

関西電力・美浜発電所納め原子力用400,000kVA, 1,800rpm内部冷却発電機固定子



#### 昭和44年第43卷第4号



# 発電機特集

#### 目 次

#### 《特集論文》

·志	岐:	守哉	・甲斐	高… 491	
森	与	志彦	・監崎	章… 501	
·坂	并	時引	·大石紀	夫… 512	
長	沢	保明	・天笠信	正… 519	
大	石	紀夫	·明石克	寬… 530	
Ξ	Л	暁 美	・松田禎	夫… 541	
鈴	木	文夫	、大田基	義… 547	
Ш	岡	靖子	・山屋恵	章… 554	
野	村	達律	ず・谷	功… 563	
	志森坂長大二鈴川野	志森坂長大二鈴川野岐与井沢石川木岡村	志森坂長大二鈴川野村之時、「「「「」」「「」「」「「」」「「」「「」」「「」」「「」」「「」」「「」」	·志岐守哉·甲斐 森与志彦·監崎 ·坂井時弘·大石紀 長沢保明·天笠信 大石紀夫·明石克 二川暁美·松田祖 鈴木文夫·太田基 明村達衛·谷	<ul> <li>志岐守哉・甲斐 高… 491</li> <li>森与志彦・監崎 章… 501</li> <li>坂井時弘・大石紀夫… 512</li> <li>長沢保明・天笠信正… 519</li> <li>大石紀夫・明石克寛… 530</li> <li>二川暁美・松田禎夫… 541</li> <li>鈴木文夫・太田基義… 547</li> <li>川岡靖子・山屋恵章… 554</li> <li>野村達衛・谷 功… 563</li> </ul>

#### 《普通論文》

#### 《新製品紹介》

)

14 PS-4600 U 形三菱ソリッドステートオールチャネルテレビ (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 IF-30 形

#### 《ニュースフラッシュ》

三菱2点切り SFL 形単一圧力式ガスしゃ断器・プ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――

#### 《表紙》

#### 関西電力・美浜発電所納め原子力用 400,000 kVA 1,800 rpm 内部冷却発電機固定子

最近脚光を浴びている原子力発電の関西電力向け第1号機であり、原子力発電 の二次系としては、国産化に踏切ったわが国最初の記録品である。発電機は4極 機であるため、固定子鉄心の振動が少なく弾性支持装置が不要となり、回転子外 径が2極機の約1.5倍であるにもかかわらず、固定子は2極機とほぼ同一外径に 納まり、またコイルエンドが短かいので長さも短かいのが特長である。

定格電流が 13,585 A と大きいので、固定子コイルの冷却には従来の内部冷却 に加えてコイルつなぎ部冷却構造を採用している。表紙の写真でわかるように、 タービン側(コイル冷却ガス出口側)のコイルつなぎ部間隔を、異相コイル間で は同相コイル間より広げ、コイルつなぎ部の絶縁をなくしている。このため、こ の部分に発生する熱は周囲の水素ガスに直接に伝わり、コイル温は非常に低い。

コイルつなぎ部冷却構造は、美浜発電所向け2号機 560,000 kVA をはじめと して、現在製作中の 400,000 kVA 以上の原子力および火力発電機6台に採用す る予定である。



- 615

-613



# VOL. 43 NO. 4 APRIL 1969 MITSUBISHI DENKI GIHO



# SPECIAL EDITION FOR GENERATORS

# CONTENTS

SPECIALLY COLLECTED PAPERS-

Four Pole Turbine Generators for Nuclear Power StationsM. Shiki	T. Kai…491
Design Features of Recent Waterwheel GeneratorsH. Miura · K. Yamashita · Y. Mori · A.	Kenzaki…501
Gas Turbine Generators	N. Ôishi…512
Excitation Systems of Turbine Generators	Amagasa519
Basic Design of Water-cooled Turbine GeneratorsM. Shiki • T. Kai • N. Ôishi • K.	Akashi530
Sator Coils and Insulation Hoses of Water-cooled Generators	

#### TECHNICCAL PAPERS-

Newtron Diffractometer delivered to the Solid State Physics Institute of Tokyo University
S. Hoshino • E. Tsuda • K. Hironaka • K. Yanagishita571
Experimental Study of MHD Generator Ducts for Long OperationT. Morikawa · Y. Murai · Y. Kobayashi579
Central Control System of the Gates for Ônyu and Furikusa, Aichiyôsui Kôdan
F. Matsumoto • N. Fujii • K. Wada • Y. Yasuda • M. Tanaka • M. Tsukahara • B. Nagata • A. Komura…586
Charged Particle Trajectory and Potential Distribution in a Flat Disk Type Acceleration Tube and Einzel Lens (I)
T. Takagi • K. Mizuno596
400 Amperes (Average) 2,500 Volts Flat Packaged High Voltage High Power Thyristors
H. Oka • S. Funakawa • J. Nakata602
Laser Oscillators for Photocoagulators
NEW PRODUCTS613
NEWS FLASH 615

A Stator of 400,000 kVA 1.800 rpm inner cooled nuclear power generator delivered to Mihama Power Station of the Kansai Electric Power Co.

This is a machine No. 1 of nuclear power generation for the Kansai Electric Power Co. now come in the limelight of late and is a first record product as the trial of home manufacture in the secondary system of the nuclear power generation. Because of 4-pole machine, the stator core has less vibration and needs no flexible mounting, and in spite of the outer diameter of rotor being 1.5 times that of a 2-pole machine, the stator frame is built to have almost the same outer diameter as the latter. The end coils are so short as to contribute to reducing the total length. As the rated current is as large as 13,585 A, the stator coil special cooling construction at coil connections in addition to the standard inner cooling.

As is shown in the cover picture, the distance between the coil connections of different phase belts on the turbine side (the outlet side of coil cooling gas) is made larger than that between the coil connections in one phase belts so as to dispense with the coil insulation there. This makes heat generated at this part conducted direct to surrounding hydrogen gas, reducing the coil temperature considerably.

This special cooling construction at the coil connections named "bare end" is expected to be used for 6 generators of nuclear power and thermal power rated above 400,000 kVA now under construction including the second machine 560,000 kVA for Mihama Power Station.

#### 二変电恢仅報」「ノムトフント

# UDC 621.313.322-815:621.311.25 原子力用4極タービン発電機 志岐守哉・甲斐 高

#### 三菱電機技報 Vol. 43·No. 4·P491~500

原子力用タービン発電機の内外状勢を述べ、4 極機の特長点と、現在および 将来の計画を示し、完成した国産第一号の関西電力美浜発電所1号機 400MVA 1,800rpm機について構造の詳細・試験結果を説明している

# UDC 621·313.322-82:621-221 最近の水車発電機 三浦 宏・山下喜美雄・森与志彦・監崎 章

三菱電機技報 Vol. 43·No. 4·P 501~511

水力発電所特に掲水発電所における水車発電機の大容量化・高速化は急速に 進められており、ソ連の 588MVA、米国の 660MWをはじめとして、各社共 200~300MVAを手がけるに至っている。当社の水車発電機製作は、わが国は もちろん、世界各国におよんでいるが 約 3,500MVAにおよぶ現在の工事に もこの傾向ははっきりとあらわれている。これに伴い技術開発も急ビッチで進 み、特に水冷却機は今後の大容量化への大きい手掛りになると思われる。本文 は当社の最近の水車発電機を代表する数例について内容を報告するとともに、 今後の技術進展について展 2000年のである。

# UDC 621.313.322:621.438 ガスタービン発電機 坂井時弘・大石紀夫

三菱電機技報 Vol. 43·No. 4·P512~518

ガスタービンは,近年急速に発達し,その種々の特長を生かして,陸上発電 用にも用いられる機会が多くなった.

ガスタービン発電用の発電機は,本質的には火力用の発電機と同じであるが, 定格kWの考え方が,火力の場合と相当異なり,また,構造的にもパッケージ化, 外気吸入冷却方式などの特長を有している.本文では,これら火力用発電機と の相違点を中心として,当社が十数台の製作実績を有するガスタービン発電機 の一部を紹介したい.

# UDC 621.313.322-815:621.313.126 タービン発電機の励磁系 甲斐 高・長沢保明・天笠信正 三菱電機技報 Vol.43・No.4・P519~529

半導体整流器の製造と応用技術の急速な進歩によって、1960年以降,タービ ン発電機の励磁系には従来の直流励磁機に代わって,静止励磁装置(複巻自励), サイリスク励磁装置,交流励磁機,ブラシレス励磁機など各種の整流器励磁方 式が登場してきた、当社ではこれらの励磁方式のすべてに実績を有するが,お のおの長所と短所があるので適用に当たっては,速応度,信頼度,保守の難易, 寸法および重量,価格などあらゆる方面から比較検討する必要がある、本文で は,当社タービン発電機の励磁系の諸方式について,製作実績と性能の概要を 紹介し,需要家各位のご参 考に供する. UDC 621.313.322-713.1.001.2 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 三菱電機技報 Vol.43・No.4・P530~540.

今後の大容量タービン発電機に必然的に採用されて来る木冷却につき,内外 情勢と主要項目の概要を述べ,その第一点として基本設計につき詳述している. 設計条件として水温・水圧・水速・水の比抵抗の範囲を述べ,また素線のうず 電流損の検計から各種の素線配置の利害を述べ,他部分と組合せた全体構造に 及んでいる.(1)大容量機では4列の中空・中実組合せ素線の形式がもっとも協 調がとれている.(2)水通路の1.7.ローか2フローかは容量によって,適用範囲 が決ってくる.(3)回転子はPressurized Gap 冷却方式とする.というのがその 要点である.

UDC 621.313.322-713.1.001.1 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・二川暁美・松田禎夫 三菱電機技報 Vol.43・No.4・P541~546

水冷却発電機の固定子巻線は、その製造に際して、コイル構成、中空導体、 端部水室用ヘッダの構造と取付法、絶縁ホースならびにこれらの漏れ検査法な どに、従来の発電機と異なる特異な問題点をもっている、コイル構成について は種々の方式が考えられるが、1,000MVA程度までのタービン発電機用とし ては中空中実組合せ式が適当であり、この方式を中心に上記の特異な問題点に ついて研究を進めた結果、信頼性の高いコイル構造とその製造技術を確立する ことができた、また絶縁ホースについては、各種の基礎実験と耐久試験を行な って、その信頼性を確実な ものにするとともに、ガス透過性・振動特 性などについても基礎的な

UDC 621.313.322-713.1.001.1 水冷却発電機の水系統と運転 今井 光・鈴木文夫・太田基義 三菱電機技報 Vol.43・No.4・P547~553

水冷却発電機の水系統は、材料の腐食および運転・保守と密接な関係がある. 冷却水系統には、水の純度や貯水そうのふん囲気ガスの種類など種々の問題点 があるが、これらについて解説を加え、さらに当社で採用する予定のものにつ いてその主要点を述べた。発電機各部の温度とケーバビリティは、従来の内部 冷却式のものとほとんど変わりない。運転・保守上の問題としては、絶縁抵抗 の測定方法、冷却水停止の場合の処置など必要な事項を具体的に述べている。

UDC 620.193.7:621.313.322:621.165 水冷却発電機における腐食 泰 卓也・松岡宏昌・山屋恵章・川岡靖子 三菱電機技報 Vol.43・No.4・P554~562

水冷却発電機においては水による腐食が,構成材料の選定,構造および設計
運転法の決定などの基そとなる、したがって信頼性の高いデータを得るため実
機を腐食の観点から模擬した試験ループを使用し,発電機材料,主として銅お
よびそのろう付け部について種々の条件で実験を行ない腐食に対する各種因子
の影響を検討した、結果の概略は次のとおりである、 温度は低いほど、水の比
抵抗は高いほど腐食は少ない、この傾向はとくにろう付け部で大きい、流電の
影響は鍋では大きいが,ステンレス網ではきわめて小さく,交流では実用上影
響がないといえる、腐食速 () 度は10年間で銅については数 $\mu \sim 30\mu$ , 銃
ろうによるろう付け部につ 💛 いては150µ 前後と推定された、

UDC 620.1:621-71:621.314	UDC 539.1.07:621.384
水冷却発電機モデルコイル長期総合試験	加速管(平板形)およびEinzel形収束Lens内における
原仁吾・野村達衛・谷功	電位分布および荷電粒子軌道(Ⅰ)
三菱電機技報 Vol. 43·No. 4·P 563~568	高木高志・水野謙一
人物をした日本と日本とそれましたとれたもので	三菱電機技報 Vol. 43•No. 4•P596~601
今後の大容量機を目指して当社では独目で水冷却発電 たが、その安全性の向上のために多大の努力を払ってき 格 396M V A 相当の固定子モデルコイル 6 本を製作し、 した長期の総合試験を行なった.本文は試作したモデルコ 実機における問題点を研究し、長期試験により信頼性を 点について述べる.長期試験は約13,000時間に及び、ヒ を加えた.この試験ではモデルコイルや絶縁ホースの漏 問題はなかった	<ul> <li>行なってき</li> <li>行なってき</li> <li>行なってき</li> <li>市なってき</li> <li>市電形加速器、とくに V,d,G形加速器において多く用いられる多段形加速電</li> <li>運転を摸擬</li> <li>の入射領域におけるレンズ作用の解明に必要な、電位分布と荷電粒子軌道の要</li> <li>堕点を調べ、</li> <li>値計算手法と、その結果について述べた. また、この手法を応用して、収束</li> <li>レンズの一種であるEinzel Lensの収束作用についても計算し、焦点距離など</li> <li>ルレンズの一種であるデータが得られたのでその概略を述べる.</li> <li>なく、その他</li> <li>本号の(I)においては、電位分布の計算手法およびその結果について述べる。</li> <li>荷電粒子軌道については、(II)において述べる。</li> </ul>
UDC 621.039.5	UDC 621.3.027.5:621.382.2
市台大学物株研究所納め内株子教利回折港	400A 2 500V 平形高耐圧大雷力サイリスタ
星塗視券・洋田米一・弘中一元・柳下和券 一支売買けね ソト 40 N 4 P = 74 5 70	
三委電機技報 Vol.43·No.4·P571~578	二委電機技報 Vol.43·No.4·P602~608
42年度に、東京大学物性研究所に納入され、日本原子 に据付けられた大形中性子回折装置は、これ以外に2台 も別個に据付け可能のものである。すなわち、1本の房 3本の単色中性子ビームを取出せるモノクロメータを有 ものである。ゴニオメータには回折中性子の測定系が3 定時間の短縮化がはかられた。測定制御回路は、固体化 にはIC化された部分もあり小形化と保守の容易さがは	JRR-3炉 平均順電流 400A 阻止電圧 2,500Vの平形高耐圧大電力用サイリスタが量 産され、既に多量に工業用途に用いられるに至った.このサイリスタは 臨界 順電圧上昇率が 200V/μs 臨界順電流上昇率が 200A/μs の特性、定格をも つある形式の つ、画期的な大電力用途のものである.このサイリスタの設計、製作上の新し 粉末試料測 い技術的緒問題について、その概要を説明し、定格と特性、ならびに信頼性に ついて記述する
いは、ます完全といえる性 () 能が得られ、10MW ほぼ2mR/h以下とするこ とができた。	
UDC 537.52:621.311.001.5	UDC 535.12.084
長時間運転用MHD発電ダクトの実験的研	コアギレータ用レーザ装置
森川鉄也・村井 裕・小林幸人	福家 咬・管野 勉
三菱電機技報 Vol.43•No.4•P579~585	三菱電機技報 Vol.43·No.4·P609~612
オーブンサイクルMHD発電機では、ダクトを通過す である上に、燃料中の灰分シード材などの腐食のはけし に、長時間運転用発電ダクトとしては、主として水冷金 壁ダクトおよび耐火材から構成し、その表面温度を材料 るセミホットウォールダクトが考えられている。しかし ールダクトの構成法については大きな進歩が見られなか 構成法によるセミホットウォールダクトを開発し、これ して熱的、電気的により良 好な特性を備えてい らかにした。	<ul> <li>本は高温高速</li> <li>このレーザ装置は眼科における網膜はく(剝)離手術用のLaser Photocoagu</li> <li>含有するため</li> <li>lator に使用するものでレーザ発振部および電源から構成されており、レーサ</li> <li>発振部の中心を成すレーザヘッドは小形でしかもレーザ光発振効率の良いclose</li> <li>変まで冷却す</li> <li>形の全浸水冷を採用しているので冷却効果は非常によく、レーザ光出力の変更</li> <li>は本ットウォ</li> <li>は非常に少ない、しかも装置全体がコンパクトに収まっている、また、電源(</li> <li>はレーザ光の暴発防止用の安全装置が付いているので、取扱上きわめて安全で</li> <li>ある。</li> <li>実験により明</li> <li>なお、この装置はレーザ</li> <li>加工機およびレーザ溶接機のエネルギーを</li> <li>としても使用できる。</li> </ul>
UDC 627.83:654.93:681.32	
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・安田宣弘・	念
塚原昌恭・永田文也・小村 明	
三愛範徴技報 VOI.43・INO.4・P 580~595 豊富た水骨を有する水源にラーいわが国にとって、2	発とその有効
計画は不可欠の事業であり、水資源利用を合理的に運営	に集中管理制
御士士が採用されるのは少数の成行きである。独山管田	央管理所より
	オンライン自
個方式が採用されるのは当然の成日でてのる。採用目を 点在するゲート制御所等を遠方監視制御し、さらに計1	
街方式が採用されるのは当然の成日さている。米干省を 点在するゲート制御所等を遠方監視制御し、さらに計 動制御まで実施すれば、最も高度な集中管理制御と言。	のたび愛知用
<ul> <li>         街方式が採用されるのは当然の成日さている:案件者を 点在するゲート制御所等を遠方監視制御し、さらに計3         動制御まで実施すれば、最も高度な集中管理制御と言。         水公団大入、振草頭首工向けに 70MHz 1波の無線装置     </li> </ul>	のたび愛知用 方監視制御装
<ul> <li>街方式が採用されるのは当然の成日さている:案件書を 点在するゲート制御所等を遠方監視制御し、さらに計1</li> <li>動制御まで実施すれば、最も高度な集中管理制御と言さ</li> <li>水公団大入、振草頭首工向けに 70MHz 1波の無線装置</li> <li>置と、ディジタル計算機と ○ により集中管理目1</li> </ul>	のたび愛知用 方監視制御装 なうゲート制

・ \*このアプストラクトカードは、資料カード(A7または127mm)へ切りばりしてご利用いただけるサイスになっております

# \* 神戸製作所

図2.1はアメリカにおける各年度の原子力発電運転開始のものの 全汽力(火力・原子力)に対する割合を示しており,各年度の台数 および最大容量機も示している。1968年以降急速な上昇を示すこと がらかがわれ、 また 1972 年には運転開始の 全汽力の半分は原子力 となることがわかる。

図 2.2 は火力と原子力の各容量別分布について、1968 年と1971 年におけるものを示している。1968年から1971年への変化を見る

2% 70 60 50 1968火力平均容量

1,800 rpm 内部冷却発電機

認識され, 世界的に脚光を浴びているが, とくに アメリカ において は軽水形原子力発電所の建設が非常な勢いで進められている。

#### 2.1 アメリカにおける原子力発電

Electric Power Co., Mihama power station (Nuclear).

# 関西電力美浜発電所納め原子力用 400 MVA, 🕱 **1.**1

400 MVA, 1,800 rpm inner-cooled generator for the Kansai

# 2. 原子力発電内外の状勢

海外においては、原子力発電は、その信頼性においても経済性に おいても、火力発電に比較して十分対抗しらるものであることが





図 2.2 1968-1971 において完成する原子力・火力の 単機容量の分布 Distributions of unit size for 1968, 1971 nuclear and fossil steam installations.

と、火力では平均容量が大きくなり台数は減少し、新設機の総容量 はあまり変化していない。一方原子力においては、平均容量・台数 ともに大幅に増加していることが判然とする。1971年には1基の容 量では1,100 MW 機が運転にはいっており、この年の新設機の全容 量の 90 %までが 600 MW 以上で、また 460 MW 以下の容量のも のはないことがわかる。

これらは、発電の形態が変化しつつあることを示しており、次の ようなことが言えよう。

(1) 火力・原子力ともに平均的には大容量化しているが,最大



原子力用4極タービン発電機

志岐守哉\*・甲斐

UDC 621. 313. 322-815 : 621. 311. 25

高\*

Nuclear power generation is now a worldwide trend to provide for future. Its reliability and economy are now recognized as fully competing with thermal power generation depending on fossil fuel. In the United States it is anticipated that a half of steam turbine generators to start operation in 1972 are nuclear power machines. In Japan Mitsubishi has completed a nuclear power turbine generator to be installed as a unit No. 1 in Mihama power station of Kansai Electric Power Co. This is the first home built machine of the kind and has great significance as a forerunner. It is a 400 MVA 1,800 rpm 4 pole machine having numerous features. The article describes the details of construction and test result of it.

## 1. まえがき

このたび、当社において、関西電力美浜発電所向け1号機として、 原子力用 タービン 発電機を完成した。この機械は国産第1号の原子力 発電機であり、今後の基本形をなすものであるので、この完成の意 義は大きい。

この完成を契機に、本稿では原子力用4極タービン発電機に関する 一般的な説明をまとめ、また美浜1号機の内容・試験結果にも及び たい。





[	<b></b> 留	者	名	日本原子力発電	日本原子力発電	東京電力	関 西 電 力	東京電力	関 西 電 力
Ħ	i.	đ	名	東海発電所	敦賀発電所 #1	福島発電所 #1	美浜発電所 #1	福島発電所 #2	美浜発電所 #2
	形		式	コールダホール改良型	BWR	BWR	PWR	BWR	PWR
页	出	カ	(MWe)	166	322	400	340	784	500
л	:	年	月	34 年 12 月	41年4月	41 年 12 月	41 年 12 月	43 年 3 月	43 年 4 月
開	3	年	月	42 年 7 月 (一部 41 年 7 月)	44 年 12 月 (予定)	45年10月(予定)	45年10月(予定)	48年3月	48年6月
設	計匠	カ	(kg/cm <sup>2</sup> g)	16.17	88	87.9	175	87.9	175
溫		度	(°C)	260	302	302	343	302	343
型量	t,羽	县長	(inch)	2台×85,000 kWe TCIF	TCDF-43'	TC4F-35''	TCDF-44''	TC 6 F-35"	TC 4 F-40"
回	酝	数	(rpm)	3,000	1,800	1,500	1,800	1,500	1,800
ス	Æ	カ	(kg/cm <sup>2</sup> g)	高圧 45.3, 低圧 16.7	66.8	66.8	55.2	66.8	54.5
П	溫	度	(°C)	高庄 355, 低庄 357	282	282	270	282	269
容		盘	(MVA)	2×100	420	525	400	911	560
カ		率	(%)	85	85	90	85	90	90
	) 気 工 間 設 辺 回 入 口 容 力	田田 田 田 田 王 明 田 王 明 田 王 明 田 王 明 田 王 明 田 王 明 田 王 王 田 王 王 田 王 王 田 王 王 田 王 王 田 王 王 田 王 王 田 王 王 田 王 王 田 王 王 王 王 王 王 王 王 王 王 王 王 王	一般     者       現     第       現     ガ       第     カ       工     年       第     年       設計     日       設計     正       型式、羽根長     度       図     転       入     圧       口     温       容     量       力     率	図         者         名           電         所         名           形         万         (MWe)           工         年         月           開         方         (MWe)           工         年         月           開         方         (kg/cm <sup>2</sup> g)           湿         皮         (°C)           型式、羽根長         (inch)           回         転         次           八         王         力           八         王         力           次         (NC)         (rpm)	図     者     名     日本原子力発電       電     所     名     東海発電所       形     式     コールダホール改良型       気     出     力     (MWe)       工     年     月     34年12月       日本第7月     42年7月     (-部41年7月)       260     260       型     丁     (inch)       回     転     次       八     王     力       八     王     第       第     3,000       入     日     力       二     第     (inch)       二     第     次       六     第     久       次     第     (ac       (°C)     高臣 45.3, 低臣 16.7       高田 355, 低臣 357     高田 355, 低臣 357       名     量、(NVA)     2×100       力     率     %)     85	図       者       名       日本原子力発電       日本原子力発電         電       所       名       東海発電所       敏賀発電所 $$1$ 形       式 $=-n.\forall =-n.\psi \oplus 20$ BWR         気       出       力 (MWe)       166       322         工       年       月       34年12月       41年4月         現       年       月       (-#41年7月)       44年12月(予定)         設       形 圧 力 (kg/cm <sup>2</sup> g)       16.17       88         週       皮 (°C)       260       302         型式、羽根長 (inch)       2 <sup>2</sup> 位×85,000 kWe TCIF       TCDF-43'         回       転 数 (rpm)       3,000       1,800         入       圧 力 (kg/cm <sup>2</sup> g)       高圧 45.3, 低圧 16.7       66.8         四       塩 皮 (°C)       高圧 355, 低圧 357       282         容       量 (MVA)       2×100       420         力       率 (%)       85       85	図       者       名       日本原子力発電       日本原子力発電       東京電力         電       所       名       東海発電所       象質発電所 $$1$ 福鳥発電所 $$1$ 形       式       コールダホール改良型       BWR       BWR         気       田       力 (MWe)       166       322       400         工       年       月       34 年 12 月       41 年 4 月       41 年 12 月         財       年       月       42 年 7 月 (一部 41 年 7 月)       44 年 12 月 (予定)       45 年 10 月 (予定)         設       王       力 (kg/cm <sup>2</sup> g)       16.17       88       87.9         週       皮 (°C)       260       302       302       302         型       皮 (°C)       260       302       302       302         型       皮 (°C)       260       302       302       302         型       皮 (°C)       3,000       TCDF-43'       TC 4 F -35''         回       転 数 (rpm)       3,000       1,800       1,500         入       田 力 (kg/cm <sup>2</sup> g)       高圧 45.3, 低圧 16.7       66.8       66.8         四       空 (°C)       高圧 355, 低圧 357       282       282         容       量 (MVA)       2×100       420       525 <t< td=""><td>■       者       名       日本原子力発電       日本原子力発電       東 京 電 力       関 西 電 力         電       所       名       東 海 発 電 所       敦賀発電所 非 1       福島発電所 # 1       美浜発電所 # 1         形       式       コールダホール设良型       BWR       BWR       BWR       PWR         気       出       力 (MWe)       166       322       400       340         工       年       月       34年12月       41年4月       41年12月       41年12月         世       年       月       34年12月       41年12月(予定)       45年10月(予定)       45年10月(予定)         設       正       力 (kg/cm²g)       16.17       88       87.9       175         選       度 (°C)       260       302       302       303       343         型太, 羽根長 (inch)       2 台×85,000 kWe TCIF       TCDF-43'       TC4 F-35''       TCDF-44''         山 成 (°C)       高圧 45.3, 低圧 16.7       66.8       66.8       55.2         四       重 皮 (°C)       高圧 45.3, 低圧 16.7       282       282       270         容       量 (°C)       高圧 45.3, 低圧 16.7       66.8       66.8       55.2         調 皮 (°C)       高圧 45.3, 低圧 16.7       85       282       270         容</td><td>照         者         名         日本原子力発電         日本原子力発電         東京電力         関西電力         東京電力           電         第         名         東海発電所         数徴発電所 #1         編鳥発電所 #1         編鳥発電所 #1         新品発電所 #1         新品         新品         第         第         第         第         第         第         1         1         第         #1         1         1         #1         1         1         43 #3 月         44 # 12 月 (予定)         45 # 10 月 (予定)         302         302         302         302         302         302         302         302         302         302         302         1,500         1,500         1,500         1</td></t<>	■       者       名       日本原子力発電       日本原子力発電       東 京 電 力       関 西 電 力         電       所       名       東 海 発 電 所       敦賀発電所 非 1       福島発電所 # 1       美浜発電所 # 1         形       式       コールダホール设良型       BWR       BWR       BWR       PWR         気       出       力 (MWe)       166       322       400       340         工       年       月       34年12月       41年4月       41年12月       41年12月         世       年       月       34年12月       41年12月(予定)       45年10月(予定)       45年10月(予定)         設       正       力 (kg/cm²g)       16.17       88       87.9       175         選       度 (°C)       260       302       302       303       343         型太, 羽根長 (inch)       2 台×85,000 kWe TCIF       TCDF-43'       TC4 F-35''       TCDF-44''         山 成 (°C)       高圧 45.3, 低圧 16.7       66.8       66.8       55.2         四       重 皮 (°C)       高圧 45.3, 低圧 16.7       282       282       270         容       量 (°C)       高圧 45.3, 低圧 16.7       66.8       66.8       55.2         調 皮 (°C)       高圧 45.3, 低圧 16.7       85       282       270         容	照         者         名         日本原子力発電         日本原子力発電         東京電力         関西電力         東京電力           電         第         名         東海発電所         数徴発電所 #1         編鳥発電所 #1         編鳥発電所 #1         新品発電所 #1         新品         新品         第         第         第         第         第         第         1         1         第         #1         1         1         #1         1         1         43 #3 月         44 # 12 月 (予定)         45 # 10 月 (予定)         302         302         302         302         302         302         302         302         302         302         302         1,500         1,500         1,500         1

# 表 2.1 わが国の電気事業用原子力発電所 Nuclear power station in Japan for public utility.

表 2.2 W社原子力発電機製作実績 Nuclear power generators manufactured by Westinghouse.

		<b>A</b>		1074	DD	1.17	COD	Die	Max		Exciter		D
	Customer	Station	Unit	MVA	PF	kV	SCR	Psig	Psig	kW	v	Туре	Date
	TVA			1,356.2	0.90	24	0.60	75	75	5,000	500	В	71
	TVA			1,356.2	0.90	24	0.60	75	75	5,000	500	В	71
	Public Service Elec. & Gas Co.	Burlington Nuclear	#1	1,300	0.90	25	0.48	75	75	5,100	530	В	69
WC	Public Service Elec. & Gas Co.			1,300	0.90	25	0.48	75	75	5,100	530	В	71
	Pacific Gas & Electric Co.	Diablo	#1	1,300	0.90	25	0.48	75	75	5,100	530	В	69
	Pacific Gas & Electric Co.			1,300	0.90	25	0.48	75	75	5,100	530	В	71
	Commonwealth Edison Co.			1,220	0.90	25	0.50	75	75	4,500	500	В	70
	Commonwealth Edison Co.			1,220	0.90	25	0.50	75	75	4,500	500	В	71
	Consolidated Edison Co.	Indian Point	₿2	1,126	0.90	22	0.50	75	75	4,200	480	В	68
	Consolidated Edison Co.	Indian Point	#3	1,126	0.90	22	0.50	75	75	4,200	480	В	69
	Washington P. P. S. S.			1,072	0.975	22	0.58	75	75	3,000	400	В	71
	Jersey Central			1,068	0.90	22	0.50	75	75	3,500	500	В	71
	Florida Power & Light Co.			1,025	0.85	22	0.58	75	75	5,000	600	В	71
	Florida Power & Light Co.			1,025	0.85	22	0.58	75	75	5,000	600	В	72
	SMOD			1,070	0.90	22	0.50	75	75	4,100	500	В	71
	Baltimore Power Co.			1,003	0.90	22	0.58	60	60	3,500	500	В	72
	Afkansas Power & Light Co.			1,002	0.90	22	0.58	75	75	3,500	500	В	71
	Florida Power & Light Co.			989	0.90	22	0.58	60	60	3,300	300	В	70
	Consumers Public Power Co.			983	0.85	22	0.58	60	60	4,000	500	В	70
	Consumers Public Power Co.	Palisades	<b>#</b> 1	955	0.85	22	0.58	75	75	3,700	500	В	68
		0		945	0.90	22	0.58	60	60	3,300	500	В	71
	Virginia Electric & Power Co.	Surry	- F	942	0.90	22	0.58	60	60	3,300	500	В	69
nc	Virginia Electric & Power Co.	Surry	\$2	942	0.90	22	0.58	60	60	3,300	500	В	70
	Virginia Electric & Power Co.			942	0,90	22	5.58	60	60	3,300	500	В	72
	Virginia Electric & Power Co.			942	0.90	22	5.58	60	60	3,300	500	в	73
	Maine Venlage			935	0.90	22	5.58	60	60	3,300	500	в	71
	Florida Power & Light Co	Taskan Datat		900	0.90	22	0.50	/5 70	75	4,310	5//	В	/0
	Florida Power & Light Co.	lurkey Point	73	894	0.85	22	0.58	- /5	/5	5.000	600	В	68
	Carolina Power & Light Co.	Delimon	40	074	0.85	22	0.58	75	75	5,000	600	В	69
	Connecticut Vankas	Heddem Neels	# 2	6004	0.90	10	0.50	/5	/5	4,000	3/3	D D	00 //
	Northern States Power Co	Prairie Island	ا چ. ۲ لا	60/	0.90	17	0.50	00 70	60	2,600	500	Б	70
	Northern States Power Co.	I Tattie Island	π.	450	0.90	20	0.50	40	40	2,000	500	D	70
	Wisconsin Public Service Co			400	0.70	20	0.50	40	40	2,000	500	D D	70
	Rochester Gas Co	Brookwood	4 1	408	0.90	20	0.50	(0	60	2,600	500	D	20
	Wisconsin Michigan Power Co	Point Basch	#1	682	0.00	10	0.56	40	40	2,000	500	D	40
	Wisconsin Michigan Power Co.	Form Deach	÷ 1	502	0.90	19	0.50	60	60	2,400	500	В	00
	South an Oplifanti Eliter C			502	0.70	17	0.50	60	00	2,400	300	D	
	Control idential Editor Co.	San Unotre	Ξ.	500	0.90	18	0.582	60	60				65
	Societa Electronucleura Itali	Inuian Point	ا چ ر بر	330	0.80	16.5	U.64	45	60				62
		Enrico Fermi	₩ I	200	0.80	15	0.64	45	60				64
H <sub>2</sub>	Yankee Atomic Electric Co.	Kowe	#1	160	0.95	18	0.64	30	30				59
] ]	Duquesne Light Co.	Snippingport	- F I	117.65	0.85	15.5	V.64	30	30				56

WC: 水冷却 IIC: 新内部冷却 IC: 現内部冷却 H<sub>2</sub>: 水素冷却 B: ブラシレス

C

容量機については、原子力における伸びがいちじるしい。

(2) 火力と原子力の新設機の総容量は 1972 年にきっ(拮) 抗し, それ以後原子力が火力をしのぐ。

(3) 原子力においては、小容量機はなくなり、ほとんど 600 M W 以上となろう。

(4) この図には表わしていないが,原子力および大容量火力の 増加とともに,peaking 用として,火力の一部が使われるほか,ガ スタービン・揚水発電所が増加している。

#### 2.2 わが国における原子力発電の発達

わが国では、日本原子力研究所の研究用 12.5 MW が 1963 年に 最初の原子力発電を行なったが、実用規模としては、日本原子力発 電東海発電所の 166 MW コールヴホール 改良形が、1967 年に試験を終 了したのが初めてで、その後の電力各社の建設状況は **表 2**.1 のと おりである。

300 MW 以上のものは,いづれも軽水形の原子炉であり,前述の Fxリカの状況と比較すると,4 年程度のずれで発達していると考えられ,今後の急速な進長が予期されると言えよう。

この表で、①、②、③、⑤はタービン発電機まで輸入品であり、④、 ⑥ではタービンおよび発電機(いわゆる二次系)は国産であるのみな らず、一次系においても他に比して国産分が多いことが着目される。 電力会社もメーカーも協力して原子力設備の国産化に努力している ので、設備全体の国産化の実現も早いことであろう。

2.3 ウェスチング ハウス社の原子力用タービン発電機

1968 年末 における ウェスチッグ ハウス 社の 原子力用 タービン 発電機の リスト を表 2.2 に示す。 製作中のものを含めて、 台数は 40 台をこ え、最大容量機は TVA 向け 1,356.2 MVA である。

このリストより汲み取れる事項は,

- (1) 力率は 0.90 がほとんどである。
- (2) 端子電圧には 25 kV のものが現われている。

(3) SCR では 1,000 MVA 級以上で 0.50 付近が多い。

(4) ガス 圧 75 psig が多い。

(5) 励磁方式は初期のものを除けば全部 ブラシレス である。

カ率・SCR については、わが国では現在ほとんどがそれぞれ 0.90, 0.58 となっているが、大容量機では寸法・重量・材料的制限が過酷 となってくるので、好力率・低 SCR の採用の寄与が大きな意味合 いを持ってくる。文献<sup>(1)</sup>によれば、アメリカ ではつぎの 10 年間に容 量は原子力で 2,500 MVA が現われ、力率は 0.9 ないし 0.95, SCR は 0.4 (限界は 0.35) となろうと報じられている。

低 SCR の採用は,系統安定度の見地から決定されるべきもので あるが,高速度 Jレー・高速度しゃ断器・連続動作 AVR・励磁系の 安定法・経済的直列 コッデッサ 装置などが開発され,高度の設計の低 SCR 大容量発電機の採用に適合するように,系統問題を解決する というすう勢にある。

#### 3. 4 極機の特長

原子炉の場合,発生する蒸気の温度・圧力が低く,蒸気量のみが 非常に大きくて大容量を可能にしているので, タービンは効率の点か ら長い ブレードを使用せねばならず,このため回転数を落さねばなら なくなる。したがって,発電機は必然的に1,800 または1,500 rpm の4極機にならざるを得ない。

同じ容量の2極機と比較した場合の4極機の特長はつぎのように なる。 (1) 回転子径は約1.5倍で,回転子重量は約2倍となる。材力 は低くてよい。

(2) 固定子 コr 深さは小さくなり, コr 外径はわずかの増加程 度である。

(3) コア 振動の モード が変わり, 振動値が小さくなり, 弾性さ さえが不要となる。

(4) フレーム外径・長さはあまり変わらず,重量は減る。

(5) フレーム と回転子は同心円筒形となる。

(6) コイルエンドが短かくなり,エンド部分の漂遊損が減り,エンド シールドは小さくてよい。

一般に回転機では,

 $kVA/rpm \infty D^2L$ 

D:ギャップ 部分の直径

L: 鉄心長

が成立するが、kVA同一で、回転数が半分になれば、 $D^{a}L$ は2倍 となり、ここでさらにLが同一であれば、Dは $\sqrt{2}$ 倍となる。こ れが(1)の根拠である。

具体的に4極機と2極機の軸材と非磁性コイル保持環の比較をそれぞれ図3.1,図3.2に示す。4極機は関電美浜1号機400 MVA 機であり、2極機としては製作中のものの中から最も定格の近いものとして、390 MVA 機を選択した。

図3.3には固定子の断面比較を示す。 コア 背部を 通る 磁束は 2 極機に比べ4極機では半分となり、 コア 背部の深さは約半分にでき る。また、 コア の振動は図にて点線で示している形となり、 2 極機

	a set with the other and the set of the other and the set of the s	
		t
par		
		free and the second sec
		1
have a state of the second		a set of the second
the second se		and the second sec

----- 2 極 390MVA 4 kg/cm<sup>2</sup> 3,600 rpm 機 39.8t

	降伏点 kg/mm <sup>2</sup>	引張強さ kg/mm <sup>2</sup>	伸点 &	<del>校</del> り %
4 極	46 民上	60 以上	20 以上	50 以上
2 極	67 以上	77 以上	15 以上	40 以上

図 3.1	原子力と火力	の発電機軸材の比較
Comparison of	generator shafts	between 4 P and 2 P machines



\_\_\_\_\_\_4 極 400MVA 4 kg/cm² 1,800 rpm 機 \_\_\_\_\_2 極 390MVA 4 kg/cm² 3,600 rpm 機

	降伏点 kg/mm <sup>2</sup>	引張強さ kg/mm <sup>2</sup>	伸 び ※	較 %
4 極	70 以上	88 以上	25 以上	45 以上
2 極	91 以上	105 以上	25 以上	37 以上

図 3.2 原子力と火力の非磁性コイル保持環の比較 Comparison of retaining rings between 4P and 2P generators.



図 3.3 4 極機と2 極機のコア振動比較 Comparison of core vibration between 4P and 2P generators.



4 極 400MVA 1,800rpm機(最大重量215t)
 2 極 390MVA 3,600rpm機(最大重量229t)

図 3.4 原子力と火力の固定子寸法, 重量の比較 Comparison of stator dimension and weight between 4 P and 2 P generators.

