化された後、混合され空気加熱器で最高 1,400°C まで予熱される。

図 5.3 に実験に供した発電ダクトの内面を示す。図に示すようにこの発電ダクトは末広形で、入口断面 108×150 mm、出口断面 108×250 mm、長さ 1,720 mm の寸法を有する。絶縁壁および電極はそれぞれ 16.5×16.5×7 mm の Al_2O_3 磁器および 20×29.5×12.4～27 mm の ZrB_2 磁器から構成され、おのおの 0.4 mm のモリブデン板を介して金属基板にろう付けされている。電極はホール効果を消去するとともに電流量の流れ方向の分布を測定するために 30 分割され、それぞれ独立した 6 種類の抵抗器を内蔵する負荷装置に接続され、出力電圧・出力電流および隣近する電極間のホール電圧を測定できるようになっている。

電磁石は磁極間隔 160 mm、幅 260 mm、長さ 1,200 mm の寸法を有する鉄心マグネットで、磁束密度は最大 3.4 wb/m² である。

図 5.2 の実験装置は、MHD 発電特性よりはむしろ長時間運転における技術的問題点を究明するためのもので、連続 100 時間以上の運転が可能であるように設計されている。

燃料は上記の実験装置と同じく軽油で、酸化剤は酸素富化空気、酸素ガスは液体酸素貯そう（容量 20,000 l）から気化器を経て供給される。なお酸化剤は別置空気加熱器で 500°C まで予熱することができる。シード材は濃度 48 % の KOH 水溶液が使用される。

燃焼器は水冷金属壁で構成され、内径 255 φ mm、長さ 362 mm の寸法を有する。

図 5.4 に実験に供した発電ダクトの内面を示す。この発電ダクトは定断面積形で、断面 30×120 mm、長さ 900 mm の寸法を有する。絶縁壁および電極の材質、冷却構造は上記の発電ダクトと同じである。電極は同じくホール効果を消却するためと、電流量の流れ方向の分布を測定するために 12 分割され、それぞれ独立した負荷に接続されている。

電磁石は磁極間隔 130 mm、幅 160 mm、長さ 700 mm の寸法を有し、磁束密度は最大 1.9 wb/m² である。

なお、いずれの実験装置もシード材による大気汚染を防ぐために排気処理筒をそなえている。排ガス中のカリウムは排気処理筒内に噴射される水に溶解する。水溶液は排水前に中和そうに送られ、硫酸

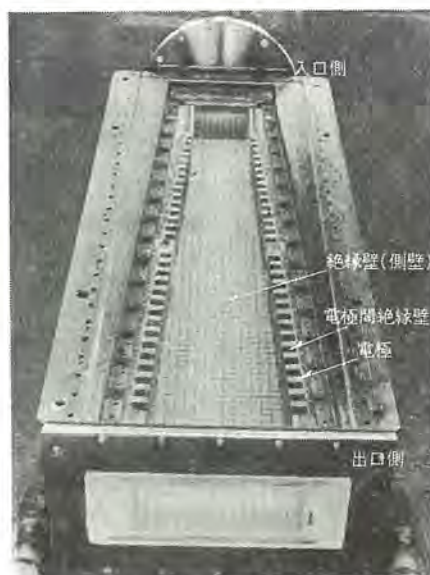


図 5.3 1,000 kW 級セミホット壁発電ダクトの内面
Interior view of 1,000 kW class semi hot wall generator duct.

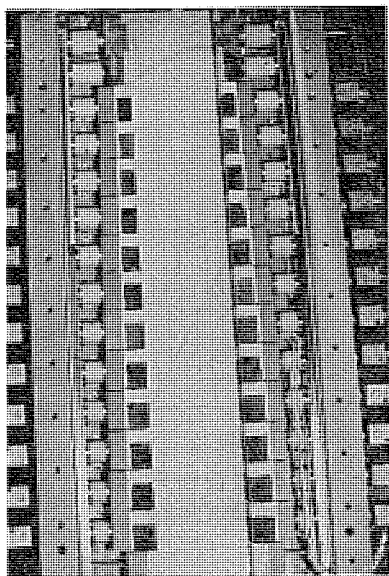


図 5.4 長時間試験用セミホット壁発電ダクトの内面
Interior view of semi hot wall generator duct for long duration test.

により中和される。

6. 実験結果とその検討

実験は第一段階として電気量の測定よりむしろセミホット壁発電ダクトの作動ガスに対する耐性、すなわち器壁の熱損失、耐熱衝撃性、耐熱応力性、耐摩耗性、カリウムに対する耐食性について調べた。

図 6.1 に図 5.3 の 1,000 kW 級発電ダクトの流れ方向の熱損失を示す。図 6.1 において○印は測定値であり、破線は平板乱流の伝熱式から求められた計算値である。ただし Al_2O_3 の熱伝導率は $0.016 \text{ cal/s} \cdot \text{cm}^\circ\text{C}$ と仮定している。図から明らかなように、測定値と計算値とはかなりよく一致している。

実験は 7 回、累計運転時間にして約 40 分になった。実験後、絶縁壁の Al_2O_3 磁器は、発電ダクトの入口から 500 mm のところまでき裂がはいっていたが、カリウムによる侵食、作動ガスによる摩耗は認められなかった。それより下流の Al_2O_3 磁器は、まったく損傷が認められなかった。

この境目付近の Al_2O_3 磁器の表面温度は図 6.1 の熱損失量から推定すると $1,200 \sim 1,300^\circ\text{K}$ である。このことは、耐熱性よりはむしろ耐熱衝撃性を改善する方向に冷却構造その他を検討する必要があることを示している。しかしながら、作動ガス中のカリウムは、壁面温度が $1,300 \sim 1,600^\circ\text{K}$ のとき凝縮して壁面に付着することが報告されており、この温度領域をさける必要があるため、上流の Al_2O_3 磁器の厚さを薄くして壁面温度を $1,200^\circ\text{K}$ にして、 Al_2O_3 磁器の熱衝撃によるき裂を防ぐのも一つの方法であると考えられる。

電極における熱損失量は、電極と電極間の絶縁壁の冷却水路が共通であるため、これらの熱損失量をまとめて測定し、その値から電極間絶縁壁の熱損失量を差引くという方法で測定した。電極間絶縁壁の熱損失量は発電ダクト入口から同じ距離にある前述の絶縁壁のそれと等しいものと仮定している。しかしながら、電極表面近傍における作動ガスの温度境界層や表面あらしなどのちがいによる影響のためか、測定値と計算値は一致しなかった。そこで電極と電極間絶縁壁の冷却系統を分け、それぞれの熱損失量が測定できるように改良中である。

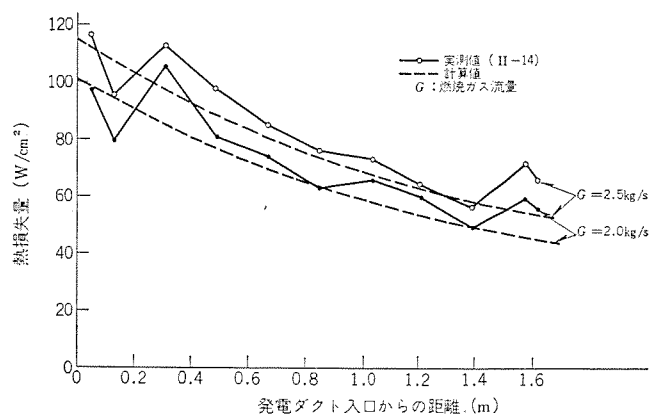


図 6.1 1,000 kW 級発電ダクトの局所熱損失
Local heat flux of 1,000 kW class generator duct.

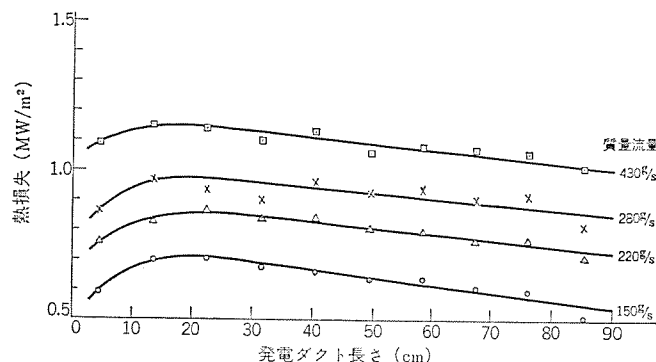


図 6.2 長時間試験用発電ダクトの局所熱損失
Local heat flux of generator duct for long duration test.

電極表面およびその近傍における電圧降下を測定するために、電極間に適当な間隔をおいて白金線のプローブを埋め込んで電位分布を測定した。電極における電圧降下はかなり大きく、これは電極の表面温度がかなり低いためであると考えられる。

長時間運転用の発電ダクトは、1,000 kW 級発電ダクトと同じく最初絶縁壁には純度 95.6 %、寸法 $16.5 \times 16.5 \times 7 \text{ mm}$ の Al_2O_3 磁器を用いた。

作動ガスの質量流量および熱入力はいずれも $430 \sim 470 \text{ g/s}$ および $2.52 \sim 2.64 \text{ MW}$ で、酸化剤は N_2/O_2 比が $0.42 \sim 0.79$ で、酸素過剰率は $1.05 \sim 1.19$ である。発電ダクトの入口および出口のガス温度はそれぞれ $2,600 \sim 2,800^\circ\text{K}$ および $2,500 \sim 2,700^\circ\text{K}$ である。

図 6.2 に絶縁壁の流れ方向の熱損失量を各質量流量に対して示す。作動ガスの質量流量が 430 g/s のとき、絶縁壁の熱損失量は全領域にわたり約 1.1 MW/m^2 である。この場合、 Al_2O_3 磁器の表面温度は、図 6.3 に示すように、質量流量が 430 g/s の場合 $1,500^\circ\text{K}$ である。なお、図 6.3 の表面温度は次式によって計算している。

$$q = k \frac{(T_w - T_0)}{l} \dots\dots\dots (6.1)$$

ここに k は材料の熱伝導率、 l は厚さ、 T_w および T_0 はそれぞれ表面および冷却面の温度で、 $k = 0.016 \text{ cal/s} \cdot \text{cm}^\circ\text{C}$ 、 $l = 0.7 \text{ cm}$ 、 $T_0 = 400^\circ\text{K}$ と仮定している。

運転は 34 時間（ただし発電時間は 24 時間）行なった。図 6.4 に運転後の絶縁壁の表面状態を示す。絶縁壁表面には Al_2O_3 の流出こん（痕）がはっきりあらわれている。この融解して流出したと考えられる Al_2O_3 は Al_2O_3 磁器のものか、 Al_2O_3 磁器の間に詰込んだアルミナセメント（主成分 Al_2O_3 、 CaO ）のものかはっきり断言できない。そして、絶縁壁の損傷はとくに陰極（電子を放射する方の電

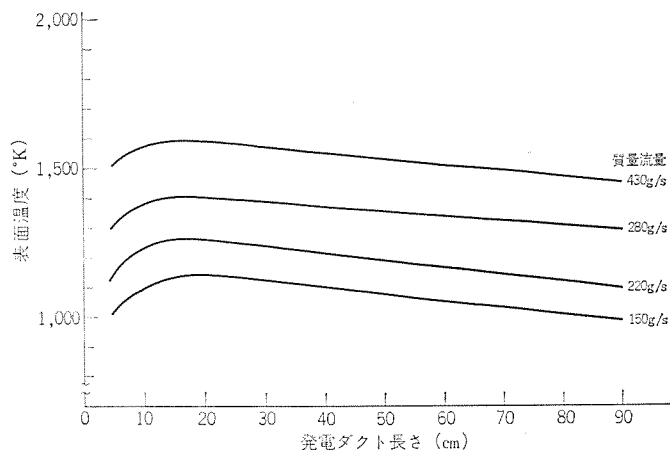


図 6.3 発電ダクトの壁面温度
Local wall temperature of generator duct.

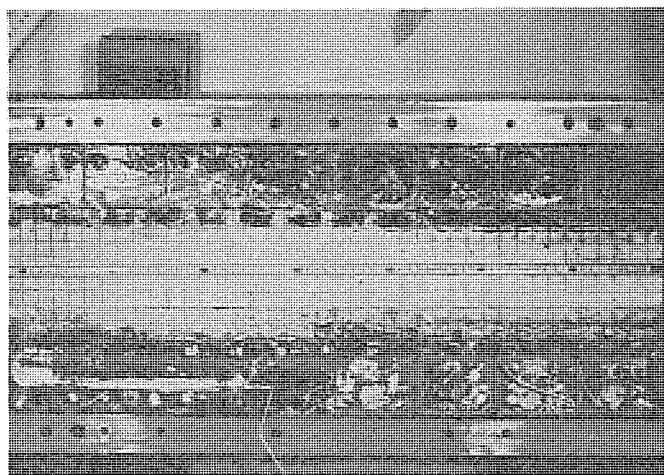


図 6.4 運転 34 時間後の絶縁壁
Insulating wall after sustained operation of 34 hours.

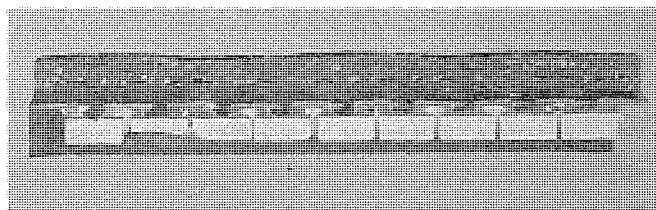


図 6.5 絶縁壁の断面
Cross section of insulating wall.

極) 近傍で大きかった。この状態を図 6.5 に示す。これは絶縁壁をダイヤモンド切断機で切断したもので、損傷に片寄りがあることがわかる。この原因としては、

- (1) 加速ノズルから発電ダクトに入った作動ガスが片寄って流れた。
 - (2) ホール効果により作動ガスが陰極側に片寄せた。
 - (3) 対向電極間に直流が流れているために、電氣的・化学的腐食が生じた。
- などが考えられる。

原因の(1)については、燃焼器、加速ノズルなど装置固有の現象である。しかし磁界を印加しない状態で、ダクトの静圧および熱損失を測定し検討したが、作動ガスの流れの片寄りは認められなかった。

しかしながら、いずれにしても図 6.3 からわかる特長的なことは Al_2O_3 磁器の表面温度はただか 1,500°K と推定されているに

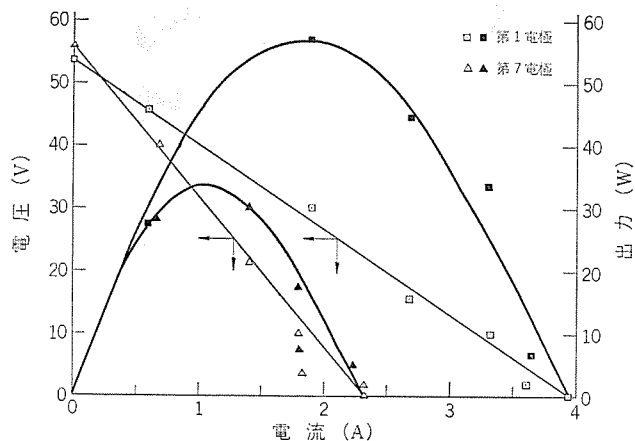


図 6.6 発電出力特性と電圧—電流特性
Power vs. voltage and current vs. voltage.

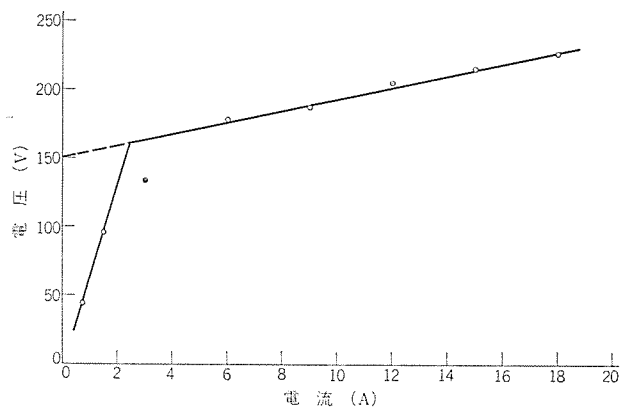


図 6.7 電圧—電流特性の一例
Example of voltage-current characteristic.

もかわらず、 Al_2O_3 磁器の表面は、前述の予備実験の結果と異なりかなり損傷していることである。これは Al_2O_3 磁器の表面にシード材が液状で付着し侵食がはげしかったためか、 Al_2O_3 磁器およびアルミナセメント中の CaO 、 SiO_2 などの不純物がまずカリウムと反応して溶融し、それが Al_2O_3 と共融したため、または実際には Al_2O_3 の熱伝導率が仮定した $0.016 \text{ cal/s} \cdot \text{cm}^\circ\text{C}$ よりも小さく、したがって表面温度が 1,500°K よりもかなり高かったためであろうと考えられる。これらの原因を究明するためには、 Al_2O_3 磁器の純度を高めること、 Al_2O_3 磁器の熱伝導率を正確には(把)握すること、 Al_2O_3 磁器間に詰め込むアルミナセメントの特性を検討することなどが必要である。

図 6.6 に最大出力時における電極 1 対当たりの電圧—電流特性および発電出力特性を示す。また図 6.7 に外部から電圧を印加して求めた電圧—電流特性を示す。図 6.7 で縦軸との交点から電極における電圧降下が求められる。この場合、電極における電圧降下は 150 V とかなり高く、これは前述の実験と同じく電極の表面温度がかなり低いためであると考えられる。しかしながら、図 6.6 に示す電氣的特性はこの電圧降下を考慮しても、従来の一次元定常流の理論から求められる計算値よりもかなり低いことである。これは、電極とケース間との間に充てんされているアルミナセメントの絶縁抵抗が低下し、各電極間に漏えい電流が流れたためと考えられる。

これらの問題点を究明するために、発電ダクトを次のように改良した。すなわち、(1) 絶縁壁の Al_2O_3 磁器の純度を 99.6 % とした。(2) Al_2O_3 磁器の厚さを発電ダクト上流から下流に向かって 4 mm か

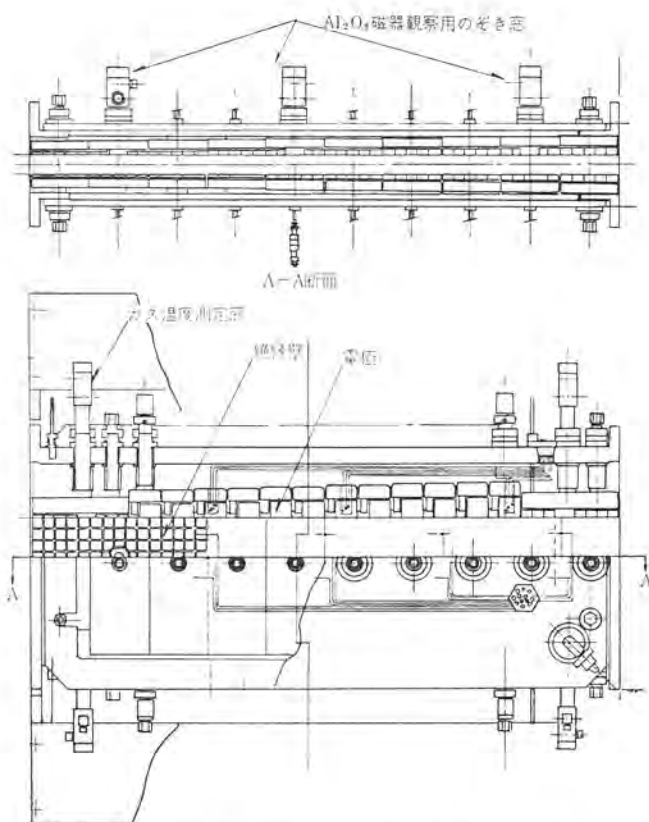


図 6.8 長時間試験用セミホット壁発電ダクトの構造
Construction of semi-hot wall generator duct for long duration test.

ら 10 mm と変化させ、 Al_2O_3 磁器の表面温度による影響を調べられるようにした。(3) Al_2O_3 磁器間の目地部のアルミナセメントを改良した。(4) 電極とケース間には Al_2O_3 粉末とシリコンとの混合物を充てんした。

実験は作動ガスの質量流量を 250~260 g/s にし、 N_2/O_2 比および酸素過剰率をそれぞれ 0.45 および 1.1 とした。この場合ガス温度は発電ダクト入口で 2,700°K である。

この発電ダクトは、作動ガスに対する耐性を主として究明するために、図 6.8 に示すように Al_2O_3 磁器観察用のぞき窓が設けられており、磁界は印加していない。

Al_2O_3 磁器の表面は、周辺部が中心部に比べてかなり高温になっているのが認められた。これは金属基板上の突起の直径が 10 mmφ と Al_2O_3 磁器の表面積 $17.5 \times 17.5 \text{ mm}^2$ に比べて小さく Al_2O_3 磁器の周辺部の冷却がわるいためである。100 時間運転後、 Al_2O_3 磁器は厚さが 7 mm 以下の場合、ヘアークラックが認められたが、カリウムによる侵食や溶損は認められなかった。これらのヘアークラックの分布は表面の温度分布と一致している。したがって、これらのヘアークラックは冷却構造を改良することにより十分さげられると考えられる。 Al_2O_3 磁器は厚さが 8 mm 以上の場合には、表面はく離が生じており、また部分的には Al_2O_3 磁器と冷却金属板との間のはく離が生じていた。 Al_2O_3 磁器の表面はく離が起きたのは、冷却面と表面との温度差が薄い磁器に比べて大きいためであると考えられる。なお高純度 Al_2O_3 磁器のメタライズについては今後十分検討する必要がある。

7. む す び

以上、筆者らが試作したセミホット壁 MHD 発電ダクトについて実験的に検討した。その結果、本構成法によるセミホット壁発電ダクトは Al_2O_3 磁器の厚さを薄くし、冷却構造を改良すれば、実用機への適用の可能性があることが判明した。

終わりに、本研究について種々の有益なご討論、ご指導をいただいた電気試験所機器部伏見部長、旭硝子 K. K. 研究所塩田室長に対し、また今回の実験を実施するにあたり、多大のご協力をいただいた電気試験所機器部の関係各位に対して厚く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- (1) T. Morikawa et al : Proc. Int. Symp. MHD Elect. Power Generation, SM 107/87 (1968)
- (2) 伏見ほか：電試彙報，32，5，477（昭 43）
- (3) 伏見ほか：昭 44 電学連大，186

Ti-Nb-Ta 合金の高磁界超電導特性

田中 光雄*・小俣虎之助**・橋本 康男***・石原 克己***

Superconductive Characteristics at High Magnetic Field in Ti-Nb-Ta Alloys

Central Research Laboratory
Sagami WorksMitsuo TANAKA・Toranosuke KOMATA
Yasuo HASHIMOTO・Katsumi ISHIHARA

In producing a magnetic field with a superconducting magnet, alloy-type superconducting materials are used for the device to the extent of 50~60 kG, and for any higher magnetic fields are employed compound-type superconducting materials as a general practice. However, these compound type materials are so expensive that it is a popular cry for feasibility of applying the alloy type materials to the generation of much higher fields than the present limitation.

Ti-Nb-Ta alloy successfully developed by Mitsubishi is known to possess the highest critical field among the alloy-type superconducting materials. Study has been made on the critical field characteristics of this alloy and critical current characteristics up to 80 kG to confirm that this alloy withstands the use at high fields. This is a report on the achievement of the study.

1. ま え が き

1961年に J. E. Kunzler らによって Nb₃Sn や Nb-Zr などの高磁界に耐える超電導材料が発表され、それまで悲観視されていた高磁界超電導 マグネット の実現が可能という見通しが立つと、超電導は、にわかに世の学者・技術者の注目を集めるに至った。それ以後 10 年たらずの間の超電導材料および超電導 マグネット の開発を中心とする超電導技術の進歩の著しさには、実に目を見張るものがある。

超電導材料の開発は、これまで超電導のおもな用途がマグネットに限られていた関係上、“より高磁界の発生できるマグネットを、より大型のマグネットを”という要請の下に、高磁界で大電流を安定に流せる線材を求めて進められてきたといつてよい。

Kunzler, Matthias をはじめとする多くの研究者によって種々の組成の合金や金属間化合物の超電導特性が次々としらべ上げられた結果、高磁界超電導材料としては、合金では Nb-Zr と Nb-Ti が、また化合物では Nb₃Sn が最もすぐれたものとしての定評を勝ち得て、それぞれ数社から製品化され販売されている。

このように代表的な高磁界超電導材料は合金と金属間化合物があるわけであるが、合金は化合物に比べて加工性や取扱いの容易さの点で、はるかにすぐれている反面、臨界磁界や臨界電流などの超電導特性は後者にくらべてかなり低いという難点がある。

そこでこの点を打開すべく 1963~4 年 ごろから日本およびソ連を中心に三元系超電導合金の開発の機運が起こり、各方面で研究が行なわれた。しかし三元合金の開発となると二元合金に比べ、組成比を変化させる範囲が一次元増加するので、最高の特性を持つ組成を見つけ出す作業は格段に複雑かつ困難になる。さらに臨界電流を増すための加工の度合いや、熱処理の温度および時間などの要素が加わると、それら要素の組合せの数は膨大なものとなり、逐一検討していくことは不可能なまでになる。そのようなわけで三元合金の開発は予想に反してアメリカではあまり活発でなく、日本・ソ連およびヨーロッパの一部でなされているにすぎない。

当社では 1962 年、国内他社にさきがけて超電導材料および超電導機器の研究に着手し、超電導線の製造技術や超電導 マグネット の

設計、工作技術の確立に成功したが、三元合金の重要性には早くから着目し、その開発研究を鋭意推進した結果、1965 年に合金系としては最も臨界磁界が高く、かつ臨界温度・臨界電流のいずれも合金として最高水準に近く、コイル特性が安定でしかも加工性に富む Ti-Nb-Ta の三元合金の開発に成功した⁽¹⁾。この合金の製法はすでに完全に確立され、量産体制にはいっており、製品は 1966 年電気試験所に納入した 60 kG マグネット を第 1 号として、その後現在までに 20 数台受注納入した小形 マグネット の素線として、また東大に納入したわが国初のプラズマ閉じ込め用カスプマグネットの素線としても用いられており、その安定な特性が高く評価されている。本文では、この合金の超電導特性のうち最も重要視される臨界磁界 (H_c) 特性および臨界電流 (I_c) 特性について述べ、この合金の高磁界特性を検討する。

2. 臨界磁界特性 (H_c 特性)

Ti-Nb-Ta のような第 2 種超電導体の臨界磁界には、いわゆる GLAG 理論から決まる H_{c1} , H_{c2} などのほかに、試料に磁界をかけた場合、スピンの磁界方向にそろって常伝導エネルギーが低下することによって決まる臨界磁界 H_F 、試料に磁界をかけていったとき実際に常伝導抵抗の回復する磁界 H_r などがあるが実際上問題になるのは H_r である。ここでは Ti-Nb-Ta 合金の組成比と H_r の関連について述べる。

2.1 H_r の測定法

Ti-Nb-Ta 合金の H_r は最高 120~130 kG にもおよぶため、これを静的な磁界の下で測定することは、従来の銅-鉄 マグネット はもとより、現在の超電導 マグネット 技術をもってしても容易ではない。この難点をさけるためにわれわれはパルスマグネットを用いて測定を行なうことにした。パルスマグネットは、コンデンサに電荷として蓄えられた高いエネルギーを、瞬間的にマグネットコイルに放出することにより、通常のマグネットでは容易に到達し得ない高磁界を比較的簡単に得ることができる装置である。

図 2.1 はパルスマグネット磁界発生装置と H_r 測定回路のブロック図を、図 2.2 は同装置の外観写真を示したものである。マグネットコイルは、巻線抵抗を減じるために、1 気圧以下に減圧された液体窒素に

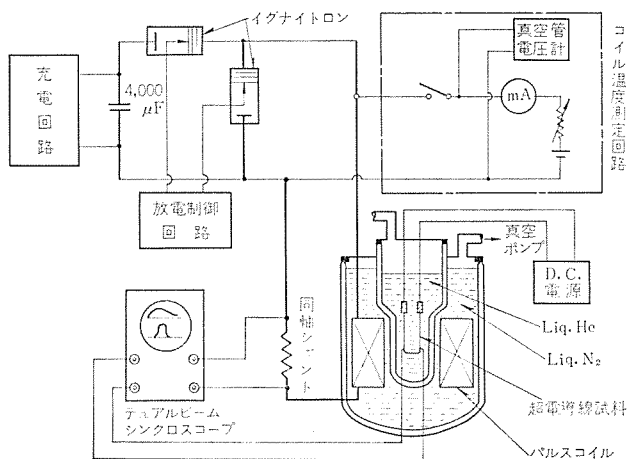


図 2.1 臨界磁界測定装置の概略図
Schematic diagram of apparatus for critical field measurement.

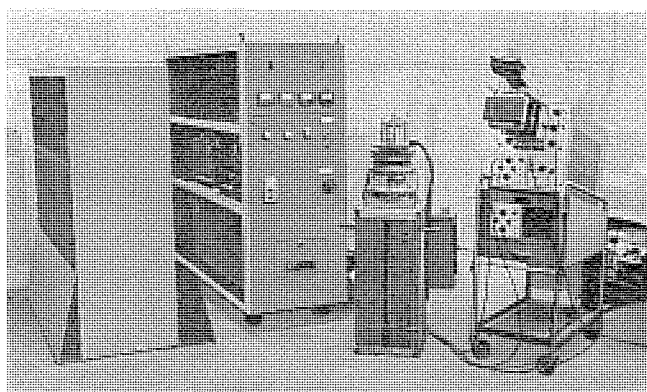


図 2.2 臨界磁界測定装置の外観
Photograph of the apparatus for critical field measurement

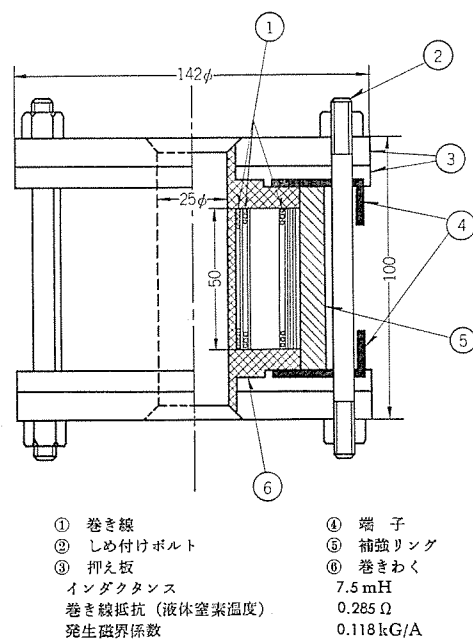
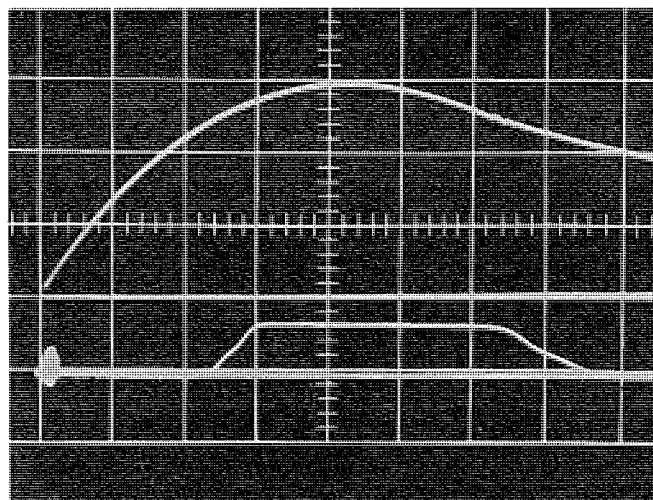


図 2.3 パルスマグネットの概略図
Schematic diagram of the pulsed magnet coil.

浸されており、これに 4,000 μ F のコンデンサバンクに充電された電荷が、コイルと直列にはいったイグナイトロンを通して放電される。コンデンサに逆電圧がかかりはじめたところでコイルと並列にはいったイグナイトロンが開き、誘動的な電流をバイパスする。この結果、コイルには立ち上がりがほぼ正弦波で減衰が指数関数のパルス電流が流れ、これに対応したパルス磁界が発生する。



上側：パルス磁界波形 (46.6 kG/div)
下側：試料電圧波形 (5 mV/div)
横軸：2 ms/div
試料 70 Ti-25 Nb-5 Ta
試料電流 30 mA

図 2.4 パルス磁界と試料電圧の波形の一例
Observed waveform of critical field measurement.

パルスマグネットは図 2.3 に示したようにエポキシ樹脂の巻きわくにホルマル銅線を巻きこんだものを用いた。コンデンサバンクは 3 kV までの充電が可能であり、このときピーク値約 1,570 A の電流が流れ、これに対応してピーク値 185 kG のパルス磁界が発生する。ピーク値に達するまでの時間は、9 ms である。

試料はパルスマグネットにそう入された液体ヘリウムデュアの中にヘアピン状にセットされている。試料には外部から、数 mA～数十 mA の電流を流しておき、試料が常伝導になって抵抗が回復したとき発生する電圧を検出して、これをパルスマグネットに流れる電流と同時にデュアルビームシンクロスコープに入れて観測した。電圧はヘアピン試料の先端、すなわち電流と垂直な磁場のかかっている部分のものを検出した。パルス磁界波形と電圧波形とをデュアルビームシンクロスコープで同時観測した例を図 2.4 に示す。

パルス磁界で測定した H_c が、静磁界での測定値と、どの程度よく一致するかの検討は、 H_c の低い Nb-10 at % Zr 線を用いて行なった結果、両者は 1～2 % の精度で一致することが確認された。

2.2 H_c 測定の試料

H_c 測定用の試料は、次のような手順で作製された。まずスポンジ状の Ti および粉末状の Nb, Ta を種々の割合で混ぜ合わせたものを、100 mmHg の密封アルゴン気中で非消耗アーク溶解した。溶解は、組成の均一度を増すため表裏 2 回の溶解後、冷間圧延によって 0.2 mm 厚の板にしたのち、10 m の長さに切断し、これをたばねあわせてさらに 4 回の溶解をした。溶解中の重量損失は、0.8 % 以下におさえた。

溶解率は冷間スエーピングおよび線引きによって、0.25 mmφ の線状にし、これを試料として用いた。組成比は Ti : 50～70 at %, Ta : 0～30 at % の間で変えた。

2.3 H_c 測定結果および検討

図 2.5 は Ti をそれぞれ 50 at %, 60 at % および 70 at % に固定して、Ta (したがって Nb も) の組成比を変えた場合の H_c の変化を示したものである。

Ti 組成比がいずれの場合も Ta 組成比を増していくと H_c は増加し、5～7 at % Ta 付近で最大値をとり、それを越えると次第に減

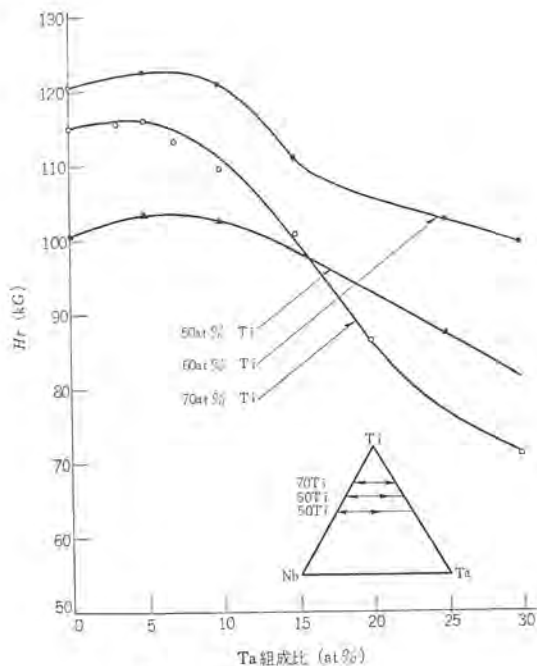


図 2.5 Ta の組成比 H_c
 H_c vs. concentration of Ta.

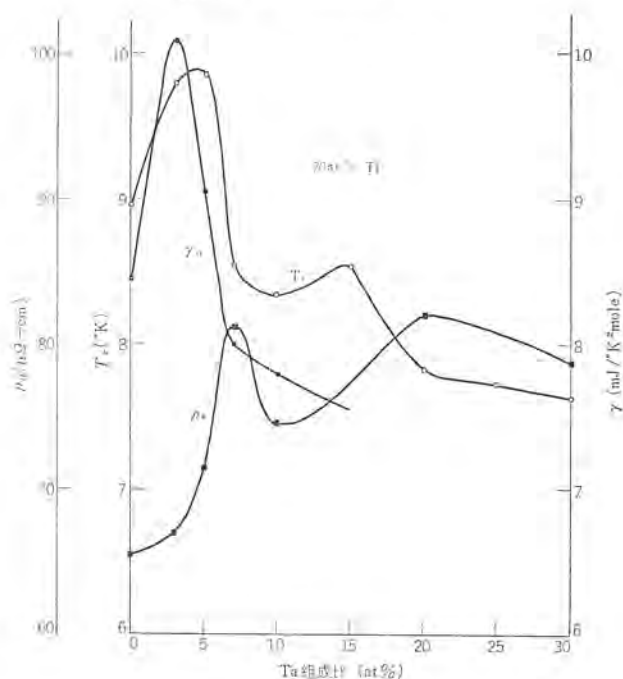


図 2.6 T_c , γ , ρ_n の Ta 組成比による変化
Variation of T_c , γ and ρ_n with concentration of Ta.

少していくという傾向を示す。このことは Ta 添加による三元合金化により、Nb-Ti 二元合金系より H_c の高いすぐれた材料が得られることを示すものである。この場合、最大値は 60 at% Ti の 5 at% Ta 付近で現われ、123 kG の H_c を有している。

これと同様の傾向は臨界温度 T_c 、超電導電子比熱 γ 、常伝導抵抗 ρ_n にも見られる。図 2.6 は 70 at% Ti における T_c 、 γ 、 ρ_n の Ta 組成比に対する変化を示したものである。臨界磁場 H_c は、これら T_c や γ とともに材料の電子論的な性質によって決まる性質であり、材料の加工などの影響を受けない基本的な性質であることが知られている。したがってこれらすべてが、Ta : 3~7 at% でピークを持つことは、この三元合金において、この組成付近でこの三元合金に特有のすぐれた超電導特性が出現していることをものがたって

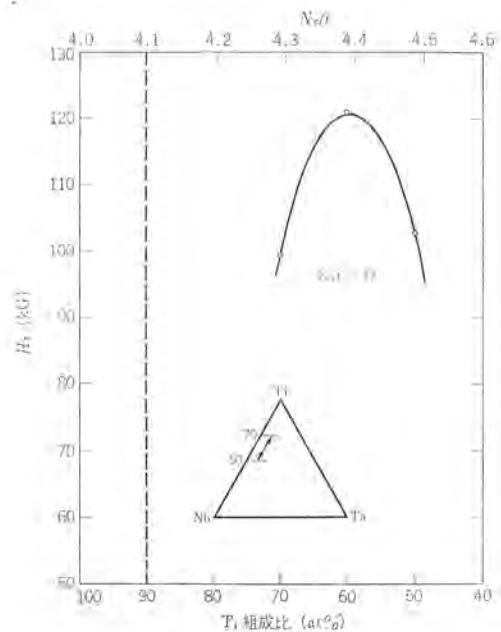


図 2.7 Ti の組成比と H_c
 H_c vs. concentration of Ti.

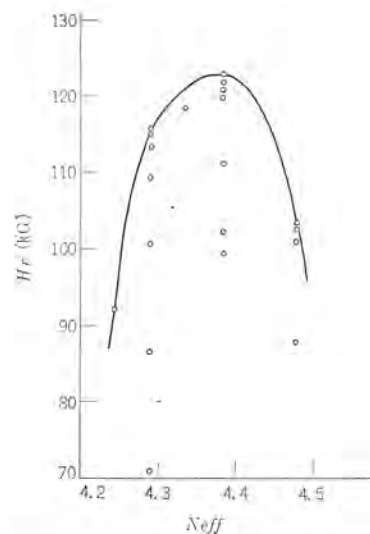


図 2.8 1 原子当たりの有効価電子数と H_c の関係
 H_c vs. effective electron-atom ratio

いる。すなわち Ta の添加は、臨界電流を増すための析出促進のためになされることのある、第三元素の添加などとはまったく意味合いを異にするものであり、母相そのものが新規な新超電導合金で形成されていることを意味する。

図 2.7 は、Ta を 5 at% に固定して、Ti と Nb の組成比を変えた場合の H_c の変化を示したものである。この場合、60 at% Ti で最大値をとる。このように Ti の割合を変えた場合には、合金の 1 原子当たりの見かけ上の価電子数 N が変わるものであるが、図 2.7 では DeSorbo⁽²⁾ の注意にしたがって、原子のサイズによる影響も考慮に入れた有効価電子数 N_{eff} (Ti-Nb-Ta の場合、各原子のサイズがきわめて近い場合実際には N とほとんど変わらない) を採用した。この場合、 $N_{eff} \approx 4.4$ で H_c が最高値をとる。図 2.8 は H_c の全測定点を N_{eff} に対してプロットしたものである。 H_c の最高点を結んだ曲線は $N_{eff} \approx 4.4$ で最高値を示していることがわかる。Matthias⁽³⁾⁽⁴⁾ や DeSorbo⁽²⁾ は、二元合金において、1 原子当たりの価電子数と、 T_c や H_c の間に一定の規則性があることを経験的に見出した

が、われわれの Ti-Nb-Ta 三元合金にも上記のような経験則が存在するわけである。

結局この三元合金は Ti 組成比を一定にした場合には、5 at % Ta 付近で、また Ti 組成比を変化させた場合には N_{eff} が 4.4 付近で H_T のピークをもつという規則性を示す。また、この合金の臨界磁界の最高値は 60 at % Ti-35 at % Nb-5 at % Ta であらわれ、その値は 123 kG である。この値は、これまでに知られている合金の中では最高のものである。

3. 臨界電流特性 (I_c 特性)

3.1 臨界電流について

すぐれた高磁界超電導線にとって、 H_T が高いということは絶対不可欠の条件であるが、これは決して十分な条件ではない。高磁界で大きな電流密度を持ってこそ初めて高磁界超電導線としての資格が与えられるわけである。しかし一般には、 H_T の高い材料が必ずしも高磁界で大電流を流し得るとは限らない。すなわち H_T と I_c とはまったく独立した要因によって決まるものである。

臨界電流 I_c を決めるメカニズムは、材料内の不均質点(たとえば転位や結晶粒界や析出物)による磁束線のピン止めであるとされている。第2種超電導体では、ある値以上の磁界の下で磁束は試料内部に侵入する。このとき磁束は連続的にひろがるのではなく、不連続な磁束線(または磁束量子線)として試料内に分布する。もし試料内部に磁束と垂直な方向に電流が流れていると磁束線はローレンツ力を受けることになる。ところが試料内に転位や析出物などの不均質点があると磁束線はその部分で運動が阻止されるような力、すなわちピン止め力を受ける。ピン止め力によって全部の磁束線の定常的な動きが完全に阻止されておれば、試料には電圧が現われずパワーロスがゼロである。ところが電流なり磁界なりが増加してローレンツ力が大きくなり、試料のピン止め力が磁束線の運動を阻止できなくなると試料には磁束の動きによる電圧が現われ、パワーロスが生じ、もはや完全導体の意味での超電導状態ではなくなる。この状態転位のおこる電流値を臨界電流 (I_c) と呼んでいる。すなわち、ある一定の垂直磁界中にある試料に電流を印加していった場合、試料に電圧が現われはじめた値が臨界電流である。

したがって、試料内部の不均質点の状態を操作してトータルのピン止め力を強くしてやるならば大きな I_c を得ることが可能でありそのためには、適当な大きさの不均質点を適当な分布状態で導入することが必要である。

3.2 測定方法および測定試料

臨界電流の測定はすべて線状試料を用い、当社で製作した、内径 13 mmφ、長さ 120 mm、最高発生磁界 80 kG の超電導マグネットに、試料をヘアピン状にしてそう入して測定した。最初にマグネットで試料線に磁界を印加し、ついで直流電源によって電流を印加した。臨界電流に達すると試料線の両端に電圧が発生するが、5 μ V の電圧が検出されたところを I_c と定めた。

I_c 測定に用いた試料は、Ti, Nb, Ta の原材料を適当な割合で混合し、約 100 mmHg のアルフンふんい気中で非消耗アーク溶解をくり返した後、高真空中で電子ビーム溶解を行ない、得られたインゴットを熱間および冷間加工によって、0.25 mm 径の線にしたものである。

3.3 I_c 測定結果およびその検討

図 3.1 は、Ta の組成比を 5 at % に保って、Ti の組成比を 50 at %, 60 at %, 70 at % と変えた場合の I_c - H 特性 (I_c の臨界 H に対

する特性)を示したものである。試料は冷間伸線加工の後に 400°C の温度で 1 時間の熱処理を施したものをを用いている。低磁界では 70 at % のものが最も高い I_c を持っているが、高磁界では 60 at % のものが最も高く、70 at % のものは三者の中で最低になってしまふ。

図から明らかなように線引きしたままの試料では、きわめて小さい I_c しか持たないのに比べて、熱処理を施した試料で大きな I_c を持つということは、この場合熱処理によって生ずる析出物が I_c 向上に大きな役割を果たしていることがわかる。事実、電子顕微鏡観察や電子線回析による解析から、この組成範囲の合金を熱処理した場合、Ti に富むちょう(稠)密六方晶である α -Ti 相が析出してくることが認められているのであるが⁽¹⁾、この α 相は液体ヘリウム温度で常電導状態であり、磁束線をピン止めする働きを持っているのである。したがって図 3.1 の組成比による I_c - H 特性の差異も、同じ熱処理条件でも組成比によって析出のしかたに差異があることによるものであると考えられる。

ところで析出は、最初に何らかの析出の核が生じ、つぎにその核が周囲の母相中の Ti 原子を吸収しながら成長していくと考えられるので、図 3.1 の中では 70 at % Ti のものが最も析出粒が成長しやすく 50 at % のものが最もしにくいと考えられる。もしも析出量が多いほど I_c が高くなると仮定するならば、低磁界における特性の傾向はよく説明されるが、高磁界での傾向は説明できないことになる。このことは、析出はその量だけで I_c が左右されるのではなく、各磁界において最適の析出粒の大きさや析出粒間隔が存在することを意味する。このことを今度は熱処理時間の観点からながめてみよう。

図 3.2 は 60 at % Ti-35 at % Nb-5 at % Ta の組成のものを比較的低い温度で種々の時間熱処理した場合の I_c - H 特性を示す。線引きしたままの線に熱処理を加えていくと、ある時間までは全磁界範囲にわたって I_c は増加するが (A→S→M)、それを越えて熱処理を続けると、低磁界の I_c は上がるが、高磁界の I_c が減少してしまうという傾向を示している (M→L)。このことは、熱処理によって析出核が成長していく過程において、高磁界超電導特性に対して最適の析出状態が存在し、それ以上の析出核の成長は高磁界超電導特性

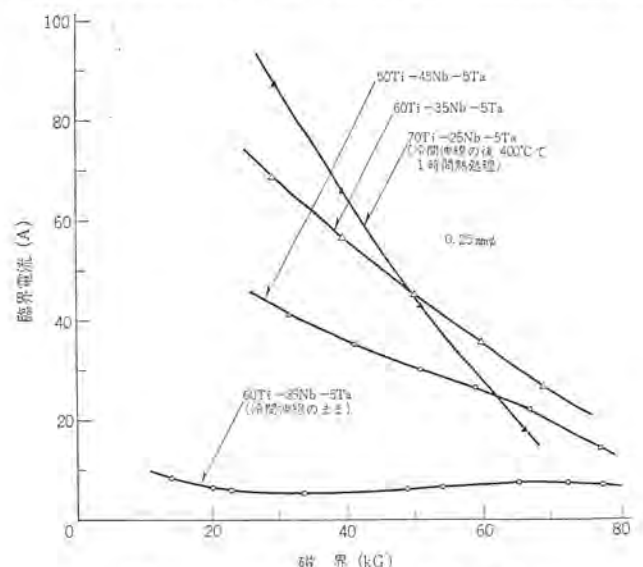


図 3.1 組成比と I_c - H 特性の関係
Effects of composition of Ti-Nb-Ta alloys on their I_c - H characteristics.

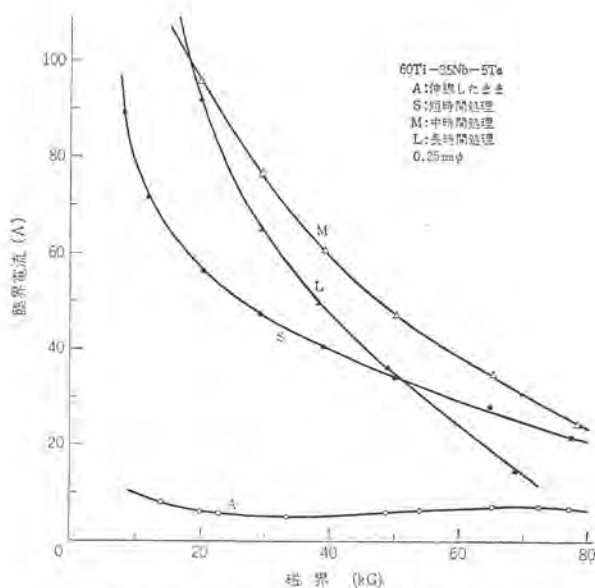


図 3.2 熱処理時間と I_c - H 特性
Effects of heat-treating time on I_c - H characteristics of 60 Ti-35 Nb-5 Ta wires.

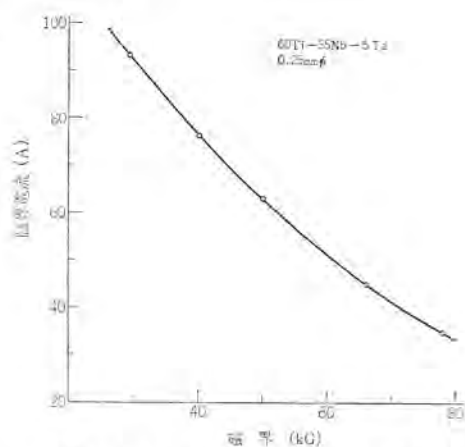


図 3.3 最適処理をした場合の I_c - H 特性
 I_c - H characteristics of 60 Ti-35 Nb-5 Ta wire treated under optimum condition.

を、かえって低下させるということになるということを示している。

析出核は最初に転位や結晶粒界に優先的に現われる。これは、溶質原子が転位や粒界のひずみエネルギーや境界エネルギーを低下させようとしてそこに集り、核が形成されるからであると考えられる。実際の試料は熱処理に先き立って、かなり強度の冷間加工を受けているため、試料には多量の転位のタングリングや結晶粒界の繊維組織が導入されているが、これらに沿って微細な α -Ti が分散して析出するものと思われる。したがって析出核の分布の初期状態を決定するのは熱処理に先き立つ加工によって導入されるこれらの格子欠陥であると考えられるので、加工過程を熱処理過程に対応して最適化しておくこともまたたいせつなことである。

析出核はさらに周囲の母相の原子を吸収して成長していくわけであるが、析出核はある程度までは大きいほど磁束線に対するポテンシャルエネルギーが大となり、ピン止め力が強くなって I_c が向上すると考えられる。これは I_c が全磁界領域にわたって向上する段階に対応

するものと思われる。核の成長がある程度進むと、一つの核が他の核を吸収して粗大化し、同時に核の数がへり核間距離が大きくなるということが考えられる。磁束線のピン止め中心としては、その大きさのある程度以上では、大きさにかかわらずピン止め力は一定の強さに止まると考えられ、またピン止め中心の間隔が広がると磁束線間隔の広い低磁界では有効であるが高磁界では有効でなくなる⁽⁵⁾。図 3.2 の長時間処理による I_c の低下は、おそらくこの過程に対応するものと考えられる。もちろん、磁束線のピン止めにあずかるものが析出粒のみでなく、転位のタングリングや粒界の繊維組織も考慮に入れなければならないことは十分に考えられる。それは熱処理をおこなっていない線引きしたままの試料の I_c が少ないながらもゼロではないことから推定される。このような転位や繊維組織は、熱処理によって消失する傾向があり、おそらく長時間の熱処理では相当量の消失が考えられ、これによる I_c の低下もあずかって大きいと思われる。

以上のように、高磁界において高い I_c を得るためには、組成・加工・熱処理温度・熱処理時間を適当に選ぶことが必要であるが、このような諸条件の最適の組み合わせを見出すことはきわめて複雑な作業になることは容易に推定がつくことと思う。われわれは、かなりの条件範囲について検討した結果、組成比に関しては H_c と同様、60 at % Ti-35 at % Nb-5 at % Ta が高磁界での I_c 特性においても最もすぐれていることを確かめた。図 3.3 はこの組成のものに現在まで知られている最適の処理を施した場合の I_c - H 特性を示したもので 80 kG で 33 A (0.25 mm ϕ) と大きい臨界電流が得られている。今後、加工や熱処理の諸条件をより厳密に検討していくことにより、さらに高い特性のものが見出される可能性が残されていると考えている。

4. む す び

当社で開発した Ti-Nb-Ta 超電導合金の高磁界特性について述べた。臨界磁界 H_c 、臨界電流 I_c とともに 60 at % Ti-35 at % Nb-5 at % Ta の組成のものが最もすぐれていることがわかった。またこの合金の臨界電流は加工や熱処理に敏感であり、処理時間が長すぎると、オーバーエイジング状態となり高磁界の I_c が低下してしまう。加工や熱処理を適当な値に選ぶことにより高磁界における I_c - H 特性をかなり向上させることが可能であることがわかった。最適処理を施した直径 0.25 mm ϕ の Ti-Nb-Ta 系超電導線（三菱超電導線）の臨界電流値は 80 kG で約 33 A という高い値を示しており、80 kG 程度までの高磁界超電導マグネット用材料としては、高価なしかも、取扱いにくい Nb₃Sn テープを使用しなくとも価格の安い合金系材料で十分であるという見通しが得られた。

参 考 文 献

- (1) 小俣, 石原, 橋本: 三菱電機技報, 41, 6, 745 (昭 42)
- (2) W. DeSorbo: Phys. Rev. 140, 3 A, A 914 (1965)
- (3) B. T. Matthias: Phys. Rev. 97, 1, 74 (1955)
- (4) B. T. Matthias, T. H. Geballe, and V. B. Compton: Rev. Mod. Phys. 35, 1, 1 (1963)
- (5) J. Sutton and C. Baker: Phys. Letters 21, 6, 601 (1966)

放電加工機の完全無人運転を可能にする 世界で初めて実用化に成功した本格的最適制御装置!

三菱ダイアックス オプティマイザー

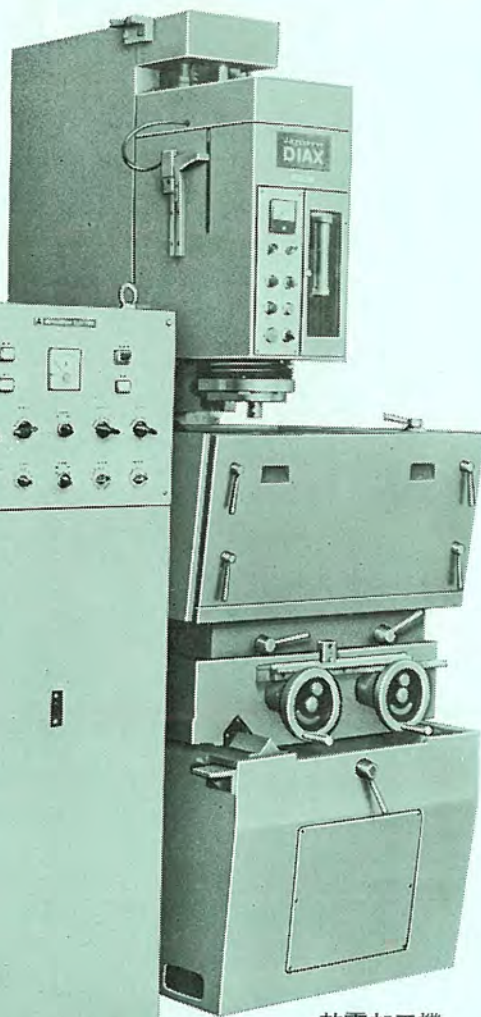
特許 世界数ヶ国に出願中



オプティマイザー
OP-1



トランジスタ電源
DE-90T



放電加工機
DM-300

- オプティマイザーによって機械は人間に代る判断制御機能を持つようになり、最適加工条件を自動的に選定します。
- 画期的発明の定常アーク前駆現象検出装置によって、放電現象の一瞬一瞬をとらえて最適動作を行っていますから、定常アークに移行することがまったくありません。
- 加工能率にオペレータの個人差がなく、誰が操作しても熟練者と同等の結果がえられます。
- アダプティブコントロール(適応制御)も、プログラムコントロールも、同時に行うことができます。
- ダイアックストランジスタ電源シリーズと組合せて使用することができます。

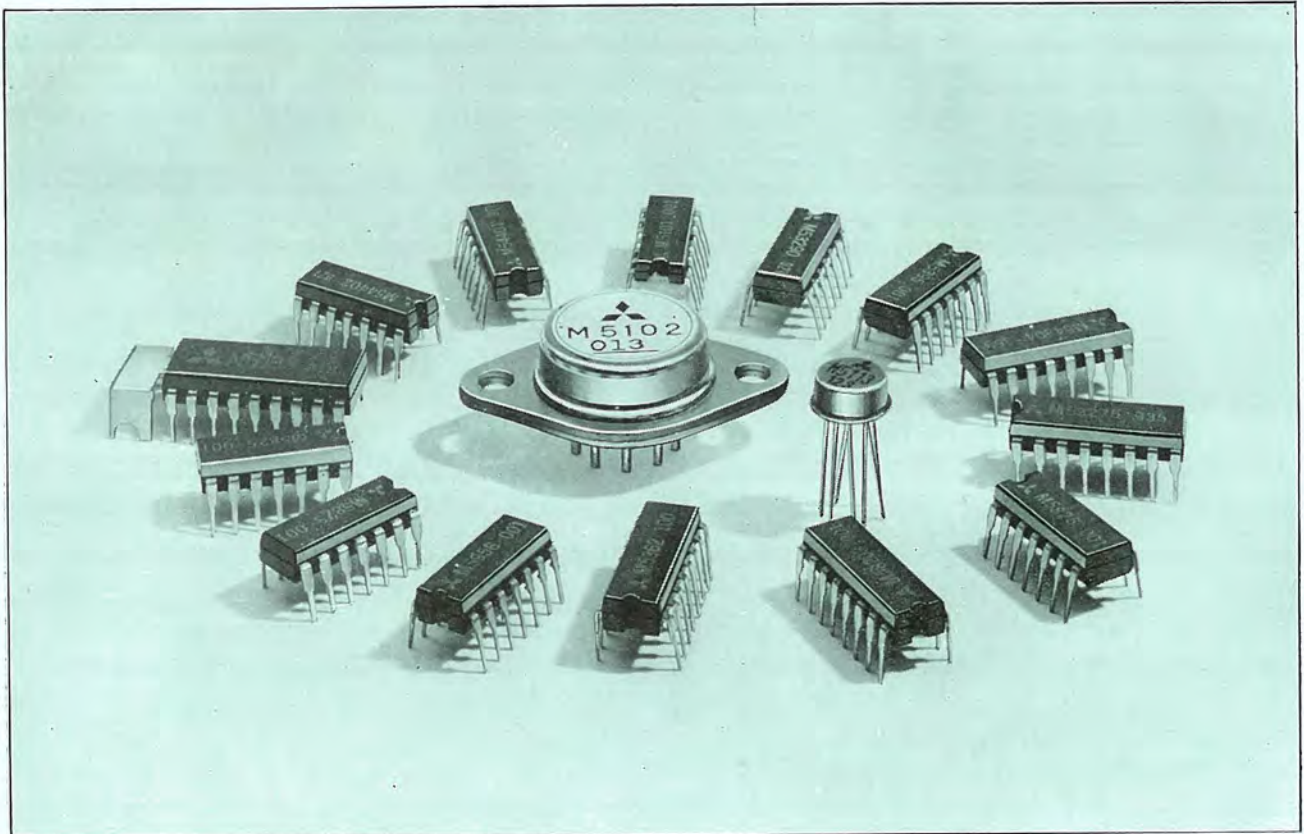
未来を開発する



お問合せは……三菱電機株式会社電機第一部
東京都千代田区丸の内2-12<三菱電機ビル>☎100東京03<218>2594

豊富なラインアップ 性能・信頼性は抜群……………

三菱モレトロン 《半導体集積回路》



電子装置の高性能化・高信頼性・経済性に対する要求は、ますます高まりつつあります。

三菱電機では、この要求にこたえるため、最新の技術と厳正な品質管理のもとに高性能・高信頼性・低価格の各種ICを生産いたしております。

現在、ディジタル回路およびリニヤ回路など6ファミリー計53品種の標準品がそろっており、あらゆるシステムに最適なICを選択することが可能で、IC化のメリットを十分に発揮することができます。

ファミリー

●TTL M5300Pシリーズ

M5304P	M5310P	M5320P	M5325P	M5330P
M5340P	M5352P	M5362P	M5372P	M5373P
M5374P	M5375P	M5376P	M5391P	M5393P
M5395P				

●TTL M53200Pシリーズ

M53275P M53290P

●MSI M54000Pシリーズ

M54304P M54401P M54402P

●MOS M5800Pシリーズ

M5803P M5823P M5825P M5826P

●DTL M5930Pシリーズ

M5930P	M5932P	M5933P	M5935P	M5936P
M5937P	M5944P	M5945P	M5946P	M5948P
M5949P	M5952P	M5953P	M5955P	M5956P
M5961P	M5962P	M5963P		

●リニヤ回路シリーズ

M5101P	M5102Y	M5103P	M5104P	M5105P
M5113P	M5113T	M5116P	M5133P	M5134P

未来を開発する



お問合せは…三菱電機株式会社電子部品部／東京都千代田区丸の内2-12〈三菱電機ビル〉☎100 東京03〈218〉2111大代表

MELCOM-3100 ディスクオペレーティングシステム (2)

—データ管理—

三井大三郎*・魚田 勝臣*・広沢 嘉教*・新田 俊晴*

MELCOM-3100 Disk Operating System (Part 2)

—Data Management—

Kamakura Works Daisaburo MITSUI・Katsuomi UOTA
Yoshinori HIROSAWA・Toshiharu NITTA

Much study has been made recently on the management information system (MIS). Information centralizing is taken up as one of the main subjects of the matter.