では、だ円形に変位するが、4極機では円周上4点に牽引力が働き、 モードが全く異なるため、コア深さが薄いにもかかわらず、振幅はは るかに小さくなる。これらが、(2)(3)の根拠である。

弾性ささえが不要となると、フレーム内部の空間は狭くできるので、 フレームの外径は2極機とほぼ同一になる。また弾性ささえのある場合には、コア積後、作業員がコア背部にもぐ(潜)って特別の作業ができるようにマレホールを設け、構造面で合理的になるようにフレームと回転子を偏心させていたが、4極機ではこの必要がなく、同心円筒形にできる。これが(4)(5)の根拠である。図3.4にフレーム寸法の具体的比較図を示す。

4 極機では コイル の ピッチ が小さくてすみ, エンド の長さも短かく, コアエンド 過熱現象や エンド 部漂遊損も軽減されてくる。エンドシールド も 小形でよく,エンド の支持も簡単化しうることになる。

#### 4. 大容量機の冷却法と適用基準

容量が大きくなると,現行の内部冷却もさらに冷却効果を改善し 軽量化を図ることは,きわめて肝要の技術問題となり,つぎのよう な各種の方式となる。

#### 4.1 コイルつなぎ部冷却

現在の内部冷却固定子 コイル では,最高温度部分が ガス 出口側 コ イル つなぎ部にある。 との理由はつなぎ部分には冷却手段がとられ ておらず,発生する銅損は自分自身の導体を伝導により伝わり,ペ ットチューブ内水素に達するからで,この部分の特別の冷却法を講ずれ ば,簡単に冷却効果を増加することになる。

実際手段としては、つなぎ部分の絶縁を施さず裸にして、まわり を流動する水素で冷やす方法が最も簡単である。しかし絶縁的見地 からは、裸部分と フレーム 構造との空間距離と、 コイル 間のせん絡距 離と、コイル と支持物表面を通る沿面距離とを十分とらねばならない。 同相内の コイル では隣接 コイル 間の電圧が低く、せん絡距離、沿面距 離も十分すぎるが、他相 コイル との間では、せん絡距離、沿面距離 ともに一般に不足するので、 異相 コイル 間の間隔を離す必要があり、 図4.1 のように 上コイル 下 コイル とも各 コイル の エンド部分の 形状を 変え、異相間で離し同相内では従来よりくっつけることになる。た だしこの手段は ガス 出口側のみ行なえばよい。

4.2 2列ベントチューブ

図4.2 において、導体内銅損の大部分は素線絶縁とペットチューブ 絶縁を通り、水素に奪われる。現内部冷却においては中央に1列の ペットチューブがあるので、この断面上での最高温度は、外側素線の銅 になり、熱流はそれより内側に向い、素線絶縁3層とペットチューブ絶 縁1層を通ることになる。これら絶縁は薄いものではあるが、これ ら絶縁での温度差の総計は容量がふえれば、20 deg ℃以上にもな り、この低減も冷却法改善の効果的手段となり、そのための方式が 2列ペットチューブである。

図4.2にて述べれば、2列ペットチューブでは最高温部は断面の中 央素線の銅となり、熱流を考えると、素線絶縁1層とペットチューブ絶 縁1層を通るので、現内部冷却に比べ熱回路での絶縁厚味は半分と なる。また1列のペットチューブの受持つ銅損が1コイル内銅損の半分





図 4.1 コイルつなぎ部冷却構造 Series coil connector ventilation.



図 4.2 現内 部 冷 却 と 2 列 ベットチューブ Present innercool and double stack of vent tube type.



図 4.3 水冷却固定子コイル(中空-中実組合せ式) Water-cooled stator coil (combination of hollow and solid strands).

となり、両々相まって 10 deg °C 程度の低下が見込まれる。

との方式は1列の ペットチューブの両側におのおの1列の 素線 が あ り, この素線は ペットチューブ をまたがって スロット 内転位が行なわれ るが, 製作の結果 ペットチューブ と素線の密着は良好である。

#### 4.3 水冷却

冷却効果のみから論ずれば、水が最良の冷却媒体である。したが って水冷却を採用すれば、固定子重量を滅じることができるが、一 方、水処理装置やステンレス配管を必要とし、価格・効率などの総合 比較から適当な容量範囲がある。

全素線が中空導体の方式では、熱損失が素線絶縁を介せず直接水 に吸収されるから温度上昇は低いが、素線の厚さが大きいので、う ず電流損が非常に大きい。

温度上昇とうず電流損の協調をとった方式としては、図4.3 に 示すような中空一中実組合せ式が好適である。この方式では中空素 線が長い幅方向で中空素線に接しているので、素線絶縁の温度差も 非常に少ない。しかし中空素線と中実素線は厚さを異にするので、 スロット内レーベル転位には特別の方法を必要とする。われわれをこの 方式は超大容量機での本命と考えているが、この場合スロット寸法も 大きくなるので、素線は図4.3のように4列となる。

#### 4.4 鉄心の軸方向通風

積層鉄心の熱伝導度は、沿層方向と貫層方向とくらべれば、前者 が数十倍となる。軸方向通風はこの利点を活用する方法であり、半

容	盘	固定于	Fコイル	回転子コイル	固定子鉄心
340 N	1W 殺	コイルつ	なぎ部冷却	現内部冷却	半径方向通具
500 N	1W 殺	2 列ベン コイルつ	トチューブ なぎ部冷却	現内部冷却	軸方向通風
800 N	1W 級	2列ベン コイルつ	トチューブ なぎ部冷却	現内部冷却	軸方向通風
1,000 N	1W 級	水	冷却	現内部冷却	軸方向通風

経方向 ダクト が不要となるので, 鉄心長が短くなる長所を持ってい る。しかし間接冷却の場合は、コイル の冷却のために コアを材料の許 容温度よりはるか下にせねばならず, 軸方向通風孔 ガス 出口側部分 温度に制限されて, 次第に姿を消してきたのであるが, 直接冷却で は コア・コイル それぞれ独立の冷却であるので, この方式の活用がで きる。一方, 回転子の磁束密度はこの方式の場合高くなるので, 通 常方式でも比較的回転子磁束密度の高い2極機には採用がむずかし く, 回転子磁束密度が割合に低い4極機にのみ採用できる。

#### 4.5 回転子の冷却

回転子の冷却は現内部冷却でも十分であるが、容量により、エンド 部分の独立通風回路のあるものとないものがある。

#### 4.6 適用容量範囲

以上を総合して4極機の各種冷却方式の適用範囲は表4.1のと おりとなる。

#### 5. 美浜1号機の仕様,構造および材料

#### 5.1 仕 様

本機の仕様を表 5.1 に、また可能出力曲線を図 5.1 に示す。

#### 5.2 各部分の構造および材料

図 5.2 に本機の概略外形寸法重量を,また,図 5.3 に本機の断面を示す。3 章で説明したように,同容量の2極機と比較した場合,回転子径が約1.5 倍,回転子重量が約2倍と大きくなっているが,固定子鉄心が薄く,また弾性ささえが不要になったので,固定子フレームの外径と長さは同容量2極機とほとんど変わらず,固定子重量はかえって若干軽くなっている。したがって,発電機全体の構成は

表 5.1 美浜 1 号機の仕様 Specification of Mihama generator No. 1.

		-	
発電	機	3h	ender to be the second state of the
1P		Æ	円间回歇齐磁形内前 行却
出		カ	400 MV A
			340 MW
カ		輝	85 %
水菜	ガス	圧	4 kg/cm <sup>2</sup>
端二	子 電	圧	17,000 V
電		流	13,585 A
相		数	三 相
周	波	数	60 Hz
[0]	転	数	1,800 rpm
極		数	4 極
短絡」	土 (400	,000 kVA において)	0.64
励私	致 范	Æ	500 V
治封注	山制御フ	与式	複流形
ガス	入替う	与武	炭酸ガス中間使用
-1- Kh 12	t #		
11. M/ 12. 172	x 1754	-1 <b>-</b>	ブラシレス 今時(高禄浦圓形(四領冷胡紫内蘭)
ли Ш		-h	1 550 LW
<u>ш</u> ем		л т	500 V
FL 1537	**	ДТ. ЭМИ	1.800 mm
1243	1405 1701	30A 2-1-	xx with a state
風入	與J) T21-	法	光道機に開始
囫		<b>出</b>	他別(副奶飯橋およびサイリステ海袖品により)
副菌菇	氢機		
形		Ĵ⊊	永久磁石回転界磁形
出		カ	20 kVA
力		率	95 %
រីដ		圧	125 V
相		数	三 相
周	波	数	420 Hz
E	藃	数	1,800 rpm
極		数	28 極
馭	勴	法	主励磁機に直結





図 5.2 概略外形寸法,重量 Outline dimensions and weight.

2極機と大差はないが、つぎの諸点にとくに注意して製作した。

5.2.1 軸 材

荒削り重量 90 t の Ni-Mo-V 鋼で日本製鋼製,発電機軸材とし てはわが国の記録品である。機械的強度の面では耐力 46 kg/mm<sup>a</sup> で 同容量の 2 極機用の 67 kg/mm<sup>a</sup> 級と比べてはるかに楽であるが,巨 大な鍛鋼品であるので,二重脱 ガス 真空造塊法を採用し均質性とじ ん(観) 性の向上に力をそそいだ。

5.2.2 コイル保持環

コイル保持環も国産最大級であるが、当社では昭和38年に超高圧 電力研究所向け、ならびに当社伊丹製作所向けの2台の短絡発電機 用として、外径1.7 m以上、重量約2tの非磁性 Mn-Cr 鋼のコイル 保持環を使用した実績がある。本機でもこの経験を生かして、日本 製鋼製の冷間加工非磁性 Mn-Cr 鋼を用いた。その機械的強度は 図 3.2 に示したとおりである。

5.2.3 冷却法

(1) 固定子 コイル

固定子 コイルの冷却には従来の内部冷却に加えて、3章で述べた



番号	品名	番号	ជា	名
1	フレーム	12	エアギャッフ	バッフル
2	17 — <i>4</i>	13	位相リング	
3	ステータコア	14	メインリード	
4	ステータコイル	15	リードブッシ	ング
5	ロータコイル	16	リードボック	ス
6	ガスクーラ	17	回転整流器	
7	ブラケット	18	AC エキサ-	イダ
8	メタル	19	メタル	
9	ブロワ	20	タコジェネレ	- 4
10	ブロワシュラウドサポート	21	エアクーラ	
11	ブロワガイド	22	エキサイタハ	ウジング





図 5.4 完成した固定子 フレーム Completed stator frame.



図 5.5 完成した回転子 Completed rotor.

三菱電機技報・Vol. 43・No. 4・1969



図 5.6 固定子コイルつなぎ部外観 (タービッ側) Exterior view of stator coil connection (turbine end).

コイル つなぎ部冷却構造を採用した。図 5.6 を見ると タービン 側(コイ ル 冷却 ガス 出口側)の コイル 端間隔を異相 コイル 間では同相 コイル 間 より広げ, コイル つなぎ部の絶縁を省略しているのがよくわかる。

(2) メインリード と ブッシング

メイシリード(図 5.3 の品番⑭)と ブッシング(同図の品番⑮)とは従 来の内部冷却機では同じ冷却 ガス で直列に冷却していたが,本機で は定格電流が 13,585 A と増大したのに伴って, おのおの 単独の通 風回路とし冷却効果の向上をはかった。

(3) 回転子 コイル

4極機では回転子外径が2極機よりも大きく,スロットも深くなる が,遠心力はかえって小さいので,スロット形状は2極機と異なり外 径に近いほうが平行で底部が テーパのついた特殊な形とした。 冷却 は従来と同様に内部冷却であるが,4極機で コイル 端部が短いので, コイル 端部単独の通風回路は不必要で,水素 ガスを コイル の両端部か ら入れて直線部中央に排出する2並列通風回路を採用した。(ただ し,500 MW 級以上の大形機では2極機と同様の4並列回路とす る)。

#### 5.2.4 固定子鉄心

鉄心材料としては冷延けい素鋼帯 H 10 (15,000 ガウス, 50 Hz にお いて鉄損2.65 W/kg) を使用している。 2 極機に比べて鉄心深さが 浅いので, スロット 背後の貫通絶縁 ボルト を省略した点以外は 2 極機 と変わらない。冷却も本機の容量 (340 MW 級) までは半径方向 ダ クトを用いた従来と同一の方法である。

5.2.5 ブロワ

ブロワは 1,800 rpm 用として設計したもので, 翼長の長い5 段の □ -タブレード と先端に シュラウド を持った 6 段の ステータブレード から成り, 回転子に組立てる 前に ブロワ 単独で詳細な特性試験を 実施したうえ で使用した。

#### 6. ブラシレス励磁機

本機では、関西電力の関係者各位の深いご理解により、 ブラシレス 励磁方式が採用された。これは事業用発電機に対する当社の ブラシレ ス 励磁機としては九州電力大分発電所1号機(278 MVA 用) ならび に関西電力三宝発電所1号機(174 MVA 用)に次ぐ3台目の製品で あるが,整流器を利用した励磁機としてはわが国最大の記録品であ り,原子力用4極機についてはもちろん初めてである。事業用大容 量発電機の ブラシレス 励磁方式については,さきに細部にわたって紹 介し<sup>(3)</sup>,また本誌記載の別論文でも触れているので,ここでは主と して4極機用としての特長について説明する。

#### 6.1 原子力用ブラシレス励磁機の特色

シリコン整流素子を回転軸上に取り付けた ブラシレス 励磁機で最も注 目されるのは、シリコン素子、ヒューズ などの部品と各構造部分の機械 的強度であるが、原子力発電機用 ブラシレス 励磁機の回転数が火力用 の 1/2 であるのに対して、シリコン素子などの部品を取り付ける ホイー  $\mu$  の直径は電流定格にも関係するが 火力用の  $120 \sim 140$  % に過ぎな いから、各部の遠心力は火力用の  $30 \sim 40$  % となり、機械強度面の 負担ははるかに軽減される。すなわち、構成部品や構造材料は火力 用と同一のものを使用するので、機械的強度の点では火力用の  $2 \sim 3$  倍の安全率を持つことになる。

電気的には火力用となんら変わるところはなく,ただ容量が大き い点に注意さえすればよい。

#### 6.2 構 造

本機の構造断面を図 6.1 に, また完成した 回転子の 外観 を 図 6.2 に示す。火力用 ブラシレス 励磁機との 相異点を次にのべる。

(1) 発電機との電気的接続を軸継手 フランジ 面で行なっている。 (特許申請中)

(2) 端子電圧が 500 V であるので, キャリヤ 蓄積効果による転流 時の スパイク 電圧を吸収するため, ホイール 内周に コンデンサ を取り付け ている。

(3) 回転整流器・交流励磁機ならびに副励磁機の熱損失を吸収



図 6.1 ブラシレス 励磁機組立断面図 Brushless exciter assembly.



図 6.2 完成した ブラシレス 励磁機回転子 Completed rotor of the brushless exciter.





するため1個の空気冷却器を共用している。

#### 6.3 整流素子の直並列個数

#### 6.3.1 並列数

励磁機定格電流 3,100 A, 発電機界磁短時間許容電流 3,660 A, 1 分間に対し, 定格平均順電流 240 A の シリコン素子を ブリッジ で 10 個 並列に使用する。1 ブリッジ (1 P×6 A) の出力電流は約 600 A であ り, 並列素子間の 電流不平衡 15 %を見込んでも 6 並列で十分であ るので, かりに 1 ァーム 内の 4 個の素子が故障して ヒューズ により切 り離されたとしても, 残りの素子だけで全負荷運転を継続できる。

#### 6.3.2 直列数

各種運転条件でシリコン素子にかかる逆方向電圧のうちで,直列数 決定に際して実際に問題になるのは、励磁機頂上電圧印加時と同期 はずれ時の逆電圧である。系統電圧が発電機端子電圧より20%以 上高い状態で同期投入を行なえば、かなり高い逆方向電圧を誘起す る可能性があるが、これは投入しゃ断器をロックすることで防止で きる。

(1) 本機の頂上電圧は試験結果によれば 923 V であり、このと き各 アーム にかかる逆電圧は 970 V となる。

(2) 同期はずれ時の逆電圧は,実際の運転条件の下では励磁機 定格電圧の5倍未満と言われており,当社での解析結果もこれと符 合している。また,外国で 60 MVA~150 MVA の発電機を実際に 脱調させて,界磁誘起電圧を実測した結果でも励磁機定格電圧の2 ~3倍以下に収まっている。界磁誘起電圧が定格電圧の5倍である とすれば,ブリッジの各ァ-ムにはその半分の2.5倍(本機では 1,250 V)の逆電圧がかかる。

上記の逆方向電圧に対し、本機では定格せん頭逆耐電圧 1,600 V, 定格過渡せん頭逆耐電圧 2,000 Vの シリコン素子 1 個を使用する。

#### 6.3.3 結 線

前項の検討結果により シリコン 素子の 接続は1S×10P×6A とした。 ブラシレス 励磁機の結線を図6.3 に示す。

#### 7. 試験結果

この原子力用国産第1号機は、今後の大容量原子力発電機の基礎

となるものだけに,製作者としても国産技術の基本方針を確立する ために大規模な技術試験を実施した。とくに,温度と磁束の分布を 知るため,数百点の特殊熱電対とサーチコイルをあらかじめ機内各部 にそう入するとともに,電流・電圧・水素 ガス 圧を広範囲に変えて あらゆる角度から特性を調査した。

本機には ブラシレス 励磁方式を採用したので,発電機および励磁機 は、おのおの試験専用の スリップリングを軸端に取り付けて別個に試験 したのち、さらに,発電機と励磁機を現地と全く同一の状態に直結 し、振動などの機械的項目を チェック した。 図7.1 は直結試験中の 発電機と励磁機である。

#### 7.1 発電機特性

無負荷飽和曲線および三相短絡曲線を図7.2に示す。

短絡比は 400 MVA 基準で保証値 0.64 に対し試験値 0.699 であり, 全負荷界磁電流は 400 MVA 17,000 V 85 % PF において 2,930 A である。

## 7.2 損失および効率

全負荷効率は 85 % PF のとき 98.80 %, 100 % PF のとき 99.09 %である。また損失の内訳は,機械損・界磁抵抗損ならびに固定子 抵抗損+漂遊負荷損がおのおの全損失の約 30 %を占め,残りの 10 %が鉄損である。



図 7.1 試験中の 400 MVA, 1,800 rpm 発電機 400 MVA, 1,8000 rpm generator under test at the shop.



#### 7.3 等価温度上昇試験

#### 7.3.1 許容温度限界と温度測定個所

本機の許容温度限界は米国規格 USAS C 50・13-1965, Cylindrical Rotor Synchronous Generators に準拠し, 表 7.1 のように定 めた。 表中の低温水素 ガス 温度, 固定子 コイル 温度ならびに固定子 コイル 出口 ガス 温度は, それぞれ, ガス 冷却器出口低温水素 ガス, 固 定子 スロット 部上下 コイル 間, ならびに固定子 コイル 冷却 ガス 出口に そう入した測温抵抗体によって測定し, 鉄心温度は鉄心各部に埋込 んだ熱電対により, また回転子 コイル 温度は抵抗法によって測定し た。

#### 7.3.2 固定子コイルの等価温度上昇

**表 7.2** に各種温度試験時の固定子 コイル の温度上昇を示す。これ から各水素 ガス 圧での最大出力に おける固定子 コイル の 等価温度上 昇を求めた結果が表 7.3 である。 定格出力 (400 MVA) における 固定子 コイル 出口 ガス最高温点 の 等価温度上昇は 29.1 deg ℃ で, 65 deg ℃の保証値に対し十分の余裕がある。

#### 7.3.3 電機子電流と固定子コイル温度上昇の関係

図7.3に銅損試験時の固定子 コイル 温度上昇を示す。 固定子 コイル 出口 ガス 温度上昇(実線)ならびに固定子 コイル 温度上昇(点線) は、電機子電流の二乗に比例している。

#### 7.3.4 固定子コイル端部およびつなぎ部の温度上昇分布

5 章で述べたように、本機で初めて コイル つなぎ部冷却構造を採 用したので、その効果を調べるために図7.4 に示すとおり、上口 コイル 端部最上層素線(主絶縁内側)、つなぎ部ならびに ペットチューブ の端に多数の熱電対をあらかじめそう入しておき、温度上昇の分布 を測定した。その結果は明らかにつなぎ部冷却の効果を示しており、 従来つなぎ部分にあった最高温点は鉄心よりに移動し、固定子 コイル 出口 ガス 温度(ペットチューブ 端温度)と最高温点温度との 温度 差 は 19.5 deg °C にとどまった。

なお、この結果から、 定格出力時の本機の固定子 コイル 最高温点 の温度は、 低温水素 ガス 温度(45°C)+固定子 コイル 出口 ガス 等価温 度上昇(29.1 deg °C)+出口 ガス と最高温点との温度差(19.5 deg °C) =93.6°C となり、B 種絶縁の許容温度限界 130°C よりはるかに低い。

表 7.1 温度上昇保証值 Guaranteed values of temperature rise.

 	崧	棫	; (	カ	部	分		測	定	法	温度上昇(deg)	全 温 度(°C)
低	调	水	蜜	ガ	ス	溫	度		TD			45
 固	宠	子	#	1	ル	最	高		ETD		65	110
圆;	定子	ы.	イル	出	ロガ	ス銀	高		TD		65	110
 0	枟	子	ч	1	N	3ष्ट	均		R		65	110
 固	定	Ð		阦	心	最	商		TD		85	130

表 7.2 各種温度試験時の固定子 コイル 温度上昇 Stator coil temperature rise under temperature test.

水素ガス圧電	kg/cm <sup>2</sup>	2	3	4	2	3	4
電機子電流	A				10,739	12,350	13,585
端子電圧	v	17,000	17,000	17,000			
温度上昇	deg °C						
固定子コイル	レ最高	9.2	6.6	5.5	19.2	19.1	20.1
固定子コイル出口	ガス最高	7.2	4.1	3.5	27.2	26.6	25.6

表 7.3 各水素ガス圧における等価温度上昇 Equivalent temperature rise at various hydrogen gas pressures.

-	水素ガス圧	kg/cm <sup>2</sup>	2	3	4
	最大出力	kVA	316,204	363,636	400,000
	等価温度上昇	deg °C			
-	圖 定 子 コ イ	ル 最 高	28.4	25.7	25.6
	固定子コイル出	ロガス最高	34.3	30.7	29.1

#### 原子力用4極 タービン発電機・志岐・甲斐

#### 7.3.5 鉄心温度上昇

図7.5 に定格電圧時(鉄損温度試験時),ならびに定格電流時(銅 損温度試験時)の鉄心各部の温度上昇分布を示す。進相運転時の鉄 心温度上昇には電圧と電流の両方が影響するから,最高温部は鉄心 端部先端と推定されるが,温度上昇は許容限界 85°C に対し十分に 小さく全く問題ない。

#### 7.3.6 回転子コイル温度上昇

回転子 コイル の温度上昇は図 7.6 に示すように,界磁電流の二乗 に比例している。これから全負荷,定格力率時(界磁電流2,930 A) の回転子 コイル 温度上昇を推定すれば 30.2 deg °C となり,保証値 65 deg°C よりはるかに小さい。

#### 7.4 励磁機特性

ブラシレス 励磁機の無負荷飽和曲線および電圧変動率曲線を図 7.7



図 7.3 銅損温度試験時の固定子コイル温度上昇 Stator coil temperature rise at short circuit test.



Stator coil end temperature rise.







	織城の部分	测导性	1.550kW 500V負荷時温度上昇(deg)						
	164 194 - P HP 77	0-0 AC 124	保証值	試驗値					
交	電 機 子 コイル	T	60	32					
流	電機子鉄心	Т	70	32					
磁	界磁コイル	R	70	44					
機	界 磁 鉄 心	Т	70	26					
流回	正 側 ホイール	Т	80	19.5					
整	負側ホイール	Т	80	20					



に示す。全負荷時 (1,550 kW 500 V) 界磁電流は 67.5 A である。

#### 7.5 励磁機温度上昇試験

全負荷温度試験の結果を表 7.4 に示す。 シリコン 整流素子の 温度 上昇は  $\pi - \mu$ の 温度上昇と ほとんど同一であり,低温空気温度を 50°C とすれば,全負荷運転時の シリコン素子の温度は約 70°C となる が、シリコン素子は接合部温度 150°C までは連続使用が可能なので,

# 表 7.5 直結試験時の軸受振幅 Bearing vibration in direct coupling test.

発電機-ブラシレス励磁機直結,定格回転時,片振幅,単位 μ

振動のフ	前	発 電 機 前 部 (タービン側)	発 電 機 後 部 (励 磁 機 偁)	励磁機
н	(水平方向)	1.9	1.5	6.0
v	(垂直方向)	1.3	1.3	5.0
A	(軸 方 向)	0,8	1.0	2.5

温度的にも十分の余裕がある。

7.6 励磁機速応度

励磁機速応度試験の結果を図7.8に示す。

- 励磁機電圧上昇率: 800 V/s
- 公称励磁機速応度: 2.02

励磁機頂上電任: 923 V (185 %)

#### 7.7 発電機ブラシレス励磁機直結試験

発電機と ブラシレス 励磁機を直結し,各軸受の振動を 測定 して 表 7.5の結果を得た。片振幅の最大は励磁機軸受の垂直方向の 6 μ で ある。この結果は当社の軸受振動許容限界(発電機 10 μ, 励磁機 25 μ)を十分に満足している。

最後に 115 %過速度試験(2,070 rpm 1 分間) を実施 したが 問題 なく,停止後機械各部を点検したがなんら異常なかった。

#### 8. む す び

原子力用4極大容量発電機製作上の第一の問題点は、火力用2極 機よりはるかに巨大な回転子の素材となる信頼性の高い軸材と、コ イル保持環材料の入手であり、第二の問題点は、340 MW、500 MW、 800 MW、1,000 MW と飛躍的に増大する単機容量に対処する冷却 法の改善である。当社では今回の美浜1号機の製作に当たって、株 式会社日本製鋼所のご協力により、国産の軸材とコイル保持環材を 使用して巨大回転子の経験を積み、今後1,000 MW 級までの回転子 を一体構造で製作できる見通しを得るとともに、冷却法についても 固定子コイルにつなぎ部冷却構造を採用して予期どおりの成績を収 めた。

引続いて製作中の美浜2号機 (560 MVA) では、上記のほか、固 定子 コイル に2列 ペントチューブ、 固定子鉄心に軸方向通風など新構造 を採用するが、さらに大容量の1,000 MW 級で使用する予定の固定 子 コイル 水冷却についても、 本誌記載の別論文で詳細に紹介してい るとおり、すべての準備を完了している。

また,単機容量の増大に伴う励磁系の問題に対しては, ブラシレス 励磁方式が最善の解決法であるが,これについても今回の美浜1号 機で十分な自信を得た。

美浜1号機ならびに2号機の発注に当たって、二次系全国産の英 断をくだされ、三菱 グループに国産技術確立の機会を与えていただい た関西電力首脳部のかたがたに、誌面を借りて深じんの謝意を表す るとともに、この貴重な経験を生かして、今後のわが国の原子力発 電の進歩に全力をつくす覚悟であることをあらためて表明したい。

#### 参考文献

- (1) L. A. Kilgore, H. E. Lokay : Conference Paper 68 CP 707– PWR.
- (2) 甲斐,長良,長沢:三菱電機技報 40, 1,717 (昭 41)

三菱電機技報・Vol. 43・No. 4・1969

UDC 621. 313. 322-82 : 621. 221

最近の水車発電機

三 浦 広\*・山下喜美雄\*・森 与志 彦\*
 監 崎 章\*\*

# Design Features of Recent Waterwheel Generators

Kobe Works Hiroshi MIURA · Kimio YAMASHITA · Yoshihiko MORI Head Office Akira KENZAKI

Waterwheel generators in hydraulic power plants, especially those in pumped storage hydraulic power plants, are becoming rapidly of larger capacity and higher speed. A 588 MVA machine in Soviet Russia and a 600 MW one in America are the first to be quoted, while several electrical manufacturers took part in building generators ranging 200~300 MVA. Waterwheel generators manufactured by Mitsubishi are now operating not only in this country but all over the world extensively. Among the orders of total 3,500 MVA generators on hand can be recognized the manifest of this trend and technological development is taking a great stride to keep a pace with it. Particularly water cooled machines are considered the step stones to climb up higher capacties. This article describes recent representative waterwheel generators built by the Company together with the forecast of future development.

#### 1. まえがき

大規模な火力・原子力発電設備の建設と並行して、水力発電所も 次第に大形化し、水車および水車発電機の設計・製作技術の発達と あいまって、発電出力あたりの建設費低減に有利な単機容量の増大 化・高速化がはかられている。最近の揚水発電所の計画ではこの傾 向が著しくあらわれており、特にわが国では地形の関係もあって、 大容量化とともに高速化への意欲が強く出てきている。これにとも ない メーカーの実績も ン連での 588 MVA の製作、米国ウェスティングハ ウス 社の 600 MW 製作開始をはじめとして、各社共 200~300 MVA 級を手がけるに至っており、発電所計画は国内・国外共に各国それ ぞれの事情はあるにせよ、ほぼ同一の傾向をたどっている。図 1.1 は従来の製作例に当社の最近の実績の数例をプロットしたものである が、上記の動向を明確にあらわしている。

水車発電機の製作にあたり,市場を海外に求めざるを得ないのは わが国の宿命で,わが社の海外輸出も次第に軌道に乗りつつあり, 製作中の水車発電機(据付中も含めて)33台,約3,500 MVA のう



ち輸出機は 85% に達し, そのなかには数々の記録的製品も含まれ ている。

このような大容量化・高速化に伴う技術的諸問題として,構造・ 機械的強度・通風および冷却・スラスト軸受・絶縁システム・発電電動 機の起動などがあり,さらに経済性向上のためのコスト低減もわれ われがとり組まねばならない大きい課題である。特に冷却方式の改 善はそれが直接大容量化につながるだけに,回転子をも含めた直接 冷却(水冷却)は,今後の水車発電機の大容量化・高速化にきわめ て有力な手掛りをあたえるものと思われる。本文は当社の最近の水 車発電機を代表する数例について内容を報告するとともに,今後の 技術進展の動向とそれに対処するわれわれの考え方,研究態勢につ いてのべたものである。

#### 2. 水車発電機製作の現況

表 2.1 は当社の大容量水車発電機(50,000 kVA 以上)をまとめ たものである。

水車発電機の設計・製作を論ずる場合の指標として,単位慣性 常数,(容量)/(回転速度),出力係数,(容量)×(回転速度)または (容量)/(極数)を用いることが多い。

単位慣性常数は,発電機が保有する蓄勢輸効果によって決定され るもので普通 6.0~8.0 程度であるが,これを越えるものは設計上特 別の注意が必要である。メキシコラビジータ発電所 80 MVA はこの値が 13.3 にも及んでおり,直径の選択,風損の低減,剛性の確保には特 に留意して製作を進めている。

(容量)/(回転速度) は トルク に比例する係数 で機械の大きさをあら わしている。 ブラジル イリキソルテーラ 発電所 170 MVA はこの値がきわ めて大きく,出力から想像される以上の大形機であることを示して いる。一面この発電機の単位慣性常数はさほど大きくはなく,電気 的・機械的によく パランス がとれていると言ってよいであろう。

出力係数は次の出力方程式の係数で,容量と機械の大きさとの関 係を示し,経済設計の目安ともなりうるものである。

#### $P_S = K_0 d^2 l n$

ここに  $P_S$ : 容量(kVA) d: 固定子鉄心内径(m)

納 入 先	発電	所	台数	容 量 kVA	電 E kV	回転速度 rpm	周波数 Hz	容量/ 回転速度 kVA/rpm	容量× 回転速度 kVA.rpm ×10-8	容量 極数 kVA/P	単位 慣性常数 kW-S/ kVA	形式	水車	製作年	備 考
オーストラリヤ (SMA)	チュマット	- 3	6	278,000/263,200	15.4	187,5	50	1,482	52,1	8,690	8.2	半かさ	V. F.	製作中	発電専用機3台 発電電動機3台
ブラジル (CESP)	イリヤソルテ	- 7	2	170,000	14.4	85.7	60	1,982	14.6	2,025	6.64	かさ	V. F.	製作中	
関 西 電 力	木	谢	1	125,000	16.5	257	60	485	32.1	4,460	6.31	半かさ	V. F.	1967	
台湾電力	下 遠	見	2	115,000/100,000	13.8	360	60	319	41,4	5,750	5.55	立	V. F.	1967	
東京電力	安	袰	2	111,000	15.4	200	50	555	22.2	3,700	6.61	半かさ	V. F.	据付中	
電源開発	田子	倉	4	105,000	13.2	167	50	630	17.5	2,920	9.85	かさ	V. F.	1958	
中部電力	高根第		2	100,000kVA/kW	13.2	277	60	362	27.7	3,850	6.74	立	<b>V</b> . D.	据守中	発電電動機
電源開発	七	色	1	90,000	13.2	129	60	7C0	11.6	1,610	6.13	かさ	V. F.	1964	
コ ロ ン ビ ヤ (メデリン電力)	ガターベ	1	2	89,000 77,400	13.8	514	60	173	45.8	6,360	6.2	立	V. P.	製作中	
メキシコ (CFE)	ラビジー	9	4	80,000	13.8/12.4	120 ′100	60 50	008	9.6	1,330	13.3	かさ	V. F.	製作中	
関 西 電 力	読 書 第	Ξ	1	000,08	13.2	200	60	400	16.0	2,220	9.59	かさ	V. F.	1960	
コ ロ ン ビ ヤ (ボゴタ電力)	エルコルヒ	<b>†</b> ∏	3	72,000 '62,500	13.8	514	60	140	37.0	5,140	6.36	橫	Н. Р.	製作中	
コ ロ ン ビ ヤ (ボゴタ電力)	カノア	х	1	72,000 62,500	13.8	327	60	220	23.6	3,280	5.4	立	V. F.	製作中	
台湾電力	范	剬	1	62,000 '54,000	13.8	514	60	120.8	31.9	4,430	4.2	橫	H. P.	1956	
台湾電力	石	P7	2	57,500 50,000	13.8	200	60	287.5	11.5	1,600	7.24	かさ	V. F.	1962	
台湾電力	谷	関	4	57,500/50,000	13.8	300	60	192	17.3	2,400	4.71	立	V. F.	1959	
コ ロ ン ビ ヤ (カルダス智力)	サンフランシ	スコ	3	57,000/53,000	13.8	400	60	163.8	22.8	3,170	6.2	立	V. F.	据勺中	
関 西 電 力	天ケ	纐	2	55,000	13.2	180	60	306	9.9	1,375	6.78	かさ	<b>V</b> . D.	1963	
電源開発	淹		2	50,000	11.0	150	50	332	7.5	1,250	7.02	半かさ	V.K.	1960	
中部電力	加難第	=	2	50,000	13.2	327	60	153	16.4	1,790	4.56	立	V. F.	1961	

#### 表 2.1 三菱大容量水車発電機 (50,000 kVA 以上) MITSUBISHI Large waterwheel generators (over 50,000 kVA).

注) (1) 単位慣性常数のベースは定格容量

(2) 立; 立轴普通形, 半かさ; 半かさ形, かさ; かさ形, 橫; 橫軸形

V.F.; 立軸フランシス, V.P.; 立軸ペルトン, V.K.; 立軸カプラン, V.D.; 立軸デリヤ, H.P.; 横軸ペルトン

*n*:回転速度(rpm) *l*:固定子鉄心長(m)

K<sub>0</sub>:出力係数

出力係数は電気装荷・磁気装荷の積に比例するもので、材料の進 歩, 設計製作技術の改善などで次第に高くとる傾向にあり, 過去の 例では 6.5 程度までであったものが、7.0~8.0 程度の実績がふえ、 ときには 9.0 程度のものも出てきている。

(容量)×(回転速度)または(容量)/(極数)は設計製作の難易さを 示す係数で、後者に対してはさらにこれを鉄心長で除したものが用 いられることもある<sup>(1)</sup>。 オーストラリヤの テュマット-3 発電所 278 MVA、 台湾下達見発電所 115 MVA, コロンビヤの ガターペ 発電所 89 MVA お よび コレヒオ 発電所 72 MVA は、いずれもこの値が大きく、設計製 作のむずかしさを示している。

この係数は発電機の可能最大出力の目安としても用いられ、前述 の出力方程式より、次式の如く導きうる(2)。

$$P_{S} \cdot n = \left[ K_{0} r_{0} \frac{1,800}{f \pi^{2}} \right] \frac{V^{3}_{\max}}{k^{3}}$$
$$P_{S}/P = \left[ K_{0} r_{0} \frac{15}{f^{2} \pi^{2}} \right] \frac{V^{3}_{\max}}{k^{3}}$$

ここで P: 極数,r<sub>0</sub>:固定子鉄心長/極間隔

f:周波数(Hz),k: 無拘束速度/定格回転速度

Vmax: 無拘束速度時の最大周速 [m/s]

たとえば成層 リム 構造で 60 Hz の場合,

 $K_0 = 8.0, r_0 = 4.5, V_{\text{max}} = 150 \text{ m/s}, k = 1.8$ 

おくと 
$$P_S \cdot n = 63.4 \times 10^6$$

上

 $P_{S}/P = 8,800$ 

となるが、これは従来発表されている値にほぼ等しく(3)、最大出力 の上限を示す一例である。

最近の製作実績のなかから,かさ形·立軸普通形·横軸形·揚水 発電所向発電電動機の代表例を選び、その内容を報告する。

2.1 オーストラリヤチュマット-3発電所

図 2.1 は発電機組立断面を示す。Ps/Pも大きく、世界有数の大 容量機であり、形式は上部に案内軸受を有する半かさ形で、3台の 発電電動機を含め、6台共同一形式を採用している。

規格は BS であるが、温度上昇は定格出力時 冷却水温 20°C より 95℃ 上昇, 過負荷時 冷却水温 15℃ より 100℃ 上昇と若干低い目 に規定されている。速度上昇率は56%と高く、そのため、単位慣 性常数は 8.2 と妥当な値に納まった。

最も顕著な特色は発電所 クレーンが 125トン2台で、固定部分のみ



しかつれない点である。このため成層 Jム は据付位置で、しかも水 車の据付をさまたげないように特殊な治具を用いて積層し、磁極取 付け後、固定子をつりこむこととなる。磁極は1極づつ取りはずせ ることはもちろんで、このことは万一の場合の固定子 コイル 交換に も便利である。水車分解時、水車部品・下づラケット などを取り出す ため、成層 Jムはそのままの位置に保持し、スパイダボス のみ取りはず しうるようにしている。スパイダボス と Jム との結合には当社独特の ス プリングキーを用いているが、本構造には最適で作業も容易に行なうこ とができる。これにより、クレーン容量は従来方式に比べてほぼ半減 し、建屋設計にも好影響をあたえており、今後の大容量発電所の計 画にあたってはぜひとも一考すべき方式と考えている。

スラスト 軸受は キングスベリ 式で, 揚水運転時に起こりうる万一の逆 転にそなえ, パッドは中心支持を採用している。冷却方式は外部に油 冷却器を設けた油循環式で電動油 ポンプを用い, また軸受点検のた め,電動機駆動の軸受昇降装置が設けてある。

停止時の制動には電気 ブレーキを常用とする。端子に三相短絡用の 切換え スイッチを置き,直流電源から励磁をあたえ,電機子抵抗損を 利用して減速をはかるものである。従来式の摩擦 ブレーキ も非常用と して設置してある。大容量機の大きい蓄勢輸効果を有するものに, 摩擦 ブレーキのみを用いることは決して得策ではなく,特に起動停止 のひん繁な発電所では電気 ブレーキの採用を考慮すべきであろう。

励磁装置には速応度も高く,経済的にもすぐれた サイリスタ 式を採 用している。

#### 2.2 コロンビヤ ガターペ I 発電所

当社はさきに台湾電力下達見発電所 115 MVA 360 rpm の大容量 高速機を完成したが、本機はそれ以上の高速機で *Ps/P* も大きく、 しかも立軸ペルトン水車に直結されるため、発電機の下部案内軸受が なく、設計にあたっては特に慎重に計画を進めた。 形式は図2.2に示すように普通形である。力率0.85,  $x'_{du} \leq 0.26$ の仕様,必要な蓄勢輸効果,960 rpmの無拘束速度とそれにもとづく機械的強度,臨界速度,輸送制限,工場での無拘束速度試験実施などの条件を十分検討した結果,立軸は直径を大きくして鋼板溶接とし,厚鋼板の積層リムは直接主軸に焼きはめで,輸送のため主軸はその外周のリムとともに2分割可能としてボルトによる結合方式を採用した。慎重を期するため,主軸溶接部に対しては工場試験の前後に非破壊  $\tau_{\lambda}$ を実施する予定である。水車軸との結合にはリーマボルトは使用せず,トルクはラジアルノックで伝達される。下 ブラケットはブレーキ 兼 ジャッキのため設けてあるが,工場試験時にはとこに案内軸受を取りつける。磁極は回転子をつり出すことなく、1 個ずつ分解可能で、制動巻線も非連続形であるが, $x_{q'}/x_{d'}$ を規定されているため、特殊な接続を実施している。

損失の軽減には特に留意し、固定子 コイルの ローベル 転位はもちろんのこと、エンドベル にも非磁性材を使用した。

励磁機は本体の通風路の一部を利用した全閉通風方式であるが、 刷子点検の便のため,整流子および スリップリングは開放形である。

#### 2.3 コロンビヤエルコレヒオⅡ発電所

横軸形水車発電機としてはわが国の記録品で、先に当社が製作した台湾電力竜澗発電所の記録を更新したものである。竜澗機に比べ $P_{S}|P$ が大きいのは当然として、無拘束速度・蓄勢輪効果が共に大きく、 $\mathbf{x}'_{du} \leq 0.30$ の制限に加えて、既設ASEA 機と基礎をそろえる制約もあり、前述の  $3y_{-}$ ペ機と並ぶむずかしい機械である。

構造は図2.3に示す如く,両側に水車を直結しており,固定子 は上下に2分割しうるようになっている。主軸中央部は鋼板溶接式 で輸送の便のため,ガターペ機と同じく2分割可能である。軸受面圧 は立軸機のスラスト軸受に匹敵し,直接水冷式で冷却効果を高めるた め鋼板を使用している。磁極は1個ずつ取りはずし可能で,また固



図 2.3 72/62.5 MVA 横軸発電機組立図 (エルコレヒヨ II 発電所向け) 72/62.5 MVA generator assembly (El Colegio II power station). 定子 コイルエンドの接続には銀ろうを使用し、特殊な転位を採用して 漂遊損の低下をはかっている。水車との接続には リーマボルトを使用 せず、両側で互いに 90 度ずらした キー により、トルク伝達を行なう 方式を採用している。水車 ホイール を両側に オーバーハング するため、 軸電流防止絶縁は両軸受共設けており、点検を容易にするため軸電 圧指示計も設置している。スリップリングには極性切換装置を備え、ま た励磁装置は増設機の関係で ASEA 製を採用している。

#### 2.4 中部電力 高根第一発電所

本機は、中部電力高根第一発電所向け デリヤポップ 水車直結の発電 電動機で、2 台製作し、1 台は工場において全組立後起動試験を含 めて、各種試験を実施した。おもな特長は下記のとおりである。

(a) 構造概要

図2.4 に示すように普通形構造である。発電機軸は、上部軸・ スパイダシャフト・下部軸と分割可能な構造とし、輸送および発電 所へ の撤入に便利なものとした。軸とスラストカラーの締付けには、当社独 特の クランプバー方式を採用した。本方式は、高降伏点強度の特殊鋼 製パーのてて作用を利用して、軸とカラーとの間にスラスト軸受全荷 重以上に相当する力がかかるように締付け、一体としたものである。 このため軸に加わる推力荷重が変化しても、軸とカラーのあたりが 変化することはなく、したがって振見調整が容易にできるし、運転 中に バランス がくずれる心配もない。スパイダシャフト と りムとは、これ も当社独特の スプリングキー方式により、締付けている。ファン は、パド



図 2.4 100 MVA/MW 発電電動機組立図(高根第一発電所向け) 100 MVA/MW generator/motor assembly (Takane No. 1 power station).

ル形の無方向性遠心 ファンで、 羽根1個1個の取りはずしが可能で ある。

固定子わくは、高速大容量の発電電動機であることを考慮して; 特に横方向剛性の高い構造とし、耐振強度の確保を図っている。そ の構造は、次章に述べるように長年にわたる研究成果を取り入れた もので、十分所要の強度を発揮したものである。起動中の磁気音や 振動抑制のため、通常の発電機より鉄心の締付圧力を高くする構造 とした。また風通内面には、防音材も施されている。固定子は輸送 制限上4分割され、さらに高さ方向にも2分される構造とした。空 気冷却器は8個である。

固定子 コイル は、2 Y 星形接続・1 ターンハーフコイル で波巻であるた め コイル のつなぎ線が少なく、 すっきりした構造となっている。 ダ イヤラスチック 絶縁を施した コイル は、 揚水発電所のひんぱんな起動停 止に伴う過酷な ヒートサイクル に、十分即応できるものである。

スラスト 軸受は、3 ディスク 支持の新構造でさらに圧縮管付とした。 このため各 スラストパッド間の負荷分担は、 きわめて理想的に パランス され、かつ スラスト 調整も容易である。起動時の軸受まさつ トルク を 軽減するためオイルリフトを設けた。オイルリフトを運転した場合の軸受 の静止まさつ係数は、約 1/1,000 程度で起動時のまさつ トルクは、数 トン-m 程度に減少する。このまさつ トルク は スラスト 荷重が増減して もほぼ一定の値である。

上部案内軸受は、周速 30 m/sec を超す高速軸受であるため、遠心 油  $\pi_{\nu}$ うを利用した油のあわ立ち防止装置を設けた。 これら軸受の 詳細設計に先立って、3,000  $_{\nu}$ 、2,52ト 軸受試験装置により、各種の 性能確認試験を行ない、その成果を適用した。油かき装置(ス,52トラン ナ に付着した熱油が、 回転とともに次の  $n_{\nu}$ ドのくさび状油膜に入 り込むのを防止する装置)、  $1 n_{\nu} - 5$  支持装置の改良および油流 ガ ィド なども、その成果の一部である。

上 ブラケット 油そうは,一体構造とし足はすべて継足とした。デリヤ ポップ 水車であるため,上下方向のたわみも極力小さく押えるよう十 分強固なものとした。

制動巻線 バー は高抵抗の特殊銅合金を使用し、その熱容量をでき だるけ大きくするよう特に構造上のくふうを払った。バー と低抵抗 の セグメント とは、接着強度を十分もたせるため特殊な加工を施し、



図 2.5 工場組立中の 100 MVA/MW 発電電動機 100 MVA/MW generator/motor in the shop.





高周波ろう付により接着を行なった。 セグメント 間の接続には, 導電 性・可どう(撓)性および冷却効果のすぐれた分割形接続片を開発し 使用している。

図2.5 に工場組立中の発電電動機を示す。

(b) 起動方式

本機は起動瞬時の電圧降下を極力少なくするために、定格電圧の 38%の低減電圧制動巻線起動方式が採用された。 起動 タップは、主 変圧器(発電電動機2台に対し1台)の起動専用の三次巻線からと られる。

工場において 60 Hz 3,000 V の工場電源を直接使用して起動試験 を実施した。このときの起動入力は約 19,000 kVA であり,起動後 約8分で同期速度に達した。起動時の制動巻線温度は、 +=2,29 温 度計素子および FM 送受信装置を用いて,回転中の実測に成功し貴 重な資料をうることができた。 また ==-2,25 も実施し,静止時の 制動巻線の温度上昇および起動  $h_{1/2}$ を確認した。図 2.6 に起動試 験の結果を示す。5,000 V 換算の起動 kVA は,約 57,500 kVA であ り,所期の設計目標どおり十分低目に起動入力を抑制することがで きた。

現地においては、 ラッナベーン 全閉、 水面押下げのあと低減電圧印 加,起動加速,低減電圧のまま同期引き入れ、あと変圧器二次巻線 に切換えて、定格運転を行なう起動方式である。世界最大容量の デ リヤ 形ポップ 水車とともに、その活躍が待たれる。

以上当社の水車発電機の代表例を紹介したが、 ブラジル イリヤソルテー 5 発電所、メキシコ ラビジータ 発電所のごとき低速度機も製作中である。 それぞれ風道直径 17.5 m, 15.0 m に及ぶ巨大機で,固定子・回転子 全般にわたり,剛性の確保が大切で,高速機とは異なる異質の問題 点を次々と解明しつつ設計製作をすすめている。

#### 技術進展の動向

めざましい技術革新が行なわれつつある現在,水車発電機も発電 専用機としてはもちろんのこと,揚水発電所向け発電電動機として も大容量化・高速化が推し進められ,同時に製作 コストの切下げも 行なわれている。現在進展中の発電機設計製作技術の動向について, 以下簡単な展望を試みたい。また今後水車発電機の励磁装置の主流



図 3.1 リムモデル 試験装置 Model rim testing equipment.

となると予想される サイリスタ 励磁装置について紹介する。

3.1 発電機構造

(a) □-タ

薄鋼板積層式 リム材として降伏点強度 49 kg/mm<sup>2</sup> のものが現在入 手可能である。このような高抗張力鋼板の出現は高応力 リムの採用 を可能とし、発電機回転子径を上げ周速を高く取ることができるよ うになった。 このため容量や GD<sup>2</sup> に応じて必ずしも回転子重量を 増加させる必要はなく、クレーンつり上げ重量の低減とともに発電所 建屋の建設費低減にも役立っている。 リムと ポス との締付には当社 独特の スプリングキーを使用し、回転に伴う リムの膨張収縮に確実に追 随させているため、回転子の安定性もきわめて良好である。

しかしながらこのような高応力 リムの採用にともない,いろいろ な技術的問題も付随して生ずる。その一つは回転中の回転子外径の 伸びであり,他は無拘束速度と負荷しゃ断時の過速度とがほぼ同程 度となる フランシス 形ポンプ水車直結の発電電動機における疲労 強度 の問題である。前者はまさに中低速大容量の大外径機になるほど顕 著であり,回転時空げき(隙)値の変化による特性の変動に留意する 必要がある。後者については 278 MVA 機の約 1/7 の積層 リムモデル を製作し,回転中の リムの応力挙動やくり返し応力に対する疲労強 度などを試験中である。図3.1 に試験中の リムモデル 装置を示す。 発電電動機の回転部の安全率をどの程度にすべきか,安全率そのも のをどう考えるかの問題解明と同時に,薄鋼板積層 リムの正確な応 力計算式の確立も,あわせて実施している。

厚み 25 mm 以上の高抗張力厚鋼板の使用も普及し,一円輸送可能な場合従来の鋳鋼もしくは鍛鋼製 リム に代わって用いられている。 すでに立軸機では 115 MVA 360 rpm 機,横軸機では 72 MVA 514 rpm 機の厚板積層 リム 機として使用され,回転子重量の軽減に役立 っている。

発電所における最大つり上げ重量をできるだけ低く制限し、クレー ン容量をそれに応じて低減させ、建屋をも含めて全体の経済化を図 る方法が推し進められている。最も簡便なクレーン容量軽減策は、回 転子の代わりに重量の少ない固定子のみを、つり上げ可能とする方 法であるが、さらに進んで一円状の固定子ではなく、分割固定子の みつり上げ可能とすれば大幅なクレーン容量低減が可能である。もち ろんこれに伴って回転子を分割可能な構造とし、部分的な回転子つ り上げを可能とするようにせねばならない。したがって発電機単独 の製作 コスト は、どうしても増加する傾向にあるが、結局発電所全 体の建設 コストの低減と、発電機の組立分解の困難さとを総合的に 勘案して、決定すべき問題であろう。

従来ほとんど例外なしに一体鍛造により製作されていた主軸も、



図 3.2 115 MVA 発電機固定子わくの プラスチックモデル Plastic model of the stator frame of 115 MVA generator.

最近溶接技術や検査技術の進歩とともに、鋼板溶接主軸に替りつつ ある。すでに立軸かさ形機では 31.7 MVA 200 rpm 機に, 普通形構 造では 89 MVA 514 rpm 機, スパイダシャフト では立軸 115 MVA 機の ほか横軸 72 MVA 機などに適用, 製作されている。これら溶接主 軸の採用は,主軸重量の低減のみならず,輸送制限問題の解決策と しても開光をあびているものである。

#### (b) 固定子

発電機自身および水車もしくは ポップ に起因する振動を, 極力抑 制し静かな運転を行なうためには,回転子自体の剛性確保や安定性 を図るほかに,固定子わくや ブラケット を含めた支持部の剛性につい ても,慎重な考慮を払わねばならない。当社では, 去る昭和 39 年 ごろよりこの問題の解明に着手し, 数々の プラスチックモデル 製作を含 め種々の試験研究を行ない,剛性計算法を確立した。図3.2 に固 定子わくの プラスチックモデル の一例を示す。 この研究成果をもとに最 少重量で最大の剛性を持つ強固な固定子わくの設計製作が可能とな り, 100 MVA 発電電動機その他に適用され好成績を得ている。

固定子 コイル 絶縁については, 業界に先がけ合成樹脂絶縁(商品 名 ダイヤラスティック 絶縁)を昭和 28 年に初めて水車発電機に採用して 以来, 延べ約 630万 kVA の水車発電機を製作または製作中である。 絶縁性能の確認試験として,先に過酷な ヒートサイクル による強制劣化 試験を実施し,予期どおりの好結果を得その成果を発表した<sup>(4)</sup>。そ の後も引続き性能改善をめざし,総合的な開発研究を実施中である。

固定子 コイルエンドの支持には、従来の絶縁スペーサに代わって エポキ シレジンを含浸した半硬化状態の フェルト(ポリエステル 繊維)を使用して いる。これを変形圧縮して所定の空げき(隙)部にそう入し、その復 元力を利用して空げきを埋め、レジンを硬化させて所要の強度を得る ものである。この方法によって巻線作業の労力と時間が大幅に削減 され、作業が簡略化された。

コイル接続にはろう付が普及してきた。機械的接着強度にすぐれた この方法は、コイルエンドで構成素線個々の接続を可能にし、このた め新しい転位法も実施可能となった。もちろん ハンダによる接続も、 コイルエンドの構造によっては便利な場合もある。当面両者の併用が続 くであろうが、フルコイルの適用の多い水車発電機では、今後ろう付 接続が一般化してゆくものと予想される。

#### (c) 軸 受

高揚程大容量の揚水発電所の建設計画に伴い,軸受とくに スラスト 軸受の設計仕様は格段にきびしいものとなってきた。従来の設計常



図 3.3 3,000 トンスラスト 軸受試験装置 3,000 ton thrust bearing testing facilities.

識を2ないし3倍も上回る高面圧・高周速の スラスト軸受が要求され ている。さらに条件をきびしくしているものは可逆回転の要求であ る。これまでに 810 トーン 277 rpm および 1,430 トーン 187 rpm 等の可逆 運転可能の スラスト 軸受が製作または製作中であるが, これらの設計 常識を大幅に打ち破る必要に迫られている。当社では先に 3,000ト ンスラスト 試験装置を製作して各種試験を実施し、大容量 スラスト 軸受 設計のための貴重な資料をうることができた。 図 3.3 に 3,000 トン スラスト 試験装置の写真を示す。詳細については別途発表の論文を参 照願いたい。高荷重であるとともに高周速の軸受の最大の問題点は 発生熱損失をいかに低く制限し、かつ発生熱損失をいかにうまく除 去するかにある。このため軸受冷却法の抜本的な解決が必要となる。 現在種々の冷却方式の試験研究を実施中である。一方、案内軸受も 周速 35 m/sec 程度までは 製作済みであるが, 周速 40 ないし 60 m/ sec 程度となると極端な油のあわ立ちが発生し、 スラスト 軸受潤滑に も悪影響を 与えることが 予想される。 このため 油流を できるだけ スムーズにするような構造上のくふうが必要である。

(d) 発電電動機起動方式

揚水発電所の電動機起動方式としては,発電電動機の磁極頭部に 設けられた制動巻線による自己起動方式が,最も簡便である。しか しながらこの方式は,主として制動巻線の熱容量により適用制限を 受ける弱点がある。また制動巻線の熱容量を大きくするために,多 くの制動巻線を埋込むと,主磁気回路の磁束通過を阻害し,また制 動巻線回路の等価抵抗が減少して起動頭初の低速域の発生トルクが 減少する。このため低速域での加速が遅れ,ますます制動巻線の過 熱を促進することになる。当社ではこれらの欠点を取除き,200 MVA 級の発電電動機にも制動巻線起動法が適用可能となるよう, 材質および構造両面について研究開発中である。図3.4 に,この 新構造の制動巻線を適用した場合の起動特性の計算例を示す。

静止時より起動用の発電機と、起動される電動機とを電気的に接続しておき、起動用発電機の発生 トルクに同期させて起動を行なう 低周波同期起動<sup>(5)</sup>は、すでに東京電力の安曇発電所(発電機容量 111 MVA,電動機容量 109 MVA,発電機1台で電動機2台同時起 動可能)その他に適用されている。この方式の難点は、特に起動頭 初の低周波数域での機器保護がやや困難なことであろう。また超低 速域定格(速度の1ないし3%程度)における発電機および電動機 両者の同期化の可否が、本起動法による起動の成否を左右する重要 な条件である。当社では、起動特性解析用の シミュレーションプログラムを 完備して万全を期している。 図 3.5 に起動特性の計算結果の例を 示す。この起動方式は、起動用発電機として利用できる近接の発電 専用機、あるいは発電所がある場合きわめて有効な起動法である。

制動巻線起動と,低周波同期起動を混合した非同期・同期起動法 は,両者のそれぞれの欠点を相補う方式として再考の余地のある起



図 3.4 新形制動巻線起動特性: Starting characteristics of new type damper winding.

1G1M PROCRAM STUDY V CASE 1 (T=0.314)

	sec	トルシ	羌軍俄速度	電動機速度
		т	G	М
N	0.	0.3140	0.0	0.
	0,100	0,3140	0 0.00358	0.00004
	0.200	0.3140	0 0,00659	0,00034
1 Protection and the set of T	0.300	0,3140	0 0,00865	0.00109
一元电微速度了	0,400	0.3140	0 0.00991	0.00228
1 \ 7	0,600	0 3140	0 0.01057	0.00507
T \T	0.700	0 3140	0 0.01015	0.00519
1 \/ T	0.800	0.3140	0.00911	0.00592
T	0,900	0.3140	0 0.00740	0.00727
	1.000	0,3140	0 0,00512	0.00732
T	1,100	0,3140	0.00265	0,00719
コー 軍動機速度こ	1,200	0,3140	0,00054	0.00693
<u>_</u>	1,300	0,3140	0.00051	0.00654
<u> </u>	1,400	0.3140	0 -0.00002	0.00596
	1.500	0,3140	0.00189	0,00519
+ N +	1,600	0,3140	0.00443	0.00439
	1.700	0,3140	0,00658	0.00379
	1,800	0,3140	0.00762	0.00354
÷	1.900	0,3140	0.00739	0.00366
+ V +	2,000	0.3140	0.00622	0.00407
i A tr	2.100	0.3140	0.0046/	0.00461
in ÷	2,200	0,3140	0.00325	0.00516
IL T	2,300	0.3140	0.00237	0.00562
i\	2,400	0.3140	0,00231	0.00091
I V T	2.600	0 3140	0.00313	0,00002
т т	2.700	0.3140	0.00628	0.00595
1 <b>N</b> T	2,800	0.3140	0.00767	0.00602
· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	2,900	0.31400	0.00845	0.00529
	2,000	0.31400	0.00855	0,00679
<u></u>	3.100	0,31400	0,00815	0.00745
! <b>N</b> - 1	3,200	0.31400	0.00755	0.00819
	3,300	0,31400	0,00707	0.00894
1 11 1	3,400	0,31400	0,00698	0.00962
	3,500	0.31400	0.00744	0,01019
i N +	3,600	0.31400	0.00846	0.01067
Т		0.3140	0.00987	0.01111
	3,800	0.3140	0.01142	0.01157
	3,500	0 31400	0.01286	0.01214
<u> </u>	4 100	D. 31400	0.01408	0.01262
T	4.200	0.3140	0.01575	0.01450
тТ	4,300	0,31400	0.01636	0.01540
I T	4,400	0.31400	0.01686	0.01629
T	4,500	0.31400	0.01724	0,01716
· · · · ·	4,600	0,31400	0.01750	0.01804
T	4,700	0.31400	0.01773	0,01893
1 <b>N</b> <u>T</u>	4,800	0,31400	0.01808	0.01984
<u> </u>	4.900	0,31400	0.01872	0.02072
, ң т	5,000	0,31400	0.01982	0.02153

図 3.5 低周波同期起動の計算結果例 Sample of computer output of synchronous starting.

動法である。

米国 Oroville 発電所では、同じ発電所に設置される 115 MVA 発 電電動機を、123 MVA 発電専用機により非同期・同期起動法によ り起動している。すなわち 50% 速度までは制動巻線起動、50% 速 度以上では低周波同期起動としている例がある。

直結誘導電動機起動法は、制動巻線起動が困難な大容量機に適用 される。同期並列は誘導電動機の速度制御により行なわれるのが普 通であるが、起動用液体抵抗器の据付 スペース が相当大きくなること、 および常規運転中常に直結誘導電動機を ァイドル運転せねばならない などの難点がある。すでに同期並列時の誘導電動機の二次抵抗制御 による自動せん速については、シミュレーションプログラム により検討済で ある。本方式の場合誘導電動機の取付位置および軸受配置について は、軸振れ抑制の観点より慎重に検討する必要がある。

(e) 通風冷却

高速大容量機となれば、鉄心長をいくらに制限すべきかの問題が 生ずる。これも結局は通風冷却をいかに有効に行なうかの問題とか らんでいる。当社では立軸111 MVA 機,100 MVA 機および横軸 60 MVA 機など鉄心長の長い発電機(いずれも約2.5 m 前後)につ いて、ステータ鉄心各部の風圧風量分布の測定を実施した。この結果 突極磁極の ファン効果が、予想以上に強力であることが確認された。 すなわち磁極による風圧発生は、鉄心の軸長方向中央部において最 も大きく、鉄心両端において低くなるような分布を示す。したがっ て鉄心両端部において、所要の風圧を確保するために ロータ両端部 に設けた ファンが必要となる。言いかえれば水車発電機は、巨大な 効率の悪い ファンを自ら回転させながら通風冷却を行なっている機 械であると言えよう。特に可逆回転式の発電電動機では、最も効率 の悪い両回転式の遠心ファンを設置せねばならない。

 この通風冷却問題を一挙に解決し、機械を小形化する最も有効な

 方法は水冷却である。すでに >> 連で、588

 第速度 電動機速度
 MVA、スウエーデン で 225 MVA、スイス で 86

 0
 MVAの水車発電機でそれぞれ実用化され

 100058
 0.0004

 100059
 0.0004

 100059
 0.0004

 100059
 0.0004

 100059
 0.0004

 100059
 0.0004

 100059
 0.0004

 100059
 0.0004

 100050
 0.0004

 100050
 0.0004

 100050
 0.0004

 100050
 0.0004

 100050
 0.0004

 100050
 0.00050

 100050
 0.00050

 100051
 0.00050

 100052
 0.00070

 100052
 0.00070

 100052
 0.00070

 100052
 0.00054

 100052
 0.00054

 100052
 0.00054

 100052
 0.00054

 100052
 0.00054

 100052
 0.00054

 100052
 0.00054

 100052
 0.00055

 100052

(f) その他

設計業務への電子計算機の適用はすっか り日常化し、自動設計,特性の解析および 算出,所要資材量の算出,各種製図計算の 機械化などが行なわれている。今後ともそ の利用はますます高度化されてゆくものと 思われる。

一方水車発電機の試験法についても,新 技術が導入されつつある。特に高性能の流 量計の開発により,水力発電所現地におい



図 3.6 リッグ励磁試験中の固定子 Ring magnetization test of the stator.

て実負荷運転時の発電機効率測定を, カロリー 法により実施すること が可能となったことは特筆に値いするものと言えよう。現在大部分 の水車発電機に容量の大小にかかわらず,工場試験を実施している。 機器仕様の合理化とともに,発電機の工場試験の廃止は, 製作 コス トを大きく下げうる要素として十分検討されるべき問題であると思 われる。工場試験の廃止は,工場における発電機の全組立を不要と する。これに伴って分割輸送のための複雑な合わせ目の加工や構造 が,現地溶接の大幅な採用が可能となることにより省略できる利点 もある。構想のみであろうが フレーム なしの ステータ の アイデア も生き る。合理化への一つの大きな課題であろう。

一方工場試験を廃止した場合,構成部品について可能な限り試験 を実施し,現地における発電機性能を事前に保証することもできる。 その一例として,鉄心積層を完了した固定子のリッグ励磁試験があ る。これは一円にされた固定子にケーブルをまき,商用周波数の励磁 により鉄損 ヒートランを実施し,積層鉄心の異常を検査する方法であ る。図3.6 にリッグ励磁試験中の重量約200トンの固定子を示す。

3.2 サイリスタ励磁装置

水車発電機の励磁方式にはまだ直流回転励磁機が多いが,最近は 中大容量水車発電機に サイリスタ 励磁方式が採用されるようになった。

これは回転励磁機にくらべて保守・点検が容易であり,建屋が小 さくて済むうえ,他の静止励磁方式にくらべても経済的かつ応答が 速く,負荷しゃ断時の速度上昇の大きな水車発電機の電圧制御に適 している等の利点があり,さらに最近大容量 サイリスタの開発ととも に,信頼性の確認がなされ,また発電機データの集積および研究に より水車発電機の諸特性が解明されてきたからである。ここではサ イリスタ 励磁方式についてその概要を述べ,実績資料の一部をご参考 までに紹介したい。

(a) サイリスタ 励磁装置の構成

図 3.7 は当社が標準として採用している サイリスタ 励磁装置の 回 路構成を示す。サイリスタ 励磁装置は励磁電源 トランス,サイリスタ および シリコン 整流器から成る整流回路,サイリスタ 点弧角制御回路(ゲート 制 御回路),発電機誤差電圧を検出して サイリスタ 点弧角制御回路の入 力として与える AVR 回路および界磁電圧を調整する手動運転回路 から成る。

## (b) 励磁電源 トランス

サイリスタ 励磁電源 トラッス は図 3.7 に示すように発電機端子から取るのを標準としている。トラッスの二次電圧は励磁系速応度(R・R)



図 3.7 サイリスタ 励磁装置回路図 Circuit diagram of the thyrister excitation system.

により決定されている。

#### (c) 初期励磁

発電機電圧確立前は励磁電源がないので、 初期励磁を与えて サイ リスタ 点弧角制御回路が正常な動作をするのに十分な電圧に なるま で発電機電圧を上げてやる必要がある。初期励磁は界磁しゃ断器を 閉じたまま回路速度が定格の約 80% 程度から与えられる。サイリスタ 励磁装置が動作を始めて出力電圧が初期励磁電圧よりも高くなる と初期励磁電流は零になる。そして発電機電圧が 100% になると AVR が働きサイリスタ励磁装置の出力電圧が零近くにまで下げられ るので、ごく短時間ではあるが、初期励磁回路に界磁電流の大部分 が流れる。したがって初期励磁回路は発電機電圧が 100% になる以 前すなわち初期励磁電流が零である期間に切離すのがよい。

(d) 整流回路

サイリスタ 励磁装置には、単相または三相全波 ブリッジ 整流方式を採用している。サイリスタ の構成としては、ブリッジ の全 アーム に サイリスタ を用いる均一 ブリッジ 式と図 3.8 に示すように、片側 アーム にのみ サ イリスタ を用い、他の側の アーム には シリコン 整流器を用い、直流出力



図 3.8 三相混合ブリッジ回路 Three-phase non-uniform connection rectifier circuit.



Output characteristics of non-uniform connection rectifier circuit.



図 3.10 混合 ジリッジ 回路出力電圧の波形 Sample of output voltage of non-uniform connection rectifier circuit.

端に転流用 ダイオードを備えた混合 ブリッジ式がある。当社は制御が容易で回路構成の簡単な後者を標準として採用している。

図3.9 に混合 ブリッジ 回路の点弧角と出力電流および転流用 ダイオ -ドに流れる電流の関係を示す。混合 ブリッジ 回路では点弧角が 60 度 を越えると,図3.10 に示すように出力電圧に途切れを生ずるが界 磁電流は、そのまま流れ続けようとして出力電圧の途切れた期間だ け転流用 ダイオード に界磁電流が流れる。

(e) 制御回路 (図 3.7 参照)

制御回路は図 3.7 に示すように, 発電機電圧を検出回路で整流 し,基準電圧との誤差電圧を演算 アップA1,A2で増幅し,サイリス タ 点弧角制御回路の入力とする AVR 回路および界磁電圧と手動電 圧設定器 70 E との差電圧を演算 アップA3 で増幅し,サイリスタ 点弧 角制御回路に加え界磁電圧を 70 E の設定電圧に保つ 手動回路 から 成る。AVR 回路使用中は自動追従装置によって手動電圧設定器 70 E が調整されて演算 アップA2 と A3 の出力電圧を 同じ値に保って いる。したがって AVR 運転から手動運転への切換えは系統へ動揺 を与えることなしに行なわれる。

(f) 界磁回路の異常現象と保護

発電機運転中に発電機端子または至近端で三相短絡が生じた場合 には交流側の短絡電流の反作用により,界磁回路に短絡発生直前の 界磁電流の約3倍の界磁電流が流れる。そして発電機端子電圧は低 とんど零になるので,励磁装置の電源はなくなりサイリスタ励磁装置 は転流不能になる。したがって均一ブリッジ回路においては、短絡発 生直前に導通中のサイリスタに上記界磁電流が流れる。また混合ブリ ッジ回路においては転流用 ダイオードに上記界磁電流が流れる。した がってサイリスタまたはダイオードの電流定格を決定する場合には、上 記の条件を十分に考慮しなけたばならない。

異電圧同期投入,2線短絡,脱調の場合には界磁電流が逆転する ことがある。この電流を流す通路がない場合には界磁巻線に異常電 圧を発生するので バリスタ 等の保護装置が必要である。

励磁電源 トランス や発電機 ステータ から界磁回路 に 侵入 す る外雷 サ −ジ や開閉 サージ に対しては, セレンアレスタ や サージアブソーバ 等の保護装 置が必要である。

(g) サイリスタ 励磁装置の実績

図 3.11 および図 3.12 は,昭和 43 年 11 月に運転開始した富 山県庁庄東第一発電所に納入の サイリスタ 励磁装置の試験 データ であ る。



図 3.11 庄東第一 P/S インディシャル 応答試験 Shoto No. 1 P/S no-load indicial response test.



図 3.11 は無負荷 インディシャル 応答,図 3.12 は ガバナ 試験(全負荷しゃ断)の結果である。

発電機および励磁装置の定格は次のとおりである。 発電機 27,400 kVA 60 Hz 11 kV 1,438 A, 150 rpm 励磁装置

```
出力電流(最大): 643 A 連続
            370 V
頂上電圧:
            均一ブリッジ式 3P4S
素子構成 :
冷却方式:
            強制風冷
            発電機端子に電源トランスを接続
電源方式 :
電源 トランス:
            3 × 単相 トランス
            一次 107 kVA 11/\sqrt{3} kV
            二次 2×53kVA 145V
            三次 1 kVA 218/√3 V
            所内 DC バッテリ
初期励磁電源:
```

4. む す び

水車発電機は容量・回転速度の変化範囲が大きい典型的な非標準

機で,製作実績はただちに技術開発にむすびつき,研究試験の成果 とあいまって設計製作の技術向上につながってゆく。表2.1 に示 すように当社の製作経歴はきわめて バラエティ に富んでおり,技術上 の問題点は次々と克服されて,工事はすべて順調な進行をみせてい る。水力発電所機器は従来の範ちゅうを意欲的に破ることにより, 存在価値もまたふえるもので,われわれは数多くの製作経験および 試験研究を通じ,信頼性高く,かつまた経済的な水車発電機の製作 を念願としている次第で,本文が関係者各位のご参考ともなれば幸 いである。

#### 参考文献

- J. H. Walker : Project Data for Hydroelectric Generators, Water Power, march 103 and April 143 (1966)
- (2) 三浦ほか:三菱電機技報 40, No. 11 (昭 41)
- (3) L. D. Anscombe : AC Generators for Hydroelectric Stations, PIEE, 110, No. 7 (1963)
- (4) 原ほか:三菱電機技報,40,1,731 (昭41)
- (5) 森ほか:三菱電機技報 40, 1,673 (昭 41)

UDC 621. 313. 322 : 621. 438

**ガスタービン発電機** 坂井時弘\*・大石紀夫\*\*

# Gas Turbine Generators

Nagasaki Works Tokihiro SAKAI Kôbe Works Norio OISHI

Gas turbines have made rapid development of late, finding their ways in the field of application to power generation on the land by making effective use of a number of their distinctive features. Although generators to be used for gas turbines are substantially the same machines as those of thermal power generation, there is considerable difference in the concept of rated kW from the latter. From the viewpoint of construction they are possessed of a number of different points such as to be turned to a packaged type and a cooling system of taking atmosphere in. This article introduces a part of gas turbine generators built by the Company based on manufacturing results of several units with different points from thermal power machines taken up as a center of description.

#### 1. まえがき

近年 ガスタービンの発達に伴い,発電用に ガスタービンが利用される機 会も,急激に増加した。表1.1 に,当社の納入した ガスタービン 用発 電機の実績を示す。

ガスタービンは当初航空機用に開発され、現在においても航空機に最 も多く用いられているが、その種々の特長を生かして、陸上発電用 にも用いられるようになってきた。たとえば、小形軽量で急速起動 が可能であるので、事業用発電所に増設されて、ピークロード用として 用いられたり、非常用電源(いわゆるブラックアウトスタート用)として 用いられる場合がある。また、蒸気サイクルと組み合わせて、大容量 火力の熱効率の改善をはかり、複合サイクルとして用いられる。自家 用発電においては、ガスタービンの燃料に、気体・液体の多様な燃料が 使用可能であるところから、廃ガス利用などの目的で設置されるこ ともある。海外においては開発途上の国々において、急速な電力需 要の伸びに対処するために用いられており、調相機運転も可能なよ うに計画される場合もある。

ガスタービン発電用の発電機としては、どく小容量の物では減速 ギア を介して、4極または6極の突極機が用いられることもあるが、容 量の大きい物は、2極円筒型回転子の発電機であり、発電機の本質 的な部分は、通常の火力用の物と何ら相違はない。しかし、発電機 の定格 kW の考え方は火力の場合と相当異なり、また、構造的にも パッケージ化・外気吸入冷却方式の採用など種々相違点があるので、 それらの点を中心に ガスタービン 発電機を紹介してゆきたい。

#### 2. ガスタービン

2.1 ガスタービンの原理

ガスタービンは,作動流体としての空気が圧縮・加熱され,その膨張 によって仕事を行なう回転機械である。

最近のガスタービンのほとんどは、オープンサイクルガスタービンであり、多 少の差異はあるが、次の三つの基本的性質をもっている。

- オープンサイクル: 作動流体としての空気は,連続的に新しく大気から吸入され,圧縮される。
  - 内部燃焼: 燃焼は作動流体中で, 連続的に行なわれる。
  - 等圧燃焼: 燃料により熱が与えられる間,作動流体(空気) の圧力は一定である。

ひとくちにオープンサイクルガスタービンと言っても、より高い性能を要求される場合には、やや複雑な熱サイクルとして、再生サイクル,中間

表 1.1 ガスタービン 発電機製作実績 List of gas turbine generators manufactured.

1											4.1. 5.0. 100 0001	··	γ <del></del>					
	納		入		先		容量	電圧	回転数	力惑	基準周囲 洞 町	お動方式	励磁方式	山粉	ガスタービン	XX (## 1411 TC) ->-		140 <b>1</b> 44
							kVA	kV	rpm	. +	°C	10-000 70 20			形 式	咒电假形式	用 遠	園 考
古 -	đ	-97	-++	n		m	20.000	11	2 000	0.05		<b>D</b> . <b>D</b> .						
5. 5	-31	н <u>с</u> ,	<i>,</i> ,				37,000	- 11	3,000	0.85	20	D/E	静止励磁	1	MW-301 G	開放・パッケージ形	非常用	製作中
四[	Ŧ	電	カ	坂		出	36,000	11	3,600	0.9	40	IM	静止励磁	1	MW-301 G	全閉内冷形	複合サイクル用	製作中
中:	部	電	力	名,	火発育	野	35,000	11	3,600	0.9	40	IM	静止励磁	1	MW-301 G	全閉内冷形	ピークロード用	昭和 41 年納入
神			枊	琉耳	電力	公社	21,000	13.8	3,600	0.85	26.7	IM	直 結	2	MW-191 G	開放・バッケージ形		昭和 43 年納入
北流	i il	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	カ	+		節	21.000	11	3 000	0.95	0	134	195 J. EL 794		MIL 101 C	MM Jula A Street		
							_,,		0,000	0.75	Ŭ	11/1	HP LC JOJ SSK	2	MW-191G	開放・パッゲーシ形	非 常 用	昭和 44 年附入
日本	て車	<b>全</b>	屆	苫	小	牧	21,000	6.6	3,000	0.953	7	D/E	静止励磁	1	MW-191 G	開放・パッケージ形	ピークロード用	製作中
丸(	住	製	紙	л	之	江	19,400	3.45	3,600	0.85	40	IM	ブラシレス	1	MW-191 G	全閉内冷形	複合サイクル用	昭和 42 年納入
*	÷	シ	Ħ	С	F	Е	17,500	13,8	3,600	0.8	35	D/E	直 結	4	MW-191 G	開放・バッケージ形	事 業 用	昭和 42 年納入
网页	西	電	カ	姫	路	Π	16,250	6.6	3,600	0.8	35	AT	<b>静止励磁</b>	1	MFT-4	開放・パッケージ形	非 常 用	昭和 43 年納入
网间	西	電	カ	海		南	16,250	6.6	3,600	0.8	35	AT	静止励磁	1	MFT-4	開放・バッケージ形	非常用	製作中
日本:	カー	-バイ	ኘ	魚		洚	15,625	3.3	3,600	0.96	40	ST ·	ブラシレス	1	MW-171 G	全閉内冷形	自家発用	昭和 40 年納入
旭 ;	Ħ	ラ	z	千		菜	12,500	6.3	3,000	0.8	40	ST	蒂止 励 磁	1	MW-171 G	全閉内冷形	自家発用	昭和 37 年納入
東 コ	疧	電	カ	新	束	京	8,825	3.3	1,000	0.85	40	D/E	<b>静止励磁</b>	1	MW-101 G	開放・パッケージ形	非常用	昭和 42 年納入 6 振樽
24.2							1									I		~ 15019A

注) 起動方式の D/E はディーゼルエンジン, IM は誘導電動機, AT は空気タービン, ST は蒸気タービンを示す







図 2.1 単純 オーブンサイクル ガスタービン の構造と原理 Construction and principle of simple open cycle gas-turbine power plant.

冷却サイクル,再熱サイクル,これらを組み合わせた複合サイクルなどが 考えられるが,本節では,単純オープっサイクルの原理・特長について のみ記してみたい。

単純 オープンサイクル ガスタービン は,図2.1 に示されるような三つの 部分で構成される。 Aのコンプレッサー により大気は タービン 入口圧力 まで圧縮され (1-2),コンプレッサー で圧縮された空気は、この空気の 一部を用いて、Bの燃焼室内で燃料を燃焼させることにより、適当 な温度・比容積をうる (2-3)。

Cのタービンは、燃焼室Bで作られた高温空気(作動ガス)が大気 圧まで膨張し、その間に発生する仕事が機械的出力になるところで あり、この仕事の一部はコンプレッサー(A)を回すために使われ、残り が有効出力すなわち負荷(発電機)に供給される機械仕事となる (3-4)。

このようなオープンサイクルガスタービンは、外気温度、大気圧力、吸気 および排気の抵抗、燃料の種類および発熱量、ガスタービン入口ガス温 度、圧縮比等により、その出力・熱効率が左右されるので、発電機 (負荷) はそれらの各種条件が定まったうえで、そのサイズが決定さ れる。

以上のようなオーランサイクルガスタービンの形式に対して、全く同一原 理であるが、航空機用 ジェットエンジン をガス 発生装置として用い、こ れに フリータービン(推力を回転力に変えるもの)を組み合わせること を特長とする、ジェットエンジン利用形のガスタービン発電機が、最近多数 使用されるようになった。これは、起動に要する時間がきわめて何 い(約3分以内)ため、火力発電所等の非常用電源として適性が高い ことや、小形軽量のため、数台の ジェットエンジン を組み合わせて、大 出力(たとえば128,000 kW 出力機の製作例が ァメリカにある)を出 すことができるという利点をもっている。麦1.1 に示す関西電力 姫路第二発電所に建設された 16,250 kVA 機は、この ジェットエンジン 式ガスタービン発電機で、アメリカの ララットアンドホイットニー 社製の GG4



General layout of gas-turbine generator plant.