To realize centralization of data will be performed by the application programs of the users', and at the same time by the various functions of the operating systems including data management.

Described in this article are the distinctive features of data management of the MARK-III operating system designed aiming at the point which forms a part of MIS, laying stress on the description of the disk equipment.

1. ま え が き

データ処理の形態は、ディスクやデータセルのような大容量のランダムアクセスメモリーの出現によって変貌をきたしつつある。すなわち、従来のような磁気テープを記憶媒体とする単一目的のシーケンシャルアクセスファイルを中心としたものから、ディスクなどを利用した多目的のランダムアクセスファイルを中心とする処理方式に移行している。また最近の経営情報システム(MIS)に関する研究をみても、その中心的課題として情報の集中化がとりあげられている。MISのめざす情報の集中化は、中央の計算機の管理下にあるあらゆるデータを集中することであり、一部には大形計算機を使ってかなり大規模に実施された報告もあるが、一般的には先に述べたような多目的ファイルをつくり、限定された集中化を徐々に進めている段階といえる。このような進め方は、処理すべきデータを発生しあるいは処理されたデータを使用する現場を含めた関係部門全体の急激な変革が困難なことは、現在の計算機技術の水準から考えて当然のことと思われる。限定された情報の集中化は、大形計算機によらずとも実現でき、相応の効果が得られるので各所で試みられている。

以上のようなデータ管理方式を実現するのは、いうまでもなくユーザの応用プログラムであるが、これの具体化のためにはデータ管理を中心とするオペレーティングシステムの諸機能によらなければならない。MELCOM-3100 MARK-III オペレーティングシステムのデータ管理は、以上に述べたようなすう勢を考え、データの集中管理の実現を主要目標として設計した。この論文ではディスクを中心にしてデータ管理の特長点を記述する。なお MARK-III 全体およびその基本システムである FOS については、前編、MELCOM-3100 ディスクオペレーティングシステム(1) —FOS (モデル 40 用基本システム)—に報告したので参照されたい。

2. データ管理の概念

処理プログラムを実行してゆく過程で、主メモリと入出力装置との間でデータを授受することが必要である。このような操作は、従来

から処理プログラムとは独立した IOCS (Input Output Control System) と呼ばれるシステムによって、統一的に行なわれてきた。IOCS はさらに、入出力装置を実際にコントロールするフィジカル IOCS と、ファイルを論理的に取扱うロジカル IOCS とに分けられているのが普通である。MARK-III では前者をスーパーバイザの機能として実現しており、後者をデータ管理と呼ぶコントロールプログラムによって実現している。

MELCOM-3100 のような中以下の規模の計算機のデータ管理システムでは、大規模計算機におけるようなデータの高度な管理機構をめざすことよりも、むしろ使いやすさと、処理速度および所要メモリーの面での能率化を追求することのほうが重要である。MARK-III のデータ管理では、これを実現するためにデータファイルの構造とその管理方法に各種のくふうを採り入れた。3～5章ではディスクファイルを中心にしてこれらの方式を記述する。

3. ディスクボリュームの構造とラベル

磁気テープリールやディスクパックのような外部記憶媒体の構成単位をボリュームと呼んでいる。MARK-III でとり扱うディスクボリュームはすべて図 3.1 に示すような構造になっている。この図からわかるように一つのボリュームには普通複数個のファイルが格納される。これらのファイルを管理するためのファイルラベルは1個所に集められ、ボリューム上の特定の領域に収められる。ファイルラベルはファイル名、ファイルの構造や識別に関する情報のほかに、ディスク上での領域の始点と終点の位置も含んでいて、ボリューム上のすべてのファイルの住所録になっている。このためファイルラベルの集まりを DOF (ディレクトリオブファイル) と呼んでいる。DOF の前にはボリューム固有の番号(ボリューム番号)や、DOF に関する情報を入れたボリュームラベルが置かれており、これによってボリュームの検証と DOF の管理が行なわれる。

ディスクファイルを呼び出すときには、必ず入出力装置の論理機器(入出力装置の呼び名に相当するもの)のほかに、ボリューム番号とファイル名を指定する。管理プログラムではこれらの情報をもとにして、図 3.2 に示したような経路でディスクファイルの管理を行なうことに

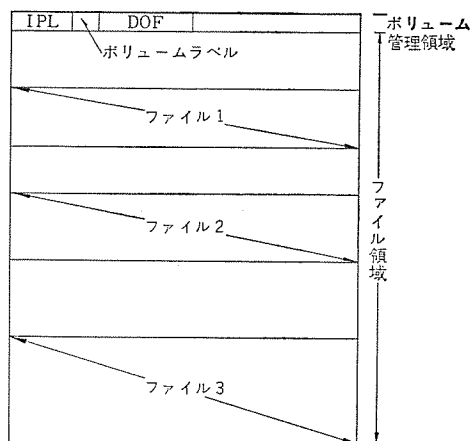


図 3.1 ディスク ボリューム の構造
Structure of disk volume

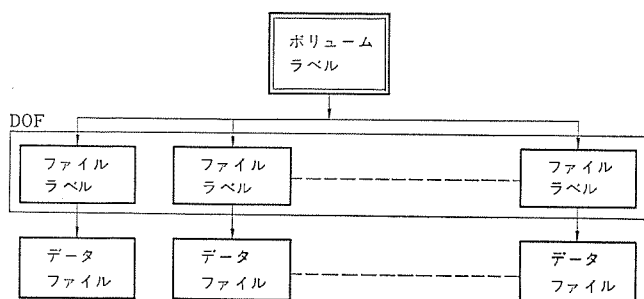


図 3.2 データ ファイル への経路
Data file identification.

よって、ボリュームのつけ間違いや領域やファイルの重複指定を防止し、ファイルが不用意に破壊されないように保護している。

DOF にはファイルの領域管理のほかに使用者の便宜を考えた重要な役割がある。つぎにこれを示す。

DOF の各エントリには、ファイルが生成されるときにファイルの構造に関するデータが格納されるが、これらのデータのうちのレコード長、ブロック率、キー項目の位置などのようにファイルに固有で以後の処理で不変のデータがある。従来のデータ管理方式ではこのような項目に対しても、処理ごとに同じことをプログラムでくり返して指定しなければならなかった。MARK-III のデータ管理では、生成後の読みとりや更新処理には DOF に格納されているデータを使うので、プログラムの中で同じことを何度もくり返して宣言する手間が省け間違いが少なくなるばかりでなく、ファイルの構造が変わった場合に変更しなければならないプログラムの本数や変更量も少なくて済むので非常に便利である。

4. データ ファイルの構造とマクロ命令

MARK-III ではデータファイルとしてつぎの5種を取り扱うことができる。

- カード ファイル
- 磁気 テープ ファイル
- プリンタ ファイル
- 紙 テープ ファイル
- ディスク ファイル

前の4種のファイルは、シーケンシャルアクセス装置を取り扱うものであるからシーケンシャルファイルである。これらは DSF (Define Sequential access File) というファイル定義マクロ命令によって定義される。

ディスクファイルはランダムアクセス装置を取り扱うものであるから、ファイルの構造もシーケンシャルに限定されない。MARK-III ではつぎの3種のファイル構造がある。

- シーケンシャル ファイル
- ダイレクト ファイル
- インデックス付き シーケンシャル ファイル

これらのファイルは、いずれも DRF (Define Random access File) というファイル定義マクロ命令によって定義される。

ファイル定義マクロ命令で指定するファイル名、レコード長、ブロック長などのオペランドの指定形式はすべてのファイルに統一されている。DSF の場合はシーケンシャルファイルであるから各ファイルとも基本部分はまったく同じで、入出力装置による特殊な指定（たとえば紙テープのコード変換テーブルの名前の指定）のみが、適当に付加される形になっている。DSF の場合のファイルの区別は、入出力装置で行なわれ“DEVICE”というオペランドで指定される。

ダイレクトファイルの場合も、ファイル名やレコード長のようなファイルの基本的な構造に関して指定しなければならない項目は、シーケンシャルファイルと変わらないから、DRF の基本部分は DSF とまったく同じ指定方法をとっている。したがって、ディスクのシーケンシャルファイルの場合の DRF は DSF とほとんど同じである。しかしダイレクトファイルやインデックス付きシーケンシャルファイル（以下 I-S ファイルと略記する）では、キーやインデックスなどの指定が数多く付加されることになる。DRF の場合のファイル構造の区別は、“FSTRC” (File Structure) というオペランドで行なわれる。

以上に述べたような DSF や DRF におけるオペランドの書式上の統一化は、単に使用者に便利であるばかりでなく、それを処理するシステム要素が標準化されるので単純なプログラムで実現できるという利点ももっている。

4.1 データ ファイルの構造

4.1.1 シーケンシャル ファイル

レコードは処理の順番に並べられる。ディスク以外の入出力装置のファイル構造はこの形のファイルのみである。ディスクの場合も、レコードがディスク上のアドレスの小さいほうから大きいほうへ順番に並べられるだけで、磁気テープなどのシーケンシャルファイルと構造のうえでは変わるところがない。しかし、他のファイルと違ってレコードの更新や削除が行なえるから、ファイルメンテナンスのような処理は新しいファイルを改めて作るのではなく、もとのファイルのレコードを更新することによって行なうことができる。

4.1.2 ダイレクト ファイル

このファイルはきわめて融通性に富んだファイルであり、他のどのファイル構造よりもディスクの特長であるランダムアクセス機能を生かした効率のよい使い方ができる。その反面問題の解析やキーの変換など使用者の負担が大きいファイルである。

図 4.1 にダイレクトファイルの構造の原理を示す。

ファイルに与えられたディスク領域の先頭位置から、指定されたレコード長にもとづいてレコードを仮想し、先頭レコードから順に 1, 2, 3, ……という番号（これをレコード番号という）を対応させる。レコード番号が与えられると始点とレコード長とをもとにして、レコード位置を示すディスク上の番地が一意にきまる。したがって使用者はレコードの番号を与えることによって、ファイル上のどのレコードでも直接アクセスすることができる。このファイル構造は数字のコードをキーとするようなファイルでは、キーをそのままレコード番号に使うファイル

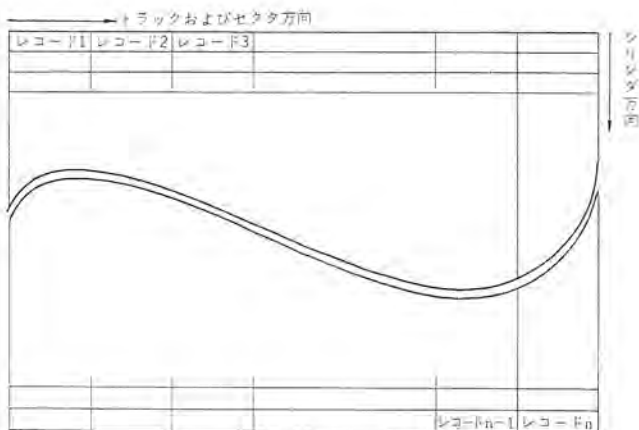


図 4.1 ダイレクトファイルの構造
Structure of direct file.

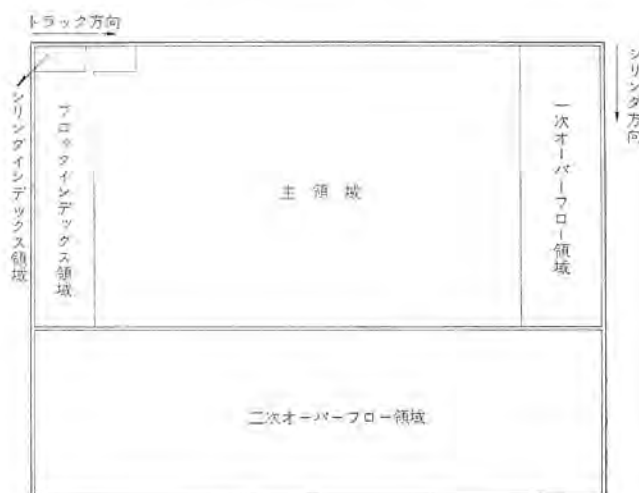


図 4.2 I-S ファイルの構造
Structure of indexed sequential (I-S) file.

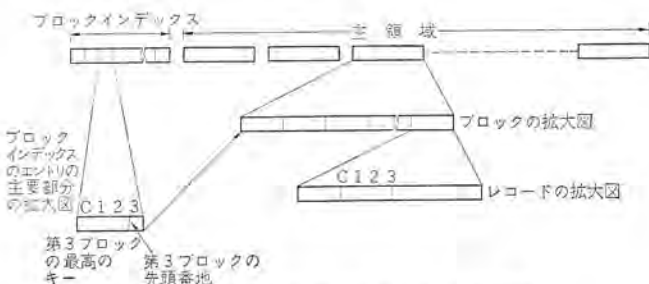


図 4.3 ブロックインデックスとレコードの関係
Relations between block index and data record.

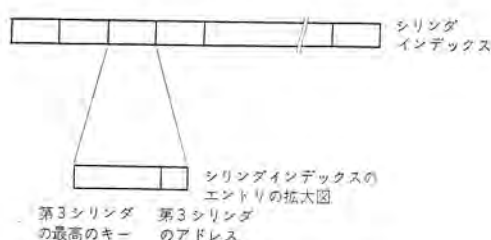


図 4.4 シリンダインデックスの構造
Structure of cylinder index.

構成することによってきわめて高能率にランダムアクセス処理ができる。しかしコードの冗長度が高い場合（たとえば6けたのコードを使っているが実際には2,000レコードしかないといったような場合）には、ディスクスペースの使用効率を低下させるので、一般にはコードをランダム化する作業と、ランダム化によって同一番号に変換されるレコードの処理（いわゆるシノニム—Synonym—の処理）が必要になる。これらはコード体系に適した方法をとらなければ、処理効率をかえって低下させるので使用者が自分で方式を確立するようになっている。

現在よく使われているランダムファイルの方式の多くはここで述べたレコード番号ではなく、レコードのディスクアドレスを直接指定させている。このような方式では使用者はコードをランダム数に変換したうえにさらにディスクアドレスに変換する操作が必要になる。MARK-IIIの場合には、このアドレス変換をシステムで行なうことによってプログラム上の負担を軽減している。

4.1.3 インデックス付きシーケンシャルファイル

このファイルは統一的なランダムアクセス方式を提供するとともに、シーケンシャルファイルの欠点を補うように工夫されたファイルである。したがってレコードをシーケンシャル、ランダム両方のアクセス方式で処理したい場合はもちろんのこと、シーケンシャルにしか処理しない場合でも、レコードの追加のような操作を行なうときに広く使われる編成方法である。この方式ではやっかいな処理は、すべてデータ管理システムがかぶるので非常に気軽に使えることも大きな特長である。

I-Sファイルの構造を概念的にとらえると図4.2のようになる。ファイルを生成するときには、キーによってソートされたレコードを主領域に書き込んでゆくと同時に二つのインデックスがつくられる。一つはシリンダインデックスといいファイル全体に対して1個設けられる。もう一つはブロックインデックスといい各シリンダごとに1個宛設けられる。

ブロックインデックスは、図4.3に示したように対応するシリンダに格納されている各ブロックの最高キー（ブロックの最後のレコードのキー）と、そのブロックのセクタ位置とをエントリとするインデックスである。

シリンダインデックスは、各ブロックインデックスの最高キー（ブロックインデックスの最後のキー）と、ブロックインデックスのシリンダ番号とをエントリとするインデックスで図4.4に示すような構造になっている。

I-Sファイルを生成したときには主領域にレコードが入れられ、二つのインデックスが作られるのみである。オーバーフロー領域は、生成されたファイルの以後の処理でレコードが追加されるときに使われる。追加レコードに対するインデックス領域、主領域およびオーバーフロー領域の結合は、すべてデータチェーンによって行なわれる。このためブロックインデックス領域には図4.3に示した情報のほかチェーンに関する情報も含まれる。

追加によって主領域からはみ出したレコードは、まず一次オーバーフロー領域に入れられ主領域データとポインタによってつながれる。多くのレコードが一次オーバーフロー領域にはいつてもここがいっぱいになると、二次オーバーフロー領域に収められポインタによってつながれる。一次オーバーフロー領域が各シリンダに専属であるのに対して、二次オーバーフロー領域は全シリンダに共通である。オーバーフロー領域がこのように2重構造になっているのは、処理速度とディスクスペースの効率化のためである。すなわち一次オーバーフロー領域は主領域と同一のシリンダにあるから、アクセスアームを移動させずに読むことができアクセスが速い。しかし、レコードの追加はシリンダごとに不均衡に起こるから、ディスクスペースの利用効率は悪くなることが考えられる。このため一次オーバーフロー領域を少なくとも二つおいて、それからはみ出るレコード

のための二次オーバーフロー領域を設けることによってスペースの効率低下を軽減している。

以上に述べた I-S ファイルの編成方式のうち、ブロックインデックスは MARK-III のデータ管理独特のものである。この方式は、大形計算機におけるようなキーサーチの機能をもたないセクタ方式のディスク装置に適した方法である。

4.2 処理マクロ命令

4.2.1 ファイル定義表 (FDT)

データ管理システムがプログラムと入出力機器との間でデータを受け渡しするときに使う各種の情報は、ファイル定義表(以下 FDT と略記する)と呼ばれる表の中にまとめておかれる。この表はプログラムの中で指定した DSF や DRF ごとに、つまりファイルごとに設けられる。FDT の情報源はつぎの3者である。

(1) プログラムで指定された DSF や DRF

(2) 実行時に指定されたジョブコントロールステートメント DFILE (ファイル定義) および DAREA (ディスク領域の定義)

(3) ボリュームに格納されている DOF

これらの情報源は OPEN マクロ (ファイルを開く命令) によってまとめられ、GET や PUT などのレコードを実際にとり扱うマクロ命令に引き継がれる。

4.2.2 ディスク関係のおもな処理マクロ命令

ここではファイルを実際にとり扱う処理マクロのうちのディスク関係のおもな命令を概説する。

(1) OPEN

プログラムとファイルを結びつけファイル処理する準備をする。すなわち DRF によって確保され可能な項目が書き込まれていた FDT に、ジョブコントロールステートメントで与えられた情報と、DOF から得た情報とを組み合わせる FDT を完成させる。この過程は 5 章で詳述する。

(2) CLOSE

ファイル処理の過程でつくられたレコード数などの情報を DOF に書き込み、しめくり処理を行なったうえでファイルをプログラムから切り離す。

(3) GET

連続した次のレコードを使用可能な状態にしてプログラムにわたす。GET は入力命令であるが、バッファ領域を利用している場合には必ずしも入力動作を伴わない。また I-S ファイルの場合には、次のレコードが主領域にない場合はデータのチェーンをたどってオーバーフロー領

域のレコードが読みとられる。

(4) PUT

レコードがプログラムと切り離される。PUT は出力命令であるから、ブロック化を行っていない場合は切り離されたレコードは直接出力装置に書き出される。しかしブロック化を行なっている場合には必ずしも出力動作を伴わない。I-S ファイルの生成のときには PUT によってインデックスが作られる。

なお GET や PUT のようなシーケンシャル処理では、入出力バッファを2個設けて入出力動作をシステム内で多重化させている。

(5) SETL

I-S ファイルでシーケンシャルにレコードを処理するときの出発点を定める。位置ぎめはインデックスによって行なわれるので、GET を使ってレコードを読みとばしてゆく方法に比べてはるかに能率的である。そのためこの命令はファイルのまとまった部分をシーケンシャルに処理するのに使われる。

(6) ESETL

SETL で位置ぎめして行なったシーケンシャル処理を終わらせる。

(7) READ

この命令はレコードに対するキーをキー領域に入れてから出されるランダムアクセスのための命令である。

ダイレクトファイルの場合には、与えられたキー(レコード番号)をディスクアドレスに変換し該当するレコードをプログラムに送る。

I-S ファイルの場合には、キーをもとにしてシリンドリカルインデックス、ブロックインデックスを探索して該当するレコードをみつけプログラムに送る。レコードが主領域にない場合には、データチェーンをたどってオーバーフロー領域を探索する。

(8) WRITE

READ と同様なランダムアクセスのための命令である。レコード位置の探索は READ と同じようにして行なわれる。WRITE 命令に先行して READ 命令がおかれており、かつキーの内容が不変であれば、READ で求められたレコード位置に書き込みが行なわれる。

(9) CHECK

READ や WRITE で出された入出力動作が終了するのを待ち動作の確認を行なう。READ や WRITE はランダムアクセス命令であるから、シーケンシャルアクセスの場合のように、二つのバッファを設けた画一的な入出力同時動作は行なえないので、READ や WRITE 命令を出したあと、CHECK がくるまでの間を並行処理するようにしている。

表 4.1 処理マクロ命令一覧

List of process macro instructions.

マクロ命令	FSTRC FTYPE	シーケンシャル ファイル					I-S フ ィ ル										ダイレクトファイル			
		OUT-PUT	IN-PUT	UP-DATE	EX-TEND	CM-BND	OUT-PUT	INPUT		UPDATE		ADD	EX-TEND	ADD-UPD	CMBND	OUT-PUT	IN-PUT	UP-DATE	CM-BND	
								Seq	Ran	Seq	Ran					Seq	Ran			
OPEN	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
READ						×	×	○	×	○	×	×	○	×	○	×	○	○	○	
WRITE						×	×	×	×	○	○	×	○	×	○	○	×	○	○	
CHECK						×	×	○	×	○	○	×	○	×	○	○	○	○	○	
SETL						×	○	×	○	×	×	×	×	○	×					
GET	×	○	○	×	○	×	○	×	○	×	×	×	×	○	×					
PUT	○	×	○	○	○	○	×	×	○	×	×	○	×	○	×					
ESETL						×	○	×	○	×	×	×	×	○	×					
CLOSE	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	

ディスクファイルでは、以上のほかに13種の処理マクロ命令があるがこれらについては省略する。表4.1に各ファイル編成で用いられる処理マクロ命令の一覧表を示した。表の中の○印で示した命令は使用できる命令、×印で示した命令は使用できない命令、空白はそのファイル編成にはない命令をそれぞれ示している。

5. ディスクの領域管理

5.1 データファイルの領域管理

4章に示したようにディスクの領域管理は、ボリュームやファイルのラベルをもとにしてソフトウェアによって行なわれる。ファイルの所在やラベルに関する情報をプログラムで指定することになると、使用するボリュームや領域が変わるたびにプログラムを修正翻訳しなければならない。これをさけるために、このような情報は実行時にジョブコントロールステートメントによって行なうことにした。図5.1に沿ってこの方式を説明する。

(1) プログラムの実行に先立ってジョブコントローラが、そのプログラムに対するジョブコントロールステートメントを読みとる。プログラムの中でディスクファイルが使われていると、その領域やラベルを指定するコントロールステートメント(DFILEおよびDAREA)が各ディスクファイルごとに与えられている。ジョブコントローラはこのステートメントを読みとり検定したうえで、システム管理領域(システム定住ファイルの領域)に保存する(図の①)。

(2) プログラムが実行されOPEN命令にくると、データ管理のOPEN機能が呼び出される。このルーチンではまずそのファイルに対するFDTをもとにして、いま開こうとしているファイル名を知り(②)、システム管理領域にあるそのファイルに対応するDFILE、DAREAの情報を参照する(③)。

(3) DFILE、DAREAの情報から、該当するディスクボリュームが装着されているディスク装置を知り、ボリューム番号を確認する(④)。

(4-1) 入力ファイルの場合には、いま読んだボリュームのDOFを探索しファイルに該当するDOFエントリをみつけて、その中からあとの処理に必要な情報(レコード長、ブロック長など)をFDTに移す(⑤)。このときDFILE、DAREAで与えられた情報も移しておく(⑥)。

(4-2) 出力ファイルの場合には、該当ボリュームのDOF全体を走査して、DAREAによって指定された領域が他のファイル領域と重複していないことや、同一のファイル名がないことなどを確認(⑦)。また、DFILE、DAREAの情報をFDTに移す(⑧)。また以後の処理マクロ命令で使う各種の定数を計算してFDTにセットし、これらの情報をもとにしてDOFエントリをつくりディスクに書き込む(⑨)。

ディスクのOPEN命令は、以上のようにかなり複雑なことを行なうのでそのルーチンも大きくなり、これをプログラムと同居させるとユーザの使用できるコア領域をかなり減少させることになるので、MARK-IIIでは、CLOSE等とともに一時領域ルーチン(トランジェントルーチン)としている。このルーチンはディスク上におかれ、プログラムで必要になったときにコアの一時領域に読みとられるので、処理時間は多少長くなるが実行回数が少ないから、処理全体からみれば時間の増加の割合はわずかで、主メモリを大幅な節約によって得られる利益のほうがはるかに大きい。

5.2 スクラッチ領域の管理

翻訳プログラムや結合、編集プログラムは一般に処理の過程で外部記憶を必要とする。またユーザ用処理プログラムでも再運転のための情報をたくわえておく外部記憶を必要とすることがある。ディスクオペレーティングシステムでは、これらの記憶媒体にはディスクが利用されるのが普通である。これらのファイルは、きわめてひん繁に使われるので定形化された標準の使い方を準備し、その用法で使用するかぎりオペレータが何も指定しなくてもすむようにするのが望ましい。標準の用法というのは、普通のプログラムの処理に便利で能率的であるように考えられたディスク領域の割り付けのことであるから、特別大きなプログラムが与えられたような場合には、処理できない可能性もでてくる。このようなときのために実行時に何らかの方法でスクラッチ領域を割り付けることができるようにしておかなければならない。

MARK-IIIではスクラッチ領域(表5.1に示す)に対するディスクファイルの機番や領域は、次の2とおりの方法でジョブコントローラが管理することによって以上の二つの条件を満足させている。

(1) 標準割り付け: 自動的に必要最小限のシステムディスク領域を確保する。

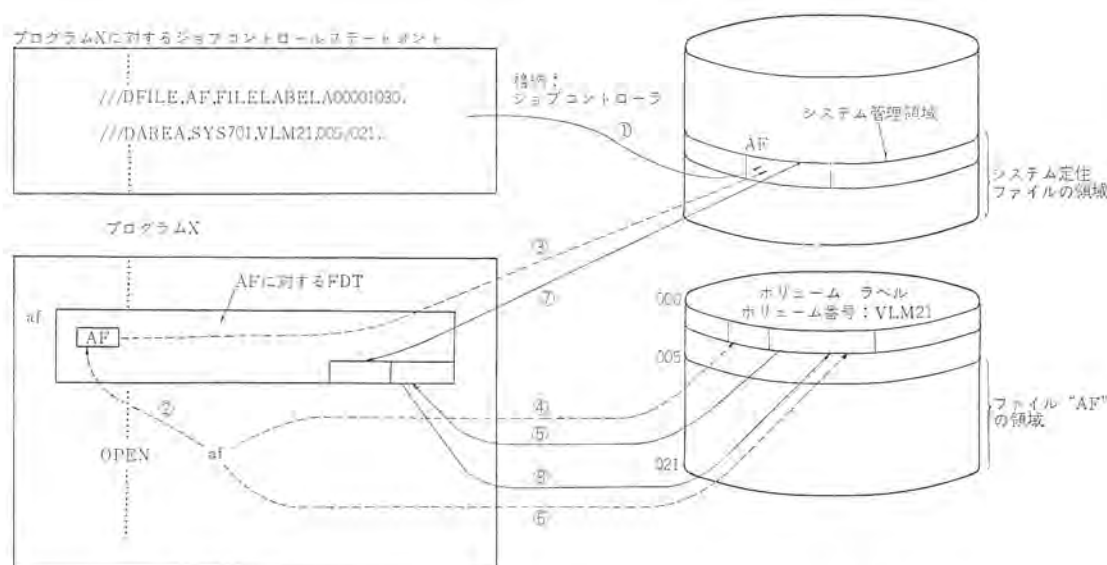


図 5.1 データファイルの領域管理

Area management scheme of data file.

表 5.1 スクラッチ ファイル Scratch file.

作 業 内 容	フ ァ イ ル 名
翻 訳, 編 集, 登 録	@ SYSSC 1
	@ SYSSC 2
	@ SYSSC 3
チェック ポイント/再始動	@ SYSCUD

(2) 任意割り付け: ジョブコントロール 言語によって システム ディスク 領域を任意に確保する。

前者は, 標準の機番や領域と同一の割り付けでシステムディスク領域が使用されるときであって, すべてシステムが自動的に準備するため, ユーザはいつさいシステムディスク領域について関知する 必要はない。後者は, 標準以外の割り付けでシステムディスク領域を使用する場合で, ユーザはジョブコントロール ステートメント

///SYSAREA

によって領域を割り付けることができる。

標準割り付けは, システム生成時に設定するようになっているから ユーザは自己の使用条件に適した用法を標準とすることができる。標準割り付けに関する情報は システム 管理領域にたくわえられる。

6. む す び

MELCOM-3100 システムシリーズの ディスク オペレーティングシステム に関する報告の第2編としてデータ管理について記述した。ここで述べたデータ管理は MIS を指向した情報の集中化を具体化する手段を提供する目的で設計されたものであるが, それはまた シーケンシャル アク

セス メモリから ランダム アクセス メモリ を利用する処理方式への移行を十分 考慮に入れたものであることはいうまでもない。

(昭和 44-7-10 受付)

参 考 文 献

- (1) 嶋村, 首藤, 藤井, 中山: MELCOM-3100 ソフトウェア(1) ——モデル 10 T プログラム の概要——, 三菱電機技報, 41, No. 4 (昭 42)
- (2) 首藤, 岡本, 武田, 三光: MELCOM-3100 ソフトウェア(2) ——モデル 30 T オペレーティングシステム の概要——, 三菱電機技報, 41, No. 10 (昭 42)
- (3) 首藤, 中山, 東海林: MELCOM-3100 ソフトウェア(3) ——モデル 30 T における プログラム の処理——, 三菱電機技報, 42, No. 3 (昭 43)
- (4) 首藤, 野田, 石川, 長田: MELCOM-3100 ソフトウェア(4) ——10 PT システム の概要——, 三菱電機技報, 42, No. 4 (昭 43)
- (5) 国分, 有坂, 首藤, 魚田: MELCOM-3100 ソフトウェア(5) ——ACE コンパイラ システム の概要——, 三菱電機技報, 42, No. 10 (昭 43)
- (6) 三井, 魚田, 武田, 峰崎: MELCOM-3100 ディスク オペレーティングシステム(1) ——FOS (モデル 40 用基本 システム)——, 三菱電機技報, 43, No. 11 (昭 44)

電鍍電極による放電加工

加 藤 強*・片 寄 文 隆*

Electric-Discharge Machining With Electroformed Copper Electrodes

Nagoya Works Tsuyoshi KATO・Fumitaka KATAYOSE

When the electric-discharge machining is applied to the making of dies, how to manufacture the electrode with good dimensional accuracy and without difficulty poses a great technical problem.

For its solution, Mitsubishi has investigated the electric-discharge machining by the use of electroformed copper electrodes and achieved a very successful result. Then, herein are described a manufacturing method of the electroformed copper electrodes to be used for discharge machining and also the very machining with this electrode. Mention is also made on practical examples involving drawing dies, shell mold dies, rubber mold dies and divided discharge machining through a multi-power circuit system using divided electroformed copper electrodes for reference to those who will take up these processes

1. ま え が き

従来の電鍍技術の応用分野は、レコードの音胎盤や美術工芸品の複製など、ニッケル電鍍が主体であった。しかし、ここ数年来、電鍍母型材料、および電鍍技術の進歩により応用分野が非常に広がってきた。とくに従来はあまりかえりみられなかった銅電鍍法を、放電加工用電極の製作技術として用いることが可能になったことは、銅電鍍の用途開発として特筆すべきものである。

銅電鍍品を放電加工用電極に応用しようとする試みは、以前からなされてはいたが、当時の放電加工機では電極消耗が多くあまり実用にはならなかったが、ここ数年前に電極がほとんど消耗しない放電加工用のトランジスタ電源やサイリスタ電源の開発により、一躍銅電鍍電極がクローズアップされ、各方面で応用されるようになったのである。

この論文では、放電加工用電鍍電極の製法、およびそれを電極として使用する場合の問題点とその解決策、放電加工応用例について述べる。

2. 電鍍電極製法と他の電極製法との差異

放電加工用電極の種類を大別すれば、抜き型加工用電極と底付型加工用電極の2種類に分類できる。しかし、底付型の場合には自由曲面となるため電極製作に苦心する場合が多い。このため表2.1に示すような各種電極製法が提案されている。

鍛造法や放電成形法等の塑性加工による電極製法では、モデルとしてかならず金型が必要であり、短時間に同形状の電極を多く必要とする場合には適するが電極の多種少量生産には不向きである。初めて金型をおこそうとする場合、従来は機械切削法による電極製作がおこなわれてきた。しかし微細模様とか絞り型を製作しようとする場合、電極を切削加工して放電加工するよりも直接金型を切削加工する従来の方法が工業的に有利な場合もあった。これは電極を製作する間に直接金型を切削加工することが可能であるからである。これでは省力生産にもっとも適するといわれている放電加工機を使用しようとする意味がまったく無になってしまう。放電加工機をもっとも有利に使用するためには、いかにして容易に電極を省力生産するかということになる。この問題に対して、われわれは銅電鍍法

表 2.1 底付型放電加工用電極の製法の分類
Classification of methods in producing electric-discharge-machining electrode.

製法による電極の分類	製 作 法	長 所	欠 点
削出し電極	機 械 切 削 法	1. グラファイト電極の製法に最適 2. 多種少量生産に適	1. グラファイトの場合には(1)切粉の飛散(2)もろいので微細模様を有する電極の製作困難
鍛造電極	熱 間 鍛 造 法 冷 間 鍛 造 法 (コイニング)	1. 同種電極の多量生産に適 2. 短時間で製作可能	1. モデルとしての金型が絶対必要 2. スケールの付着とか熱による縮みを生ずる 3. 鍛造プレスが必要
薄板の塑性加工電極	プレス加工法 液中放電成形法 電磁成形法 液圧成形法 爆発成形法	1. 同種電極の多量生産に適 2. 短時間で製作可能	1. モデルとして金型が絶対必要 2. スプリングバックを生ずる 3. 塑性加工(絞り)に限界あり 4. 電極の補強が必要 5. 繰返し精度が粗
電鍍電極	銅 電 鍍 法	本文 3.2 節参照	本文 3.2 節参照
鋳造電極	精 密 鋳 造 法	1. 同種電極の多量生産に適	1. 冷却途中に収縮を生じる 2. 鋳巣がでやすい 3. 表面に酸化物が付着する
溶射電極	金 属 溶 射 法	1. モデルに石膏などの使用可能 2. 同種電極の多量生産に適	1. 電極消耗が大きい 2. 熱ひずみを生じやすい

による電極製法を紹介するものである。

3. 放電加工用銅電鍍電極

3.1 製法

図3.1に放電加工用銅電鍍電極製法のフローチャートを示す。マスターモデルは電鍍母型の原型となるものであり、一般に永久保存される場合が多いのでネガティブモデルを作り、これよりさらに電鍍母型を反転製作する場合が多い。電鍍母型用材料には不良導体で工作の容易なエポキシ樹脂や石膏が用いられる。場合によっては木型やシリコンゴム等を用いることもある。

電鍍母型は上述のように不良導体であるため、その表面を導電化

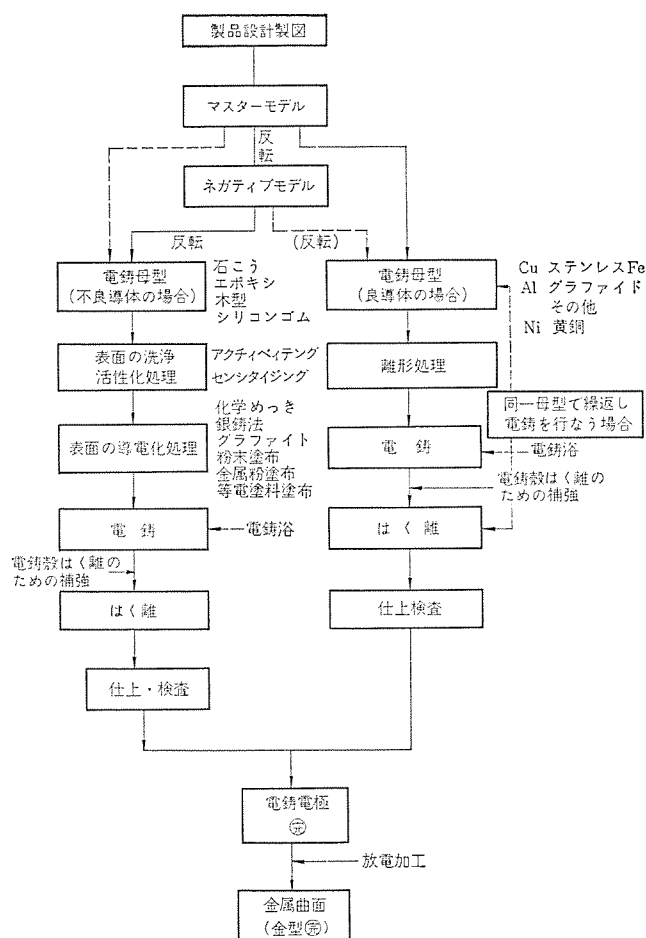


図 3.1 放電加工用銅電铸電極の製作工程
Producing process of the electroformed copper electrode for electric-discharge-machining.

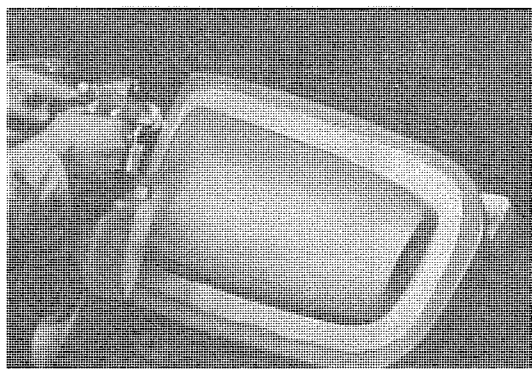


図 3.2 スプレーによる銀鏡法
Spray silvering.

処理する必要がある。通常は銀鏡法によって導電化処理を行なう。場合によっては、グラファイト粉末、または導電塗料の塗布によることもある。図 3.2 は、自動車ボディ絞り形「フロントフェンダーローイングダイ」の電铸母型表面（材質はエポキシ樹脂）をスプレーによる銀鏡法によって導電化処理を行なっている状況を示す。

導電化処理の終了したものは直ちに電铸浴に入そう（槽）し、通電することによって銅電铸層が得られる。0.5～3 mm 程度の厚さが得られたところで電铸浴より引き上げ、これをはく離し、電铸母型表面に接していた電铸面を放電加工用電極として使用するものである。しかし、この状態では強度的に弱いので、電铸層を補強する目的でエポキシ樹脂や低融点合金を流し込んだり、または金属溶射等によって、バックアップ（補強）を行なうことが必要である。

なお、鉄のような良導体を電铸母型とした場合には電铸層の密着強度が非常に強く、不良導体を電铸母型にした場合に比べて電铸層のはく離を非常に困難にするので、離型を容易にするような処理を行ってから電铸を行なうことが必要である。

3.2 電铸法の特長

ここでは放電加工用電極製作技術としてみた場合の銅電铸電極の特長について記述する。

長 所

- (1) 非常に純度の高い銅電極が製作できる。
- (2) 電铸モデルに対して非常に写実性が良く、他のいかなる塑性加工電極製作法に比べても精度の高い放電加工用電極を容易に製作可能である。
- (3) 従来の切削による電極製作法に比べ、電極材のむだが非常に少ない。
- (4) 電铸モデルには工作の容易な木型やプラスチック、石膏、シリコンゴム等の安価なものの使用ができ、金型を必要としない。
- (5) 電铸工程の段取りを正しくしておけば、ほとんど無人で放電加工用電極を製作することができる。
- (6) 大きさに制限がないので、電铸その大きさが十分であればどんなものでも製作可能である。
- (7) 一つの電铸そうで一度にかなり多くの電極製作が可能であり、経済的である。

電铸法による電極製作法には以上のように多くの長所がある。しかしその反面、今後の研究をまたねばならない点もある。

すなわち

- (1) 電铸モデルにおけるおうとつ（凹凸）の差の大きい場合、均一な厚さの電铸層を得ることが困難である。
 - (2) 放電加工に必要な電铸層厚さを得るためには、通常数十時間を必要とする。場合によっては 100 時間以上を必要とすることもある。ただし昼夜連続無人運転で電铸可能であるため、電铸日数は数日である。
 - (3) 電铸技術に通じた高度の作業技術が必要である。
- いずれにしても、電铸モデルには工作が容易で安価な材料が使用できるので、たとえば自動車ボディ用絞り型のような新しい自由曲面を意図どおりに製作したい場合の電極製作には最適であり、この方面での応用が急速に進んでいる。

4. 電铸電極の問題点

電铸法により放電加工用電極を電铸することは、銅メッキの理論を応用することにより可能であっても、これを放電加工用電铸電極として利用できるか否か、放電加工に必要な電铸層厚さはどれ位あればよいかなど、工業的見地よりみれば解決しなければならない問題点が多い。この章ではこれらの問題点とその解決策について記述する。

4.1 電铸電極の電極消耗

銅電铸層は銅メッキを厚く行なうことによって得られる層であるため、図 4.1 (a) に示すような樹枝状組織（硫酸銅浴による場合）になっている。一方従来電極として使用している銅電極の組織を図 4.1 (b) に示す。どちらも純銅であるが組織にこれだけの差があるので、放電加工における電铸電極の電極消耗特性に差異があるのではないかと懸念があるので、次のような実験を行なった。

硫酸銅電铸浴で厚さ 1.5 mm の銅電铸電極を製作し、図 4.2 に示



(a) 硫酸銅電鍍組織



(b) 電気銅組織

図 4.1 電鍍銅と電気銅の組織の比較
Comparison with micro structure of electroformed copper and ordinary copper.

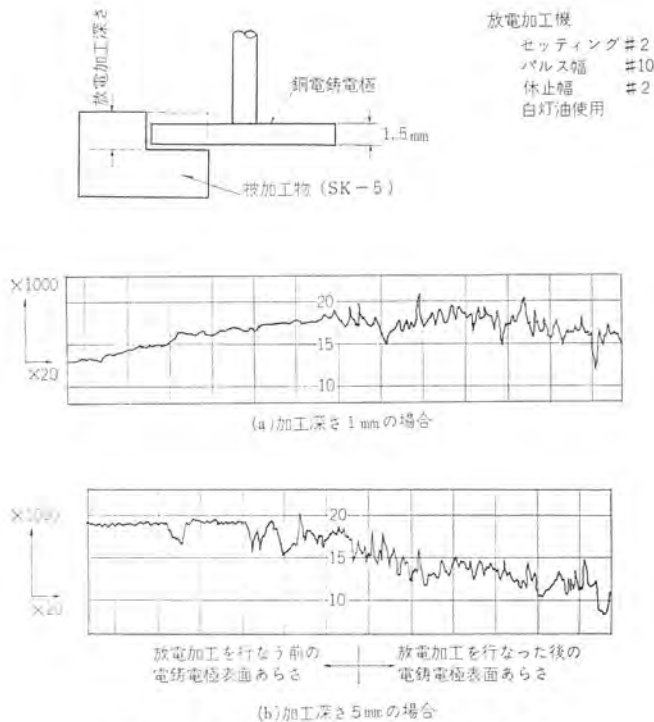


図 4.2 電鍍電極の電極消耗特性
Properties of electroformed copper for electric-discharge-machine-electrode ware.



(a) 破れた電鍍電極



(b) (a)の電鍍組織

図 4.3 電鍍電極の破れとその電鍍組織
Break electroformed copper electrode and micro structure of the electroformed copper.

ような方法で電極と被加工物 (SK-5) をセットし、放電加工を行った。実験に使用した放電加工機は DIAX 放電加工機 DM-250-9 T (トランジスタ電源) である。

放電加工後、電鍍電極が消耗すれば電極の放電面と非放電面の境界に段丘ができるので、この境界を中心に面荒さ計で段丘の高さを測定し、電極消耗の大きさを測定した。その結果、5 mm 放電加工した場合に段丘が約 10μ 生じている。これを電極消耗比で表わせば約 0.2 % である。また 1 mm 放電加工した場合、その境界における段丘はほとんど認められない。これは従来の削り出し銅電極に対し損色がなく、放電加工用電極として十分使用でき得ることを示すものである。

4.2 電鍍電極の破れ

銅電鍍法で製作した電鍍電極の電極消耗特性は、4.1 節で述べたように従来の削り出し銅電極と損色ない特性を示す。しかし電鍍方法が好ましくない場合、または適正な放電加工法がとられなかった場合には図 4.3 (a) に示すように電鍍電極が破れる場合がある。この例は電鍍電極の製作法が適正でなかったために生じたものであり、その電鍍層断面の組織写真を図 4.3 (b) に示す。図 4.3 (b) の電鍍層組織は図 4.1 (a) の均一な樹枝状組織とは異なり、組織内に幾重かの断層ができておりと同時に不均一な組織を示している。一般に電極のエッジ部分はその平坦(担)部よりも消耗が多い傾向にあるため、電鍍層にこのような欠陥がある場合図 4.3 (a) のように断層に沿って累積的に電極消耗が増加する。ゆえに電鍍法によって銅電鍍電極を製作する場合、均一な電鍍組織になるように電鍍することが必要である。この要求に対し電鍍条件の適切な選定はもちろんのこと補助極の使用、またはスパーサーの使用などを考慮した電鍍方式の開発によって非常に良好な電鍍電極の製作が可能になった。

つぎに放電加工条件と適切な電鍍層厚さの関係について記述する。まず、この関係が適切でなかったため電鍍電極が破れた例を図 4.4 に示す。この例は電鍍層厚さが 0.2 mm 位しかない電極で、約 1 g/分という速度で放電加工を行なったため電鍍層が破れ、同時に電鍍層がパッキング層(補強層)よりはく離までしている。すなわち、放電加工速度に対する適正な電鍍電極の厚さは、おおよそ表 4.1 のように選定する必要がある。

なおもっとも電鍍されにくい部分、換言すればもっとも電鍍層の薄い個所で多く放電加工を行なうことになるので、おうとつに關係なく均一な電鍍層厚さを有する電鍍電極を製作することが放電加工上重要な事項である(均一電鍍性については 6 章で記述する)。

4.3 電鍍層のはく離

電鍍電極を用いて放電加工を行なう場合、電鍍層内に図 4.3 (b) に示すような断層組織を有する欠陥があることは決して好ましいことではない。とくに、断層間の密着性が悪い場合、その境界に酸化



図 4.4 電鍍電極のめくれ
Deprivation of electroformed copper electrode.

表 4.1 電鍍層厚さと放電加工速度の一般的関係
Relation between electric-discharge-machining rate and thickness of electroformed copper electrode.

条 件	放 電 加 工 速 度	適切な電鍍層厚さ	DIAX DE-90T に相当する加工セッティング
荒 加 工	1~3 g/分	3 mm 以上	#4~#6
中 加 工	0.1~1 g/分	1 mm 以上	#2~#3
仕 上 加 工	<0.1 g/分	0.5 mm 以上	#1

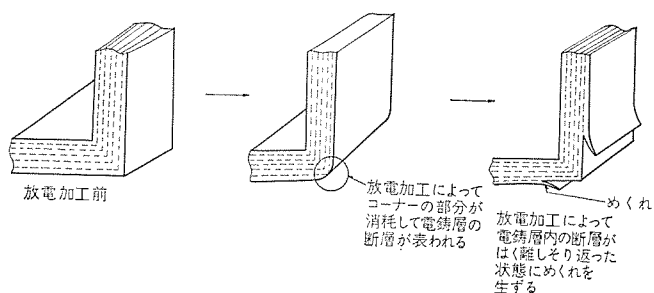


図 4.5 電鍍電極のめくれの機構
Mechanism of deprivation for electroformed copper electrode.

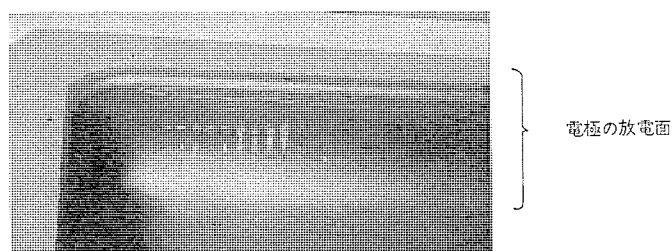


図 4.6 電鍍電極の断層とめくれ
Layer and deprivation of electroformed copper electrode.

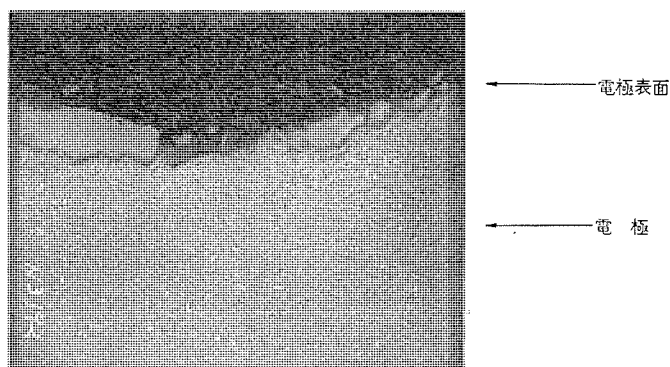


図 4.7 電極表面の断面顕微鏡組織
Micro structure of electrode surface after electric-discharge-machining.

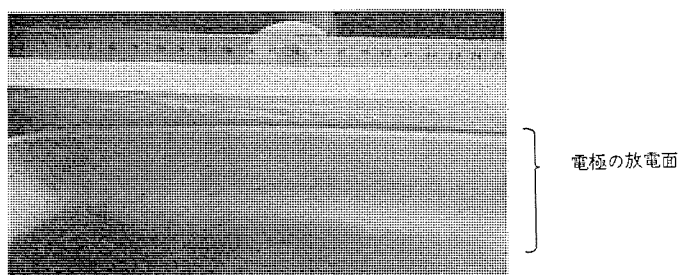


図 4.8 完全な電鍍電極の放電加工面
Perfect surface of electroformed copper electrode.

物を介していたり、または電鍍条件の中途変更によって断層間の密着強度が悪くなった場合には、放電エネルギーによって断層境界から一層ごとにめくれを生ずることがある。そのメカニズムを図 4.5 に示し、図 4.6 に実例を示す。反り返った状態にめくれを生ずる理由はつぎに述べるとおりである⁽¹⁾。

電鍍層の各断層が非常にうすく、コーナー部はわずかの消耗によって断層部が表われる。また断層間の密着性が悪い状態にあるところに被加工物から溶融状態の加工くず(屑)が飛散付着し、冷却されて電鍍表面で凝固収縮し、そのとき電鍍電極表面に引張応力が生ずる。これら二つの要因が重畳した場合、断層境界より被加工物の方向に向ってめくれを生ずる。図 4.7 の顕微鏡写真は被加工物より溶融状態の加工くずが飛散付着したものであり、電極表面上で白色点状物となっている⁽²⁾。これがめくれの原動力になっていると考えられる。

図 4.8 は、電鍍処理が適切であったため、被加工物より溶融状態の加工くずが飛散付着しても電鍍電極面がめくれを生じていない例である。

電鍍電極におけるこのような欠陥を生じさせないようにするためには、電鍍層の組織を均一にすることがまずたいせつである。やむを得ず電鍍を途中で中断した場合には、組織内に断層が生じないように酸洗によって電鍍表面の酸化物を除去し、入浴後数秒間逆電流を付加し、表面を活性化したのち電鍍を続行すれば良好な電鍍電極を得ることができる。

5. 電鍍電極による放電加工精度

電鍍電極を用いて放電加工を行なった場合、電鍍電極の精度は十分保障できても被加工物の放電加工精度がどれだけの寸法精度であるかが重要な問題である。そのデータをつぎに示す。

被加工物は図 5.1 に示すような自動車ボディ絞り形「フロントフェンダーアウトードローイングダイ」である。左側が電鍍電極であり、右側が放電加工の終了した被加工物である。被加工物の上には寸法精度測定用のチェック治具をセットしている。

精度のチェック方法はとつ(凸)形をしている被加工物にチェック治具を覆いかぶせ、チェック治具とのすき間を測定した。その結果被加工物の上面は完全にチェック治具と一致して問題はなかった。しかし、被加工物の側面はほとんど垂直であるため、全周にわたって非常に

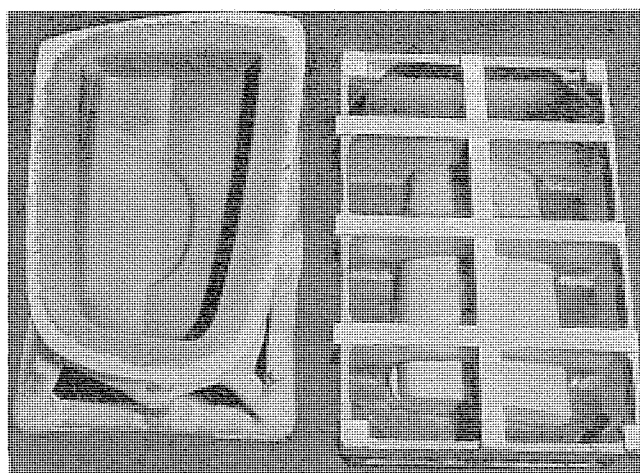


図 5.1 自動車ボディ絞り型の放電加工例
Sample of electric-discharge-machining for car-body drawing die.

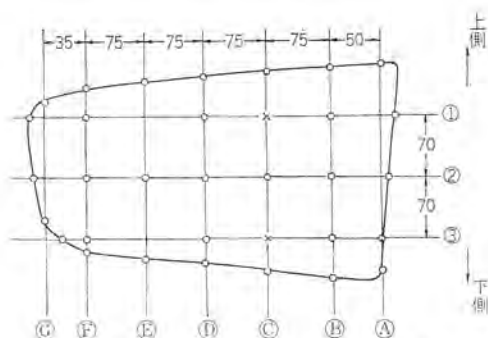


図 5.2 被加工物の加工精度測定点
Measuring point of working accuracy for electric-discharge-machined work.



図 5.3 被加工物に対する精度 チェック 治具の当て方
Setting of check jig for electric-discharge-machined work.

表 5.1 自動車ボディー絞り型の放電加工精度
Electric-discharge-machining accuracy for car-body drawing die.

けがき No.	No-1					No-2				
	①参考	②参考	③参考	④外周下側	片側クリアランス	①参考	②参考	③参考	④外周上側	片側クリアランス
A	—	0.05	—	0.04	0.02	—	0.06	—	0.10	0.05
B	0.1	0.08	0.06	0.15	0.075	0.08	0.06	0.07	0.10	0.05
C	—	0.05	—	0.15	0.075	—	0.05	—	0.15	0.075
D	0.10	0.10	0.10	0.15	0.075	0.10	0.10	0.08	0.12	0.06
E	—	0.10	—	0.10	0.05	—	0.05	—	0.15	0.075
F	0.05	0.08	0.10	0.08	0.04	0.05	0.06	0.04	0.10	0.05
G	—	0.04	—	0.05	0.025	—	0.04	—	0.07	0.035
外周前	0.06	0.15	0.10	—	—	0.06	0.15	0.10	—	—
外周後	0	0	0	—	—	0	0	0	—	—

(単位=mm)

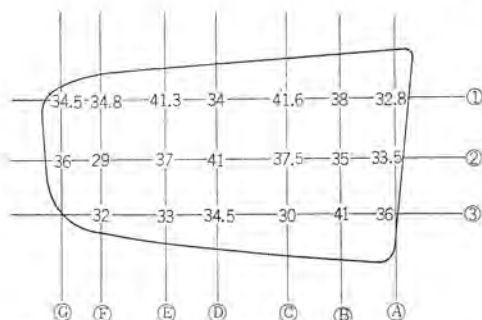


図 5.4 放電加工面あらさのばらつき
Surface roughness of electric-discharge-machined surface.

わずかのすき間ができた。このすき間をつぎのような方法によって測定した。

図 5.3 に被加工物の側面の精度をチェックするためのチェック治具のセット方法を示す。図 5.3 (a) は被加工物の左方を基準にチェック治具を合わせ、右方のすき間 (クリアランス) を測定する方法である。この方法によって得たデータを No-1 として表 5.1 に示す。また図 5.3 (b) は、これとは反対側の右側を基準にして左方のすき間 (ク

リアランス) を測定する方法であり、そのデータを No-2 として表 5.1 に示す。測定点は図 5.2 に示す。表 5.1 における参考値は、被加工物の側面のすき間 (クリアランス) を測定するため、チェック治具を被加工物の片側に寄せたことによって生じた上面のすき間 (クリアランス) を示したものであり寸法精度には直接関係ない値である。

これらの結果より片側クリアランスは 0.06 mm 程度であり、図面寸法精度 ± 0.1 に十分満足する値であることがわかり、問題なく放電加工用電極として使用できる。

つぎに電鍍電極で放電加工した被加工物表面の面あらさのばらつきのデータを図 5.4 に示す。測定箇所は図 5.2 と同じである。この結果より、放電面あらさの平均 35μ に対するばらつきは $\pm 5 \mu$ である。

6. 均一電鍍性

電鍍法によって放電加工用電極を製作する場合、重要なことは放電加工に十分な厚さの電鍍層を有するものでなければならない。一般に電鍍母型のおうとつの差の大きい場合、従来の方法では均一な電鍍層を得ることができないので、筆者は溶性補助陽極とか不溶性補助陽極を用い、場合によってはしゃへい板を利用した電鍍法を応用することによって均一電鍍層を得ることに成功した⁽³⁾。電鍍浴を陰極表面に吹き付けながら行なう方法も有効な方法であった。

図 6.1 は硫酸銅浴を用い、これらの方法を併用しながら銅電鍍を行なった場合の均一電鍍層厚さの例を示すものである。この例より、上述の方法を併用することが非常に良好な均一性を得るために有効な方法であることがわかる。



図 6.1 硫酸銅電鍍浴による電鍍層厚さ
Thickness of electroformed copper with sulfate acid copper bath.