エンジンと, 三菱重工製の フリータービン を組み合わせたものである。関 西電力 海南発電所向け 16,250 kVA 機も同様に ジェット 式を採用し, 目下鋭意製作中である。

図 2.3 は三菱重工製各 ガスタービン 形式,および ジェットエンジン 式に 対する ガスタービン 発電機系の配列例を示す。

#### 2.2 ガスタービンの起動装置

ガスタービン にしても、ジェットエンジン にしても、 自力での起動が不可 能であるため、何らかの起動装置が必要となる。普通考えられる起 動装置としては、

- (1) รี่ง-ชี่มรอย่อ
- (2) 巻線形誘導電動機
- (3) かご形誘導電動機とトルクコンバータの組み合わせ
  - (4) 蒸気 タービン
- (5) 圧縮空気を用いた エアタービン

などがある。ピークロード用発電 セット の場合には所内に電源があるの で、(2)、(3)が用いられるが、発電所の ブラックアウト防止用のため の非常用発電 セット としては、(1)が適している。また、蒸気が利 用できる場合には(4)が用いられる。 ジェットエンジン の場合には所要 トルク が小さいので、(5)が用いられる。 これらの起動装置によって、ガスタービンが着火し、自力で加速しう る状態に至った場合には、エアクラッチなどを使用して、これらの起動 装置を切りはなす必要がある。

なお,起動装置については、ガスタービンのスピン運転(燃料を供給 しない状態での運転),および,万一の起動失敗を考慮した連続繰 返し起動などに対する考慮をはらう必要があるので,誘導電動機の 場合には,標準の電動機と異なった体格のものとなることに注意せ ねばならない。

2.3 ガスタービンの利点

ガスタービンは次のようなすぐれた特質を有している。

(1) 小形・軽量であるため, 据付面積も少なくてすみ, 建設費 が安価となる。

(2) 起動・停止がきわめて短時間内で行なえるうえ、停止中の 熱損失がまったくない。起動・停止時の燃料消費量もわずかである。

(3) その熱 サイクル が蒸気 タービン に 比べて 比較的単純であるか ら、遠隔操作も容易であるし、全自動化発電所・無人発電所の建設 も可能である。

(4) 天然 ガス や軽油を燃料として用いれば、大気汚染の心配がない。

(5) 冷却水消費量が少なく,また完全に不要とすることもでき るため,蒸気 タービンプラントのような高価な純水装置や,大がかりな 冷却水設備が不要となる。(したがって ガスタービン 発電機には,冷却 水を用いない,いわゆる"外気吸入方式"の採用が好ましいことが 多い。)

(6) 効率は蒸気 タービンよりやや低いが、利用率が比較的低い場合には、それほど問題とはならない。

(7) 建設工期が短く,また補修・点検のための期間が非常に短い。

以上のような ガスタービン の特質を生かした,ガスタービン 発電設備は 次のような用途に好適である。

(1) ピークロード用としての発電設備

(2) 非常時起動電源設備

(3) 大容量 ベースロード 発電所として, 蒸気 タービンプラント と組み 合わせた複合 サイクル 発電所

(4) 中容量の離島発電所、および負荷調整用発電所として、排 ガスポイラ・蒸気 タービン と組み合わせた ガスタービン 発電所

(5) ガスタービン燃料に適した工場副産物がある工場の発電設備

(6) 工場 プラット で必要蒸気量が必要電力に比べて少ない場合, 排 ガスボイラ と組み合わせた ガスタービッ 発電設備

(7) 既設老朽火力の トッププラット として ガスタービッ を追加設備す る場合

#### 3. ガスタービン用 空気冷却発電機

ガスタービンの特長・信頼性が広く認識され,各種用途に応じてその 需要は急激に増大している。特にガスタービン用空気冷却発電機は, 事業用発電所のピークロード用・非常用電源として有利であり,また, ガスタービン燃料に適した工場廃ガス利用の自家発電設備,および複合 サイクル用として中小容量の発電設備にも適しており,これらの需要 が多い。表1.1にみられるように,旭ガラス(千葉)向け12,500 kVA 機は,ガスタービン用空気冷却発電機としての1号機であって,1962 年(昭和37年)の納入以来,好調な運転を継続している。ガスタービン 用空気冷却発電機は,四国電力(坂出)向け,36,000 kVA 機等を含 め, その製作・納入台数は 19 台, 合計容量は 350,000 kVA に達している。

ガスタービッ 用空気冷却発電機は,通常の火力用空気冷却発電機と本 質的に異なるものではないが,開放形・パッケージ形式の採用などに より,その構造・材料・設計定格出力の決定などに特別の考慮を払 っているので,以下に通常の空気冷却発電機,および水素冷却発電 機との相違点を述べる。

3.1 パッケージ形式の採用

パッケージ 形は、一体形の屋外 ハウジング 中に、 ガスタービン・発電機・ 励磁装置・各種制御装置・補機類・バッテリ など、発電に必要なすべ ての装置を内蔵した方式であり、外部からの冷却水や補機用電源の 供給をいっさい必要としない独立した プラント であるから、本体のみ にとどまらず プラント 全体としての標準化がなされている。したがっ て、 この パッケージ 形 ガスタービン 発電機は、従来の屋内形の ガスタービン 発電機 プラント (コンベンショナル 形と言われる) と比べて次のような特長 をもっている。

(1) プラント全体としての建設費が安くなる。

(2) 据付が迅速・簡単にでき、現地で調達する資材費・人件費 などの据付費用も少なくてすむ。

(3) 所要敷地面積が少なくてよく、建屋は不要となる。

(4) 外部電源・冷却水を必要としない プラントの計画が可能であり,特に水の入手困難な場所にも設置できる。

(5) 将来の移設も考慮して設計しており、必要に応じて設置場 所を移動することができる。

(6) 遠隔無人操作 プラット としてまとめやすい。

発電機は空気冷却器を用いない。いわゆる"開放型外気吸入方式" をパッケージ形に採用するが、湿気や有害 ガスの侵入に対する絶縁劣 化および腐食の防止対策,また騒音防止対策などには、とくに細か い注意が払われている。

**表**1.1 に示すようにパッケージ形ガスタービン発電機は、すでに納入 したメキシコ電力庁向け 17,500 kVA 機4台をはじめ、製作中の日本 軽金属(苫小牧)向け 21,000 kVA 機等を含め計 11台に達している。 図 3.1 はメキシコ電力庁向け 17,500 kVA 機の機器配置図であるが、 パッケージハウス は左から制御パッケージ、発電機パッケージ、ガスタービン本体 および直結補機パッケージ、独立補機パッケージから成っている。 制御 パッケージは、騒音と酷暑から運転員を保護するように、防音装置・ 冷房装置を備えている。発電機は直接に外気を吸入する方式とした が、吸入部にはフィルターを設け、また、空気吸入部 ダクトおよび空 気吐出口には サイレンサーを設け騒音防止を行なっている。 ガスタービン 本体および補機パッケージ部は、タービン 運転中室内の温度を適当に保 つために十分な換気を行なうとともに、大災報知器および消火設備 をおいて、万一の火災事故に備えている。本 プラントはパッケージ形の 1号機である。

図 3.4 は製作中の関西電力(海南)向け 16,250 kVA, ジェットエン ジン式 ガスタービン発電機 プラントの機器配置図である。 これは前述の ように、ジェットエンジンの急速起動特性を生かして、緊急時の電源確 保用に使用されるもので、すでに納入した関西電力姫路第2発電所 向け 16,250 kVA と同一タイプのものである。本 プラントは、ガスタービ ンパッケージ・発電機 パッケージ からなり、 思いきった コ ンパット 化が図られている。

北海道電力(七飯)向けおよび日本軽金属(苫小牧)向け 21,000 kVA 機は、寒冷地向けのパッケージ形 ガスタービン 発電機で、積雪・低



Dガスタービン 排気穴
<b>D</b> 補機歯車
B記動用ディーゼル
9燃料油制御装置
⑩燃料ガス制御装置
②噴霧および掃除空気冷却器
20クラッチ空気圧縮機
③制御空気圧縮機
劉油ろ器
勁圧力スイッチ およびゲージキャビネット
週バッテリ
劉補機モータ制御室
29噴霧空気圧縮機およびタンク
③ラジエータ
國排気サイレンサ

図 3.1 パッケージ形 ガスタービン 機器配置図 General layout of packaged type gas-turbine plant.



図 3.2 工場試験中の メキシコ 電力庁向け 17,500 kVA 機 17,500 kVA gas-turbine generator for Mexico CFE.



図 3.3 メキシコ 電力庁向け パッケージ 形 プラント の現地据付外観 Exterior view of packaged type gas-turbine generator plant for Mexico CFE.

①ジェットタービン吸気穴
 ②消音器
 ③ジェットタービン
 ④フリータービン
 ⑤排気室
 ⑥排気室
 ⑧都気サイレンサ

⑦排気筒
 ⑥発電機
 御発電機
 ゆ発電機
 ペカ空気吸入口
 ●発電機
 ゆ発電機
 空気止出穴
 ・ニング装置
 ・シグ室
 ・シグ室

図 3.4 ジェットエンジン式 ガスタービン 機器配置図 General layout of jet engine type gas-turbine plant.

気温に対して考慮を払っており,発電機排気口部にダンパーを設け, 外気温が極度に低い場合,パッケージハウス内室温および吸気温度を一 定限度に保ち, 潤滑油の保護, 異常変形を防止するために,排気熱 風の一部をパッケージ内にフィードバックするようにしており,また室温 自動調節 ヒータを設けている。

琉球電力(沖縄)向け 21,000 kVA 機は居住地域に近いところに 設置されるため, 騒音に対する規制がきびしく,60 m 離れた地点 において 50 ホン以下として計画されている。このため,パッケージハウ ス 壁は効果的な防音構造を採用し,発電機吸気はパッケージ 内吸気と して、さらに消音 ダクトを吸気口に取付け、 また、排気口に対して も、十分に消音効果をもつサイレンサを取付けた騒音規制条件により、 このような方式を本機以後のものには採用している。 図 3.5 は工 場試験中の琉球電力機である。

#### 3.2 定格出力の決定

ガスタービンの出力は,使用燃料・外気温度によって決定される。す なわち,発熱量が高い気体燃料・ナフサ・灯油・軽油等の燃料に対し, C重油あるいは発熱量の低い気体燃料ではガスタービンの性能が変わ り,効率が低くなる。また,外気温度すなわち圧縮機入口温度が変



図 3.5 工場試験中の沖縄琉球電力向け 21,000 kVA 機 21,000 kVA gas-turbine generator for Ryukyu electric power Co.

化すれば圧縮機の吸込空気量が変わり, ガスタービンの出力ならびに効率が変化する。一般に外気温度が1℃低下すると出力は約1%上昇する。以上のような条件からガスタービン出力が決定されたら, この出力に見合う発電機出力を決定するが, 空気冷却器付ガスタービン用発電機は,入口空気温度が一定(一般に 40℃)であるので,発電機出力はガスタービンの最大出力に一致させる。

開放形外気吸入式の ガスタービン 用発電機では, 発電機入口空気温 度は外気温度であり,出力の決定においては,ガスタービン最大出力と その基準外気温度を考慮しなければならない。すなわち,JEC にお いて入口空気温度 40°C として発電機各部温度上昇値を定めるが, 仮に ガスタービン最大出力点の基準外気温度を 10°C とすると,発電機 入口空気温度も 10°C であり,各部温度上昇値はさらに 30°C 大き く設計してよいので,出力が同じ空気冷却器付発電機よりも機械の サイズを小さくしてよいことになる。

外気温が極度に低い場合には 3.1 節 で述べたように、 温度調節  $\vec{s}_{\nu}$ パ および自動調節  $t_{-9}$ を設け、室内の温度を  $5^{\circ}$ C 一定としてお り、  $5^{\circ}$ C 以下を基準外気吸入温度とする  $\vec{1}_{29}$ -ビッと結合する開放 形発電機は、吸気温度  $5^{\circ}$ C として出力を決定している。以上から、  $\vec{1}_{29}$ -ビップラットが寒冷地に有利なこともわかる。

図 3.6 は発電機出力決定の一例である。本例では、ガスタービン は 大気温度 5℃として、その出力を決定し、との出力に見合う発電機 定格出力を決定し、発電機 サイズを決めている。本図に示すように、 ガスタービンと発電機の大気温度に対する 出力曲線の傾向は 一般に 異 なっている。

#### 3.3 冷却水

パッケージ形 ガスタービン 発電機に、 冷却水を必要としない開放形外気 吸入方式を発電機に採用していることは前述のとおりであるが、 さ らに潤滑油の冷却も直接空気によって行なわれる。 油対空気 (Oilto-air) 式の屋外形 ラジェータが採用され、冷却水を完全に不要として いる。

#### 3.4 騒音の制限

パッケージ形においては、ガスタービン駆動・屋外設置・発電機は外気 吸入方式という条件により、プラントにはきびしい騒音規制を要求さ れる場合が多い。発電機のおもな騒音源は吸気口音・排気口音・発 電機フレーム透過音・励磁機音であるが、これらの騒音性質について はすでに十分な解析をおこなっており、その性質に応じて効果的な 防音対策を施している。吸排気口には30 ホン以上の消音効果をもつ



図 3.6 ガスタービン 発電機 出力一大気温度の関係 (例) Industrial gas turbine-generator capability versus ambient temperature.





吸気 ダクト、サイレンサを設けており、発電機 フレーム 透過音・励磁機音 は吸排気口音に比べて小さいので、パッケージハウス 自体を消音効果の あるものとして、外部に伝ばしないよう極力防音している。さらに、 吸気は パッケージハウス 内吸気として、きびしい騒音規制に対処してい る。パッケージ形 ブラント においては、設計上・公害対策上、および経 済的見地から, 騒音規制目標値を音源の中心より 100 m 地点で 60 ポ ッ (JIS, A 特性) 以下として騒音対策をおこなっているが、3.1 節で述べた琉球電力機のように、60 m 地点で 50 ポン 以下というよ うなきびしい規制値に対しては、特殊な設計として問題を解決して いる。

図 3.7 に騒音実測例を示す。測定 データは発電機単体を、工場内 で テスト して得られたものであり、 発電機の吸・排気口入口で、そ れぞれ サイレンサ を取付けた場合と サイレンサ なしの場合に騒音を実測 したものである。 サイレンサ なしの場合, 吸気口騒音は 1,000~2,000 Hz 周波教成分をピークとし、 排気口は 125 Hz 周波教成分をピーク とする周波教特性であることがわかる。この騒音特性を考慮して、 サイレンサを選び、パッケージより 60 m 点の規制騒音レベル を満足させ ることができた。本例はもっとも、きびしい騒音規制の場合であり、 騒音防止対策に要する費用が大きく、経済的に不利であったが、経 済的に制約されないなら、騒音低減は容易に成果を得られることを 示す一例でもあろう。

#### 3.5 ブラシレス励磁機の採用

パッケージ 形 ガスタービン 発電機は コンパクト 化の必要上,発電機の軸方 向寸法がもっとも小さい静止励磁方式が採用されることが多いが, これは ブラシ 回りの保守点検が必要であり,また有害 ガス ふんい気 の場合,スリップリングの腐食,荒損等があり発電機を運転不能とする 場合もある。したがって,ブラシ,スリップリングのない ブラシレス 励磁方 式は,無人化発電所とか,有害 ガス ふんい気に設置される発電機な どに適している。

ブラシレスタービン 発電機としては、国内第1号機である ガスタービン 駆 動の日本 カーバイド (魚津) 納め 15,625 kVA 機は、昭和40年10月 の運転開始以来現在に至るまで無事故運転を続けており、その信頼



図 3.8 丸住製紙 (川之江) 納め 19,400 kVA ブラシレス 方式 ガスタービン 発電機

19,400 kVA brush-less gas-turbine generator for Maruzumi Paper Co.



図 3.9 ブラシレス 励磁装置図(回転整流器 ホイール および 交流励磁機回転子) Brushless excitation apparatus.



図 3.10 ブラシレス 励磁機断面図 Cross section of brush-less exciter.

性が高く評価されている。そのあらわれとして、この方式の タービン 発電機の受注が相次ぎ、現在まで、16 台もの タービン 発電機を納入ま たは製作中である。 パッケージ 形 ガスタービン 発電 プラント に対しても、 さらに コンパクト 化することにより、 ブラシレス 励磁方式の需要はいっ そうの増加をたどるであろう。

図 3.8 は丸住製紙(川之江) 納め 19,400 kVA ブラシレス 励磁方式の ガスタービン 発電機を示す。図 3.9 は ブラシレス 励磁装置図,図 3.10 は ブラシレス 励磁機構造断面図を示す。

3.6 非常用発電機の特性について

非常用発電機(ブラックアウトスタート用)では, 系統全停時において, 主要な補機類を自力で起動し,発電所全体を再起動するという重大 な使命をもっているから,その特性については慎重な考慮が必要と なる。一般に新鋭火力発電所内の重要負荷中で最大の起動電流を与 えるものは,給水ポップとか, M-G 形励磁機とかを駆動するかご形 誘導電動機であるが,これらの起動時における電圧降下が,すでに 運転に入っている他の誘導電動機に対しても悪い影響(リレー・コンタ クタのドロップアウトなど)を与えないように考慮を払って設計する必 要がある。

発電機端子で起こる電圧降下は、モータの体格と特性、発電機のリ  $r_{29223}$ と湿渡時定数、発電機に使用されている励磁系の応答度、 およびモータと発電機の間に接続される外部 -12--9223などによっ て左右される。すなわち、モータ回転子の大きな拘束電流、高内部リ  $r_{29223}$ 、および高外部 リ $r_{29232}$ はモータ端子で起こる電圧降下を 増加させるので、十分にモータ特性と体格を検討する必要がある。 また、発電機 リ $r_{29223}$ は電圧降下の大きさを左右し、発電機時定 数は回復時間を左右するので、これらを十分小さな値に設計しなけ ればならない。発電機の励磁系は、降下した電圧を急速に回復させ るために、高い応答度が要求されるが、ブラシレス励磁方式および複 巻自励方式は、通常の火力発電所のブラックアウトスタートの条件を十分 に処理できる。変圧器や -5ル で代表される発電機とモータ間の外 部 -2--323 も、電圧降下を防ぐため、できるだけ小さくすること が望ましい。

図 3.11 は2台の異なった特性の発電機が同じモータを起動する 場合の電圧応答曲線を示し,発電機 リアクタンス と過渡時定数の効果 を示す。

#### 3.7 構造・材料・その他

ガスタービン 用発電機は 急速起動 および 急速負荷印加を特長とする



図 3.11 10,000 IP 起動 モータ に対する 28,000 kVA 発電機の 電圧応答曲線

(Iの発電機 Xd=175 %, Xd'=23 %, Tdo'=5.5 s) IIの発電機 Xd=227 %, Xd'=45 %, Tdo'=7.5 s) Voltage response with different 28,000 kVA generators, starting motor 10,000 IP. ので、その軸材は曲りや きれつの発生などの不具合を生じないよう な遷移温度の低いものを選び、 回転子 コイル には、銀入銅帯を使用 し、銅帯の収縮現象を防止している。

また,休転時の吸湿による メグ低下を防ぐため,発電機内および 励磁機回りには スペースヒータ を設けるようにしている。

そのほか, ガスタービン 用発電機は調相機運転を行なうように計画される場合もあるが, この場合は, スラスト 軸受・潤滑油装置が別途に 必要となる。

以上, ガスタービッ用空気冷却発電機について, その特長と構造の概略を述べたが, 特にパッケージ形 プラットに対しては, さらに標準化・ コッパクト化を推進して急増する需要に応えたい。

#### 4. ガスタービン用水素冷却発電機

ガスタービン 発電 ブラント が大容量になると、水素冷却発電機が用い られる。30 MW~50 MW の範囲においては、空気冷却・水素冷却 のいずれも可能であり、ビークロード用のように常時運転されない物で は、可能な限り大容量まで空気冷却機で製作されるであろう。しか し、事業用火力の複合サイクルの場合のように、常時運転されるもの では、効率の良い水素冷却機が有利である。さらに、容量の大きい 機械(たとえば米国には 138 MW の ガスタービン 発電機がある)は、 すべて水素冷却で製作される。

水素冷却機も、通常の火力用の発電機と根本的な相違はないが、 前節の空気冷却機の場合との相違点をあげると、次のとおりである。 (図4.1はガスタービンと結合された水素冷却発電機の例である)

4.1 定格出力

空気冷却機の場合の オージンエア 方式と異なり, 発電機低温水素 ガス 温度は一定であるので, 発電機出力は ガスタービン 出力の 最大値に 一致させねばならない。

4.2 冷却水

水素 ガス 冷却器の冷却水が必要である。

4.3 騒 音

水素冷却発電機は、耐爆形のがんじょうな フレーム に納められており、空気冷却機のような空気の吸込口・吐出口がないので、空気冷却機に比べて騒音は低い。また、この クラス の容量では一般に屋内形となるので、建屋による騒音の減衰を考えれば、屋外形より騒音に対する件条は良い。しかし、ガスタービン は火力の場合より、騒音に



図 4.1 ガスタービン 用水素冷却発電機 Hydrogen cooled generator coupled with gas-turbine.

対してきびしく規制されることが多いので,発電機・励磁機を含め, 騒音に対しては十分考慮する必要がある。

#### 4.4 ガス制御および密封油制御装置

フレームの軸貫通部に設ける油膜密封方式は、火力用発電機の場合 と変わらない。しかし、常時運転されない非常用発電機の場合にも、 急速起動するためには常時水素 ガスを充てんし、密封油を供給し続 ける必要があり、この場合にも、真空処理式密封油系統とすべきか、 否かは、運転条件により検討を要する。

密封油系統の方式のいかんにかかわらず、一般的には下記のよう な問題が存在する。

(1) 密封油の バックアップ 油圧

火力の タービン と異なり、タービン 軸駆動の主油 ポップ がない場合が あるので、バックアップ 油圧の順序が火力の場合とは違ってくる。

(2) 寒冷地の低油温対策

寒冷地に設置され、しかも常時運転されない発電機においては、 冬期、低温の主油そうの油を、密封部に必要な量だけ常時供給する 場合が生ずる。この場合、密封部・軸受などに損失熱の発生がない ので、油温を適当な値に保つため、必要に応じ t-タ や警報を設け る。

(3) ガス 制御装置の自動化

特に常時運転されない ガスタービン においては,発電所全体を無人 化する傾向があるので,ガス制御装置も自動化し,たとえば,ガス乾 燥器の再生 サイクル を自動的に行なえるようにしたり,炭酸ガス供給 装置に気化器を設ける。また発電機が停止している時間が,運転し ている時間に比べて比較的長いため,ガス乾燥器は,機内 ブロワの差 圧による通風にのみに依存することはできず,別に ファンを内蔵し なければならない。同じように,ガス純度計も機内 ブロワの差圧を利 用する型は不適当で,ファン(純度発信機)を有している物が便利で ある。

#### 5. む す び

ガスタービン用発電機につき,通常の火力用発電機との相違点を中心 にして紹介した。

ガスタービンは、ピークロード用・非常用電源その他に適する種々の特 長を有しており、今後、パッケージ形の標準化と相まって、ますます 広い範囲に応用されようとしている。

ガスタービン用発電機も,標準化により納期の短縮をはかる一方,多 様化する使用目的に応じ,騒音低減などの目標に向って,ひきつづ き努力を傾ける考えである。

#### 参考文献

- (1) 池田, 馬場: 自家発用 タービン 発電機の最近の動向, 三菱電 機技報, 40, No. 11 (昭 41)
- (2) 平井:パッケージ形ガスタービン,三菱重工技報, 5, No. 2
- (3) 上松: ジェットタービンの性能, OHM (昭43-4)
- (4) 青木: ガスタービン 発電機の概要と各利用分野における経済性, 電力 47, No. 8, No. 9
- (5) 平井, 甲斐:日本 カーバイト 15 MW ガスタービン 発電 セット,動力(昭41-1)
- (6) 広瀬:名火(ガスタービン)発電所の計画,火力発電 17, No. 8

UDC 621. 313. 322-815 : 621. 313. 126

タービン発電機の励磁系

甲斐 高\*·長沢保明\*·天笠信正\*

# Excitation Systems of Turbine Generators

Kôbe Works

Takashi KAI•Yasuaki NAGASAWA•Nobumasa AMAGASA

With rapid progress in the manufacture of semiconductor rectifiers and their application technique, various excitation systems covering static exciters (compound wound, self excited), thyristor exciters, AC exciters and brushless exciters have made their appearance in the places of DC exciters of turbine generators since 1960. Mitsubishi has had experiences in building all these excitation systems. In deciding which one is to be applied, it needs thorough study by comparing their voltage response, reliability, maintenance, dimensions, weight and prices as they have merits and demerits respectively.

This article introduces various excitation systems of the company's turbine generators and actual results of manufacture together with the outlines of their performances for the reference to users.

# 1. まえがき

昭和35年(1960年)に、当社はシリコン整流器を利用した最初の 自励 タービン発電機を山陽パルプ 岩国工場に納入したが、これは、こ れまで長期間にわたって励磁機の座を独占してきた直流励磁機に対 する技術革命の出発点であった。これ以来、励磁方式について多数 の新しい アイデァ や部品が現われたが、当社は昭和40年にわが国で 初めての ブラシレスタービン発電機を日本カーバイト 魚津工場に納入し、 すでに3年間以上無事故という運転実績を収め、昭和43年には九 州電力大分発電所1号機278 MVA、関西電力三宝発電所1号機174 MVA ならびに関西電力美浜発電所1号機400 MVA の3台の事業 用大容量機をブラシレス 励磁方式で完成した。

現在当社で実用している励磁方式は、励磁機の形式で分ければ、 直結直流励磁機・減速 ギヤ 駆動直流励磁機・別置電動機駆動直流励 磁機・ブラシレス励磁機・交流励磁機・複巻自励方式・サイリスタ励磁方 式の7種類となるが、本文では、これらの各種励磁方式中とくに整 流器利用の諸方式に重点をおいて、構成部品、回路方式、制御系と しての性能と特長、信頼性などにつき概要を説明するとともに、当 社としての適用基準についても簡単に紹介する。個々の励磁方式の 詳細については、これまでに製作のたびに発表しているので参照願 いたい<sup>(1)(2)(3)</sup>。

なお本文では、蒸気 タービン または ガスタービン 駆動の タービン 発電機の励磁系だけを対象として説明した。用途別では、国内向けと輸出



図 1.1 九州電力大分発電所向け 1 号 278 MVA 3,600 rpm ブラシレスタービン 発電機 Brushless turbing generator for the Kyushu electric power

company, Ôita power station, unit #1 278 MVA 3,600 rpm.

向けとを問わず, 事業用発電 プラット と自家用発電 プラット だけに限 定し船舶用は除外した。また 2 章の諸統計では,便宜上 5,000 kVA 未満の タービッ 発電機は省いている。

水車発電機・ディーゼル発電機など タービッ発電機以外の同期発電機 にも、本文で記載したものと類似の励磁方式が使用されるが、ここ では触れない。

#### 2. 各種励磁方式

#### 2.1 励磁方式多様化の背景

1955 年に、半導体整流器を励磁装置として利用した 560 kVA の 船舶用自励交流発電機がわが国で初めて運転されたが、これが整流 器励磁方式の急激な発展のきっかけとなった。最初の数年間は、そ の応用範囲は船舶用発電機や小形 エンジン発電機に限られていたが、 1958 年に 6,250 kVA 3,600 rpm の タービン発電機用として静止励磁 装置が製作されて以来、次第に中容量の タービン発電機にも普及した。

これらの初期の整流器励磁方式は、いずれも自励複巻方式のもの であったが、その運転実績により、半導体整流器の信頼性が認識さ れるに及んで、整流器を利用した各種の励磁方式が開発され、多様 化の時代を迎えることになった。

この間,事業用タービン発電機の容量は急速に増加し,これに伴っ て励磁容量も飛躍的に増大した。すなわち,1955年に最大300kW 程度であったものが,1960年には975kW,1965年には1,500kW と増大し,1970年には2,300kW,1975年ごろには4,000~5,000kW 程度にも達すると予想される。このような大容量の励磁機を従来ど おり直流機で製作するのは経済的でなく,また保守の面での負担も 重くなるので,1966年ごろから,大容量機にも整流器励磁方式を採 用する気運が高まり,1968年には3台の事業用ブラシレスタービン発電 機が完成した。大容量機用励磁方式としては,このほかに,交流励 磁方式も実用期に入っているが,いずれも大容量機で要求される高 信頼性・小形軽量・保守簡単・速応性などの実現を目ざしている。

また,応答速度が特に重視されるような用途に対しては,自励式のほかに,サイリスタ 励磁方式も登場している。

#### 2.2 当社の各種励磁方式とこれまでの実績

表2.1 は当社で製作している各種励磁方式と代表的製作例である。また事業用ならびに自家用 タービン発電機に対する各種励磁方式の適用(台数と総出力)の年度ごとの推移を図2.1 および図2.2

	破け	方式			代 表 機													
励			AL 7 14	T/G		EX						T/G		EX			台 数*	
				約 入 先	kVA	rpm	kW	rpm	元成	割 入	宄	台数	kVA	rpm	kW	rpm	完成	
	面	直 #	結							東京電力(新東	(京)	1	92,000	3,000	280	3,000	1957	66
直										中国電力(新与	: 部 )	2	95,909	3,600	280	3,600	1957	
流	¥	ニャード	関 西 雷 力(大阪)	208 696	3,600	975	885	1959	某	社	2	500,000	3,600	2,300	514	製作中	17	
励					200,070	0,000				東京電力(鹿	扇)	1	2×350,000	3,000	2×1,350	750	製作中	
低达	N		МG		) 192,000	3,600	975 (予備)	885	1959	某	社	1	500,000	3,600	2,300	505	製作中	97
7		м		力 胡 愛 力(期用)						関 西 電 力(姫路	第二)	1	396,000	3,600	1,500	505	1964	+
1		101		No Ni NE NI (MILLI)						関 西 電 力(姫路	第二)	1	320,000	3,600	1,300	710	1963	(予備12)
										東京電力(五	井)	1	2×224,000	3,000	2×1,050	740	1967	(1 001 - 2)
	交流					3,600	25.2	3,600	1966	大昭和製紙(白	老)	1	29,000	3,000	90	3,000	1968	13
		: sets	流励磁	合成し イマン(安山)	3,750					大昭和製紙(鈴	川)	1	26,470	3,000	85	3,000	製作中	
		. Dir								王子 製 紙(春 E	– 井)	1	25,000	3,600	90	3,600	1968	
鮾										佐賀板紙(久像	と田)	1	11,400	3,600	50	3,600	1967	
74	ブミ					3,600	65	3,600	1965	関西電力(美社	₹ #2)	1	560,000	1,800	2,300	1,800	製作中	29
Dir				日本カーバイト(魚津)	15,625					某	社	1	408,000	3,000	1,700	3,000	製作中	
器		ラシ	ラシレス							某	社	1	390,000	3,600	1,600	3,600	製作中	
励										鹿岛北共同	] \$2	1	147,059	3,000	425	3,000	製作中	
碳										日石化学(浮	島)	1	23,750	3,000	80	3,000	製作中	
-#	サイ	トイリス	7 7	市安委市(月 川)	39,000	3,000	100		10/0	日新製鋼( 男	; )	1	56,250	3,600	160		製作中	0
<i>万</i> 式			~ ~	来示电刀(面 用)					1909	某	社	1	56,250	3,600	160		製作中	3
	自				) 10,000	3,600	45			福山共同;	くカ	1	43,750	3,600	110		1966	
			E.	10 10					1960	三 菱 化 成(黑	崎)	2	34,444	3,600	100		1968	
			נעט	山 岡 ハ ル フ( 沿国)						宇部セメン	/	1	33,333	3,600	90		1963	80
										化成水	鶋	1	31,250	3,600	100		1965	

表 2.1 各種励磁方式の代表的製作例

Example of representative excitation systems.

\* 5,000 kVA 以上のタービン発電機で 1959 年以降,現在製作中のものを含む.





に示す。図中,下段が直流励磁方式,上段が整流器励磁方式の統計 であり,直流励磁が次第に整流器励磁に置き換えられていることが わかる。事業用と自家用とで励磁方式のパターンが違うことも興味深 い。すなわち,事業用における整流器励磁の主流は ブラシレス である が,自家用では全般的に自励が多く,最近になって、ブラシレス・交





流励磁・サイリスタ などの諸方式が伸びてきている。

#### 2.3 発電機容量区分と励磁方式の関係

以下の説明で便宜上, 発電機を大容量内部冷却機(160 MVA 以 上)・中容量水素冷却機(35~160 MVA) ならびに小容量空気冷却 機(50 MVA 未満)に分類する。

#### 2.3.1 内部冷却発電機用励磁機

タービン発電機の冷却方式の進歩とともに、その単機容量は飛躍的 に増大し、励磁容量も急激に上昇した。励磁方式は信頼性の高い経 済的なものへと変化している。

History of manufacturing brushless exciters.													
		_	先	台数	Т	/G			E	-البر والر	vitet and Li		
	卻	Α.			kVA	PF	冷却	kW	v	Hz	rpm	元成	理嘱開好
and and a second se	日本 (魚	カーバノ	(ト 津)	1	15,625	0.96	A	65	220	420	3,600	1965	1965-11
A CONTRACTOR OF THE OWNER OWNE	三(四	菱 油 日	化 市)	1	9,412	0,85	А	48	110	240	3,600	1967	1967-10
	丸 (川	住 製 之	紙 江)	2	19,400	0.85	Α	80	250	240	3,600	1967	1967-11
	九 (大	州 電 分	力 #1)	1	278,000	0.9	IC	950	375	300	3,600	1968	据付中
and the second s	東 (川	燃 油	化 畸)	1	10,000	0.92	A	53	250	200	3,000	1968	1968-8
V V VANTE / A VI	北 F (江	日本製	紙 別)	1	5,000 ا	0.8	Α	70	250	200	3,000	1968	1968-11
A MANANA AND AND AND AND AND AND AND AND AN	閃 (三	西 電	力 宝)	1	174,000	0.9	IC	003	330	300	3,600	1968	据付中
And and an and an	富士 (富	:フィノ 士 ノ	レム 宮)	1	5,625	0.87	A	36	125	200	3,000	1968	1968-12
and an and a second second	丸 (五	善 石	油 升)	1	10,000	0.9	Α	53	250	200	3,000	1968	1968-12
The second	東 (和	亚 燃 歌	料 山)	1	22,222	0.9	A	85	250	240	3,600	1968	1969-1
And in case of the local division of the loc	日 本 (千	(合成:	ゴム 葉)	1	10,625	0.8	A	50	250	200	3,000	1968	1969-2
Contraction of the local division of the loc	閃 (美	西 電 近	力 #1)	1	400,000	0.85	IC	1,550	500	120	1,800	1968	据付中
	日 (浮	石 化	学 島)	1	23,750	0.8	A	03	250	200	3,000	1969	据付中
	化	成水	岛	1	82,353	0.85	$H_2$	220	250	240	3,600	製作中	
	九 (大	州 電 分	力 #2)	1	278,000	0.9	IC	950	375	300	3,600	製作中	
	施岛 (	北共同1 #1	置力 )	1	111,765	0.85	$H_2$	340	375	200	3,000	製作中	
	施晟 (	北共同1 #2	<b>電力</b> )	1	147,059	0,85	$H_2$	425	250	200	3,000	製作中	
	距离	南共同	電力	1	80,000	0.85	$H_2$	230	250	200	3,000	製作中	
	中 (西	部 電 名 古	力 屋)	2	250,000	0.9	IC	1,200	375	300	3,600	製作可	8
	<i>"</i>	(国Y	EA	2	250,000	0.9	IC	1,100	375	250	3,000	製作中	T
	関 (英	西 電 近	力 #2)	ı	560,000	0.9	IC	2,300	500	120	1,800	製作中	1
	菜		社	1	390,000	0.9	IC	1,600	500	300	3,600	製作中	1
	菜		社	1	408,000	0.9	IC	1,700	500	250	3,000	製作中	1
	菜		社	1	217,000	0.9	1C	950	330	300	3,600	製作中	1

表 2.2 ブラシレス 励磁機製作経歴

\* 製作中は大容量機のみ配載した.

1959年,最初の内部冷却発電機に 975 kW 減速励磁機が採用され た。これは励磁容量が約400kW をこえる場合,高速回転の直結励 磁機では整流に支障を生ずるため、減速歯車によるか、別置の駆動 電動機により低い回転数とせねばならないからである。

その後多数の直流励磁機が、高い信頼性と長期の連続運転を必要 とする内部冷却発電機用励磁機として納入されてきたが、直流機の 出力は整流および機械的強度の条件により制限され、この出力限界 のため, 励磁容量の著しい増加は定格回転数の低下を招き, 直流励 磁機の寸法・重量はともに大幅に増加する。現在 2,300 kW 505 rpm の減速励磁機を製作中であるが、経済性ならびに保守の点からみて 直流励磁機は 3,000 kW をこえないであろう。

一方、半導体製品の信頼度の著しい向上は整流器励磁方式の大容 量機への利用を可能にした。

1968年に内部冷却発電機用励磁機として,最初の整流器励磁方式 である 950 kW 3,600 rpm ブラシレス 励磁機が完成した。発電機単機容

量の増加に伴う励磁容量の増大につれて、ますます煩雑となってき た直流励磁機の保守の問題を解消し、かつ励磁容量にほとんど限界 を持たない最終的な励磁方式を確立するため, 当社は 1960 年以来 ブラシレス 励磁方式の開発に努めてきたが、1968年に3台の事業用 ブ ラシレスタービン発電機を完成したのに引続き,現在では 2,300kW 1,800 rpm 機, 1,700 kW 3,000 rpm 機, 1,600 kW 3,600 rpm 機を含め, 9台を製作中である。(表 2.2参照)

内部冷却発雷機用励磁機として10年目に登場した ブラシレス 励磁 機は、1970年には台数・容量ともに全体の半分をこえるであろう。

#### 2.3.2 水素冷却発電機用励磁機

水素冷却機用励磁機も内部冷却機用と同様な傾向を示している。 1953年に最初の水素冷却発電機を納入し200kW直結励磁機を製作 した。以来 280 kW 3,600 rpm など 30 台以上の直結直流励磁機を製 作してきたが、1969年になって ブラシレス 励磁機・サイリスタ 励磁機が 相ついで採用され,直流励磁機は次第に減少する傾向にある。

現在 425 kW 3,000 rpm ブラシレス 励磁機, 160 kW サイリスタ 励磁機 など7台の整流器励磁機を完成または製作中である。

#### 2.3.3 空気冷却発電機用励磁機

この10年間を振りかえると、50 MVA 級以下の発電機用励磁機 は多岐にわたり、近年開発された各種方式を目的・用途により使い わけている。1960年, 45 kW 静止励磁器(複巻自励方式)を製作 したが、1964年には直流励磁機を圧倒する台数となり、 整流器励 磁の分野を確立した。自励式は速応性が特に優秀であること、保守 が比較的に容易であることなどの性能上の特長により、最近まで空



RECTE

(g)複巻自励方式

generator.
# 気冷却機用励磁機の主流をなしてきた。

その後、1965年にわが国で初めて 65 kW ブラシレス 励磁機を納入, ついで 1966年には 25.2 kW 交流励磁機を納入し,現在では各種励 磁機を製作しているが,とくに ブラシレス 励磁機の占める割合が増大 しつつある。

## 2.4 各種励磁方式の構成

当社が現在製作している7種類の励磁方式の構成を,図2.3 に 示す。図中, AVR などの制御装置部分は代表的なものを示した。 以下,各方式の具体的内容を説明する。

### 3. 励磁機構成要素

#### 3.1 直流励磁機

# 3.1.1 直結励磁機

発電機に直結, 駆動されるため, 3,600 または 3,000 rpm という高 速回転であり,約 400 kW を境として整流子の製作および保守が急 速に困難となる。 構造における特色は特殊機構を採用した シュリンク リング式整流子にあり,高速で長期間連続運転を行なえるよう点検に も考慮が払われている。

冷却は自己通風方式で,発電機 スリップリング 部も含めて ブラシ の粉 じんによる汚損を防ぐ通風構造としている。

# 3.1.2 減速ギヤ駆動励磁機

減速 キート を介して発電機軸から駆動されるので,直流機として最 適の回転数を選択できる利点を有する。 チート と発電機軸の連結部は 振動を伝達しないように設計され,また チート の騒音に対しても注意 が払われている。

構成は主発電機用 スリップリング・減速 ギヤ・直流発電機・ハウジング・ 通風 ダクト・ベッド より成り, 軸受は強制潤滑で ペデスタル 形である。 (図 3.1 参照)

整流子周辺の配置, ベッド形状, 点検とびらなどの適切な設計により, 保守が十分に行なえるだけの空間を設けている。冷却は自己通 風形である。

## 3.1.3 別置電動励磁機

主発電機運転時においても予備励磁機に切換えることによって、 簡単に保守点検を行なうことのできる電動励磁機は、予備励磁機と しても多数製作されてきた。しかし、誘導電動機により駆動される ため、所内電源の切換えや電圧変動の影響を受けやすい。このため 電動機の最大 トルク, セットの慣性定数などに特別な注意を要する。 (図 3. 2 参照)

直流機本体ならびに励磁系としての基本的考えは減速励磁機と同 一であるが、高価なので最近は予備励磁機としてだけ製作される場 合が多い。

#### 3.2 交流励磁機

交流励磁機を用いる励磁方式は,高価で保守の困難な直流励磁方 式に代わるものといえる。シリコン整流装置を別置静止形とする交流 励磁方式と回転体に装架する ブラシレス 励磁方式がある。

# 3.2.1 交流励磁方式

交流励磁機電機子の出力を別置の シリコン 整流装置により, 直流に 変換し,発電機 スリップリング より励磁電力として供給する。

従来の直流機を交流機に置き換え,整流子をなくしたものである が,発電機ならびに励磁機用として2組の スリップリングを必要とする。

図 2. 3(d) に示すように交流励磁機・シリコン 整流装置・副 励 磁 機 (PMG)・AVR からなる。



図 3.1 減速半 駆動直流励磁機 975 kW 375 V 897 rpm Gear driven DC exciter, 975 kW 375 V 897 rpm.



図 3.2 別置電動励磁機 1,100 kW 375 V 710 rpm Motor driven DC exciter, 1,100 kW 375 V 710 rpm.



図 3.3 交流励磁機 25.2 kW 3,600 rpm AC exciter 25.2 kW 3,600 rpm (commutatorless excitation system).