7. 放電加工応用例

電鍍電極を放電加工用電極として応用しようとする場合、前述のような問題点が散在していた。しかし現在ではその原因が究明され解決策が見いだされたので、放電加工用電極として十分使用できるようになり、各方面で利用されている。この章ではその応用例について記述する⁽⁴⁾。

7.1 彫刻模様の加工例

非常に複雑な模様を、電鍍電極を用いた放電加工法によって製作する場合、つぎのような利点がある。

電鍍母型用材料は非常に加工の行ないやすい樹脂を用いることができるので、どんな複雑な模様でも容易に製作できる。図 7.1 にその加工例としてパートーベン像のメダル金型を、図 7.2 には王冠の金型加工例を示す。



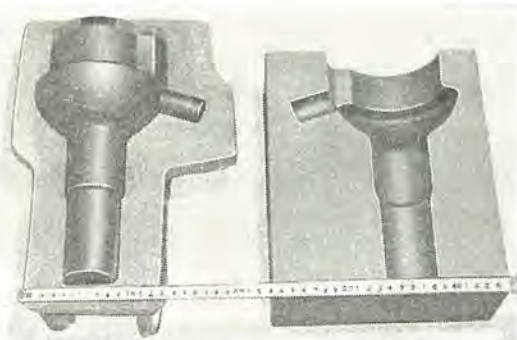
左側：被加工物 右側：電鍍電極
図 7.1 ベートーベン像メダル金型の加工例

Sample of electric-discharge-machining (engraving die) of Beethoven's image



左側：被加工物 右側：電鍍電極
図 7.2 メダル金型

Sample of electric-discharge-machining (medal metallic die)



左側：電鍍電極 右側：被加工物

図 7.3 5.0トン用ジャッキ中子取りシェルモールド金型
Example of shell mold die (5.0 ton jack die).

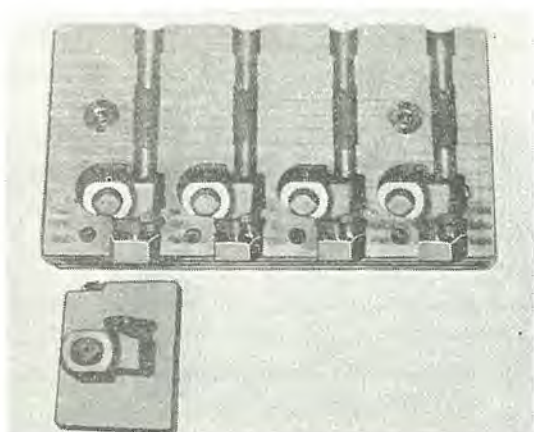


図 7.4 ハウジングステアリングギヤ中子取りシェルモールド金型
Example of shell mold die (housing-steering-gear)

表 7.1 5.0トン用ジャッキ中子取りシェルモールド金型の加工データ
Electric discharge machining data for shell mold die (5.0 ton jack die).

使用機種	DM-250-9T	総加工時間	8時間41分
電極材質	銅電鍍電極		
被加工物材質	FC 25	(粗加工)	7時間10分
使用電極数	1個	(中加工)	1時間
下加工の有無	放電取代1.5mm	(仕上げ)	31分
最終仕上面	20~30μH max		

7.2 モールド型の加工例

7.2.1 シェルモールド金型の加工例

加工例 1.

図 7.3 は5.0トン用ジャッキ中子取りシェルモールド金型を電鍍電極を用いて放電加工した例である。左側が電鍍電極であり、右側が被加工物である。被加工物の素材はFC-25であり、放電取りしろ(代)

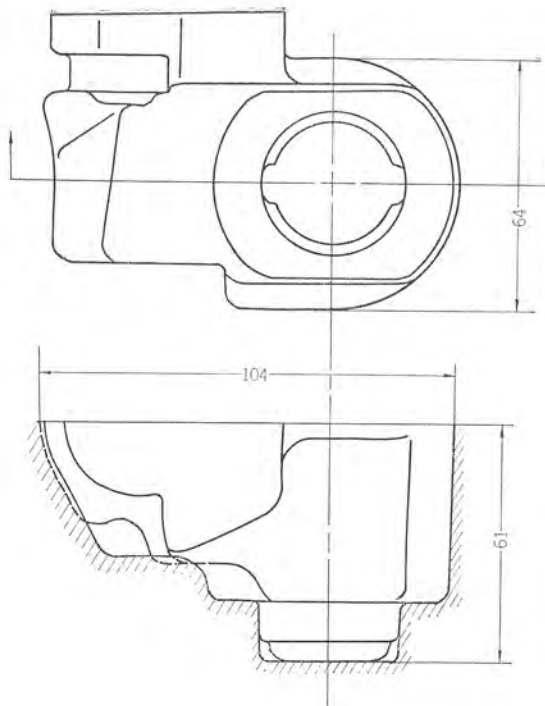


図 7.5 ハウジングステアリングギヤ中子取りシェルモールド金型の外形
Outline of shell mold die (housing-steering-gear)

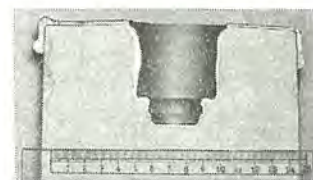


図 7.6 ハウジングステアリングギヤ中子取りシェルモールド金型放電加工用電鍍電極の電着層厚さ
Thickness of electroformed copper electrode for shell mold die (housing-steering-gear).

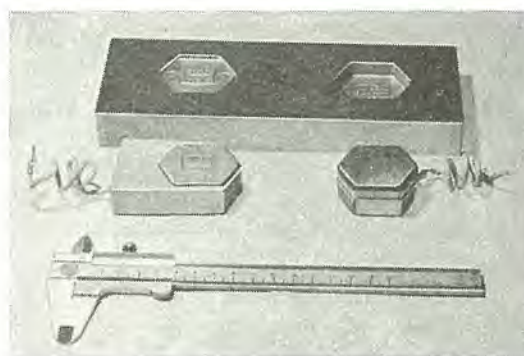


図 7.7 マイカコンデンサモールド金型
Example of electroformed copper electrode and work piece (mica-condenser mold die).

は全面1.5mmである。全加工量は400gであった。その加工データを表 7.1 に示す。

加工例 2.

図 7.4 は自動車部品ハウジングステアリングギヤ中子取りシェルモールド金型を、1個の電鍍電極で4個所放電加工した例である。被加工物の材質はFCG-20であり、放電取りしろを約1.5mm残して、なら

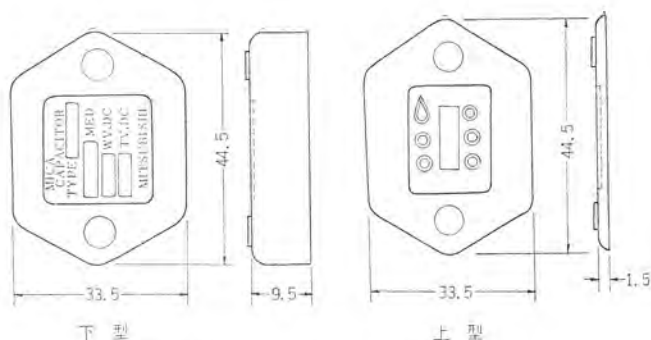


図 7.8 マイコンデンサモールド 金型の外形
Outline of mica-condenser mold die

表 7.2 ハウジングステアリングギヤ 中子取り シェルモールド 金型の加工データ
Electric discharge machining data for shell mold die (housing-steering gear).

使用機種	DM-250-9T	総加工時間 (1個当り)	6時間 10分
電極材質	銅電鍍電極	(粗加工 3時間 30分) (中加工 1時間 30分) (仕上げ加工 1時間 10分)	
被加工物材質	FCG-20		
使用電極個数	1個		
下加工の有無	有(ならい加工)		
最終仕上面	15~20 μ H max		

表 7.3 マイコンデンサモールド 金型の加工データ
Electric-discharge machining data for Mica-Condenser mold die.

使用機種		加工時間		
電極材質	銅電鍍電極	上・下型	上型	下型
被加工物材質	SKH-11	総加工時間	2時間 32分	2時間 50分
使用電極個数	各1個	内粗加工	38分	—
下加工の有無	なし	誤中加工	—	—
最終仕上面	20~25 μ	仕上げ加工	1時間 54分	2時間 50分

表 7.4 ゴム成形型の加工データ
Electric-discharge machining data for rubber mold die.

使用機種	DM-250-9T	総加工時間	5時間
電極材質	銅電鍍電極	(粗加工 3時間 30分) (中加工 1時間) (仕上げ加工 30分)	
被加工物材質	SS-41		
使用電極個数	1個		
下加工の有無	有(ピックフィード約 10mm)		
最終仕上面	10 μ		



左側：電鍍電極 右側：被加工物
図 7.9 ゴム成形型
Example of rubber mold die.



図 7.10 自動車 ボディ 絞り型 (フロントフェンダーローイングダイ)
Example of car-body drawing die (front-fender drawing-die).

表 7.5 自動車 ボディ 絞り型 (フロントフェンダーローイングダイ) の加工データ
Electric-discharge-machining data for front-fender die.

使用機種	DM-300-9T	総加工時間	26時間 20分
電極材質	銅電鍍電極	(粗加工 21時間 20分) (中加工 2時間) (仕上げ加工 1時間 50分)	
被加工物材質	ミーハナイト鋳鉄		
使用電極数	1個		
下加工の有無	有(ならい加工)		
最終仕上面	30~40 μ H max		

に加工したものである。放電加工データを表 7.2 に示し、図 7.5 に被加工物の形状を示す。非常におう(凹)部の深い電鍍母型であるため、電鍍層厚さの均一性を調べる目的で電鍍母型を電鍍後中央より分割したものの状態を図 7.6 に示す。これより非常に均一な厚さの電鍍層が得られていることがわかる。

7.2.2 プラスチックモールド型の加工例

図 7.7 は、マイコンデンサのプラスチック成形用金型を電鍍電極を用いて放電加工した例である。下型の加工では、その底面に非常に微細な文字が刻印されているため、粗加工はグラファイト電極を用い仕上げ加工のみを電鍍電極が行なった。外形図を図 7.8 に示す。上型は加工除去量が非常に少ないので最初から電鍍電極を用い、仕上げ加工条件のみで放電加工した。これらの加工データを表 7.3 に示す。

7.3 ゴム成形型の加工例

ゴム靴の底を成形する金型は非常に複雑であり、これを機械加工によって正確に製作することは困難であると同時に長い製作時間が必要となる。これを放電加工によって製作する場合でも、従来の方法によれば電極製作に苦勞する。電鍍電極を用いた放電加工によれば非常に容易に金型を製作することができる。図 7.9 がその放電加工例である。左側が電鍍電極であり、右側が被加工物のゴム成形型である。加工データを表 7.4 に示す。被加工物の材質は SS-41 であり、ピックフィード 15 mm 程度のならい加工をした状態から放電加工したものである。

7.4 絞り型の加工例

加工例 1.

自動車 ボディ 絞り型 (フロントフェンダーローイングダイ) を電鍍電極により放電加工した例を図 7.10 に示す。被加工物の荒加工はカッター径 50 ϕ を用い、ピックフィード 20 mm のならい加工をしたものである。この状態から電鍍電極を用いて放電加工を行なった場合、製作日数は従来の方法に比べて、約 30 % 短縮できるという結果を得た。放電加工によって得られた面粗度は 20~30 μ H max である。これを手

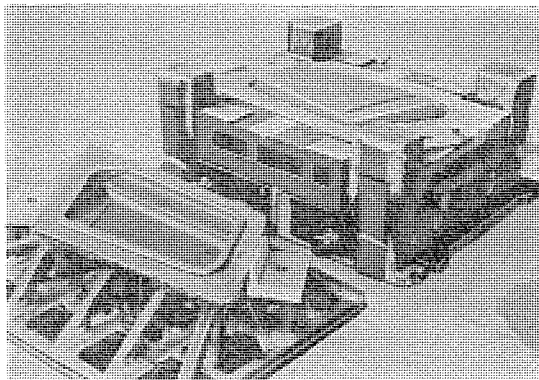


図 7.11 自動車ボディ絞り型 (リアピアアウトドローイングダイ)
Example of car-body drawing die (rear-pier-outer drawing die).

表 7.6 自動車ボディ絞り型 (リアピアアウトドローイングダイ) の加工データ
Electric-discharge machining data for rear-pier-outer drawing die.

使用機種	DM-500-9T	総加工時間	36時間20分
電極材質	銅電鋳電極	粗加工	32時間50分
被加工材質	FC-25	中加工	2時間
使用電極	1個	仕上加工	1時間30分
下加工の有無	有 (ならい加工)		
最終仕上面	30~40 $\mu\text{H max}$		

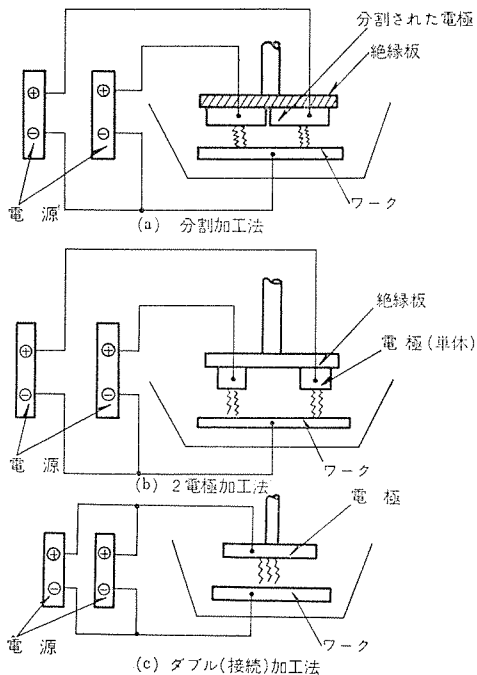


図 7.12 マルチパワー回路方式による各種加工法
Working process made by multi power supply.

みが(磨)きによって2~5 $\mu\text{H max}$ 程度に仕上げるのに10数時間を要しただけであり。非常に容易に仕上げることができた。放電加工データを表7.5に示す。

図7.10の右側が電鋳電極であり、その表面にある6個の穴は加工液噴出用穴とガス抜き用穴である。左側が被加工物の絞り型である。

加工例 2.

自動車ボディ絞り型(リアピアアウトドローイングダイ)を電鋳電極を用いて加工した例を図7.11に示す。従来のならい加工によって製作した場合と電鋳電極による放電加工法を導入して製作した場合の経済性の比較をすれば、放電加工法を導入することによって全体の製作日数が13.5%減少し、製作費も全体の9.6%低減できた。放電加工データを表7.6に示す。

7.5 電鋳電極による多分割放電加工

放電加工では、加工電流を増加させると加工速度はかなり大きい値になる。その反面加工面あらさが非常にあらくなる。また放電クリアランスも大きくなる。結局良好な加工面あらさ、および狭い放電クリアランスを得るためには加工電流を少なくしなければならない。その結果、仕上加工速度は荒加工に比べて相当小さくなってくるため、とくに電極面積が大きい場合の放電加工時間は長くなる。これを解決するために開発されたのがマルチパワー回路方式による多分割放電加工法である⁽⁵⁾。

7.5.1 多分割放電加工法

マルチパワー回路方式による多分割放電加工法の原理は、1台の機械本体に対し複数台の電源を接続させることによって放電加工を行なうものである。電源と電極の組み合わせにより図7.12に示すような加工法がある。

- (a) 分割加工法
- (b) 2電極加工法
- (c) ダブル加工法

とくに大きな絞り型等の場合には分割加工法が好ましいので、ここでは多分割電鋳電極による分割加工法について述べる。これは、一つの電鋳電極をほぼ面積が等しくなるように複数個に分割し、電極面を互いに絶縁してそのおのおのに互いに独立した電源の出力を接続し放電加工を行なう方法である。この場合の加工速度は全体の合計された値になるので電源が2台の場合には2倍に、3台の場合には3倍の加工速度が同じ面あらさに対して得られる。

7.5.2 電鋳電極による多分割放電加工例

図7.13は2分割された電鋳電極によって2分割放電加工した例である。図7.13(a)が2分割電鋳電極であり、図7.13(b)が被加工物である。

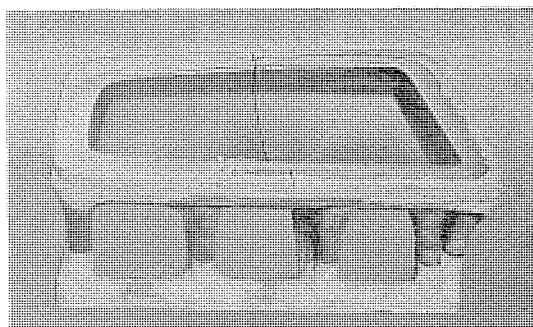
分割されたおのおのの電極面積が大きく異なれば、電極の送り速度は電極面積の最も大きいほうの加工降下速度で規制されるため、不均等な電極分割は分割効果が表われにくい。そのためおのおのの分割電極面積はできるだけ均等にすることが必要である。

電極を分割すれば電極間にすき間が生ずることは当然のことであるが、電極間のすき間をある程度以上近づけて放電加工を行なえば被加工物上に生ずるべき境界壁は消失する。これを分割電極の臨界すき間とよぶ。この臨界すき間は放電加工条件によって異なり一定ではないが、中加工程度で0.4mmである。しかしながら、実際作業において境界壁が残留したとしても分割電極のすき間をあまり大きくさえしなければ問題はないと考える。

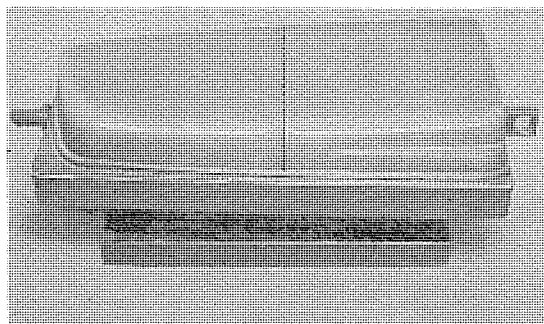
7.5.3 分割電鋳電極の製作法

分割電鋳電極の製作方法は、一般的には従来の電鋳電極製作法となんら異なるところはないのでここでは電鋳電極の分割のみについて述べる。

分割法には一体の電鋳電極完成後、電鋳殻のみを機械的に切断する方法と電鋳過程において分割する方法の2とおりある。一般には



(a) 2分割電鋳電極



(b) 被加工物

図 7.13 分割放電加工された自動車 ボディ用絞り型
Car-body drawing die made by multi-power supply
in the electric-discharge-machine.

後者の方法による場合が多い。図 7.14 にその方法を示す。電鋳母型表面に 1 mm 程度の厚さのつい立てを立てる。

つい立ての高さは 20~30 mm とし、電鋳完了後容易に引きはずすことが容易なように電鋳母型表面に幅 1 mm、深さ 2~3 mm のみぞをほり、この中につい立て板を入れて両端を固定する。またつい立て板には導電化処理を行なわないようにすると同時に塩化ビニール等の不良導体を用いる。

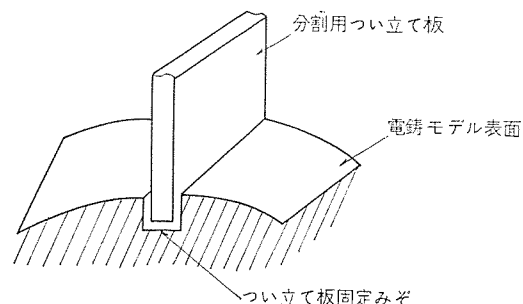


図 7.14 電鋳電極の分割法
Working process of divided electroformed
copper electrode.

8. む す び

新しい技術として、現在各方面から非常に注目されている放電加工用電鋳電極の製作法、およびそれを用いた放電加工法と放電加工応用例について述べた。また最近では、マルチパワー回路方式による多分割放電加工法が開発されたので、2分割電鋳電極を用いた放電加工法とその応用例についても記述した。電鋳電極を用いた放電加工法のもつ幾多の長所を生かせばますます応用範囲が広がるものと確信している。
(昭和 44-7-15 受付)

参 考 文 献

- (1) 斉藤，加藤，片寄：昭和43年度関西地方定期大会予稿集 No-205
- (2) 斉藤，田中，加藤，片寄：昭和 42 年度精機大会秋季大会等 No-225
- (3) 特許申請中
- (4) 斉藤，荒井，片寄：応用機械工学，10，No-7 (昭和 44 年)
- (5) 斉藤，小林：昭和 43 年度関西地方定期大会予稿集 No-206

MELDAS-1120 形 A 制御弁自動試験装置

中司 修慈*・桑田 博**・篠田 東吾**・岸浪清二郎**

Automatic Test Rack for Type A Air Control Valves

Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. Syuji NAKATSUKASA

Mitsubishi Electric Corp., Kamakura Works

Hiroshi KUWATA・Togo SHINODA・Seijiro KISHINAMI

In old practices testing of air control valves of brake for train is conducted by hand operation, but this method is liable to involve difference in the result depending on individual tester. As a result those products past the test can hardly be of uniform quality.

An automatic test rack introduced herein conducts all the test automatically according to sequence programmed in advance, leaving no room to allow personal difference entering. Consequently the products taken care of by this test rack have more reliability in the performance, while expenses needed for the test is reduced considerably.

1. ま え が き

列車のブレーキ系統の中で最も重要かつ複雑な機能をはたしているものが、空気制御弁である。制御弁の故障は列車の運行不能ひいては重大事故につながるため、その検修作業については従来から重要視され、製品の受入検査はもちろん、定期点検もきびしい管理体制のもとに行われてきた。

しかしその試験作業についてはいまだ従来の3T試験台により人が試験台のブレーキハンドルを手動操作し、それに伴う圧力空気の変化を圧力計の指針の振れを目視しながらストップウォッチで時間を計測し、性能の良否を判定しているの、試験作業は非能率的でかつ判定には個人差が介入しやすく高度の熟練を要する。日本国有鉄道はこのような状態を考慮し、試験作業の能率化と試験精度の向上を図るため、空制弁自動試験装置を昭和39年度に技術課題で取り上げ当社がその開発を担当した。

まず比較的簡単な貨車用のK制御弁自動試験装置を数台開発し、良好な結果が得られたので、引き続いて今回は客車用および電車用

のA制御弁自動試験装置を開発した。ここにその概要を紹介する。

図1.1に本装置の外観図を示す。なお本装置のうち空気系統部に關しては三菱重工業(株)三原製作所が担当した。

2. A 制御弁の構造および機能

2.1 A 制御弁の構造

A制御弁を大別すると、つり合い部、非常部および急動部の3部分に分けられる。

2.1.1 つり合い部

弁体の中央に位し制御弁作用の大部分を行ない、弁の主要部分をなしている。つり合いピストン、つり合いすべり弁、つり合い度合弁および逆止弁などからなる。

(1) つり合いピストン

ブレーキ管圧力の変化に伴いつり合いすべり弁およびつり合い度合弁を動かすと同時に、ブレーキ管圧力空気を補助空気だめ(AR)および付加空気だめ(SR)に通ずる込みみぞおよび込み穴を開閉する。

(2) つり合いすべり弁

次のような圧力空気の移動を開閉する。

(a) 付加空気だめから補助空気だめへ。

(b) つり合い度合弁によりブレーキ管からブレーキシリンダへ。

(c) つり合い度合弁によりブレーキシリンダからブレーキシリンダ吐出口へ。

(d) 補助空気だめからブレーキシリンダへ。

(3) つり合い度合弁

次のような圧力空気の移動を開閉する。

(a) 補助空気だめから抵抗穴へ。

(b) 抵抗穴から大気へ。

(c) つり合いすべり弁により補助空気だめからブレーキシリンダへ。

(d) つり合いすべり弁によりブレーキシリンダからブレーキシリンダ吐出口へ。

(e) つり合いすべり弁によりブレーキ管からブレーキシリンダへ。

(4) 逆止弁

急ブレーキの場合はこの弁を押しあげ、ブレーキ管圧力空気の一部をブレーキシリンダに込める。

2.1.2 非常部

弁体の上部を占め非常ブレーキの際、急動部を働かせて急動作用を

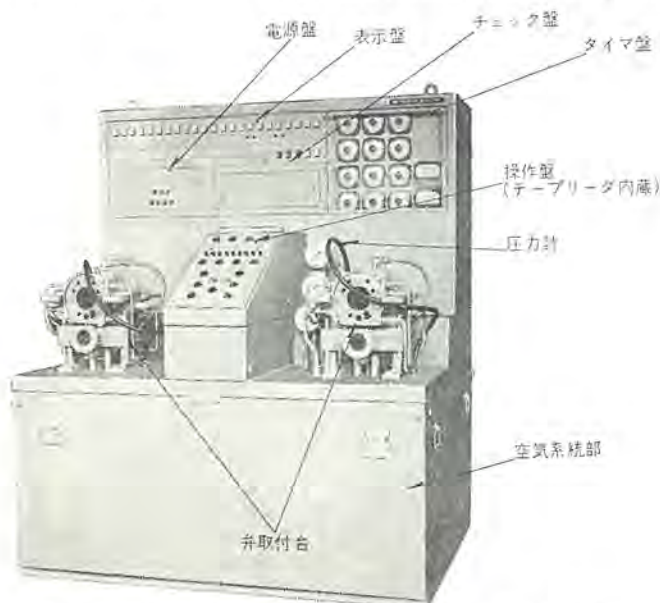


図 1.1 MELDAS-1120 形 A 制御弁自動試験装置 (外観)
Appearance of automatic test rack for type-A air control valve.

行なうと同時に高圧弁を開いて高圧空気をブレーキシリンダに込める。非常ピストン、非常すべり弁、非常度合弁および球弁などからなる。

(1) 非常ピストン

ブレーキ管圧力の変化により、非常すべり弁および非常度合弁を動かすと同時に、ブレーキ管圧力空気を急動空気だめに通ずる込め穴を開閉する。

(2) 非常すべり弁

次のような圧力空気の移動を開閉する。

- (a) ブレーキ管から急動空気だめへ
- (b) 急動空気だめから逃がしピストン下部へ
- (c) 付加空気だめから高圧弁背部へ
- (d) 高圧弁背部から非常部吐出口へ
- (e) 非常度合弁により急動空気だめから非常部吐出口へ
- (f) 付加空気だめから非常すべり弁室へ

(3) 非常度合弁

次のような圧力空気の移動を開閉する。

- (a) 非常すべり弁により急動空気だめから非常部吐出口へ
 - (b) 非常すべり弁により急動空気だめから逃がしピストン下部へ
- #### (4) 球弁

ブレーキ管減圧の場合急動空気だめ空気の逆流を防ぐ。

2.1.3 急動部

弁の下方にあってその大部分は、弁体から取りはずすことができる逃がし弁箱内に含まれている。逃がしピストン、逃がし弁などからなる。逃がしピストンは非常の際、非常部の作用によりその下部にはいつてきた急動空気だめ空気のために押し上げられ、このピストンにはめ込まれた逃がし弁を弁座から離して、ブレーキ管圧力空気を大気に放出し急動作用を行なう。

2.2 A 制御弁の機能

2.2.1 ゆるめおよび込め位置 (図 2.1)

(1) 最初の込め

ブレーキ系統に圧力空気がない場合、ブレーキ管に圧力空気を込めるとつり合いピストンは左方に、非常ピストンは右方に押し込まれてこ

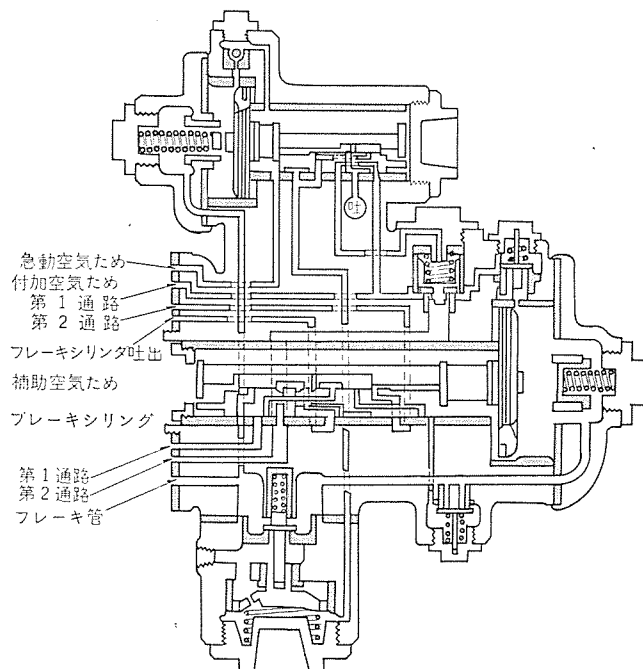


図 2.1 ゆるめおよび込め位置
Release and charging position.

の位置をとる。この位置ではブレーキ管の圧力空気が補助空気だめ、付加空気だめおよび急動空気だめのおおのに込められる。

(2) 又込めおよびゆるめ

ブレーキ後ブレーキ管の圧力を高めると、同管の圧力空気は上記と同様の移動をする。このほかブレーキシリンダ圧力空気は大気に吐出される。

2.2.2 急ブレーキ位置

ブレーキ管の減圧を行なうとつり合いピストン正面の圧力が減少し、同ピストンは補助空気だめ側の圧力のためにつり合い度合弁を伴って右方に進み急ブレーキ位置となる。したがって補助空気だめの圧力空気は、ブレーキシリンダに込められる。またブレーキ管の圧力空気は一部逆止弁を経てブレーキシリンダにはいり、局部減圧を行なって後部車両に減圧の伝達を早くする。

非常度合弁の穴の大きさは、ブレーキ管の減圧が非常ブレーキの割り合いで行なわれた場合のみ、非常ピストンおよび非常度合弁で左方に動き急動作用をするよう定められている。要するに急ブレーキの場合は、非常部においては非常すべり弁を動かさぬために上記のような作用をするに過ぎない。したがって高圧弁各急動部にはゆるめ位置となんら変化ない。

2.2.3 全ブレーキ位置

ブレーキ管減圧の場合ピストン両面の圧力差が大であるとつり合いピストンは急ブレーキ位置を通り越してさらに右方に進み、度合ばねを圧縮して最右端に至るまで進む。これが全ブレーキ位置であり、補助空気だめの圧力空気はブレーキシリンダに込められる。またブレーキ管の圧力空気は、急ブレーキ位置を通過する際ごくわずかにブレーキシリンダにはいるのみである。

2.2.4 ブレーキ重なり位置

ブレーキ管の減圧が止まりブレーキ管内の圧力が一定になった場合でも、つり合いすべり弁室の圧力が少しブレーキ管圧力よりも低下するまでは、依然補助空気だめ内の圧力空気はブレーキシリンダに流れ、つり合いピストンはつり合い度合弁を伴い少し左方に動き、ピストン棒がつり合いすべり弁の右肩に当たり、すべり弁までも動かす力はなくして止まる。

この位置においては補助空気だめとブレーキシリンダとの通路はしゃ(遮)断され、それ以上ブレーキシリンダに圧力空気の供給を停止する。また非常ピストン室の圧力が減圧後一定になれば、非常すべり弁室の圧力がブレーキ管圧力よりも多少降下し、非常ピストンは最右端に押しやられる。ゆえに補助空気だめおよび急動空気だめは、ブレーキ管圧力につり合いブレーキシリンダ圧力はそのまま保たれる。

2.2.5 ゆるめ重なり位置 (図 2.2)

ブレーキ管減圧後一度同管内につり合いピストンをゆるめ位置に押し動かすだけの圧縮空気を込めて、次に込めをやめ圧力を一定に保たせるとゆるめ重なり位置となる。まず込めを行なうと補助空気だめは、ブレーキ管および付加空気だめより込められると同時にブレーキシリンダ内の圧力空気は吐出される。

次に込めを止めてブレーキ管圧力を一定に保った場合でも、補助空気だめはその圧力がブレーキ管のそれよりも低い間は依然付加空気だめより込められ、つり合いピストンはつり合い度合弁を伴って右に動きつり合いすべり弁の穴をふさぐので、つり合いピストン棒の左端がつり合いすべり弁の左端にあたり、すべり弁を動かす力はないのでこの位置に止まる。これがゆるめ重なり位置である。

非常部においてはブレーキ管の圧力空気は急動空気だめに込めら

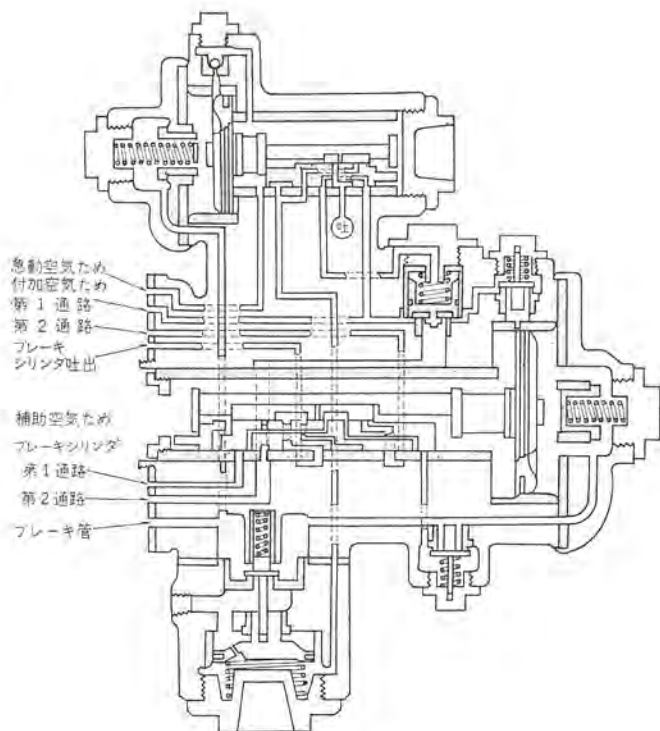


図 2.2 ゆるめ重なり位置 Release lap position.

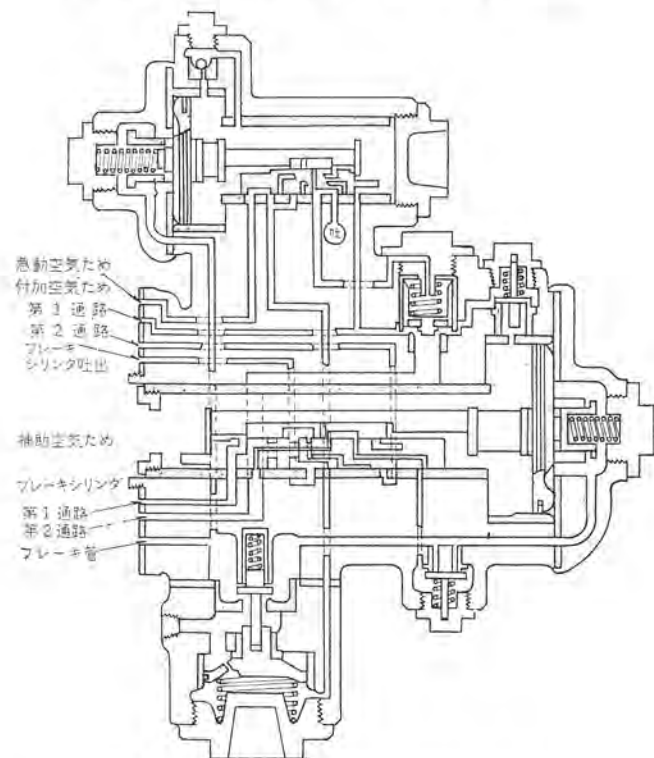


図 2.3 非常位置 Emergency position.

れるが、込めが止められてブレーキ管圧力が急動空気だめ圧力とつり合った場合は、もうそれ以上ブレーキ管圧力が急動空気だめを込めることはなく、非常ピストンの両面がつり合い、球弁は自重でその座に下がる。いわゆる階段ゆるめとはこのゆるめ重なり位置を用いて行なうブレーキのゆるめ方である。

2.2.6 非常位置 (図 2.3)

ブレーキ管圧力を急激に降下せしめたときは動作弁は非常位置をとる。つり合い部は全ブレーキの場合と同様に補助空気だめの圧力空気はブレーキシリンダに込められる。非常部においてはまず非常ピストンが

非常度合弁を伴って左方に動き、急動空気だめより非常吐出口へ吐出されるが、ブレーキ管圧力の降下すなわち非常ピストン室の圧力降下が急激であるため、相対的に非常すべり弁室内の圧力が高まり非常ピストンは最左端まで押し出される。非常すべり弁がこの位置になる途中において、まず非常度合弁が急ブレーキおよび全ブレーキの場合よりわずかに左に動いた際、非常すべり弁の通路が開き、急動空気だめの圧力空気は逃がしピストン面に作用する。

このようにして逃がしピストンは直ちに押し上げられ、ブレーキ管の圧力空気は逃がし弁を開いて大気へ吐出され、急激なブレーキ管圧力の降下を行なうと同時に後部車へ急動作用の伝達を早める。

また一方付加空気だめ圧力空気は高圧弁を押し上げブレーキシリンダに込められる。したがって非常ブレーキの場合にはブレーキシリンダ、補助空気だめおよび付加空気だめの三つがつり合う。この圧力は約 4.5 kg/cm^2 であって、全ブレーキの場合より約 29% 増加されている。このようにA制御弁は普通ブレーキ中、あるいはブレーキ後といえども、非常の場合には常に最大非常ブレーキシリンダ圧力を与える。

3. 試験装置の機能および構造

本装置による試験は図 3.1 のように自動試験と手動試験があり、自動試験の中には連続試験と単独試験がある。

連続試験とは通常の自動試験で、全試験項目を自動的に試験する。単独試験とは全試験項目 (23 項目) を 9 グループにわけ各グループごとの試験を行なう。これは連続試験を行なった後の確認用等に用いる。手動試験とはテープの代りに手動でコードを設定して試験を行なうもので、装置の点検用に用いる。

また試験弁取付台 (スタンド) は 2 台分あり、向って右がスタンド A、左がスタンド B である。スタンド A に弁を取付けて試験中に、スタンド B にも次の弁を取付けて待機し、スタンド A の試験が済んだら直ちにスタンド B に切り換えて次の弁の試験を行なうことができる。すなわち、取付けに要する時間を短縮することができる。本装置は空気系統部と電気制御部の二つに大別される。図 1.1 の外観図に示すように、空気系統部の上に電気制御部をのせた構造になっている。



図 3.1 本装置による試験
Test method by the system.

4. 空気系統部

4.1 動作の概要

電気系統部のブロック図を図 4.1 に示す。試験に必要な空気圧は

表 4.1 電磁弁一覧
List of electromagnetic valve

記 号	記 事	個 数
A 1, A 2, A 4, A 5, A 6, A 8 RS, BS	ブレーキ管の空気を給排する	8
R 1, R 4, R 6, R 7, R 8	補助空気だめの空気を給排する	5
BA	ブレーキ管と補助空気だめとの間の 通路を開閉する	1
C 2	補助空気だめとスタンドとの間の通 路を開閉する	1
C 3	ブレーキシリンダとスタンドとの間の 通路を開閉する	1
C 4, C 6	ブレーキシリンダの空気を排出する	2
C 5, 5 D	A 制御弁の SR 通路の空気を給排す る	2
TA, TB	スタンドの切換えのため通路の開閉 を行なう	2
CQ(A), CQ(B)	急動空気だめとスタンドとの間の通 路を開閉する	2
CR(A), CR(B), QV	急動空気だめの空気を給排する	3
PS(A), PS(B)	スタンドのピストン止めシリンダの 空気を給排する	2
CS(A), CS(B)	A 制御弁の SR 通路を開閉する	2
FA(A), FA(B), FE(A), FE(B), FQ(A), FQ(B), FS(A), FS(B)	A 制御弁吐出孔通路の開閉および流 量計通路の切り換えに使用する	8
VC(A), VC(B), EQ(A), EQ(B)	A 制御弁をスタンドへクランプする	4
CE	元空気だめと調圧弁との間の通路を 開閉する	1
GR	階段ゆるめ試験のためブレーキシ リンダ通路を開閉する	1

る。

4.6 電磁弁

電磁弁は電気制御部の電気信号により空気通路の開閉を行なう。本試験装置では試験に必要な空気通路の開閉は膜板 コック や スプール 弁を使用して行ない、電磁弁はパイロットの役目をする。従って試験に必要な通路容積の大小にかかわらず 45 個の多数の電磁弁は一種類で統一し小形である。(AC 100 V, 15 VA, オリフィス 径 1.6 φ)

電磁弁に供給する空気圧はブロックごとにマニホールドを設けて行ない、1 個のマニホールドに 10 個以上の電磁弁を植込み配管を容易にし、また制御圧 (7 kg/cm²) 専用でメタルフィルタを設けじんあい(塵埃)により電磁弁オリフィスが目詰まりを起こさぬようになっている。

本試験装置に使用している電磁弁の一覧を表 4.1 に示す。これらの電磁弁はそれぞれに対応する膜板 コック や切換弁と配管される。

4.7 給排弁部

給排弁部はブレーキ管や補助空気だめ等の各圧力系で圧力空気を給排する部分である。給排弁部は給気と排気の 2 個の弁で構成されているのではなく、圧力変化こう(勾)配が用途により異なる場合があるので、その場合は給気用および排気用ともに数個の弁を必要とする。これらの弁は電磁弁の制御圧をパイロットとして作動するリモートコントロール式で膜板 コック および切換弁の 2 種類が使用される。

4.7.1 膜板コック

図 4.2 に膜板 コック を示す。図の状態では A と B との間の通路は開いている。配管孔 Cへ電磁弁の制御圧が流入すると膜板(2)は膜板押え(3)および膜板(5)を下方へ押してコック体(6)の座へ押しつけ通路を閉じる。供給時の圧力変化こう配を変えるのはねじ部 Dに適当な絞りをねじ込み、排気の場合はネジ部 Bに絞りを付け B側を大気側とする。

4.7.2 切換弁

図 4.3 に切換弁を示す。本試験装置に使用の切換弁はシリンダ式のスプール弁で、図の状態では A と B との間が閉じ B と C とが連絡する。電磁弁の制御圧がシリンダに流入するとスプールは切り換えられて B と C との間が閉塞し B は A に連絡する。

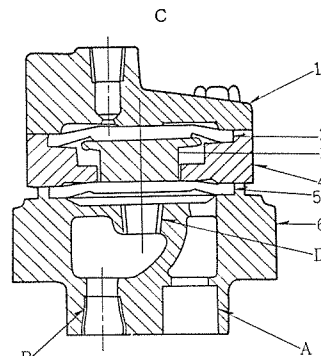


図 4.2 膜板 コック Diaphragm cock.

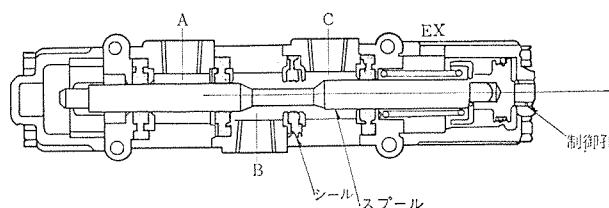


図 4.3 切換弁 Transfer valve.

4.8 空気だめおよび空気配管

本試験装置による試験規格は従来の手動試験機と同一値を使用しているため配管容積を含む空気だめの容積は手動試験機に合わせている。配管は管内のスケール等により機器が作動不良、漏気発生とならないよう銅管を使用している。

4.9 調圧弁および元空気だめ締切弁

試験用および制御用の調圧弁はゴム板弁式で同種のものを使用している。調圧弁は自動排気機構を有しているので供給圧がオーバーチャージすることはない。調圧弁が万一故障して試験用の圧力が変動すると試験結果に影響をおよぼすため、元空気だめ圧力は気圧スイッチで観測するようにしている。すなわち設定値より高圧となると高圧表示灯を点灯し、元空気だめ締切弁を締切り、元空気だめへの空気供給を停止する。また設定値より低くなると低圧表示灯を点灯し、テプリーダをストップさせる。

5. 電気制御部

5.1 動作の概要

本制御部の動作の概要を図 5.1 によって説明する。

A 制御弁の試験のためのプログラムはあらかじめ紙テープにさん孔されていて、試験開始に先立って紙テープをテプリーダに装着する。テープが正常に装着された状態で試験開始信号を出すとテプリーダが起動し、紙テープの内容を読みとってデコーダ回路に送り出す。またこのときテプリーダが読みとった内容は、パリティチェック回路へも同時に送られ常時その内容をチェックしており、テプリーダが誤読した場合には直ちにテプリーダを停止させ表示盤にその旨表示させる。

デコーダに送られた信号は 69 種類の命令に分類され、リーダ制御回路、電磁弁駆動回路、準備回路、準備コントロール回路、試験回路に送られ各回路を動作させる。リーダ制御回路に送られた命令はテープリーダの起動・停止を制御し、電磁弁駆動回路に送られた命令は所定の電磁弁を開閉する。準備回路に送られた命令は準備回路の選択を行ない、準備コントロール回路は準備の開始および完了を制御し、試験回路は試験の開始・結果の表示を制御する。準備というのは、空気弁の試験をする際に空気系統の各部の圧力等を所定の条件にあら

表 5.1 操作盤ランプ、スイッチ一覧
Parts list of operation panel.

部 品 名 称	使 用 部 品	機 能
「電源」表示ランプ	パイロットランプ(緑)	電源「ON」のとき点灯している
「電源 ON」スイッチ	押しボタンスイッチ(赤)	電源投入
「電源 OFF」スイッチ	押しボタンスイッチ(黒)	電源シャ断
「空気供給」スイッチ	切 換 え スイッチ(黒)	電磁弁 CE の開閉
「連続—単独」スイッチ	トグルスイッチ	連続試験、単独試験の切り換え
「CS開—CS閉」スイッチ	トグルスイッチ	電磁弁 CS の開閉
「単独試験選択」スイッチ	押しボタンスイッチ(黒)	単独試験項目グループの選択
「ランプ試験」スイッチ	押しボタンスイッチ(黒)	表示器の「合格表示」ランプがすべて点灯する。
「不合格確認」スイッチ	押しボタンスイッチ(黒)	不合格の試験項目が一つ以上ある場合、試験終了の際ベルの鳴動を止める。ただし、この場合表示盤の「合格表示」ランプは消灯しない
「復 帰」ス イ ッ チ	押しボタンスイッチ(黒)	復帰(リセット)状態にする
「連続試験開始」スイッチ	押しボタンスイッチ(赤)	連続試験の場合、テーブルリダを起動して試験を開始する
「スタンドA—スタンドB 切り換え」スイッチ	切り換えスイッチ (黒)	スタンドA、スタンドBの切り換え
「スタンドA」表示ランプ	パイロットランプ (だいだい)	スタンド切り換えスイッチがA側に倒れているとき点灯している
「スタンドB」表示ランプ	パイロットランプ (だいだい)	スタンド切り換えスイッチがB側に倒れているとき点灯している
「VC」ス イ ッ チ	切り換えスイッチ (黒)	電磁弁 VC (弁クラップ用) の開閉
「VC」表 示 ラ ン プ	パイロットランプ (白)	電磁弁 VC を ON にしてクラップ圧 CC が 5.0 kg/cm^2 以上になったとき点灯する。(消灯するとテーブルリダは自動的に停止する)
「EQ」ス イ ッ チ	切り換えスイッチ (黒)	電磁弁 EQ(吐出口クラップ用)の開閉
「EQ」表 示 ラ ン プ	パイロットランプ(白)	電磁弁 EQ が ON のとき点灯する
「EE」ス イ ッ チ	切り換えスイッチ (黒)	電磁弁 EE(吐出口クラップ用)の開閉
「EE」表 示 ラ ン プ	パイロットランプ(白)	電磁弁 EE が ON のとき点灯する

を持っている。

5. 6. 2 電磁弁駆動回路

デコーダで翻訳された種々の電磁弁開閉信号などにもとづいて、電磁弁の開閉を行ない空気系統の制御を行なう回路である。

5. 6. 3 準備コントロール回路

準備ステップごとに歩進する準備カウンタ回路とそれらの内容を翻訳するリレーデコーダ回路の駆動部からなり、プログラム上の「準備ステップ」数を順次カウントしながらリレー回路を通して準備信号を作り出す機能を持っている。

5. 6. 4 試験コントロール回路

試験ステップごとに歩進する試験カウンタ回路とそれらの内容を翻訳するリレーデコーダ回路の駆動部から成り、プログラム上の「試験ステップ」数を順次カウントしながらリレー回路を通して試験信号を作り出す機能を持っている。

5. 6. 5 判定回路

判定回路は試験結果の合否を判断する回路で、本装置の中で最も

表 5.2 表示盤ランプ一覧
Parts list of display panel.

部 品 名 称	使 用 部 品	機 能
「合格表示」ラ ン プ (23 個)	小角形信号灯 (白)	試験に合格すると、その項目のランプが点灯し、試験終了までの状態を保持する
「試験項目」表示ランプ (23 個)	2 号形ランプ (白)	進行中の試験項目番号のランプが点灯し、現在なん番の試験項目を実施中かを表示する
「電磁弁」動作状態表示 ランプ (20 個)	2 号形ランプ (白)	各電磁弁の動作状態を表示し、電磁弁が動作して(開いて)いるとき、その電磁弁に対応するランプが点灯する
「試験結果区分」表示ラ ンプ (4 個)	2 号形ランプ (赤)	階段ゆりめ試験の不合格範囲「3 回」以下、「8 回以上」、およびリングもれ試験の途中経過および不合格範囲「45 秒」「55 秒」を表示する
「低圧」表 示 ラ ン プ	小角形信号灯 (赤)	元空気だめ圧力 MR が 5.0 kg/cm^2 以下に低下すると点灯する。(このときテーブルリダは自動的に停止する)
「高圧」表 示 ラ ン プ	小角形信号灯 (赤)	元空気だめ圧力 MR が 5.9 kg/cm^2 以上に上昇すると点灯する。(このとき電磁弁 CE は閉じる)
「誤読」表 示 ラ ン プ	小角形信号灯 (赤)	テーブルリダが誤読したときに点灯し復帰スイッチを押すまで消灯しない
「リレー」作動中表示ラ ンプ	小角形信号灯 (白)	テーブルリダが動作中のとき点灯する
「終了」表 示 ラ ン プ	小角形信号灯 (白)	連続試験のときは全試験の終了時、単独試験のときは選択した試験グループの終了時に点灯する。復帰スイッチを押すと消灯する

表 5.3 チェック盤ランプ、スイッチ一覧
Parts list of check panel.

部 品 名 称	使 用 部 品	機 能
「1」〜「8」設定スイッチ	シーゾースイッチ	手動入力信号設定スイッチ
「1」〜「8」表示ランプ	2 号形ランプ	手動入力信号表示ランプ
「コード送出」ス イ ッ チ	押しボタンスイッチ(黒)	手動コード送出スイッチ
「手動—自動切り換え」ス イッチ	トグルスイッチ	自動—手動(コード)切り換え スイッチ
「A」,「B」,「C」設定ス イッチ	シーゾースイッチ	模擬試験結果設定スイッチ
「試験」ス イ ッ チ	押しボタンスイッチ(黒)	模擬試験結果送出スイッチ
「試験—本番切り換え」ス イッチ	トグルスイッチ	本番—チェック(試験結果)切 り換えスイッチ

表 5.4 タイマタイマ、メータリレー一覧
Parts list of timer panel.

使 用 部 品	最大目盛	個数	備 考
タ イ マ	10 秒	4	2 秒, 2.5 秒, 4 秒 (4) 秒用
タ イ マ	30 秒	4	10 秒, 15 秒, 20 秒, 25 秒
タ イ マ	60 秒	3	30 秒, 45 秒, 55 秒
タ イ マ	180 秒	1	60 秒用
メータリレー	1 mA	2	0.30 mA (0.82 cm ² /s), 0.49 mA (1.37 cm ² /s)

重要な論理回路である。この回路で採用している判定方法は、

(1) 試験回路より到来する入力信号の時間的順序を判別して合否を判定する……(判定回路 I)

(2) ある条件に達するまでに所定の動作を何回繰返したかを判別して合否を判定する……(判定回路 II)

の 2 種類がある。一つの特種な試験を除いてはすべて判定回路 I によっている。

判定回路 I における合否判定の基準は、試験回路より到来する入力信号を仮りに A, B, C とした場合に、A→B→C の時間的順序が成立したときのみ合格となり、他の時間的組み合わせに対してはいずれも不合格となる。図 5.3 に判定回路 I、図 5.4 に判定回路 II

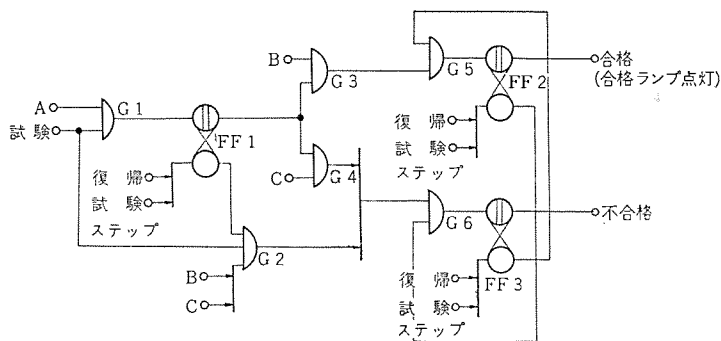


図 5.3 判定回路 I Decision circuit I.

の論理回路図を示す。図 5.3 にしたがって判定回路 I の動作を説明する。

(1) 時間的順序 A→B→C の場合 (合格)

判定前、FF1～FF3 のフリップフロップはリセット状態にあり、ゲート G5、G6 のみが開く。やがて入力信号 A が到来すると G1 により FF1 がセットされ、ゲート G3、G4 が開かれ逆にゲート G2 が閉じられる。次に入力信号 B が到来すると G3、G5 により FF2 がセットされ合格信号がでる。このとき合格信号によりゲート G6 が閉じられるので、その後入力信号 C が到来しても G4 よりの信号 (FF3 セット信号) をブロックし不合格信号を出さない。

合格が判定されリーダが起動して次の試験に進むと、判定回路はリセット (試験ステップ信号) され次の判定に備える。

(2) 時間的順序 A→C→B の場合 (不合格)

不合格になる場合の時間的順序は A→C→B のほかに B→A→C、B→C→A、C→A→B、C→B→A の組み合わせがあるが、方法は同じであるので A→C→B についてのみ説明する。

試験信号がきて判定開始となるとゲート G1、G2 が開く。やがて入力信号 A が到来すると G1 により FF1 がセットされ、ゲート G3、G4 が開かれ G2 が閉じられる。つぎに入力信号 C が到来すると G4、G6 により FF3 がセットされ不合格信号がでる。このとき不合格信号によりゲート G5 が閉じられるので、その後入力信号 B が到来しても G3 よりの信号 (FF2 セット信号) をブロックし合格信号を出さない。

次に図 5.4 にしたがって判定回路 II の動作を説明する。本回路は「階段ゆりめ」試験の合格判定に使用されるもので、繰返し動作のフローチャートを図 5.5 に示す。なお本試験における合格判定の基準は、「気圧スイッチ BC0.1 ↓ が動作するまでに繰返しした動作回数のうち 4～7 回を合格とし、3 回以下あるいは 8 回以上の場合を不合格とする」ものである。さらに不合格の場合は 3 回以下の不合格か 8 回以上の不合格かを判断する。

判定前はカウンタおよびフリップフロップはリセットの状態にあり、デコーダには 10 進数の 0 に対応する出力がでている。やがて階段ゆりめの試験信号がくると判定開始となる。同時に繰返し動作が行なわれ、その回数がカウンタにてカウントされる。気圧スイッチ BC0.1 ↓ が動作したときに、カウントされた回数が 0～3 の範囲のときは G1 によって FF1 がセットされ 3 回以下の不合格信号となる。また 4～7 の範囲であれば G2 により合格信号がでる。繰返し回数を 7 回カウントしても気圧スイッチ BC0.1 ↓ が動作しないときは、G3 によって FF2 がセットされ 8 回以上の不合格信号がでる。階段ゆりめの試験が終わりリーダが起動すると、カウンタは試験ステップ信号にてリセットされるが、不合格信号は記憶されたままである。

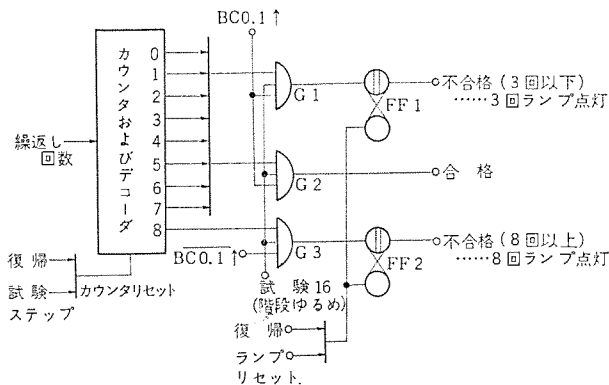


図 5.4 判定回路 II Decision circuit II.

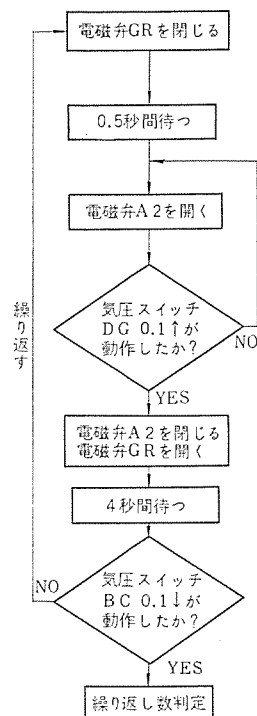


図 5.5 階段ゆりめ (試験 16) 繰返し動作 フローチャート
Flow chart of graduated release test.

5.6.6 単独試験回路

本回路は連続試験の内容を九つのグループに分割し、選択押しボタンの操作により、任意のグループごとの試験が実行できる機能をもつ。連続試験終了後不合格項目などの再確認に使用される。連続試験が終了して試験項目 14 (度合弁のもれ) が不合格となり、それを再確認する場合の例を図 5.6 の論理回路図を開いて説明する。

操作盤の「単独—連続」スイッチを「単独」に切り換えて選択スイッチ 13—14 を押すと、G5 によりリーダのスタート信号がでる。同時に試験 13—14 のグループを選択したということが FF5 によって記憶される。リーダはテーパーチをしながら各試験グループの始まりを示すコードを読み込む。いま最初に試験 1—3 グループの始まりを示す「単独 1—3」コードを読み込まれたとしても、試験 1—3 グループを選択したという信号が FF1 より得られないのでゲート G10、G11 は閉じたままとなり、試験 1—3 グループに関する内容は無視される。このように選択の指示のない試験グループはすべて無視される。

やがて試験 13—14 グループの始まりを示す「単独 13—14」コードが読み込まれると FF5、G18 により電磁弁の開閉命令などを翻訳するデコーダの制御ゲートが開き、またエンコーダを通して準備 15、試験 13 の状態にそれぞれのカウンタがセットされ、試験 13 が開始される。

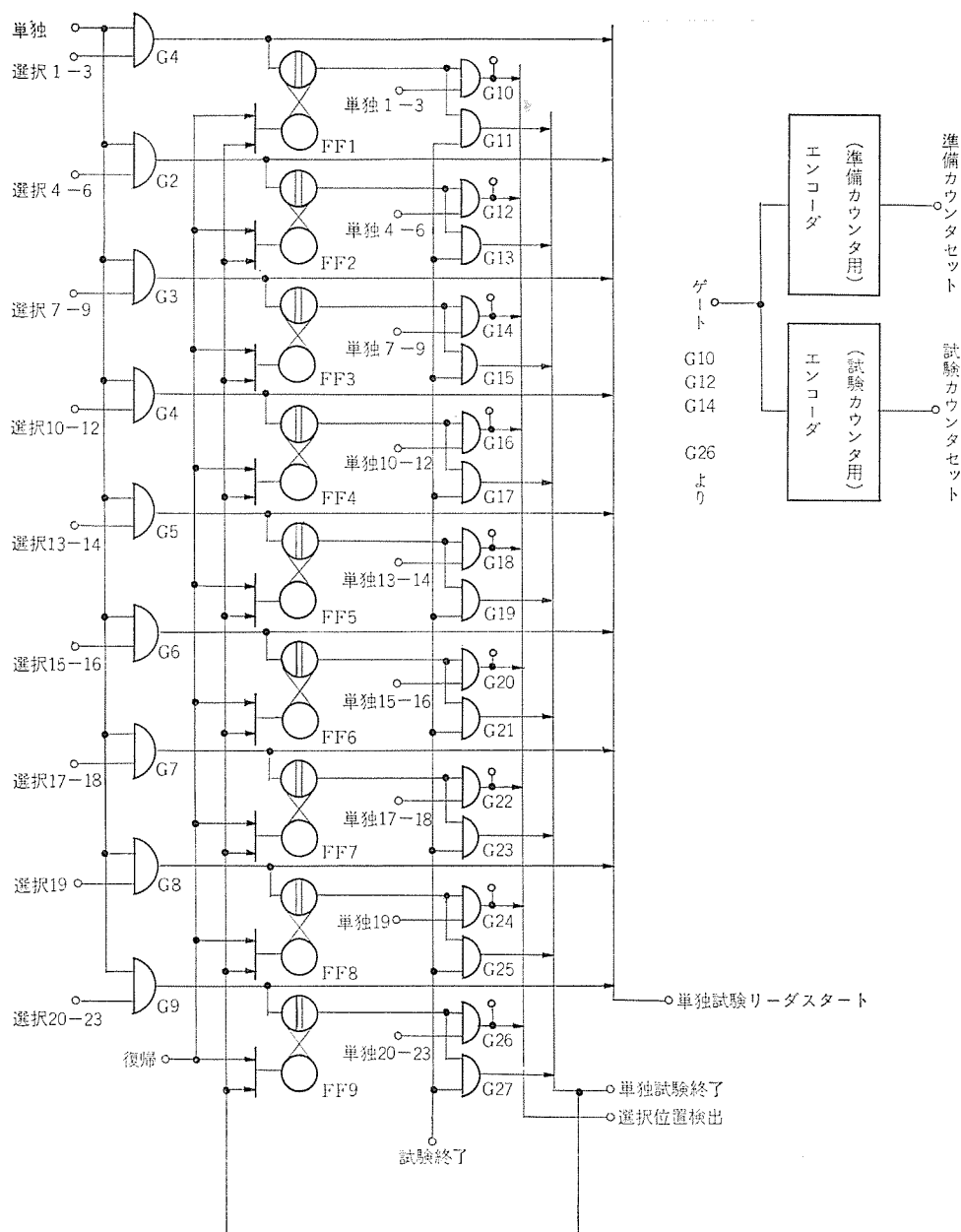


図 5.6 単独試験回路 Individual test circuit.

試験 13 の後は引き続いて 試験 14 が行なわれ、試験 14 が終わって本グループの「試験終了」コードを読込むと G 19 により単独試験終了信号がでて FF 5 がリセットされ、リーダが停止して試験 13—14 グループの単独試験終了となる。

5.7 リレー盤

リレー盤には気圧信号回路、合格ランプ点灯回路、テープリーダ駆動回路、電磁弁駆動回路、タイマ駆動回路、準備回路、試験回路などがあり、これらの回路はワイヤスプリングリレーあるいはパワーリレーの組み合わせで構成されている。

5.7.1 気圧信号回路

準備操作あるいは試験結果の判定などに必要な空気系統の気圧スイッチの動作信号を論理信号に変換する回路である。

5.7.2 準備回路

種々の項目の試験を行なうのに先立ち空気系が所定の条件を満たすまでリーダを停止させ、次の命令の実行を待機させる機能をもつ。本回路はリレーデコーダを中心に構成されており、各ステップの空気系の所定の条件がすべて本回路上にプログラムされている。リレーデコーダ

は準備カウンタにより準備ステップごとに順次歩進する。また準備回路の出力としては各準備項目ごとの準備完了を示す信号が得られ、これをもとにリーダの駆動制御あるいは準備完了にともなう電磁弁の開閉がなされる。

図 5.7 にしたがって本回路の動作を説明する。

例 (準備 10 : AR 圧 5.6 kg/cm² ↑ 以上、QC 圧 5.6 kg/cm² ↑ 以上 となると次へ進む)

「準備」コードを読込むとリーダは停止し、準備 10 までのシーケンスで開閉された電磁弁の動作による空気系統の応答を待つ。空気系統の応答により気圧スイッチがそれぞれ AR 圧 5.6 kg/cm²、QC 圧 5.6 kg/cm² 以上に達して動作すると AR 5.6 ↑・QC 5.6 ↑の論理積条件が満たされ、リレーデコーダ接点 10 を通して準備完了信号なり、リーダが再起動して次へ進む。

5.7.3 試験回路

時間的に異なって到来する気圧スイッチ信号、タイマ接点信号、メータリレー接点信号を受けて、判定回路の入力に必要な時間的順序信号を構成する回路である。各試験項目の判定に必要な時間的順序信号

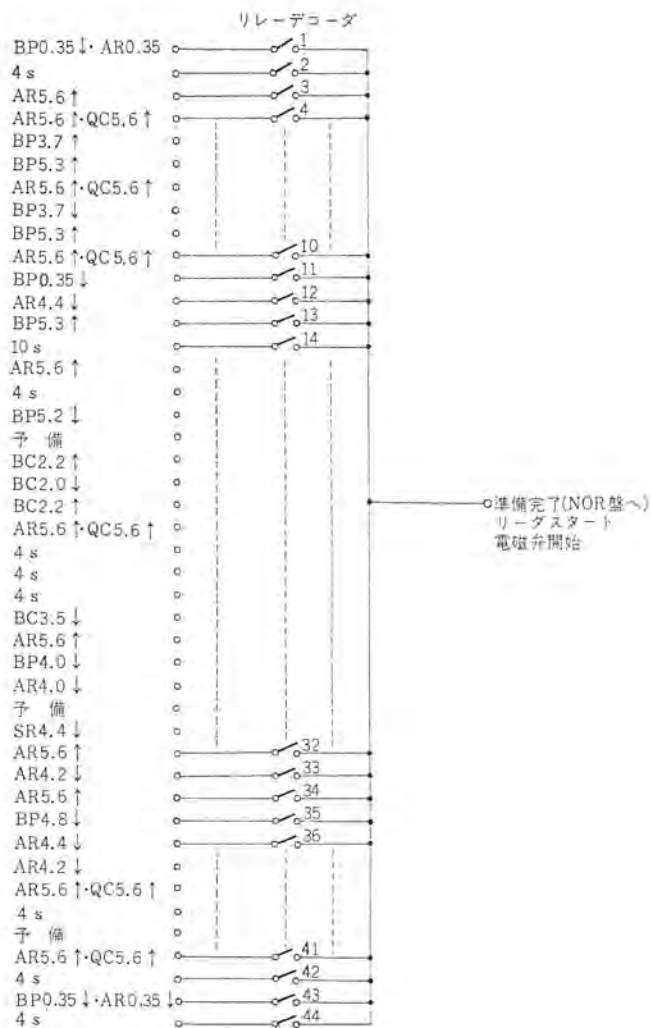


図 57. 準備回路 Preparation circuit.

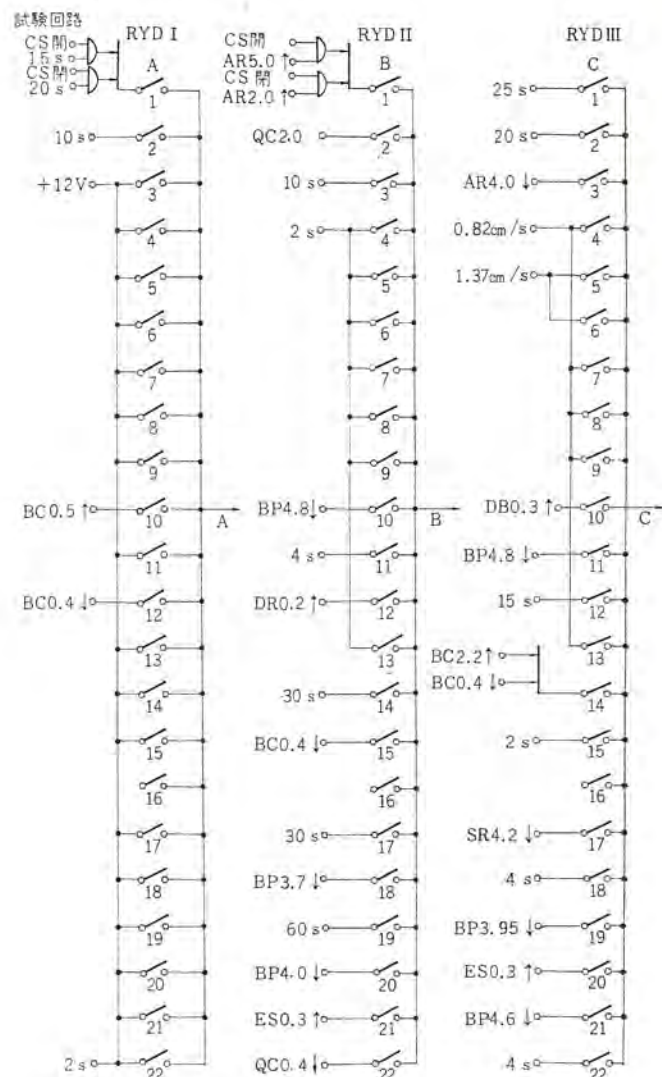


図 5.8 試験回路 Test circuit.

表 6.1 試験項目および規格

List of test items and standards.

番号	項目名称	項目略称	規格	番号	項目名称	項目略称	規格
1	AR 込め時間	AR こめ	CS 閉の場合は AR 圧が 0 から 5.0 kg/cm ² ↑ になるまでの時間が、15~20 秒であること CS 開の場合は AR 圧が 0 から 2.0 kg/cm ² ↑ になるまでの時間が、20~25 秒であること	12	ゆるめ感度	ゆるめ感度	BP 圧と AR 圧の差圧が 0.2 kg/cm ² ↑ (DR 0.2 ↑) に達しないうちに BC 圧が 0.4 kg/cm ² 以下になること
2	QC 込め時間	QC こめ	QC 圧が 0 から 2.0 kg/cm ² ↑ になるまでの時間が 10 秒であること	13	重なり位置におけるつり合い吐出部の漏れ	つり合い部もれ	4 秒間経過後、2 秒間の漏れ流量が 0.82 cm ³ /s を越えないこと
3	シリンダガスケットの漏れ	ガスケットもれ	AR 圧が 4.4 kg/cm ² から 34.0 kg/cm ² ↓ になるまでの時間が 10 秒以上であること	14	重なり位置における度合弁の漏れ	度合弁もれ	30 秒間に BC 圧が 2.2 kg/cm ² ↑ 以上または 0.4 kg/cm ² ↓ 以下にならないこと
4	非常位置におけるつり合い吐出部の漏れ	つり合い部もれ (非常位置)	4 秒間経過後、2 秒間の漏れ流量が 0.82 cm ³ /s を越えないこと	15	全ゆるめ	全ゆるめ	BC 圧が 2.0 kg/cm ² ↓ から 0.4 kg/cm ² ↓ になるまでの時間が 2 秒以内であること
5	非常位置における非常吐出部の漏れ	非常部もれ (非常位置)	4 秒間経過後、2 秒間の漏れ流量が 1.37 cm ³ /s を越えないこと	16	階段ゆるめ	階段ゆるめ	BC 圧が 3.5 kg/cm ² ↓ から 0.1 kg/cm ² ↓ になるまでの間に、BC-BC 差圧が 0.1 kg/cm ² ↑ (DG 0.1 ↑) になる回数が 4~7 回であること
6	非常位置における急動吐出部の漏れ	急動部もれ (非常位置)	4 秒間経過後、2 秒間の漏れ流量が 1.37 cm ³ /s を越えないこと	17	付加遮止弁の漏れ	付加遮もれ	SR 圧が 4.4 kg/cm ² ↓ から 4.2 kg/cm ² ↓ になるまでの時間が 30 秒以上であること
7	ゆるめ位置におけるつり合い吐出部の漏れ	つり合い部もれ (ゆるめ位置)	4 秒間経過後、2 秒間の漏れ流量が 0.82 cm ³ /s を越えないこと	18	急ブレーキ穴試験	急ブレーキ穴	BP 圧が 4.2 kg/cm ² ↓ から 33.7 kg/cm ² ↓ になるまでの時間が 4 秒以内であること
8	ゆるめ位置における非常吐出部の漏れ	非常部もれ (ゆるめ位置)	4 秒間経過後、2 秒間の漏れ流量が 0.82 cm ³ /s を越えないこと	19	つり合いピストリングの漏れ	リングもれ	BP 圧が 4.2 kg/cm ² ↓ から 3.95 kg/cm ² ↓ になるまでの時間が 6.0 秒以上であること
9	ゆるめ位置における急動吐出部の漏れ	急動部もれ (ゆるめ位置)	4 秒間経過後、2 秒間の漏れ流量が 0.82 cm ³ /s を越えないこと	20	ブレーキ安定試験	ブレーキ安定	BP 圧が 4.0 kg/cm ² ↓ に降下する以前に急動吐出スイッチ (ES 0.3 ↓) が作用しないこと
10	ブレーキ感度	ブレーキ感度	BP 圧、AR 圧の差が 0.3 kg/cm ² ↑ (DB 0.3 ↑) に達しないうちに BC 圧が 0.5 kg/cm ² 以上になること	21	非常ブレーキ感度試験	非常ブ感度	BP 圧が 4.6 kg/cm ² ↓ に降下する以前に急動吐出スイッチ (ES 0.3 ↓) が作用すること
11	ずれ落ち	ずれ落ち	4 秒経過後に BP 圧が (4.8 kg/cm ² ↓) 以下になっていないこと	22	非常 BC 上昇	非 BC 上昇	BC 圧が 5.0 kg/cm ² ↑ となるまでの時間が 2.5 秒以内のこと
				23	非常 QC 降下	非 QC 降下	QC 圧が 3.5 kg/cm ² ↓ から 0.4 kg/cm ² ↓ になるまでの時間が 2~4 秒であること

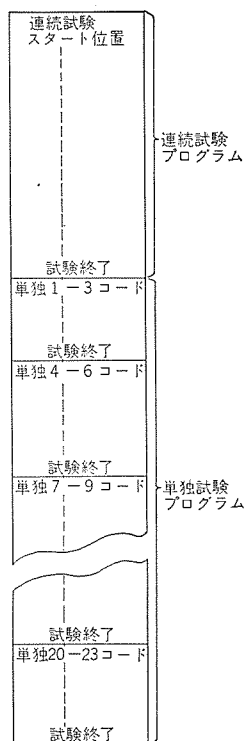


図 7.1 プログラムテープ Programmed tape.

は三つあり、そのうち時間的に一番最初に到来しなければならない信号群を A グループ、2 番目のものを B グループ、最後のものを C グループとして、リレーデコーダにそれぞれプログラムされている。リレーデコーダは試験カウンタにより試験ステップごとに順次歩進する。

図 5.8 にしたがって本回路の動作を説明する。

例 (試験 2 : QC 圧が 2.0 kg/cm^2 ↑ になるまでの時間は 10~20 秒の範囲内であること)

本試験の判定は 10 秒タイマ→気圧スイッチ QC $2.0 \uparrow$ →20 秒タイマの時間的順序においてのみ合格となる。したがって 10 秒タイマ信号は RYD I-10 (A グループ)、気圧スイッチ QC $2.0 \uparrow$ 信号は RYD II-10 (B グループ)、20 秒タイマ信号は RYD III-10 (C グループ) にプログラムされる。

6. 試験項目および規格

本装置で実施する試験項目名称、略称および規格は表 6.1 のとおりである。

7. プログラム

本装置を動作させるためのプログラムは、図 7.1 に示すような連続試験プログラムの後に単独試験プログラムをパンチしたテープをエンドレ

表 7.1 連続試験プログラムの一例
Example of continuous test program.

番号	キ	ー	プログラム	備	考
81	VT		試 験	(6)	急動吐出部の漏れ (非常位置) 4 秒経過後 2 秒間漏れ流量を測定する 2 秒間に漏れ流量は $1.37 \text{ cm}^3/\text{s}$ を越えないこと 試験終了後結果をランプ表示し次へ進む
82	FORM		試験ステップ		
83	←		FQ CLOSE		
84	:		CQ CLOSE		
85	U		A 8 CLOSE		
86	A		A 1 OPEN		
87	K		C 3 OPEN		
88	TAB		準 備	⑬ BP 圧が 5.2 kg/cm^2 以上になると次へ進む	
89	LF		準備ステップ		
90	TAB		準 備	⑭ (10 秒) 経過後次へ進む (はき出しが止むのを待つため)	
91	L		C 3 CLOSE		
92	=		FS OPEN		
93	LF		準備ステップ		
94	VT		試 験	(7)	つりあい吐出部の漏れ (ゆるめ位置) 4 秒経過後 2 秒間の漏れ流量を測定する 2 秒間の漏れ流量は $0.82 \text{ cm}^3/\text{s}$ を越えないこと 試験終了後結果をランプ表示し次へ進む
95	FROM		試験ステップ		
95	>		FS CLOSE		
97	?		FE OPEN		
98	VT		試 験	(8)	非常吐出部の漏れ (ゆるめ位置) 4 秒経過後 2 秒間の漏れ流量を測定する

スにつないだものを使用する。コードは ASCII である。表 7.1 に連続試験プログラムの一部を示す。

8. む す び

A 制御弁は客車および電車のブレーキ系統という人命をあずかる重要な機能の心臓ともいふべきものである。その構造、作用は非常に複雑で精密なものである。しかも車両 1 両につき 1 個ずつ付けてあるので、その試験装置は高信頼性であると同時に高能率なものでなければならない。

当社は A 制御弁自動試験装置の 1 号機を昭和 43 年 3 月に日本国有鉄道小倉工場に納入したが、現在順調に実動している。人為的誤差が皆無であると同時に、試験に要する時間も従来の手動試験の半分以下であることが報告されている。

終わりにこの装置の製作にあたって多くのご指導をいただいた日本国有鉄道のかたがたおよび空気系統の製作を担当された三菱重工業(株)三原製作所のかたがたに深く感謝する次等である。

(昭和 44-7-28 受付)

参 考 文 献

- (1) 小島：空制弁自動試験装置，マシナリー，4，(1969)

当社における電力機器の耐震強度の研究状況

志 村 勲*・高橋 康英*・篠原 資直*・奥津 尚宏*

Recent Research on Electrical Equipment Strength against Earthquake

Itami Works Isao SHIMURA・Yasuhide TAKAHASHI
Yorinao SHINOHARA・Naohiro OKUTSU

Increase of the height about the ground of apparatus on account of extra high voltage being applied to power transmission systems or the advent of complicated machines due to substation equipment turning compact has aroused serious problems on the earthquake resisting strength of them. On one hand in the building construction field dynamic study on the earthquake-proof strength has been intensively made to cope with a coming age of super-lofty buildings. Mitsubishi has taken lead in the research on the above subjects and been trying new concept in manufacturing electric machines. Of various attempts response calculation of structures in general by means of digital computers and random waveform shaking tests on actual machines through a large electrohydraulic servo type shaking tester are unique to the Company and contribute to the dynamic study a great deal. This article introduces various experimental processes conducted so as to make public the achievement.

1. ま え が き

環太平洋地域に位置するわが国は、地震の脅威を免がれることはできない。発生頻度や被害の大きさから見て、この地域内でも屈指の地震国である。地震学会では地震予知の研究を本格的に推進しているようであり、データの集積、理論の発達、計測器の長足な進歩などによりいずれは地震の予知も相当な精度で可能になるであろう。その場合でも、人的被害は未然に防いでも建造物については応急的対策を除いて、ほとんど初期の設計条件によって被害の程度は定まる。したがって、耐震構造の設計は超高層ビル化の時代を迎えて、さらに重要性を増すことは明らかである。

以上の事実は電力機器についてもあてはまることで、建築業界の超高層化に対応するかのようになり、送電系統の超々高圧化が進められ機器の地上高は増しつつある。また、変電設備のコンパクト化から複雑な形状の機器が出現し、ここでも新たな耐震の問題を提起している。

電力機器が地震の被害を受けはじめたのは、相当以前にさかのぼるであろうが、耐震問題を電力業界が大きく取上げたのは新潟地震および松代群発地震以後である。これらの被害状況は他の文献に譲るが、大きな被害例を外国のデータによって示すと表 1.1⁽¹⁾ のようである。これは極端な例と言えようが、各メーカーは被害を未然に防止すべく鋭意研究中であり、多くの成果が報告されている。当社においてもいち早く耐震強度の研究に着手し、一部は報告済み⁽²⁾ であるがここにとりまとめて参考に供するしだいである。

表 1.1 トルコ・アダパザリの 154 kV 変電所における地震の被害状況⁽¹⁾ (1967 年 7 月 2 日, M7)

List of destroyed equipment of 154 kV substation near Adapazari in Turkey by an earthquake of M7 on 22. 7. 67.

機 器 名 称	破 損 数/全 数
空 気 し ゃ 断 器	10/10
3φ 断 路 器	10/30
変 流 器	40/57
避雷 器	2/6

2. 耐震強度の一般的検討法

対象とする地震の性質や大きさについては後節で述べることにし、検討法にどのようなものがあるかをまず考えてみる。

耐震強度の検討方法には幾つかの種類があり、それぞれ長所や短所をもっているため、適用に際しては数種類を併用するのが普通である。大別すれば、机上で検討する理論的方法と何らかの試験品を用いて検討する実験的方法になる。以下に各方法を示し、3 章以降で当社が適用した例を引用して詳述する。その方法とは

(1) 理論的方法

- (a) 統計的方法
- (b) 応答スペクトラム法
- (c) デジタルコンピュータ法

(2) 実験的方法

- (a) 荷重試験法
- (b) モデル実験法
- (c) 実体加振法

である。この分類には異論もあると思うが、便宜上このように分けておく。(1)の(a)は地震波に対する構造物の応答を、定常不規則な振動波形に対する振動系の応答としてとらえていこうとするものであるが、詳細は他の文献⁽³⁾を参照していただきたい。

3. 理論的方法

3.1 応答スペクトラム法⁽⁴⁾

この方法は純理論的と言いがたいが、スペクトラムがあれば机上計算で結果を出すことができるので理論的方法の中に入れた。この方法の概念は M. A. Biot が提案したらしいが、G. W. Housner の名前が通っている。以下にこの方法と当社で行なった結果を示す。振動系の基本方程式は後にも関係してくるので、やや詳しく記しておく。図 3.1 のような 1 自由度系の振動系に地動が加わった場合の運動方程式⁽⁵⁾は、

$$m\ddot{X} + c\dot{x} + kx = 0 \dots\dots\dots (3.1)$$

$\ddot{x} = \ddot{X} - \ddot{z}$ を式 (3.1) に代入すれば

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = -m\ddot{z} \quad (3.2)$$

ここで

$$\omega_n = k/m, \quad \zeta = c/2\sqrt{km} \quad \text{とすれば式 (3.2) は}$$

$$\ddot{x} + 2\zeta\omega_n\dot{x} + \omega_n^2x = -\ddot{z} \quad (3.3)$$

初期条件を $(x)_{t=0} = (\dot{x})_{t=0} = 0$ とおけば、最終の解は

$$x = -\frac{1}{\omega_n\sqrt{1-\zeta^2}} \int_0^t \ddot{z}(\tau) e^{-\zeta\omega_n(t-\tau)} \sin \omega_n\sqrt{1-\zeta^2}(t-\tau) d\tau \quad (3.4)$$

ただし、 ω_n : 固有円振動数 ζ : 減衰比率 τ : $0 \sim t$ 内の任意時間
ここで

$$A = \int_0^t \ddot{z}(\tau) e^{-\zeta\omega_n(t-\tau)} \cos \omega_n\sqrt{1-\zeta^2}\tau d\tau \quad (3.5)$$

$$B = \int_0^t \ddot{z}(\tau) e^{-\zeta\omega_n(t-\tau)} \sin \omega_n\sqrt{1-\zeta^2}\tau d\tau \quad (3.6)$$

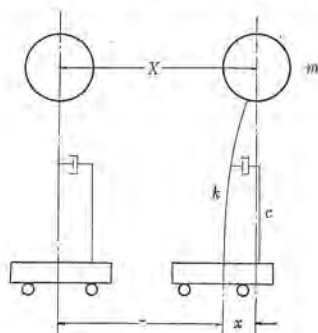
といて

$$S_F = \sqrt{\frac{A^2 + B^2}{1 - \zeta^2}} \quad (3.7)$$

なる量を考え、これを速度スペクトラムと呼ぶ。 $\zeta \ll 1$ なるときは

$$x_{\max} = \frac{1}{\omega_n} S_F, \quad \dot{x}_{\max} = S_F, \quad \ddot{x}_{\max} = \omega_n S_F \quad (3.8)$$

である。 $x_{\max}$ は変位スペクトラム、 $\dot{x}_{\max}$ は加速度スペクトラムと呼ぶ。



m : 質量
 R : ばね定数
 c : 粘性減衰係数
 z : 強制変位
 X : 絶対変位
 x : 相対変位

図 3.1 1 自由度振動系の模型

Single degree-of-freedom system with viscous damper.

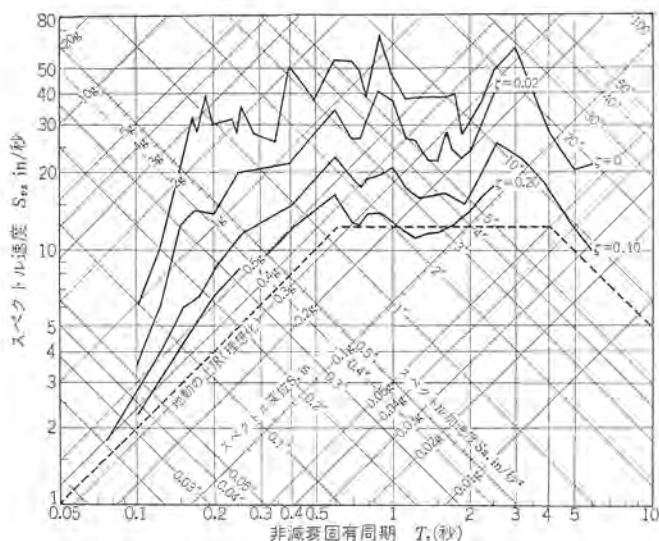


図 3.2 弾性系の応答スペクトラム, 1940 年 El Centro 地震
Response spectrum of El Centro earthquake in 1940.

いま入力として地震波をとり、横軸に周期 T をとり多数の T について振動系の最大応答量を求めて、両対数グラフに描くとこれが応答スペクトラムである。最大応答量は種々の方法で求めることができるが、アナコンを用いるのが簡便である。現在広く用いられているのは El Centro 地震波に対するスペクトラムである。Blume らの作成したスペクトラムを図 3.2 に示す。

El Centro 波以外の地震波について応答スペクトラムを求めてみた。その結果を図 3.3 に示す。また、正弦波の 1 波から 4 波を加えた場合のスペクトラムを図 3.4 に示す。応答スペクトラムは 1 自由度系について求められているが、2 自由度とした場合にどうなるかをアナコンで求めてみた。2 自由度とするとパラメータが非常にふえるので、上段と下段の定数は等しくとった。結果を図 3.5 に、ブロック図を図 3.6 に示す。

応答スペクトラム法の長所は系の最大応答量が容易に求められ、系が比較的単純な場合は精度も良い。したがって、設計の初期段階では大いに活用すべきである。短所は多自由度系の計算がやっかいなことと、構造が複雑な場合に精度が落ちたり細部の動きがわからないことなどである。

3.2 デジタルコンピュータ法

構造物の動的応答特性を調べる場合、運動方程式を立ててこれを解こうとするのはごく自然であり、オソドックスないき方である。しかし、自由度が増すと計算はやっかいになり、どうしてもデジタルコンピュータを使用しなければならない。

3.2.1 多自由度せん断構造模型

一般に取扱われる多自由度系の模型を図 3.7 に示す。この形の振動系の運動方程式は周知のように下式で示される。

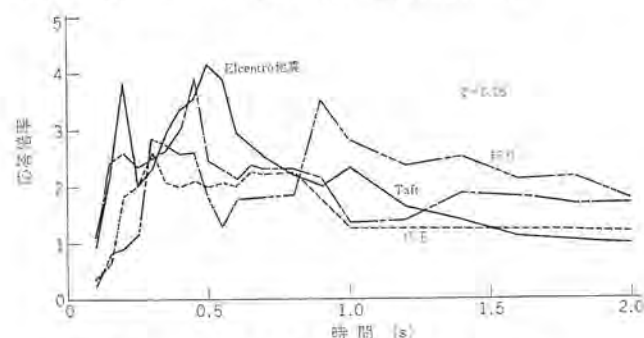


図 3.3 アナコンによる 1 自由度系の計算応答スペクトラム
Response spectrum of single degree-of-freedom system by analog computer.

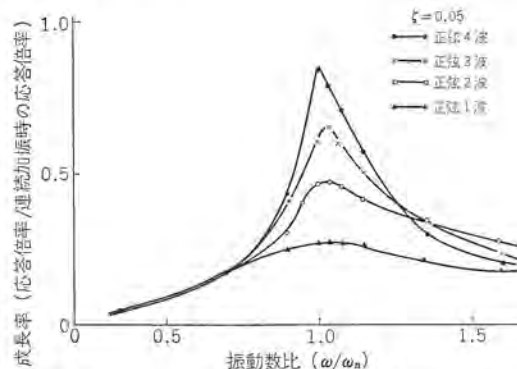


図 3.4 アナコンによる正弦波加振に対する 1 自由度系の応答曲線

Frequency ratio vs. normalized transient response factor to 1~4 sine pulses. (single degree-of-freedom system, calculated by analog computer)

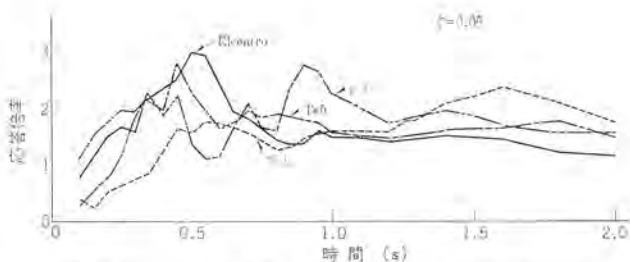


図 3.5 アナコンによる2自由度系の計算応答スペクトラム
Response spectrum of two degree-of-freedom system
by analog computer

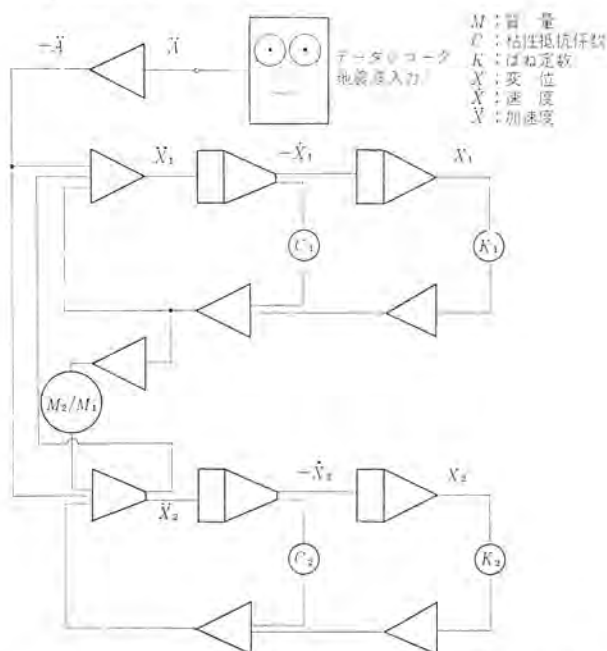


図 3.6 2自由度系のアナコンによる計算のブロック図
Block diagram of analog computer for two degree-
of-freedom system simulation.

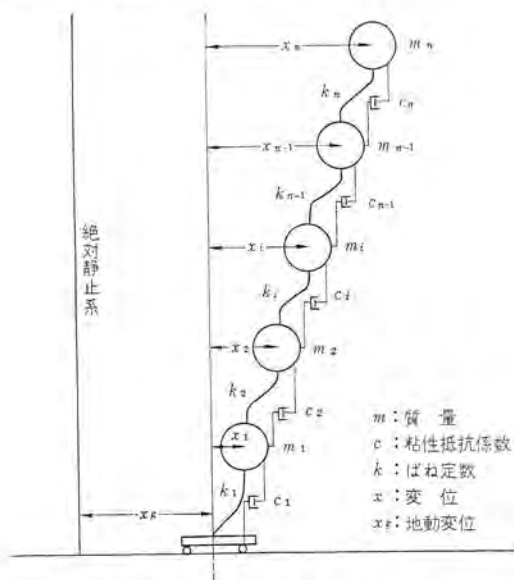


図 3.7 せん断形多自由度形の模型
Shear type multi-degree-of-freedom system.

$$\left. \begin{aligned} m_1(\ddot{x}_1 + \ddot{x}_g) + c_1\dot{x}_1 + c_2(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + k_1(x_1) \\ + k_2(x_1 - x_2) = 0 \\ m_2(\ddot{x}_2 + \ddot{x}_g) + c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + c_3(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) \\ + k_2(x_2 - x_1) + k_3(x_2 - x_3) = 0 \\ \vdots \end{aligned} \right\} \dots (3.9)$$

$$\left. \begin{aligned} m_{n-1}(\ddot{x}_{n-1} + \ddot{x}_g) + c_{n-1}(\dot{x}_{n-1} - \dot{x}_{n-2}) + c_n(\dot{x}_{n-1} - \dot{x}_n) \\ + k_{n-1}(x_{n-1} - x_{n-2}) + k_n(x_{n-1} - x_n) = 0 \\ m_n(\ddot{x}_n + \ddot{x}_g) + c_n(\dot{x}_n - \dot{x}_{n-1}) + k_n(x_n - x_{n-1}) = 0 \end{aligned} \right\}$$

式 (3.9) をマトリックス表示すれば、最終的に

$$[m]\{\ddot{x}\} + [c]\{\dot{x}\} + [k]\{x\} = \{F\} \dots (3.10)$$

ただし $[]$ は正方行列, $\{ \}$ は列ベクトルを示すものとする。 $\{F\}$ は強制振動の項である。

3.2.2 曲げ構造模型と一般的な多自由度系の運動方程式および影響係数の導入

構造物を多自由度の集中定数系に置き換えるとき、質点とコイルばねの組み合わせの形（せん断構造）では不十分な場合がある。これは、つぎの例を考えれば明らかである。

いま、一つの片持はり（梁）があり、先端に荷重 W を加えたときのたわみが δ で、ばね定数は k であるとする。このはりを1とし、その先に同じ形のはりを2をつなぐとこのばね定数は $\frac{k}{2}$ とならない。これは1のはりの端部の回転角が2のはりの端部の変位に影響を与え、全体のたわみが 2δ 以上になるためである。このような変形をする構造物を曲げ構造物と呼ぶ。この種の構造物については Myklestad や Thomson らがマトリックス法で固有振動数の計算を行なっているが、減衰項を考慮し、かつ任意波形に対する応答計算を行なわせるには不適當である。そこで影響係数の概念を導入してこれを逆変換してばね定数を求め、式 (3.10) の形としてから解く方法をとった。こうすれば既存の振動計算用プログラムがそのまま使える。

影響係数は次のように定義される。 n 個の自由度をもつ線型系において、 j 点に単位のを加えたとき、 i 点の変位が α_{ij} だけ変位したとすると、 α_{ij} が影響係数そのものである。 n 個の自由度を有する系では n^2 個の影響係数ができる。定義から明らかなように、各点に単位荷重が加わったときの i 点の変位 x_i は下式で示される。

$$x_i = \sum_{j=1}^n \alpha_{ij} \dots (3.11)$$

より一般的には F を外力として

$$\{x\} = [\alpha]\{F\} \dots (3.12)$$

一方、広義のばね定数 $[k]$ を用いると

$$[k]\{x\} = \{F\} \dots (3.13)$$

であるから

$$[k] = \alpha^{-1} \dots (3.14)$$

である。この関係は曲げ構造に限らず、質点やばねが三次元的に入組んでいるような系にも同様にあてはまる。したがって、影響係数を求めれば式 (3.10) の $[k]$ は求めることができるが、 $[c]$ をどうするかが問題である。現在われわれは次のようにしてこれを求めている。すなわち、系全体の換算粘性係数から求める方法である。式 (3.10) の $\{x\}$ を各振動モードに分けて

$$\{x\} = \sum_{j=1}^n q_j \{X_j\} \dots (3.15)$$

とし、式 (3.10) に上式を代入すれば

$$\sum_{j=1}^n [m]\{X_j\}\ddot{q}_j + \sum_{j=1}^n [c]\{X_j\}\dot{q}_j + \sum_{j=1}^n [k]\{X_j\}q_j = \{F\} \dots (3.16)$$

一次振動系について考えることにして式 (3.16) に $\{X_1\}^T$ を乗ずれば

$$\{X_1\}^T [m] \{X_2\} = \{X_1\}^T [m] \{X_3\} = \dots = 0 \dots (3.17)$$

$$\{X_1\}^T [k] \{X_2\} = \{X_1\}^T [k] \{X_3\} = \dots = 0 \dots (3.18)$$

$$\{X_1\}^T [c] \{X_2\} = \{X_1\}^T [c] \{X_3\} = \dots = 0 \dots (3.19)$$

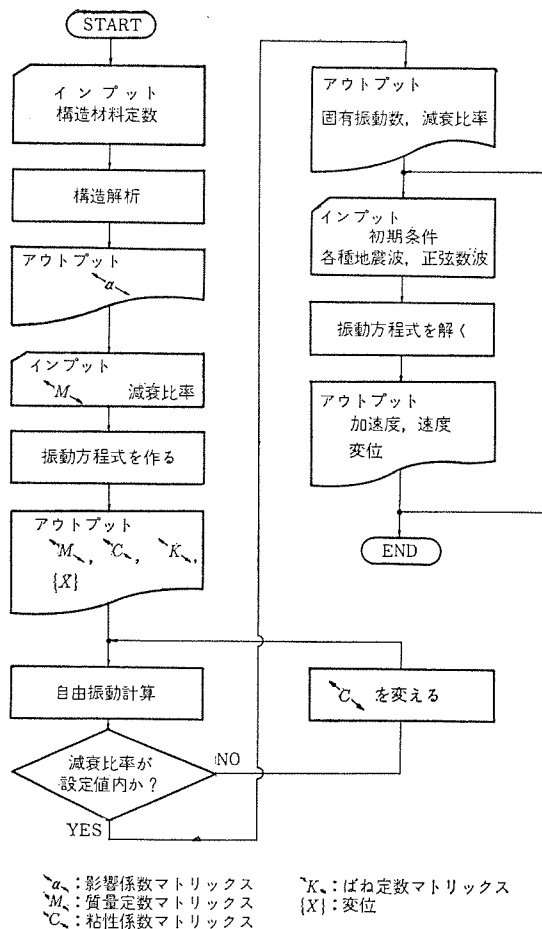


図 3.8 一般化された多自由度系の計算のフローチャート
Flow chart of generalized multi-degree-of-freedom system for digital computer.

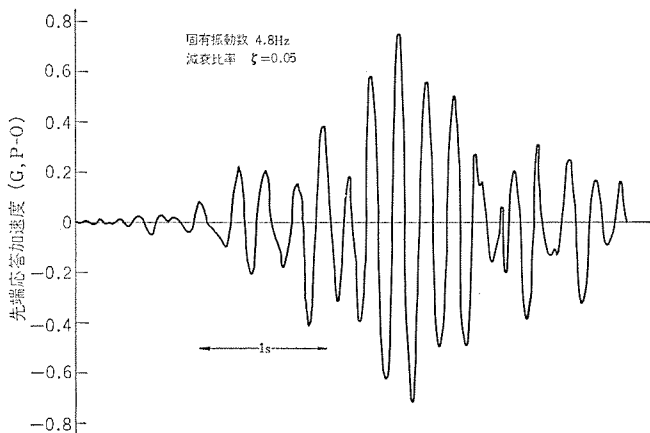


図 3.9 El Centro 地震波による計算応答曲線
Example of calculated response wave-form for El Centro earthquake by digital computer.

ただし、 c は微小と考える。式 (3.17) ～ 式 (3.19) の関係は振動モードの直交性によって証明することができる。この関係を用いて式 (3.16) を書き直すと

$$M_1 \ddot{q}_1 + c_1 \dot{q}_1 + K_1 q_1 = R_1 \dots (3.20)$$

ここに

$$M_1 = \{M_1\}^T [m] \{X_1\} = \sum_{r=1}^n m_r X_{r1}^2 \dots (3.21)$$

$$C_1 = \{X_1\}^T [c] \{X_1\} = \sum_{r=1}^n \sum_{s=1}^n c_{rs} X_{r1} X_{s1} \dots (3.22)$$

$$K_1 = \{X_1\}^T [k] \{X_1\} = \sum_{r=1}^n \sum_{s=1}^n k_{rs} X_{r1} X_{s1} \dots (3.23)$$

$$R_1 = \{X_1\}^T \{F\} \dots (3.24)$$

いま、固有振動数を ω_1 、系全体の減衰比率を ζ_1 とすれば

$$\zeta_1 = \frac{C_1}{2M_1\omega_1} \dots (3.25)$$

$$\omega_1 = \frac{K_1}{M_1} \left(f_1 = \frac{1}{2\pi} \frac{K_1}{M_1} \right) \dots (3.26)$$

ここで c の分布は k の分布に相似であるとの大きな仮定を入れると

$$[c] = \frac{C_1}{K_1} [k] = 2\zeta_1 \sqrt{M_1/K_1} [k] \dots (3.27)$$

で c は求まる。 $\{X_1\}$ はストラ法で計算する。

現在、 α_{ij} はマトリックス構造物解析法を用いて計算しているが、一連の耐震計算のフローチャートを図 3.8 に示す。また、計算結果の一例を図 3.9 に示す。

4. 実験的方法

4.1 荷重試験法

この方法はさらに純然たる静的試験法とデルタ、あるいはステップ関数形の荷重を与える過渡応答法に分けられる。前者は主として荷重-たわみ特性や荷重-ひずみ特性を厳密に測定したい場合に用い、後者は共振試験を行なうことができない場合、簡単に動特性を調べるときに用いる。

静的荷重試験は基礎研究の段階で非常に重要な役割りを果たす。われわれは構造物を幾つものブロックに分けて測定を行ない、また、実体の組立状態でも多くの測定を行なった。測定に際してはひずみ計の使用はもちろん、ダイヤルゲージ、トランスミットやオートコリメータなどの光学器械を多数使用する。図 4.1 に支持がいしの影響係数の測定状況を示す。これらの測定は非常に多くの時間と労力を要するので、一定量のデータが集積された段階では省略されよう。

過渡応答法には種々の荷重のかけ方がある。最も普通の方法としては、供試品の重心部を引張ってたわめて置き、突然手放す方法である。そして各部のひずみや加速度の波形を記録し、固有振動数や減衰比率を測定する。突然手放す方法では次の事項に注意する必要がある。

第一には引張りの荷重を十分大きくとることである。荷重が小さいと、後述する減衰比率 ζ の振幅依存性によって極端に小さくなる

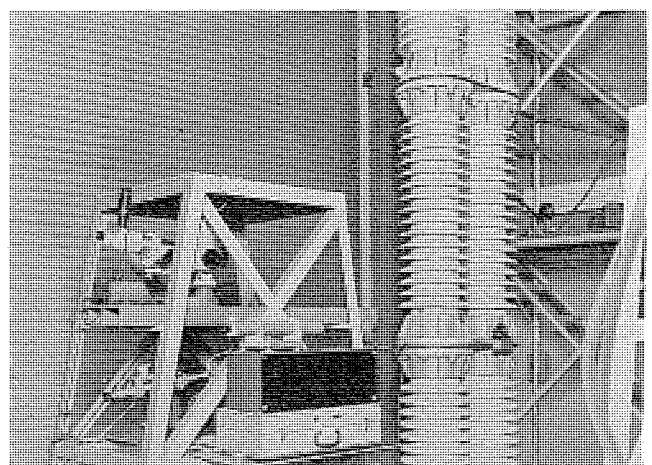


図 4.1 光学器械による影響係数の精密測定
Precise measurement of influence coefficients by using optical device.

測定してしまうことがある。これは応答倍率 $Q\left(=\frac{1}{2\xi}\right)$ を不当に高く見積る結果になり、好ましくない。

第二には、荷重をかける点に注意することである。振動モードの形を想定して印加しないと、高次の振動数や複雑なビート波形を測定する結果になる。また、振動波形のはじめのほうと後のほうでは、振動数に差異を生ずることがあるので落ち着いた状態の値を読む必要がある。

他の荷重のかけ方として衝撃力を与える方法がある。われわれが試みたものに、供試品に向けてフォークリフトを軽く衝突させる方法がある。この場合、衝突面にはクッションを入れておかないと複雑な高調波を測定する結果になる。外国で行なった例では、貨車に供試品を積載しておき、これにバッテリーロコを追突させて測定する方法が報告されている。最近、引合いのあった国外からの仕様に過渡応答法による耐震強度の検証を要求したものがあった。

4.2 モデル実験法

モデル実験が必要とされる場合は、およそ以下の理由による。

- (1) 実物が大きすぎるので縮小してシミュレートする。
- (2) 実物を作ると高価であり、製作日数もかかる。あるいは実物を破壊したくないので、モデルで破壊試験をする。
- (3) 実物形状がまったく定まらないので、多数のモデルからプロトタイプを選定する。

(4) 実物のある機能だけを測定すれば十分に目的が達成できるので、部分モデルで実験をする。

などで、古くから船舶、航空機、建築物、自動車その他のシミュレーションにさかんに使用されており、確立した一つの技術となっている。現在当社には大形の加振機が設置されているので相当大形の物でも実体の加振はできるが、開発段階で加振試験をする場合にはモデルでやるほうが得策であり、また、機器を複雑に組み合わせた状態の特性を知る必要もあるから、今後もこの種の試験が行なわれるであろう。

スケールモデルの基礎をなすものは Buckingham の π 定理であるが、理論は省略して振動試験に関係する次元の関係式を表 4.1 に示す。加振試験のブロック図を図 4.2 に、加振試験状況を図 4.3 に示す。供試品の比スケールは $\frac{1}{5}$ であり、試料の下にはバランスをとるためにバランスウェイトをつけている。なお、このモデルは実体と同じ材料を使い、幾何学的形状比率は部分によって変えていない。ただし先端部だけは等価重量となるように材質を一部変えている。

モデル実験によって明らかになったことは、

- (1) 静的に測定した固有振動数は、動的に測定した値と少し差がある。
 - (2) 振幅を大きくすると減衰比率も大きくなる。すなわち、減衰比率の振幅依存性が認められる。
 - (3) 加振試験の結果では、固有振動数、地震波に対する応答などは理論および実体加振の結果と非常によく一致した。ただし、発生ひずみはやや小さめである。
- などである。

4.3 実体加振法

実体あるいはできるだけ大きなモデルを加振して、強度的に耐えることを検証できれば机上計算だけよりもさらに安心感が持てる。そのため、これまでにも幾つかの大形加振機が作られ活躍している。とくに現在では油圧機器が高度に発達してきたために、任意波形で大出力をもって加振できる試験機が登場している。

表 4.1 モデルと実体の換算式
Scale factor for model test.

諸 元	記 号	モデルと実体の関係式
長 さ	L	$L_m = (1/\lambda) L_p$
密 度	ρ	$\rho_m = (1/\rho) \rho_p$
時 間	t	$t_m = (1/\lambda) \sqrt{\mu/\rho} t_p$
変 位	δ	$\delta_m = (\mu/\lambda^2 a \rho) \delta_p$
加 速 度	α	$\alpha_m = (1/a) \alpha_p$
外 力	F	$F_m = (1/\lambda^3 a \rho) F_p$
ヤ ン グ 率	E	$E_m = (1/\mu) E_p$
ひ ず み	ε	$\varepsilon_m = (\mu/\lambda a \rho) \varepsilon_p$
応 力	σ	$\sigma_m = (1/\lambda a \rho) \sigma_p$
周 波 数	f	$f_m = \lambda \sqrt{\rho/\mu} f_p$
ポ ア ソ ン 比	ν	$\nu_m = \nu_p$

ここに λ : 長さの比 ρ : 密度の比 a : 加速度の比 μ : ヤング率の比
また、サフィックスの m はモデルを p はプロトタイプを示す。

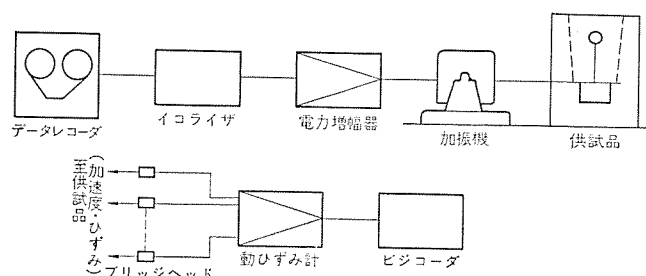


図 4.2 モデルによる加振試験のブロック図
Block diagram of shaking test of model.

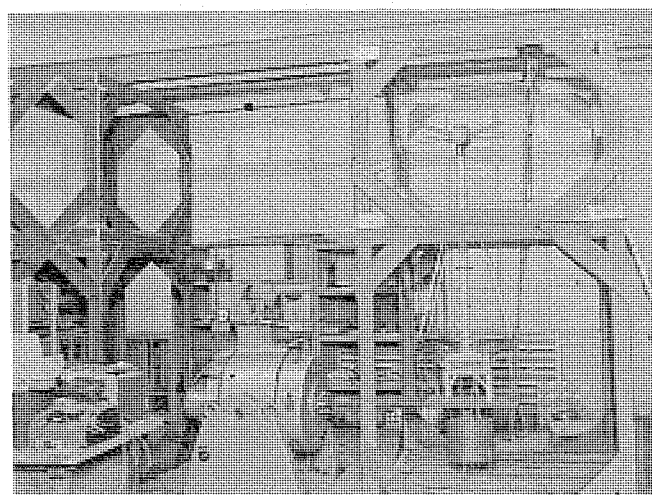


図 4.3 1/5モデルの任意波形による振動試験
View of 1/5 scale model shaking test by random waveform.

当社は、初期において油圧ユニットとピストンを組み合わせ、ソレノイドバルブで ON-OFF することにより台車を揺動させて加振試験を行なった。その後、この装置を発展させて電油サーボ形の大形加振機を製作して設置した。この加振機の仕様、諸元などについては表 4.2 および図 4.4~4.5 に、電気油圧式制御系のブロック図を図 4.6 に示す。これまでの経験を生かして、この加振機は次の点をとくに注意して製作されている。

- (1) 台車の剛性を十分にとる。とくに台車の両側に丸軸をつけ、合計 6 点のジャーナル軸受で受けて変形を防いでいる。
- (2) 加振機の固有振動数をできるだけ高くとり、制御特性を良くするためにシリンダの直径を大きくとっている。必然的に油量は増大するので増幅案内弁をそう入している。
- (3) ポンプユニットの吐出油量は十二分にとり、アキュムレータはリッフルの除去だけにそう入している。

表 4.2 おもな仕様
Main performance characteristics.

加振力	17 t・g
最大振幅	±75 mm
積載重量	7 t
最大速度	45 cm/s
加速度	2.4 G (at 15 Hz 実測)
周波数範囲	0.1~15 Hz (実測 90 Hz)
振動波形	正弦(Sinusoidal), 〇形(Square), 三角波(Triangular), 外部信号による任意波形(Random Wave)
主ループの油圧源	
最大油圧力	140 kg/cm ²
最大油量	1,700 l/min (連続 Continuous 1,090 l/min)

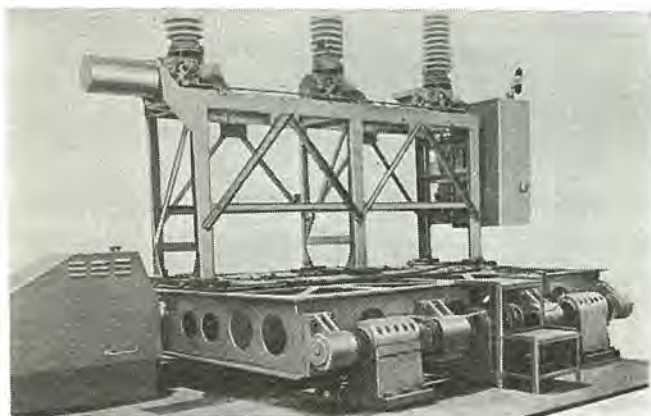


図 4.4 アクチュエータおよび加振台
Actuator and shaking table.

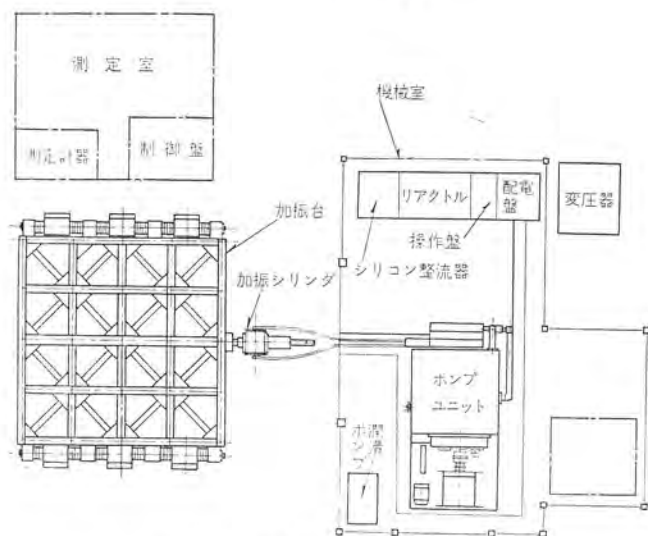


図 4.5 大型加振機試験設備配置
Plane view of shaking test laboratory.

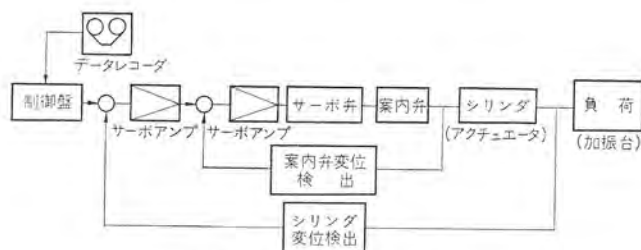


図 4.6 サーボ系ブロック図
Block diagram of servo loop.

(4) 直流モータを使用してメインポンプの回転数を微小調整して効率的な運転を行なっている。

(5) ポンプの騒音を低減するために油中に設置している。

(6) サーボ系の油圧は別ループを使用して安定化している。

以上、全般に非常にぜいたくで余裕のある設計になっている。

この加振機は任意波形で加振できる点が最大の特長であるから、この点を生かして多くの試験を行なった。加振試験においては通常は以下の項目について測定を行なっている。

- (1) 固有振動数
- (2) 減衰比率
- (3) 加振台加速度対各部の発生ひずみ
- (4) 先端部加速度対各部の発生ひずみ
- (5) 加振台加速度対先端その他の部分の加速度
- (6) 各種地震波、正弦波印加に対する各部の応答

また加振中に各部の動きを詳細に観察し、締結部のゆるみとかクラック発生の有無をチェックすることも重要である。供試品をのせる場合基礎の取付けが重要であるから、加振台の上に 40 mm の厚鋼板を多数点でボルト締めし、この上に供試品をのせて溶接するか現地取付けのボルトと同サイズのボルトで取付けを行なっている。加振試験の状況を図 4.6 に示す。ひずみの測定はストレインゲージを張架し、加速度は抵抗線ひずみ計形の加速度計でどちらも動わい(歪)計を介して測定する。周波数範囲から考えて記録計としてはペンオシロが最適である。

固有振動数の測定は正弦波の周波数を連続的に変えて行なうか、微小ステップで周波数を変えて行なう。後者のほうがむしろ正確である。

任意波形でこれまでに加振した例は

- (1) El Centro 地震波 (1940 年 5 月 8 日)
- (2) Taft 地震波 (1952 年 7 月 21 日)
- (3) 埼玉地震波 (1956 年 2 月 14 日)
- (4) 新潟地震波 (1964 年 6 月 16 日)
- (5) 正弦 1~4 波

である。地震波は東京大学の地震研究所所有の波形を採録させてい



図 4.7 加振状況
Under shaking test of hyper high-circuit breaker.

Elcentro 地震に対するしゃ断器の応答波形

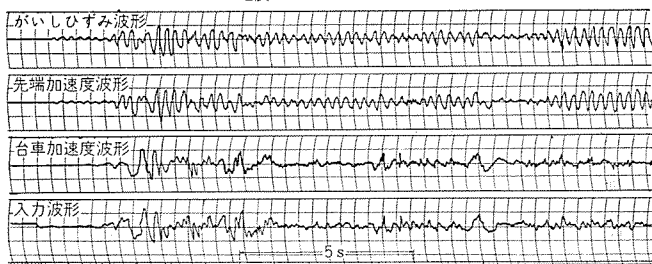


図 4.8 El Centro 地震波に対するしゃ断器の応答波形
Response waveform of circuit breaker to El Centro earthquake.

新潟地震に対するしゃ断器の応答波形

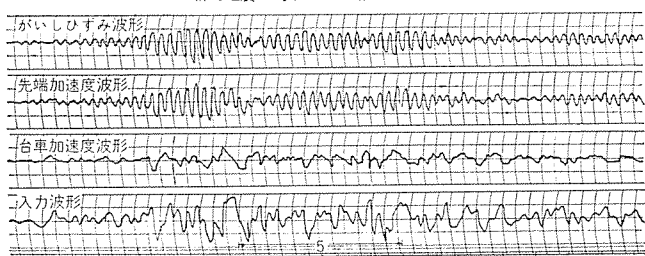


図 4.9 新潟地震波に対するしゃ断器の応答波形
Response waveform of circuit breaker to Niigata earthquake.

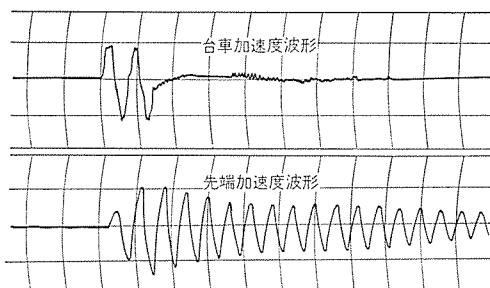


図 4.10 正弦2波に対するしゃ断器の応答
Response waveform of circuit breaker to 2 sine pulses.