交流励磁機は回転界磁形で,高速回転のため円筒界磁を採用する。 したがって構造上極数は多くとれず,周波数は商用周波数か,100 または120 Hz としている。大容量機の構造は,空気冷却器を利用 した全閉形でコンパクトにまとめ,小容量機では,自己通風形とし冷 却空気取入口にフィルタを設置し,排気は基礎内通風路を通して騒音 の低減をはかっている。(図 3.3 参照)

三相全波整流回路を持つ整流装置は,保護回路とともに整流器盤 に収納され適当な位置に設置される。事故時の点検・交換に都合の 良い トレイ構造を採用する場合が多い。

# 3.2.2 ブラシレス励磁方式

回転電機子形交流発電機の出力は、回転整流器(シリコン整流装置) により直流に変換され、軸上または軸内に装架した リードをとおり 発電機界磁に供給される。この方式の特色は、発電機励磁に必要な 電力を回転体の外部にとりだす必要がなく、スリップリング、ブラシ など の機械的しゅう(摺)動部分を全く不要としている点にある。このた め事故発生の原因をもたず、また回転中に励磁がなくなることがな いので、信頼度は他の励磁方式に比べ最も高いといえる。



図 3.4 950 kW 375 V 3,600 rpm ブラシレス 励磁機 (ハウジング をはずしたとてろ) 950 kW 375 V 3,600 rpm brushless exciter (housing removed).

図 2.3(e) に示すように、 交流励磁機・回転整流器・副励磁機 (PMG)・AVR から成り、空気冷却器を有する全閉構造とし、基礎 の簡素化・騒音の低減をはかっている。

交流励磁機は静止界磁形で、極数を自由に選択できるため通常 100~400 Hz を採用して時定数を減じ、応答性を改善している。回 転電機子は、1パンチングの積層鉄心構造とし、コイルエンド部にかかる 遠心力に対してもコイルを押えるエポキシガラスバインドに10倍の安全係 数をとるなど、各部とも200%程度の回転数に耐えうる構造である。

図3.4にブラシレス励磁機の外観を示す。

# 3.3 静止励磁器(複巻自励方式)

静止励磁器の外観を図 3.5 に示す。 発電機出力の一部を励磁に 使用する複巻自励方式はすべての励磁装置が静止機器で構成されて おり,保守点検が容易で,握付の自由度が大きく,特性的にも多く の利点を有する。リアクトル・CT・可飽和電流電圧変成器 (SCPT)・ シリコン 整流器・AVR などから構成され,必要に応じ初期励磁回路 を設ける。リアクトル により発電機の無負荷定格電圧に要する励磁電 流を,CT により負荷電流による リアクタンス 降下分を補償する励磁電 流を供給し,これを SCPT で ペクトル 的に加算し,その出力を整流 して発電機界磁に供給する。

回路定数の設定により複巻特性をもたせ発電機電圧の変動を本質 的に小さく押えることができる。また,従来の回転励磁機のむだ時 間がなく応答が非常に早く,負荷急変時の瞬時電圧変動が小さく, 回復時間も短いなどの特性上の利点を持つが,系統と連系して使用 する場合には応答が鋭敏すぎて,無効電力がその発電機に集中する 可能性があり,特長を十分発揮できない場合もある。

また,高速の タービン発電機用励磁器としては,割合に高価なこと もこの方式の欠点である。

# 3,4 シリコン整流装置

# 3.4.1 シリコン整流素子

電力用シリコン整流素子の定格の増大と信頼性向上はめざましいも のがある。励磁機の定格により使用整流素子も異なるが,代表的な SR 200 H-24 の定格は順電流 240 A, せん頭逆耐電圧 1,200 V, 遥渡 せん頭逆耐電圧 1,500 V である。

回転整流器に使用される シリコン素子は,強大な遠心力に耐えうる 構造となっている。たとえば PN 接合部は 3,000 kg の静圧縮荷重に よっても,電気的・機械的になんら損傷を生じないが,実際の使用 状態で加わる力は 100 kg 程度に過ぎない。



図 3.5 静止励磁装置(複巻自励方式)70kW 250V Static excitation panel (Sdf-excitation system).



図 3.6 ブラシレス 励磁機部品 Main elements of brushless exciter

#### 3.4.2 整流回路

整流器励磁方式の整流回路には、利用率がよく、整流素子に加わ る逆電圧が低い三相全波結線が採用される場合が多い。

整流回路の仕様は励磁機定格によって決定される。 各 F-ム の直 列素子数は,頂上電圧,発電機異常運転時の逆電圧ならびに素子の 逆耐電圧により,また,並列素子数は定常時ならびに短時間過励磁 の界磁電流を考慮して決められる。

図 3.6 に ブラシレス 励磁機用の シリコン 素子,分圧抵抗などの主要 部品を示す。

#### 3.4.3 冷 却

ブラシレス 励磁方式の場合には回転による ファン 効果が大きく,常に 十分な冷却が行なわれるので, この点においても信頼性が最も高い。

一方, 別置の整流装置を用いた各種励磁方式は冷却 ファン または 冷却木による強制冷却を必要とするので,たとえば風圧を検出する 断風 リレー などを設け, 界磁喪失事故が起こることを防いでいる。

# 3.5 サイリスタ励磁器

サイリスタ 励磁器は、サイリスタ素子を用いた単相あるいは三相整流回 路より構成されるもので、約50kW 以下程度の小形のものには単 相が用いられ、容量の大きいものは三相整流回路が有利である。整 流回路の構成方法にも図3.7 に示すように、サイリスタ とうりつい整 流器とを組合せて使用する混合 ブリッジ 方式と、サイリスタ 素子のみを 用いる インパータ 方式とがある。

混合 ブリッジ 方式は転流 ダイオードを併設しており,発電機出力端の



事故の場合に界磁側に生じる異常電流を吸収できるので装置が簡単 になるが、界磁に負電圧を印加することができないので減磁側の つ オーシングは零までである。しかし励磁器の動作速度がきわめて早い ため、従来の励磁機に比べなんら劣らない特性を示す。一方、インパ ータ形は界磁を正の頂上値から負の頂上値まで フォーシングすることが でき、きわめてすぐれた性能を示す。しかしながら、この形は事故 時の異常界磁電流の処理について十分な考慮が必要であり、装置の 容積もやや大きくなる。

電源は通常,発電機端子電圧を励磁専用電源 トランス を経て使用する。

# 4. 励磁の制御

# 4.1 自動電圧調整器 (AVR)

現在においては、静止形増幅器を使用したものが一般的である。 特に当社においては出力段にも完全な静止形増幅器を使用すること を基本としている。図4.1 に直流励磁機の場合のマグ・ア・スタット 形 AVR,図4.3 に ブラシレス 励磁機の場合の AVR を示す。これら 装置は、磁気増幅器および サイリスタ 増幅器を基本的構成要素とした ものであるが、近い将来には、すべて半導体を使用した増幅要素に よるものに変えられるであろう。その一例として図4.5 に サイリスタ 励磁器の場合の AVR を示す。

# 4.1.1 マグ・ア・スタット形 AVR

電圧設定用の小形誘導電圧変成器を通して与えられる発電機端子 電圧信号は、三相全波整流され、第一段磁気増幅器の制御巻線の一 つに加えられる。第一段磁気増幅器は、この検出信号と別に与えら れている基準信号との差を検出し、増幅する。この誤差信号は第 二段磁気増幅器によりさらに増幅され、あるいは必要によっては、 低励磁制限等の他の信号と混ぜ合わされ、出力段増幅器に与えられ る。出力段増幅器は増磁用および減磁用の二つの磁気増幅器により 構成され、それぞれ直流励磁機の増磁および滅磁用界磁 を制 御 す る。装置の電源は、誘導電動機に直結された PMG (400 あるいは 420 Hz) より供給される。この方式の場合の基本励磁は励磁機の自 励分巻界磁により保たれ、AVR は変化分のみ補なうものである。

# 4.1.2 ブラシレス励磁機用 AVR

直流励磁機の場合と異なる点は、励磁機のみで基本励磁を持たないことである。すなわち、 ブラシレス 励磁機のただ一つの界磁巻線にAVRから、 基本励磁と変動分とを合わせて供給しなければならない。このため、出力段増幅器に要求される容量は大きくなる。さらに、一つの励磁機の界磁巻線で、 減磁方向にも強力な フォーシングができることが望ましい。そこで、出力段増幅器には インバータ 形サイリスタ 増幅器が使用される。しかも全く同じ増幅器を二台並列して使用し、運転の信頼性を上げている。その他の部分、すなわち第一段および第二段増幅器はマグ・ア・スタット形と同じく磁気増幅器である。











図 4.2 マグ・ア・スタット 形 AVR Type Mag-a-stat AVR.

電源は発電機軸に直結された PMG(400 あるいは 420 Hz) より供給 される。

## 4.1.3 半導体形 AVR

サイリスタ励磁器などの場合,AVR に要求される出力容量はきわめ て小さく,また励磁器自体が半導体装置のため,AVR もトランジスタ 等を用いたものがふさわしい。通常,増幅要素としては演算増幅器 が用いられ, 誤差検出・増幅・信号混合などが行なわれ,サイリスタ 励磁器のゲート制御装置に与えられる。













# 4.1.4 複巻自励装置用 AVR

ACCESSION OF

発電機の出力側に JFクトル・変流器・可飽和変流器などを設け, これにより励磁電流を得る複巻自励装置は,これ自身で発電機が定 電圧となるように設計されているものであり,AVR は定常的には 徴小な電圧補正のみを行なうものでよく,小出力・低利得のもので 十分である。通常は電圧検出回路・基準回路・磁気増幅器より構成 され,これの出力で自励装置の可飽和変流器の直流巻線を制御する

#### 4.2 手動電圧設定器

励磁系のなかには、 AVR を除外したときでも発電機の励磁を変 えることのできるように、手動調整装置を備えねばならない。直流 励磁機の場合は自励分巻界磁およびその界磁調整器がこれに相当す る。その他の場合は別に手動設定器を設け、しかも基本励磁分を手 動設定器に持たせることが多い。

# 4.3 励磁制限装置

低励磁制限装置 (MEL) および過励磁制限装置 (OEL) がある。 どちらも発電機の容量限界あるいは安定限界によくマッチ した特性 を持つもので、制限信号は AVR に与えられ、許容範囲内に励磁を 限定するように働く。なお、限界内では AVR の動作になんら影響 を与えることがないように適当な競合回路を用いて、これら信号は 混ぜ合わされる。 図 4.6 に発電機出力に対するこれら装置の動作 域を示す。

#### 4.4 自動追従装置

上記したように,通常は AVR では過渡的な変化分のみを補うの であるが,外部条件の変化などによって AVR が出力を出したまま ある時間継続することがある。そこで, AVR の出力がある値以上, ある時間以上継続したことを条件に手動設定器を自動的に操作し, 基本励磁側に移してしまうものである。

#### 4.5 界磁しゃ断器

従来,火力においては界磁しゃ断器は発電機界磁回路に設けられ るのが普通であった。一方,水力においては励磁機界磁に設けてい た。しかしながら,火力においても界磁電流の増大によるしゃ断器 容量の増加,あるいは ブラシレス 励磁方式のように発電機界磁回路が 外に出ていないものの出現などにより,励磁機界磁回路に設ける方 式に変わるものと思われる。この場合,界磁電流の減少速度は,発 電機界磁にしゃ断器を設けたときに比べ長くなることはさけられな いが,当社の場合,励磁電流が 1/2 まで減少する時間が,従来方式 のとき3秒程度であったものが,励磁機界磁しゃ断器方式にしたと き5秒程度になるだけで,実際上それほど問題にならない。



Operating range of excitation limiter.

# 5. 励磁系の特性

# 5.1 要求事項

# 5.1.1 励磁機公称速応度・励磁系電圧速応度

励磁機公称速応度は、励磁機の性能を表わす一つの目安であるが、 現在のように種々のタイプの AVR があり、 しかもその AVR が連 続形であるような場合には、AVR・励磁機を含めた励磁系としての 性能を表わすことがむずかしくなってきた。そこで近年、励磁系電 圧速応度という考え方がとられている。これは AVR の入力端から 励磁機出力電圧までの性能を示すもので、従来の励磁機公称速応度 と同じように、励磁機出力電圧変化の等価時間面積で表現するもの である。励磁系電圧速応度は、励磁機公称速応度に AVR 部におけ る時間遅れ・利得などが加味されたもので、励磁機公称速応度に比 ベ小さくなり、しかも AVR をいくら大きくしても励磁機単体の速 応度までしか達しないものである。

このように、従来の速応度を包括した励磁系速応度がとり入れら れ、励磁系の制御効果の判断に大いに役立っているが、この方法に よっても、実際上問題となる種々の値、たとえば、負荷しゃ断後の 電圧上昇率あるいは安定限界の拡大などを直接表現することはでき ない。一般的には、負荷しゃ断後の電圧上昇に関していえば、速応 度は1.0 程度が望ましく、2.0 以上に高くしても効果は薄いといわ れている。また安定限界については、安定限界に大きく影響するも のが微小変動領域での AVR の利得であり、速応度が表わす大きい 変化時の性能とは直接つながらないともいわれている。

したがって、今後励磁系の評価のためには、系の時間遅れ・利得 などを用いた自動制御論的手法を、併用していく必要があろうかと 考える。

励磁機公称速応度については、 USAS に 0.5 以上と規定しており、 現在では一般的に、これが唯一の規則として適用されている。

また,以上の速応度は主として回転励磁機を対称に考えられたも のであり,静止形あるいは整流器励磁方式の場合には,別に新しい 表現方法が立案されるべきであろうが,現在はまだできておらず, どのような形の励磁装置にも従来の速応度の考え方がとり入れられ ている。

# 5.1.2 励磁機頂上電圧

速応度と密接に関係し、頂上電圧が大きいほど速応度も大きくな る。これも速応度と同じく、USAS に発電機の定格出力時に要する 励磁電圧の120%以上と規定されている。 サイリスタ 励磁器のように 全く時間遅れなく応答するものは、この程度の頂上値で十分である が、回転励磁機の場合は速応度の要求から、頂上値はこの値よりも かなり大きい値(150%~200%)になっている。

#### 5.1.3 ダンピング

通常, 励磁系の動作を安定にするための適当な ダッピッグ が必要で ある。直流励磁機方式においては, 発電機界磁電圧を適当な ダッピッ グ装置を通して AVR に帰還することにより行なっている。 ブラシレ ス 励磁方式では, 励磁機界磁電圧より ダッピッグ をかけており, この ときは ダッピッグ 回路のなかに, 励磁機の時間遅れを模擬した回路を 含めることが多い。

### 5.1.4 電圧変動率

国内においては、これまでは  $\pm 1\%$  が標準の値であったが、近 年  $\pm 0.5\%$  に変わりつつある。 特に外国においては  $\pm 0.5\%$  が一般 的な値である。電圧変動率は励磁系の一巡利得できまるものであり、 増幅器を用いて、十分な ゲインを与えておけば問題ない。

# 5.2 実際の特性

図 5.1 に各励磁方式における無負荷過渡応答特性を示す。ブラル ス 励磁機の場合は,励磁機速応度をやや高めに設計しているので全 体の応答特性が早くなっている。複巻式の場合は,AVRの大きさ が他方式のものと比べ小さいので,過渡応答については予想するほ





図 5.2 励資磁機速応度の一例 (250 MW T/G 用 ブラシレス 励磁機) Example of speed response of exciter.

ど良くはみえないが、負荷しゃ断時の電圧上昇抑制には大きな効果 を発揮する。

図 5.2 に最近の ブラシレス 励磁機の速応度試験の結果を示す。

図 5.1 にみるように、 ブラシレス 励磁方式は、従来の直流励磁機方 式と同等かむしろすぐれている性能を示し、 励磁方式の現在の動向 とも考え合わせて、 今後は一般的には、 ブラシレス 励磁方式が主流と なり、 一方、 複巻自励方式・サイリスタ 励磁方式などの静止形が応答 性の良さを要求される場合に広く用いられるようになるであろう。

#### 6. 励磁系の信頼性と予備

## 6.1 直流励磁機の信頼性と予備励磁機

最近の直流励磁機は,設計技術の進歩と多年の運転経験により各種の改良が加えられ,長期間の連続運転にも十分に信頼して使用で きるものとなっているが, 整流子と ブラシを持つため外部のふんい 気の影響を受けやすく,保守にも細心の注意を要し,ときには不測 の事故が発生することがないとはいえない。

このため、事業用発電所で直流励磁機を採用する場合には、2台 ないし3台の発電機に対して1台の予備励磁機(別置電動機駆動) を設置するのが普通であり、予備励磁機を設けないときでも、少な くとも予備電機子程度は備えることが多い。

常用または予備として使用される電動励磁機は, タービン発電機軸 に直結されていないので, 駆動電動機の電源の切換えや電圧変動に 対して励磁を確保するため,

- (1) 電動機の最大 hup を定格 hup の5 倍以上とする。
- (2) セットの慣性定数を5秒以上とする。

(3) 電動機電圧が定格の70%のときでも励磁機は速応度0.5以

#### 上,頂上電圧120%以上に設計する。

などの考慮を払い,実用上,直結励磁機と同等の信頼性を持たせて いる。

予備励磁機を設けておけば、常用励磁機に事故が生じても直ちに 予備機に切換えることによって、発電機の励磁を維持することがで き、運用上の弾力性も増すが、予備励磁機のためにかなり広い据付 面積を必要とすることと価格が高いことが問題である。

## 6.2 整流器励磁の信頼性と予備の考え方

#### 6.2.1 シリコン整流素子の信頼性

整流器励磁の信頼性は、その心臓部ともいうべき シリコン 整流素子の信頼性によって大いに左右される。

一般に、半導体素子の寿命は PN 接合部の温度にかなり影響され るが、当社の電力用 シリコン素子についての実験結果を図 6.1 に示 す。励磁機用整流器は電流容量にかなりの余裕を見込んで計画する ので、定常状態での接合部温度は通常 100°C 以内に収まり、どんな 場合にも 125°C を越えることはなく、温度によって寿命が急に縮ま ることは考えられない。

寿命に影響をおよぼす他の因子としては、熱サイクルの繰り返しに よるろう付部の疲労があるが、オン・オフの激しい電車用素子などと 違って、ほとんど一定負荷で使用される励磁機用素子の場合には問 題にならない。

結局、励磁機用素子は使用条件の点では、電車用や一般工業用の 素子と同等か、あるいはやや楽であるといえよう。米国での統計に よれば、1958年から1965年までの8年間の工業用 シリコン素子の故 障率(平均寿命の逆数)は2×10<sup>-7</sup>/hであり、また励磁機用として 使用された2,000個のシリコン素子の運転開始後1年目までの故障率 は、据付および試運転中の故障率2~3×10<sup>-7</sup>/hを含めて、5×10<sup>-7</sup>h となっている。シリコン素子の信頼性は、製造技術の進歩とともに最 近さらに高まっており、当社の電車用シリコン素子の最近の故障率は 10<sup>-8</sup>~10<sup>-9</sup>/hにまで達している。

ブラシレス 励磁機に使用される シリコン 素子では,以上のほかに高速 回転による遠心力などの機械的問題がある。これについては,前に も紹介したが<sup>(3)</sup>,素子単独で静荷重圧縮試験・長時間加圧通電試験



Failure rate of a silicon diode.

・振動試験などを行なうとともに、回転試験装置に取付け実際に遠 心力をかけて各種性能の変化の有無を調査し、全く問題がないこと を確認したのち使用しているので、信頼性については、静止状態で 使用される素子と特に変わった点はない。その一つの証拠として、 当社が1965年に日本カーバイト魚津工場に納入した ブラシレスタービッ発 電機の第1号機15,625 kVA は、運転開始後約3.5年を経過したが、 24個の使用素子中1個の取換えもなく順調に運転している。また、 それ以後に据付けを終わった9台の発電機も故障皆無であり、ブラシレス 用素子の延運転時間は約150年に達している。

#### 6.2.2 整流器励磁方式の信頼性

上記のように、当社の励磁機用 シリコン素子は信頼性がきわめて高 く、素子 100 個を用いた励磁機でも 50 年間運転して 1 個故障 が 起 こるかどうかという程度であるが、整流器回路の構成、保護装置、 交流励磁機の構造、 AVR などに至るまで細心の注意を払い、励磁 系全体としての信頼性の向上に万全を期している。

(1) 整流素子の直並列個数

直列個数については、励磁機頂上電圧印加時ならびに発電機脱調時に整流器の各 r-ムにかかる逆方向電圧に十分耐えられる個数を 選ぶ。また、並列個数については、発電機定格負荷時界磁電流(連 続)、または頂上電圧印加時界磁電流(短時間)に必要な並列個数に 最低 20% の余裕を加えるが、特に ブラシレス の場合には最小 2 個の 余裕をみこむ。

#### (2) 保護装置

直列に接続される整流素子問の電圧分担を均一にするために、分 圧抵抗や コンデンサ を素子に並列に接続するが、 ブラシレス の場合には、 これらの部品自体の機械的信頼度にも十分注意し、厳重な形式試験 に合格したものだけを使用している。また、シリコン素子と直列に高 速限流 ヒューズをそう入し、万一若干の素子に短絡を生じた場合には、 ヒューズ によって故障素子を回路から切り放し、故障が他の素子に波 及するのを防ぐとともに、動作表示器により ヒューズの動作を表示す る。静止整流器では、 運転中でも故障素子をトレイ ごと引出して新 品と交換することができるし、回転整流器の場合には、ストロボ法に よって運転中でも動作 ヒューズを検出できるから、運転を継続したま まで次回の停止点検の時期を計画することが可能である。

(3) 交流励磁機の構造

交流励磁機は、交流励磁方式では回転界磁形, ブラシレス 励磁方式 では回転電機子形という違いはあるが、いずれも同期発電機であり、 本質的に従来の直流励磁機より堅固である。ブラシレス の場合にはスリ



図 6.2 回転整流器 Exterion view of rotatingrectifier.

ップリングや ブラシ もないから、 絶縁に有害な カーボン 粉も発生せず、 機械の寿命は半永久的となる。

(4) AVR

4 章に詳述したとおりである。

6.2.3 整流器励磁の場合の予備の考え方

以上を総合すれば、整流器励磁の場合には、各構成部品ならびに 励磁系全体の構成から見て、運転の信頼性は直流励磁機の場合より はるかにすぐれており、特に、交流励磁機・回転整流器および副励 磁機がすべて タービン 発電機の 軸端に 直結されている ブラシレス 励磁 方式の信頼性は群を抜いている。

したがって,整流器利用の各種励磁方式——なかでも発電機軸か らすべての励磁用 エネルギーの供給を受けている ブラシレス 励磁方式な らびに交流励磁方式——ではとくに予備励磁機を設ける必要はない。

7. 各種励磁方式の比較

これまで述べてきた各種励磁方式の構成および性能をまとめると, 表7.1となる。構成については,前掲の図3.1も参照願いたい。 励磁系としての構成から大別すれば次の3 グループ に分けられよう。 第 I 群 D (直結),G (キャ 駆動),M (電動機駆動) 第 II 群 A (交流励磁),B (ブラシレス)

第Ⅲ群 T (サイリスタ), S (自励複巻)

第 I 群は直流励磁機を利用するものであるが、最も基本的な形式 は D であり、G と M は励磁機容量が増大して低速としなければ製 作困難となったため、やむを得ず減速 ft, あるいは駆動電動機を 付加したもので、低速であることと相まって寸法重量が大になる。 また、第 I 群全体としては整流子と スリップリングがあるので、保守点 検がめんどうであり、応答速度もとくに速いわけではない。

第 II 群は D の整流子の代わりに シリコン 整流器を利用するもので, 整流器が静止しているか回転しているかによって, A および B と なる。A, B とも整流子がないので発電機と同一速度で製作可能で あり,小形軽量になる。いずれも,回転子軸から励磁 Iネルギーをう るので信頼性が高く,保守点検も楽になる。とくに,Bは整流子と ともにスリップリングもないので,実質上保守不要となり大容量機にな るほど偉力を発揮する。応答速度については,一般に交流励磁機の ほうが直流励磁機より時定数が小さいので,第 I 群より若干改善さ れる。

A と B を比較すれば、交流励磁機そのものには大きな差はない。 すなわち、 A は回転界磁形で小容量 タービン 発電機とほとんど同一 であり、B は回転電機子形で直流機の電機子(整流子を除いたもの) に似ているので、いずれも従来の経験を利用することができ、構造 上の問題点はない。電気的には、A の場合、回転界磁形であるため 極数はせいぜい4 極までであるのに対して、B では、静止界磁形で

表 7.1 各種 励 磁 方 式 の 比 較 Comparision of various excitation systems.

厉力	酸古子	直	流励磁方	整流器励磁方式						
		直 結 (D)	ギャ駆動 (G)	電 励 (M)	交流励磁 (A)	プラシレス (B)	サイリスタ (T)	自励複卷(S)		
	励磁エネルギー	回転子軸	回転子軸	所内電源	回転子麵	回転子軸	発電機出力	発電機出力		
	励战战器	直 流 励 磁 機 回転電機子 高 速	滅 速 ギ ヤ 直 流 励 磁 機 回転電機子 低 速	取 动 電 动 機 直 流 励 磁 機 回転電機子 低 速	交 流 励 磁 機 回 転 界 磁 高 速	交 流 励 磁 機 回転電機子 高 速	励磁トランス 静止	リアクトル C T 可飽和電流電圧 ドランス 静止		
樽	整 流 機 器	スリップリング+ プラシ 1組 整 流 子+ブ ラ シ	スリップリング+ プラシ 1 組 整 流 子+ブ ラ シ	スリップリング+ プラシ1組 整 流 子+プ ラ シ	スリップリング+ プラシ2組 シリコン整流器 静止	シリコン整流器 回 転	スリップリング+ プラシ 1組 サイリスタ 静止	スリップリング <del>+</del> プラシ1組 シリコン 遼流 器 静止上		
	制御エネルギー	所内電源	所内電源	所内電源	回転子軸	回転子軸	発電機出力	発電機出力		
成	制御機器	電 動 PMG 出力アンプ (マグ) AVR (マグ)	電 动 PMG 出力アンプ (マグ) AVR (マグ)	電 動 PMG 出力アンプ (マグ) AVR (マグ)	直 結 PMG 出力アンプ (サイリスタ) AVR (マグ)	直 結 PMG 出力アンプ (サイリスタ) AVR (マグ)	AVR (トランジスタ)	AVR (マグ)		
	保酸装置	界磁	界 弦 流 放 炭 環 環 環 環 環 環 環 環 環 環 環 環 調 調 二 振 調 二 振 調 器 二 振 調 二 振 読 加 記 に 記 二 に 載 読 加 記 に 記 に 二 低 読 加 記 に 記 に 記 に 記 に 記 に 記 に 記 に 記 に 二 低 読 た の 低 読 た の 低 に の に の 低 に の に の に の に の に の に の に の の の の の の の の の の の の の	界 磁 流 定 振 振 服 服 服 服 服 服 服 服 服 服 服 服 服	界磁し や 断 器 遊 流 ブ ス 界磁放 記 冠 紙 用 電 麗 武 計 題 度 計	励 磁 機 界磁しゃ 期器	界磁しゃ断器 直流 ポポス 界磁放 電抵 抗 発電機 F 計 電流 計 温 度 計	界磁しゃ断器 直流 プ 界磁放 電低 距 武 開 電 正 計 温 皮 計		
性	応答速度	小	小	小	中	гþ	×	大		
能	励 磁 制 御 量 信 額 性 保 守 点 検	小 中 可	小 中 可	小 中 可	中 大 良	中 大 優	大 中 良	最小 中 良		
4	回転機器	小	中	大	小	小	最小	最小		
法	静止機器	小	小	小	中	小	大	最大		
* 当 分	- 泰	27 1,430	17 4,177	22 5,524		15 4,044	1 39	4 90		
実績	自家用 { (台数) (MVA)	39 815		5 115	13 170	14 266	2 113	76 1,037		
**   最	発電機 (MVA)	約 100	755	(4 P) (2 P)	1,280 (4 P) 907 (2 P)	1,356.2 (4 P) 948 (2 P)	約 400	575		
大機	励 磁 檓 (kW)	約 400	3,140		約 4,000	5,300	1,700	2,240		

\* 当社実績は 1959 年以降,現在製作中のものまでの統計である.

\*\* 最大機は国外を含む.

あるので極数をかなり大きく選ぶことができ、Aよりも時定数を小 さくすることが可能である。

一方,発電機内部故障の場合の急速減磁については,Aでは従来 と同様に発電機界磁回路に界磁しゃ断器をそう入し,事故時はしゃ 断器を開き界磁放電抵抗を通じて短絡することが可能であるが,B の場合には,励磁機界磁回路にしかしゃ断器をそう入できないので, 減磁に要する時間は主界磁しゃ断器のある場合より2~3秒長くな る。

しかし,最近の大容量発電機のように励磁電流が大きくなると, 発電機界磁回路に設置する界磁しゃ断器は製作が困難となるし,製 作可能な場合でも非常に高価なものになる。また,急速減磁を必要 とするような発電機の故障または主変圧器の故障は最近ではきわめ てまれであり,さらに,万一そのような故障が起こった場合には, 急速減磁を行なっても被害を皆無に押えることはできず,若干の期 間は発電機を停止せざるを得ないであろう。とすれば,界磁しゃ断 器を発電機界磁回路に設けることによる利益は,きわめてまれな故 障の場合に,たとえば発電機鉄心の損害がごくわずかだけ軽小にな るというだけである。

水車発電機においては、従来から主界磁しゃ断器を省略している が、最近、諸外国では、上記理由により タービン発電機についても主 界磁しゃ断器をやめる傾向が強くなっており、米国では A (交流励 磁方式)の場合でも励磁機界磁回路にしゃ断器を設ける例が多くな っている。

発電機界磁の電圧,電流ならびに温度の計測は,B(ブラシレス)で も不可能ではない。しかし,スリップリングがある場合に比べると若干 めんどうになるし,これらの計測自体がかなり習慣的なもので,界 磁の諸量を知らなくても発電機の運転は可能出力曲線の範囲内であ れば問題ないので,Bの場合には計測しないことが多い。

励磁機の寸法重量は、Bの回転整流器に対し、Aには2組(4個) の スリップリッグがあるので、A のほうが若干大きくなる程度である。 ただし、Aには、このほかに静止の整流器があるので、全体として は B が有利である。

第Ⅲ群は,第Ⅰ群ならびに第Ⅱ群とは全く異なり, スリップリング以 外には回転機を全然使用しない形式であるが,その特長は応答速度 が速いことである。現在までのところ,中小容量機に使用された例 が多いが,特に応答速度が問題になるような条件では適切である。

N

Þ.

このグループが第1群または第11群に比べて不利な点は,静止機器 の占める床面積が大きいことと高価なことである。一般に回転励磁 機の価格は,kWが同一でも回転数によって変わり,高速であるほ ど安くなる傾向にある。したがって,低速の水車発電機用直結励磁 機とならば競争できる価格であっても,同一容量の g-ビン発電機用 励磁機としては不利となる。 しかし, S(自励) は別としても, T(サイリスタ) はまだ発達途上の 方式であり, 将来 サイリスタ の大容量化ならびに量産化が進み価格が 下れば, 大容量 タービッ発電機の励磁方式として広範囲に普及する可 能性もある。

以上を総合すれば、タービン発電機の励磁方式についての現時点での推奨基準は次のようになる。

(1) 事業用大容量発電機には ブラシレス 励磁方式が最適である。

(2) 自家用中小容量発電機には、一般的に、 ブラシレス 励磁方式 ならびに交流励磁方式を推奨する。いずれを選ぶかは ユーザーの好み にもよるが、腐食性ふんい気などでスリップリングの保守が問題になる ような場合には、 ブラシレス 励磁方式のほうが適切である。

(3) 自家用発電機で系統との連系がないか,連系はされていて も単独運転に近い場合には,負荷変動が大きければ,自励(複巻) 方式ならびに サイリスタ 励磁方式が適切である。

もちろん,価格,励磁装置を置くためのスペースあるいは軸長に対 する制限などは,発電所計画に当たって常に考慮すべき事項である ことは論ずるまでもない。

## 8. む す び

大容量火力ならびに原子力発電の進歩とともに事業用 タービン発 電機の励磁容量は急速に増大し、従来の直流励磁方式に代わって整 流器励磁方式が広く利用されるようになった。当社では、その中で も特に大容量機に適性を有する ブラシレス 励磁方式の開発に力を注い できたが、電力会社で計画に当たられるかたがたのご理解により、 現在までに3台の大容量機をこの方式で完成し、12台を製作中であ る。

また自家用 タービン 発電機についても,保守の簡単化と性能の向上 を目ざしており,特に応答速度の速い自励方式ならびに サイリスタ方 式のほかに,一般的用途に適する ブラシレス 励磁方式および交流励磁 方式の開発を完了し,使用条件に最も適した励磁系を供給できるよ うに心掛けている。

本文は、タービン発電機の励磁系全般について最近のすう勢を紹介 するとともに、各方式の利害得失ならびに計画に当たって考慮すべ き事項をなるべく一般的に記載したつもりである。本文が励磁方式 選定の一助になれば、望外の幸せである。

なお,執筆に際しては長崎製作所の関係者のかたがたのご援助を 受けた。誌面を借りて謝意を表したい。

#### 参考文献

- (1) 武田,林ほか:三菱電機 35, No. 6 (昭36)
- (2) 加来,森:三菱電機技報:40,1,750(昭41)
- (3) 甲斐,長良ほか:三菱電機技報 40, 1,717 (昭 41)

UDC 621. 313. 322-713. 1. 001. 2

# 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 克寬\*\*

# Basic Design of Water-Cooled Turbine Generators

Kôbe Works 🛛 Moriya SHIKI • Takashi KAI

Central Research Laboratorys Norio OISHI · Katsuhiro AKASHI

In regard to water cooling of machines which comes into employment inevitably for future large capacity turbine generators, home and oversea situations and principal subjects are outlined herein together with an explanation of basic design as a primary item.

Design conditions are discussed about the extent of water temperature, water pressure, water velocity and specific resistance of water. Advantages and disadvantages of the various arrangments on strands are described from the viewpoint of eddy current losses in the strands. Discussion is also made on the whole construction in combination with other parts. As for large capacity machines a style combining 4 rows of hollow strands and solid ones is the most well balanced. Whether to provide one flow or two flows of water passage is to be decided by the capacity of installations. The rotor shall be of a pressurized gap cooling system. These are the main features.

# 1. まえがき

当社が現在事業用タービン発電機の冷却方式に採用している内部冷 却は,昭和28年にWestinghouse社(以下W社と略す)において 誕生した世界最初の水素直接冷却方式であり,その後に各社におい て誕生した他の直接冷却方式に比べ,構造簡易・工作法容易である ので,信頼度と価格の面より見てきわめて卓越し,広い容量範囲に わたって適性を持っているので,最近の大容量機でも,冷却効果の 部分的改善を加味して,なお製作中である。

しかしながら、冷却効果そのものを考えた場合、木が最良の冷却 媒体であり、超大容量機に対する考慮から、当社神戸製作所と中央 研究所が一丸となって、昭和 37 年より固定子 コイル 木冷却の詳細の 研究を開始し、W社とも緊密な連絡を保ち、試作と実験および検討 を重ね、すでに研究完了しているので、本誌にその結論の一端を発 表したい。本編は基本設計を解説し、コイル・絶縁 ホース や水系統・ 腐食問題・モデルコイルテスト については、それぞれ単独の編としてまと めてあるのでご参照いただきたい。

## 2. 水冷却発電機のすう勢

#### 2.1 大容量機での考慮点と水冷却の目的

今後の大容量 タービン 発電機の 計画 における 重要な考慮点はつぎ のとおりである。

- (1) 単機容量の飛躍的増大に応じらること(効果的冷却法)
- (2) 低価格
- (3) 高効率
- (4) 系統条件に適合した安定度(過渡 リアクタレスの上限)
- (5) 高信頼性と運転保守の容易さ

これら要点の中には、たとえば(2)と(3)、(2)と(4)のように 互いに矛盾した要求があるので、計画にあたっては単に個々の要求 を満足するだけでなく、全体としての協調を考えればならない。

最近世界各国で、 固定子 コイル の水冷却がかなり普及したが、 と れは主として(1)の理由によるものであり、付属的に(4)の目的も ある。

一般にいわれている水冷却の目的は

530 \* 神戸製作所 \*\* 中央研究所(工博)

(1) 冷却効果が良く、小型軽量とする。

- (2) 冷却媒体循環のための動力を減らし、効率を良くする。
- (3) スロット深さを浅くして、 温渡 リアクタンス を小さくする。

(4) コイルの温度制御がやりやすく、絶縁寿命を長くする。

であろう。

2.2 内外の情勢

発電機の冷却に液体を使うという アイデア はかなり古く,初期のも のには,固定子と回転子を仕切り,固定子内部を油に浸漬する間接 油冷却もあったが,主絶縁での温度差が大きく,大容量機には不適 当である。

世界最初の液体冷却発電機は,昭和 30 年に GE 社で完成してい る。との機械は 260 MVA 3,600 rpm 18 kV であり,固定子 コイル のみの油冷却であった<sup>(1)</sup>。油は タービン 側より絶縁 ホース を通して上 ロ コイル に入り,スリップリング 側から位相 リングを通り,下口 コイル か ら タービン 側に帰える方法であり,コイル は中空導体式であった。そ の後同社は,全面的に水冷却としている。

英国においては、3 メーカー が合併以前の GEC 社、AEI 社、EE 社にておのおの単独に水冷却を採用していた。 いずれも コイル は中 空導体式である。

BBC 社では,液体冷却としてあとあとの水冷却を考えて初めに 油冷却 260 MVA を製作し<sup>(2)</sup>,その後水冷却と油冷却と両方製作し ている。水冷却も油冷却も全く同一構造で,油冷却採用の場合は大 部分客先要求のためであると言っている。コイル 導体は中空素線と中 実素線の組み合せ式であり,4列配置となっている。中実素線は厚 さの薄いものとし,5段から8段の中実素線に1本の厚い中空素線 という配置であるが,銅の中空素線の代わりに単なる冷却管として ステンレス 管のものもある。

ドイツの シーメンス 社・AEG 社のものは、4 列中空素線式である。 ソ 連では定格を標準化しており、200 MW、300 MW を水冷却と 内部冷却の2 種類とし 500 MW, 800 MW を水冷却とする模様であ る。

われわれの提携しているW社では木冷却 907 MVA 3,600 rpm 26 kV 機を昭和 43 年完成し,その後木冷却として 2 極機 900 MVA 級, 4 極機 1,200 MVA 級に多数製作中である。

表 2.1 各種流体の熱的性質 (20°C の値) Thermal properties for various fluids (value at 20°C).