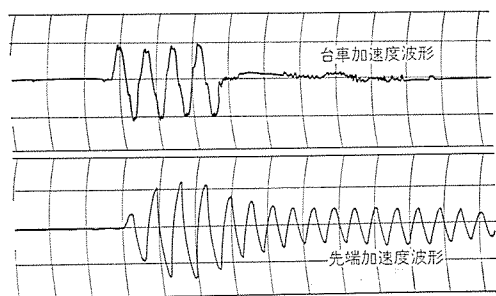


図 4.11 正弦4波に対するしゃ断器の応答
Response waveform of circuit breaker to 4 sine pulses.

ただいたものであり、正弦1～4波はアナコンによって発生した波形を採録したものである。これらの波形による加振試験のオシロの数例を図4.8～図4.11に示す。

実体の加振試験によって

- (1) 理論計算およびモデル実験の精度
- (2) 減衰比率の振幅依存性
- (3) 実体加振でなければわからない締結部の動きやステイの作用

などが明らかになり、耐震強度の検討に対して非常に有益なデータが得られた。

5. 総合的検討

これまで各種の検討方法とその結果について述べてきたが、ここで総合的な考察を行なってみる。

5.1 地震波の周波数成分と最大加速度

順序が逆になったが耐震強度を検討する場合、まず、対象とする構造物がどのような性質の地震波にさらされるかを考える必要がある。

第一に地震波の周波数成分であるが、Response spectrumあるいはPower spectrumなどで表示されたデータがある。これらのデータを総合すると周波数範囲が明確になる。1956年に国内で起こった地震のスペクトラムの一例をとれば、0.5 Hzから10 Hzの範囲にほとんどはいつてしまう。武藤氏の求めた国内および外国の応答スペクトラムの数例⁽⁶⁾によれば、中心の周波数は0.4 Hzから4 Hz、十分大きめにとっても0.2 Hzから20 Hzの範囲にはいる。大高氏の求めたEl Centro波のパワースペクトラム⁽⁷⁾によれば、1～4 Hzに優勢な成分があり、0.1～20 Hzをとればほぼ全成分がはいる。M. Rocha⁽⁸⁾が各国の強い地震のパワースペクトルを求めた結果では、0.4～5 Hzである。したがって、普通は0.4 Hzから10 Hzまで、十分広くとっても0.1～20 Hzである。後者の範囲なら屋内の場合まで包含されよう。

第二は地震波の最大加速度であるが、波形もきれいに記録されている最大のはEl Centro波(1940年)で、0.326 G(P-O)である。新潟地震、松代地震もこの値より低い。えびの地震で0.45 G程度の値が観察されたとの報告もあるが推定値である。

ところで、マグニチュードMと震度の関係を示す式が多数提案されているが、Housnerや坪井氏はMに上限のあることを示しているので、最大加速度にも上限のあることが推定される。金井氏は地盤の振動特性を加味してM対加速度の関係式⁽⁹⁾を出している。この式では地動の卓越周期さえ短かければ、一見加速度はどんどん大きくなるようだが卓越周期にも限度があるから非常に短い仙台とかEl Centroの値をとると、せいぜい0.4 Gである。

一方、地殻のひずみの限度から考えて、地割れを伴わずに発生できる最大加速度は約0.5 Gとする説もあるので、Housnerが耐震検討の上限として0.5 G(El Centro波の1.5倍)をとったのも首肯できる。これらより、最大加速度値として0.5 G(P-O)を見込めば十分と考える。

5.2 減衰比率、応答倍率の振幅依存性

耐震強度を検討する場合、減衰比率 ζ 、あるいは応答倍率Qは非常に重要な意味を持つ。とくに、理論計算だけで検討する場合は ζ のいかんで数値はかなり変わるから注意しなければならない。初期の段階では $Q(=1/2\zeta)$ としてさまざまな値が提出された。

しかし一般に構造物は純粋の粘性抵抗は持たず、固体減衰をかなり行なうはずであるから、加振力を上げて振動の振幅を増せばQは小さくなることが予想される。そこで、モデルについてこの実験を行なったところ、顕著な振幅依存性が観察された。その後各種の実体についてこの特性を測定したが、いずれもこの現象が観察された。実体の応答倍率の振幅依存性の一例を図5.1に示す。がいしを主体とする構造物は、がいしのひずみが 100×10^{-6} から 200×10^{-6} の範囲で試験されることが最も多いようであり、 $Q=10 \sim 12$ 程度の報告例が多いのは当然である。実際の地震に遭遇した場合も上記の数値の範囲で振れることが多いと思われるので、がいし形の機器では特別なものを除いて $\zeta=0.05$ をとり、振幅が成長してQの下る事実

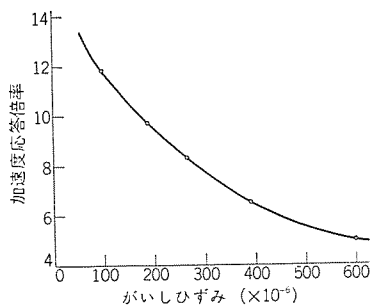


図 5.1 加速度応答倍率の振幅依存性の一例
Example of accel. response factor vs. porcelain strain.

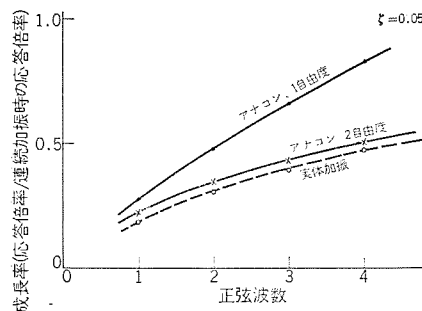


図 5.2 共振正弦波加振に対する最大応答曲線
Normalized transient response factor vs. input sine wave number at resonant frequency.

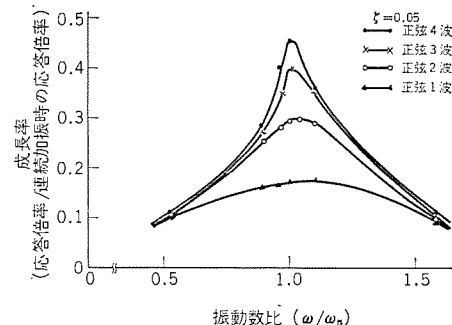


図 5.3 実加振による正弦 1～4 波加振に対するシャ断器の応答
Frequency ratio vs. normalized transient response factor to 1～4 sine pulses (shaking results of circuit breaker).

は裕度として見ておけばよいであろう。

5.3 地震波に対する構造物の最大応答

応答スペクトラム法から実体加振試験にいたる最大応答倍率について検討してみる。4種の地震波に対するスペクトラムを図3.3に示したが各地震波によって最大値をとる周期は異なるが、包絡線を描けば、この曲線から少なくとも4種の地震波に対する最大応答量を安全側で求めることができる。それぞれの地震波を詳細に観察すれば、波形はかなり異なっているが、最大応答量はあまり大きくずれない。おそらくその他の地震波のスペクトラムをもってきて、このスペクトラムの包絡線から大きくはみ出ることはないであろう。

上の曲線は減衰比率に対応して変化するから、これをパラメータとする曲線群ができる。われわれが求めたスペクトラムによれば、 $\zeta=0$ で約12倍に達するものもあるが、 $\zeta=0.04\sim0.05$ と常識的な値をとれば約4倍にとどまる。Blumeらの作ったスペクトラムで $\zeta=0.02$ ときびしい値をとって最大値を求めると4.3倍である。ところで、振動系の自由度を増していくと、1自由度の場合よりも応答量は小さくなる。これは計算例が少ないので断定するのは早計であるが、実体を多自由度系とみなせば少なくとも1自由度系よりかなり低い。したがって、各種の地震波に対する構造物の最大応答量は、1自由度系の応答スペクトラムの包絡線を越えることはないと考えてよいであろう。

5.4 共振正弦 1～4 波加振に対する応答

正弦波形の1波とか3波が突印された場合、どうなるかが論議されているので、これに対する応答量を求めてみた。結果の一部は前出の図に示すとおりである。アナコンによるシミュレートの結果と実体加振の結果を図5.2に示す。また、実体に対して入力正弦波をパラメータに、加振周波数を変えて測定した応答倍率の曲線を図5.3に示す。これらの結果から、1質点系では $\zeta=0.05$ の場合でも正弦4波が加わると連続加振の87%に達することがわかる。実体加振では約50%である。地震波に対する応答量と比較すると過酷である。

いま地震波応答の最大値を基準にとり、これと等価の応答量を示す正弦波入力の波数を求めると

- | | |
|---------------------|-----------------|
| (1) アナコンの1自由度応答から | 2波 (0.33 G P-O) |
| (2) アナコンの2自由度応答から | 2波 (0.33 G P-O) |
| (3) 実体加振の結果から安全側に見て | 2波 (0.33 G P-O) |
- なお、3波にすると0.22 G(P-O)で等価となる。この正弦波波応

答は理論計算から求めるのは容易であるが、実体加振で行なおうとする場合は、電池サーボ型以外の加振機では相当の困難を伴うので、正弦波連続加振で加振加速度値を下げる方法をとるのも一つの策であろう。

6. む す び

以上、各種の検討方法とそれによって得られた結果について述べてきたが、耐震強度の検討に関する課題はつきない。今後も継続して研究しデータを集積していく必要がある。しかし検討の基準とすべき基本的数値は、これまでの結果や多くの文献から定めることができると思える。しかるべき機関において審議し、規格を明文化することを切望する次第である。なお、この報告書では耐震強度だけを取上げたが、もう一つ保護リレー類の地震における誤動作が大きな問題となっている。この件についてもすでに研究を行なっているが、今回は報告を割愛する。

この研究にあたり終始ご指導をいただいた京都大学建築教室の金多教授、大形加振機の製作、各種の機器の耐震強度の検討および試験にじん力された関係各位に対し、紙上を借りて深甚なる謝意を表する。

参 考 文 献

- (1) H. C. Hitchcock, New Zealand electricity department: Electrical equipment and earthquakes
- (2) 山内, 高橋, 篠原: 昭44連大, No. 777
大野, 稲村, 高橋, 奥津: 昭44連大, No. 778 その他
- (3) 田治見: 耐震理論に関する基礎的研究, 東大生研報告
- (4) 金多: 超高層鉄筋コンクリート建築の耐震設計, 日本セメント協会
- (5) 小高: 耐震構造の総合的研究, 宇野書店
- (6) K. Muto: Recent trends in high-rise building in Japan
- (7) 大高, 中村, 入江: ボイラおよびボイラ建屋の耐震設計に関する研究, 三菱重工技報 4, No. 6
- (8) M. Rocha: Stress Analysis, John Wiley and Sons
- (9) 金井: 地震動の振動特性に関する実験式, 耐震工学シンポジウム

モールド絶縁材料

寺谷 宏*・福島 二郎*・田嶋 尚志**・伊藤喜代之**

Casting and Molding Materials for Electrical Insulation

Central Research Laboratory Hiroshi TERATANI・Jiro FUKUSHIMA

Sagami Works Hisashi TAJIMA・Kiyoshi ITO

For the insulation of electric apparatus, a number of materials are used in various forms. However, from the viewpoint advantages derived from the compactness of machines and the ease of maintenance and inspection of them, molded insulation with solid materials is increasingly coming into use because of bonding and covering to form the apparatus into integral structure. On the other hand, with the improvement of the function of machinery characters demanded for molding insulation materials are becoming by far severer.

This article describes consideration on the development of insulation materials, and recent trends and problems with epoxy casting resin and ethylene propylene rubber as the main subject.

1. ま え が き

電気機器の絶縁には種々の材料が種々の形態で使用されているが、機器の小形化、保守点検作業の軽減などの要求から、固体絶縁材料による絶縁、接着、被覆等を兼ねた一体構造の絶縁処理方式（以下これをモールド絶縁とよぶことにする）の採用が増加しつつある。その対象機種も次第に大形化し、使用電圧も高くなっているのみならず従来の部品への適用から一歩進めて、ある一つの機能を有する装置全体を固体絶縁により一体化処理する方向に進みつつある。

モールド絶縁を行なうに際しては、機器の要求性能を満足するような材料はもちろん設計、工作法にも十分な配慮が払われねばならない。材料はモールド絶縁の基礎となるべきものであり、材料の性質にあわせて有効適切な設計、工作法を検討すると同時に、これらの因子を含めた要求性能を満足する材料の開発を進める必要があると考える。

当社で使用している固体絶縁材料は有機物、無機物をあわせ多種にわたるが、モールド絶縁に使用されているのは、熱硬化性注形成樹脂とゴム成形材料が主であるが、ここではエポキシ系の注形成樹脂とブチルゴムおよびエチレンプロピレンゴム成形材料を中心に、開発における基本的な考え方と最近の動向、問題点について述べてみる。なおこれら材料の使用状態は機種によりかなり異なるので、実際例についてはそれぞれの機種に関する他の報文、説明書等とあわせてご覧願えれば幸いである。

2. モールド絶縁材料の開発の考え方

モールド絶縁材料の開発にあたっては、まず適用機種の要求性能を明確に知る必要がある。材料として、すべての面において満足な性質を有するものはなく、ある性質が良いものは他の面で劣るのが普通であるといっても過言でない。そこで、最も重要と考えられる性質より順次検討を行ない、要求に合致する材料を開発せねばならない。最初は標準的な試片と試験法による選別を、ついで要求される特殊試験を行なって数種の候補材料に絞り、最終的に実機を試作し、初期性能および特殊環境試験が行なわれる。もちろん各試験検討の結果は前段階にフィードバックされながら開発が進められる。この関係を、たとえばエポキシ注形成樹脂の場合について Schühlein⁽¹⁰⁾ が

表 2.1 エポキシ樹脂(注形用)検討方法
Evaluation process of epoxy casting resins.

述べていることを補足してまとめると表 2.1 に示したようになると思われる。これは他の材料についても、最初の原料選定の項以外の検討項目は似たものといえる。また、主材料のみならず実機において使用される各種の材料についてもそれぞれ試験を進めるとともに、主材料と他の使用材料との組み合わせ時の複合的な性質についても、十分な検討が必要であるのはいうまでもない。さらにこのようにして開発された材料は、機器の要求性能を満足することを前提として、経済的な要求すなわち入手が容易で低価格であり、作業性が良好であることが望ましいのは当然である。

モールド絶縁材料開発の基本的な考え方は以上のとおりであるが、試験項目によっては、ただちに結果が判明せず長時間を要することを考え、将来の動向を予測して必要となるデータを蓄積しておくことが重要であるのは論をまたない。

3. 樹脂系およびゴム系モールド絶縁材料

現在モールド絶縁には、樹脂系の注形成材料とゴム系の成形材料が主として使用されているが、この両者には見かけ上表 3.1 に示すような差異がある。最も大きな違いは、樹脂は強度が高く変形が小さいので、寸法精度のきびしい構造物を兼ねた部分に適しているが応力によりクラックが発生しやすい傾向があるので、材料の開発、設計、工作に細心の注意を要するのに対し、ゴムは柔軟性に富み、衝撃に

表 3.1 注形樹脂とゴム成形材料の比較
Comparison of casting resin and rubber molding compound.

項目	材 料	注 形 樹 脂	ゴ ム 成 形 材 料
注形または成形条件			
圧 力		低 (真空～数気圧)	高 (10 kg/cm ² 以上)
温 度		室温～200℃	140～200℃
機 械 的 性 質			
抗 張 力		中～大	小～中
伸 び		小～中	中～大
耐 衝 撃 性		小～中	中～大
電 気 的 性 質			
誘電率, 誘電体損 固有抵抗値		良～優	良～優
絶縁破壊電圧		大	中
耐 コ ロ ナ 性		中～大	大
耐トラッキング性		中～大	大
熱 的 性 質			
耐 熱 性		中～大	中
耐 寒 性		小～中	大
膨 張 係 数		小～中	中～大
耐 薬 品 性			
水		中～大	中～大
無 機 薬 品		中～大	中～大
有 機 溶 剤		中～大	小～中
油		中～大	小～中
耐 候 性		中～大	大

注) 樹脂とゴムはモールド絶縁において一般的に使用されるものを取りあげてある。

強くクラック発生のおそれはないが、寸法精度、強度面で要求のきびしい箇所への使用に適さないことであろう。したがって機器の要求性能を考慮し、これら材料の特長を生かすように使いわけることにより、すぐれたモールド絶縁機器を製作するのが可能となる。

4. エポキシ注形樹脂

エポキシ樹脂は硬化時の収縮が小さく、接着性がすぐれているうえに、電気特性・機械的強度・熱的および化学的安定性が良好であることなどに加えて、エポキシ樹脂・硬化剤・硬化促進剤・希釈剤・可とう性付与剤などの樹脂部成分および充てん剤などの種類が多種多様に存在することから希望の特性を有するエポキシ樹脂組成物をえやすいので、注形品に適用される材料の中でもとくに大きな役割を占めているのが現状である。最近では、このようなエポキシ注形樹脂に対して要求される条件は、きびしいものあるいは特殊なものが多くなりつつあり、たとえば

- (1) より大形の注形品の製作、あるいは構造材料的な性格の強い注形品の製作のために耐熱衝撃性・耐衝撃性などの機械的強度にすぐれていること。
- (2) 機器を小形軽量化あるいは高性能化とするために、より高い耐熱性を有すること。
- (3) 熱伝導性にすぐれていること。
- (4) とくに屋外用としての注形品を製作するために耐候性、耐トラッキング性あるいは耐アーク性にすぐれていること。
- (5) 高電圧下においても適用できるように耐電圧、耐コロナ性や耐トリッキング性にすぐれていること。
- (6) 事故が発生したときの火災の発生による災害を防止するた

めに難燃性であること。

- (7) 特殊な環境下でも適用できること。

(8) すぐれた注形品をしかも大量生産できるために、注形作業が合理的かつ簡単であること。

などである。しかも実際の機器においては以上の諸特性が組み合わされて要求されるので、このような要求を満足させるにはエポキシ樹脂、硬化剤、可とう性付与剤および充てん剤などを合理的に選定するとともに、そのようにしてえられるエポキシ樹脂組成物の諸特性を基礎的な面から機能的な面にわたって十分検討する必要がある。

4.1 耐熱衝撃性、機械的強度

注形品においては種々の原因により内部残留応力が発生し、さらにこれに熱衝撃が印加されたりして樹脂が割れることがしばしばある。注形品にクラックが発生すると、その注形品は電氣的、機械的な面の特性において要求を満足することができなくなり、使用不可能となることが多い。エポキシ樹脂を注形用材料として用いる場合は、この点についてとくに留意する必要がある、この解決策としてはたとえば可とう性を著しく増加させる方法があるが、この場合は電氣的、機械的な特性を犠牲にすることが多いので一般には好ましくない場合が多い。

つまりこのような問題に対して、エポキシ樹脂の各種応力による破壊強度⁽¹⁸⁾は次のように考えられる。

- (1) 注形品を成型後の注形樹脂中に発生している内部応力は、エポキシ樹脂の硬化過程およびエポキシ樹脂と埋込物の弾性率、線膨張係数などの物理量と関係づけることができ、大部分(90%強)の内部応力はエポキシ樹脂の二次転移温度から室温までの冷却過程において発生していると考えられること⁽¹⁾。

- (2) 上記のいわゆる材料因子⁽²⁾と埋込物および注形型の形状との関係により発生する内部応力の分布、種類および大きさ、さらにこれに熱衝撃が印加された場合の変化。

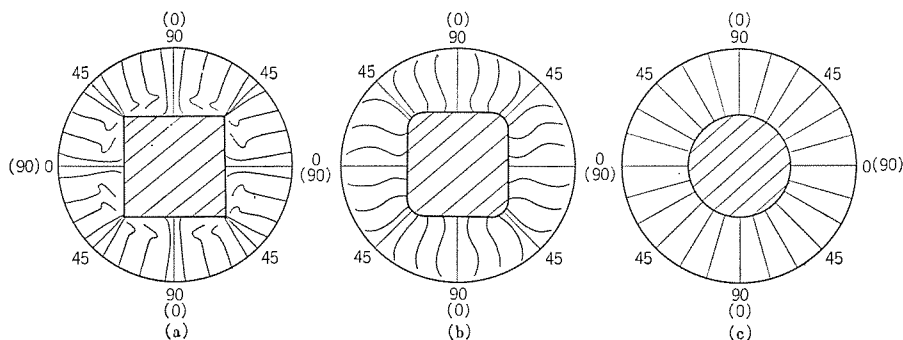
および注形品が長期間にわたって使用される関係上、

- (3) クリープや疲労および熱劣化などのいわゆる注形品が使用される環境に即した因子によるエポキシ樹脂の破壊強度の変化、ならびに上記(1)および(2)の原因により注形品中に発生する内部応力の緩和も含めて、やはり同じ因子によるところの内部応力の変化、との関係を十分に握してエポキシ注形樹脂の選定、ならびに注形される機器(埋込物)の材質や形状の決定をする必要がある。

これらは非常にむずかしい問題ではあるが、われわれはこのような問題に対して知見を与えるために、主として光弾性法およびストレイグージ法を用いて検討している。注形品の大きさおよび埋込物の大きさも材料因子と関連して内部応力の大きさに関係することは明らかであるが⁽¹⁾、実際面においては、とくに埋込物の形状が内部応力の分布、種類および大きさに大きく影響する。したがってこの点の検討は重要であり、図4.1および図4.2に二次元光弾性法を用いて検討した結果の1部を示す。

図4.1の(a)をみると埋込物の角部に等傾線が集中しており、この角部はいわゆる集中荷重点の作用点⁽³⁾であることがわかるが、R付きの角部はもはや集中荷重点ではなくて同図(c)に示す円形の埋込物の場合のように、分布荷重の作用する部分に近いものとなり、内部応力の集中はかなり緩和されているものと考えられる。

また図4.2をみると、樹脂の収縮方向に対する埋込物の拘束条件の違いにより発生する内部応力の種類が異なって現われることがわかり、図4.2の(b)の場合のように二つの埋込物をあらかじめ



斜線部：埋込物（金属） 実線：等傾線（数字は傾度を示す）

図 4.1 等傾線図（二次元光弾性法）
Sketch of isoclinics (two-dimensional photoelastic method).

相互に固定し、一体化しておいた状態のものを長方形の注形用型の中に置き、周囲をエポキシ樹脂で注形した場合には、二つの埋込物間に存在する樹脂部分の縦方向には引張主応力が現われているのがみられ、(a)の場合と異なっていることがわかる⁽⁴⁾。

しかしこのような内部応力もゴムのような弾性体を塗布することにより、その大きさを著しく低下させることができる⁽⁵⁾。

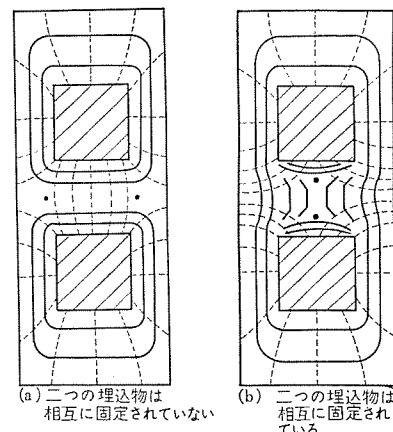
なお実際面においては前述した(1)および(2)以外にエポキシ樹脂の硬化時の発熱や、硬化させるときの不均一な加熱あるいは冷却などのいわゆる熱因子⁽²⁾により発生する残留ひずみ⁽⁶⁾が、注形品の耐熱衝撃性などに悪影響をおよぼすかどうかについても考慮する必要がある。これらはエポキシ注形樹脂の選定、および注形品を成型するときのプロセスにおいて検討すべき問題であり、低発熱のエポキシ注形樹脂を選定するとともに成型時に不均一な加熱、あるいは冷却をさけることが肝要となる。

ところで、エポキシ注形樹脂相互の耐熱衝撃性を比較検討するための簡単なモデル試験として、われわれは埋込物としてのワッシャーの形状ならびに印加する熱衝撃の条件を種々検討した結果、主としてオリファントワッシャー試験法⁽⁷⁾を1部変更した方法を用いて検討している。

すなわち図4.3の(a)に示すオリファントワッシャーを同じく図4.3の(b)に示す注形用受け皿を用いて注形し、所定の硬化条件で硬化させたのち、離型してえられる試験片5個に対し表4.1に示す熱衝撃サイクルを印加しクラックを発生させる。クラック発生の有無は冷却後チェックする。なお無充てん⁽⁸⁾のエポキシ樹脂の場合のように、熱衝撃に弱いものについては、アルミニウム製のオリファントワッシャーを用いて試験することもある。かくしてクラックの発生したサイクル番号の平均値をそのエポキシ樹脂組成物の耐熱衝撃指数値と定め、この値の大・小よりエポキシ注形樹脂の耐熱衝撃性を評価している。

この方法で無充てんの場合および充てんした場合の各段階で耐熱衝撃性にすぐれたものを選定するわけであるが、この耐熱衝撃性に対して充てん剤の種類の影響も大きく、表4.2に最も一般的な充てん剤であるシリカ粉末と比較した結果を示す。表4.2をみると、セラミックス系などの特殊な充てん剤を用いることにより、一般に機械的強度にとぼしいと考えられていた脂環式のエポキシ樹脂でも、かなりきびしい耐熱衝撃性が要求される注形品に対しても十分適用できるくらいすぐれた耐熱衝撃指数値を有するものになることがわかる。

結局耐熱衝撃性などの機械的強度にすぐれた注形品をえるためには、上記記述したような事柄を十分検討し、エポキシ注形樹脂の選定ならびに注形される機器の設計をおこなって注形品を製作するが、



-----：圧縮主応力 ————：引張主応力
・印：特異点（この場合はいずれも零点）
斜線部：埋込物（金属）

図 4.2 主応力線図（二次元光弾性法）
Principal stress patterns (two-dimensional photoelastic method).

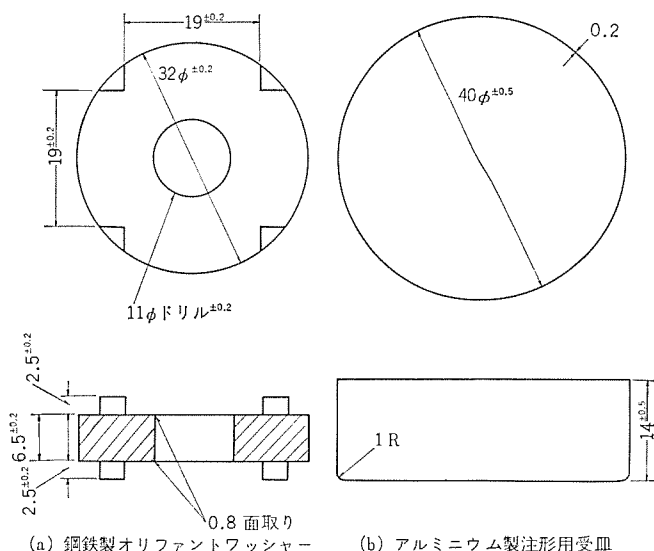


図 4.3 耐熱衝撃性試験用器具
Tools used in test for thermal-shock resistance.

表 4.1 熱衝撃サイクル
Thermal-shock cycles.

サイクル番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
温度差	105°C	105°C	105°C	105°C	105°C	120°C	135°C	150°C																
	0°C	-15°C	-30°C	-45°C	-60°C	-60°C	-60°C	-60°C																

注) 高温側は30分間、低温側は10分間保持する。

表 4.2 耐熱衝撃性におよぼす充てん剤の効果
Effects of various fillers on thermalshock resistance.

樹脂部	充てん剤の種類	充てん率 (重量%)	耐熱衝撃指数値
ビスフェノールA型 エポキシ樹脂	シリカ325メッシュ	60.3	4.0
	セラミックス系充てん剤 A	63.9	10.0
	B	66.7	14.0
	C	66.7	12.0
脂環式エポキシ樹脂	シリカ325メッシュ	66.6	0.0~1.0
	セラミックス系充てん剤 A	68.3	8.4

注) 樹脂部の配合は各場合において同一配合である。
硬化条件、ビスフェノールA型エポキシ樹脂：120°C×20~24時間
脂環式エポキシ樹脂：90°C×16時間+130°C×18~20時間

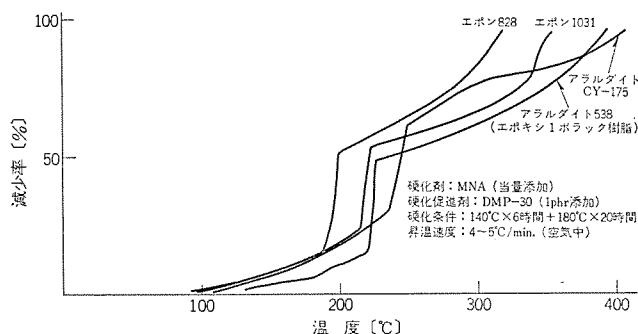


図 4.4 熱重量曲線
Curves by thermogravimetric analysis.

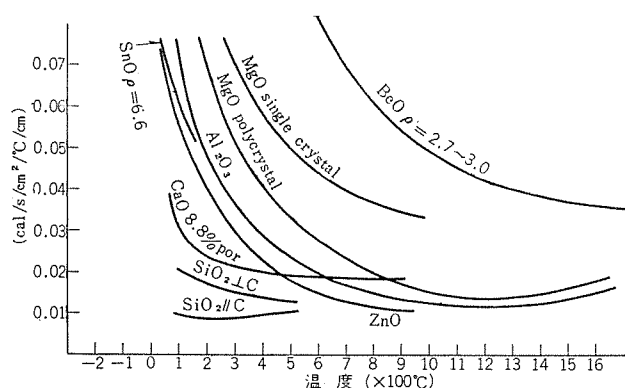


図 4.5 酸化物の熱伝導率⁽²⁰⁾
Thermal conductivities of various oxides⁽²⁰⁾.

表 4.3 熱伝導性によぼす充てん剤の効果⁽¹⁹⁾
Effects of various fillers on thermal conductivity⁽¹⁹⁾.

充てん剤の種類	充てん率 (体積 %)	熱 伝 導 率 (Cal/sec/cm²/°C/cm×10⁻⁴)		
		充てん剤	樹 脂 部	充てん剤入り樹脂
アルミニウム 30 メッシュ	63	4970	4.7	60.4
砂	64	28	4.7	23.6
マイカ 325 メッシュ	24	16	4.7	12.2
アルミナ (平板状)	53	723	4.7	24.5
アルミナ (Bimodular 平板状)	58	723	2.0	36.5
アルミナ 325 メッシュ	48	723	5.4	34.0
銅 粉	60	9180	5.4	39.0
シリカ 325 メッシュ	39	28	5.4	18.3

最終的な確認として注形品にかなりきびしい熱衝撃を印加させて、発生する全内部応力にエポキシ注形樹脂が十分耐えることができることを確認する必要がある。

最近においては、エポキシ樹脂製の懸すいがいしなども含めてこのような注形品が構造材料的な使用に供されることが多く、この場合には使用状況を考慮した注形品の機械的強度、とくに疲労特性なども十分検討して実用に供することが必要となる。

4.2 耐熱性

エポキシ樹脂組成物の耐熱性を向上させるには、いろいろな方法がある。まず熱分解や熱酸化に対して抵抗性の大きなもの、高温でも電気的・機械的特性の低下しないものすなわち化学構造上、熱的に安定な結合、分子間力を多く有しているような材料、たとえば芳香族系、ヘテロ環系の剛直な骨格を分子内に有しているエポキシ樹脂や硬化剤を使用する方法、さらには組成物の架橋密度を高くするまた

は架橋密度が高くなるような多官能性のエポキシ樹脂や硬化剤を使用する方法が考えられる。この種のエポキシ樹脂としては、脂環式のエポキシ樹脂であるアラルダイト CY-175 (CIBA)、ユノックス 207 (U. C. C.) などやエポキシノボラック樹脂、エポキシクレゾールノボラック樹脂、エポキシシレピソノール樹脂、エポキシ化シアヌル酸樹脂 (Henkel & Cie. GmbH), シリコン樹脂や多官能性のエポキシ樹脂であるエポン 1031 (Shell Chemical) や QX-3476 (Dow Chemical) などがある。

また硬化剤としては PMDA (Pyromellitic dianhydride), TMA (Trimellitic anhydride), ヘット酸, MNA (Methyl nadic anhydride), NA (Nadic anhydride), CPDA (Cyclopentane dianhydride), BTDA (3, 3'-4, 4'-Benzophenone tetracarboxylic dianhydride) のとき酸無水物系の硬化剤が有名である。図 4.4 に若干の耐熱性にすぐれたエポキシ樹脂の T. G. A. による結果を示す。

4.3 熱伝導性

機器の小形化あるいは耐熱性の向上に対しては、用いる材料の熱伝導性の良否も大きく関係する。無充てんエポキシ樹脂の熱伝導率はだいたい $4.0 \sim 6.0 \times 10^{-4}$ Cal/sec/cm²/°C/cm 程度であるが、これに熱伝導性の大きい無機質の充てん剤を添加することにより熱伝導率を向上させることができる。この場合当然のことではあるが、充てん剤の大きさ、粒形、種類や充てん率などが関係する。また同じ充てん率であれば、熱伝導性の大きい充てん剤をできるだけ微粉にして充てんすれば効果的となるようである。

電気絶縁性を有し、充てん剤として使用できるものの中では一般に金属酸化物の熱伝導性が大きい、中でも酸化ベリリウム (BeO) の熱伝導性が最も大きく金属に匹敵する。したがってこの種の充てん剤を用いることにより、エポキシ注形樹脂の熱伝導率を向上させることができる⁽⁸⁾。その他、アルミナ、マグネシア、酸化亜鉛の熱伝導性も良好ではあるが、図 4.5 をみればわかるように酸化ベリリウムにくらべて大幅に劣る。なお、表 4.3 に若干のエポキシ注形樹脂の熱伝導率を示す。

4.4 耐アーク性、耐トラッキング性および耐候性

開閉器、しゃ断器の消弧室あるいはヒューズの保護筒などに使用される注形品の場合はアークにさらされるので、これに用いる材料は耐アーク性にすぐれていなければならない。また従来の磁器製がいしなどの分野にエポキシ樹脂製のものが適用される傾向にあるが、このように注形品を屋外あるいは汚損の激しい所で使用する場合には、これに用いる材料は耐候性および耐トラッキング性にすぐれていなければならない。このような目的に対し最近では脂環式のエポキシ注形樹脂が実用化されており、代表的なものにエポン 190 (Shell Chemical), エポン 172 (Shell Chemical), アラルダイト CY-180 (CIBA), アラルダイト CY-185 (CIBA) や ユノックス 221 (U. C. C.) などがある。

このような脂環式のエポキシ樹脂と HHPA (Hexahydrophthalic anhydride) のようなやはり脂環式の骨格を有する酸無水物で硬化させたものを、耐アーク性については JIS. K-6911 法で、耐トラッキング性については電気学会耐トラッキング試験法専門委員会標準法および Dip-track 試験法⁽⁹⁾で試験した結果はいずれも各測定法の測定範囲の上限を越えており、実用に供しても問題ないと考えられる。

耐候性についても 1 年間の屋外ばくろの結果はビスフェノール A 型のエポキシ樹脂にくらべて非常に良好であり、十分実用に供することができるものと考えられる。

しかしこのような脂環式のエポキシ樹脂も機械的強度において従来のビスフェノール A 型のエポキシ樹脂に劣る欠点があり、熱衝撃に対

しても弱い。したがって注形品に適用する場合にはこの点に留意する必要がある。たとえば硬化剤に PAPA (Polyazelaic polyanhydride) などを用いて可とう性を持たせる⁽¹⁰⁾とか、耐熱衝撃性にすぐれた特殊な充てん剤を用いるなどの工夫が必要となる。

4.5 難燃性

注形品に対しては プリント 配線基板 (ASTM. D-1867) とか通信機用トランス (MIL-T-27 A) にみられるような難燃性についての規格⁽¹¹⁾はないが、難燃性であるのが好ましい。

エポキシ注形樹脂を難燃化するには、ハロゲン化されたエポキシ樹脂や硬化剤を用いる方法と、3水和アルミナや三酸化アンチモンなどの難燃化剤を添加する方法があるが⁽¹¹⁾、3水和アルミナを除いてはいずれも耐アーク性および耐トラッキング性や耐熱性を低下させる欠点がある⁽¹²⁾。したがってエポキシ注形樹脂に対しては3水和アルミナを用いるのが好ましいが、この場合も機械的強度が低下するので他の機械的強度にすぐれた充てん剤と併用するなどの工夫が必要となる。

4.6 特殊な環境下における耐久性

エポキシ注形樹脂は、耐湿・耐水性、耐酸・耐アルカリ性などのいわゆる耐薬品性にすぐれていることが要求されるが、SF₆ガスを用いたしゃ断器などに適用する注形品においては、アークド SF₆ガスに侵されないことという特殊な性質が要求される。とくにこの場合において問題となるのが、最も一般的にエポキシ注形樹脂の充てん剤として用いられているシリカ粉末が完全にアークド SF₆ガスに侵されることである。したがってこの場合には、アークド SF₆ガスに侵されにくいアルミナ⁽¹³⁾やフッ化カルシウム⁽¹⁴⁾などがエポキシ注形樹脂の充てん剤として検討されている。

4.7 作業性

現在は主として高温でエポキシ樹脂や硬化剤などを調合したものを同じく高温で真空注形しているが、この場合材料の予熱、調合、注形などのプロセスを自動混合成形装置など⁽¹⁵⁾を使用して完全に自動化する傾向にある。完全に自動化されると各プロセスは従来よりも能率よく、かつ適確に規定どおりの作業がおこなわれるので、たとえば従来の注形樹脂に要求されていた不必要なほどの長い可使用時間は必要でなくなり、したがって従来可使用時間が短いため使用しにくかったが、短時間硬化・低温硬化の特長を有するアミン系の硬化剤を用いたエポキシ樹脂組成物が広範囲にわたって使用できることになる。しかし可使用時間の短いものは、一般に硬化時の発熱が大きいのでこの点が注形においては問題となることが多い。したがって低発熱で短時間硬化のエポキシ注形樹脂を選定することがこの場合重要となる。

また材料面においても従来の注形樹脂のように多くの成分を注形時に調合して用いるのではなくて、あらかじめ調合しておいた粉末状、ペレット状あるいは塊状のいわゆる一液性のエポキシ樹脂をホットメルトさせて注形（この場合は低圧成型とも考えられる）することも検討されている。

さらに処理方式の面においても、従来高压コイルなどを有する複雑な構造の機器においては、まずこのコイルなどを無充てん低粘度の含浸用樹脂で真空含浸処理し、ついでこれら全体を充てん剤入りの注形用樹脂で注形するといういわゆるダブルキャスト方式が用いられているが、これを

(1) 充てん剤入り（ただし、充てん率は従来の注形用樹脂の場合より低くしている）のエポキシ注形樹脂を用いて、1回の真空注形処理でコイルなどへの含浸および周囲の注形を同時におこなうとい

う方式。

(2) (1)の方式と逆に、最初に埋込物と注形用型の間に充てん剤を充てんさせておき、ついで低粘度の含浸用樹脂で真空含浸してコイルへの含浸および周囲の注形を同時におこなうという方式（基材充てん方式）。

などにより処理することもできる。

いずれにしても以上の方法は、従来熱可塑性樹脂の分野や電子部品などのごとき小形注形品の分野で用いられてきた注形・成型の方式などが中・大形注形品にも応用されたものであり、大量生産や作業性の合理化、エポキシ樹脂や硬化剤などによる人体への悪影響の防止あるいは特定の特性の向上（たとえば、基材充てん方式を用いると充てん率を大幅に増加させることができるので、樹脂の耐熱衝撃性を向上させることができる）などが期待できるが、含浸性などは従来のダブルキャスト方式のほうがすぐれている。したがってこのような点を十分検討して適用していく必要がある。

以上電気業界の進歩・発展につれて、最近のエポキシ注形樹脂に課せられた要求の動向を概説した。この他にも、高電圧機器へエポキシ注形樹脂を適用する場合の内部あるいは外部コロナ放電や、トリイングの発生による材料の劣化の問題があり、これらに対してもいまだ不明な点が多い。またたとえば耐熱衝撃性などのようにエポキシ注形樹脂に本質的についてまわる問題もある。しかしエポキシ樹脂のすぐれた特性および経済性が認められて、屋外用機器、耐アーク性や耐トラッキング性の要求される分野、大形品、高圧機器あるいは特殊品への分野でさらにその適用は増大していくものと考えられる。

5. EPDM およびブチルゴム

電気機器モールド絶縁用ゴム材料としては電気特性が良好であるとともに熱的性質がよく、耐食性、耐オゾン性、耐候性なども備えていることが要求される。また、エナメル線や紙、テープフィルムのような他の絶縁材料と相温性があり、金属類を腐食せずかつ接着性のよいことが必要である。ゴムコンパウンドとしては粘度が低くて低圧で成型でき、加硫温度が低くて加硫時間が短いことが望ましい。モールド絶縁用ゴムとしては、シリコンゴム、ウレタンゴムなども利用されているが、その大部分はブチルゴム (IIR) であり、これに続くゴムとしてエチレンプロピレンゴムがあげられる。

ブチルゴムはイソプレンと少量のイソプレンの共重合よりなる低度不飽和ゴムで、電気絶縁性、耐オゾン性、耐候性にすぐれ、耐熱性、耐熱老化性もよいのが特長である。エチレンプロピレンゴムには、エチレンとプロピレンのみが重合した EPM (Ethylene Propylene Polymethylene) と EPM の末端に非共役型のジエン成分を共重合させた EPDM (Ethylene Propylene Diene Polymethylene) とがある。EPM は不飽和部分をもたないので、従来ゴム工業において行なわれている硫黄による加硫ができず、過酸化化物により加硫される。

EPDM は不飽和結合が導入されているため、硫黄による加硫が可能で扱いやすくなり、また不飽和部分の成分と量により反応性と加硫物の物性が調節できるようになった。ブチルゴムも EPDM も低不飽和ゴムで性質の類似点も多いが、ブチルゴムが分子鎖中に不飽和結合を有するのに対し、EPDM は不飽和結合が分子鎖の末端にあるため、加硫反応にあずからなかった不飽和結合は、酸素やオゾンによる攻撃を受けてもゴム分子の骨格を破壊するに至らなかったため、耐オゾン性、熱老化性、耐候性などがブチルゴムよりすぐれている。

表 5.1 EPDM のおもな銘柄
Mainly brands of EPDM.

銘柄	メーカー	ジェン成分
EP syn	Copolymer Rubber and Chemical	Ethyliden Norbornen (ENB)
Keltan	Dutch State Mine	Dicyclopentadiene (DCPD)
Nordel	Du Pont	1,4-Hexadiene
Royalen	Uniroyal	Dicyclopentadiene (DCPD) or Ethyliden Norbornen (ENB)
Vistalon	Enjay	Methylene Norbornen (MNB)

表 5.2 EPDM の一般性状
General properties of EPDM.

エチレン/プロピレン比 重量	50/50~80/20
比重 d_{25}^{25}	0.85~0.87
ムーニー粘度 ML ₁₊₄ 100°C	40~150
結晶化度	X線
屈折率 n_D	1.476~1.478
色相	透明白色~明こはく色
ガラス転移温度	°C
よう素価	8~14
安定剤添加量	%
	0.5~1.0

表 5.3 EPDM およびブチルゴムの機械的性質
Mechanical properties of EPDM and butyl rubber.

測定項目	EPDM-A	EPDM-B	Butyl-A	Butyl-B
原品				
硬度 ショアー A	67	66	70	65
抗張力 kg/cm ²	35.4	38.8	41.2	34.7
伸び %	680	900	700	630
150°C 24 h 加熱老化後				
硬度変化	+4	+4	+3	+7
抗張力変化率 %	-1.8	-1.8	-14.0	-19.2
伸び変化率 %	-13.3	+4.5	-8.5	-15.3

表 5.4 EPDM およびブチルゴムの耐トラッキング性
Tracking resistance of EPDM and butyl rubber.

試料	電気学会標準法		DIP-TRACK 法注1)	
	CTI	浸食深さ注2)	トラッキング電圧	浸食深さ注3)
EPDM-A	600 以上	0.1 mm 以下	3 kV 以上	1.6 mm
EPDM-B	600 以上	0.1 mm 以下	3 kV 以上	1.0 mm
Butyl-A	600 以上	0.1 mm 以下	3 kV 以上	1.7 mm
Butyl-B	600 以上	0.1 mm 以下	3 kV 以上	2.0 mm

注) 1. 定抵抗法, 抵抗値 30 kΩ, 電流 (3 kV 時) 83 mA
2. 51 滴落下後
3. 51 サイクル後

EPDM は、エチレンとプロピレンの量比および分子量による差はあっても加硫方式は共通であり、製造メーカーによる差はほとんどないと考えられるが、EPDM はジェン成分により性質が異なってくる。現在市販されている EPDM のおもな銘柄を表 5.1 に、一般的な性状を表 5.2 に示した。これら EPDM の一部について、モールド絶縁への適用を目的として検討した結果をブチルゴムと対比しつつ述べてみたい。

5.1 機械的性質

(1) 硬度、抗張力、伸び

原品をギヤオーブンで加熱老化後の値を表 5.3 に示す。測定は 2 mm 厚さのシートを JIS 3 号ダンベルで打ち抜いた試片を使用し、JIS

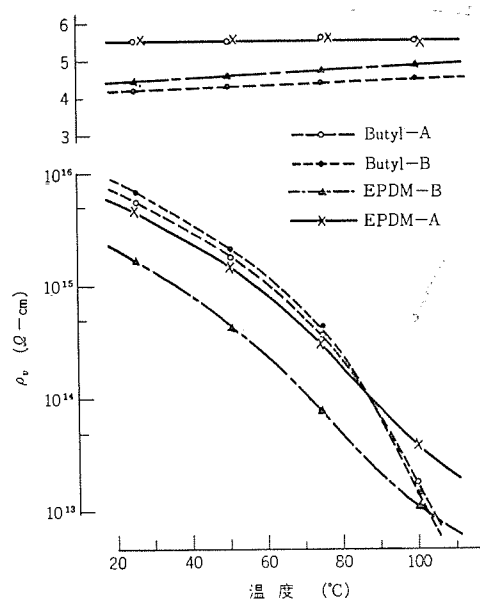


図 5.1 EPDM およびブチルゴムの電気特性
Electrical properties of EPDM and butyl rubber.

K 6301 に準じて室温で測定した。EPDM のほうが熱老化が小さく、耐熱性のあることがうかがえる。

(2) 耐寒性

耐寒性の測定方法として、ここでは ASTM D 736 のクラッシュパグ試験機による低温時のねじり剛性を測定した。その結果 T_F (Flexure or Stiffness Temperature) はそれぞれ次のとおりであった。

EPDM-A	-44.0°C
EPDM-B	-49.5°C
Butyl-A	-50.5°C
Butyl-B	-49.8°C

これより機器の使用される実際の条件下での耐寒性は、いずれも十分であるといえる。

5.2 電気特性

(1) 誘電率、体積固有抵抗

厚さ 2 mm のシートにすずはく(箔)電極をはりつけ、誘電率はシーリングブリッジを使用し AC 200 V, 60 Hz で、体積固有抵抗はアンメータを使用し DC 500 V (1 分値) で測定した結果を図 5.1 に示す。いずれも電気特性は良好であるが、EPDM のほうがブチルゴムにくらべ高温時の特性低下が小さい。

(2) 絶縁破壊電圧

厚さ 1 mm のシートを 25 φ 平板電極にはさみ、シリコン油中で測定した。昇圧速度 1 kV/分の場合の破壊電圧は室温でいずれも 25~27 kV/mm を示し、測定のばらつきを考慮すれば有意差はないといえる。また 100°C でも値はほとんど変わらなかった。

(3) 耐アーク性、耐トラッキング性

耐トラッキング性は試料の湿潤状態、汚損状態、電位傾度により変化し、各種の測定方法が提案されているが、ここでは電気学会標準法と Dip-Track 法⁹⁾により測定した結果を表 5.4 に示してある。いずれの試料も電気学会標準法では CTI 600 以上で、浸食深さは 0.1 mm 以下であり、Dip-Track 法でも測定限界である 3 kV では破壊せずきわめて優秀な耐トラッキング性を有している。ただし Dip-Track 法による試験後の浸食深さは、EPDM のほうがブチルゴムより若干すぐれている。

耐アーク性は JIS K 6911 により測定した結果、いずれも 130~133

表 5.5 EPDM および ブチルゴムの耐 コロ ナ 性 (50 Hz 換算)
Corona resistance of EPDM and butyl (converted to 50 Hz)

試 料	寿 命 (時 間)
EPDM-A	37,000 以上
EPDM-B	37,000 以上
Butyl-A	17,500
Butyl-B	12,600

表 5.6 EPDM および ブチルゴムの耐溶剤性, 耐油性
(重量変化 パーセント)
Solvent and oil resistance of EPDM and butyl rubber
(weight change percentage).

浸 漬 液	浸 漬 条 件 温 度 時 間	EPDM-A	EPDM-B	Butyl-A	Butyl-B
メチルアルコール	25°C 7 日	0.33	0.27	0.75	2.13
	25°C 28 日	0.33	0.26	1.29	4.04
アセトン	25°C 7 日	-1.49	-1.58	4.18	2.01
	25°C 28 日	-1.04	0.41	8.43	5.41
トルエン	25°C 7 日	74.8	102.0	194.6	160.7
	25°C 28 日	76.2	103.1	203.9	161.2
ASTM No. 1 オイル	25°C 7 日	11.4	20.2	6.5	5.4
ASTM No. 1 オイル	120°C 18 時間	63.8	74.1	49.4	41.0
ASTM No. 2 オイル	25°C 7 日	14.3	22.2	6.6	6.1
ASTM No. 2 オイル	120°C 18 時間	86.9	79.8	72.7	60.4
ASTM No. 3 オイル	25°C 7 日	54.0	80.6	28.9	27.8
ASTM No. 3 オイル	120°C 18 時間	133.5	110.3	129.3	108.9

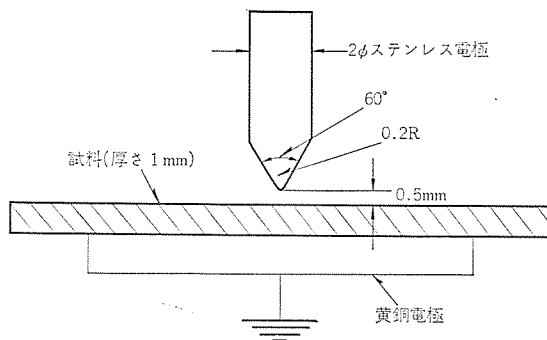


図 5.2 耐コロナ性試験方法
Testing method for corona resistance.

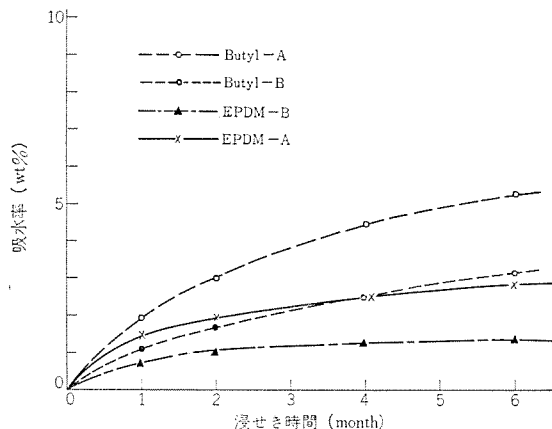


図 5.3 EPDM および ブチルゴムの吸水率（室温浸せき）
Water absorption of EPDM and butyl rubber
(immersed in tap-water at room temperature).

秒で差は認められなかった。

(4) 耐コロナ性

絶縁材料の耐コロナ性は測定法により評価が異なるが、ここでは以前に本誌に紹介した方法⁽¹⁷⁾で測定した。すなわち、図 5.2 に示すような電極と試料を五酸化りんを入れたデシケータ中に収め、600 Hz、8 kV の電圧を印加し、試料が破壊するまでの時間を求めた。測定結果は表 5.5 に示したが、EPDM はブチルゴムに比べ耐コロナ性が格段にすぐれており、両者のこの差異は、先にも述べたように不飽和結合の位置の違いにもとづくものと考えられる。

5.3 吸水性, 耐薬品性

吸水性は 1 cm 角の立方体試験片を常温水中に浸漬し重量変化を測定した。結果は図 5.3 に示したが、EPDM のほうが吸水率が少なく、かつ平衡に達する時間が速いようである。

耐薬品性は、塩酸、硫酸、硝酸、アンモニア、かせいソーダの各水溶液 (10%) 中に厚さ 2 mm のシートを JIS 3 号 ダンベル で打ち抜いた試片を常温で浸漬し、抗張力、伸びの変化率を測定した。30 日経過後の結果では、EPDM は変化率 10% 以内、ブチルゴムは 20% 以内で、EPDM のほうが酸、アルカリによる影響は小さいといえる。

5.4 耐溶剤性, 耐油性

EPDM、ブチルゴムとも極性基を有していないため、炭化水素系の溶剤や油には耐えないことはよく知られている。耐溶剤性、耐油性は 20×50×2 mm のシート状試片を使用し、重量変化率をみたがその結果の一部を表 5.6 に示した。アルコール、ケトンなどの極性溶媒には、いずれも影響されにくい油類には大きな変化を示し、高温になると変化が著しくなる。耐油性は EPDM のほうが劣っているようである。溶剤類は気中放置により揮発し、膨潤した試料は元の状態に復するが油は揮発せずそのまま残り、ゴムは膨潤したままにとどまっている。実機では膨潤による変形は性能をそこなう原因となるので、油類はもちろん膨潤性の大きな溶剤はゴム部分に付けないように注意する必要がある。

5.5 耐オゾン性, 耐候性

JIS 3 号 ダンベル で打ち抜いた厚さ 1 mm の試片を 20% 伸長し 100 ppm のオープン雰囲気にはくろし、耐オゾン性を測定した。ブチルゴムは約 24 時間で裂が発生したが、EPDM は 100 時間でも何ら異常は認められなかった。

耐候性については、ウェザオメータによる促進試験と並行して屋外ばくろ試験を実施している。促進試験と屋外ばくろ試験の相関性は問題となるところであるが、現在まで約 20 个月にわたり屋外ばくろした結果ではいずれも大きな外観変化はなく、き裂の発生も認められない。

以上の結果より、EPDM はブチルゴムよりすぐれた性質を有し高圧電気機器への使用に適していると考えられる。ゴムは配合による性質の変化が大きいため、実機への使用にはさらに検討を要するが、ここに述べた特長は十分生かせるものと考えられる。

6. む す び

モールド絶縁は機器の一体化構造の絶縁であるため、材料は電気的な性能はもちろん機械的性能のよいことが必要で、さらに機器の使用環境での機能維持のために、耐熱性、耐食性、耐候性なども併せて要求されることが多い。モールド絶縁材料は試験片による個々の性能試験と同時に、実機試作および試験による結果を得てはじめてその適否が判断されることも少なくない。したがってモールド絶縁の開

発には、材料とともに設計、工作法の検討も重要であり、実機にたいして相関性があり信頼性の高い材料試験法の確立ならびにデータの蓄積が必要である。

ここでは、モールド絶縁材料についてエポキシ注形樹脂とEPDM系ゴム成形材料を中心に述べたが、この他にも各種の材料が使用されている。今後物性的に樹脂とゴムの中に位置する材料の発展、合成技術の進歩に伴うオリゴマーを利用した物性のすぐれた材料の開発などにより、モールド絶縁の方式も現在と様相を変えていくであろう。各種の性質のすぐれた材料の開発により、電気機器の性能がますます向上することを希望している。(昭和44-7-31受付)

参 考 文 献

- (1) 福島, 伊藤, 寺谷: 第15回高分子研究発表会, 2-18 (昭44)
- (2) 吉川, 石川: 日本機械学会論文集 (第I部), 34, No. 265, 1491 (昭43)
- (3) 応力測定技術研究会編: 応力測定法 (昭30) 524-530 朝倉書店
- (4) 伊藤, 福島: 第17回高分子学会年次大会, 25 D 20 (昭43)
- (5) Frank D. Swanson: Insulation, 12, No. 2, 42 (Feb. 1966)
- (6) 吉川: 材料, 18, No. 187, 304 (昭44)
- (7) M. Olyphant, Jr.: Proceedings, First National conference on the Application of Electrical Insulation, Ohio, U. S. A. (Sept. 1958)
- (8) 特公昭37-12, 320
- (9) 原, 川上: 電連大42-488 (昭42)
- (10) シェル 化学: シェルエンジニアリングニュース, No. 84
- (11) 伊藤, 坂上: 三菱電機技報, 41, 788 (昭42)
- (12) 伊藤, 坂上: 電連大42-258 (昭42)
- (13) オランダ 特許 6,610, 422
- (14) ドイツ 特許 1,243,762
- (15) シェル 化学: シェルエンジニアリングニュース, No. 65
- (16) E. Schühlein: Elektrotech. Z. (E. T. Z.) -B-, 17, 870 (1965)
- (17) 原, 平林: 三菱電機, 34, 890 (昭35)
- (18) 後藤, 相田: 工化誌, 59, 第7号, 768 (1956)
- (19) W. Colletti, L. Rebori: Insulation, 11, No. 1, 27 (1965)
- (20) 今井, 河嶋: 耐熱材料ハンドブック (昭40) 682 朝倉書店

自動検針システム

武田 克己*・室田 慎**・前田 良雄***・杉山 康夫***

Automatic Metering System

Fukuyama Works Katsumi TAKEDA

Communication Equipment Works Shin MUROTA

Central Research Laboratory Yoshio MAEDA・Yasuo SUGIYAMA

Described herein are ; first, necessity and advantage of automatic metering in connection with various industries of electric power, gas and water works, and comparison made between the present metering business partly improved and the automatic one referred to, next, problems given rise to it as the system made clear. That means, there are three problems : (1) system composition, (2) a transmission route-special lines, telephone lines and distribution lines, (3) an oscillation mechanism of meter. Thirdly, given is an outline of automatic metering equipments built for trial based on the above condition. The principal specifications are translation form, special lines and an oscillation mechanism in combination of a magnet and lead switches. How to use telephone lines and distribution lines for the transmission route, how to summarize many sources producing information, also a method to take out the signals from the meter remain unsettled.

1. ま え が き

近年、各企業において業務の機械化が進められている。電力・ガス・水道の各事業においても例外でなく、各業務において機械化が進んでいる。しかし料金調定業務としての各メータの検針業務だけは、検針員が各需要家を戸別訪問して計器の指示を読みとるという旧態依然とした方法がとられている。

料金調定業務を分類すると次の三つになる。

- (1) 検 針
- (2) 計 算
- (3) 集 金

以上三つの業務の中で計算業務は最も機械化しやすい性質のもので各事業においてほとんど実施されている。また集金業務は各需要家の預金口座から自動的に払込むことによって（主需要家には適用できないが）かなりの量の機械化が可能である。そこで残された問題は検針業務の機械化である。料金調定業務の入力である検針業務が機械化されれば、料金調定業務のすべての機械化が可能となる。また、若年労働者の不足や単純労働の忌避による検針人の不足および人件費の上昇に伴う労務費の高騰等の問題からも、現行の検針のやり方を再考する時期にきていると考えられる。

以上の諸点から自動検針の研究開発の必要性が生じ、まずシステム検討を行ない、種々の方式の中から現在の技術で作り得る一つの方式を取り上げ試作を行なった。

2. 自動検針の利点

自動検針方式は従来の検針員の戸別訪問方式に比べて次のような利点を持つと考えられる。

- (1) 検針業務の簡易化・信頼性の向上

検針員が不要となり、需要家が留守のため再度の訪問をするといったむだもなくなり、読み取り誤りも機械のほうが人間の場合より格段に少なくなると考えられる。

- (2) 需要家への立ち入りによるトラブルの解消

需要家のプライバシーを侵す可能性がなくなり、また検針員が犬にかみつかれたりするといったこともなくなる。

- (3) 検針期間の延長短縮が容易

現在のように1ヵ月検針といった概念にとらわれることなく必要な時期に検針できる。また需要家の料金問合せに対しても即時に処理できる。

- (4) 計器の集団誤差チェック

計器の集団に対し、その合計の電力量を親メータの電力量または推定標準電力量と比較することによって誤差の大きい計器を調べることができる。

- (5) 適時計量値チェックによる異常状態の発見

異常な使用変動を示す需要家等については、周期を短かくして調べることによって、盗用、事故等を発見できる。

3. 現状改良方式

完全な自動検針が実施される以前に現状を改良することを考慮する必要がある。これには運用上から改良する方式と、メータの所で目で読んで手で書くのではなく、何らかの形で機械化を行なって手間はぶき、読み取り誤りを減らそうという方式がある。

3.1 運転改良方式

- (1) 隔月検針方式

検針周期を従来の1ヵ月をやめて、2ヵ月または3ヵ月さらには6ヵ月ごとに検針し、料金だけは負荷曲線より推定して1ヵ月ごとに徴集する。

- (2) 依頼検針方式

需要家に検針を依頼し、はがきで通知してもらう。

- (3) 取付位置変更方式

メータの取付け位置を読み取りやすい場所に設置したり、集合表示させる。

以上の方式のうち、需要家に検針を依頼することは種々問題があり、また計器の取り付け位置の変更も必ずしもスムーズにいかないと思われるので、隔月検針方式のみが有望な方法であり現在実施され

ようとしている。

3.2 読み取り機械化方式

(1) 写真方式

需要家名および計量値を写真機で写す方式である。すでに実用に供している所もある。

(2) テープパンチ方式

計量値を目で読み取り、手で紙テープにパンチし、センターにおいて紙テープの内容を機械で磁気テープに写す。

(3) テープレコーダ方式

計器にパルス変換器をとりつけておき、検針時にテープをそう入してパルス変換器の出力を自動的に携帯用テープレコーダに記録する。センターにおいてテープに記録された計量値はトランスレータで翻訳され表示または印刷される。

(4) 自動パンチカード方式

特定の時間に計器からカードへ計量値をパンチさせる。需要家はそのカードを郵送する。

(5) 自動磁気テープ記録方式

ある単位量を消費するごとに磁気テープにパルス記録する。検針人はその磁気テープを集めるだけでよい。センターでは磁気テープのパルス数をトランスレータを使って計算機入力に変換する。なお、磁気テープは時間に同期して回転しているので消費量の時間分布を調べるとも可能である。

(6) 読みとりカードの自動処理方式

計量値を特殊なカードに記録し、センターではカードに記録された値をOCR(光学文字読取装置)を使って自動的に磁気テープに記録する。

以上の各方式はいずれも部分的な機械化であって機械化された部分の誤り率は大いに減られるが、どこかに人手を要する点には変わりがない。そこで完全な自動化、無人化が必要となってくる。

4. 自動検針方式

中央(たとえば営業所)から各需要家の計器の計量値を自動的に読み取る自動検針方式を実施するには次のような問題がある。

4.1 計器から電氣的信号を取り出す方法

(1) 発信方式

機械的方式、光学的方式、電磁的方式等があり、具体的にはリードスイッチと磁石の組み合わせ、磁性体円板、機械接点形円板等が考えられている。

(2) 発信単位

ある一定単位ごとに1パルスを取り出す方法、1けた分の値を取り出す方法、全けたの値を取り出す方法が考えられる。これらの方法はいずれも実験として行なわれている。

4.2 システム構成

システム構成は表4.1に示すように中継方式・伝送時点・伝送量によって種々あり、さらにその組み合わせによって非常に多くの場合が考えられる。

4.3 伝送路

計量値を伝送するための伝送路としては、電話線・専用線・配電線(電力会社の場合)が考えられる。電話線の場合は、現在の電話器との結合方式・切替方式および電話のない需要家へのブランチ方式が問題となる。専用線があれば技術的に最も容易であるが工事の繁雑さ工事費の膨大なことが問題となる。電力会社の場合、計量す

表 4.1 システム 構成分類表
Classified table of system structure.

		直 送 式	中 継 式
中継装置	中継装置に対するメータ数		1. 各メータごと1個 2. 複数個のメータごと1個
	記憶機能		1. あ り 2. な し
伝送時点	中 継 通 過	1. 中央からの呼出し 2. メータから随時	1. 中央からの呼出し 2. メータから随時
	中継ストア	中 央 ↑ 中 継	1. 中央からの呼出し 2. 中継から随時
	中 継	中 央 ↑ 中 継	1. 中継からの呼出し 2. メータから随時
	メータ	メータ	
伝送量	中 継 通 過	1. 1パルス 2. 1けた 3. 全けた	1. 1パルス 2. 1けた 3. 全けた
	中継ストア	中 央 ↑ 中 継	1. 1パルス 2. 1けた 3. 全けた
	中 継	中 央 ↑ 中 継	1. 1パルス 2. 1けた 3. 全けた
	メータ	メータ	

べき電力を供給している配電線に計量値信号を乗せられれば線路の有効利用の面から最もよいのであるが、もともと配電線は情報伝送用には何も考慮がなされていないので、これを使うには解決すべき技術的問題が多い。

5. 試作自動検針装置

以上に述べたように自動検針方式は現段階ではこれが最適であるという結論は出されておらず、種々な方式について検討がなされている段階である。筆者らは考えられる可能な方式すべてについて検討を進める一方、現在の技術で容易に試作することができ、また他の方式へも適用することができる方式の一つを選んで試作したのでここに紹介する。なお、この方式は一応電力会社を対象として説明するがガス・水道にも適用可能である。

5.1 構成と動作概要

図5.1、図5.2に示すように、営業所に設けられた中央装置、柱上変圧器ごとに設けられた端末装置、各需要家に設けられた発信装置付き電力量計、中央装置と端末装置を結ぶ伝送線、端末装置と電力量計を結ぶ計測線からなる。

発信装置付き電力量計から1kWh消費するごとに1パルスが発生し、これを計測線を通して直流パルスで伝送し端末装置にあるリードアウトカウンタを動作させる。中央装置から呼出しがかかると端末装置の電源を投入し、リードアウトカウンタにある計量値を順次、中央装置へ伝送線を通して伝送する。中央装置では数字ランプで表示するとともに紙テープにパンチし、プリンタで印刷する。

5.2 発信装置付き電力量計

発信装置付き電力量計は自動検針のもととなるもので、発信装置を付加したために特性的、寿命的に電力量計本体に悪影響を与えては自動検針は成立しない。またこのことは、取引に必要なための検定合格品でなくてはならない。このために5けたの計量器とリードスイッチと永久磁石の組み合わせによって、所定のパルス信号を発信するようにした発信装置を取付けたものにしてある。なお、発信装置付きの計量器は従来の計量器と入れかえることが可能である。ただし、端子箱部分は2線多くなるので別となる。

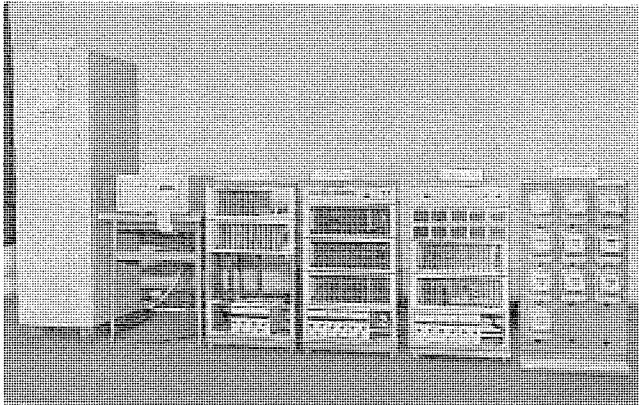


図 5.1 自動検針装置
Trial equipment of automatic metering.

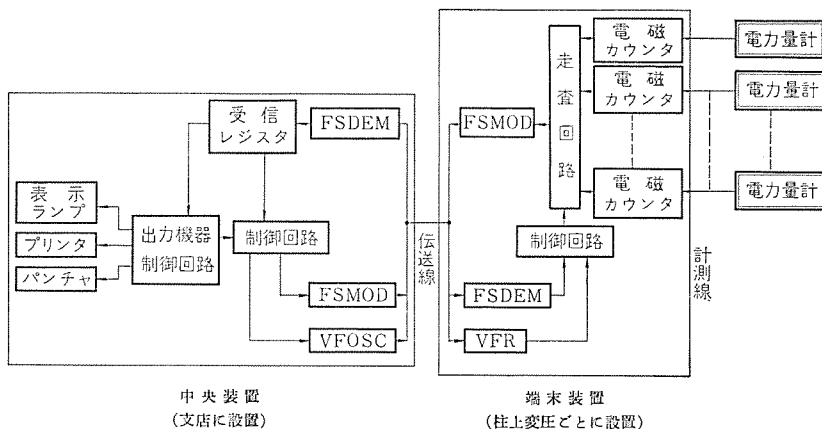


図 5.2 自動検針装置ブロック図
Block diagram of automatic metering equipment.

図 5.3 に MF-72-L 形单相 2 線式発信装置付き電力量計を、図 5.4 に MU-70-L 形 三相 3 線式発信装置付き普通電力量計の外観を示す(構造をわかりやすくするためカバー、名板を取りはずした状態を示す)。

(1) 構造および動作説明

発信装置は永久磁石とリードスイッチの組み合わせによる方式である。大略の構造を図 5.5 に示す。

計量装置の最低位数字車に取付けられた歯車から、さらに発信器用伝導歯車を経て軸上に自由に回転するように遊合した歯車が連動回転する。この歯車には後述の円筒形永久磁石部分駆動用の押し手が固定されており歯車と同一回転する。前記、軸上には自由に回転するように遊合した円筒形永久磁石部分が取付けられ、永久磁石には磁極 A と磁極 B の磁極片が取付けられている。

上記、永久磁石の磁極面と平行にリードスイッチ取付板が設けられ、リードスイッチが固定されている。磁極 A は磁極 B に対してある程度大きくしてあるため、不平衡な回転体となっており、押し手によって永久磁石が回転し磁極 A が最上部に達した時、不平衡のため重力により永久磁石は急速に所定角度回転する。この回転中両磁極の磁極面がリードスイッチと対向しリードスイッチを所定時間だけ閉路状態にさせる。永久磁石とリードスイッチは無接触で動作し、しかも駆動体への影響がわずかなるような構造となっている。

(2) 定格

- (a) パルス幅 30 ms 以上
- (b) 出力接点容量 4 W
- up to 250 V

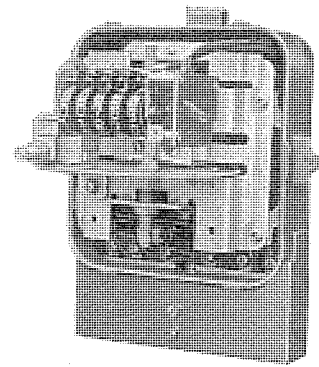


図 5.3 MF-72-L 形单相 2 線式発信装置付き電力量計
MF-72-L watt hour meter with pulse making mechanism
(Single phase 2 wire).

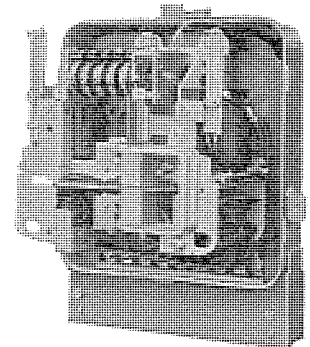


図 5.4 MU-70-L 形 三相 3 線式発信装置付き電力量計
MU-70-L watt hour meter with pulse making mechanism
(3 phase 3 wire).

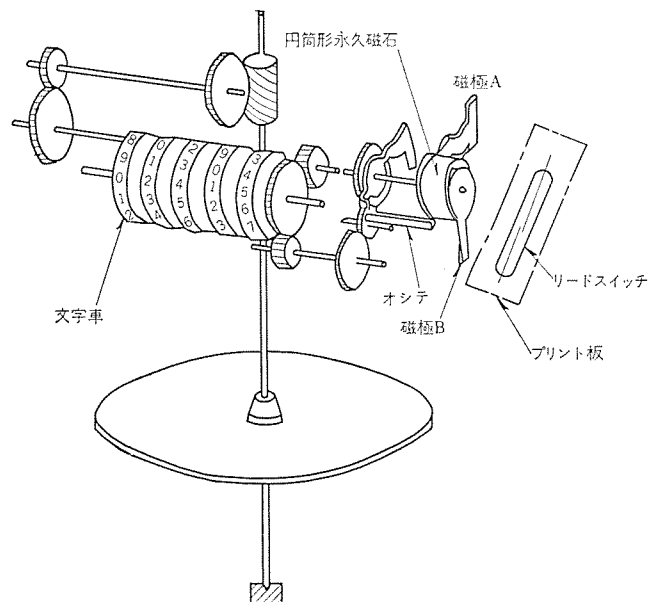


図 5.5 L 形発信装置構造
Construction of L type pulse making mechanism.

- up to 0.25 A
- (c) 寿命 2,000 万回以上 (火花消去回路付き)
- (d) 発信パルス単位 最低位数字車が 1 回転で 1 パルス または 1/10 回転で 1 パルス
(計器の種類によって計量装置は整数位 5 けたのものと、整数位 4 けた、少数位 1 けたのものがあるため)

ドに合致していれば ACK が返送され次のメータの情報が送られる。端末装置は最後のメータの情報を送り終わってそれに対する ACK を受信すると Stop 信号を送送する。中央装置はそれを受信すると ACK を返送する。端末装置は ACK を受信すると電源を切る。中央装置は ACK を送り終わって一定時間以上受信信号がなければ、次の端末装置への呼出し可能な状態となる。

5.8 特長

(1) 伝送回線としては配電網にそって設けられた専用線（パイロットワイヤ）を使うこととし、配電線、電話線利用も可能である。

(2) 信号変復調器 (MODEM) は 3 値 FS 方式を採用したため、次の利点がある。

(a) 2 値 FS 方式と比較していわゆる複極 RZ 信号を用いるため伝送信号信頼度が高い。

(b) 伝送速度が多少変化してもなんらさしつかえないため端末装置の屋外設置による温度変化、およびかなりの長期間無調整で使用することを考えるとすぐれている。

(c) 同期が容易にとれるため、複雑なタイミング回路を設ける必要がない。このため装置が経済的に構成できる。

(3) 端末装置が同一伝送路に複数台接続されると、どの端末装置を作動させるかの判定をするため呼出信号が必要となる。この呼出信号としては 3 値 FS 波とは別な周波数を持った音声 2 群多周波信号を用いる。この原理はタッチトーン電話器に用いられているものと同じである。

(4) アドレスを情報のあとに置くことによりメータからの計数パルスが到来した過渡時の読取り誤りを防いでいる。

(5) 回路は小形化、経済化、高信頼化などのために IC を用いる。

(6) 中央装置の FSMOD および端末装置の FSDEM があるので、将来配電網あるいは電力需要家に対する幾種かの制御装置を併用させた場合に、中央から端末への制御情報および端末から中央へ送った情報に対する応答情報を送ることができる。

5.9 仕様

仕様は次のとおりである。

- (1) 方式……中継記憶方式
- (2) メータの発信方法……永久磁石とリードスイッチ
- (3) メータの発信単位……1 kWh/Pulse
- (4) 端末・メータ間伝送時点……随時
- (5) 端末・メータ間伝送路……計測線（専用線）
- (6) 端末・メータ間伝送信号……直流パルス

- (7) 端末記憶装置……電磁カウンタ
- (8) 中央・端末間伝送時点……中央からの呼出しによる。
- (9) 中央・端末間伝送路……通信線（専用線）
- (10) 中央・端末間伝送信号……3 周波 2 値 FS
- (11) 中央・端末間伝送符号…… C_2 /けた
- (12) 中央・端末間信号伝送量……メータ番号 2 けた + 計量値 4

けた/メータ, 30 Bit/メータ

- (13) 中央・端末間信号伝送速度……50 ボー, 約 1 秒/メータ
- (14) 中央装置出力機器……数字ランプ, プリンタ, パンチャ
- (15) メータ選択方式……端末装置は中央で選択

メータはメータ番号で区別する。

- (16) 収容能力……100 メータ/端末装置

10 端末装置/中央装置

1,000 メータ/中央装置

6. むすび

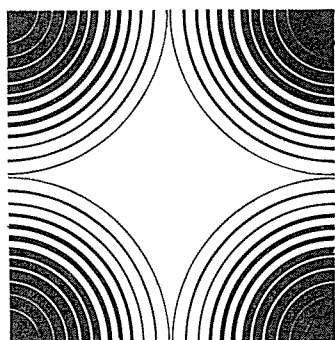
以上、自動検針方式および試作した自動検針装置について説明した自動検針が実施される時期については十分先であろうという議論と、意外と早い時期に必要な個所から実施に移されるのではないかという議論があるが、いずれにしても非常に大きなシステムであり社会的問題も含みさらに技術的に未解決のところも多く、今後さらに研究開発を強力に押し進めてゆく必要がある。今後、解決してゆかねばならぬ技術的問題としては次のようなものがある。

- (1) 配電線を信号伝送路として使う方式の開発
- (2) 電話線利用の場合の結合方式および電話優先に対する処置
- (3) 自動検針用計器として最適な計器の開発
- (4) 信頼性のある方式の開発
- (5) 価格の低廉化

最後に、このシステムの研究開発に努力いただいた福山製作所計器技術課、通信機製作所多重伝送課、中央研究所第一研究部の関係各位に感謝いたします。(昭和 44-10-15 受付)

参考文献

- (1) 渡辺, 杉野:「計測と制御」6, 5, 14~20, (昭 42-5)
- (2) 渡辺:「OHM」17~20, (昭 42-7)
- (3) 渡辺, 杉野:「エレクトロニクスダイジェスト」33~41, (昭 42-10)
- (4) Robert F. Tomczak: Electrical World 29~31, (17 Feb 1969)



技術講座

システム理論 (V) ——数理計画と制御——

田村 坦之*

1. ま え が き

近年、電子計算機のもつ情報処理能力の大規模化・高速化にともない、システム工学⁽³⁰⁾およびその理論は急速に発達しつつある。ジャーナリストの言を借りれば、「情報革命時代」、「システム時代」に入りつつあると言われている現代において、今後計算機とその周辺機器、遠隔情報処理技術等の発達にともない、システム工学の分野はますます重要視されてくるものと思う。

本文は、システムの最適化の理論に関して、従来 OR の分野で発達してきた数理計画法 (Mathematical Programming) と、制御の分野で発達してきた最適制御理論 (Optimal Control) の、橋わたしの役を果たす関数空間における数理計画法、および最適化のアルゴリズムの topics を解説することを意図している。

なお、本文を読むにあたって、数理計画法 (線形計画法・非線形計画法程度) の基本⁽³¹⁾に関する知識と、現代制御理論 (特に線形システム解析) の入門的知識⁽³¹⁾を仮定している。

2. 双対性とその応用

線型計画法 (Linear Programming) において、Dantzig が双対性 (Duality) を応用した⁽⁴⁾のにはじまり、非線形計画法 (Nonlinear Programming)⁽⁵⁾、あるいはもっと広く関数空間における数理計画法において双対性が応用され⁽⁷⁾⁽⁸⁾、最適化理論における新しい手法が開発されつつある。

本章では最小ノルム問題における双対性、Lagrange の双対定理、Fenchel の双対定理等を概観し、これらの定理の幾何学的な意味を明らかにするとともに、数理計画問題・制御問題への応用例をいくつかひろって解説する。

2.1 双対空間

定義 1: 線形空間 (Linear space)、ノルム空間 (Normed space) ……文献 (3) 参照。

定義 2: 有界な線形はん関数 (Bounded linear functional) X をノルム空間とし、はん関数 $f: X \rightarrow R$ のうち、

$$f(\alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2) = \alpha_1 f(x_1) + \alpha_2 f(x_2), \quad \forall x_1, x_2 \in X \\ \forall \alpha_1, \alpha_2 \text{ スカラー}$$

$$|f(x)| \leq M \cdot \|x\|, \quad \forall x \in X, \quad M \text{ はある定数}$$

を満たすものを有界な線形はん関数という。

例 (a) $X = E_n$ (n 次元ユークリッド空間) のとき、

$$f(x) = \sum_{i=1}^n \eta_i \xi_i, \quad x = (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n), \quad \eta_i, (i=1, 2, \dots, n) \text{ は固}$$

定は有界な線形はん関数である。

(b) $X = L_2[a, b] = \{x(t) : x(t) \text{ は } a \leq t \leq b \text{ 上に定義された} \int_a^b |x(t)|^2 dt < \infty \text{ を満たす関数}\}$ のとき、

$$f(x) = \int_a^b y(t)x(t)dt, \quad y(t) \in L_2[a, b] \text{ は固定}$$

は有界な線形はん関数である。

定義 3: 双対空間 (Dual space)

ノルム空間 X の上に定義されるすべての有界な線形はん関数 x^* の集合を X の双対空間と言い、 X^* であらわす。ただし X^* におけるノルムを

$$\|x^*\| \triangleq \sup_{\|x\| \leq 1} |x^*(x)|, \quad x \in X, \quad x^* \in X^* \dots \dots \dots (2.1)$$

で定義する。

例 (a) $X = E_n, \|x\| = (\sum_{i=1}^n \xi_i^2)^{1/2}$, ただし $x = (\xi_1, \dots, \xi_n)$ のとき、

$$X^* = E_n, \quad x^*(x) = \sum_{i=1}^n \eta_i \xi_i$$

$$\|x^*\| = (\sum_{i=1}^n \eta_i^2)^{1/2}, \quad \text{ただし } x^* = (\eta_1, \dots, \eta_n)$$

であらわされる。

(b) $X = C[a, b] = \{x(t) : x(t) \text{ は } a \leq t \leq b \text{ 上に定義された連続関数}\}, \|x(t)\| = \max_{a \leq t \leq b} x(t)$

のとき

$X^* = BV[a, b] = \{v(t) : v(t) \text{ は } a \leq t \leq b \text{ 上に定義された有界変動の関数}\}, \quad x^*(x) = \int_a^b x(t)dv(t)$

$$\|x^*\| = Var(v) = \int_a^b |dv(t)|$$

であらわされる。

2.2 最小ノルム問題の双対

多くの最適化問題は、有限個の線形の制限条件のもとにノルムを最小にする問題におきかえることができる。

基本問題:

X をノルム空間とし、 $y_i (i=1, 2, \dots, n)$ を X における n 個の線形独立 (linearly independent) なベクトルとする。今 Γ を

$$\Gamma = \{u \in X^* : u(y_i) = c_i, i=1, 2, \dots, n\}$$

とし、 $\Gamma \neq \emptyset$ すなわち Γ は空集合でないとする。このとき

$$\text{Minimize } \|u\| \quad \dots \dots \dots (2.2) \\ u \in \Gamma$$

を解け。

例 (a) $X = E_3, y_1 = (1, 0, 1), y_2 = (0, 1, 0), c_1 = 2, c_2 = 3$ とすると、

$$u(y_1) = 2 \text{ より } u_1 + u_3 = 2$$

$$u(y_2) = 3 \text{ より } u_2 = 3$$

図 2.1 に示すように、式 (2.2) をみたす u は、原点から $\Gamma = \{u : u_1 + u_3 = 2, u_2 = 3\}$ への射影 (Projection) で与えられ $\hat{u} = (1, 3, 1)$

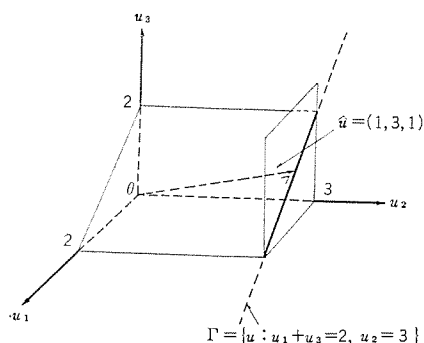


図 2.1 3次元ユークリッド空間における最小ノルム問題

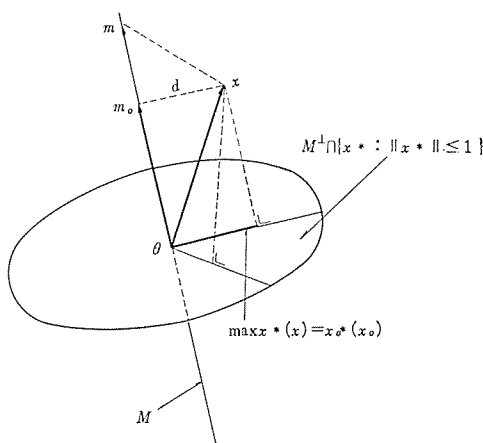


図 2.2 最小ノルム問題における双対性の幾何学的解釈

が基本問題の解となる。

(b) Quadratic Programming

$$\text{Minimize } \frac{1}{2} x' Q x - c' x$$

は適当な変数変換によって式(2.2)の問題におきかわる⁽¹³⁾⁽²⁵⁾。

定理1: 最小ノルム問題の双対定理

$$\min_{u \in \Gamma} \|u\| = \max_{\sum_{i=1}^n a_i y_i \leq 1} c' a \quad \dots\dots\dots (2.3)$$

式(2.3)の左辺から $\hat{d}$, 右辺から d を得たとすると

$$\hat{d} \left(\sum_{i=1}^n \hat{a}_i y_i \right) = \|\hat{d}\| \cdot \left\| \sum_{i=1}^n \hat{a}_i y_i \right\| \quad \dots\dots\dots (2.4)$$

が成り立つ。

定理1の基本になっている双対定理を以下にあげ、その幾何学的な解釈を説明する。

定理2:

X をノルム空間, M をその部分空間とし, d を $x \in X$ から M への距離とすると,

$$d = \inf_{m \in M} \|x - m\| = \max_{\substack{\|x^*\| \leq 1 \\ x^* \in M^\perp}} x^*(x) \quad \dots\dots\dots (2.5)$$

右辺の $\max$ は $x_0^* \in M^\perp$ に対して得られる。もし、左辺の $\inf$ が

$m_0 \in M$ において得られるならば

$$x_0^*(x - m_0) = \|x_0^*\| \cdot \|x - m_0\| \quad \dots\dots\dots (2.6)$$

が成り立つ。

解説:

式(2.5)の左辺は x から M への距離, 右辺は x から $M^\perp \cap \{x^* : \|x^*\| \leq 1\}$ の半径へおろした射影点と原点 θ との距離を示すから図2.2から明らかなごとく $\max x^*(x)$ は d と一致する。

定理1は定理2を少し変形することによって得られるもので、種々の最適化問題を解くうえで応用上非常に重要な定理である。以下に定理1の応用例を示す。

応用例: 最適制御

システム方程式が,

$$\ddot{x}(t) = u(t) - 1, \quad x(0) = \dot{x}(0) = 0, \quad x(T) = 1$$

で与えられ、燃料消費を最小にする制御 $u(t)$ を求める問題を考える。すなわち評価関数は,

$$J = \int_0^T |u(t)| dt$$

で与えられるものとする。

システム方程式を2回積分すると

$$x(T) = \int_0^T (T-t) u(t) dt - \frac{T^2}{2} = 1$$

を得る。今 $v \in BV[0, T]$ とし, u を dv/dt で置きかえると、もとの最適制御問題は,

$$\int_0^T (T-t) dv(t) = 1 + \frac{T^2}{2}$$

すなわち

$$v(T-t) = 1 + \frac{T^2}{2}, \quad v \in BV[0, T]$$

のもとに

$$\|v\| = \text{Var}(v) = \int_0^T |dv(t)| = \int_0^T |u(t)| dt$$

を最小にする式(2.2)の形の問題に帰着される。

定理1によって

$$\min_{v(T-t)=1+\frac{T^2}{2}} \|v\| = \max_{\|v\| \leq 1} a \left(1 + \frac{T^2}{2} \right)$$

を得る。ただし右辺のノルムは $C[0, T]$ におけるノルムである。右辺は a に関する簡単な一次元の最大化問題であり、もとの無限次元の問題にくらべてはるかに解きやすい。まず a に関する最大化問題を解き、次に式(2.4)の関係をを用いて最適 a に対応する $v(t)$ の最適値を述べる。

2.3 Lagrange の双対定理

本節に示す基本問題は次に示す一般的な Convex Programming の問題である。

基本問題:

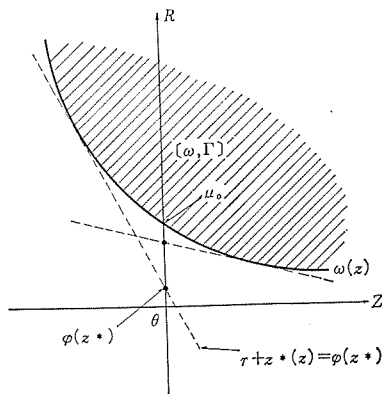


図 2.3 ラグランジの双対定理の幾何学的解釈

X を線形空間, Ω をそのつ(凸)部分空間, Z をノルム空間とし, $f: \Omega \rightarrow R, G: \Omega \rightarrow Z$ はともに Ω 上の関数である。この条件のもとに,

$$\text{Minimize } f(x) \quad \text{subject to } G(x) \leq \theta, x \in \Omega \quad (2.7)$$

を解け。

定理 3: Lagrange の双対定理

$$\mu_0 = \inf_{x \in \Omega} f(x) = \max_{z^* \geq \theta} \inf_{x \in \Omega} \{f(x) + z^* G(x)\} \quad (2.8)$$

式 (2.8) の右辺はある $z_0^* \geq \theta$ において得られる。もし左辺の $\inf$ が $x_0 \in \Omega$ において得られるならば,

$$z_0^* G(x_0) = 0 \quad (2.9)$$

を満たし, x_0 は $f(x) + z_0^* G(x)$ を最小にする。

解説: この双対定理を用いると, 式 (2.7) の基本問題を解くかわりに, 式 (2.8) の右辺で与えられる双対問題を解くことによって, もとの問題の解が得られる。今, 基本はん(汎)関数 (Primal functional) を

$$\omega(z) \triangleq \inf_{x \in \Omega} \{f(x) + z^* G(x)\}$$

で定義すると, 基本問題は $\omega(\theta)$ を求める問題になる。また双対はん関数 (Dual functional) を,

$$\phi(z^*) = \inf_{x \in \Omega} \{f(x) + z^* G(x)\}$$

で定義すると式 (2.8) の双対定理は次のように書きかえられる。

$$\mu_0 = \min_{z^* \leq \theta} \omega(z) = \max_{z^* \geq \theta} \phi(z^*) \quad (2.8)'$$

図 2.3 に式 (2.8)' の幾何学的解釈を示す。 $\omega(z)$ が z に関する単調減少関数であることは明白であり, $f(x), G(x)$ が Ω 上の関数のときは $\omega(z)$ もまた Ω 上の関数となることは容易に証明できる。今,

$$\Gamma = \{z: G(x) \leq z \text{ なる } x \text{ が存在する}\}$$

$$[\omega, \Gamma] = \{(r, z): \omega(z) \leq r, z \in \Gamma\}$$

とすると, $[\omega, \Gamma]$ は $R \times Z$ において, $r = \omega(z)$ より上にある Ω 上の集合を示す。また

$$r + z^*(z) = \phi(z^*)$$

は Ω 上の集合 $[\omega, \Gamma]$ に接する超平面を示す。 $z=0$ に対して $r = \phi(z^*)$

を得るので $\phi(z^*)$ は図 2.3 に示すごとく, 超平面が垂直軸 (R 軸) と交った点を意味する。これより式 (2.8)' の幾何学的な意味は明らかになった。

応用例 (a): Linear Programming

$X = E_n$ とし A を $m \times n$ 行列, b を n 元ベクトル, c を m 元ベクトルとし, 基本問題を

$$\text{Minimize } b'x, x \in E_n \quad \text{subject to } Ax \leq c, x \geq \theta$$

で与える。この双対問題は

$$\text{Maximize } \lambda'c, \lambda \in E_m \quad \text{subject to } A'\lambda \leq b, \lambda \geq \theta$$

となる。Lagrange の双対定理を用いると基本問題から双対問題に簡単に導けるので読者自ら試みられたい。

応用例 (b): 最適制御

システム方程式が,

$$\dot{x}(t) = A(t)x(t) + b(t)u(t), x(t_1) \geq c$$

評価関数が,

$$J(u) = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_1} u^2(t) dt$$

で与えられるものとする。ただし $x(t)$ は n 次元状態ベクトル, $u(t)$ はスカラー制御である。

システム方程式から,

$$x(t_1) = \Phi(t_1, t_0)x(t_0) + \int_{t_0}^{t_1} \Phi(t_1, t)b(t)u(t)dt$$

を得る。ここで $\Phi(t_1, t)$ は状態遷移行列である。

$$d = c - \Phi(t_1, t_0)x(t_0)$$

$$Ku = \int_{t_0}^{t_1} \Phi(t_1, t)b(t)u(t)dt$$

とおくと, もとの最適制御問題は

$$\text{Minimize } J(u) \quad \text{subject to } Ku \geq d$$

という無限次元の Convex programming の問題におきかわる。

Lagrange の双対定理により

$$\begin{aligned} \mu_0 &= \max_{\lambda \geq \theta} \min_u \{J(u) + \lambda'(d - Ku)\} \\ &= \max_{\lambda \geq \theta} \left[\min_u \int_{t_0}^{t_1} \left\{ \frac{1}{2} u^2(t) - \lambda' \Phi(t_1, t)b(t)u(t) \right\} dt + \lambda'd \right] \end{aligned}$$

となる。ただし λ は n 次元ベクトルである。 u に関する $\min$ は

$$u(t) = \lambda' \Phi(t_1, t)b(t)$$

において得られるので, 双対問題は,

$$\text{Maximize } \lambda'Q\lambda + \lambda'd \quad \text{subject to } \lambda \geq \theta$$

で与えられる。ただし,

$$Q = -\frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_1} \Phi(t_1, t)b(t)b'(t)\Phi'(t_1, t)dt$$

一度 Q を求めれば, 双対問題は n 次元の Quadratic programming の問題となり, もとの問題よりもはるかに解きやすい。

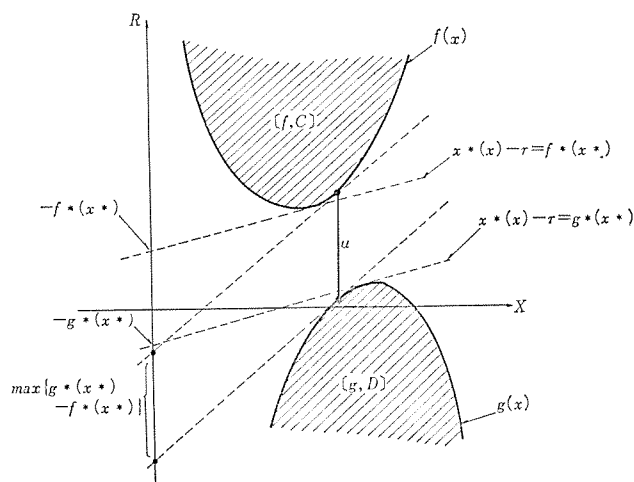


図 2.4 フェンケルの双対定理の幾何学的解釈

2.4 Fenchel の双対定理

本節では共役集合、共役はん関数を用いて双対性を表現する。

定義 4：共役とつ(凸)はん関数

X を ノルム 空間, C を そのとつ部分空間, $f: C \rightarrow R$ を とつはん関数とし, 共役集合 C^* と共役とつはん関数 $f^*(x^*)$ を 次のように定義する。

$$C^* \triangleq \{x^* \in X^* : \sup_{x \in C} [x^*(x) - f(x)] < \infty\}$$

$$f^*(x^*) \triangleq \sup_{x \in C} [x^*(x) - f(x)] \quad (f: C \rightarrow R)$$

定義 5：共役おう(凹)はん関数

X を ノルム 空間, D を そのとつ部分空間, $g: D \rightarrow R$ を おうはん関数とし, 共役集合 D^* , 共役おうはん関数 $g^*(x^*)$ を 次のように定義する。

$$D^* \triangleq \{x^* \in X^* : \inf_{x \in D} [x^*(x) - g(x)] > -\infty\}$$

$$g^*(x^*) \triangleq \inf_{x \in D} [x^*(x) - g(x)] \quad (g: D \rightarrow R)$$

定理 4 Fenchel の双対定理

$C \cap D$ が内点をもち, $\mu = \inf_{x \in C \cap D} \{f(x) - g(x)\}$ が有限であると仮定すると,

$$\mu = \inf_{x \in C \cap D} \{f(x) - g(x)\} = \max_{x^* \in C^* \cap D^*} \{g^*(x^*) - f^*(x^*)\} \quad \dots\dots (2.10)$$

が成り立つ。

解説：本定理の幾何学的解釈を図 2.4 に示す。

今,

$$[f, C] = \{(r, x) \in R \times X : x \in C, f(x) \leq r\}$$

$$[g, D] = \{(r, x) \in R \times X : x \in D, r \leq g(x)\}$$

とする。式 (2.10) の左辺は二つのとつ集合 $[f, C]$ と $[g, D]$ の間の垂直距離の最小値を示す。また

$$x^*(x) - r = f^*(x^*)$$

$$x^*(x) - r = g^*(x^*)$$

はおのおのとつ集合 $[f, C]$ および $[g, D]$ に接する平行な超平面を表わす。 $x=0$ とおくと

$$r = -f^*(x^*)$$

$$r = -g^*(x^*)$$

を得るので $-f^*(x^*) - (-g^*(x^*))$ すなわち $g^*(x^*) - f^*(x^*)$ は二つの超平面間の垂直距離を示す。したがって式 (2.10) の右辺は $[f, C]$ と $[g, D]$ を分離する二つの平行な超平面間の距離の最大値をあらわし, 左辺に示す二つのとつ集合 $[f, C]$ と $[g, D]$ の間の垂直距離の最小値と一致する。

応用例：配分問題

$$\text{Maximize } \sum_{i=1}^n g_i(x_i)$$

$$\sum_{i=1}^n x_i = x_0$$

$$x_i \geq 0, \forall i$$

利益 $g(x) (= \sum_{i=1}^n g_i(x_i))$ を最大ならしめるよう, 資源 x_0 を n 個の activity に配分する問題である。 $g(x)$ はおう関数であるものとする。式 (2.10) の両辺に -1 をかけて Fenchel の双対定理を,

$$\sup_{x \in C \cap D} \{g(x) - f(x)\} = \min_{x^* \in C^* \cap D^*} \{f^*(x^*) - g^*(x^*)\} \quad \dots\dots (2.10)'$$

に変形する。

Fenchel の双対定理を応用して, 上の配分問題を解くにあたり,

$$f(x) = 0$$

$$C = \{x : x = (x_1, \dots, x_n), \sum_{i=1}^n x_i = x_0\}$$

$$D = \{x : x \geq 0\}$$

とおく。この結果, 共役集合および共役はん関数は次のようにあらわされる。

$$f^*(y) = \sup_{x \in C} y'x - f(x) = \sup_{\sum x_i = x_0} y'x$$

$$C^* = \{y : y = \lambda(1, 1, \dots, 1), \lambda \text{ は スカラー}\}$$

したがって

$$f^*(y) = \lambda x_0$$

を得る。また

$$g^*(y) = \sum_{i=1}^n g_i^*(\lambda) = \sum_{i=1}^n \inf_{x_i \geq 0} \{\lambda x_i - g_i(x_i)\}$$

$$D^* = \{\lambda(1, 1, \dots, 1) : g^*(y) > -\infty\}$$

したがって式 (2.10)' の双対定理を用いると, もとの配分問題は次の双対問題におきかわる。

$$\text{Minimize } [\lambda x_0 - \sum_{i=1}^n g_i^*(\lambda)]$$

$$\lambda(1, 1, \dots, 1) \in D^*$$

これは λ に関する一次元の最小化問題であり, もとの n 次元の最大化問題にくらべてはるかに解きやすいことがわかる。

以上, 双対定理とその応用例に関する概説を行なった。あるシステムの最適化を行なうにあたって, まずその数学モデルを作り, この最適解を得る際に双対性を考慮することによって得られる merit として次の二点を強調することができる。

(a) もとの数学モデルが無次元の問題でも, この双対性を考慮することによって, 有限次元の問題におきかわる可能性がある。その結果, 計算実行可能性がでてくる。

(b) もとの数学モデルが有限次元の問題でも、この双対問題をとることによって、次元を減らし得る可能性がある。このときには最適化のアルゴリズムが簡略化される。

巻末の付録に代表的な線形空間およびその双対空間をリストアップする。

3. 最適化のアルゴリズム

前章では解析的な手法を用いて、無限次元の問題を簡単な有限次元の問題になおし、また有限次元の問題の次元を減らす手法を述べた。本章では、くり返し法によって最適化を行なうアルゴリズムの代表的な topics をひろって解説する。

3.1 最大傾斜法と共役傾斜法

基本問題：

X を線形空間、 $x \in X$, $f: X \rightarrow R$ として、

$$\text{Minimize } f(x) \quad (3.1)$$

を解け。

傾斜法：

任意の初期値 x_1 から出発して、

$$x_{n+1} = x_n + \alpha_n p_n \quad (3.2)$$

に従って x を逐次変化させる。ただし p_n は x を変化させる方向をきめるベクトル、 α_n はステップ幅をきめるスカラーである。方向ベクトル p_n のきめ方には種々の方法がある。いったん p_n がきまると、次にステップ幅 α_n をきめねばならない。理想的には、 α_n は $f(x_n + \alpha_n p_n)$ を α_n に関して最小にするように選ぶ。現実にはこのような α_n をみつけることが困難な場合が多いが、 $f(x_n + \alpha_n p_n) < f(x_n)$ をみただす α_n を各ステップで選ぶことが要求される。

最大傾斜法：

$$x_{n+1} = x_n + \alpha_n r_n$$

$$r_n = -f'(x_n)$$

すなわち、方向ベクトルとして $f(x)$ の最大傾斜の方向を選ぶ。

応用例(a)：

$X = E_n$ として、

$$f(x) = \frac{1}{2} x' Q x - b' x \quad (3.3)$$

ただし Q は $n \times n$ 対称行列、 b は n 次元係数ベクトルという二次形式のはん関数を最小にする問題を考えてみる。

$$f'(x) = Qx - b$$

したがって

$$r_n = b - Qx_n$$

を得る。 α_n も陽に求めることができ、

$$\begin{aligned} f(x_{n+1}) &= f(x_n + \alpha_n r_n) \\ &= \frac{1}{2} (x_n + \alpha_n r_n)' Q (x_n + \alpha_n r_n) - b' (x_n + \alpha_n r_n) \\ &= \frac{1}{2} \alpha_n^2 r_n' Q r_n - \alpha_n r_n' r_n + \frac{1}{2} x_n' Q x_n - b' x_n \end{aligned}$$

これより

$$\alpha_n = \frac{r_n' r_n}{r_n' Q r_n}$$

を得る。

結局、式 (3.3) を最大傾斜法に従って最小にするアルゴリズムは、

$$\begin{aligned} x_{n+1} &= x_n + \frac{r_n' r_n}{r_n' Q r_n} \cdot r_n \\ r_n &= b - Qx_n \end{aligned} \quad (3.4)$$

で与えられる。

注) 式 (3.3) を最小にする問題は $Qx = b$ なる線形方程式を解く問題と等価である。

応用例(b)：最適制御

システム方程式が

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t)), \quad x(t_0) \text{ は既知} \quad (3.5)$$

評価関数が

$$J = \int_{t_0}^t l(x(t), u(t)) \quad (3.6)$$

ただし、 $x(t)$ は n 次元状態ベクトル、 $u(t)$ は r 次元制御ベクトルとする。

このとき J の $u(t)$ に関する最大傾斜の方向は

$$J_u(u(t)) = l_u(x(t), u(t)) + \lambda'(t) f_u(x(t), u(t)) \quad (3.7)$$

となる。ただし $\lambda(t)$ は

$$-\dot{\lambda}(t) = [f_x(x, u)]' \lambda(t) + l_x(x, u), \quad \lambda(t_1) = 0 \quad (3.8)$$

の解である。

まず $u(t)$ の第一近似が与えられているものとする。この $u(t)$ と式 (3.5) を前方向に解いた結果得られる $x(t)$ と、式 (3.8) を後方向に解いた結果得られる $\lambda(t)$ を式 (3.7) に代入すると最大傾斜の方向が求められる。この方法は、制限条件のない非線形の最適制御問題を数値的に解く手法として有力である。

Conjugate Direction Method：

式 (3.3) を最小にする問題を考える。今 $p_1, p_2, \dots$ を

$$p_i' Q p_j = 0, \quad i \neq j \quad (3.9)$$

をみたすベクトルとする。このようなベクトルの列を Q-orthogonal なベクトル列または Q-conjugate なベクトル列という。このような p_i , $i = 1, 2, \dots$ を、各ステップで x を変化させる方向ベクトルに選ぶ。すなわち

$$x_{i+1} = x_i + \alpha_i p_i$$

に従って x_i を変化させる。 α_i は $f(x_i + \alpha_i p_i)$ を α_i に関して最小にするように選ぶ。

$$\begin{aligned} f(x_i + \alpha_i p_i) &= \frac{1}{2} (x_i + \alpha_i p_i)' Q (x_i + \alpha_i p_i) - b' (x_i + \alpha_i p_i) \\ &= \frac{1}{2} \alpha_i^2 p_i' Q p_i - \alpha_i p_i' (b - Qx_i) + \frac{1}{2} x_i' Q x_i \\ &= \frac{1}{2} \alpha_i^2 p_i' Q p_i - \alpha_i p_i' r_i + \frac{1}{2} x_i' Q x_i \end{aligned}$$

ただし
これより

$$r_i = b - Qx_i$$

$$\alpha_i = \frac{p_i' r_i}{p_i' Q p_i}$$

を得る。

結局、式(3.3)を Conjugate direction 法によって最小にする アルゴリズムは、式(3.9)をみたす Q-conjugate なベクトル列 $p_i, i=1, 2, \dots$ が既知として、

$$x_{i+1} = x_i + \frac{p_i' r_i}{p_i' Q p_i} p_i \quad (3.10)$$

$$r_i = b - Qx_i$$

で与えられる。

ここで

$$r_i' p_k = 0, k=1, 2, \dots, i-1$$

という直交関係をみたしている。

共役傾斜法 (Conjugate Gradient Method) :

共役傾斜法とは Conjugate direction 法の一つで、繰返し各ステップで、式(3.9)をみたす Q-conjugate なベクトル列 $p_i, i=1, 2, \dots$ を発生しながら x を逐次変化させる アルゴリズム である。具体的なアルゴリズムは次のように与えられる。

$$p_1 = b - Qx_1$$

に選び、

$$\left. \begin{aligned} x_{i+1} &= x_i + \frac{p_i' r_i}{p_i' Q p_i} p_i \\ p_{i+1} &= r_{i+1} - \frac{r_{i+1}' Q p_i}{p_i' Q p_i} p_i \end{aligned} \right\} \quad (3.11)$$

$$r_i = b - Qx_i$$

に従って x を逐次変化させる。一般的な非線形関数に対する Conjugate gradient 法のアルゴリズムは文献(17)を参照されたい。

最小にすべき関数が n 次元の二次形式のときに、Conjugate direction 法ではただか n ステップで収束することが示されている⁽⁷⁾。

3.2 分解原理とマルチレベル法

Dantzig, Wolfe が大規模な Linear Programming (L. P.) の問題を解くのに、いくつかの小規模な L. P. 問題に分割して解く分解原理 (Decomposition Technique)⁽¹⁴⁾を開発して以来、同種の手法が非線形計画問題・動的最適化問題に対して開発されている。ここではその代表例として、Varaiya の分解原理と、Lasdon のマルチレベル法のアルゴリズムを簡単に解説する。

Varaiya の分解原理 :

本手法は有限次元空間における大規模な非線形計画問題を、小規模な問題に分割して解く手法である。

$$\text{Minimize } \sum_{i=1}^N f_i(x_i) \quad (3.12)$$

$$\sum_{i=1}^N A_i x_i = b$$

$$x_i \in \Omega_i$$

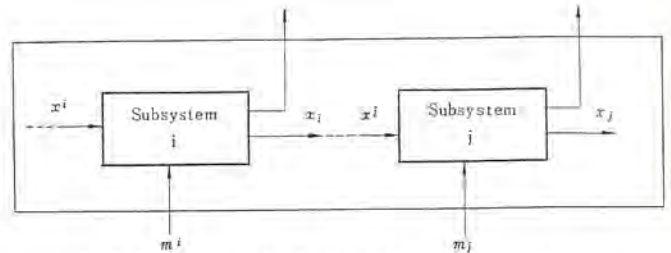


図 3.1 マルチレベル法における入力と出力の関係

ただし $X_i = E_{n_i}$, Ω_i は X_i のとつかつ compact⁽³⁾ な部分空間, $f_i : \Omega_i \rightarrow R$ で strictly convex⁽⁵⁾ な関数とする。

ここで penalty vector $p_i, i=1, 2, \dots, N$ を導入する。 p_i の初期値は任意の値に選べる。そして N 個の小規模な最小化問題、

$$\text{Minimize } \{f_i(x_i) + p_i' x_i\}, i=1, 2, \dots, N \quad (3.13)$$

を解く。つぎに誤差ベクトルを

$$e(p) = \sum_{i=1}^N A_i x_i(p_i) - b \quad (3.14)$$

で定義し、

$$v(p) = \frac{1}{2} \|e(p)\|^2 \quad (3.15)$$

とする。もし $v(p) = 0$ ならばこのときの $x_i(p), i=1, 2, \dots, N$ は、もとの問題式(3.12)の解である。もし $v(p) > 0$ ならば最大傾斜法にしたがって $v(p)$ を減少させる。

$$\begin{aligned} \Delta p_i &= -\frac{\partial}{\partial x_i} v(p) \Delta t \\ &= -\frac{\partial}{\partial x_i} \left[\frac{1}{2} \left\| \sum_{i=1}^N A_i x_i(p) - b \right\|^2 \right] \Delta t \\ &= -A_i' \left(\sum_{i=1}^N A_i x_i(p) - b \right) \Delta t \end{aligned}$$

すなわち、

$$\Delta p_i = -A_i' e(p) \Delta t, i=1, 2, \dots, N \quad (3.16)$$

として p_i を $p_i + \Delta p_i$ に変更し再び式(3.13)の最小化問題を解く。

応用例(a) : スケジューリング問題⁽²⁵⁾

応用例(b) : 列車自動運転制御系の設計⁽²⁶⁾⁽²⁷⁾

マルチレベル法 (Multi-level technique) :

本手法は N 個のサブシステムより構成される大規模システムの最適化手法である。

図 3.1 に各サブシステム間の出力関係を示す。入出力関係は、

$$x_i = T_i(m^i, x^i), i=1, 2, \dots, N \quad (3.17)$$

であらわされる。ここに m^i はサブシステム i の操作ベクトル, x^i は他のサブシステムからサブシステム i へはいる入力ベクトル, x_i はサブシステム i から他のサブシステムまたは全システムの外部へ出てゆく出力ベクトルである。問題は、全システムの目的関数、

$$f(m) = \sum_{i=1}^N f_i(m^i, x_i) \quad (3.18)$$

を、制限条件、

$$H_i(m^i, x^i) \geq 0, i=1, 2, \dots, N \dots\dots\dots (3.19)$$

のもとに最小にする操作ベクトル $m^i, i=1, 2, \dots, N$ を求めることである。

まず、サブシステム i の出力に“価格ベクトル” p_i を与え、他のサブシステムの出力の価格ベクトルからきまるサブシステム i の入力の価格ベクトルを p^i とする。そして N 個の最小化問題、

$$\begin{aligned} & \text{Minimize } \{f_i(m^i, x_i) + p_i' T_i(m^i, x^i) - p^i' x^i\} \dots\dots\dots (3.20) \\ & H_i(m^i, x^i) \geq 0 \\ & i=1, 2, \dots, N \end{aligned}$$

を m^i, x^i に関して解く。つぎに誤差ベクトルを

$$E_i = x_i - T_i[m^i(p_i, p^i), x^i(p_i, p^i)] \dots\dots\dots (3.21)$$

で定義し、 $E_i=0, i=1, 2, \dots, N$ ならば、このときの $m^i(p_i, p^i)$ は、もとの問題式 (3.17), (3.18), (3.19) の解すなわち最適操作量である。もし $E_i \neq 0$ なるものがあれば、

$$dp_i/dt = E_i \dots\dots\dots (3.22)$$

に従って価格ベクトルを変更し、再び式 (3.20) の最小化問題を解く。

分解原理とマルチレベル法の等価性については文献 (19) (29) を参照されたい。

今後制御対象が大型化するに従って、上に述べたような Hierarchy system の構成は必要不可欠な考え方になるものと思う。この際重要なのは、全システムを最適化することよりも、まず

(1) 実行可能なシステムを構成すること (Feasibility)

(2) 全システムをいくつかのサブシステムに分割する方法 (Organization)

を検討することである。

4. む す び

以上、現代のシステム最適化理論のトピックスとして、双対性の理論とその応用およびアルゴリズムをとりあげて概説した。本文では特に OR の理論的な分野と、制御理論分野の結びつきを強調して書いた。今後データ通信技術が発達してくると計算機の、工学分野・経営管理分野における使用法がますます多様化し、制御対象も大型化する傾向にあるので、これらを統一的に取りあつかうシステム工学、およびその理論分野はますます脚光をあびてくるものと考えられる。

終わりに、常日ごろご指導ご鞭撻をいただいている馬場準一、大野栄一両博士に心から感謝する次第である。

参 考 文 献

数学的基礎

- (1) 伊藤：「関数解析，特に線形作用素の半群について」，計測と制御，8，No. 7，458～464 (昭44)
- (2) L. Liusternik and V. Sobolev：Elements of Functional Analysis, Translated from Russian to English by A. E. Labarre, Jr., H. Izbicki and H. W. Crowley, Frederic

Ungar, N. Y., (1961)

- (3) 吉田ほか：位相解析の基礎，岩波書店，(昭35)
- 双対性とその応用
- (4) G. B. Dantzig：Linear Programming and Extensions, Princeton University Press, Princeton, N. J., (1963)
- (5) G. Hadley：Nonlinear and Dynamic Programming, Addison-Wesley, Mass., (1964)
- (6) L. S. Lasdon：Duality and Decomposition in Mathematical Programming, IEEE Trans. on System Science and Cybernetics, SSC-4, No. 2, 86～100, (1968)
- (7) D. G. Luenberger：Optimization by Vector Space Methods, John Wiley and Sons, N. Y., (1969)
- (8) D. G. Luenberger：Convex Programming and Duality in Normed Space, IEEE Trans. on System Science and Cybernetics, SSC-4, No. 2, 182～188, (1968)
- (9) B. Mond and M. Hanson：Duality for Control Problems, SIAM J. Control, 6, No. 1, 114～120, (1968)
- (10) B. Mond：Duality for Variational Problems, J. Math. Analysis and Appl., 18, No. 2, 355～364, (1967)
- (11) J. E. Rubio：Duality and Approximate Controls, J. Franklin Inst., 286, No. 2, 114～122, (1968)
- (12) 田村：双対性とそのシステム工学への応用 (Survey)，システム工学シンポジウム，計測自動制御学会主催，(昭44-9)
- (13) 田村：大規模生産スケジューリング制御問題の双対定理による定式化，自動制御連合講演会，(昭44-11)

アルゴリズムとその応用

- (14) G. B. Dantzig and P. Wolfe：Decomposition Principle for Linear Programming, Operations Research, 10, No. 101, (1960)
- (15) G. B. Dantzig：(4)に同じ
- (16) A. V. Fiacco and G. P. McCormick：Nonlinear Programming, Sequential Unconstrained Minimization Techniques, John Wiley and Sons, N. Y., (1968)
- (17) R. Fletcher and C. M. Reeves：Functional Minimization by Conjugate Gradients, Computer J., 7, 149～162, (1964)
- (18) 児玉：分解原理の最適制御への応用，計測と制御，7，No. 2, 107～118, (昭43)
- (19) 児玉，馬場：Varaiya 氏の分解原理による線形系の最適制御，電気学会雑誌，88-7，No. 958, 1,329～1,338, (昭43)
- (20) L. S. Lasdon and J. D. Shoemaker：A Multi-level Technique for Optimization, Proc. JACC, 85-91, (1965)
- (21) L. S. Lasdon, S. K. Mitter and A. D. Waren：The Conjugate Gradient Method for Optimal Control Problems, IEEE Trans. on Automatic Control, AC-12, No. 2, 132～

- 138, (1967)
- (22) L. S. Lasdon and A. D. Waren : Mathematical Programming for Optimal Design, Electro-Technology, Sci. and Eng. Series 107, 53~70, Nov., (1967)
- (23) D. G. Luenberger : (7)に同じ
- (24) B. V. Shah, R. J. Buehler and O. Kempthorne : Some Algorithm for Minimizing a Function of Several Variables, SIAM J, Appl. Math., 12, No. 1, 74~92, (1964)
- (25) 田村 : 生産スケジューリング制御問題の分解原理による定式化, 自動制御協会学術講演会, 121, (昭44-5)
- (26) 田村 : プログラム自動運転における時間制御系の最適設計, 鉄道サイバネ国内シンポジウム, (昭44-9)
- (27) 田村, 大野 : 列車プログラム自動運転制御系の設計—分散型最適制御理論および分解原理の応用—, 計測自動制御学術講演会, (昭44-8)
- (28) P. Varaiya : Decomposition of Large-scale Systems, in

- “Systems Theory”, edited by L. A. Zadeh and E. Polak, McGraw Hill, N. Y., (1969)
- (29) P. Varaiya : A Decomposition Technique for Nonlinear Programming, IBM Res. Rept. RJ-345, (July 1965)
- その他
- (30) 馬場 : システム工学の考え方, 制御工学, 10, No. 10, 11, 439~443, (昭41)
- (31) 福永, 田村 : Mathematical Programmingの動向(その1), 三菱電機技報, 39, No. 11, 1,412~1,419, (昭40)
- (32) R. E. Kalman, P. Falb and M. A. Arbib, Topics in General System Theory, McGraw Hill, N. Y., (1969)
- (33) R. E. Larson : State Increment Dynamic Programming, American Elsevier, N. Y., (1968)
- (34) R. J. Schwarz and B. Friedland : Linear Systems, McGraw-Hill, N. Y., (1965)