4	b	1	1	王 力 ata	比重量 γ kg/m <sup>3</sup>	定臣比熱 Cp kcal/ kg°C	動粘性係 数 <sup>ッ</sup> m <sup>2</sup> /sec	熱伝導率 入 kcal/ mhr°C	プラント ル数 Pr	ヌッセル ト相関係 数 m
空			戾	1	1.161	0.240	0.154	0,022	0.71	0.021
~	IJ	ウ	4	1 1.5	0.1661 0.2497	1.251	1.174 0.784	0.1193 (0.130)	0.736	0,021
				1 2 3	0.0836 0.1672 0.2508		0,1061 0.0531 0.0354			
水		茶 4 0.3344 5 0.4180 21 1.756		3.42	0.0265 0.0212 0.00505	0.160	0.021			
炭	餀	Ħ	x	1	1.840	0,202	0.0801	0.0136	0.788	0.021
 ۲	ラ	ンス	油	1	866	0.452	0.365	0.107	481	0,027
7	ピン	្រុ	ー油	1	871	0.442	0.150	0.124	168	0.027
メラ	ドルク	ロラ	1 F	1	923	0.379	0.00293	3 0.140	2.63	0.024
7	V	オ	v	1	1,330	0.231	0.00198	3 0.0626	3.53	0,024
エラ	ドレン	グレコ	JL	1	1,117	0.569	0.192	0.215	204	0.027
		水		1	998.2	0.998	0.0100	0.515	7.03	0.027

# 表 2.2 水とトラレス 油の冷却効果 Cooling effect of water and transformer oil.

(圧力損失を同一とした場合)

流 体	流 通	熱 容 量	熱伝導率	動力
水素 (大気圧)	1.0	1.0	1.0	1.0
トランス油	0.0052	9.8	3.5	0.0052
<b>水</b>	0,0072	18.0	10.1	0.0072

わが国においても、GE 社よりの輸入機 442 MVA、625 MVA、700 MVA の  $\rho_{D,Z,J,U}$ 、光後をはじめ、運転に入っているものが次 第にふえてきており、その運転経験も報告されている<sup>(3)</sup>。

# 2.3 冷却媒体の比較

#### 冷却液体として望まれる性質は、

- (1) 熱的性質において冷却効果の大きいこと。
- (2) 絶縁性の良いこと。
- (3) 化学的・熱的に安定で劣化しないこと。
- (4) 火災の危険が少ないこと。
- (5) 氷点が低く、沸とう点も妥当な値であること。
- (6) 維持費の安いこと。
- があげられる。

冷却に使用されうる各種流体の熱的性質の比較を表 2.1 に示す。 表中の  $C_{p\gamma}$  を単純に比較すれば、水は油の 2 倍である。

実際には熱容量のみでなく、熱伝達率 h も比較する要があり、こ れは表中の記号を使用して、乱流の場合

> $h = rac{m}{g} [C_{p \gamma \nu^{0.2}} P_r^{-2/3}] [V^{0.8} / D^{0.2}]$   $g : 重力の加速度 (m/s^2)$  V : 流 速 (m/s)D : 冷却管の等価直径 (m)

で求めることができる。これから圧力損失が同一という条件で、水 とトランス油の冷却効果を比較すると大気圧水素を基準に表わして 表2.2のとおりとなる。すなわち、水は冷却性能の点で卓越して いる。

その他の条件を比較しても、木は化学的に安定で不燃性で、入手 しやすく安価という付加的利点があり、氷点・沸とう点も妥当な範 囲である。しかし、絶縁性の見地からは水の純度を妥当な範囲に維 持する要があり、このための水処理装置が必要となる。トランス油は 絶縁性で水よりもすぐれているが、ガスを発生して油の劣化を促進 する可能性があること、粘度が温度によって変化しやすいこと、可 燃性であることなどの問題もあり、総合的に見て、発電機の冷却媒 体として、水の低うが性能面よりも発展の現状から考えても妥当で あると言える。

#### 2.4 水冷却の主要項目

水冷却発電機の場合,発電機が全体的に協調のとれた性能をもつ 設計であること,水漏れのないこと,構造および材料が寿命的に十 分なものであること,保守が容易で信頼性のあること,が肝要であ るが,これらを大分類すると,発電機の基本設計,固定子コイルや 絶縁 ホースの構造および主として機械的問題,冷却水系統の構成と その制御,使用材料の水による腐食 データと各要因の影響などがっ ローズアップされる。

以上の分類からさらに主要項目を拾うと

- (1) 基本設計
- (a) らず電流損と冷却効果を考え合わせた コイル 構成

(b) 全固定子 コイル を考えた水通路 および 回転子を含めた全体 構造

- ~ (2) 固定子 コイル と絶縁 ホース
- (a) コイルヘッダの構造とろう付け法
- (b) 絶縁 ホースの材料と電気的・機械的特性および寿命試験
- (c) 漏れの検査法
- (3) 水系統
- (a) 構成機器の選定
- (b) 製作および運転保守の要領の決定
- があり、これらに共通する基本的問題として
  - (4) 腐 食
- (a) 使用材料の水による腐食 データ
- (b) 溶存 ガス・水の比抵抗・温度・流速など各要因の影響
- (c) 流電腐食

がある。最後にこれらの単独の結論の総合的試験として,実物機と 同様の モデルコイル に水処理装置を設けて,実機運転条件と同様の長 期間試験が,総合的回答を与えることになる。すなわち,

(5) モデルコイルテスト

となる。

本誌では上記分類にしたがい各編に分割, 解説しているので, 関 連事項を総合的に対照判読いただきたい。

## 3. 水冷却 固定子コイルの設計条件

水冷却 固定子 コイル の設計に際し、コイル 寸法を決める基本となる 各種条件を述べる。

#### 3.1 水 温

水温は,冷却水系統中のあらゆる個所において,沸とう点以下に 保つ必要がある。大気開放式冷却水系統の場合は,冷却水系統内で 大気圧以下の水圧になる点はないから、大気圧における沸とう点  $100^{\circ}$ C が水温の制限となるが、余裕も含めて、  $\exists \ell_{\mu}$  出口水温を 85  $^{\circ}$ C 以下に保つのが妥当であろう。 設計目標としては、さらに  $10^{\circ}$ C 程度の余裕を取り、  $\exists \ell_{\mu}$  出口部での水温と表面温度上昇の和を 75  $^{\circ}$ C として、設計するのが一般的である。

コイル入口水温は、USAS 規格 C 50–13 に準拠して 45~50°C の範 囲内に定めることになる。この値を 50°C とするほうが、45°C の場 合より冷却水 2-5 が小形化されるので、50°C とするのが有利であ る。冷却水の温度上昇は 50°C から 75°C までの 25°C であるが、水 の比熱は大きいので、この程度の温度上昇で十分に冷却できる。

したがって、水温の計画値は次のとおりである。

コイル 入口水温	50°C	
コイル 出口水温	85°C (75°C 設計目標)	

# 3.2 水 圧

機内冷却水系統(すなわち入口マニホルドから固定子 コイルを経て, 出口マニホルドまで)のあらゆる個所において,水圧を機内 ガス 圧よ り低く保ち,冷却水系統から機内へ漏水する可能性がないようにす る。水圧と機内 ガス 圧との差圧を 0.3kg/cm<sup>2</sup> に選び,最低の定格 ガ ス 圧を 2 kg/cm<sup>3</sup>g とすると,機内での許容最高水圧は 1.7 kg/cm<sup>3</sup>g となる。 機内冷却水系統の中では,固定子 コイル の圧力損失が最大 であるので,コイルの水速, フローの選定などは,これを考慮して決 定する。

機内の許容最高水圧 1.7 kg/cm<sup>2</sup>g

#### 3.3 水速

中空素線内の冷却水の水速が高すぎると腐食量が増し、場合によっては キャビテーション を発生する。また、低流速では流れが層流に遷移する値、あるいは発生した気泡が流れにくくなり、熱伝達を阻害するような範囲が制限値となる。 これらの点につき、試作 コイル での試験、腐食試験の データ などを比較検討した結果、冷却水流速の制限値は 0.4~4.0 m/s であることがわかった (別稿「水冷却発電機 における腐食」、「水冷却発電機 モデルコイル 試験」を参照)。しかし、コイル の設計に際しては、 フローの選定、中空素線肉厚の選定などにより、水速の決定には自由度がかなりあるので、 実機の コイル の水 速をこれらの上限・下限近くに取る必要が生ずる可能性は少なく、設計値としては次の範囲を選ぶ。

コイル 中空素線内の水速 0.5~2.0 m/s

## 3.4 冷却水の抵抗範囲

水の比抵抗, すなわち水の純度は, 腐食および電気的特性の両者 に関係がある。腐食については, 種々の純度の水につき腐食試験を おこなった結果, 電導度  $2\mu \sigma/cm(25^{\circ}C)$  以下であれば十分である ことがわかった(別稿「水冷却発電機における腐食」参照)。絶縁  $\pi$ -ス部分での漏れ電流による電力損失は, 上記の純度の場合,発電 機1台分で1kW以下であって問題なく, 冷却水が正常に流れてい れば沸とうの可能性もない。また,絶縁  $\pi$ -スの沿面せん(閃)絡も 上記純度の水を管内に流している場合には,  $\pi$ -スの外部で起こるこ とが試験により確かめられた(別稿「水冷却発電機固定子 コイルと絶 縁  $\pi$ -ス」参照)。

なお水の純度は,温度によって対数的に変わるので,一定の基準 温度の値に換算して表わすのが普通であり,本文中では 25℃ での 値で表示してある。

以上により、水の純度は、電導度で表わして 2µ∪/cm(25℃) 以 下であればよいことがわかったが、設計条件としては、さらに余裕 を取り,電導度 0.5 μ<sub>0</sub>/cm(25°C)以下, すなわち比抵抗 2 MΩ-cm (25°C) 以上とする。

木の比抵抗(純度) 2 MΩ-cm(25°C)以上 (1 MΩ-cm で警報)

# 3.5 絶縁ホースの長さ

絶縁  $\pi$ - $\chi$  は、絶縁耐力の点から必要な長さが要求される。 定格 電圧 24 kV に対する絶縁耐力試験値 51 kV, および衝撃絶縁耐力 試験値 90.1 kV に対して、 $\pi$ - $\chi$ の長さは 500 mm 以上あれば十分 であることが、試験により明らかとなった(別稿「水冷却発電機の 固定子 コイル と絶縁  $\pi$ - $\chi$ 」参照)。この長さは 将来予想される 定格 電圧値 26 kV, または 28 kV に対しても十分余裕を持っている。

このほか,絶縁 ホースは、 コイルの熱膨張に追随する可とう性などの構造上の理由からも、ある程度の長さが必要である。これらの点は別稿「水冷却発電機の固定子 コイルと絶縁 ホース」に詳述する。

#### 3.6 中空素線の高さ

4.3節(4)に示すように、中空素線の高さが高くなると、うず電 流損が急激に増大するので、できるだけ高さを低くするとなが望ま しい。しかし中空素線の高さは、いくらでも低くできるものではな く、冷却水の圧力損失、中空素線の機械的強度、素線の製造技術、 □1ルの成型技術、冷却水の詰まりの可能性などを総合的に判断して 決定しなければならない。

# 4. コイル設計

固定子 コイルの設計で、最初に考慮しなければならない基本事項 は次の3点である。

(1) 損失を最小にすること。

この損失には,固定子 *Г*<sup>2</sup>**R** 損失,うず電流損失ならびに冷却水の循環動力を含む。

(2) 温度上昇を最小にすること。

コイル 出口の冷却水最高温度は,水量を加減することによって調整 できるが,導体の局部最高温度と冷却水最高温度との温度差は コイル 構成によって決まる。

(3) コイルの製作が容易で、作業の信頼性が高いこと。

とくに、 冷却水の出入口となる コイルエンド 継手部分の構造は、作 業性に直接に関係する。

水冷却固定子 コイルの断面構造としては、図4.1 に示すように、 中空導体式・ベットチューブ 式ならびに中空一中実組み合わせ式の3種 類がある。これらの方式にはそれぞれ利害損失があるが、比較検討 を行なうには、まず、コイル内に発生する熱損失を正確には握する必 要がある。このため、導体内のうず電流損失について解析を行ない、





三菱電機技報・Vol. 43・No. 4・1969

さらに、導電紙法により導体内電流分布の模擬試験を実施し、精度 の高い計算式を得た。

これに引き続いて 400 MVA 3,600 rpm 機を対象として,図4.1 に示した各種方式につき具体的に水冷却固定子 コイル を設計し,現 内部冷却機も含めて発電機全体としての総合性能を比較検討すると ともに,実物大 モデルコイルの試作と機能試験を行ない、コイルエンド 継 手部ろう付け法や検査手順など,工作上の諸問題を究明した。

さらに、この試作検討結果に基づいて、733 MVA 機の詳細設計 と試作を行ない、大容量水冷却固定子 コイルの設計ならびに製作上 の問題点をあらゆる角度から研究した。

以下に、上記検討結果の概要を述べる。

4.1 うず電流損

スロット内に収められた導体に交流電流が流れるとき、この電流に よる漏れ磁束によって導体中にうず電流を生じ、直流 PR 損失のほ かにいわゆるうず電流損失を発生する。中実素線を使用しスロット内 でレーベル 転位をほどこした固定子 コイル のうず電流損失の計算式は 従来からよく知られており、全節巻の場合の鉄心内うず電流損失と 直流 PR 損失の比  $K_s$  は、上口 コイル と下口 コイル を平均して次式で 与えられる。

ここで d:素線厚さ (cm)

n: 1 コイル あたりの素線段数

*b<sub>r</sub>*: スロット内の全素線幅 (cm)

*a*:スロット幅 (cm)

f : 周波数 (Hz)

上式で nd は スロットの深さが与えられればほとんど一義的に決まるから、うず電流損失はほぼ d<sup>2</sup> に比例する。

水冷却 コイル に使用される 中空素線内の うず電流損失の計算法に ついては、これまであまり発表されていないが、解析の結果、素線 段数が5 段を越える場合には次式で計算できることがわかった。

$$K_{s} = 0.4d^{2} \left( nd \cdot \frac{b_{\tau}}{a} \cdot \frac{f}{50} \right)^{2} \left( 1 - \frac{b'd'}{bd} \right) \left( 1 - \frac{b'd'^{3}}{bd^{3}} \right) \cdots \cdots \cdots \cdots (4.2)$$

ここで, d:素線厚さ (cm)

Ì

d': 中空部の高さ (cm)

b:素線幅 (cm)

b':中空部の幅 (cm),図4.2参照

これを中実素線のときの式(4.1)と比べると、右辺の第3項と第 4項が新しく係数として付け加えられている点だけが異なるが、こ れらはいずれも中空素線の形状だけによって決まる係数である。し たがってこの場合にも、形状が類似であれば、うず電流損失はほぼ d<sup>2</sup>に比例することがわかる。

中実素線と中空素線内のうず電流損失を求める上記2式が実際と よく一致するかどうかを調べるため、導電紙法によって素線内電流 分布の模擬試験を行なったが、その結果の一部を図4.3に示す。 図は素線1個の高さ方向の電流分布を示したもので、a図は当の素 線より下側にある素線全体の電流 $I_0$ による漏れ磁束によって当の 素線内に生ずるうず電流分布を示し,b図は $I_0$ のほかに当の素線自 身にも電流 $I_i$ を流したとき,有効電流とうず電流の合成値がどんな 分布になるかを示したものである。図で明らかなように、計算値と 測定値は試験誤差の範囲内でよく一致しており、上記計算法の妥当 性を確認することができた。





2 4.3 導電紙法による素線内らず電流分布模擬試験の一例 Test result of strand eddy current by a conducting paper method.

中空素線は内部に冷却水の通路となる中空部分を設ける必要上, 厚さを中実素線の場合の2~2.5 倍 とするのが普通である。他方中 空素線の形状については、素線製造技術や コイル 成形条件から肉厚 の極端に薄いものや厚いものは実用が困難で、d'/d および b'/b の 値にはおのずから一定の限界があり、これに伴って式 (4.2) の右辺 の形状係数  $(1-b'd'/bd)(1-b'd'^3/bd^3)$ の値もほぼ 0.5~0.8 の範囲 に落ち着く。したがって、中空素線の場合のうず電流係数  $K_s$  は中 実素線の場合の 2~5 倍程度となる。

このように中空素線内のうず電流損失が中実素線の場合よりもか なり大きいという事実は, 水冷却 コイルの設計に当たってとくに注 目すべき点である。

4.2 コイルの構成

前述のように水冷却固定子 コイルの構成は, 基本的には次の3種類に分類できる(図4.1)。

(1) 中空導体方式

水の通路となる中空素線を同時に導体として用い,2列または4 列多段に積み重ねたものから構成する。各素線はお互いに Röbel 転位されている。

(2) ベントチューブ 方式

中央に1列または2列の ベットチューブを入れ,その両側に2列また は4列の中実素線を多段に積み重ねる。ベットチューブは水の通路とし てだけ用い,導体とはしない。中実素線はお互いに Röbel 転位し, 全体的に現内部冷却式 コイル と類似している。

(3) 中空・中実組み合わせ方式

中空素線と中実素線を交互に積み重ねたものを2列または4列配 置する方式で、中空素線は水の通路と導体を兼ねている。中空素線



スロット深さを100%以上に増しても効率の改善にはほとんど寄与し ない。すなわち中空素線方式の場合には、素線高さをできるだけ低 くすることが必要であるが、中空素線の機械的強度・製造技術など から、素線の高さはある範囲内に制限される。

(2) ベットチューブ方式の場合には、中空導体方式のように素線高 さに対する制限が存在しないので、素線を薄くしてうず電流損を滅 らしたり、スロットを深くして素線内熱損失を滅じ、効率を改善でき るという利点がある。ただし、この方式では、素線絶縁中の温度上 昇が大きいという欠点があるが、水冷却の場合には、全温度上昇を 適当な範囲内に納めることは、それほど困難ではない。またベットチ ューブ方式では、中空素線方式に比べて、水に対する伝熱面積が減少 するため表面温度上昇が高く、ことに層流域において著しいので、 ベットチューブ寸法および水速の選択を適当にする必要がある。

ベットチューブ材質としては、非磁性・高抵抗の耐食性金属で、かつ 薄肉の管に適した物を選ぶ。材質の点よりは、むしろ コイル 端部に おける ベットチューブ 相互の絶縁や、 ヘッダ 取付け法に問題があり、本 方式を早急に実用化することは困難である。

(3) 中空中実組み合わせ方式は、温度上昇の点でも損失の点で も、前二者の中間的性格を有している。またこの方式で注目すべき 点は、素線絶縁による温度上昇が非常に小さいことで、これは中実 素線が長い幅方向の面で中空素線に接しているからである。

したがって、本方式は現在技術的に実現可能な構成方式のうちで、 最もすぐれていると考えられるものであり、当社においても、本方 式を標準として開発を進めてきた。

(4) 水素内部冷却方式を以上の各種水冷却方式と比較してみる と、水素内部冷却方式でも、温度上昇は十分に実用範囲内にあるこ

図 4.5 (a) 各種冷却方式 コイル 構成における温度上昇と 圧力損失の関係 Relation between temperature rise and pressure drop in

圧力損失  $\Delta P$  (kg/cm<sup>2</sup>)

Finf-susses

2

various coil construction.

1 段に対して中実素線2 段を組み合わせる例が多いが、3 段とした 例もあり、素線の配列の自由度は大きい。素線の配列次第で中空導 体方式に近いものからベントチューブ方式に近いものまで、弾力的な設 計が可能である。

これらの各方式にはそれぞれ利害得失があり,以下に 396 MVA 機について具体的に素線寸法を決めて比較した結果を述べる。

対象とした発電機の定格は,

396 MVA 3,600 rpm 19 kV 12,034 A

である。 木の流れは出入口を タービン 側に設ける 2 フロー 式とし, 位 相 リング も水で冷却するため, 結線は YY で 54 スロット とした。スロ ット 幅はすべて一定値に統一し, 前記 3 種の構成方式に対して, スロ ット 深さ 80 %, 100 %, 110 %の三つの場合, 合計 9 種類を比較し た。うず電流の計算法は前項に述べた方法による。

比較のために水素内部冷却方式で設計した場合も計算した。

図4.4,4.5は、これらの計算結果を図示したものである。 以上を要約すれば次の結論が得られる。

(1) 中空導体方式では、すべての素線に水が流れるので、素線 絶縁による温度上昇がなく、温度上昇が低いという利点がある。し かし素線高さが高いため、うず電流損が非常に大きく、しかも スロ ットを深くしても、うず電流損が増大するため、損失の合計は減少





と、素線内通風動力が水冷却に比べて非常に大きいことがわかる。 しかし通風動力の差は、水冷却(中空中実組み合わせ方式)における うず電流損の増分よりも少ないので、この場合欠点とは考えられな い。すなわち、ここではコイル構成方式の比較のために、396 MVA 機を対象として選んだが、396 MVA 級では、水素内部冷却方式を 強いて水冷却方式に変更すべき利点はないと言える。

#### 4.3 水冷却コイルの設計例

水冷却固定子 コイル の設計に際し,中空素線の高さや スロット 深さ などの各変数が,性能上にどのような影響を及ぼすかを示すために, 中空中実組み合わせ方式の固定子 コイル につき, 種々の計算を行な った結果を以下に述べる。

対象とした発電機は,

## 733 MVA 3,600 rpm 20 kV 21,159 A

である。水の流れは、タービン側からエクサイタ側への1つローとした。 冷却水温度の条件は、3章に述べたとおりで、すなわち、コイル入 口では50°C、コイル出口では、水温とコイル表面温度上昇を加えた温 度が75°Cとなるようにした。中空素線内面の熱伝達率は、水速に 依存するから、水量の決定には繰り返し計算が必要であり、このた め電子計算機 プログラムを開発した。このプログラムの概略手順は次の とおりである。

(1) 与えられた スロット 寸法に対し,絶縁等に必要な寸法を除いて,素線寸法を自動的に決める。ただし,素線寸法の概略の高さは ィップット で与える。

(2) うず電流損を含む熱損失を計算する。

(3) ある水量を仮定し、その値をもとにして、上口 コイル 出口 での水温と表面温度上昇の和が 75℃ になるように近似を進め、収 れん(斂)するまで続ける。

(4) 前項によって求まった上口 コイル 入口水圧に対し, 下口 コ イル 水量を計算し温度上昇を求める。したがって,下口 コイル 出口部 の温度上昇はに 75°C なるとは限らない。

計算結果の一部を紹介すると次のとおりである。

(1) スロット 深さの影響

前記の条件の下に、中空素線の高さを約5 mm, 中空素線の肉厚 は 1.0, 1.3, 1.5 mm の三つの場合について、スロット 深さの影響を調 べた。図 4.6 には、スロット 深さを 125 %から 90 %まで変化させた 場合の全損失(直流損とうず電流損の和)を、図 4.7 には、その 場合に温度上昇を一定とするような全水量の変化を示す。

本計算結果によれば、スロット深さを深くしてゆくと、うず電流損 が増加するため、ある深さ以上では逆に全損失が増大する傾向にあ り、全損失・全水量ともスロット深さのある値で最小値を取る。この 場合にはその深さは100%付近である。したがって水冷却コイルの 設計の際には、スロット深さをこの最適値付近に選ぶのが望ましいが、 スロット深さの減少に対し、損失の増加は急激ではないので、発電機 の重量・体格の減少のためには、最適点より少し浅い目のスロットを 採用することも有りうる。

(2) 中空素線の肉厚

前項の計算において,中空素線の肉厚を1.0,1.3,1.5 mmの範囲 で変化させても,全損失・全水量はほとんど変化しない。これは, 肉厚を厚くして銅断面積を増し直流損を滅じても,うず電流損の増 大により相殺されて,全損失があまり減少しないためである。ただ し,全水量に変化のないまま,管路面積が変わるので水速・圧力降 下は大きく変化する。

したがって中空素線の肉厚は、中空素線の機械的強度、製造技術 や水速の条件などを考え合わせて決定する。

(3) 上口 コイル と下口 コイルの素線段数の差

うず電流損が下口 コイルよりも上口 コイル に大きいところから,上 口 コイルの コイル 高さを下口より高くし,素線高さを変えて,上口 コ イルの温度上昇を低くすることは古くから試みられており,当社で も現内部冷却式固定子 コイル に採用してきた。

水冷却固定子 コイル の場合に、上口 コイル・下口 コイル の素線段数 を変えて、全損失・水量の変化を求めた結果を図 4.8 に示す。本 図において興味のある点は、下口 コイル の断面を大きくするほうが 全損失は減少するということであるが、これは中空素線の高さが他 の条件から決まってしまい、しかもかなり厚いために、上口 コイル







図 キ・ラ 中 空 糸 練 向 さ の か 音 Relation between hollow conductor height and other parameters. 断面を大きくしても、直流損の増分よりも、うず電流損の増分のほ うが多いためである。

図においては、1 つローの計算をおこなっているので、上口 コイル 断面を大きくした場合、上口 コイルの損失の増分より中空素線数の 増加のほうが多く、一定温度上昇に対する水量は減少しているが、 2 つローの場合には、水量はほぼ全損失に比例した量を流せばよいの で、逆に増加することになる。

(4) 中空素線の高さ

中空素線の高さを3,4,5 mm に変化させた場合の,全損失の変化の様子を図4.9 に示す。 容易に予想されるように,素線高さを





低くするほうが全損失は減少するので、素線はできるだけ低くする ことが望ましい。

(5) 1<sub>フロ</sub>- と2<sub>フロ</sub>- の比較

冷却水が タービン 側から エクサイタ 側にのみ流れ, 上口 コイル・下口 コイル 内の流れが平行となるような配置を 1 つロー と呼ぶ。他方,上 口 コイル 内を タービン 側から エクサイタ 側 に流れた冷却水が, エクサイタ 側 コイル 端で反転し,下口 コイル を タービン 側に流れるような配置を 2 つロー と呼ぶ (図 6.3)。

一定の発生熱損失を除去するに必要な冷却水量は、いずれの配置 でもあまり変わらないから、2つローではコイル内の水速が約2倍と なり、圧力損失が約4倍となる。鉄心長の比較的短い機械で、1つ ローでは流速が低く、層流域に近づくような場合には、2つローが採 用され、他方、大容量機では、圧力損失が高いので、1つローが採 用されるのが一般的傾向である。

温度分布の点を見ると、 $2 ext{ > 0 - }$ では、下口  $ext{ > 1 }$ の温度が上口  $ext{ > 1 }$ ルより全般的に高く、両  $ext{ > 1 }$ ール間に伸び差を生ずることになるが、 1  $ext{ > 0 - }$ の場合には、逆に下口  $ext{ > 1 }$ ーの場合には、逆に下口  $ext{ > 1 }$ ーの場合には、ごに下口  $ext{ > 1 }$ の温度が低くなる傾向があるので、  $ext{ 1 }$   $ext{ > 0 - }$ が特にすぐれているともいえない (図 4. 10)。

# 5. Pressurized Gap 冷却回転子

水冷却は、将来においては、 回転子 コイル の冷却にも用いられる であろうが、 回転子 コイル の水冷却は固定子 コイル の場合に比べ、 さ らに困難な点が多く、 現時点においては、 水冷却固定子 コイル に水 素内部冷却回転子 コイル を組み合わせた冷却方式が 最も 標準的であ る。

当社では、水冷却固定子 コイルの用いられるような大容量機に対 し、4極では、現に内部冷却回転子 コイルを採用し、2極では、さ らに進歩した Pressurized Gap 冷却回転子 コイルを採用する方針で あるので、ここで、水素冷却方式に関する事柄ではあるが、Pressurized Gap 冷却方式につき、簡単に説明を加えたい。

現内部冷却の回転子通風では、 冷却 カス は 回転子両端部で コイル



図 5.2 高圧 ジーン 数 と回 転子 AT との 関係 Relation between pressurized zone numbers and rotor AT.



図 5.3 試作した pressurized gap 冷却回転子 モデル Model of pressurized gap cooled rotor.

中に入り, 胴体中央部から ギャップ に排出され, コイルの両端部は別 個に冷却されている。つまり 1/2 コイル 長について考えれば, 冷却回 路としては4並列回路の構成である。しかし鉄心長の長い機械では, 回転子 コイル 中の小さくて長い通風路に, コイルの銅損を吸収するに 十分な量の水素 ガスを流すには, かなり高圧の軸流 づロつが必要で ある。

この冷却効果の改善には、冷却回路並列数の増加が望ましい。コ イル 直線部で並列回路数を増加するには、風の取り入れ、 取り出し を ギャップ で行なわなければならないので、 図 5.1 に示すような構 造となる。 すなわち、ギャップ 部分は軸方向にいくつかの ジーン に仕 切り、高圧 ジーン への風は、 ブロフ 風圧を コア 背部より ダクト を通し て ギャップ にもたらし、 コイル 冷却後 ギャップ 低圧 ジーン に出た風は、 やはり ダクト を通して コア 背部に通す。 ギャップ 部分の仕切りのため の バリヤ は、回転部 バリヤ と固定部 バリヤ から成り、ロータ そう入に支 障ない程度の大きさの バリヤ を回転子に焼ばめして、回転部 バリヤ と し、ロータ そう入後、固定部 バリヤ を鉄心端より スロット を利用して取 り付ける構造である。回転部 バリヤ と固定部 バリヤ との間には、振動 やたわみに対して接触しない程度の スキ を設ける必要があり、これ は高圧 ジーン から低圧 ジーン への風の漏れを生ずるが、全体通風に対 しては大きな影響はない。この方式を Pressurized Gap 冷却方式と 称する。

本冷却方式は, ロータ表面の周速を利用して通風をおこなう他社の 方式と一見類似しているが,他社の方式においては,通風に利用で きる圧力が ロータ周速によりおのずから制限されるのに対し, ブロワ による圧力を,自由に加えて,必要な冷却効果を得られる点が特長 である。

高圧 ジーンの数は、バリヤの数を増すことにより任意に定めること ができ、この数の多いほど冷却効果は良くなる。図 5.2 は ジーン数 の増加と回転子 AT の関係を示すものであるが、回転子 AT は ジー ン数の増加につれ飽和する傾向を持っており、加工や組立の点から も、2 高圧 ジーン・3 高圧 ジーン程度が適当である。

当社においては実物大の固定部 バリヤ を試作し、 実機と同じ長さ の模擬鉄心に組立てることにより、バリヤ 各部品の製作経験ならびに 組立方法を確立した。図 5.3 は試作した Pressurized Gap 冷却回 転子 モデル を示す。

## 6.構造

図 6.1 に 2 極の水冷却発電機 (733 MVA 級)の断面構造を示す。 全体の構造は、通常の タービン発電機とほとんど変わらず、主として 固定子巻線の構造、 およびその入口・出口 マニホールド が付属する点 が相違点である。

#### 6.1 固定子コイル

固定子 コイルは、中空中実組み合わせ方式(図 4.1)とし、厚さ 比がほぼ 1:2 の中空素線と中実素線を、中空1段に対し中実2段 の比で組み合わせて構成する。大容量機であるので、スロット数選定 の関係から、素線配列は4列となる。水冷却固定子 コイル において は、ハーフコイルの両端部で全素線が ヘッダにより短絡されるので、う ず電流防止のため、従来の冷却方式の場合とは異なった特殊な転位 方式が必要である。

中空素線は、角形に線引きした2重 ガラス巻き平角銅管で、JISの 4号平角銅線に準ずる材質である。中空素線はメーカーおよび当社受 取時に漏えい(洩)試験・通風試験を実施して、詰まり・断面のつぶ れがないことを確認した物を使用する。中空素線および中実素線の 面取り(R)は、あまり大きいとろう付けで完全に詰めることがむず かしく、あまり小さいのは素線自身の製法が困難で、無段のろう付 け試作により定めた最適値を選んでいる。

各 ハーフコイルの両端には、スリーブ状の ヘッダをろう付けし、さらに その外側に ヘッダキャップ をろう付けして水室を形成する(図 6.2)。 ヘッダキャップには、 さらに、冷却水の接続、 および上口 コイル・下口 コイル 間の電気的接続に必要な継手類を付属している。水管の接続お よび電気的接続の構造は、通常の運転における熱膨張差や、短絡現 象の条件を考慮して、必要な可どう(携)性および強度を有するもの とする。

当社においては、数次にわたり試作水冷却 コイルを製作し、ろう







図 6.2 コイル端部のつなき Connection of coil ends.

付け部の漏えいや各素線の詰まり・変形等のない,信頼性の高いコ イルを製作する技術を確立した(別稿「水冷却発電機 モデルコイル 試験」 参照)。

# 6.2 冷却水の供給排出

機外の冷却水系統から供給された冷却水は, ステンレス 配管により, 入口マニホルド に導かれる。入口マニホルドは, タービン 側の フレーム 内周 に環状に取り付けられた ステンレス 鋼管で, 絶縁 ホース の数に相当す る継手を設けてある。 冷却水は各継手から絶縁 ホース を経て上口 コ イル に入り, 励磁機側で上口 コイル から下口 コイル への接続水管を通 り,下口 コイル を タービン 側に流れて, コイル 端から絶縁 ホース を経て 出口マニホルド に流出する。 出口マニホルド から機内 ヘッドタンク に入っ た冷却水は, 配管により機外の冷却水系統へ戻り, 冷却されてふた たび循環する。

図においては、入口マニホルドと出口マニホルドをいずれもタービッ側 に設け、冷却水は、上口コイルと下口コイルを直列に流れる、いわゆ る2つローの場合を示したが、冷却水の流れを、上口コイル・下口コ イルに並列に流す1つローの場合には、出口マニホルドは励磁機側に設 ける(図 6.3)。この場合には、コイル両端に絶縁ホースを使用する ので、絶縁ホースの数は2つローの場合の2倍になる。マニホルドと外 部配管との接続つランジはマニホルド上部に設け、運転中万一冷却水 ポ ップが停止した場合にも、コイル中の水が落ちないように考慮する。 マニホルドのドレンプラグはこれとは別にマニホルド下部に設ける。

位相 リング および リードブッシングを 水冷却することも 可能であり, 図 6.1 は位相 リングを水冷却する構成を示している。

絶録 ホース (図 6.4) は、 テフロン のゆるく彎曲した ホース で、高い 電気絶縁性と内圧・外圧に対する十分な強度を有するものである。

General arrangement of water cooled turbine generator.









図 6.4 絶縁 ホース Insulation hoses.

絶縁 ホース は両端に ステンレス 鋼の取付金具を持ち,一端は コイル 端 ヘ ッダキャップの継手に,他端はマニホルドの継手に接続する。取付金具は フレアナット 式で,取付時 ホース に無理な曲げが加わらないように注意 する。 フレアナット 式継手を使用することにより,ホース両端の金具を コイル 組立時 フレーム内の 狭い場所で ろう付けする不便を除くことが できる。 しかしいずれにせよ, 励磁機側 コイル 端での上口・下口間 の接続水管はこの時点でろう付けせねばならないし,また運転開始 後に絶縁 ホースを取換える必要性もほとんど考えられないので,将 来ろう付け技術が発達すれば、ホース両端の金具はろう付けされるよ うになる可能性もある。

当社では、絶縁 ホース につき内圧・外圧を加えた ヒートサイクル 試験, その他の強度試験を実施した(別稿「水冷却発電機の固定子 コイル と 絶縁 ホース」参照)。また絶縁 ホース を含めて、コイルエンド の電気的接

三菱電機技報・Vol. 43・No. 4・1969



図 6.5 水冷却固定子 コイルモデルテスト Test of water cooled stator coils.

続 ・ 水管接続を実物大の モデルコイル について製作することにより種種の実際的経験を得た(図 6.5)。

# 6.3 その他の構造部分

固定子 コイル は水で冷却されているが,その他の回転子 コイル,固 定子鉄心等は,水素 ガス で冷却されるので,通常の内部冷却 タービン 発電機と類似の構造である。

発電機の  $s_{-t'_{2}}$  側に多段の軸流  $j_{00} \ge 4$  個の立型  $p_{-5} \ge a$  に  $\nu_{-4}$ 下部には Pressurized Gap 冷却  $n_{-9}$  の各高圧  $j_{-\nu}$ , 低圧  $j_{-\nu}$  に応じた入口および出口の冷却  $j_{3}$   $g_{7}$ ト を持っている。 これら n = 2 に応じた入口および出口の冷却  $j_{3}$   $g_{7}$ ト を持っている。 これら n = 3 の  $j_{7}$ ト は、もちろん  $\nu_{-4}$ 内に配置することもできる。  $f_{+\nu}$   $j_{7}$ は 5 個の  $j_{1}$ ト により、 2 高圧  $j_{-\nu} \ge 3$  低圧  $j_{-\nu} \ge 1$  に仕切られ、固 定子鉄心は各  $j_{-\nu}$  ごとに、  $g_{7}$ トピース 内を半径方向内向き、または 半径方向、外向きに流れる冷却  $j_{3}$  により冷却される。 回転子 2 イ  $\nu$  の冷却は 5 章に説明した Pressurized Gap 冷却方式である。

励磁機は ブラシレス 方式で、本図の場合には、容量が大きい(約 3,500 kW)ので、半分の容量のものを2台 タンデムにつないである。 しかし将来は、ブラシレス 励磁機も水素冷却とし、小形でかつ単機で、 この程度の容量のものが得られることになる。

なお,4極の原子力用 タービン 発電機に水冷却固定子 コイル を適用 する場合には、回転子 コイル が現内部冷却方式であるので、全体構 造は2極機の場合より、さらに内部冷却発電機に類似したものとな る。

## 7. 水冷却の特長と各種冷却方式の適用

直接冷却機では、冷却媒体の質量流を増加することによって冷却 効果を飛躍的に増すことができる。したがって、電流密度を上げる ことによって、回転子および固定子の アンペアターンを同一体格の間接 冷却機の数倍にまで増すことが可能となり、同一定格出力に対して は鉄心長を滅ずることができ、また鉄心長を同一とすれば定格出力 を2~4倍程度に増すことが可能である。

ただし一口に直接冷却といっても、固定子と回転子の両方に適用 する場合と一方だけの場合とがあり、また冷却媒体も水素 ガス、水 および油が実用に供されていて、これらの組み合わせは多岐にわた るが、そのうちで現在広く使用されているもの、ならびに今後大い に発達しそうなものは次の4種類である。

- a. 固定子:間接水素冷却,回転子:直接水素冷却
- b. 固定子:直接水素冷却,回転子:直接水素冷却

- c. 固定子: 水 冷却, 回転子:直接水素冷却
- d. 固定子: 水 冷却, 回転子: 水 冷却

このうち, a は約 300,000 kVA 以下の機械だけに利用され, d は 1,000,000 kVA を越える超大容量機向きで, 世界でも商用機として 運転にはいっているものはほとんどない。現在の大容量発電機はほ とんど皆 b か c のいずれかに属しているが, 固定子, 回転子とも直 接冷却であるための共通の利点のほかに, それぞれ次のような特長 を有する。

- (1) 内部冷却機の特長
  - 冷却媒体として水素 ガス だけを使用するので、冷却水循 環装置、純水装置、冷却水配管(ステンレス)などの付属設 備が不要である。
  - 水素 ガスは回転子軸上の高圧 ブロワ によって 機内各部を 循環するので、発電機が運転している限り冷却が停止す る心配がなく、運転の信頼性が高く、保守が楽である。
- (2) 固定子水冷却機の特長
  - 水は最良の冷却媒体であり冷却効果が良いので、固定子 コイルの断面積が ガス 冷却の場合より小さくてすみ、スロ ットの深さを浅くすることによって 固定子の外径ならび に重量を減らすことができる。
  - 冷却水を循環させるには数十 kW 程度の ポップ で足りるので,高圧 ブロア で水素 ガス を循環させる ガス 冷却の場合より通風動力が少なくてすむ。
  - 冷却水は外部の ポップ から供給されるので、 その量を加 減することで、 固定子 コイル 出入口の冷却水温度を一定 の値に保つことができる。
  - 固定子 スロットを浅くすることが可能なので、系統安定度の点で 過渡 リアクタンス の値に制約を受けるような 超大容量機に適している。

以上のように、 ガス 冷却機と水冷却機にはそれぞれ一長一短があ るが、水冷却機の場合の運転の信頼性は、 固定子 コイル ならびに冷 却水通路各部の製作にあたって作業品質の厳格な管理と十分な検査 を行ない、水漏れのないものを作るとともに、 冷却水系統に対して 必要な保護、 警報ならびに パックアップの機能を設けることによって、 ガス 冷却と同程度の高い信頼性を保証することができる。一方、ガス 冷却機は冷却媒体の循環動力が水冷却機に比べ若干大きいが、 固定 子 コイル 内のうず電流損失は逆に水冷却機より小さいので、 全損失 はほとんど変わらず、発電機効率 は 冷却法 とは 関係なく回転子の D<sup>Q</sup>L によって支配される。

結局,水冷却機は ガス 冷却機に比し固定子の外径と重量が小さく なる代わりに余分の付属装置が必要ということになり,いずれを選 ぶかは本体と付属品の価格のパランスによって決まる。水冷却機のス テンレス 配管ならびに冷却水系統などの付属装置の価格は発電機の容 量にあまり関係なくほぼ一定であるのに対し,水冷却機とガス冷却 機の固定子の重量差は大容量機になるほど大きくなるので,ある容 量以上では水冷却機のほうが有利になる。

発電機製作者のなかには固定子の直接冷却法として水冷却または 油冷却しか製作していないところもあり、この場合には、本章の最 初に示した分類中aに属するもの(回転子のみ直接水素冷却で固定 子は間接水素冷却)の限界容量の約300,000 kVA以上の機械は、必 然的に固定子水冷却または油冷却としないわけにはいかない。

これに反して当社では、昭和34年にわが国で最初の直接冷却

N.



表 7.1 各種冷却法と適用基準



図 7.1 500 MW タービン 発電機の水冷 ロータ Water cooled rotor of 500 MW turbine generator (English Electric Co.).

機(208,696 kVA)を製作して以来,現在までに51台,総出力約 13,500,000 kVAの発電機を水素内部冷却方式で納入または製作中 であり,他社とは事情が若干異なる。水素内部冷却方式自体も,固 定子 コイル については コイル つなぎ部冷却および2列 ペントチューブ,回 転子 コイル については Pressurized Gap 冷却など各種の新構造を採 用し,容量の増大に適したものとなっている。したがって現状では, 固定子水冷却機は火力用2極機で約800,000 kVA以上,原子力用4 極機で約1,250,000 kVA以上になった場合に,はじめて水素内部冷 却機より有利になると考えている。

もちろん,輸送条件がとくに厳しい内陸の発電所に据付けられる 発電機,あるいは系統安定度の見地からかなり小さい過渡 JF/92v スを必要とする発電機などに対しては,固定子水冷却の特長が十分 に発揮されるので,上記分岐点より相当小さい容量のものでも水冷 却とするほうが有利な場合もある。また,ユーザーとして将来の増設 計画なども考慮し,総合的見地から内部冷却機よりも水冷却機のほ うを選びたいという希望がある場合にも,十分にご相談に応じたい。 以上を総括すれば,三菱 9-ビン発電機の各種冷却法と適用基準は 表 7.1 のようになる。

なお現時点では,原子力用 タービン発電機の 単機容量の伸びがとくに著しく,最大容量機 は当分の間原子力用4極機については本誌記載の 別論文に詳述されているとおり,回転数が低 く回転子各部の遠心力が小さいので巨大な回 転子軸材を利用可能であり,回転子冷却の問 題はあまり過酷ではなく,1,500,000 kVA 程 度までは水素内部冷却で十分である。

しかし,火力用2極機の最大容量も次第に 増加して1,000,000 kVA を越えようとしてお り,原子力用では遠からず単機2,000,000 kVA

級に近づくものと予想される。このような超大容量機に対しては, 固定子 コイル だけでなく回転子 コイル にも水冷却を適用することが必 要となる。

 $g-E_{2}$  発電機の回転子に対する水冷却の適用についての世界のす う勢は、ソ連で水冷却回転子の実験機 50,000 kVA が 1963 年頃運転 を始めたのに引続いて 500,000 kW, 800,000 kW 各 1 台が製作され ていると伝えられていたが、 1968 年に 英国 English Electric 社で 500,000 kW 機が完成し West Burton 発電所 4 号機として納入され る予定と報道された。図 7.1 にその外観を示す。また、スイス Brown Boveri 社でも 300,000 MVA 機を受注したと伝えられる。

タービン発電機は本質的に回転子寸法によって最大容量が制限される機械であり、これに水冷却を適用することによって得られる利点は固定子水冷却の比ではない。固定子、回転子とも水冷却というのが、タービン発電機の究極の冷却法といわれるゆえんである。

水冷却回転子には、冷却水の不均一な流れによる振動、コイル に冷 却水を導く絶縁接手の機械的信頼性、漏れの検知などかなり高度の 技術的問題があるが、いずれも解決できない問題ではない。ただし、 その詳細についての議論は本文の目的ではないので別の機会に譲り たい。

# 8. む す び

以上,水冷却発電機の内外情勢と基本設計の問題について述べ, 同時に水冷却発電機全般の ガイド として解説しており,それらは本 誌別論文に詳細説明を行なっている。全部を併読願えば,当社の水 冷却に対する熱意・成果をご理解願え,これが幾分でも諸賢のご参 考になれば望外の幸せである。

#### 参考文献

- C. E. Kilbourne, C. H. Holly : Liquid Cooling of Turbine Generator Armature Windings, AIEE TP 56-191
- (2) E. Wiedemann : Fully Water Cooled Turbogenerators, BB Review Sep. (1966)
- (3) 鈴木,吉田:固定子水冷却発電機とその運転実績,火力発電 May (1965)

# 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\*·二川暁美\* 松 田 禎 夫\*\*

# Stator Coils and Insulation Hoses of Water-Cooled Generators

Central Research Laboratory Akira MURAKAMI • Akemi HIJIKATA • Akemi FUTAKAWA Kôbe Works Sadao MATSUDA

In manufacturing stator coils of water cooled generators, there are peculiar problems different from those of conventional machines with coil formation, hollow conductors, construction and mounting of coil end water chambers, insulation hoses and their leakage test. Various system are considered in the coil formation, but for use in turbine generators of up to 1,000 MVA, a modified hollow conductor type is appropriate. As a result of study on the above problems made with this type as a main subject, coil construction of high reliability and techniques to manufacture the coil have been established. As for insulation hoses, various basic experiments and endurance tests have been made to secure their reliability. Basic information has been also made available on gas permeability and vibration characteristic of them.

# 1. まえがき

水冷却発電機の固定子巻線の構造は、水素冷却機よりかなり複雑 になる。

当社は、大容量発電機の直接冷却方式については、水素内部冷却 タービン発電機など長年の経験をもっているが、冷却ばい体として水 を使用する場合には、水素などの気体ばい体とちがった種々の特異 な問題を生ずる。すなわち、水は冷却能力がすぐれているばかりで はなく、高純度の場合には良好な絶縁体であり、発電機固定子コイ ルなど高電圧部の冷却ばい体として好適であるが、純度が下がると 急激に絶縁性が低下する性質をもっており、機内に漏れだすと絶縁 その他に悪影響をあたえるおそれがあるので、冷却回路は完全にし ゃへいされた独立の ループにしなければならない。

このため、固定子 コイル 内部に冷却ばい体の通路を設けるのは水 素直接冷却方式の場合と同じような考え方となるが、そのほかに、 固定子 コイル端に水接続のための水室、高電位の固定子 コイル と接地 された水系統との連結用の 絶縁 ホース などが あらたに必要となって くる。これらの問題を解決し、信頼性の高い水冷却固定子巻線を製 作するには、材料・設計・製作法などについての総合的な研究が必 要である。

以下,水冷却発電機の開発研究の一環として行なった,固定子コ イルの構造,製作法および絶縁 ホースに関する研究ならびにその成果の概要をのべる。

# 2. 固定子コイルの構造

水冷却固定子 コイルの構造上の問題点は,

- (1) 冷却水をコイル内部に導くためのコイル構成
- (2) 冷却水を通じる中空管
- (3) コイル 端部の水室
- (4) 冷却水出入口部の絶縁接手
- などがある。

and the second

2.1 コイル構成

大容量発電機の直接冷却固定子 コイルの構成には、 種々の方式が



考えられる。主要な方式のコイル 断面概念図を図 2.1 に示す。

図 2.1(a) に示す ベットチューブ式は,当社が大容量 タービッ 発電機 の水素直接冷却方式に採用している構成で, コイル内部に冷却ばい体 専用の中空管を設ける方式である。この方式は導体としてはすべて 中実素線を 使用するため、素線導体の 厚さを 薄くできる特長があ り、渦流損が小さくなるので、気体ばい体の場合にはもっともすぐ れた方式といえる。水冷却の場合でも、水通路と導電部は完全に隔 離されているので、図 2.1(b) に示す中空導体式の場合のように、 水との長年月にわたる接触により生ずる腐食によって、導電断面が 減少するという心配はまったくなく, また, ペットチューブに ステッレス 鋼 管を使えば,腐食に対する考慮はほとんど必要がなくなる点,すぐ れた方式といえる。 しかし,コイル 端部で ペントチューブ を短絡すると 損失が大きくなるため,水冷却の場合,コイル端部に水室を設けると き、ベントチューブ相互間を絶縁する水継手が必要となり、構造が複雑 になる欠点がある。 この方式の場合, コイル 端部の水接続は, コイル のベットチューブ端に低圧用の絶縁継手が取付けられ、これを介してコ イル1本ごとに設けられた水室につながり、高圧用の絶縁継手によ り水分配管に接続される構造となる。このベットチューブ式についても、 実用化の見通しはえているが、構造がどうしても複雑になるので、 現状の容量範囲ではつぎの方式を選ぶ。

中空導体式は素線導体そのものに中空部を設け,冷却水を直接通 じる方式で,もっとも簡易な構造であり,製作が容易で,温度上昇 も低いので,一般の水冷却機に採用されている。しかし,中空導体 の製造技術・圧力損失・機械的強度・腐食などの観点から,素線導体の最小厚さを3mm以下にするのは困難であり,大容量機になる と渦流損が大きくなって,かならずしも有利な方式とはいえない。

図2.1(c)に示す中空中実組み合わせ式は、上述の中空導体式 の欠点を改善するために、中空素線に厚みの薄い中実素線を組み合 わせて、渦流損の減少をはかった方式である。この場合、中実素線 の発生熱量は素線絶縁を介して中空素線に伝導し、冷却水により取 り去られることになり、中空導体式に比べると温度上昇がやや大き くなるが、素線間の伝熱面積が大きいので、普通の場合、この温度 上昇は問題にならない程度である。コイル端部の水出入口部の構造は、 中空導体式と同じく、全素線を一括して水室用 ヘーyź に取り付け、 水室から高圧絶縁継手により水分配管に接続される。また、この方 式は中空ー中実の組み合わせ数をかえることによって、非常に自由 度の大きい設計ができるという特長もあり、1,000 MVA 252 また はそれ以下の 2-ビッ発電機には最適の方式である。

図2.1(d) に示す ヘっトチューブレーベル 式は、 ヘっトチューブ 式と中空 中実組み合わせ式の長所を組み合わせた方式で、 冷却ばい体専用の ベっトチューブを設けるのは ヘっトチューブ 式と 同じであるが、 この 場合 は、 ペットチューブを コイル 素線導体といっしょに レーベル 転位させる。 この方式では、 ペットチューブ 式の難点である ペットチューブ と水室の間の 低圧用絶縁継手は、 ペットチューブ が転位されているため不要で、 構造 が簡単になる。 ペットチューブ に曲げ加工性のよい特殊な材料を選ばね ばならないことはあるが、 超大容量機の場合には、 ペットチューブ 式と ともに有力な方式となろう。

#### 2.2 中空導体

中空中実組み合わせ式または中空導体式に使う中空導体は,鋼の 引抜角管とした。その中空部は長方形で,圧力損失を小さくするた めに内面はなるべく平滑にしたほうがよい。さらに、3章にのべる ヘッダおよび素線導体相互間の密封ろう付けを容易にするため,導 体の外側角部の丸みはできるだけ小さいほうが望ましく,各種実験 の結果 0.8 mmR 以下がよいとの結論をえた。また,壁厚は導体製 造技術,機械的強度,水との長年月にわたる接触による腐食などを 考慮すると,1 mm 程度は必要である。

壁面に欠陥があると、はなはだしい場合には水漏れを生ずるし、 わずかな欠陥でも、応力の集中による欠陥の拡大、腐食などにより、 長年月の機器運転中には水漏れの原因となるおそれがあるので、厳 重な検査が必要である。このため、水冷却固定子 コイル に使用する 中空導体は、製造時の各 プロセスにおいて、通常の漏れ試験、外観検 査のほかに、内部欠陥の発見を容易にするために、管が塑性変形を おこさない限界で、できるだけ高い圧力をかけて漏れ試験を行なう とともに、さらに最終検査として、渦電流式探傷を行なって万全を 期することにした。

素線導体の絶縁は、中空導体式以外では、これを通って熱が伝達 することになるので、 熱伝導のすぐれた ガラス 被覆絶縁を採用する ことにした。

#### 2.3 コイル端部構造

中空中実組合わせ式または中空導体式の コイル 端部の構造は、 ヘッ ダ、 絶縁 ホース および コネクタ 電気接続用よりなる。 図 2.2 に コイル 端部の外観を示す。 冷却水は水分配管から絶縁 ホース を通り、 ヘッダ 内部の水室をへて コイル に出入りし、電流は コイル から ヘッダ を通り、 ヘッダ に取付けられた コネクタ により他 コイル または位相 リング に接続 される構造である。



図 2.2 コイル端口冷却水接続部 (中央: 絶縁 ホース 中央より右へ: 口金, ヘッダコイル) Water connection to coil end.

ヘッダの材質は、導電性と接続の容易さから飼を使用し、十分な導 電断面をもたせる。また、ヘッダ水室は各中空導体に水が均一に流れ るように、計算と水流実験によりその形状を選定した。

電気接続用 コネ29 は 導電の機能 および 組立工作上の配慮のほか に、上口・下口 コイル の温度差による伸長の差にもとずく応力に対 する配慮も必要である。 このため、別報に示す コイル 機能試験装置 を使って、上口・下口 コイル 間に種々の温度差を与え、 コネ29 部の 応力測定を行なうとともに、 コネ29 単体について機械的疲労試験を 行ない、両者を対比することによって、強度的に十分安全であるこ とを確かめた。 なお、この部分は冷却水と直接接触せず、機内 ガス によってのみ冷却されるので、冷却効果をよくするため、 ヘッダ部よ り先は絶縁を施さず、 コイルエンドの構造は、一部の大容量機に使用し ている異相間の コイルリード間隔をひろげる方式を採用した。 絶縁 ホース については、その詳細を 4 章にのべる。

# 3. 固定子コイルの製作法

水冷却固定子 コイル の製作にあたっては, 種々の特異な問題を生 じる。中空導体を使用する方式におけるおもな問題点としては,

- (1) 中空導体の加工
- (2) コイル 端部水室用 ヘッダの密封取付け
- (3) 漏れ検査
- などがある。
  - 3.1 中空導体の加工

中空導体を コイル に加工するときには、レーベル 転位用曲げ、エンド 部成形などいろいろな変形をうけるが、との際の中空部および壁厚 の変化が問題となる。

中空導体の曲げによる中空断面積の変化の一例を図3.1 に示す。 図の曲げ試験条件は非常に過酷であり、実際の曲げ加工における断 面積の减少は10%以下と推定される。いずれにせよ、変化は部分 的なものであり、その部分での水の流速の増加もさほど大きくはな





三菱電機技報・Vol. 43・No. 4・1969



図 3.2 ヘッダ部ろう付け断面 Cross section of coil header brazed portion.

いので、実用上問題はない。また、壁厚の減少も、図 3.1 と同条 件の試験で 20 %以下、導電部断面積の減少は 5 %以下である。

したがって,かなり過酷な曲げ加工を行なっても,中空導体の変 形は実用上さしつかえない程度である。

3.2 ヘッダの取付

コイル 端部への ヘッダ の取付けは, 水冷却 コイル 製作技術を確立す るうえで, もっとも苦心を要した。

ヘッダは、2.3節にのべたとおり、水室をつくるためのものであり、コイル端に堅固に密封取付けしなければならず、また同時に、水室につながるコイル素線導体相互間も完全に密封する必要がある。密封は単に水が漏れないというだけでは不十分であり、温水との長年月の接触による腐食も十分考慮して、密封材料に耐食性のよい材料をえらぶとともに、かなりの厚みをもった密封壁をつくらねばならない。また、電流はコイル素線導体端部から、ヘッダを通って流れるため、素線導体相互問および素線導体とヘッダとの導電接合面積を十分に確保しなければならない。

以上の観点より、 ヘッダの取付けには,現在の銅材料接合技術でも っとも信頼性が高く,また,上述の条件を満足するものとして,高 周波加熱による銀ろう付けを採用した。

約4年間にわたり、300回以上の試作を行ない、ろう付け結果の 断面切断検査などによる厳密な評価によって、ヘッダ構造およびろう 付け技術の改良を重ねた結果、4列多段構成の大きなコイル断面をも った大容量機用固定子コイルについても、 信頼性の高い、安定した ろう付けが可能となった。

図3.2にろう付け部分の断面写真を示す。

#### 3.3 漏れ検査

N

冷却水回路に漏れが生じた場合の様相は,漏れ箇所によってこと なる。

コイル 絶縁内部で漏れが生じた場合には, 絶縁層は水と直接接触す ることになり, いかに耐水性のよい絶縁でも,長年月にわたって高 圧力の高温水にさらされると悪影響をうけるので, この部分での漏 れは絶対にあってはならない。

 $\Box f_{L}$  絶縁外部の  $\neg g$  部などで漏れが生じたと仮定した場合には, 冷却水系統の  $f_{2}$ トなどで, 機内  $f_{2}$  圧が規定値以下の状態で通水 したときには水が機内に漏れだすが,正常運転中では機内  $f_{2}$  圧は 冷却水回路の水圧より高いので,機内への水漏れはおこらず,逆に, 機内  $f_{2}$  が水系統に漏れ込むことになる。この場合,漏れ込み量が 多ければ気泡を生じて水の冷却効果を滅じ,非常に多量のときは水 の流れを妨げることになるが,少量であれば水に溶解してしまうの で冷却効果を害することはない。したがって,この部分の漏れは,  $\Box f_{1}$  絶縁内部ほど致命的なものではない。



図 3.3 漏 れ 検 査 回 路 (圧 力 降 下 法) Leak detection circuit of pressure drop method.

以上の観点より、固定子 コイル 単独の漏れ検査は、非常に厳重に 行なら必要がある。このため、中空導体は 2.2 節にのべたように、 高圧の圧力  $\overline{z}$ トを行なうほか、 渦電流式採傷を行なって、欠陥の ない完全なものを使用する。また、コイル 製作中の損傷を防止するた め万全の対策をとるほか、さらに、各 3ロセス 完了後に厳重な目視検 査を行なうとともに、気体による圧力降下法および へりひる質量分析 計法による漏れ検査を行なうこととした。圧力降下法は実用的であ るが、普通の方法ではこの場合に必要な感度がえられないので、 図 3.3 に示すように、標準 3-20 とU字管を使用して感度を高め、お およそ 10<sup>-6</sup>cc (NTP)/s (約 1 cc/12 days)の漏れを検知できるように した。 へりひる質量分析計法では、 高圧力はかけられないが 10<sup>-9</sup>~ 10<sup>-10</sup>cc (NTP)/s (約 1 cc/30~300 years)の超高感度がえられる。

絶縁 ホース取付け後の漏れ検査も、圧力降下法によるが、4 章 に のべるように、 絶縁 ホース に ガス を透過する性質があるので、 漏れ 検査の基準値はこの点を考慮して決定しなければならない。 なお、 最終的には、水による圧力降下法によって漏れのないことを確かめ る。

# 4. 絶縁ホース

絶縁 ホース に要求される性能としては,

(1) 通水中に外部水管系と コイル 導体間を, 電気的に絶縁できること。

(2) 冷却水圧による内圧,水素圧による外圧などの内外圧や, 冷却水の温度変化に伴う熱サイクル,あるいはホース取付け部の振動 などに十分耐えうる機械的強度を有すること。

(3) 固定子 コイル 端部の熱変形に耐えうるよう,また ホース接続 作業が容易なように,ある程度の可どう(撓)性を有していること。

(4) 諸負荷条件下で十分な耐リーク性を有すること。

(5) 長期間の使用にわたって,実用上問題になるような腐食や 劣化がないこと。

などがあげられる。

このような要求性能にたいし、4 ふっ化 エチレン 系の ホース を使用 した場合,耐水・耐熱劣化・耐食性については問題なく,主として (1)~(4)項の電気的・機械的諸性能が問題になると考えられる。

総縁ホースはこのような諸性能を長時間の連続使用にたいして十 分満足するものでなければならないから, テフロンを用いた絶縁ホー スを中心に各種の試験研究を行ない,これらの問題点について検討 した。以下その概要をのべる。

#### 4.1 電気的特性

絶縁 ホースの破壊電圧特性を知るために、テフロン 管に比抵抗が 100 kΩ-cmの水を通した状態で沿面破壊電圧試験を行なった。図4.1

543.



図 4.1 テフロン管の耐電圧特性 Results of electrical break-down tests of Teflon tube.

は各種の試験条件における破壊電圧と電極間隔の測定結果である。 この結果から最も沿面せん絡が起こりやすい場合でも、交流破壊電 圧は電極間距離が 140 mm のとき 50 kV 程度であり、衝撃破壊電圧 は電極間距離が 60 mm で約 40 kV である。絶縁 h-x は通常組立工 作の作業性から 500 mm 程度の長さが必要であるので、この程度の 長さがあれば上記の結果から明らかなように、電気的にはほとんど 問題とならない。

また, 絶縁 ホース に通水した状態で通電した場合, 水に流れる漏 れ電流により次式で表わされる電力損失を生じる。

ここに W<sub>g</sub>:電力損失 (W)

n: 絶縁 ホース の本数

- d: 絶縁 ホース の内径 (cm)
- l: 絶縁 ホース の長さ (cm)
- V: 端子電圧 (V)
- ρ:水の比抵抗 (Ω-cm)

式 (4.1) によって, たとえば, 定格 20 kV の発電機に内径 20 mm, 長さ 500 mm の絶縁  $\hbar-\lambda$ を 100 本 使用した場合の 電力損失を求め ると, 比抵抗 100 k $\Omega$ -cm の水の場合で約 3 kW となり, 絶縁  $\hbar-\lambda$ に通水した状態で通電することにより生じる電力損失はほとんど問 題にならない程度であることがわかる。

4.2 機械的およびその他の特性

絶縁 ホースは、 ホース 部とこれを ヘッダおよび水分配管と接続する ための継手金具とから構成されるが、 ホース 部自身のほかに、 ホース と継手金具との結合部も含めた特性を確実なものとすることが必要 である。 そのため各種の試作絶縁 ホース について、つぎにのべるよ うな試験を行なった。

(1) 耐圧強度

総縁 ホース は内・外圧をうけるが, 使用状態においては一般に外 圧のほうが大きく, また供試絶縁 ホース では内圧による破裂圧力よ りも外圧による座屈圧力のほうが小さいから、外圧による座屈強度 (とくに高温における)が最も問題となる。 そのため 80℃ で短時 間と長時間の外圧座屈試験を行なった。 試験は絶縁 ホース より切り 出した長さ 300 mm の管を圧力容器にそう入し、恒温そう(槽)内で これを 80℃ に加熱して行なった。

その結果,式(4.2)で求まる薄肉円筒の外圧座屈圧力の理論値の ほぼ $0.6\sim0.7$ であり,  $\pi$ -ス部の(肉厚/平均半径)を1/3以上にす ることにより,使用外圧にたいし十分の初期耐外圧性を付与しうる ことがわかった。

$$p_{cr} = \frac{E}{4(1-\mu^2)} \left(\frac{h}{a}\right)^3 \dots (4.2)$$

ここに *p*<sub>cr</sub>: 座屈圧力 (kg/cm<sup>2</sup>)

E: 縦弾性係数  $(kg/cm^2)$ 

- μ:ポァソシ 比
- h : ホース 部肉厚 (cm)
- a: ホースの平均半径 (cm)

また,長時間外圧にさらされたとき,クリープ変形により耐外圧特 性が低下する可能性のあることを考慮して,使用外圧の数倍の外圧 を80℃において長時間加え変形の状況を調べた。この結果,いず れの ホースにも変形はほとんど認められず,発電機の機内 ガス圧程 度の外圧に十分耐えうることを確認した。

(2) 振動特性

絶縁  $h-\lambda$  は 100~120 Hz で励振されるので、その振動特性を検討するため  $h-\lambda$  一端を固定し、他端を振動台に取り付けて 0~180 Hz の範囲で加振し、そのときの  $h-\lambda$  の振動状況を調べた。試験 は  $h-\lambda$  が中空のときと通水状態にあるときについて行ない、通水 状態のときは 水圧を 0~2 kg/cm<sup>3</sup>、水温を常温から 80°C に変化させた。加振周波数と振幅比の測定値の一例を図 4.2 に示す。これ らの結果から  $h-\lambda$  の固有振動数は通水により 10~20 %低下するが、



図 4.2 絶縁 ホースの 振動 特性 Vibration characteristics of insulation hose. E.

通常の使用水圧である 1~2 kg/cm<sup>2</sup> の範囲では水圧の影響はない。 温度にたいしては 20°C から 80°C の温度変化にたいし約 20 %低下 する。また共振倍率は振動方向によっても異なるが 3~13 程度であ った。さらに絶縁 ホースに振動が加わった場合の強度と耐 リーク 性を 調べるため、実際に近い周波数・振幅で加振繰返し数 10<sup>8</sup> 回まで絶 縁 ホースを励振した結果、何らの異常も生じなかった。

## (3) 水密性

絶縁  $\pi$ -ス はその使用中に、 $\pi$ -ス 部と継手金具との結合部や、  $\pi$ -ス継手金具と水分配管や  $\eta$ -ス総手金具と水分配管や  $\eta$ -ス との金属どうしの接合部から水漏れがあってはならない。これを検討するために、これらの各部を対象に絶縁  $\pi$ -スについて、水浸漬加圧法(空気で加圧し、水中に浸漬して気泡の発生を調べる)ならびに  $\eta$ -カム値量分析計法による漏れ試験を行なった。その結果、 $\pi$ -ス部と継手金具の結合構造を  $\pi$ -フロンの  $\pi$ -ルド フローを阻止するような構造とし、かつ適正な締込率を与えることにより、漏れは測定精度以下で問題のないことがわかった。

#### (4) ガス 透過量

絶縁  $n-\chi$  は高い圧力の水素ふんい気中に置かれるため, 水素 ガ ス が  $n-\chi$  部より拡散により 透過して 冷却水系統へ混入することが 考えられる。この透過する ガス の量を知るために水素 ガス と炭素 ガ ス につき, 常温と 80°C で流量法により ガス 透過量を測定した。そ の結果は, 別途板状の試験片で行なった図 4.3 に示す ガス 透過係 数の測定値から計算した値とよく一致した。この結果, 絶縁  $n-\chi$ の温度 80°C, 圧力差 5 kg/cm<sup>2</sup> のときの ガス 透過量は 10<sup>-3</sup>~10<sup>-4</sup>cc (NTP)/s 程度である。この値は ガス の補給などに関しては 実用上 問題にならない値であるが, 水系統の漏れ検査や, 冷却水中の水素 ガスにより 発電機内の冷却水系の漏れを 検出するような手法をとる 場合には考慮すべき値である。

(5) 熱 サイクル 試験

ALC: NO

絶縁 ホースのホース部と継手金具の結合部は、線膨張係数の異なる 異種材料の機械的な結合部であり、ホース材料の クリープ性を考慮す るとき、熱サイクル によるゆるみを十分確認しておく必要がある。

このために、発電機の運転停止にともなう絶縁  $\pi$ -ス の温度  $\pi$ /2  $\nu \epsilon 5 ~ 80^{\circ}$ C, 熱  $\pi$ /2 $\nu$  繰返し数を $1 \times 10^{4}$  回として, この温度  $\pi$ /2 $\nu \epsilon$ 加える熱  $\pi$ /2 $\nu$  試験を行なった。 図 4.4 は熱  $\pi$ /2 $\nu$  試験 装置で、 $80^{\circ}$ C および 5°C の恒温水そうの水を  $\pi$ -2 と電磁弁により 絶縁  $\pi$ -ス に交互に通水し、加熱冷却を繰返すものである。 冷熱の 1  $\pi$ /2 $\nu$  は  $\pi$ -ス の温度分布が定常状態になるよう 15 分とした。



熱サイクルを104回繰返し加えたあとで漏れ試験を行なった結果,



図 4.4 絶縁  $\pi$ -ス の熱 サイクル 試験 Heat cycling test of insulation hoses.

 $h-\lambda$ 部と継手金具の結合方法が適正であれば、十分これらの熱  $\eta - \lambda$  のにたいしても漏れの発生しないことをたしかめ得た。 なお供試  $h-\lambda$ 中、 $h-\lambda$ 部と継手金具の結合方法が不十分であると、 試験前 に 4.2節(3)でのべた漏れ試験に合格したものでも、熱  $\eta - \lambda$  負 荷により漏れを生じることのあることが認められた。このことは、 この種  $h-\lambda$ にたいする熱  $\eta - \lambda$ に 試験の重要性と同時に、非金属部 と金属部の結合には十分の検証が必要なことを示している。

また, 絶縁 ホースの温度変化にともなう変形と応力の挙動も検討 したが,冷却水の温度変化が 5~80°C の範囲では熱応力は直接問題 とならない程度であった。

# 4.3 機能試験

総縁  $\pi$ -ス の実用性・耐久性を確認するため、図 4.5 にその  $j_0$  $y_0$  図を,また図 4.6 にその外観を示す機能試験装置を製作し、絶 縁  $\pi$ -ス の総合的な寿命試験を行なった。試験条件は次のとおりで



図 4.5 絶縁  $\hbar$ -ス 機能試験装置の ブロック 図 Block diagram of evaluation test equipment for insulation hose.



図 4.6 絶縁 ホースの機能試験装置 Evaluation test equipment for insulation hoses.

ある。

- (1) 冷熱 サイクル:室温と 65~85℃の純水を交互に周期 30分で通水
- (2) 振 動 :加振周波数 120 Hz, 全振幅 0.2 mm
- (3) 水素外E : 4 kg/cm<sup>2</sup>
- (4) 印加電圧 : AC 24 kV

各種 ホース に対し約6ヵ月連続試験した結果,前節の熱 サイクル 試 験で漏れの生じたものと同種の ホースが,ホース部と継手金具との結 合部で高感度の漏れ検査で感じうる程度のわずかの漏れを生じた以 外は,すべて異常は認められなかった。すなわち,適切な結合方法 を採用すれば,実用上も十分の信頼性をもつことを確認し得た。

5. む す び

以上,水冷却発電機の主要構造としての固定子 コイルと,絶縁 ホ

-ス における特異な問題点についての研究 および検討結果の概要をのべた。その結果をまとめると次のようになる。

(1) コイルの構成は、1,000 MVA 程度の タービン 発電機について は、中空中実組合せ式が最適である。

(2) 中空導体は欠陥のない完全なものでなければならない。こ のため,弾性域限界までの高圧力試験・渦電流式採傷などの検査に より,万全を期することにした。また,中空導体の加工による中空 部の変形は許容しうる程度であることがわかった。

(3) コイル 端部水室用 ヘッダの密封取付けには,高周波加熱による銀ろう付けを採用し,4列多段の大断面 コイル についても,安定した密封取付技術を確立した。

(4) 電気接続用 コネクタ の機械的耐久力, ヘッタ 水室の形状など について詳細な検討を行ない,最適の構造を選定した。

(5) 固定子 コイル の漏れ検査には、実用的で感度の高い圧力降 下法と超高感度の ヘリウム を併用し、万全を期することにした。

(6) 絶縁 ホース の テフロンホース 部は、実用上その(肉厚/平均半径)の比を 1/3 以上にとれば、短時間はもちろん長時間の クリーラ変形を考慮しても、十分の耐圧強度を有している。また、ホース長さは500 mm 程度であれば、電気的には問題はない。

(7) 絶縁 ホースのホース部と継手金具の結合部が漏れの点からは 最も問題となるところであるが、適当な結合構造にすることにより 熱サイクルや振動にも耐え、十分実用しうる。

(8) また,高温水素 ガス ふんい気中で純水を通水することにたいして,耐水・耐食・耐熱劣化性などの化学的特性も十分満足するものであることを確認した。そのほか,絶縁 ホースの振動特性・ガス透過性など ホース 設計上の基礎的な知見を得た。

(昭和44-2-7受付)

# 水冷却発電機の水系統と運転

今井 光\*·鈴木文夫\*·太田 基義\*\*

# Water Circulating System and Operation of Water Cooled Generators

Kôbe Works Hikaru IMAI • Fumio SUZUKI Central Research Laboratory Motoyoshi OTA

A circulating system of water cooled generators has close relation with corrosion of materials and operation and maintenance of the generators. There are good number of problems imposed on the water circulating system with the purity and atmospheric gases around a water tank. This article describes these points and also main items of those expected to be employed by Mitsubishi. The temperatures of various parts of generators and the capability are almost the same as those of conventional Inner Cooled types. The article also elucidates concretely essential subjects in the operation and maintenance such as measurement of insulation resistance and a step to be taken when cooling water fails.

# 1. まえがき

水冷却発電機では固定子 コイル 以外の部品は従来と同じく水素(内 部) 冷却であるため、水素制御系統が必要なことは今までと同じで ある。冷却水系統はこれらにさらに加わるわけであるから、信頼性 が大きいことはもちろん、操作簡単で保守が容易なことに計画、設 計の重点をおいた。

### 2. 冷却水系統の問題点

冷却水系統で問題となるのはつぎのような項目である。 (1) 冷却水の純度とその保持

や却木の運転純度は、電気的損失と材料の腐食の点から決めなけ ればならない。冷却木を固定子 コイル を含む閉 ループ で循環使用し、 木の純度は コイル に 流れる 木の一部を イオン 交換樹脂筒に バイパス さ せて、一定値以上に保つことが一般に行なわれている。また、ボイラ 復木の一部をそのまま固定子 コイル に流し、ふたたび ボイラ 側に戻す 方法もある。

木の純度は温度によって対数的に変わるので、一定の基準温度の 値に換算して表わすのが普通である。ところが木の比抵抗の温度係 数は純度によって異なるので注意を要する。すなわち、純度の悪い ときは不純物 イオンの影響が大きいが、電導度が 1.0 µ U/cm 程度以 下になると、不純物 イオンによる電導度と完全な純木の イオンの電導 度が同程度となる。

(2) 水圧と水温

★系統の水圧は,発電機内ではガス圧より低くし,絶縁ホースなどに万一漏れ個所が発生しても水が機内に漏れ込まないようにし、 一方機内では大気圧より高く保ち,空気が漏れ込まないようにする ととが必要である。また発電機内部で気泡の発生や沸騰が起こらな いよう,発電機内部の水圧をその部分の水の飽和蒸気圧より高く保 つ必要がある。気泡の発生や沸騰は □イルの冷却を阻害し,また絶 録ホースの電気的絶縁性を低下させる。

<sup>冷却</sup>水温の調節ができることは水冷却の特長であるが,水冷却器 のパイパス量を,水冷却器の入口側あるいは出口側に設けた三方弁に よって,自動的に加減することが一般に行なわれている。また水冷 <sup>均器</sup>の二次冷却水量を加減する方法をとることもある。

# (3) 水中の溶存酸素

水中の溶存酸素は使用材料の腐食に重要な関係を持つが、大気空 気中の酸素が水に溶存する程度であれば、腐食にはなはだしい悪影 響を及ぼすことはないようである。

文献<sup>(1)</sup>に見られるような ガス 加圧式の場合には, 貯水そうの水面 に最初適当量の ガス を流せば, 以後はその ガス 中に含まれる酸素の 分圧だけの濃度に保つことができ, 十分脱酸素の目的が達せられる。

(4) ふん囲気 ガスの種類と圧力

もっとも普通なのは大気空気である。また大気空気の代わりに窒素 ガス などを用いる方法は, 腐食上さらに 有利であるという データ もある。

窒素 ガス などの ガス を用いる場合には,空気が漏れ込まないため あるいは木圧との関係で大気圧以上に加圧するのが普通であり,そ のため圧力調整装置や漏れに対する自動補給装置が必要となる。し かし コイル 出口の水の圧力, したがって沸騰点が高くなり気泡が発 生しにくくなる。また補給水量は大気開放式に比べ少なくなるであ ろう。

窒素 ガス などの ガス を用いる方法は, 水系統に漏れ込む水素 ガス の検知感度を上げるかも知れない。しかし定検時など配管から水を 抜いている間, コイル に窒素 ガス などを詰めておくような必要が起こ れば別であるが, 普通には水素 ガス, 水についで第3番目の系統と なり, 設備上・保守上不利である。

(5) 漏れ検出

冷却水系に漏れ箇所が生じた場合,機外では系統の水圧を大気圧 より高く保つので水が外に漏れ,機内では一般に ガス 圧を水の圧力 よりも高くとるので,ガス が水系統に漏れ込む。大きな漏れ箇所と なれば,その逆も生じうると思われるがその段階では発電機の運転 は停止すべきであり,むしろそれに至るまでの漏れ箇所をいかに検 出するかが問題になる。

発電機外部での水漏れは、ある程度までは運転に支障をきたさないと思われる。機内での水漏れは、発電機 ケーシングの下部にたまった水の検出あるいは機内 ガスの湿度の測定以外に運転中に発見する方法はない。

したがって、水系統へ漏れ込む水素 ガスの検出というのはひとつ の提案となる。水系統へ漏れ込んだ気体の一部は水に溶解し、残り はあわとなって木とともに流れていくが、このあわが冷却効果を阻害せず、また系統の運転に支障をきたさないかぎりとくに問題とす る必要はないであろう。この許容限度については明確でない。しか しながら木系統への ガスの漏れ込みを監視すれば、漏れの増加傾向 がわかり冷却効果の阻害、さらには事故を未然に防ぐことができよ う。

絶縁 ホース に使用する テフロン は、拡散によって ガス が透過する。 したがって水素 ガス は一定期間の後には系統の水の中に飽和して存 在することになり、単に水素 ガス あるいは溶存水素の存在を検出し ても意味がない。この漏れ込んだ水素 ガス の監視法には、

(a) 発電機出口における気泡を監視する方法

管路の一部に蓄電器を配置し,電極間を通過する気泡により変化 する静電容量を利用するもの,光学的な方法,気泡を集める方法な どがある。

(b) 貯水 タンクの圧力上昇を監視する方法

(c) 貯水そう(槽)の気相 ガスの水素純度変化を監視する方法 などがある。貯水そうの気相を大気開放とする場合は(c)の方式, ガス加圧式では、(b)の方式が採用できると思われる。

(6) 貯水そらの配置

貯水そうは水の温度変化による容積変化を吸収するため必要であ る。貯水そうの位置は発電機の上方に設ける方法,同一面のもの, あるいは下方に設ける方式といろいろ考えられ,また系統上からは 主回路中に設ける場合と,主回路からはずす場合とある。

発電機の上方および同一面に設ける方式は、もし気相を排気する 方法をとる場合には漏れ込む水素 ňス の検出はしやすいが、設置に 適当な場所が得にくく、また コイル の水を抜く場合受けがないので 問題である。発電機の下方に設けるのが配置上もっとも好都合であ ろう。また、主回路に設けるほうが系統の熱容量が増し、また イオ ン交換樹脂の取換えなどで イオン交換樹脂筒への バイパス を止めた場 合など、水の比抵抗の低下の程度が少ない。主回路からはずして設 けると水温は室温近くになり、主回路に補給されたとき コイル 入口 水温に急変を与える場合があろう。

#### 冷却水系統の構成

## 3.1 冷却水系統の仕様と構成

以上の諸点を考え合わせて 図 3.1 に示すような冷却水系統を選 択しているが,主要仕様は

- (a) 固定子 コイル 入口水温 45~50°C
- (b) 固定子 コイル 出口水温 75℃ 以下
- (c) 固定子 コイル 水速 0.5~4.0 m/s

で水の純度は電導度で 25℃ において 0.5 µひ/cm 以下に保つ。

(1) 系統は閉 ループで, ポンプ・水冷却器・フィルタ・固定子 コイル ・ヘッドタンク・貯水そうを直列につないでいる。ポンプを出た水の一部 は,水冷却器出口から イオン 交換樹脂筒に バイパス し貯水そうに戻す。

(2) コイル入口水温は常に一定に保つ。その調節は、水冷却器の 出口側に設けた空気作動式温度調節弁(三方弁)により、水冷却器 りバイパス量を加減して行なう。

(3) 水冷却器は2台直列に並べ,発電機100%負荷時全水量の <sup>10</sup>%を冷却器に流し,残り20%はパイパスさせる。冷却器1台を点 贪その他で止める場合,残りの1台だけでも定格負荷の80%をと ることができるようにするが, この場合のパイパス量は20%以下で ちる。 (4) ポップは2台あり、1台は常用(AC)、他の1台は非常用(DC)である。

(5) コイル に流れる水量を一定に保つため、コイル入口水圧を一 定に保つ。(後で述べるようにコイル出口の圧力は大気圧で一定)。 すなわち、冷却器に流れる水量とパイパス量の割合が変われば、コイル 入口水圧が変わろうとするが、これをポップ出口に設けた空気作動 式の圧力調整弁で一定に保つようにする。

(6) 主 フィルタ は常用1台のみとする。

(7) 全水量の約20%を,水冷却器出口からイオン交換樹脂筒に バイパスさせ,水の純度を規定値に保つ。

(8) 貯水そらは主回路中に設け、発電機の下方に設置する。

(9) 貯水そうの水面上のガスは大気空気とする。

(10) 貯水そうの気相部分に水素検知器を設け、水系統に漏れ込む水素 ガスを検出する。

(11) 貯水そうには高低の水位警報器をつける。系統の水が漏れ などのため減少すれば警報器が作動する。

(12) 系統への水の初充てんおよび補給は、ポイラなどの純水 タン クからイオン交換樹脂筒を通して手動で行なう。

(13) 固定子 コイル への水の出入は,発電機 フレーム 内端部に設け るマニホールドの上部で行ない,かりに ポップが止ってもコイル から水 が流れ落ちないようにしている。入口・出口マニホールドの上部を連 結する通気管は,系統に水を初充てんする場合の空気抜きであり, また 運転中もし入口マニホールド に ガス がたまろうとするようなこと があれば,これを出口マニホールドから後述する ヘッドタンクに排出し, 固定子 コイル にはいらないようにする。

(14) 出口マニホールドの上部水出口位置にヘッドタンクを設け、ヘッド タンクと貯水そうの間を太い戻り管で結ぶほか、サイフォン 現象防止用 ベント に管を設ける。したがってヘッドタンク内は大気圧に保たれる。

(15) 戻り管の下部は貯水そうの水面以下まで下げ、しぶきによって気泡が下がりポップに吸われることのないようにする。

(16) 戻り管には水は充満して流れないので,温度計素子・純度 検出 セルの取付けのため水平の拡管部を設け水がたまるようにする。

(17) 水の純度は コイル 出口および イオン交換樹脂筒の出口で測定 する。

(18) 水の脱酸素は行なわない。

3.2 冷却水系統の構成機器

冷却水装置の外形を図 3.2 に示す。 構成機器の概要はつぎのと おりである。材質はとくに断わらないかぎりすべて ステンレス 鋼であ る。

(1) ポップ: ギヤーポップ は潤滑困難で使用できず, ボリュートポップ を採用する。キャッドモータポップ はこの程度の大きさになると製作が困 難で高価となるほか, 非常用に DC モータ を用いるときは ブラシ の取 り換えが困難であるなどのことのため,採用に難点があり, メカニカ ルシールポップ を使用する。

(2) 水冷却器: シェル 側に 冷却水,水管側に 二次冷却水を流 す。発電機入口水温を 50°C にすれば冷却器の大きさをかなり減少 できる。

(3) 貯水そう: 木銀 フロートスイッチ により高低水位の警報を行 なうが、水面計も取り付け水位を肉眼で監視することができるよう にしてある。

(4) 圧力調整弁: ダイヤフラム形で,圧力変換器,警報つき記録 計,調節器,ダイヤフラム調節弁(手動 ハンドル つき)などから成って





図 3.2 固定子 Jイル 冷却用冷却水装置

λ<sub>i</sub>: イオン 交換樹脂筒出口の水の電導度(ひ/cm)

 $A: 1 \to \infty$  交換樹脂簡への バイパス 量 ( $V_i$ ) を ゼロ としたとき の主 ループの電導度の増加 ( ʊ/cm/h)

V: 系統内の水量(1)

Vi: イオン 交換樹脂筒への バイパス 量 (l/h)

この式には主 ループの流量は関係しておらず,水の純度は イオレ 交換 樹脂によりきまる  $\lambda_i$  と, $\mathit{AV}/V_i$  によって決定されることを示して おり,

(a)  $\lambda_m \gg \lambda_i$ のときは  $AV \ge V_i$ の比により決まり

(b)  $\lambda_m = \lambda_i$ のときは $\lambda_i \gg A \frac{V}{V_i}$ であり、 $\lambda_i$ によって決まる。

機能  $\overline{r}_{\lambda_m} = \lambda_i = 11.5 \, \mathrm{M} \, \Omega \, \mathrm{cm}$ であって, $\lambda_i$ が支配的であり, $\mathit{AV/V_i}=1.6 imes10^{-8}$  $_{0}/\mathrm{cm}$  であった。 したがって  $\lambda_m$  が  $0.5 \mu_U/cm(2 M \Omega - cm)$  程度でよい場合は, バイパ ス流量を全冷却水流量の130程度とすることも可能である。イオン交 換樹脂量は、バイパスの最大流量に対して Space Velocity が 60 程度 になるようにするのが適当と考えられ、使用樹脂の選定には使用温

いる。

(5) 温度調節弁: 固定子 コイル 入口に設ける水銀膨張式の測 温素子のほか、温度変換器、警報つき記録計、調節器、ダイヤフラム形 三方形(手動 ハントル つき)などから成っている。

(6) 水質計: 純水の電気伝導度の温度特性は純度によって変 わるので、水質計の温度補償はこのことを考慮したものでなければ ならない。 実機では、この点を考慮した 25℃ 換算の計器を使用す る。

(7) イオン交換樹脂筒: 腐食生成物の混入によって冷却水の 純度が低下するが、これを所定の純度に保つため冷却水の一部をィ オン交換樹脂筒へ バイパス して,連続的に純化する。冷却水系統の水 の純度は次の関係式で与えられる。

$$\lambda_m = \lambda_i + A \frac{V}{V_i}$$

ててで

λ<sub>m</sub>: コイル 入口の水の電導度(U/cm)



図 3.3 イオン交換樹脂筒 Ion exchange resin cylinders.