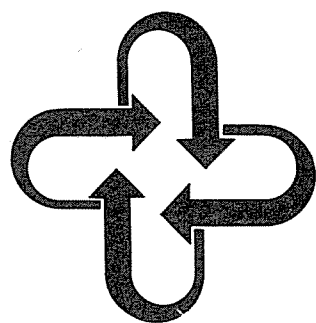
付 録

2章で議論した双対性の理論を応用するにあたって, 重要になる

代表的なベクトル空間およびその双対空間を付表1にリストアップする。

付表1 代表的なベクトル空間とその双対空間

Vector space	Element	Norm, inner product	Remarks	Dual space	Bounded linear functional	Norm	Condition for $x^*(x) = \ x^*\ \cdot \ x\ $
R	x	$\ x\ = x $	Complete, reflexive	R	$x^*(x) = xy$ $y \in R$	$\ x^*\ = y $	$x \geq 0$ & $y \geq 0$ or $x < 0$ & $y < 0$
E_n	$x = (\xi_1, \dots, \xi_n)$ $y = (\eta_1, \dots, \eta_n)$	$\ x\ = (\sum_{i=1}^n \xi_i^2)^{1/2}$ $\langle x, y \rangle = \sum_{i=1}^n \xi_i \eta_i$	Hilbert space, reflexive	E_n	$x^*(x) = \sum_{i=1}^n \eta_i \xi_i$ $y = (\eta_1, \dots, \eta_n) \in E_n$	$\ x^*\ = (\sum_{i=1}^n \eta_i^2)^{1/2}$	$x = \lambda y$ for some λ
l_p ($1 < p < \infty$)	$x = (\xi_1, \xi_2, \dots)$ $\sum_{i=1}^{\infty} \xi_i ^p < \infty$	$\ x\ _p = (\sum_{i=1}^{\infty} \xi_i ^p)^{1/p}$ $\langle x, y \rangle_{l_2} = \sum_{i=1}^{\infty} \xi_i \eta_i$	Complete, reflexive ($1 < p < \infty$), Hilbert ($p=2$)	l_q ($\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = 1$)	$x^*(x) = \sum_{i=1}^{\infty} \eta_i \xi_i$ $y = (\eta_1, \eta_2, \dots) \in l_q$	$\ x^*\ = (\sum_{i=1}^{\infty} \eta_i ^q)^{1/q}$	$(\frac{ \xi_i }{\ x\ _p})^p = (\frac{ \eta_i }{\ y\ _q})^q$ for $i=1, 2, \dots$
l_{∞}	$x = (\xi_1, \xi_2, \dots)$ $ \xi_i < \infty$	$\ x\ _{\infty} = \sup_i \xi_i $	Complete				
c_0	$x = (\xi_1, \xi_2, \dots)$ $\lim_{n \rightarrow \infty} \xi_n = 0$	$\ x\ = \max_i \xi_i $	Subspace of l_{∞}	l_1	$x^*(x) = \sum_{i=1}^{\infty} \eta_i \xi_i$ $y = (\eta_1, \eta_2, \dots) \in l_1$	$\ x^*\ = \sum_{i=1}^{\infty} \eta_i $	$\xi_1 = \xi_2 = \dots$ $\xi_i \geq 0, \eta_i \geq 0, \forall i$ or $\xi_i \leq 0, \eta_i \leq 0, \forall i$
c	$x = (\xi_1, \xi_2, \dots)$ $\lim_{n \rightarrow \infty} \xi_n = \xi_0$	$\ x\ = \sup_{1 \leq i < \infty} \xi_i $	$x - \xi_0 e \in c_0$, $e = (1, 1, \dots)$	c. f. Ref. (2), p. 106	$x^*(x) = \xi_0 \eta_0$ $+ \sum_{i=1}^{\infty} \eta_i \xi_i$	$\ x^*\ = \eta_0 $ $+ \sum_{i=1}^{\infty} \eta_i $	$\xi_1 = \xi_2 = \dots$ $\xi_i \geq 0, \eta_i \geq 0, \forall i$ or $\xi_i \leq 0, \eta_i \leq 0, \forall i$
$C[a, b]$	$x(t)$ on $[a, b]$ continuous	$\ x\ = \max_{a \leq t \leq b} x(t) $	Complete subspace of L_{∞}	$BV[a, b]$	$x^*(x) = \int_a^b x(t) dv(t)$ $v \in BV[a, b]$	$\ x^*\ = \text{Var}(v)$ $= \int_a^b dv(t) $	v varies on $\Gamma = \{t \in [a, b] : x(t) = \ x\ \}$ v nondecreasing at t if $x(t) > 0$, v nonincreasing at t if $x(t) < 0$
$L_p[a, b]$ ($1 < p < \infty$)	$x(t)$ on $[a, b]$ $\int_a^b x(t) ^p dt < \infty$	$\ x\ _p = (\int_a^b x(t) ^p dt)^{1/p}$ $\langle x, y \rangle_{l_2} = \int_a^b x(t) y(t) dt$	Complete, reflexive ($1 < p < \infty$) Hilbert ($p=2$)	$L_q[a, b]$ ($\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = 1$)	$x^*(x) = \int_a^b x(t) y(t) dt$ $y(t) \in L_q[a, b]$	$\ x^*\ = (\int_a^b y(t) ^q dt)^{1/q}$	$(\frac{ x(t) }{\ x\ _p})^p = (\frac{ y(t) }{\ y\ _q})^q$ $a. e. \text{ on } [a, b]$
$L_{\infty}[a, b]$	$x(t)$ on $[a, b]$ $ x(t) < \infty a. e.$	$\ x\ _{\infty} = \text{ess. sup } x(t) $ $= \inf \sup y(t) $ $y(t) = x(t) a. e.$	Complete				



技術解説

UDC 621. 397. 62

パネルディスプレイの各種方式

吉沢 達夫*・伊吹 順章**

1. ま え が き

最近ディスプレイ装置の開発研究が国外はもとより、国内でも非常に活発に行なわれている。その目的はコンピュータ用ディスプレイ、軍用ディスプレイ、テレビ電話、板状テレビ、広告パネルなどかぎりなくその重要性はいまさらいうまでもない。

ディスプレイ装置を作る場合、まず検討しなければならない事柄として特性面では画面の明るさ、解像度、コントラスト、中間調、明るさの直線性、色調と色数、応答速度、寿命、信頼性、所要電力などがあり、構造面では用途、価格、周囲条件、全体の重量、画面寸法、全体の大きさおよび体裁などがある。

周囲条件、明るさ、コントラスト、解像度などと判読性の関係はとくに重要で、たとえばこのディスプレイ装置が昼光下で用いられるか半暗室でよいかにより適当な明るさ、コントラストなどの要求度が大きく変わる可能性がある。また用途、使用場所により大きさ、方式などがおのずと限定される場合もある。そのため一概には最適条件あるいは特性を決めるわけにはいかないが、ディスプレイの一般的な要求特性をテレビ、計算機用ディスプレイなど、動く画像を目的としたものについて大形スクリーンディスプレイとコンソールディスプレイに分けて考えると表 1.1 のようになる⁽¹⁾。

また現在知られているおもなディスプレイ方式を投射形と平板形に分けると表 1.2 のようになる。投射形でそれ自身発光する形のものとして陰極線をけい光体面に投射するブラウン管方式（以下 CRT 方式と呼ぶ）および紫外線光を投射するけい光体スクリーン方式がある。また透過あるいは反射を利用するものとして MIS (Mechanical

Inscribing System)、FPS (Film Projection System) のほか Magnetic-Optical 方式や固体光パルプ方式が注目されている、そしてレーザー光の偏向を利用した方式も今後急速にのびる技術の一つといえよう。

一方ここで述べる平板形ディスプレイは発光形のものとして EL および放電関係の技術を利用したもの、透過あるいは反射形として液晶関係の技術がとくに注目され研究されている。さらに偏向形として光ゲート方式がある。これらの各方式の簡単な特性を表 1.2 にあわせて示した。

CRT 方式は現在テレビ受像管として一般に広く実用されているほか、コンソールディスプレイ装置としても一応満足されて使用されているが、少なくとも次に述べるような六つの欠点がある。

(1) 実用的用途には画面寸法を 20~30 インチ以上にするとはむずかしい。

表 1.1 ディスプレイの一般的な要求特性

性 能	形 式	大形スクリーンディスプレイ	コンソールディスプレイ
画 面 寸 法		8×6 ft	10~20 inch
全 体 の 厚 さ		1~2 inch (投射形は別)	10~20 inch (1~2 inch が望ましい)
明 る さ (平 均)		20~25 fL	40~60 fL
コ ン ト ラ ス ト		50 : 1	20 : 1
色		3 色 (望ましい)	3 色 (望ましい)
解 像 度		512~2,048 本	512~2,048 本
明るさの直線性からのずれ		0.2~0.5%	0.5~1.0%
応 答 速 度		<1 s	30~50 フレーム/s
寿 命		10 年以上	10 年以上

表 1.2 各種ディスプレイ方式

			用 途		応 答 速 度 (s)	明 る さ (fL)	カラー化の可能性	信頼性と寿命
			大 形	コンソール				
投 射 形	発 光	CRT	×	◎	1×10 ⁻⁶	50	◎	良 好
		けい光体スクリーン	○	×	1×10 ⁻³		○	
	透過あるいは反射	MIS(Mechanical Inscribing Sys)	◎	×	1~5	20	◎	不 良
		FPS(Film Projection Sys)	◎	×	5~15	20	◎	不 良
		ホトクロミック CRT	○	△	<1	20	○	良 好
		オイルフィルム光パルプ	◎	×	50×10 ⁻³	20	△	不 良
		熱あるいは光プラスチック	○	×	>0.2	20	△	
		固体光パルプ	○	△	1×10 ⁻³		△	
		Magnetic-Optical	○	△	0.1×10 ⁻³	100	△	
	偏 向	レーザー	○	○	1×10 ⁻⁵		△	
平 板 形	発 光	EL	○	○	10×10 ⁻³	10	○	不 良
		注入形 EL	×	○	10×10 ⁻³	100	○	
		プラズマ	△	○	10×10 ⁻³	10	△	
		放 電	△	○	<0.1	50	△	
		電球配列	○	×	0.1	50	○	
	透過あるいは反射	フランクフルディッシュ効果	×	○	1×10 ⁻⁶	1	カラーのみ	不 良
		電気化学効果	○	○	0.1	100	△	
		ヘラバイト	○	○	0.1	100	△	
		結 晶	○	○	0.1	100	△	
	偏 向	光ゲート	×	○	1×10 ⁻⁶	10	△	

* 判定の記号 ◎ : 実用中, ○ : 適当, △ : 可能性あり, × : 困難

(2) ブラウン管の大きさが三次元的にみて大きい。

(3) 選択あるいは変調回路に高電圧、高出力が必要なためIC化が困難である。

(4) 分解能や信号の書き込みは偏向電極やそれに関連した操作機構の性能によって制限される。

(5) 軍用など強いショックや振動を要求される用途には弱い。

(6) 目に感じるフリッカーをさけるためには少なくとも 30 フレーム/秒の割合で操作する必要がある。

以上のことからわかるように、CRT は大形スクリーンディスプレイとしては不適當であり、コンソールディスプレイとしてでさえ将来は構造的に自由に光点を選択できる可能性のある平板ディスプレイに置きかえられるであろうといわれている。また MIS 方式、FPS 方式はいずれも大形スクリーンディスプレイとして今日でも特殊用途に実用されているが、これも応答速度が遅く系全体の寸法が大きく、信頼性にも問題があり近い将来新方式が開発され次第おきかわるだろう。

この他投射形では固体 バルブ 方式, Magnetic-Optical 方式, レーザ方式などが注目され各社で研究を進めており, とくに Magnetic-Optical 方式は G. E 社が力を入れ, IBM 社も磁性薄膜を用いたディスプレイシステムを研究している。またレーザ方式は Zenith 社がすでに数年前に商用 TV 画像を映し出しており, TI 社も KDP 結晶を用いて 50 mW の Ne-He レーザ光を映像信号で変調し, その変調光を圧電素子で鏡を動かして垂直偏光させ, 一方水平はガルバノメータで鏡を駆動しスキャンさせてテレビ像を得るレーザディスプレイ装置を発表している。しかしここでは, さらに今後の動きが注目されている平板形の動く画像を目的としたパネルディスプレイにかぎって述べる。

2. パネルディスプレイの各種方式

2.1 真性ELディスプレイ

EL ディスプレイは機械的可動部分やプロジェクション光学系をもたない全固体形ディスプレイであり、非常に薄い平板にすることができている。現在のところまだ走査した場合の明るさ、けい光体の色調寿命に問題がある。しかしこの方式には多くの特長があることから多くの人達によって研究されている。一般に真性 EL と呼ばれているものは、特殊な表面処理をした ZnS あるいは ZnS・Se 系の電場発光用けい光体粉末を高誘電率の媒体内にうめ、これに交番電界あるいはパルス電界をかけたときに見られる発光で、固体内にあらかじめ存在した電子が電場によって加速されて発光中心に衝突し、これを励起したのちふたたび再結合するときに発光が生ずる。このとき EL 板の印加電圧 V と発光強度 L の関係は

$$L=L_0 \exp [(V_0/V)^{-1/2}] \dots\dots\dots (2.1)$$

で表わされる。ただし L_0, V_0 は定数

このような EL けい光体を用いて図 2. 1 のように層の両表面に X Y マトリクス電極を形成させ、この交点を発光させるようにしたものが ELXY パネルディスプレイである。しかし一般にクロストーク効果 (4. 1

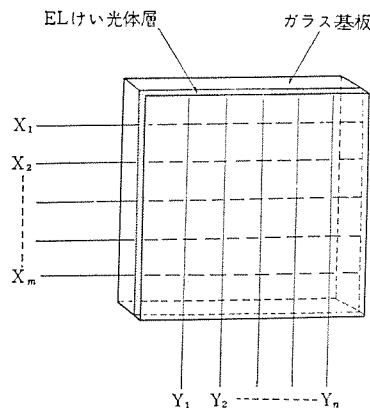


図 2.1 EL パネルの構成

節参照) のため XY の交点と X, Y 線上の他の点の発光強度比はあまり大きくならない。このクロストーク効果を減少させコントラストを上げようとする努力が、EL の明るさの改善と平行して進められている。この方式のもう一つの欠点は、たとえば TV の映像を出そうとするとき EL 自身にメモリー作用がないため光点を多くすると、各点を十分な時間励起できないため明るさが減少するうえ、フリッカーをさけるために画像は 30 フレーム/秒 以上の速度で出さなければならない。しかし構造的にはこの方式は大形スクリーンディスプレイ、コンソールディスプレイ いずれにも適している。

2.2 注入形 EL マトリクス

注入形 EL とは半導体の PN 接合やヘテロ接合を順方向にバイアスして両電極からそれぞれのキャリアを注入し、接合部で再結合発光させるという機構を利用したものである。発光強度 I は印加電圧 V に対して

$$L \propto \exp \frac{eV}{mkT} \dots\dots\dots (2.2)$$

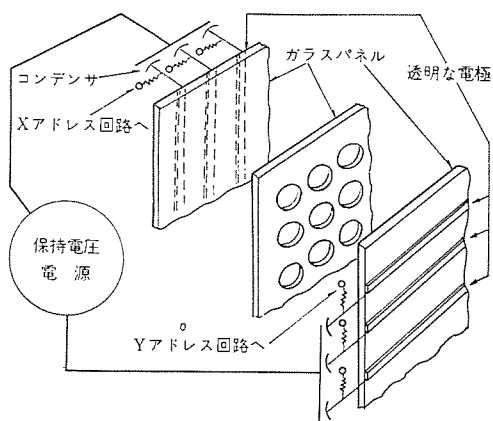
で表わされる。ただし m は定数, k はボルツマン定数, T は温度。

さてこの方式は注入形 EL ダイオードをマトリックス 状に並べたもので、解像度は EL 方式と同程度であり、コントラストは PN 接合あるいはヘテロ接合を用いるため本質的にすぐれている。その上数 V の電圧で明るさは 100 fL 以上にも達するが、光点を多くすると並べる手数が大変であること、高価になることから従来のままでは実用化の可能性は小さい。

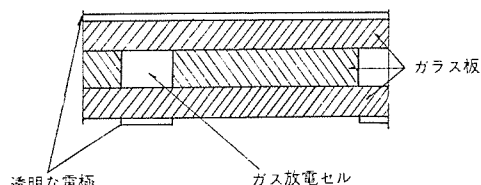
GEではモノリシックIC技術を利用して、GaAs EL ダイオードの広面積画面を一度に作る方法を開発した。またRCAではマトリクス形発光ダイオードアレイを実現する際に問題になる、各ダイオード間の電気的な絶縁を巧みに解決している⁽¹⁾⁽²⁾。今後さらにこうした分野の技術発展が大きく期待されている。

2.3 プラズマディスプレイ⁽³⁾

プラズマディスプレイ方式はイリノイ大学で計算機用パネルディスプレイとして開発されたもので、図 2.2(a), (b)にその分解図、断面図を示した。すなわち 3 枚のガラス板(厚さ 0.15 mm)を組み合わせて



(a) 分解図



(b) 断面図

図 2.2 プラズマディスプレイパネル

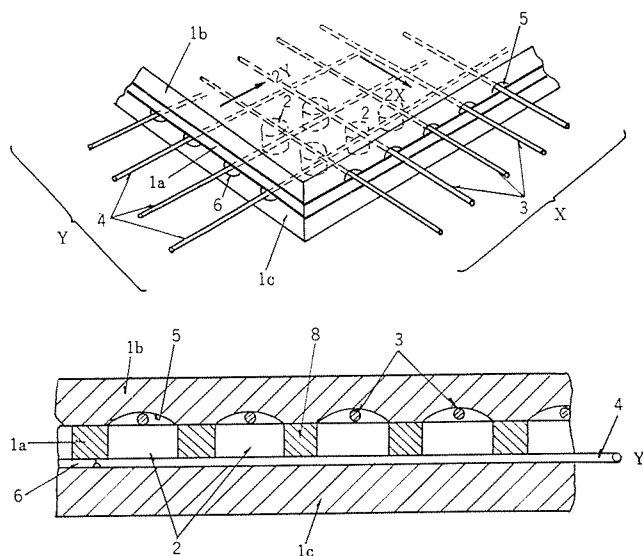


図 2.3 放電ディスプレイパネル

中央の穴に適当なガスを封入し、XYマトリクス電極を両側のガラス板の外側につけたものである。動作原理は放電電圧よりわずかに小さい維持電圧を加えておき、これに信号パルス電圧を重畳させることによって放電を起こさせる。この場合両側のガラス板の内壁面に反対の電荷がたまり、その電荷はストレージ効果をもつためメモリーが可能であるうえ、構造が比較的簡単でしかもレスポンスが早い特長がある。反面、欠点としては一般に放電開始電圧が300~400Vと高く、スイッチング機構が大変なうえIC化が困難であるので、放電開始電

圧の低下が強く要請されている。

2.4 放電を利用したディスプレイ

XYマトリクス状にはられた金属導線の対向交差部にガスを封じ信号電圧が印加された交点でガス放電による発光を起こさせるものである。図2.3にその構造図を示したが、この方式の特長は構造が簡単であり、電流を流すことによって発光強度を大きくできること、クロストーク効果を示さないことなどの反面、欠点としては寿命が短い、カラー化が複雑である、高電圧でしかも大電流が必要であることなどがあげられる。

2.5 豆球配列式ディスプレイ

ソニーにより試作発表されたもので画面の対角線が100インチという大画面がソニービルに展示された。これは赤、青、緑の各豆球をそれぞれ26,000個、合計78,000個縦横に並べたもので豆球1個、1個にトランジスタとダイオードをつなぎ発光強度をコントロールさせている。したがって価格が非常に高く、コンソールディスプレイとして小形化することは困難であり、寿命も短い欠点がある⁽⁴⁾。

2.6 フランツケルディッシュ効果を利用した方式

フランツケルディッシュ効果（以下FKと呼ぶ）というのは絶縁性半導体、またはPN接合に $10^4 \sim 10^5$ V/cmの高電圧を印加することによって、トンネル効果により禁止帯内に有限の電子状態を誘起し吸収端付近の光の吸収係数を変化させる現象である。図2.4にこの現象の模式的説明図を示した。したがって電場 E を印加する前後の吸収係数をそれぞれ α_0 , α_E とするとその変化分 $\Delta\alpha$ は⁽⁵⁾

$$\begin{aligned}\Delta\alpha &= \alpha_E - \alpha_0 \\ &= \alpha_0 \{ \exp(\gamma^2 e^2 E^2 / 12 \hbar m^*) - 1 \} \\ &= \alpha_0 \{ \exp K E^2 - 1 \} \\ &\approx \alpha_0 K E^2 \dots\dots\dots (2.3)\end{aligned}$$

となる。ただし γ は吸収曲線のこう配を表わす量、 e は電荷、 m^* は実効質量 $\hbar = h/2\pi$ 、 h はプランクの数値、 $K = \gamma^2 e^2 / 12 \hbar m^*$ 。

こうした効果はたいていの半導体にみられ、吸収係数の変化は実効的には禁止帯幅が小さくなったことに相当し、基礎吸収端がみかけ上長波長側に移動したことになる。このため吸収端付近の光を照射すると印加電圧の変化により透過光強度が変調される。

この方式の特長は、応答速度が早く1 μ s以下であること、所要電力が小さいことの反面、欠点として一般に吸収端の移動が非常に小さく 10^5 V/cmの電界でもわずか8~10Å程度であるため光源として非常に鋭くしかも強いものが要求されることである。また光変調率を大きくしようとする、吸収係数の大きい波長領域を用いなければならないため著しく光強度が低下する。なお最近RCA社からSbSIなる物質が発表された。これは 10^3 V/cmの電界で80~100Åの吸収端移動が報告されており、今後の研究開発が期待されている。

2.7 電気化学的効果を利用した方式

光強度変調用素子としてAgIとNaIの混合電解液を使い、この

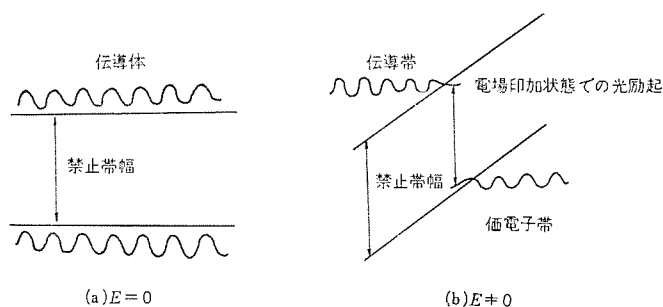


図 2.4 フランツ・ケルディシュ効果の説明モデル

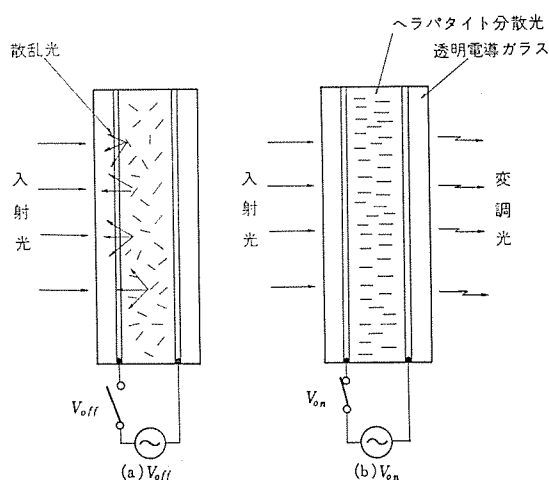


図 2.5 ヘラパタイト方式の原理図

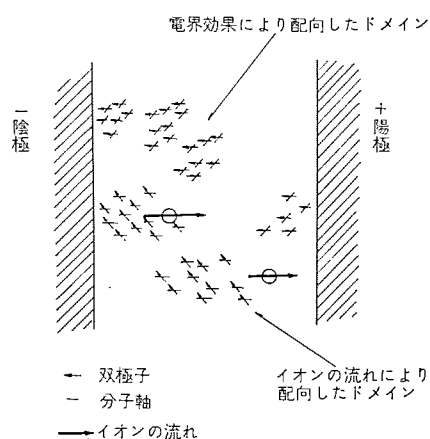


図 2.6 液晶の光変調に対する一つのモデル

電解液の両側に XY マトリクス透明電極を形成する。これに電解を印加することによって陰極側に Ag が析出し、光透過率を変化する。すなわち透明カソード電極上に金属イオンを付着させる一種の電気メッキであり、この効果を使って光透過率を変化させる方法である。そして電圧の極性を反転することによってふたたび Ag イオンを溶解させることも可能である。すでに報告されているデータによると、応答速度は印加電圧が 10 V のオーダーで書き込み時間が 1.5 ms、消去時間が 10 ms 程度、解像度は 10 素子/インチ程度である。この方

式の最大の欠点は消費電力が大きく、一般のパネルディスプレイには不向きである。

2.8 ヘラパタイト結晶を用いたディスプレイ

ヘラパタイトは硫酸キニンによる素を反応させてできる針状結晶で、これを適当な溶剤に分散させて電界を加えると、ブラウン運動によりランダムに分散していたヘラパタイトの針状結晶が一方向にそろふ。そのため図 2.5 のような構造にして、ヘラパタイト分散液の両側に適当な電界を印加することによって入射光強度の変調を行なうことができる。またこの電極を XY マトリクスに構成し、各電極に画像に応じた信号を加えることによって映像板ができる。しかしこの方式の欠点はやはり応答速度が遅いことである。

2.9 液晶を用いたディスプレイ

RCA 社から最近発表されたもので、ヘラパタイト方式と同様に 2 枚の電極間に液晶を配置し、これに前面から光を照射した場合印加電圧がないときは液晶は透明で光を透過してしまう。しかし電圧を加えると液は乳白色を呈し光を反射するようになる。このような現象を示す液晶としてネマチック相が知られており、中でも p-azoxyanisole, anisaldazine, dibenzalbenzidine など良い特性が得られている。

こうした光电効果は分子軸と双極子の方向が一致していない液晶でのみ起こることから、電場によって図 2.6 のように双極子が電場方向に整列しようとする力とともに、負イオンの流れに伴ってイオンの流れの方向に分子軸をそろえようとする力が生じ、こうした二つの方向にそろった分子群の境界で光散乱が起こるといふ Dynamic Scattering Mode によるメカニズムが、RCA のグループによって現在のところ支持されている。

この方式の特長は構造が簡単であり安価にできること、電圧および消費電力が小さいため IC 化が可能であることの反面、たとえば p-azoxyanisole の場合 117~130°C の間でネマチック相を持ち、こうした光強度変調効果をもつため温度を上げることが必要であること、応答速度が遅く立上がり 2 ms、立下がり 20 ms の値をもつことなどがあり、むしろ今後の研究成果が期待される。

2.10 光ゲート方式⁽⁶⁾

電氣的信号によって光の通過を高速で制御する光パルプ方式の一つに偏光面を交差させた 2 枚の偏光板の間に液体または結晶をセットし、それに電界を加えたときに生ずる偏光面の回転を利用した光ゲート方式の光変調素子がある。

強誘電体である $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ を用いて試作された光ゲートパネルは、4 mm×2 mm の結晶に 100 素子をもつきわめて解像度の高いものでスイッチング速度は約 1 μs である。また $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ のヒステリシス特性により記憶作用をもたすことも可能であるうえ、使用する結晶の厚さを変えることにより、色を変えることも可能である。この方式の構成図を図 2.7 に示した。この方式の最も大きな問題は $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 結晶の製造上の困難さであり、これら強誘電体の蒸着膜が結晶と同程度の性能をもって開発されることが大きく望まれている。

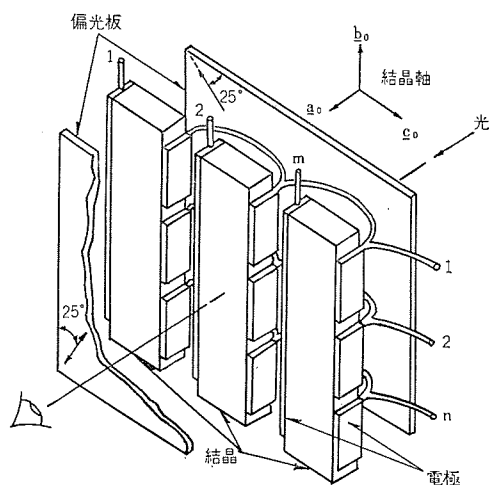


図 2.7 光ゲート方式の構成図

3. 各方式の現状

前章で現在までに知られているおもなパネルディスプレイ方式の簡単な動作原理、構造の紹介とその長所、短所について述べた。次にこの中でさらに期待され研究されている4方式についての現状を述べよう。

3.1 真性ELパネルディスプレイ

真性ELパネルを用いた固体ディスプレイは約10年前に積極的に研究されたが、TVの映像を得ようとすればEL自身の輝度が低い、寿命が短い、明るく発光させようとすると高電圧が必要であり、これを改善するためには複雑なメモリ回路あるいは固体メモリ素子が必要であること、クロストーク効果(4.1節参照)のため思うように画像のコントラストが上がらないし、コントラストを改善するためには構造的にあるいは回路的に複雑になるなどの欠点があった。

真性EL方式を用いて現在までに試作されたパネルディスプレイ装置はELマトリクス方式、光増幅器方式の二つに大別される。それらの装置および簡単な性能を表3.1に、また構造を図3.1～図3.5にそれぞれ示した^{(7)～(10)}。なお松下電器でも三菱電機とほぼ同じ時期にほとんど同じ特性をもつパネルディスプレイ(平面テレビ)を発表している。いずれにしても真性ELを用いたパネルで商用テレビ画像を映したのはわれわれが初めてであり注目してよい。

しかしELFスクリーン、トランスフラスカー映像表示装置は図からわかるように、輝度およびクロストーク改善のためかなり複雑な構造をしており、また壁かけテレビは回路系統の面で複雑になっている。一方光増幅器方式でも応答速度の早い光導電素子がまだ得られておらず、結局いずれの方式も動きの早い性能の良い画像を安価に作ることは困難な状態である。しかし相変わらずこれらの改良研究が続けられており、最近ではけい光体、誘電体の改良によりZnS・Se; Cu, Br けい光体をACパルスで励起し、印加電圧1,500 V, duty 0.1% のとき10 fL, 連続励起では10,000 fL以上に相当する発光強度を得た

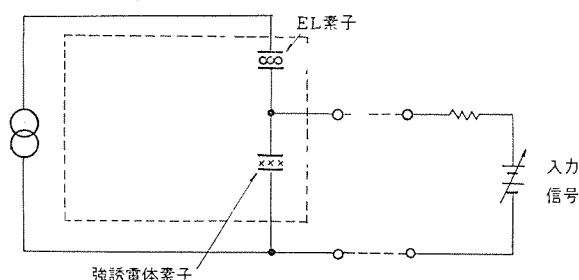


図 3.1(a) EL素子の組み合わせ

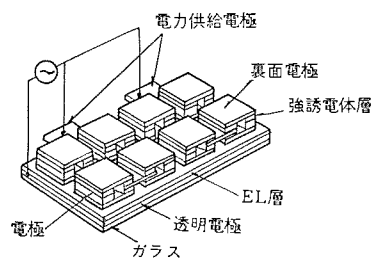


図 3.1(b) ELFスクリーンの構造

という報告⁽¹¹⁾、ELパネルを不活性気体中に封止することによって3,000 hで10%の輝度減少しか認めなかったという報告などがある。

いずれにしても10年前に出くわした問題の本質的な解決までは達しておらず、こうした方式でパネルディスプレイができたとしても多くの制約をもつものとなろう。なお図3.6に三菱電機で試作された80本×80本のパネルで受けた商用テレビ画像の一例を示す。

3.2 注入形ELマトリクス

現在ELダイオードはGaAs_{1-x}P_x, Ga_{1-x}Al_xAs, GaP, SiC, ZnSe_xTe_{1-x}, Cd_{1-x}Mg_xTeなどが知られている。一般に赤色発光は発光効率も0.3～3%とすぐれているが、緑色、青色発光はまだ十分ではなくGaPの緑色発光は0.05%, SiCの黄色発光は約10⁻⁴%と室温、連続励起では小さい。しかし注入形ELダイオードは現在最も勢力的に研究されている半導体素子の一つである。従来こうした注入形ELダイオードの配列をディスプレイに応用することは、高価になり困難であるといわれていた。しかし最近RCAでGa(As・P)結晶の基板上に50×50のマトリクスアレイを作り商用テレビ信号を受像した。これは1フレーム時間の映像信号を回路に貯えたのち各フレーム同時に印加しており、また解像度は通常のテレビの1/10であるが、商用テレビの映像信号を映したのはこの報告が最初である。図3.7にこの装置の外観写真を示した⁽¹²⁾。

またG.EではモリスミックICの製作技術を使って400ドット/インチのGaAs ELダイオードアレイを作っている⁽¹⁴⁾。このアレイはGaAsを用いているため赤外発光であるが、表面に赤外→緑色変換けい光膜、たとえばLaF₃: Er, Ybを塗布してもよい⁽¹³⁾、可視光のELダイオード物質にこの技術に応用すればよい。今後の大きな発展が期待さ

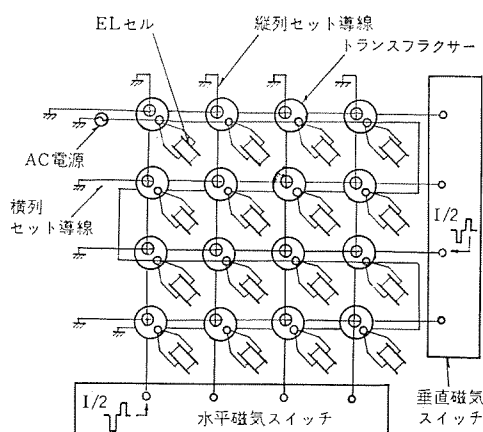


図 3.2 二円孔 トランスフラクサー と EL セルの配列からなる表示板

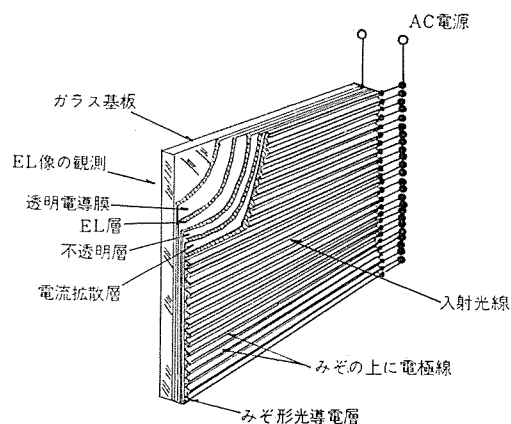


図 3.4 光増幅器の構成

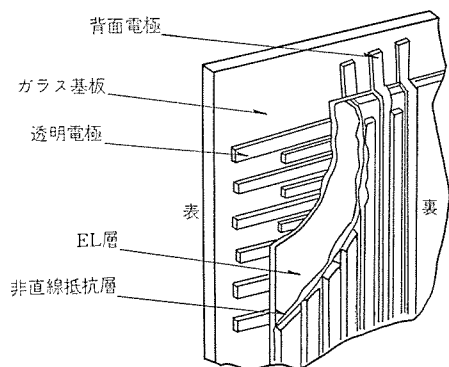


図 3.3 壁かけテレビ板の構造

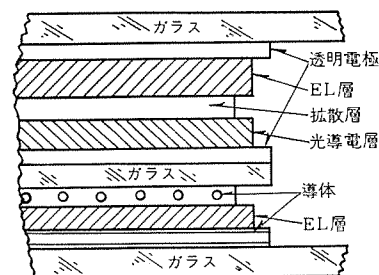


図 3.5 新しい扁平テレビ受像管の構成図

表 3.1 各種 EL パネルディスプレイの性能

形 式	E L マ ト リ ク ス 形			E L 光 増 幅 形	
名 称	ELF スクリーン	トランスフラクサー 映像表示装置	壁かけテレビ	光増幅器	平板テレビ受像管
発 表 年 代	1958	1958	1969	1958~1968	
試 作 会 社	WH 社	RCA 社	三菱電機	RCA, WH 社ほか多数	Automatic Radio Manufacturing Co.
発 表 法	IRE Nat. Conv. Res. Part 3 ('58)	Proc. IRE 46 p.1,808 ('58)	新 聞	おもに雑誌	US パテント ('67) No. 3337683
構 造	EL+Ferraelectric Material	EL+Transfluxer (Mag. switch)	EL	EL+CdS	EL+CdS
解 像 度	40~10 本/インチ	30 本/13 インチ ×40 本/17 インチ	80 本/7 cm×80 本/10 cm	10 本/mm	
電 圧	200 V, 10 kHz	175 V, 12 kHz	350 V	500~600 V	860 V
明 る さ	25~100 fL	4~50 fL	5 fL	10 fL	
コ ン ト ラ ス ト	100 : 1~50 : 1	Half Tone がよく出る	5 階調		
寿 命	1,000 h				
消 費 電 力	166 mW/(インチ) ²	0.2 W			



図 3.6 商用テレビ受信画像

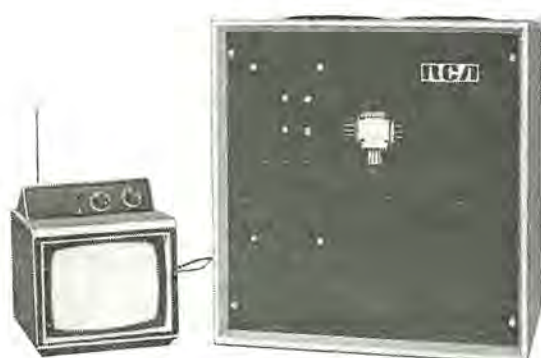


図 3.7 注入形 EL ダイオードアレイによる 50×50 テレビディスプレイ

れる。

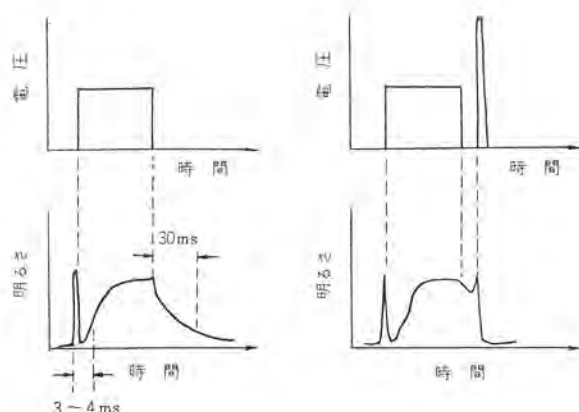
3.3 プラズマ ディスプレイ

W. H 社で試作されたプラズマディスプレイパネルは光点の大きさが直径 0.4 mm, 40 セル/インチの解像度をもち単一セルの輝度は 300 kHz の電源周波数で励起して平均 1,000 fL, 最大 2,000 fL が得られている。しかも単一セル当たりの消費電力は 200~300 μ W と小さいうえ、セル内部に電極を持たず構造的にも簡単のため約 100,000 h の寿命をもつといわれている⁽¹⁵⁾。

放電は外部電極に印加された電圧によってセル内部の電圧がしきい(閾)値をこえたとき起こるが、そのとき発生した正負の電荷はそれぞれ反対の極に向かって移動し、ガラス板内壁に数十 ns 以内で集積される。すなわちこの電荷によりパネル自身メモリー効果をもっていることはこの方式の大きな特長である。しかし反面前章で述べたような欠点も持っており、主として計算機用ディスプレイ、ハードコピーなどへの応用が考えられている。

3.4 液晶

現在 RCA 社から発表されている液晶ディスプレイの性能は、印加電圧が数 V~数十 V, 1 平方インチ当たりの消費電力は 1 mW, 分解能は 500 本/インチ, 応答時間は立上がり 1~5 ms, 立下がり 30 ms, コントラストは 15:1, 使用可能温度は -18~+100°C である⁽¹⁶⁾。これまでの報告では 100°C 以上に加熱しなくては液晶状態を示さな



(a) 普通のパルスでの応答曲線 (b) 普通のパルスに“Turn-off”パルスを印加したときの応答曲線

図 3.8 応答速度の改善

い物質のため実用的な面で大きな欠点であったが、室温用の液晶物質が最近 RCA で開発されたことは大きな進歩である。

残る問題は応答速度の改善と寿命であるが、とくに応答速度は RCA の Heilmier がいうような液晶中に含まれていた、あるいは電界により発生したイオンが電場に引かれて動くときに起こる一種の乱流状態による入射光の散乱効果であるなら、大きな分子イオンが液晶中を動く必要があるために本質的な改善は困難である。しかし最近この応答速度とくに“Turn-off”の改善方法が考えられ実用化に一步前進したといえよう。すなわち図 3.8(a)は普通のパルスを印加した場合の明るさの応答曲線、同図(b)はこの改善にもとづく普通の信号パルスに一定時間の遅れをもたせた“Turn-off”パルスを印加した場合の応答曲線である。このような操作をほどこした走査回路を用いて 2×18 のマトリクスパネルが作られ、中間調も出せたと報告している⁽²³⁾。

最近やはり RCA から液晶テレビディスプレイが発表された⁽¹⁷⁾。これはブラウン管の電子銃によるスキニング装置と組み合わせられたもので、解像度は 225 本/インチ、コントラストは 7.5:1 である。図 3.9 にこの構造図を示す。これらは平板テレビへの第一歩として注目される。

また W・H 社の“spectrathem”液晶というサーモペイントは温度に可逆性のサーモペイントで、温度によって色が赤→黄→緑→青→紫に変

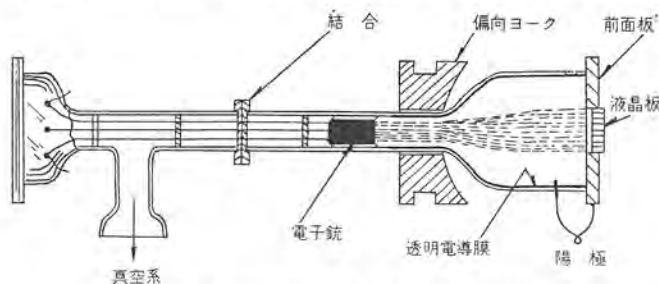


図 3.9 液晶板と組み合わせた陰極線管

なる液晶体で 0.1℃ の温度変化に対しても色が変わることを利用したパネルディスプレイがすでに試作されている。このほか液晶の二つの違った相、すなわちネマチック相とコレステリック相を混合することによって数ヶ月にも及ぶ像のメモリー効果も報告されており、用途によっては興味がある。

4. 問題点

以上 パネル ディスプレイ による画像表示の各種方式について述べてきたが、これらのディスプレイ装置を完成させるためにはむしろその周辺技術に大きな改善がなされることが必要である。中でも最も大きな問題は走査であり、次にクロストーク効果、輝度の改善である。それらについて少し検討してみよう。

4.1 クロストーク効果

EL 方式にかぎらず FK 方式、ヘバタイト方式、液晶方式などのように素子間の抵抗が高く電気容量的な結合を考慮してよい場合、その XY マトリックスの等価回路は一般に図 4.1 のように表わされる。すなわち X, Y 導体がそれぞれ m, n 本とすると交点には印加電圧そのまゝの V が加わるが、各電圧印加導体に添う交点以外の素子にもそれぞれ $\frac{n}{m+n}V$, および $\frac{m}{m+n}V$ の電圧が印加される。 m, n が十分大きくしかも $m=n$ であれば各素子に $1/2 V$ の電圧が印加されることになる。注入形 EL のように電圧対輝度特性に本質的に大きな非直線性があるもの、電気化学的效果を利用した方式のように大電流を必要とするもの、プラズマ方式や放電方式のようにしきい値がクリティカルなものでは、こうした効果はあまり問題ではない。このことは前にも述べたようにこれら方式の大きな特長である。

EL の場合、 V での輝度 B_1 と $1/2 V$ での輝度 $B_{1/2V}$ の比 D は 5 ~ 10 であり、実際の パネルディスプレイ を作る場合これでは不十分である。たとえば テレビ 信号で走査する場合、いま極端に X 線上のすべての素子に電圧 V がつぎつぎに印加されると、各素子は $V/2$ に対してほとんど 100% の duty をもつことになる。そのため XY マトリックスにした場合の交点の明るさ B_1 と電圧を印加した XY 線上の各点すなわち クロストークの点の明るさ $B'_{1/3V}$ の比 C は、

$$C = \frac{(1/N)B_r + \left(\frac{N-1}{N}\right) \cdot B_{V/2}}{\left(\frac{N-1}{N}\right) \cdot B_{V/2}} = \frac{1}{N}D+1 \quad \dots\dots\dots (4.1)$$

ただし N は 1 line 上の発光素子の数

となり N が大きくなるほど C は小さくなる。もし 500 素子 $\times$ 500 素子のパネルで 10:1 のコントラストを得ようとするとき D は約 5,000 でなければならない。実際にはこれほど単純ではなくこれ以外に多くの因子がはいるし、また逆にいろいろな対策がなされているが、いずれにしても非常に高い D の値が要求されることは確実である。

これに対して多くの改善策が検討され実験されているが、その一つが前に述べた ELF 子式であり、トランスフラクサー方式である。このほか ZnO の電圧に対する非直線抵抗特性を利用してこれを改善し

表 4.1 ZnO を用いたクロストーク効果の改善例

けい光体	発光色	EL層の厚 (μ)	ZnO なし		ZnO あり	
			電圧 V*	D**	電圧 V*	D**
#1	緑	150	425	36.0	……	……
		20	100	14.0	370	5,000
#2	緑	50	320	16.0	……	……
		50	170	9.5	335	70
#3	だいたい	90	500	6.3	……	……
		45	270	5.9	530	28

* 400 Hz で 5 fL になる電圧

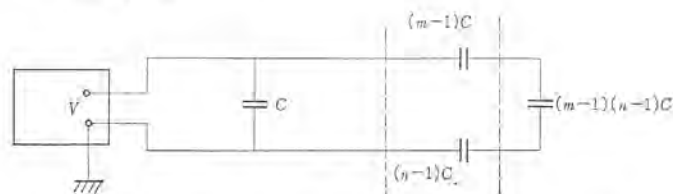
$$\text{或者 } B_V/B_{\frac{1}{2}V} = D$$


図 4.1 X, Y 電極がそれぞれ m, n 本である時の等価回路

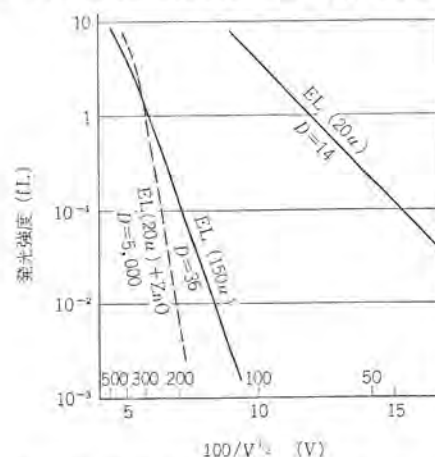
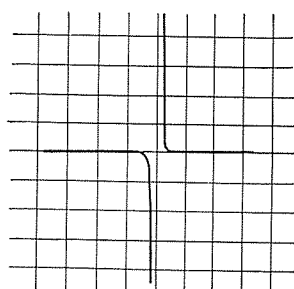


図 4.2 ZnO の非直線抵抗特性を利用した
クロストーク効果の改善例

た報告もある。この特性の一例を図 4.2 および表 4.1 に示しておく⁽¹⁸⁾。その他 CdSe, SiC など非直線抵抗素子として有用であることが知られている。

また非直線抵抗素子の代わりに各種のスイッチング素子を使用することも考えられており、とくに最近ではガラス状半導体を用いたスイッチング素子が注目されている。図4.3にTe:48%, As:30%, Si:12%, Ge:10%の組成をもつガラス半導体の電圧-電流特性を示した⁽²¹⁾。この素子の特長は高速でしかも記憶効果をもっているため、もし安定でしかも広面積のものが簡単にできればパネルディスプレイとの組み合わせも十分考えられる。図4.4はITT (the International Telephone and Telegraph Corp.) で考えられたELと組み合わせられたパネルディスプレイ装置である。こうしたスイッチング素子の研究およびパネルディスプレイ装置との組み合わせが、今後急速に行なわれることと思われる⁽²²⁾。



電圧—電流特性 (縦軸 2 mA/目盛, 横軸: 5 V/目盛)

図 4.3 60 Hz の交流電圧によるスイッチ素子の動作

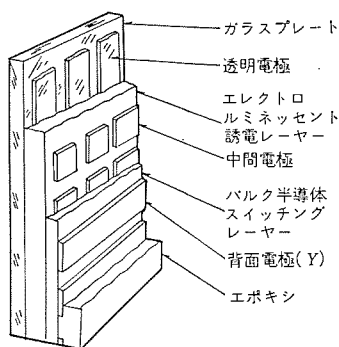


図 4.4 ITT で考えられている EL 素子装置

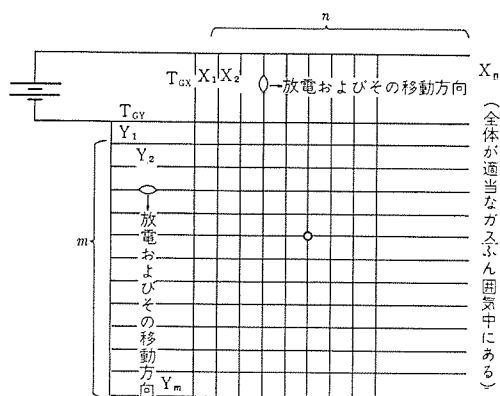


図 4.5 ガス放電を利用した走査の機構図

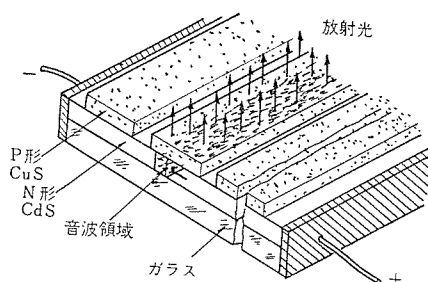


図 4.6 CdS 超音波発光装置

の方式は回路が複雑で特殊用途にはよいが、パネルディスプレイ装置を商品として、たとえば板状テレビにまで広く実用するためには高価である。比較的高電圧が必要なこと、一般に輝度を上げるためにメモリー回路が必要なことのため IC、LSI などの急速な進歩にもかかわらずすぐには実用が困難である。そこで次に述べるいくつかの新しい走査方式が検討され、実験されている。しかしいずれも多くの問題がありまだ実用されるまでにはいたっていない。

4.2.1 ガス放電を利用した方式

図 3.5 に示した新しい扁平テレビ受像管の走査機構にこのガス放電方式が使われている。すなわち図 4.5 のような XY マトリックスの X 軸、Y 軸それぞれに放電のトリガギャップ T_{GX} 、 T_{GY} および素子数と同数の m 、 n 個のギャップからなり、このギャップを直流磁場中にセットする。そしてトリガギャップにトリガパルスを加え放電を起こさせると、あとは直流磁界の作用で放電がギャップ間を次々に移動する。(詳細はアメリカ特許 3337683 “Scanning Device” を参照)

こうして放電の交点は XY マトリックス上を次々に走査することが可能であり、たとえば直流 EL 素子と組み合わせると、発光点として走査できる。すなわち Y 軸の放電を Y_1 において X 軸側を X_1 、 X_2 、...、 X_n と走査し、次に Y_2 に放電を移してふたたび X 軸側を X_1 、 X_2 、...、 X_n と走査する。こうして画面上の点すべてを次々に走査することができる。これに図 3.5 に示した光増幅器を組み合わせることによって非常に簡単な、安価なパネルディスプレイが可能になる。しかもこうした機構をもつ平板テレビをここ数年のうちに完成するという発表が G. T. シュエール社から 1968 年になされている。

4.2.2 固体中の超音波の移動を利用した方式

圧電半導体中の超音波の移動を利用した方式がいくつか報告されており、中でもとくに興味があり期待されているのは図 4.6 に示したように N 形 CdS 上に P 形 Cu_2S 層を作り、CdS 中の超音波の移動に伴うドメインの形成によって N-P 接合部、あるいは P-N 接合部に流れる電流で注入形 EL を起こさせるものである。一つの CdS 基板上の超音波の移動方向にそって多くの Cu_2S 層を作ることによって CdS 中の超音波の移動に伴い次々に発光点を走査させることが可能である。輝度、寿命、広面積の結晶あるいは薄膜の製作など困難な問題が多いが、実現すれば非常におもしろい。

4.3 蒸着膜 EL

こうしたパネルディスプレイ装置の多くの動きの中で最後に蒸着膜 EL について述べておく。

蒸着膜 EL 素子の利点は非常に薄い 1μ 程度のけい光体層を用いるため解像度がきわめて高くなること、電圧対発光輝度特性の傾斜が急であるためクロストーク効果がきわめて小さく、非直線抵抗素子を用いなくても $B_T/B_{1/2T}$ の比が約 10,000 にもなることである。二層の SiO 絶縁膜で ZnS:Mn 蒸着膜をはさみ 256×256 本のパネルディスプレイが作られ、200 V、13 kHz で 200 fL、効率 1 lm/W が得られ

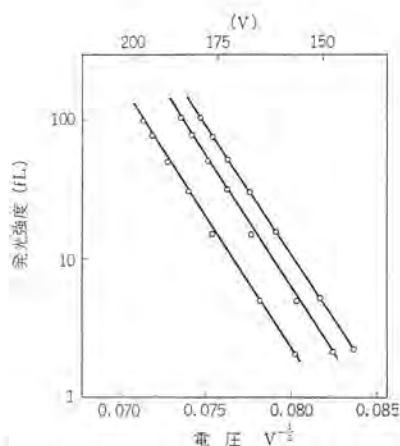


図 4.7 薄膜EL素子の電圧対発光強度特性

表 4.2 蒸着ELパネルの10,000対1のコントラストを得るに要する電圧比

周波数 kHz	電圧 V_1 at 100 fL	電圧 V_2 at 0.01 fL	電圧比 V_1/V_2
5	183.2	120.6	1.45
10	181.4	118.8	1.53
15	182.9	118.2	1.54
20	188.5	120.8	1.56
25	203.0	129.9	1.56

ている。これの電圧対輝度特性を図4.7にまたコントラストが10,000:1になる電圧比を表4.2に示した。

この他 ZnS : Mn 蒸着膜の表面に Cu を拡散させた形の EL ダイオードに直流を印加し、1,000 fL を得た報告もある。

しかし欠点は蒸着膜特有の信頼性の悪さ、製作工程の複雑さなどがあり、これらの困難さをいかに解決するかが今後の問題である。

5. む す び

以上パネルディスプレイの現在知られているおもな10方式を取り上げその構成、長所、短所さらに研究現状といったものを述べてきた。以上述べてきた検討結果からは、やはり真性EL、注入形EL、プラズマ、液晶の4方式がパネルディスプレイ装置の表示面として可能性が大きいといえる。しかしこの4方式においてもそれぞれ長所、短所をもっており、簡単には商品化はむずかしい。さらに本質的な改善を行なうか、それぞれに適した用途を開き実用化していく必要がある。

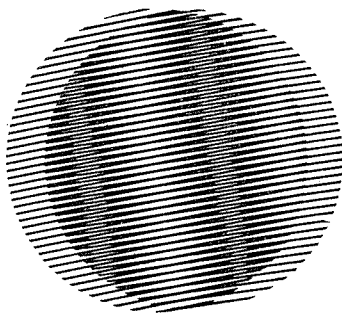
とはいえ今日のすばらしい技術の進歩、研究、開発のすさまじい勢いの波によって必ず近い将来パネルディスプレイとしてあるいは家庭用壁かけテレビとして実用される時代がくるものと思う。

参 考 文 献

- (1) H. H. Poole : Fundamentals of Display System (1966) Macmillan, London
- (2) W. T. Lynch, et al : IEEE Trans. on Electron Devices ED-14, 705 (1967)
- (3) D. L. Bitzer and H. G. Slottow : Proc. of the Fall Joint Computer Conference 541 (1966)
- (4) S. Shimada : Electronics 41, 93 (1968)
- (5) 安川, 吉沢, 伊吹 : 三菱電機技報, 42, 1483 (1968)
- (6) S. E. Cummins : Proc. IEEE 55, 1537 (1967)
- (7) E. A. Sack : Proc. IEEE 46, 1694 (1958)
- (8) J. A. Rajchman et al : Proc. IEEE 46, 1808 (1958)
- (9) B. Kazan : Proc. IEEE 47, (1959)
- (10) Electronics, 39, 143 (1966)
- (11) S. A. Harper : RADC. Ref., TR 65-478 (1966)
- (12) S. Caplan et al : 1968 Wescon Technical Papers Session 10 (August 1968)
- (13) S. V. Galginitis and G. E. Fenner : 1968 Int. Conference on Gallium Arsenide (Oct. 1968)
- (14) Electronics 41, (Oct. 14) 53 (1968)
- (15) R. H. Willson : 1968 Wescon Technical Papers (Aug. 1968)
- (16) G. H. Heilmeyer et al : Proc. IEEE 56, 1162 (1968)
- (17) J. A. Raalte : Proc. IEEE 56, 2146 (1968)
- (18) H. E. Irey and W. A. Thornton : Proc. IEEE 49, 278 (1961)
- (19) E. J. Soxman : Aerospace Medical Research Laboratories Report AMRL-TR-67-1
- (20) A. Vecht, et al : Brit. J. Appl. Phys. Ser. 2, 134 (1968)
- (21) S. R. Orshinsky : Phys. Rev. Letters 21, 1450 (1968)
- (22) Peterson : AFFDL-TR-66-123
- (23) B. J. Lechner et al : 1969 IEEE International Solid-State Circuits Conference.

最近登録された当社の特許

名 称	登 録 日	登 録 番 号	考 案 者	関 係 場 所
電池の陽極製造法	43- 6-29	522187	鳥 生 次 郎・長谷川知治	商品研究所
電解積分器	43- 7- 5	522578	秦 卓 也・松岡宏昌	中央研究所
電解積分器	43- 7- 5	522579	秦 卓 也・松岡宏昌	中央研究所
液面検出装置	43- 7- 5	522580	山地正城	長崎製作所
対数電圧発生回路	43- 7- 5	522581	倉橋浩一郎	中央研究所
放電加工装置	43- 7-29	524307	小酒井鶴男・西居春雄	名古屋製作所
コンパ装置	43- 7-29	524308	武 長 豊・瀬原田三郎	稲沢製作所
衝撃加工装置	43- 7-29	524309	前田裕雄・斉藤長男	名古屋製作所
無整流子形回転電機	43- 7-29	524310	大野栄一・赤松昌彦	中央研究所
近接電話処理方式	43- 7-29	524312	前田良雄・平浜茂一	中央研究所
方向距離継電装置	43- 7-31	524437	北浦孝一・古谷昭雄	神戸製作所
電動ホイス装置	43- 7-31	524456	米野俊彦・藤木博愛	福岡製作所
距離追尾系自動ロックオン方式	43- 7-31	524463	加藤亮一・大貫益夫	鎌倉製作所
並入動作シミュレータ	43- 7-13	523635	桑 田 博	鎌倉製作所
データ伝送装置	43- 7-29	524311	竹内康太郎・高根宏士	鎌倉製作所
関数発生器	43- 7-31	524457	阪尾正義・淡野光章	鎌倉製作所
関数発生器	43- 7-31	524458	阪尾正義・淡野光章	鎌倉製作所
関数発生器	43- 7-31	524459	阪尾正義・淡野光章	鎌倉製作所
可逆移相器	43- 7-31	524460	中原昭次郎・紅林秀都司	鎌倉製作所
自動テープレコーダのテープ駆動装置	43- 7-31	524461	和田庄次・上村達雄	郡山製作所
磁気円板	43- 7-31	524462	織田博靖・池上騏一郎 岡村康弘	鎌倉製作所
電話交換方式	43- 8- 9	524916	前田良雄・平沢茂一	中央研究所
インバータ装置	43- 8-15	525428	大野栄一・赤松昌彦	中央研究所
電気分析装置	43- 8-15	525429	石橋勝・小巻 仁 松岡宏昌	中央研究所
直流出力電圧調整装置	43- 8-29	526560	佐野善之助	伊丹製作所
電力パルス発生装置	43- 8-29	526561	大野栄一・赤松昌彦	中央研究所
タイムスイッチ装置	43- 8-29	526562	武田克己・高橋賢治	福山製作所
真空しゃ断器	43- 8-29	526563	大倉敏幹・森 真次郎	中央研究所
誘導電動機運転装置	43- 8-29	526564	川畑隆夫	中央研究所
磁石発電機の制御装置	43- 8-29	526565	水田和幸	姫路製作所
水中ポンプ用モートル	43- 8-29	526566	小川栄治	名古屋製作所
電流一致式磁心記憶マトリックス	43- 9- 3	526568	中村 弘・水上益良 井手平三郎	相模製作所
零相変流器	43- 9- 3	526569	森田義男・小倉忠利 春原岑生	相模製作所
零相変流器	43- 9- 3	526970	森田義男・小倉忠利 春原岑生	相模製作所
差動入力形ドリフト補償付直増幅装置	43-10- 4	528666	佐藤 毅・岡田康則	鎌倉製作所
制御用計算機の監視装置	43-10-29	530078	仁田周一	鎌・本重制
交通量測定装置	43-11- 6	530923	田村祥一・阿部寿夫	鎌倉製作所
溶存水素溶存酸素測定装置	43-11- 6	530924	秦 卓 也・松岡宏昌 錦織威紀	中央研究所
電気掃除機用吸込具	43-11- 6	530925	武井久夫・加藤 悟	郡馬製作所
電気掃除機	43-11- 6	530926	武井久夫・加藤 悟	郡馬製作所
工作機械数値制御における刃物径補正演算方式	43-11- 6	530927	松下大四・黒田泰次	鎌倉製作所
数値制御装置における円弧円挿近似演算方式	44-11- 6	530928	松本大四・黒田泰次	鎌倉製作所
消音器を兼ねた電気集塵器	43-11-16	532750	斉藤 寛	和歌山製作所
重複表示装置	43-11-26	532751	河野隆一	鎌倉製作所
故障相検出装置	43-11-26	532752	高田信治	神戸製作所
冷蔵庫	43-11-26	532753	木下忠男	静岡製作所
搬送保護継電装置	43-11-26	532754	北浦孝一・古谷昭雄	神戸製作所
無効電力制御用計算装置	43-11-26	532755	馬場準一・林 重雄 石田 芳	中央研究所
けい光放電灯用電極	43-11-26	532756	土井貞春・鈴木勝利 大木秀春	大船製作所
静止形積分特性継電装置	43-11-26	532757	森 健夫・松本忠士 野沢輝夫	神戸製作所
頂部装荷アンテナ	43-11-26	532758	喜連川 隆・武市吉博 小野 誠	鎌倉製作所



新製品紹介

LBH 形 無励磁作動式電磁ブレーキのシリーズ化完成

省力化時代をむかえて、各種機械は自動化はもちろん、無人化される傾向にある。また、それと同時に安全性が強調されるようになってきた。これらの要求に答えて、別名「安全ブレーキ」とよばれる、LBH 形無励磁作動式電磁ブレーキの6機種のシリーズを完成した。

このブレーキは、従来のEBA形励磁作動式電磁ブレーキに対して次のような特長をもっている。

(1) スプリングの力で制動し、電磁力で開放するので、制動トルクの立ち上がりが速く、急速な制動ができる。

(2) 停電時に自動的に制動するので、機械の惰走を止め、危険防止ができる。

また、小形軽量で取付方法は簡単、取付場所をとらない、機械にとりつけたまま、摩擦による空げきの調整ができるなどの特長をもっている。

つぎに、このブレーキを、モートルや電磁クラッチと組合せて使用したばあいのけんか現象をさけるため、ZKL形電源装置も同時に完成した。この装置はサイリスタを使用して、アーマチュア吸引時に85V、吸引後は12Vを印加するようにしたものである。この装置を併用することによって、普通の使用方法では、摩擦による空げきの調整は不要となる利点がある。

用途としては、自動倉庫、クレーン、リフト、など荷役機械の昇降や走行の停止用、数値制御の各種工作機械の送り機構の定位置停止および保持用、など幅広い用途がある。

表1および表2はそのおもな仕様、図1はLBH5形電磁ブレーキである。

表1 LBH 形無励磁作動形電磁ブレーキのおもな仕様

(電源 DC 24 V)

形 名	定格トルク kg·m	コイル抵抗 Ω/75°C	消費電力 W	主 要 外 径 寸 法 mm				重 量 kg
				最大外径	全 長	軸 径		
LBH-0.6	0.6	35.0	14	110	58	12		3
LBH-1.2	1.2	32.1	18	128	62	15		4.5
LBH-2.5	2.5	24.8	23	156	69	20		6
LBH-5	5	18.0	32	178	79	25		13
LBH-10	10	14.8	39	200	88	30		20
LBH-20	20	11.0	50	250	102	40		30

表2 ZKL 形電源装置のおもな仕様

形 名	容 量	入力電圧 AC(V)	出 力 電 圧		負荷抵抗	外 径 寸 法 mm		
			High	Low		縦	横	高 さ
ZKL-50 W	50 W	200/220	DC 85 V	DC 6~12 V	6 Ω 以上	225	130	130

[姫路製作所]

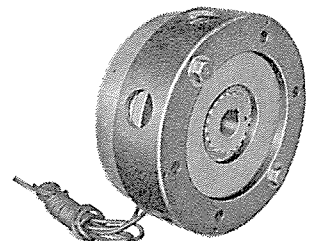


図1 LBH-5 形電磁ブレーキ

住宅向け新形石油温水機発売

一般家庭へのセントラルヒーティングの普及も本格化しつつあり、当社も、住宅向けセントラルヒーティング関連機器の開発に力を入れており、このたび住宅向け石油温水機としては、他社に類を見ない最新のデザインと、便利なアイデアを豊富にもりこんだ新機種PB-D15形を開発した。

新製品紹介

形 名 PB-D 15 形石油温水機
 価 格 現金正価 112,000 円 ローン取扱い
 発売時期 44 年 10 月 15 日

■ PB-D 15 形石油温水機の特長

(a) 据付面積が小さくてすみ経済設計

サービススペースを必要とするのは前面だけですむ。

(b) 搬入に便利なセパレートタイプ

階段の多い高層階への搬入、機械室とびらの小さな場所への搬入など、なやみの種であったが、PB-D 15 形はスパナ 1 本で上下に分割でき、しかも 1 個が 30 kg 前後と搬入・据付に大変便利である。

(c) 安全設計

通常大形機種にしか採用しない過熱防止サーモ（からたき防止サーモ）をつけて、安全を確保している。

(d) 操作に便利なリモコン方式

小さなリモコンボックスを屋内に取り付ければ温水機の運転・停止はもちろんのこと、今燃焼中か温水温度が何度になっているかを一目で確認できる。

(e) 2 重リング式バーナーの採用

従来のポット式バーナーをさらに品質向上させた二重リング式を採用し、油の燃焼音を低くしている。

(f) 住宅向けにふさわしいデザイン

従来のデザインに比べて住宅向けとしてふさわしいすっきりした明るいデザインである。

■ 仕様

形 電		名 源	PB-D 15 AC 100 V 50/60 Hz
入 力 W	点 火 時 遅 延 時		190 26
	外 形 寸 法 (高さ×幅×奥行) mm		1,540×600×632 (胴 500 φ)
出 力 kcal/h		15,000	
燃 焼 機	使 用 燃 料		白灯油
	燃料消費量 l/h		2.5
	バ ー ナ 形 式		強制通風ポット
	点 火 方 式		低電圧ヒータ
熱交換器 (罐体)	形 式		縦形煙管式
	回 路 数		1
	材 質		SUS 27 CP
	材 量 l		100
	伝 熱 面 積 m ²		0.87
	最高使用圧力 kg/cm ²		1
制 御 装 置	耐 圧 試 験 圧 力 kg/cm ²		2
	運 転		安全自動運転
	制 御 器		カム式コントローラ
	炎 検 知 方 式		温度検出
	ア ク ア ス タ ッ ト		ベロ形液膨張式
	からたき防止サーモ		バイメタル反転式
燃 料 制 御		オイルコントロールバルブ (フロート式)	
必 要 空 気 量 m ³ /h		36	
煙 突 径 mm		150	
重 量 kg	製 品 重 量		70
	運 転 重 量		170
付 属 品		リモコンボックス・ドラフトレギュレータ・すす取りヘラ	

[和歌山製作所]



図 1 PB-D 15 形石油温水機



図 2 PB-D 15 形石油温水機用
リモコンボックス (AC-15 B)



NEWS FLASH

三菱電解加工機 ダイヤシンカ MC-100 V-B 製品発表会

電解加工機、ダイヤシンカ “MC-100 V-B” を完成し、チェコスロバキアのクラドノ製鋼所へ出荷前の10月29日に、名古屋製作所において発表会を行なった。

当日は自動車メーカーを中心に電解加工機ユーザがほとんど参会し、当社技術者と活発な質疑応答が行なわれた。ユーザの電解加工機導入に対する関心は強く、伸びゆく加工機の未来像が見られ、先日納入した客から「三菱の技術の進歩は驚異的で早く買おうと損をするようだ」とうれしい苦情もあった。

本機は、米国アノカット社と競争の末、当社へ受注が決まったもので、機械性能は、電源容量10,000 Aで、当社が誇る高圧気体混入方式およびくり返し精度を著しく高める G. O. C. 装置によって、電解加工の加工精度は保証されており、型加工を精度良く、短時間に人手を要することなく生産できる。操作性を容易にする目的で、位置決め装置にはデジタル表示方式を採用し、手元の操作盤により、電極の加工動作を自動的に設定ができる装置や、加工が途中で中断された場合、自動的に加工面に筋や段などがつくことなく、継続して次の加工ができる装置など、これまでに見られない新しい制御方式を採用した画期的な電解加工機である。

(1) 本機のおもな特長

(a) 高圧ガス混入方式の採用により、加工底面の平坦度や面あらしがよい。

(b) 遠心分離機の採用により、常に清浄な電解液を供給し、安定な加工を維持できる。

(c) G. O. C. (問げき最適制御) 装置の付属により、液温や濃度の変化に関係なく、高い繰返し精度が得られる。

(d) デジタル式位置決め装置の採用により、手元の操作盤で容易に加工深さおよび加工動作の自動設定が行なえる。

(e) リカバリー装置により、短絡などで途中で加工を中断した場合、仕上面に筋や段をつけずに続けて加工できる。

(f) 独自の極間異常状態の検出回路と、高速シャ断回路を組み合わせた装置により、電極の損傷を防ぐ。

(2) おもな仕様

(a) 電源

入 力 三相 50/60 Hz 400 kVA
出 力 電圧 4~18 V
最大電流 10,000 A

(b) 機械本体

- | | |
|--------------------------|------------------------|
| (i) 電極送り ストローク | 350 mm |
| (ii) 電極送り制御方式 | 定電流密度方式 |
| (iii) 最大被加工物寸法 | 1,200×800×600 (H) mm |
| (iv) 被加工物取付面寸法 | 1,400×800 mm |
| (v) 電極および被加工物最大取付面間距離 | 最大 1,150 mm |
| (vi) 被加工物移動距離 | 左右 500 mm
前後 250 mm |
| (vii) 被加工物搬入のための加工そう移動距離 | 1,700 mm |

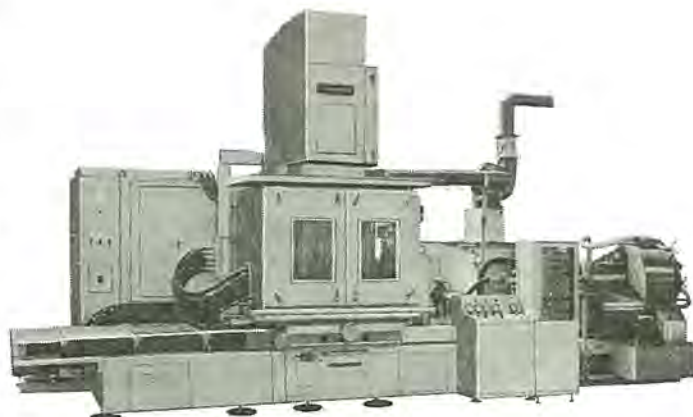


図 1 電解加工機 “ダイヤシンカ MC-100 V-B”



図 2 本機により加工した クランクシャフト 鍛造型の写真

電極分割数 6, 総加工重量 19.75 kg, 最大加工深さ 65.9 mm, 総加工時間 3 時間 7 分

(3) 加工性能

(i) 最大加工面積	500 cm ²
(ii) 加工送り速度	0.3~5 mm/min
(iii) 最大加工速度	170 g/min
(iv) 加工精度	型彫り精度 ±0.1~0.3 mm 貫通孔加工 ±0.05 mm
(v) 面あらかさ	3~20 μH _{max}

[名古屋製作所]

1,800 V 100 A 30 μs の高耐圧大容量高速スイッチング用サイリスタを開発

当社では、このたび耐圧 1,800 V、電流容量 100 A、ターンオフ時間 30 μs の定格をもつ、高耐圧大容量高速スイッチング用サイリスタ（形名 CR 100 CX-36）の開発に成功し、量産に移行した。

従来、高速スイッチング用サイリスタのターンオフ時間を短くすると、もれ電流あるいは順電圧降下が増大し、高耐圧になるほどその度合は著しいため、その耐圧と電流容量には制限があり、ターンオフ時間が 30 μs 程度（以下）の高速サイリスタでは、電流容量 100 A 級で 1,300 V 程度が最高のものであった。

今回当社が開発した CR 100 CX-36 は、以上の製造技術上の問題点を解決し、その耐圧を一挙に 1,800 V 以上に高めたもので、同クラスの高速スイッチング用サイリスタとしては電流・耐圧とも記録的な容量をもっている。

本素子の実現によって高圧インバータあるいは高圧チョッパ装置において、素子の直列数の減少が可能となり装置の信頼性の向上、小形軽量化低コスト化をはかることができる。

CR 100 CX-36 のおもな特性・定格はつぎのとおりである。

	—36	—38
せん頭順阻止および逆耐電圧	1,800 V	(1,900 V)
過度せん頭順阻止および逆耐電圧	1,900 V	(2,000 V)
電流容量（正弦半波平均）	100 A	
瞬時過電流	2,000 A	
臨界順電流上昇率 (di/dt)	100 A/μs	
臨界順電圧上昇率 (dv/dt)	100 V/μs	
最小点弧 ゲート 電流	100 mA	
最小点弧 ゲート 電圧	3 V	
代表的 ターンオン 時間	1~3 μs	
最大 ターンオフ 時間	30 μs	

[北伊丹製作所]

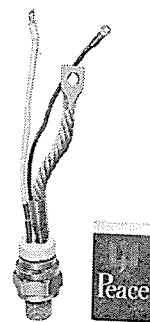


図 1 CR 100 CX 形サイリスタ

自動車の安全性および性能向上を図る各種エレクトロニクス装置を開発

現在、各自動車メーカーをはじめ電気メーカー等の間では、自動車の安全性および性能向上・公害防止等を図る目的から、自動車機器へのエレクトロニクス技術の導入が積極的に進められているが、当社では、このたびこれらの目的に沿った各種エレクトロニクス応用装置の開発を一部完了し、さる10月24日東京晴海で開かれた第16回モーターショーに展示して好評を博し、さらに10月25日NHK「スタジオ102」でも紹介された。

(1) 超音波式後方障害物検出装置

超音波を用いるレーダー装置の一種で、車体後方の視界死角にある障害物を検出し、警報を発する装置である。乗用車用・トラック（大形）車の2種があり、国内外に数件の特許出願中。

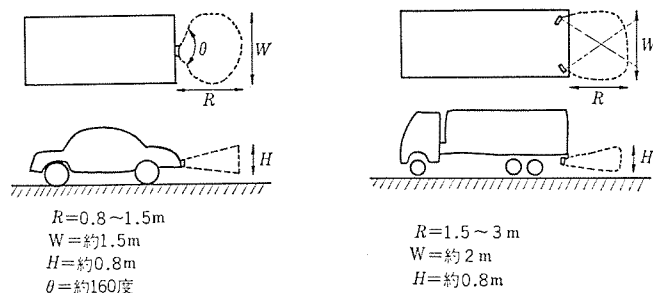
形 名	REC-UP (乗用車用)
	REC-UT (大形車用)
価 格	3～5万円
発売時期	昭和45年春ごろの予定

■ 特 長

- (a) 検知範囲が広い。
- (b) レンジゲート方式を用いているので、検知距離を確実にコントロールできる。
- (c) 検知物体は、人間はもちろん金属・非金属何でもよい（空気と比重が異なるものなら何でも検知できる）。
- (d) センズル値保持回路により S/N 比を改善しているので、動作が確実である。
- (e) 外部雑音による誤動作はほとんどない。
- (f) 装置の故障による誤動作を防止している。正常動作時には断続音を発し、障害物を検知すると連続音に変化する。

■ 仕 様

(a) 検知範囲



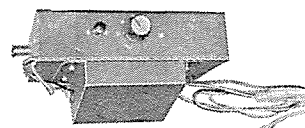
- (b) 検知物の大きさ……約5cm 四方の物体または直径5mm以上の棒
- (c) 電 源……直流 12V 0.5A
- (d) 使用トランジスタ……約20本

(2) ボデーアンテナ

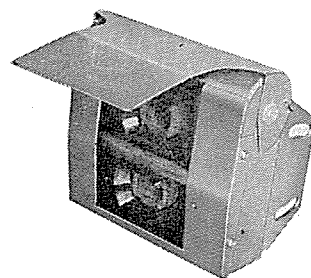
車体の一部をラジオ用受信アンテナとして使用するもので、当社では約3年前から各種のボデーアンテナについて実験を進めていたが、このほどトラックカバーを利用する方式の実用化に成功した。これはトラックカバー自体と周辺部（レインダクト、ちょうつがい等）の形状および材



NHK「スタジオ102」テレビで放送中



(a) 操作部 (幅160×高さ40×奥行90mm)



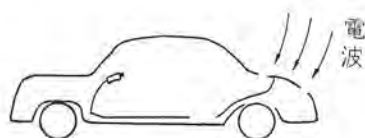
(b) トランスデューサー部 (幅120×高さ120×奥行50mm) シャッターを開いた状態

図1 REC・UP形 超音波式後方障害物検出装置

質について、電気的な検討を加えるとともに、これにマッチするラジオの開発を行なったもので、本年5月ごろからコルツ 1500 SS に採用され、ユーザの評判もよく今後需要は増加するものと思われる。国内外に数件の特許および実用新案を出願中。

■ 原 理

電界中にある金属導体表面には、その面積および形状に比例する数の電気力線が、ほぼ垂直に入射して電荷（電流）を生じ、アンテナとして作用する。



■ 特 長

- (a) 感度・指向性は AM, FM とも従来のポールアンテナと同じである。
- (b) 操作はいっさい不要である。
- (c) 突出していないので安全である。
- (d) 高速走行時の空気抵抗がない。
- (e) 接触不完全等による雑音発生がない。
- (f) 折損等の事故がない。

(3) 自動音声警報装置

従来、計器板の表示灯やメーターによって行なっていた故障警報や、ドライバーの誤操作等を音声によって通報する装置である。メッセージを録音したエンドレステープを、センサーからの入力によって駆動し、チャンネルを自動的に選択して再生するので、ドライバーは運転中計器板に注意しなくてもよく、安全性向上に有効である。

■ 形 名 VAS-220 形

■ 特 長

- (a) センサー（検知器）は、従来使用されているものがそのまま使える。
- (b) センサー部で接地するのみで、装置の電源接続とチャンネル選択が行なわれる。
- (c) 複数の故障発生時は順次に繰返えて警報する。
- (d) 小形軽量であるが、テープ速度は 9.5 cm/s で音質がすぐれている。

■ 仕 様

- (a) 電 源……直流 12 V 2 A
- (b) チャンネル数（警報の種類）……8
- (c) アナウンス時間（一周）……約 6 秒
- (d) 使用テープ……1/4 幅 エンドレステープ
- (e) 寸 法……幅 170×奥行 120×高さ 80 mm

■ 警報例

半ドア
サイドブレーキのはずし忘れ
オーバースピード
オーバーヒート
油圧低下
充電系故障
ランプ断線



図 2 自動音声警報装置

その他

(4) 定速走行装置

定速走行装置とは、アクセルペダル の操作なしで、車の走行速度を、希望する一定値に自動的に保持する装置で、高速道路の発達したアメリカでは、ドライバー の疲労軽減に役立つものとして、ほとんどの車種がこの装置を オプション 装備として準備しており、装着率も遂次向上して現在では、10%を越えたと言われている。このたび当社が開発した方式は、バキュームサーボモータを主体としたもので、このため従来の純電気式制御に比較して大幅にコストが低減されている。

■ 形 名 K-003

■ 発売時間 昭和45年4月(予定)

■ 特 長

(a) 押し ボタンスイッチにより、ワンタッチで車速の設定記憶ができる。ドライバー が押し ボタンスイッチを入れたときの実車速を設定値として記憶し、定速走行を行なう。設定可能な最低車速は45km/hである。

(b) いったん設定した車速でも容易に変更できる。押し ボタンスイッチが二段となっており、一段押すと自動加速、二段押すと自動減速となって車速が自動的に変わり、押し ボタンスイッチから手をはなしたときの車速が、新しい設定車速になる。

(c) 追越しは装置が動作状態のままでアクセルペダル を踏み込めばよく、アクセルペダル から足を放すと、もとの設定車速に戻って定速走行状態に復帰する。

(d) ブレーキ を踏むと、定速走行状態は自動的に解除されるが、設定車速は記憶されているから、もとの設定車速まで再加速してやると、自動的に定速走行状態にはいる記憶装置を付加した。

(5) 電子式ガソリン噴射装置

ガソリン 噴射装置は、種々の外部条件(エンジン 回転数・吸気管負圧・冷却水温度・エンジンオイル 温度・吸入空気温度・吸入空気圧等)に応じて、精密に空燃比を コントロール することができるから、気化器を使う場合よりもエンジンの燃焼状態がよくなり、したがって排気ガスの浄化、燃費出力の向上というメリットが得られるとして、各メーカーで研究されてきた。機械式制御のものは、かなり古くから採用されており、これはエンジン 性能のアップをねらったもので、メルセデスベンツ 250 SE などがその例である。

電子式制御のものは、その制御性が買われて、現在では開発研究の主対象となっている。この分野では、西ドイツ のフォルクスワーゲン 社が1967年対米輸出車に、ポッシュ 社製のものを全面的に採用したのが最初で、その後メルセデスベンツ、ボルシェ 各車も一部に採用することを発表した。

当社ではこのたび IC を利用し、独自の アイデア にもとづく新制御方式を採用した高性能の電子式 ガソリン 噴射装置の開発に成功した。

■ 基本原理

エンジンの運転状態により変化する要因(エンジン 回転数・吸気管負圧・冷却水温度・エンジンオイル 温度)、および外部要因(吸入空気温度・吸入空気圧)を各センサー が検知し、これらセンタから伝えられた情報をまとめて、コンピューター が必要にして十分な燃料の量を決定し、この決定された燃料の量を、吸気バルブの近くへ電磁的に作動する噴射ノズル(各気筒ごとに装備してある)で噴射し、シリンダ 内へ吸入燃焼させる。

このほか、減速時の燃料カット(排気ガス 対策)、加速時の燃料増量(パフォーマンス 向上)。



図3 定速走行装置



図4 電子式 ガソリン 噴射装置

および寒冷始動時の燃料増量（寒冷時の始動容易化）という制御も行なっている。

■ 形 名 K-4011

■ 特 長

- （a） レース 用のような高速 エンジン（12,000 rpm でも可）にも十分追従できる。（従来発表されている電子式は 6,000 rpm 程度が上限である）
- （b） IC を利用して信頼性を高めるとともに、部品点数を大幅に減少した。
- （c） 各気筒ごとに噴射 ノズル が設けられているから、 気化器式のような気筒ごとの混合比不同がなく、また気化器式よりもはるかに多くの条件を折り込んで、ガソリン 供給量を制御することができるため、排気 ガスの浄化、出力燃費の向上が得られる。

■ 仕 様

- （a） 噴射量は、電磁噴射 ノズル の開口時間（通電時間）で定まり、普通の運転状態で 3～28 mg（開口時間 2～9 ms）
- （b） 噴射 ノズル ストローク……0.3 mm
- （c） 噴射 圧力……2 kg/cm²

[京都製作所]

正 誤 表

Vo. 43 No. 11 に掲載の論文、「富士製鉄（株）名古屋製鉄所向け厚板圧延機計算機制御 システム」に誤記がありましたので次のように訂正いたします。

ページ・行	誤 り	正
1480 ページ 左 下から 8 行目	幅 1,200～2,300 mm	幅 1,200～2,400 mm
1480 ページ 右 上から 5 行目	ブッシャー によって押込まれる。	炉内に装入される。
1480 ページ 右 下から 7 行目	スラブ	圧延中間製品
1481 ページ 左 上から 2 行目	縦目成品	リングスワイズ 圧延材
1481 ページ 左 上から 2 行目	偶数回	奇数回
1481 ページ 左 上から 3 行目	横目成品などとも	クロス 圧延材と

三 菱 電 機 技 報 昭和 44 年 第 43 卷 総 目 次

回顧号

ハイライト	9
巻頭言	25
1. 研究	26
2. 発電	43
3. 送電・変電	54
4. 配電	71
5. 工業プラント用電機品	77
6. 工業用電機品	97
7. 船用電機品	114
8. 電鉄用電機品	119
9. ビル用電気設備	128
10. 電装品	138
11. 電子機器	142
12. 電子計算機	161
13. 計測器	170
14. 放射線機器	176
15. ランプ・照明器具および照明施設	181
16. 家庭用一般電気品	187
17. 電子管および半導体素子	202
18. 材料	213

特 集 論 文

〈宇宙開発〉

茨城衛星通信所第2アンテナ	西田 昌弘・糸原志津夫・喜連川 隆・水沢 丕雄・西村昭三・木下 親郎・石井 康一・篠原 英男・別段 信一・松村雅司	227
メキシコ納め衛星通信用大口径アンテナ	丸 浜 徹郎・森 川 洋・阿 部 修・遠藤義昭・尾形良征	
メキシコ納め衛星通信用大口径アンテナの据付	竹内 政和・吉 田 連・塚田 憲三・水沢 丕雄	245
衛星通信用広帯域変復調装置	阿 部 修・西山 猛・岡野 晃・中西道雄	265
太陽電波観測用160MHz複合干渉計	土 屋 淳・渋谷暢孝・山前瑞穂・伊藤 卓司・金城益夫	271
人工衛星打上げロケットの誘導制御	郷 鉄夫・加藤 亮一・田中 稔	276
航行衛星用トランスポンダ	近藤 五郎・甲野 克洋	285
インテルサットⅢ号商業通信用衛星電源制御器	吉田 武彦・近藤 五郎・中村 悟・向井長夫・吉沢 達夫	291
人工衛星用アンテナ	武市 吉博・信岡 正裕・小野 誠・中村雅澄	297
フェーズドアレイ用マイクロ波フェライト回路	中原昭次郎・紅林秀都司	302
ロケット用埋込み形アンテナ	武市 吉博・河 村 孝・小野 誠	309
液体ヘリウム冷却パラメトリック増幅器システム	明石克寛・神頭徳治・白幡 潔・武富大児・立山 茂・折目晋啓・池川秀彰	313

〈発電機〉

原子力用4極タービン発電機	志岐 守哉・甲斐 高	491
最近の水車発電機	三 浦 宏・山下喜美雄・森与 志彦・監崎 章	501
ガスタービン発電機	坂井 時弘・大石 紀夫	512
タービン発電機の励磁系	甲斐 高・長沢 保明・天笠 信正	519
水冷却タービン発電機の基本設計	志岐 守哉・甲斐 高・大石 紀夫・明石克寛	530
水冷却発電機の固定子コイルと絶縁ホース	村 上 晃・土方 明躬・二川 曉美・松田 禎夫	541

水冷却発電機の水系統と運転	今井 光・鈴木文夫・太田基義	547
水冷却発電機における腐食	秦 卓也・松岡宏昌・川岡靖子・山屋恵章	554
水冷却発電機モデルコイル長期総合試験	原 仁吾・野村達衛・谷 功	563

《生活の快適化》

(A) 基礎編

文化生活和健康	西川 濱八	621
皮膚の美容と電気器具の利用	中村敏郎	624
住宅設備の問題点と将来	勝田 高司	626
快適な空調	武藤 正	628
音と生活	藤木 一	633
住宅照明における快適性の追求	小堀富次雄	637
暮らしと色彩	堀田鉦太郎	641

(B) 機器編

住宅の暖冷房システム	小原 英一	648
冷水温水による住宅冷暖房機器	岩崎善彦	655
冷暖房用ポンプ	城戸久吾	665
家庭用ファンコイルユニット	吉野昌孝	668
住宅用ルームクーラ	石川英敏・坂田英二郎・貝瀬俊朗・遠藤吉隆	674
換気扇	入沢淳三・穴戸幸男	679
深夜電力利用蓄熱暖房器	荻原孝久・赤羽根正夫	684
深夜電力利用電気温水器	荻原孝久・赤羽根正夫	688
電気衣類乾燥機	町原義太郎	691
住宅用照明器具—ジョイントシステムによる照明器具—	山崎 肇・桂 秀年	695
家庭用理美容機器（回転機応用品）	武井久夫・増田 三郎	699
家庭用理美容機器（電熱応用品）	森本敏夫・小川 昇	703
脈拍数計（ハートベット）	岩田 誠・柳 父 靖	706
三菱医学用テレメータ装置PT-270	小林督智・安田弘明・斎藤邦夫	709

《半導体》

高耐圧大容量双方向サイリスタBCR150A	船川 繁・蒲生 浩・宮嶋辰夫	763
高耐圧大電力半導体素子	中田 伏祐・山本 勇・上田 守・須川嘉幸・米田良忠	769
溶接機用サイリスタACスイッチ	杉本盛行・山本 勇・飯田隆彦・大島征一・小嶋鈴夫	778
高周波高出力シリコントランジスタ	井上 功・楠 和郎・亘 善彦・平瀬邦彦・杉村滋夫・下馬場民夫	786
シリコンモールド形低周波電力用トランジスタ	細見 清・新保信太郎・進藤通世・井上 晟	792
サイリスタ用トリガー素子	柴田 浩・進藤通世・石井 真	796
MOS IC の設計技術	土屋鍊平・坪内夏朗	799
ラジオ用IC	石井 悠	803
IC用横形PNPトランジスタ	大久保利美・中野隆生・堀場康孝	807
GaAs ショットキ障壁ダイオード	池川秀彰・八原俊彦・星加春幸	812
(Ga _{1-x} Al _x)As 発光ダイオード	奥 泰二	816
シリコンアバランシェフォトダイオード	藤川恭一郎・高宮 三郎	821
デジタルICの機能試験装置（ICテスト）	壺井芳昭	826
クロムマスク	大田基義・矢田俊雄・豊田裕康・伊藤和男・川瀬 健	830

《モートル》

最近の大容量同期電動機	山口 孝・成 清 正・福本紀久男	895
最近の大容量誘導電動機	東 覚 里 志	904
一般工業用直流電動機	大川 明 久	914
かご形クレーンモートル—ハイスロックモートル—	小島敏男・森田 清・堀内勝彦	917
NBブレーキ付モートル	三 富 孜・松谷英治	922
リミストップクラッチモートル—ミシン針自動定位装置付クラッチモートル—	横山 昌 弘	925

交流電動機速度制御方式	山下隆三郎・栗田 静 夫	930
单相誘導電動機サイリスタによる速度制御	前川 善 六・小野 健 一	940

《多重通信とデータ伝送》

多重無線の動向	丸 浜 徹 郎	1021
新幹線試験電車 951 形用列車無線装置	馬 場 武・中島久雄・横山保憲・中川幹雄・上田勝彦	1024
800MHz 帯狭帯域工業用テレビジョン無線装置	沼田敏男・関川一彦・一の瀬友次・嶋田 正	1030
ME-7D 302 形 7GHz 帯多重通信装置	沼田敏男・中北喜一郎・嶋田 正	1039
新形 12GHz 帯多重無線装置	金子正治・中北喜一郎・嶋田幸男	1046
制御用データ伝送	室 田 慎	1052
新しい符号化方式	藤原謙一・山内才胤・田 中 智・林 信喜・平沢茂一	1054
符号伝送用変復調装置	太田堯久・小林 茂	1063
データ伝送装置の新実装方式	佐藤円二・小村 明・中島明賢	1067
自動給電用 IC 化デジタル伝送装置	永田文也・羽子岡蕃・千田和禧	1070
電力系統安定用信号伝送装置	水谷克己・藤野勝己・角田義成・金子信男・新井 清・羽子岡蕃	1078
IC 化遠隔監視制御装置	小林 茂・荒尾和男・藤井孝知	1081
庄川系水力発電所集中監視制御システム	永田文也・羽子岡蕃・金井三男	1084
水道用データ伝送システム	多田政文・前田竜夫・橘田芳男・吉武敏朗・藤原謙一・柳沢 忍	1090
ダム河川管理用 IC 化テレメータ/放流警報装置	藤原謙一・今泉 巽・柳沢 忍・北原貞守	1099
海象観測用テレメータシステム	今泉 巽・安岡 護・豊原亜洲	1105
大気汚染監視テレメータシステム	今泉 巽・北原貞守・小村 明	1112
東京都交通局納め電鉄変電所集中監視制御装置	島田政代士・鍋倉浩一郎・流郷忠彦	1117

《原子力放射線機器》

最近の原子力放射線応用機器	桜井良文	1155
三菱臨界実験装置 (MCF)	小倉成美・隼田公彦・津田元裕	1159
放射線測定器	岩 井 優・吉島宇一・仲森誥貢	1167
放射線応用計測器	岩 井 優・吉島宇一	1174
放射線監視装置	岩 井 優・吉島宇一・仲森誥貢・吉田和夫	1178
三菱 RI カテテルの開発とその悪性しゅよう(腫瘍)診断への応用	東 与 光・久田太郎・池本真一	1184
最近の X 線テレビジョン	道家昭彦・宮下恭一・高田 守・岩岸 聡・小田 稔・藤川恭一郎・浜 正治	1184
イラク国立原子力研究所納め中性子回折装置	田部貞夫・津田元久・道家昭彦・堀 高明	1193
ガンマ線照射装置	今 井 光・三富至道・松宮正幸・弘中一光	1202
微量放射能測定技術	津田栄一・今 井 光・三富至道	1209
	柳下和夫・岩岸 聡・小田 稔	1215

《水プラント用電機品》

水プラント用電動機と制御装置	奥 勝・栗田 静 夫・高木洋一郎	1293
水中モートル	和田義彦・佐藤公夫・山本作衛	1303
最近の水道プラント受電設備の傾向	田 和 穰・川端保男・田中久雄・梁川美孝・吉光己吉・塚本修平	1309
水道プラント制御装置	山田米造・荒木義朝・斎藤心一	1321
水道用遠方監視制御装置	島田政代士・今泉 巽	1332
大阪府村野浄水場計算機システム	江村利雄・坂口 功・石川欣央・竹内幸雄・山本潤二・竜田直紀・深尾忠一郎	1343
トランジスタ化ろ過池洗浄制御装置	坂口 功・松本直巳	1356
水系ゲート制御	安田宜弘・渡辺一弘	1361
AF-210 形超音波流量計	吉山裕二・芥 和 弘・田井昌輝・梶田征也・古木寿人	1366
水位リレー	下吉正人・三田村隆輝	1370
三菱 MVA 形バルブアクチュエータ	深川吉則・盛口全太	1374

《計算機制御》

自動車工業における生産管理システム	植 木 崇・服部昭雄・仁科迪哉・磯崎 真・菊田正雄	1437
MELCOM-9100 ガスクロマトグラフデータ収集システム	阿部寿夫・梶山 裕・望月純夫・岡 治 樹	1442

電力系統状態監視システム	林 重雄・石田 芳	1447
電源開発(株)高砂火力発電所納め計算機システム	中林恭之・田中慎一・渡辺 聡	1455
衛星追尾用指令制御システム	山内信治・松村雅司・山本征二	1462
MELCOM 350-5制御電子計算機システム	中尾勝丞・仁田周一・松本孝郎・竜田直紀・深尾忠一郎・蒲生容仁	1470
富士製鉄(株)名古屋製鉄所向け厚板圧延機計算機制御システム	鈴木輝義・岡本佳三・杉原弘章・穴戸隆介・新野修平	1480
日新製鋼(株)呉製鉄所における転炉製鋼工程の計算機制御システム	平本武紀・沢野 清・井上信義・小野寺博志・外山守城	1486
火力発電所計算機制御の動向	花村泰助・橋本健治	1491
大阪府水道部集中管理システム	江村利雄・坂口 功・石川欣央・田中 稔・安田宜弘・柳沢 忍・塚原昌恭	1495
小形計算機による電車総合回路試験装置	湯浅俤史・竹内幸雄・小田橋正寿・中司修慈	1504
計算機(MELCOM 350-5)による位置制御装置	川崎宗男・三浦 望	1511

《MHD発電》

MHD発電開発の現状	伏見光造	1581
MHD発電用超電導磁界装置	明石克寛・荻野 治・岩本雅志・佐藤 隆	1589
70kG 超電導ケーブルの開発研究	石原克己・橋本康男・田口 修・小島英則・小俣虎之助・田中光雄・平田郁之・菅原宏	1599
75kG 大形高磁界超電導電磁石(I) —その設計と製作—	岩本雅民・佐藤 隆・平田郁之・山田忠則・蓬来 勝・藤原健三	1607
75kG 大形高磁界超電導電磁石(II) —運転試験—	荻野 治・神頭徳治・岩本雅民・佐藤 隆・山田忠利・田中光雄・平田郁之	1615
45kG 超電導電磁石冷却系(I) —計画設計および製作—	荻野 治・森口哲雄・相良泰一・中間清孝	1621
45kG 超電導電磁石冷却系(II) —据付および運転試験—	荻野 治・森口哲雄・尾原昭徳・坂東修三・山口 進	1629
セミホット壁MHD発電ダクトに関する研究	池田 茂・是永定美・森川鉄也	1636
Ti-Nb-Ta 合金の高磁界超電導特性	田中光雄・小俣虎之助・橋本康男・石原克己	1642

普 通 論 文

原子炉用中性子検出器—CICおよび ¹⁰ Bカウンター	小林一夫	323
極低温における金属の電気的・熱的性質	小俣虎之助・田中光雄・平田郁之	329
四国電力(株)納め分水水系自動出力制御装置	田中鉄弥・対尾準三郎・片岡明孝・石井清隆	355
低周波ビレットヒータ	藤室雅司	363
低周波ビレットヒータ用変圧器	鶴田敬二・川島 亘	370
超々高圧ガスしゃ断器とその実用性能	瀬渡卓三・渡辺次男・大野 玲	376
三重県三瀬谷発電所長ヶ逆調整池のゲートおよびゲート制御装置	西島淳方・滝沢 博・持田雅夫・柳沢 忍・山田米造	383
ME-04 D 051 X 形 400 MHz 帯多重無線装置	一ノ瀬友次・小森千之・光高公一・岡村義一	396
水冷式パウダクラッチブレーキ	村田俊哉・車戸秀男・浅野哲正	400
水素炎イオン化検出法による自動車排気ガス中炭化水素濃度の連続測定	森川允弘・吾妻健国・平野重明	407
フォトリソミックプラスチックシート	太田基義・矢田俊雄・豊田裕康・山口久美子	416
ガスレーザとその応用	谷口 一郎・樋口隆一・宮沢淑子・佐竹正章	424
滴下処理用絶縁ワニス(DRV)の特性	柴山恭一・鈴木康弘	436
ドリル樹脂成形品の性質	西崎俊一郎・古橋靖夫	442
厚板鋼板用点溶接機	山本利雄・奥田滝夫・馬場利彦・越智紀明	446
遅延列車の回復運転法	山崎英蔵・小畑 甫	454
極低温におけるオーステナイト系ステンレス鋼の機械的性質	小俣虎之助・平田郁之・菅原 宏	460
非破壊検査用電子ライナック“ML-15R形”の性能	源 進一・逢坂誠司・浦田和義・長井俊彦・秋葉稔光	465
東京大学物性研究所納め中性子散乱回折装置	星埜楨男・津田栄一・弘中一光・柳下和男	571
長時間運転用MHD発電ダクトの実験的研究	森川鉄也・村井 裕・小林幸人	579
愛知用水公団納め大入、振草両頭首工向けゲート集中管理制御装置	松本富士夫・藤井直二・和田宏三・安田宜弘・田中 稔・塚原昌恭・永田文也・小村 明	586
加速管(平板形)およびEinzell形収束Lens内における電位分位および荷電粒子軌道(I)	高木高志・水野謙一	596
400A 2,500V 平形高耐圧大電力サイリスタ	岡 久雄・船川 繁・中田伏祐	602
コアギレタ用レーザ装置	福塚 峻・菅野 勉	609

加速管(平板形)およびEinzel形収束Lens内における電位分布および荷電粒子軌道(II).....	高木高志・水野謙一.....	715
静止形電圧調整継電器(変圧器制御用).....	松本忠士・稲垣宏明.....	720
大電力高速スイッチング用サイリスタ.....	船川 繁・蒲生 浩・山上 岸三.....	728
高エネルギー電子ビームモニターの特性.....	小浜太郎・柳沢 武・磯貝文彦.....	739
マイクロ波プリント基板.....	中原昭二郎・信岡正祐・堀切賢治・太田基義・藤永 弥.....	746
三菱大容量クレーンモートル.....	藤田淳治・富田晴彦.....	752
新形空気式限時継電器.....	杉浦 博.....	835
MS形電磁開閉器、電気の寿命と適用.....	丸地謙二・岡戸弘行・寺尾定彦.....	845
2×224MVA東京電力五井火力5号クロスコンパウンドタービン発電機.....	中 歩 高・柏木俊男・速水 和夫・浜田一義.....	854
愛知用水公団納め駒場池ゲート制御装置.....	藤井和洋・藤井直二・合田啓治.....	864
三菱多段多重式遠方監視制御装置.....	山中彪生.....	870
3/6kV閉鎖形配電盤ブロックパネル.....	水淵和哉・柳堀純一郎.....	875
方向性けい素鋼帯の磁気ひずみ.....	土屋英司・岡田 将.....	947
両方向直流高速度しゃ断器.....	渡辺睦夫.....	955
うず電流問題の差分法による解析.....	野村達衛.....	964
安全ブレーカ.....	松浦 清.....	970
静電結合形固定記録装置.....	小島一男・蒲生容仁・南部 元.....	972
コークス押出機の自動運転装置.....	今堀信彦.....	977
航空機用電動バルブ.....	杉山昌司・奥田安男・細津登良.....	982
深海潜水艇用油入均圧直流電動機.....	河村博敏.....	990
中性子チョッパ.....	渡辺光人.....	996
大形スラスト軸受の性能.....	田附和夫・石井 明・山本 明.....	1223
静止レオナード用サイリスタ装置.....	山村隆司・大道 隆・柏野栄三・有賀恵蔵・留井英明.....	1235
航空機用UHFブレードアンテナ.....	武市吉博・浜口道雄・小野 誠.....	1242
低圧絶縁導体バスダクト.....	堀田滋矩.....	1246
スペイン国鉄向け3100kW 直流電気機関車.....	浅越泰男・平尾新三.....	1256
列車自動制御用演算回路のIC化.....	鳥居健太・金子弘美・石本正明.....	1267
高圧水中モートルの絶縁方式.....	諸岡 廣・早川隆昭.....	1379
新形中容量SF ₆ ガスしゃ断器SFLシリーズ.....	富永正太郎・田辺俊雄・佐藤邦彦.....	1383
小田急電鉄納め変電所集中監視制御装置.....	山中彪生.....	1392
真空スイッチ管の実用性能.....	岡田武夫・青木伸一・松山 清.....	1399
プリント配線板の自動設計システム.....	三上晃一・田淵謹也・杉本満信.....	1406
電力流通コンピュータ.....	馬場準一・迎 久雄・山田郁夫.....	1519
国鉄向けEF-71形電力回生制動付交流電気機関車.....	永岡 栄・矢野 昌雄・芦谷正裕.....	1524
MELCOM-3100ディスクオペレーティングシステム(I)-FOS(モデル40基本システム)-.....	三井大三郎・魚田勝臣・武田浩良・峰崎秀生.....	1539
蒸発式冷却器の電力変圧器への適用.....	明石克寛・西山 槐・山内 敦・川中 進.....	1546
パルス光ホール効果測定装置の試作.....	香崎銀博・伊吹順章.....	1555
MELCOM-3100ディスクオペレーティングシステム(2)-データ管理-.....	三井大三郎・魚田勝臣・広沢嘉教・新田俊晴.....	1649
電鍍電極による放電加工.....	加藤 強・片寄文隆.....	1655
MELDAS-1120形A制御弁自動試験装置.....	中司修慈・桑田 博・篠田東吉・岸波清二郎.....	1664
当社における電力機器の耐震強度の研究状況.....	志村 勲・高橋康英・篠原資直・奥津尚宏.....	1675
モールド絶縁材料.....	寺谷 宏・福島二郎・田嶋尚志・伊藤喜代之.....	1683
自動検針システム.....	武田克己・室田 慎・前田良雄・杉山康夫.....	1691

技 術 講 座

アナログ計算機のプログラミング(2) 一伝達関数、偏微分方程式の解法.....	桑田 博・井塚秀弥・佐藤 毅.....	335
アナログ計算機のプログラミング(3) 一各種の問題、自動演算.....	桑田 博・井塚秀弥・米谷光雄.....	472
システム理論 一(I)基礎.....	伊藤貴康.....	1002
システム理論 一(II) システム解析とグラフ理論.....	上村勝彦.....	1133
システム理論 一(III)統計的決定理論とその応用.....	山田敬吾.....	1416
システム理論 一(IV)ーダイナミカルシステムの理論.....	国方敏行.....	1563
システム理論 一(V)ー数値計画と制御.....	田村坦之.....	1696

技 術 解 説

パネルディスプレイの各種方式	吉沢達夫・伊吹順章	1704
----------------	-----------	------

新 製 品 紹 介

新形P Fパッケージ冷房装置・C D形直流操作電磁接触器・G Tシリーズ産業用パッケージ空気調和装置・高周波誘導周波数変換器・		
165 mm携帯用丸ノコ		342
Z K G-B形マイクロパウダクラッチ・“PW-2000形三菱脱水洗たく機(愛称ABS千曲)”発売・17形直角画面の“17 T S-6700形三菱ソ		
リッドステートテレビ(愛称・桂)”発売・三菱けい光灯器具“ルミフラワーシリーズ”発売		481
14 P S-4600 U形三菱ソリッドステートオールチャンネルテレビ(愛称・マッハライン14)発売・維持費ゼロの画期的な新製品三菱除鉄器		
I F-30形		613
“三菱ドアホン、ドアチャイム”発売・三菱小形電子計算機MELCOM-83 発売・三菱電気ハンマードリル新製品発売		883
新形“三菱オイルポンプ”シリーズ完成・テクスねじ用電気ドライバー・MEL-PACK5001-ガスアーク溶接機・携帯用電気みぞ切機・		
放電加工機用最適制御装置「オブティマイザ」		1010
三菱高圧B種電動機・コンパクトな高圧配電盤三菱H Cパネル		1141
三菱L O E形高圧地絡継電装置完成発売J I S-C4601適合品(昭和43年8月1日制定)・イナートガスアーク溶接機MEL-ARC		1278
精密直流バイロット発電機・改良形携帯用電気カンナ・クラッシャーモートル		1425
125 mmハンディグラインダ・R R-603 形電子レンジ発売		1572
L B H形無励磁作動式電磁ブレーキのシリーズ化完成・住宅向け新形石油温水機発売		1714

ニ ュ ー ス フ ラ ッ シ ュ

SHF 形大容量ガスしゃ断器形式試験完了・サイリスタ無整流子電動機実動開始・小名浜製錬(株)向け大電流平形サイリスタ整流器完成・八幡		
製鉄(株)君津製鉄所向け粗圧延用同期電動機完成・高速大容量ソリッドボール同期電動機あいついで完成		347
「レーザ式座標測定装置」日刊工業新聞社10大新製品賞を受賞・“FT800 A形サイリスタおよびFD-1000 B形シリコン整流素子”を開発・画期的な		
電着絶縁電線(MEDIS 電線)の開発に成功・アプセック用全自動バーエンドヒータ完成・世界最大容量の鹿島電解向けサイリスタ整流装置を受注		485
三菱2点切り SFL 形単一圧力式ガスしゃ断器・ブラウン管を使わない世界で初めての発光板テレビ——壁かけテレビへの第一歩を踏み出す		615
わが国初の6/3kV キュービクル用2,000 A真空しゃ断器完成・万国博向け三菱トラベータの完成・国連から気象レーダ5台を受注・日・比合弁の		
“International Elevator and Escalator 社”を設立		758
世界で最初の実用化“6.6kV 級浸水式高圧水中モートル”完成・南アフリカ連邦向け1,000MVA 超々高圧変圧器完成・わが国初めての“数値制御装		
置付溶接機”完成・集積回路のセラミック封止形パッケージ改良		887
可変プログラム方式総括制御装置MELMAC・輪転機リールスタンド周速計用高精度IC 化DA 形速度変換器完成・自動検針装置		1015
ジェットタービンおよびガスタービン発電機続々完成・川崎車両向け三相機動式抵抗溶接機完成・超高層ビル用エレベータモータ完成・大容量直		
流電動機の世界記録品完成・コンゴ BCK 鉄道向けディーゼル電気機関車完成・三菱原子力工業納め三菱臨界実験装置・カナダグランダック鉱山		
向け電気機関車完成・水車発電機用大容量サイリスタ励磁装置完成・BHB-80形直流高速度しゃ断器の完成・世界初の電力流通コンピュータ完成		
・国産最大世界第二位の278MVA水車発電機(オーストラリアテュマット発電所納め)完成		1142
全無接点式バーナ制御装置国産第1号完成・電気動力計試験用超高速直流電動機完成・東京電力安曇電所納め111MVA水車発電機低周波同期始		
動に成功・王子製紙春日井工場向け抄紙機用アナログおよびデジタルスピードロー測定装置完成・IC化サイクリック式遠方監視制御装置・自		
動記録装置付集中監視制御装置・国鉄 JRS 規格交流電車線保護継電器完成・数値制御装置付自動溶接装置・電話用対ケーブルによるITV長距離		
伝送装置完成首都高速道路公団に納入		1280
8,700kW ブラシレス励磁ソリッドボール同期電動機完成・日本国有鉄道向けEF 81形交流直流電気機関車完成・わが国最小の高圧ディーゼル発電機		
盤完成・LBC 1.5重方式母線地路保護継電装置・九州地区における初のスポットネットワーク受電設備完成		1428
永久磁石励磁式ローラテーブル駆動用直流電動機完成・西武鉄道向け直流電気機関車完成・タイ国 EGAT 向け250 MVA ブラシレスタービン発電		
機完成・鹿島北共同発電(株)向けラジアルベントロータ冷却式125MVAタービン発電機完成		1574
三菱電解加工機ダイヤシンカMC-100V-B製品発表会・1,800V, 100A, 30μsの高耐圧大容量高速スイッチング用サイリスタを開発・自動車の安		
全性および性能向上を図る各種エレクトロニクス装置を開発		1716

本社・営業所・研究所・製作所・工場所在地

本 社	東京都千代田区丸の内2丁目12番地(三菱電機ビル)	(電) 100	(電) 東京 (03) 218局 2111番
大阪営業所	大阪市北区梅田町8番地(西阪神ビル)	(電) 530	(電) 大阪 (06) 312局1231番
名古屋営業所	名古屋市中村区広井町3丁目88番地(大名古屋ビル)	(電) 450	(電) 名古屋 (052) 561局5311番
静岡出張所	静岡市伝馬町16の3番地(明治生命静岡支社)	(電) 420	(電) 静岡 (0542) 54局4681番
福岡営業所	福岡市天神2丁目12番1号(天神ビル)	(電) 810	(電) 福岡 (092) 75局6231番
長崎出張所	長崎市丸尾町6番14号	(電) 850-91	(電) 長崎 (0958) 23局6101番
札幌営業所	札幌市北2条西4丁目1番地(北海道ビル)	(電) 060-91	(電) 札幌 (0122) 26局9111番
仙台営業所	仙台市大町4丁目175番地(新仙台ビル)	(電) 980	(電) 仙台 (0222) 21局1211番
富山営業所	富山市桜木町1番29号	(電) 930	(電) 富山 (0764) 31局8211番
広島営業所	広島市中町7番32号(日本生命ビル)	(電) 730	(電) 広島 (0822) 47局5111番
岡山出張所	岡山市駅前町1丁目9番地(明治生命館)	(電) 700	(電) 岡山 (0862) 41局0331番
高松営業所	高松市鶴屋町2番1号	(電) 760	(電) 高松 (0878) 51局0001番
東京商品営業所	東京都千代田区丸の内2丁目12番地(三菱電機ビル)	(電) 100	(電) 東京 (03) 218局2111番
城北家電営業所	東京都文京区大塚3丁目3番1号(新茗溪ビル)	(電) 112	(電) 東京 (03) 944局6311番
城南家電営業所	東京都世田谷区池尻3丁目10番3号(三菱電機世田谷ビル)	(電) 154	(電) 東京 (03) 411局8181番
城西家電営業所	国分寺市南町2丁目16番14号(秀美ビル)	(電) 185	(電) 国分寺 (0423) 22局1881番
横浜家電営業所	横浜市中区富士見町3番地4	(電) 232	(電) 横浜 (045) 251局2226番
千葉家電営業所	千葉市新宿町2丁目49番地(三菱電機千葉ビル)	(電) 280	(電) 千葉 (0472) 42局5486番
大阪商品営業所	大阪市北区堂島北町8番地の1	(電) 530	(電) 大阪 (06) 344局1231番
洲本出張所	洲本市上物部2丁目6番33号	(電) 656	(電) 洲本 (07992) 2局0631番
名古屋商品営業所	名古屋市中村区広井町3丁目88番地(大名古屋ビル)	(電) 450	(電) 名古屋 (052) 561局5311番
静岡出張所	静岡市小島162番地	(電) 420	(電) 静岡 (0542) 85局6141番
福岡商品営業所	福岡市天神2丁目12番1号(天神ビル)	(電) 810	(電) 福岡 (092) 75局6231番
札幌商品営業所	札幌市北2条西4丁目1番地(北海道ビル)	(電) 060-91	(電) 札幌 (0122) 26局9111番
仙台商品営業所	仙台市大町4丁目175番地(新仙台ビル)	(電) 980	(電) 仙台 (0222) 21局1211番
富山商品営業所	富山市桜木町1番29号	(電) 930	(電) 富山 (0764) 31局8211番
広島商品営業所	広島市中町7番32号(日本生命ビル)	(電) 730	(電) 広島 (0822) 47局5111番
高松商品営業所	高松市鶴屋町2番1号	(電) 760	(電) 高松 (0878) 51局0001番
新潟営業所	新潟市東大通1丁目12番地(北陸ビル)	(電) 950	(電) 新潟 (0252) 45局2151番
関東商品営業所	与野市上落合後原842番地	(電) 338	(電) 与野 (0488) 33局3181番
東京機器営業所	東京都千代田区丸の内2丁目12番地(三菱電機ビル)	(電) 100	(電) 東京 (03) 218局2111番
大阪機器営業所	大阪市北区堂島北町8番地の1	(電) 530	(電) 大阪 (06) 344局1231番
中央研究所	尼崎市南清水字中野80番地	(電) 661	(電) 大阪 (06) 491局8021番
商品研究所	鎌倉市大船2丁目14番40号	(電) 247	(電) 鎌倉 (0467) 46局6111番
神戸製作所	神戸市兵庫区和田崎町3丁目10番地の1	(電) 652	(電) 神戸 (078) 67局5041番
伊丹製作所	尼崎市南清水字中野80番地	(電) 661	(電) 大阪 (06) 491局8021番
三田工場	三田市三輪町父々部85番地	(電) 669-13	(電) 三田 (07956) 局 4371番
長崎製作所	長崎市丸尾町6番14号	(電) 852	(電) 長崎 (0958) 23局6211番
稲沢製作所	稲沢市菱町1番地	(電) 492	(電) 稲沢 (0587) 32局8111番
和歌山製作所	和歌山市岡町91番地	(電) 640-91	(電) 和歌山 (0734) 23局7231番
鎌倉製作所	鎌倉市上町屋325番地	(電) 247	(電) 鎌倉 (0467) 46局1111番
通信機製作所	尼崎市南清水字中野80番地	(電) 661	(電) 大阪 (06) 491局8021番
北伊丹製作所	伊丹市大鹿字主ヶ池1番地	(電) 664	(電) 伊丹 (0727) 82局5131番
熊本工場	熊本市竜田町弓削720番地	(電) 862	(電) 熊本 (0963) 62局7211番
名古屋製作所	名古屋市中区矢田町18丁目1番地	(電) 461	(電) 名古屋 (052) 721局2111番
福岡製作所	福岡市今宿青木690番地	(電) 819-01	(電) 福岡今宿 (09295) 6局0431番
福山製作所	福山市緑町1番8号	(電) 720	(電) 福山 (0849) 21局3211番
姫路製作所	姫路市千代田町840番地	(電) 670	(電) 姫路 (0792) 23局1251番
相模製作所	相模原市宮下1丁目1番57号	(電) 229	(電) 相模原 (0427) 72局5131番
世田谷工場	東京都世田谷区池尻3丁目1番15号	(電) 154	(電) 東京 (03) 414局8111番
静岡製作所	静岡市小島110番地	(電) 420	(電) 静岡 (0542) 85局1111番
中津川製作所	中津川市駒場町1番3号	(電) 508	(電) 中津川 (05736) 5局7151番
大船製作所	鎌倉市大船5丁目1番1号	(電) 247	(電) 鎌倉 (0467) 46局6111番
郡山製作所	郡山市栄町2番25号	(電) 963	(電) 郡山 (02492) 2局1220番
群馬製作所	群馬県新田郡尾島町大字岩松800番地	(電) 370-04	(電) 尾島 (02765) 2局1111番
藤岡工場	藤岡市本郷字別所1173番地	(電) 375	(電) 藤岡 (02742) 2局1185番
京都製作所	京都府乙訓郡長岡町大字馬場小字園所1番地	(電) 617	(電) 京都西山 (075) 921局4111番
長野工場	長野市大字南長池字村前	(電) 380	
ラジオ工場	尼崎市南清水字中野80番地	(電) 661	(電) 大阪 (06) 491局8021番
札幌工場	札幌市北2条東12丁目98番地	(電) 060	(電) 札幌 (0122) 23局5544番

次 号 予 定

三菱電機技報 Vol. 44. No. 1

昭和 44 年技術の進歩

- | | |
|---------------------|---------------|
| ○ 研究 | ○ 電装品 |
| ○ 発電 | ○ 電子機器 |
| ○ 送電・変電 | ○ 電子計算機 |
| ○ 配電 | ○ 計測器 |
| ○ 工業プラント用電気設備 | ○ 放射線機器 |
| ○ 工業用電機品(1)(生産設備用) | ○ 電子管および半導体素子 |
| ○ 工業用電機品(2)(電動機その他) | ○ 照明 |
| ○ ビル用電気設備 | ○ 住宅用電気品 |
| ○ 交通 | ○ 材料 |
| ○ 船用電機品 | |

三 菱 電 機 技 報 編 集 委 員 会

委員長	仙 石 廉	常任委員	祖 父 江 晴 秋
副委員長	神 崎 邇	"	湊 武 雄
常任委員	明 石 精	"	山 田 栄 一
"	石 川 理 一	委 員	尾 畑 喜 行
"	上 田 重 夫	"	北 垣 成 一
"	宇 佐 見 重 夫	"	南 日 達 郎
"	大 野 寛 孝	"	林 昇 寿
"	北 川 和 人	"	松 元 雄 蔵
"	小 堀 富 次 雄	"	和 田 義 勝
"	鈴 木 正 材		(以 上 50 音 順)

昭和 44 年 12 月 22 日印刷 昭和 44 年 12 月 25 日発行「禁無断転載」定価 1 部金 100 円(送料別)

編集兼発行人

東京都千代田区丸の内 2 丁目 12 番地

仙 石 廉

印刷所

東京都新宿区市谷加賀町 1 丁目 12 番地
(郵便番号 162)

大日本印刷株式会社

印刷者

東京都新宿区市谷加賀町 1 丁目 12 番地

高 橋 武 夫

発行所

東京都千代田区丸の内 2 丁目 12 番地 (郵便番号 100)

三 菱 電 機 株 式 会 社 内

「三菱電機技報社」

(電) (03) 218 局 2323 番

発売元

東京都千代田区神田錦町 3 の 1 (郵便番号 151)

株式会社 オーム社書店

(電) (03) 291 局 0912 番 振替東京 20018