図 3.4 カートリッジフィルタ Car

Cartridge filter.

度を考慮しなければならない。イオン交換樹脂の寿命は0.5年以上, 2年程度とし, 定期的に再生ずみのイオン交換樹脂ととりかえる方 式が簡便である。イオン交換樹脂筒を図3.3に示す。

(8) 主 フィルタ: 冷却水中に生じる腐食生成物のうち,イオン化 しない生成物は,これを連続的にフィルタでろ過することが必要であ る。各種のフィルタ材料を Cu<sub>2</sub>O, CuO, Cu を含む溶液中で加温劣化 試験を行なった結果, アセテートフィルタが良好であることがわかった。 フィルタによる圧力損失が 0.14 kg/cm<sup>2</sup> 程度以下となるような,カート リッジタイプのフィルタを使用する。カートリッジフィルタを図 3.4 に示す。

(9) 補給水入口 フィルタ: 補給時よりも水の初充てん時のこと を考え,主フィルタ と同等のフィルタ を使用する。

(10) 水素検知器: 熱伝導式 ガス分析計を用いる。

(11) 流量指示計

(12) ブローオフ 弁: コイル から水を除去する際断続的に開閉する 必要があり、レバー つきとする。

(13) 配管: 腐食防止のため ステッレス 鋼管を使用する。溶接によって配管をつなぐ場合の継手の形は、フラッシングのことも考慮して決めたものを使用する。溶接後の焼鈍は行なわない。 フランジ 継手のパッキング 材としては、 NBR・SRB などを使用し、 ネオプレンゴム などの クロロプレン 系 ゴム は使用しない。

系統の機器・部品・配管はすべて常用木圧 10 kg/cm<sup>2</sup>, 耐圧 15 kg/cm<sup>2</sup> で設計する。

# 3.3 冷却水系統のその他の問題

(1) 前述のように、貯水そう水面上のふん囲気は大気空気を採 用の予定である。もちろん、必要に応じ窒素 ガス などのような他の ガス を使用することも可能である。

(2) 水の純度は電導度で 25°C において 0.5  $\mu$  $_{0}/cm$  以下にする ことは前述した。 しかし将来は  $1 \sim 2 \mu_{0}/cm$  程度としてもよいの ではないかと考えている。

(3) コイルの機能試験においては、 主 n-Jの流量に対する イオ ン交換樹脂筒への バイパス 流量約7%で、十分小さな電導度が得られ た。したがって所要の  $0.5 \mu \sigma/cm$  (25°C) 程度の電導度に対しては 前節(7)にのべた 式にしたがって バイパス量 をさらに少なくするこ とができ(機能 = 2 + n-Jの場合は約3%にすることができる)、 イオ ン交換樹脂の量を減らすことができよう。

(4) 純水装置なしで復水をそのまま使用する方法は、水の処理 が不要となり、かつ プラント全体の熱効率もわずかではあるが向上す るので検討の価値がある。ただし復水の純度や供給の信頼度の点な どが問題であろう。

(5) 水系統に漏れ込む水素 ガスの検出は、水素検知器により貯 水そう気相部の水素純度の変化により行なう予定であることは前に のべた。場合によってさらに感度を上げねばならぬ場合には、検出 部を ヘッドタンク 上部に設けたり、 あるいは屋外排出管に設けて漏れ 量を測る方法を検討の必要がある。

(6) 定検時の冷却水系統の漏れ試験は短い期間に実施しなけれ ばならない。系統の内壁に付着する水分を完全に除去することは不 可能であり,製作途中と同じ高感度の漏れ試験を詳細に実施するこ とは困難である。そのため定検時には単に漏れの有無を チェックする 程度とする予定である。方法としては圧力降下法か真空度低下法の いずれかとなろう。

(7) 屋外形発電機その他で、冬期水の凍結防止を考慮する必要 が起こる場合があるかも知れない。この場合、エチレングリコールを水に 入れるのがもっとも簡単であろう。エチレングリコールは水に溶け、わず かイオン化するのみで水の電導度を変えず、またイオン交換樹脂も害 しないと考えられる。しかし銅や鋼を犯さないようインビタが必要 であり、このインビタは水の比抵抗を下げるともいわれている。ま た高温になったとき酸素があると有機酸に分解するので、ふん囲気 が大気空気の場合は注意を要する。

また エチレンクリコール 使用の場合には, 脱酸素樹脂は使えない。

#### 4. 発電機各部温度とケーパビリティ

水冷却発電機の場合は、水系統の運転が従来にない新しい項目で あるが、発電機本体自身でも考慮せねばならない新しい点がでてく るので、これらをのべる。

#### 4.1 発電機各部温度

発電機固定子各部の温度は,内部冷却式の固定子 コイル つなぎ部 冷却の場合とほぼ同じで,それより低目の分布をとる。発電機各部 の温度上昇限度および基準温度を表4.1 に示す。

#### 4.2 固定子冷却水なしの場合の発電機出力

固定子 コイル に水のない場合,固定子 コア に半径方向 ベットダクト を 有する普通の構造のものについては、コイルの熱は普通水素冷却式と 同じように冷却され,発電機の出力は定格出力の 25 %程度となる。 固定子 コア に半径方向 ベットダクト がなく, 軸方向通風のものについ てはこの値はさらに小さくなる。

#### 4.3 固定子冷却水停止の場合

出力すなわち電流のほか時間も考慮する必要があり、 6.2.1 項 に述べる。

#### 4.4 短時間過電流耐量と不平衡運転の限度

短時間過電流耐量は電流密度を高くとる分だけ減少するはずであ るが,現行の ASA-C 50-1 の基準はとくに変更する必要はない。不



#### 表 4.1 各部の温度上昇限度および基準温度 Temperature rising limit and reference temperature of various parts.

	润	定	個	đĩ		怷	準	溫	度	温度上昇 deg	許容温度限界 ℃	測		宠		法
固	宠	子	Э	イ	л	冷却	[木]	\¤į	息度	40~45	90	垭	込	溫	度	計
 回	転	孑	Э	イ	л	ΥĽ	コガ	ス法	且度	65	110	扺		抗		値
鉄					心	자	コガ	ス祖	國度	85	130	サ		÷ 力	ッフ	° r
<u></u> .	イル	出口	冷夷	水泪	頭皮	冷却	ホノ	ίΠ	鼠度	25~30	75	サ		力	<i>ッ</i> フ	r n
Ш	п	ガ	х	温	皮	入口	コガ	ス泪	副度	65	110	サ		≠ =	ィイ	л

(注) 基準温度

冷却水入口温度 : 45~50°C (水銀温度計) 入口 ガス 温度 : 45°C (サーチコイル)

平衡運転の限度はおもに回転子構造に支配されるので,固定子冷却 の場合も現内部冷却機と同様でよい。

#### 5. 絶縁抵抗測定と耐電圧試験

水冷固定子 コイル の絶縁抵抗値および耐圧値は,絶縁 ホースの状態 で大きく左右され,試験はその電気的特性を考慮して実施する必要 がある。

# 5.1 絶縁抵抗測定

コイルの絶縁抵抗を測定する場合は、絶縁  $\pi$ -ス 内部の水分を完全 に除去し、乾燥した状態で測定しなければならない。正規条件での 通水中(以下通水中という)あるいは湿潤状態での測定値は、水の 比抵抗によって決まり、コイルの絶縁抵抗としてはまったく意味がな い。たとえば、 通水前 コイルの絶縁抵抗が 1,000 MΩ あったとする と、通水中では、水の比抵抗を 5 MΩ-cm、絶縁  $\pi$ -スの内径および 長さをそれぞれ 20 mm・640 mm、絶縁  $\pi$ -スの数を 100 本とすると 約1 MΩとなる。

総縁 ホース 内部の水分を完全に除去するには、 圧縮空気または窒 素による 断続放出と真空 ポップによる 真空乾燥法とを併用するのが 適当である。 なお、特殊な構造を採用すれば通水中でも コイルの絶 縁抵抗測定が可能である。

#### 5.2 耐電圧試験

耐電圧試験は絶縁 ホース に通水中, あるいは水分を完全に除去し 乾燥した状態で実施しなければならない。静止水中では温度が上り, 漏れ電流を生じ, さらに気泡を発生してせん(閃)絡破壊に至る可能 性があるので実施してはならない。水を抜いたままでの湿潤状態で も漏れ電流により, ホース内面を損傷するので不可である。

絶縁 ホース に通水中のせん絡破壊電圧については, 前掲の"水冷 却発電機の固定子 コイル と絶縁 ホース"を参照されたい。

#### 6. 冷却水系統の運転・保守

水系統の運転・保守につき, モデルコイル での運転経験を折り込み, 種々の角度からの検討結果の成果を手順別にのべるとつぎのとおり である。

#### 6.1 冷却水系統のフラッシング

発電機本体および固定子冷却装置を据え付け,配管工事を終了し てから冷却水系統の フラッシング を行なう。発電機の機内配管および コイル は製作段階で酸洗いのうえ,純水で フラッシング してある。また 配管も製作段階で酸洗いを施行してある。現地での フラッシングは, フラッシングはまず外部配管系統のみを行なう。それは発電機下部の 短管部を バイパス し, 荒 フラッシング の後純水を循環させる。つぎに発 電機を含めた全系統を行なう。これらの場合,イオン交換樹脂筒にも 純水を循環させる。また,水の温度を 70~80°C にあげれば,フラッ シングの効果が上がる。

フラッシングの具体的な方法は以下のとおりである。

6.1.1 外部配管のフラッシング

(1) 一次 フラッシング

(a) 発電機下部の冷却水出入口の短管をはずし, バイパス 用接続 管をつなぐ。

(b) 発電機入口管の ストレーナ にこし網を入れる。

(c) 荒 フラッシングを行なう。

(d) 戻り管と貯水そうの接続部にこし網を入れる。

(e) 冷却水装置に水道水を満たす。

(f) ポップを起動して水を循環させる。配管の溶接部を ハッマーリ ッグして溶接 スケール を除去する。

(g) 水を排出し, ストレーナ のこし網を調べる。

(2) 二次 フラッシング

(a) 冷却水装置内の主 フィルタ に カートリッジ を入れる。

(b) イオン 交換樹脂筒に樹脂を入れる。

(c) 冷却水装置に純水を満たす。 純水は復水または蒸溜水 タン クから供給する。

(d) ポップを起動して水を循環させる。イオン交換樹脂筒にも循 環させる。発電機の入口で水の電導度が25°C にて1µひ/cm以下に なるまで水の循環を続ける。

(e) 水温をあげて温水 フラッシングを行なう。温水 フラッシングを行 なう時は水質計検出 セルを抜く, また イオン 交換樹脂筒の出入口弁 を閉じる。水温は 70~80°C とする。水温を上げるには,水冷却器 の二次側に温水を通すか,貯水そうに アルミカヒータ(約 100 kW) を入 れる。温水 フラッシング中, 配管を ハンマーリング して スケール などを除去 する。

(f) 水を排出し, ストレーナのこし網を調べる。

(g) スケール などが完全になくなるまで(a)~(f)を繰返す。

(h) 全系統の水を完全に排出する。

6.1.2 発電機を含めた全系統のフラッシング

(1) 発電機下部の バイパス 用接続管をはずし,発電機に冷却水管 を接続する。水質計検出 セルを復旧し,イオン交換樹脂筒の出入口弁 を開く。

(2) 主 フィルタ の カートリッジを取り換える。

(3) 系統に純木を満たす。

(4) ポップを起動して水を循環させる。

(5) 発電機入口 ストレーナ に異物・スケール がたまらなくなるまで フラッシングを続ける。

(6) この間 イオン 交換樹脂筒には規定流量を循環させ, 発電機 入口の電導度が 25℃ にて 0.5 μ℧/cm 以下になるまで運転を続ける。

6.2 冷却水系統の運転・保守

冷却水系統全般および主要構成機器につき、その運転・保守方法 ならびに警報設定値などについてのべる。

6.2.1 運転・保守

(1) 水位と水量

(a) ポップが正常な動作をしているかどうかを発電機入口の圧力計で監視する。

(b) ポップの吐出圧が正常値より 1.0 kg/cm<sup>2</sup> だけ下れば圧力 スイ ッチ によって警報を発し、同時に非常用 ポップが自動的に起動する。

(c) 非常用 ポップ の自動起動は、1週間に1回程度は チェック しておかねばならない。

(d) つぎのいずれかの状態になれば冷却水は停止したと考えられる。

(i) 発電機入口水圧が正常時の値から0.9 kg/cm<sup>2</sup>だけ下ったとき。

(ii) 発電機入口水量が上記の水圧に相当する量だけ下ったとき。

(iii) 発電機出口水温が 95℃ に上昇したとき。

(e) 冷却水が停止した場合はつぎの順序で負荷を減少させる。

(i) 2分以内に発電機出力を固定子冷却水なしの出力(定格出力の25%)まで下げる。

(ii) さらに絶縁 ホースの テフロン 内面が漏れ電流により損傷する のを防ぐため、冷却水停止前の水の電導度によってつぎの二つのう ち、いずれかの処置をとる。

(イ) 冷却水の停止前の水の電導度が 25°C にて 0.5 μ<sub>0</sub>/cm 以下
(正常)のとき:60分以内に発電機電圧を零まで下げ,発電機を停止する。

(α) 25°C にて 0.5 μ<sub>0</sub>/cm 以上(正常でない)のとき: 3分以内
に発電機電圧を零にし、発電機を止める。

(2) 水 温

(a) 発電機入口水温は自動的に 45~50°C に一定に保たれる。

(b) 試運転時の最初の10回ぐらい、負荷上昇中各 コイルの出口 に設けた サーモカップルの全部の読みを記録しておく。営業運転にはい っても、2、3カ月ごとに測定し、水流が パランス しているかどうか 調べる。場合によってはこれらのうちの6点くらいを選んで常時指 示させてもよい。

(c) 負荷変化による出口冷却水温の変化は非常に早く,1分間 に数度の *1-3* である。

(3) 水の純度および イオン 交換樹脂筒

(a) 冷却水の純度は電導度で、発電機出口で25℃において0.5 µひ/cm 以下に保つよう、イオン交換樹脂筒へのパイパス量を加減する。

(b) 純度の値は、水が正常に循環しているときのものでなけれ ばならない。水が循環していないときの指示はあてにならない。

(c) イオン交換樹脂の能力は長期間の間には減少するので,弁の 開度(バイパス量)は数ヵ月に一度くらいは調節し直さなければなら ない。

(d) 発電機出口の水の純度が電導度で 25°C にて  $1.0 \mu_{\text{U}}$ /cm ま で低下すれば警報を発するが、その場合には純度低下の原因を調査 しなければならない。 25°C にて  $5.0 \mu_{\text{U}}$ /cm 程度になれば発電機の 負荷を 50 %に下げ、さらに 25°C にて  $10.0 \mu_{\text{U}}$ /cm の警報が出れば 発電機を手動で停止せねばならない。

(e) 水の純度が下がる 原因には イオン交換樹脂 の劣化のほか, 水冷却器における二次冷却水の漏れ込みなども考えられる。

(f) イオン 交換樹脂はつぎの場合に取り換える。

(i) 圧力損失が正常時の値の2倍になったとき。

(ii) バイパス量を最大にしても出口純度が電導度で25℃にて 0.5 µ0/cm以下に下らないようになったとき。

(g) イオン交換樹脂の取り換えに要する時間は2~4時間であ

るが、 との程度の時間 イオン 交換樹脂筒が働かなくても純度はほと んど低下しない。

(h) イオン交換樹脂を取り換える場合,銅イオンを分析することがのぞましい。

(i) イオン交換樹脂筒にパイパス しなくても 純度が急速 に下るこ とはなく、そのまま数日間運転することが可能であるが、イオン交換 樹脂筒としては、Space Velocity 10. 以下で運転しないほうがよい。

(j) なお,発電機出口の水の純度の変化により, バイパス量を自動的に加減する方法もある。

(4) 主 フィルタ

(a) フィルタ 前後の差圧を監視し、それがはじめの値の2倍くらいになったとき カートリッジを取り換える。

(b) フィルタカートリッジの取り換えは1時間くらいで行なうことが できるが、その間冷却水はパイパスして発電機に送る。

(5) 貯水そう

(a) 貯水そらの水位は側面につけた水面計で監視する。

(b) 木位高は、補給水系統につながる弁の誤操作や木冷却器に おける二次冷却水の漏れ込みなどによって生じる。水位高の警報を 発した場合は ドレン 弁を開いて調整し、原因を調べる。

(c) 水の減少は水面からの蒸発によるもののほか,系統のどこ か,たとえば バルブの グランド 部,ポンプの シール 部などに漏れがある ときなどに起こる。

(d) 水位低の警報を発した場合,補給水を入れると同時に漏れ 箇所を調べる。

(e) 水を補給する場合には、補給水配管内にたまっていた木を 一応全部棄て、さびなどを十分 ブロー させたのち補給する。 こうす ると フィルタ の負荷を軽減させることができる。

(f) 補給水量は流量計で計測し記録しておく。補給水は1週間 に1001くらいである。

(6) 水冷却器

(a) 常時2台の冷却器に直列に水を流す。

(b) 運転中,1台を点検のため系統からはずすことができる。 この場合発電機の負荷は定格の80%まで下げなければならない。

(c) 熱交換能力の低下を防ぐため定期的に掃除し、たまった沈 酸物を除く。湿っているうちのほうがとれやすい。

(7) 機内への水漏れ

機内への水漏れは漏水警報器で知ることができる。この場合,まず ガス 冷却器の水漏れを チェック しなければならない。

(8) 水素 ガスの水系統への漏れ込み

機内水素 ガスの水系統への漏れ込みは、貯水そう上部に設けた水 素検知器の読みの変化により知ることができる。ただし運転開始後 約20日たつと系統の水は 水素 ガス で飽和し、その一部は 貯水そう で分離して気相中に存在する。この水素濃度は周囲温度その他の条 件によって変化するので、水素検知器の読みの変化から漏れ込みが 起こったことを判断するには注意が必要である。

(9) 溶存酸素と銅 イオン

冷却水中の溶存酸素と銅 イオンの量を定期的に測定する。

(10) 発電機停止の場合

(a) 短期(2週間以内):温度調節弁の水冷却器側で閉じ,水 冷却器を バイパス して循環させておく。

(b) 長期(2週間以上): 水を抜き乾燥する。

表 6.1 冷却水系統の警報 Alarm of cooling water circulation system.

検出部位	警報	警報の条件
発電機入口水圧	低	正常値から 0.7 kg/cm <sup>2</sup> 下れば 警報, さらに 0.2 kg/cm <sup>2</sup> 下れば発電機を止める
発電機入口水量	波	正常値から上記水圧に相当する水量に下れば警報, さらに下れば発電機を止める
発電機入口水温	高	正常値より 2°C 高くなれば警報
発電機出口水温	間	正常値より 10°C 高くなれば警部, 95°C 以上にな れば発電機を止める
ポンプ肚出圧力	低	正常値から 1.0 kg/cm <sup>2</sup> 下れば警報
非常用ポンプ	起動	ポンプ肚出圧力が正常値から 1.0 kg/cm <sup>2</sup> 下れば自 動起動
冷却水純度	侹	維度が電導度で 25°C にて 1.0 μ0/cm となれば警 額, 10.0 μ0/cm となれば発電機を止める
貯水そう水位	高,低	正常値 ±75 mm で警報

#### 6.2.2 警報

冷却水関係の警報を表 6.1 に示す。

# 6.3 冷却水系統の定期点検

水冷却発電機の定期点検要領は、水冷却系統および絶縁 ホース 回 りを除けば普通の発電機と同じである。水冷却系統および絶縁 ホー ス回りの点検要領はつぎのとおりである。

## 6.3.1 発電機本体

(1) 水の放出および乾燥

定検時には コイル, 絶縁 ホース 内の水を完全に放出し乾燥させる。 水の放出は機内 ガス を空気に入れ換えた後で行なう。水の放出およ び乾燥方法については 5.1 節で述べたとおりである。

(2) 漏れ試験

- Aller

冷却水系統(コイル・絶縁ホースを含む)の漏れ試験を真空低下法ま

たは加圧圧力降下法などで行なう。

(3) 絶縁 ホースの点検

絶縁 ホースの偏れ,変形などを調べる。不具合な個所があれば取り換える。継手金具は機械式なので取り換えは簡単である。

(4) 水出口 サーモカップル の点検

サーモカップルの点検,記録計の校正などを行なう。

#### 6.3.2 冷却水系統

水を完全に放出して、つぎの各部を調べる。

(1) イオン 交換樹脂筒の樹脂を取り換える。

(2) 主 フィルタ・補給水 フィルタ の カートリッジ を調べ, ほぐれなどの不具合があれば取り換える。

(3) 発電機入口のストレーナを調べる。

(4) 水質計用検出 セルの白金黒めっきがよごれ、あるいははく(剥)離していないか調べる。

(5) ポップ・水冷却器を分解し、点検清掃を行なう。

(6) 温度調整弁, 圧力調整弁, その他弁類の点検。

(7) 制御盤の計器の校正。

などを実施する。

## 7. む す び

以上,水冷却発電機の水系統と運転方法について述べた。冷却水 系統はとくに材料の腐食および運転・保守と密接な関係があるが, 系統の仕様や構成は,数年間にわたる広範囲な腐食問題その他の研 究の成果によって決められた。この点に関し,上記の研究,試験に たずさわれた中央研究所および神戸製作所の関係者のかたがたに, 深く感謝したい。

# 参考文献

(1) Manfred Pluschke : Elektrizitätswirtschaft, Jg. 65, Heft 6, (1966)

# 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\*\*\*

Corrosion on Water Cooled Generators

Central Research Laboratory Takuya HATA • Hiromasa MATSUOKA • Yasuko KAWAOKA Kôbe Works Yoshiaki YAMAYA

In water cooled generators corrosion by water poses basic problems in the selection of materials, construction and other designs, and determination of operating method. Consequently, experiments have been made to obtain highly reliable information of corrosion under various condition, by using a simulated test loop from the viewpoint of corrosion on actual machines, on generator materials-chiefly on copper and its brazed parts-to see the influence of various factors. It has been revealed that, the lower the water temperature and the higher the specific resistance of water, the less the corrosion. This phenomenon is noticeable with brazed parts. Current through the interface of metal and water has large influence on copper but very small one on stainless steel ; AC has no practical influence. Progress of corrosion in ten years is guessed a few  $\mu \sim 30 \mu$  with copper and somewhere about 150  $\mu$  with silver brazed parts.

# 1. まえがき

木冷却発電機に使用される木は純度の高い木であるから、腐食自体は一般の腐食よりはるかに少ない。しかし発電機の寿命は20~30年を要求され、しかも冷却木は発電機の重要部分である コイルの中を流れるので、腐食に関する長時間にわたる信頼性の高い データが 必要である。

腐食研究の立場から考えると、腐食速度の小さい腐食を検討する ためには長時間を要するので一般には加速試験が行なわれるが、そ の結果をもとに実際の腐食量を推測することは非常に困難である。 とくに純木のように不純物の少ない腐食媒による腐食の場合には、 加速のための操作(たとえば塩を添加するなど)が腐食の機構を変 えてしまい、実際の腐食との対応を著しくそこなうおそれがある。 したがって信頼性の高いデータを得るためには、できるだけ実際と 同じ条件で試験を行なう必要がある。そのため著者らは実験の大部 分を実機の 冷却系統を模擬した 腐食試験 ループを用いて行なった。 この結果の一部はすでに報告<sup>(1)</sup>したが、この報告ではその後の結果 を中心にのべる。

純木中での金属の腐食に関する研究は、原子炉および ポイラ 材料 について多く行なわれているが、これらは鋼および ステンレス 鋼の高 温高圧下での研究が主であり著者らの目的にあわない。木冷却発電 機で対象となる材料は鋼およびろう材が主であり、水温もたかだか 100°C までであり、これらの材料および温度における研究は少ない。 著者らと同じ目的の研究は G. V. Browning 氏<sup>(3)</sup>らおよび大橋氏<sup>(3)</sup> らによっても行なわれているが、発表されている データが不十分で あり信頼性に問題があるように思われるので、著者らはこの点に主 力を注ぎ研究を進めた。

## 2. 腐食試験ループ

腐食試験のために4種類の腐食試験 ループを使用した。 この他に 機能試験 ループにおけるモデルコイル(実機のコイル)について腐食量の 測定を行なった。(モデルコイルテストについては本誌別編参照)。

図 2.1 は腐食試験  $\mu$ -プ I の系統図である。 この  $\mu$ -プ はすべて ステンレス 鋼で構成されており、 ポンプ には キャンドモータポンプ を使用して

いる。 図において イオン 交換筒は腐食によって純度の低下した水の 純度を高めるためのものであり,脱気塔は水中の溶存酸素を調節す るためのものである。図2.2 はこの ループの腐食試験部分であり,



図 2.1 腐食試験 ループ I の系統図 Flow-diagram of corrosion test loop I.



A:通電試料 B: 總緑ホース C: 試片ホルダ 図 2.2 腐食試験 ループ I 腐食試験部 Testing part of corrosion test loop I.

三菱電機技報・Vol. 43 · No. 4 · 1969



図2.3は腐食試片ループⅡの系統図である。ループⅡが水冷却発電 機に特有な電圧印加、あるいは中空導体を流れる電流の影響、およ び種々の材料の腐食性を調べることをおもな目的にしたのに対して、 この ループは 流水中での腐食の測定を種々の条件で 効率よく行なう ことを目的とした。構成材料はループIと同様すべて ステンレス 鋼であ る。図2.4 がこのループの全景であり、水平に走っている白い4本 の ホース A が試片 (20×100×1 t) をそら入するための試片 ホルダで, テフロンホース からなっている。 各試片 ホルダの流速はおのおの独立に 調節することができ、したがって同時に4レベルの流速についてのデ -- タ が得られる。 縦長の円筒 B は加熱 タンク で、上部は気相になっ ておりこの空間に任意の ガスを通ずることによって溶存 ガスを変え ることができる。なお、溶存ガスとしては空気、窒素および水素の 3種類を選んだ。窒素は空気を除去し、溶存酸素の少ない条件で実 験を行ならためであり、水素は実機においては機内が水素加圧状態 になっており、 絶縁 ホース などからの拡散により水素が水に溶解す ることを考慮し選んだものである。

腐食試験 ループⅢは、系統図は ループⅡと同じなので省略する。異



図 2.5 腐食試験<sub>ルー</sub>プ IV Corrosion test loop IV.

なるところは規模が約 1/4 であることと,接液部の大部分が銅で構成されていることである。

図 2.5 は腐食試験  $\mu$ -プ IV の全景である。 この  $\mu$ -プは3台の独 立した  $\mu$ -プからなっており、3種類の異なる条件で同時に試験する ことができる。現在は3種類の溶存  $J_{\lambda}$  (空気・窒素・水素), につ いて長期腐食試験中である。A は FEP (Fluolinated ethylene propylene,  $\tau$ つつの一種)からなる試片  $\pi \mu \sigma$  で、大きさ  $11 \times 80 \times 11$ の試片が多数そう入されている。流速は他の  $\mu$ -プと同様  $4 \nu \eta \mu$  で 行なえる。配管は鋼管であり、加熱 タンクと  $1 \pi \nu \sigma$  没換筒が ステンレス 鋼である。実機の水系統においても銅(コイル)と ステンレス 鋼が使用 されており、 この点からこの  $\mu$ -プの構成はより実機に近いわけで ある。 なお流量は タンク 内に噴射する水の高さから測定できる。

実験の大部分はこれらの腐食試験 ループを使用したが,不純物の 影響および 流電の影響などは テャッヶータ形の セパラブルフラスコ を使用した。

3. 実 験

腐食の観点から水冷却発電機をみると,まず コイルの構成材料で ある銅およびろう材の腐食が問題となる。ろう付け部についてはろ う材自体の水中での耐食性のみでなく,ろう付けのための つラックス が残留する可能性があり,残留 つラックス による腐食も検討する必要 がある。次に水による直接冷却の電気機器に特有と思われる腐食で, 高電圧印加により水との間に出入する電流による腐食(以下流電腐 食と呼ぶ)が検討の対象となる。この他に一般に腐食に影響する因 子として溶存 ガス・温度・接触腐食および不純物などの影響が検討 されなければならない。以下の実験はこれらの観点から行なった。

3.1 材料の腐食性の比較

図3.1は水冷却発電機に使用される可能性のある材料の腐食さ れやすさを示したものである。これらは図に示す条件の範囲で数回 にわたり実験を行ない,その結果をまとめたものである。ステンレス 鋼はほとんど腐食を受けない。1年あまり使用された配管の内面は フランジとの溶接部で,まれにわずかな腐食が認められる程度で他の





部分は使用前とまったく変わっていない。 洋白は ビッティングを生ず ると腐食は大きいが、そうでない場合は銅よりむしろ少ない。 銀ろう (BAg-1a, BAg-4, BAg-6)の腐食は銅と同じか少し多い



程度であるが、シルフォス 15、フォスシルパ2 および フォスシルパ6 はいずれ も腐食がはげしい。これらは Ag-P-Cu 系ろう材でいずれもりんを 含んでいる。

鋼については電気鋼 (TPC), OFHC (Oxygen free high conductivity copper) および VMC (Vacuum melt copper) の3種に ついて試験したが,腐食の差は認められなかった。

#### 3.2 溶存ガスの影響

以下の実験には 図 3.2 に示すような中央部を突合わせ ろう付け した試片を用い、銅およびそのろう付け部の腐食を検討した。

図 3.3 は銅についての溶存  $f_{3}$ の影響を示したものである。 な お、水素溶存についても行なったが、窒素溶存の場合とほとんど同 じなので省略する。これらの実験は腐食試験  $\mu$ -jIIによるもので、 流速は 0.16, 0.5, 1.6 および 5 m/s の  $4_{\nu}$  について行なった。 図 中に示した水の比抵抗はすべてその実験の温度における値である。 なお、温度と水の比抵抗の関係は大略 図 3.4 のとおりであり、高 比抵抗の水ほど温度による変化が大きい。溶存酸素量は回転白金電 極法で測定した結果、空気溶存の場合は 2 ppm、窒素および水素の 場合は 0.02 ppm 以下であった。図 3.3 から銅の腐食に対する溶存  $f_{3}$ の影響を比較すると、空気の場合は窒素のほぼ 2 倍の腐食量で ある。

腐食後の試片の外観は一般に窒素溶存の場合は黒紫色で、空気溶存の場合は黒色である。X線回折の結果、これらの腐食生成物はいずれも亜酸化銅と酸化銅であり、窒素では亜酸化銅が多い。流速5m/s では流れの上流側の試片の先端でキャビティションエロージョンを受けているものがある。窒素にくらべ空気溶存の場合にはげしいエロージョンを受けているので、キャビティションの機械的要素だけでなく腐食も大きく影響していることがわかる。図3.5にキャビティションエロージョンを受けた試片の先端を示す。

次にろう付け部の腐食状況をのべる。 図 3.6 に実験結果を示し た。腐食量測定はろう付け部を切断し、その断面を顕微鏡で観察す ることによって行なった。 図 3.7 はろう付け部断面の一例で、 図 3.7(a) はろう材に シルフォス 15 が使用されており、 いちじるしく 腐食されている例である。図 3.7(b) はろう材は BAg-1 a であり、 銅の部分とほぼ同じ腐食量で、とくにろう付け部が腐食されている ということはない。ろう付け部の腐食の形態は大きく三つに分ける ことができ、 図 3.7(a) のようにろう材と銅の境界が局部的に腐 食されているもの (A形と呼ぶ) のほかに、ろう材部分のみが均一 に腐食するもの(B形)、およびろう材部分の腐食が銅の部分と同等 あるいはろう材部分がわずかに弓形にくぼむもの (C形) がある。 図 3.6 においても腐食量の多い シルフォス 15 はA形 の腐食を受けて いるものが多い。BAg-1 a、BAg-4、BAg-6 はB形またはC形の腐 食であり、腐食量もシルフォス 15 とくらべ少ないことがわかる。なお、

三菱電機技報・Vol. 43・No. 4・1969



谷棒クラフはろう科を示す。 左からシル フォス15, フォスシルバ2, フォスシル バ6, BAg-6, BAg-1a, A, B, C は 図3.5に示した腐食のパターンを示す。

図 3.6 ろう付け部の腐食, 溶存 ガスの影響 Influence of dissolved gas on corrosion of brazed part.



図 3.8 水の比抵抗の影響 Influence of resistivity on water corrosion of copper and its brazed parts.

図 3.9 温度の影響 Influence of temperature on corrosion of copper and its brazed parts.



図 3.10 流電試験装置 Test equipment to study influence of current.



図 3.7 ろ ら 付 け 部 の 腐 食(×265) Corrosion of brazed parts (brazing : Silfos 15) (×265).

> A形の腐食は シルフォス 15 のほかに フォスシルバ2 および フォスシルバ6 に 見られた。 Ag-P-Cu 系ろう材がこのようなせん孔的な腐食を示す のは、これらの腐食によってりん酸を生ずるためと思われる。

> 実験はやはり水素溶存についても行なったが、これらの結果と合わせ、溶存 ガス別に腐食量の違いをみると、銅の腐食と同様に窒素と水素はほとんど差がなく、空気の場合は BAg-1 a, BAg-4, BAg-6 ではこれらの約2倍の腐食量を示している。Ag-P-Cu 系はさらに大きい腐食量である。

#### 3.3 水の比抵抗の影響

図 3.8(a) および(b) に銅およびろう付け部に対する木の比抵 抗の影響を示した。銅の腐食に対する影響は少ないが,ろう付け部 では比抵抗の増加で顕著に減少している。 Ag-P-Cu 系ろう材でと くにこの傾向の大きいことが目だつ。

#### 3.4 温度の影響

温度の影響を図 3.9 に示した。これは 90°C,55°C および 40°C における試験結果であるが、これから銅およびろう付け部の腐食は 温度の低下とともに減少することがわかる。とくにろう付け部では 55°C から急げきに少なくなっている。 なお図 3.9(a)の 40°C の 場合、低流速で腐食量が増しているが、この理由は低温・低流速で 生ずる腐食被膜が多孔的であるため、溶存酸素などが侵入しやすく、 また被膜の中に純度の低い水が存在しやすいためと考えられる。

#### 3.5 電流の影響

電流が腐食に影響を与えるのは金属と水との間で電流の出入があ るときのみである。中空導体の内部に水を通じ、中空導体に、たん に電流を通じた場合は導体の抵抗が水の抵抗にくらべ十分小さいた め水と導体との間には電流の出入が起こらず、したがってこのよう な電流の通じ方は腐食に影響しない。(図2.2 に示した通電試験部 での実験によってこのことは確認された)したがってこの節では金 属と水との間に電流の出入のある場合、すなわち流電腐食について のみのべる。

実験は図 3.10 に示すように板状の試片を平行にならべ、これらの間に電流を通ずることによって行なった。なお、セパラブルフラスコの内部は4室に仕切られており、4レベルの電流で同時に実験することができる。

図 3.11 および図 3.12 に実験結果を示した。(詳細は既報<sup>(4)</sup>参 照)図 3.11 から銅は直流ではもちろん交流](60<sup>Hz</sup>) でもかなり腐 食が促進されることがわかる。一方, ステンレス 鋼は交流ではほとん

557










図 3.13 フラックス 水溶液中での銅の腐食 Corrosion of copper in aqueous solution of flux.



ど腐食されず,直流でも銅の交流による腐食よりはるかに少ない。 図 3.12 は銅の腐食に対する交流の周波数の影響を調べたもので, 図に記した 範囲の電流密度では 5,000 Hz 以上の交流では 流電の影響は認められない。高い周波数で腐食の少なくなる理由は,電気二 重層への充放電および物質移動過程を考慮することにより理解でき る。

#### 3.6 残留フラックスの影響

フラックス がろう付け部の表面に残留している場合は、流木により すみやかに洗い流されてしまうので問題にならないが、ろう付け部 の微細な毛管中に存在する場合は、毛管内部は比較的高濃度の つラ ックス の水溶液に長時間接触する。また、毛管内部に気相が存在する 場合には 100 %湿度の中で つラックス と接触する。このような場合を 想定し残留 つラックス の影響を調査した。

図 3.13 は ハッディフラックス, コポックス およびほう砂の 3 種類の フラックス 水溶液についての実験結果である。なお, フラックス はあらかじめ 700~800°C で焼いたものを水に溶解した。

この結果から、空気溶存のときの腐食量が非常に多く、溶存酸素の影響が大きいことがわかる。pHは ハンディフラックス 6.9、コポックス 8.7、 ほう砂は 9.0 であり、窒素溶存の場合は低 pH のものほど腐食が多 く、したがって水素発生形的腐食の傾向を示している。なお、水素 溶存の場合は窒素溶存と変わりなかった。

100% 湿度の中での試験では 75992、は試片の上に塗布したが、 均一に被ふくできないためばらつきが多く、各種 75992、の間に差 をつけがたい。しかし、腐食の形態は  $\Lambda v \pi^2 r 75992$ 、は均一な腐食 で 200 的にみても深い腐食がないのに対し、他は局部的に深い ピ ットを生じていた。したがって実際的な面からは  $\Lambda v \pi^2 r 75992$ 、の腐 食が最も少ないといえよう。腐食の絶対量を考えてみるに、その一 例として実機で予想される最悪の場合として、長さ 45 mm の毛管 に 75992、が存在し、その 75992、が最悪の条件で薄められていく 場合、毛管中の 75992、減度が十分低く(1 ppm)なるために約4 年を要する。したがって、75992、に  $\Lambda v \pi^2 r 75992$ 、の除 去されるまでの4年間に 96  $\mu$  の腐食を生ずる。すなわち残留 75992スによる腐食量は最悪の場合でも 100  $\mu$  程度であり、これに対し て実機の場合ろう付け代は十分長くとることができるので、問題と ならない。

#### 3.7 不純物の影響

セパラブルフラスコ を使用し、銅と ステンレス 鋼を共存させた実験におい て、ステンレス 鋼に腐食が生ずる (低級な ステンレス 鋼を使ったときな ど)と、鋼の腐食が増加する場合があった。また、腐食試験 ループ において イオン 交換樹脂のもれ込みや フィルタの崩壊の起とった場合、 腐食量が増加することを経験した。

ここでは不純物として ステンレス 鋼の腐食生成物の影響を検討した 結果をのべる。(イオン 交換樹脂, フィルタ 材などの影響は現在検討中 である)

図 3.14 は ステンレス 鋼のさびの主成分である鉄・クロム および ニッ ケル の水酸化物を添加した水中での腐食試験結果である。 これから 水酸化 クロムを添加したものが 他にくらべ約2倍の腐食量 であるこ とがわかる。 すなわち鋼の腐食の増加の原因は水酸化 クロム である と考えられる。水酸化鉄・水酸化 ニッケル およびなにも添加しなかっ たものを比較するとわずかな差であるが、水酸化 ニッケル を添加した ものの腐食が少ない。 水酸化 クロム の存在が腐食を促進する理由と

三菱電機技報・Vol. 43・No. 4・1969



図 3.15 ステンレス鋼と銀ろう(BAg-1a)の境界近ぼうの 腐食状況(倍率×400)

State of corrosion near the interface of stainless steel and BAg-1 a.







and the second



しては 20ム 酸の生成が考えられる。 すなわち,関係する電極反応の電位は

2 Cu+H<sub>2</sub>O=Cu<sub>2</sub>O+2H++2e<sup>-</sup> 0.06 V (vs. NHE at pH=7) Cr(OH)<sub>3</sub>+H<sub>2</sub>O=CrO-<sub>4</sub>-+5H++3e<sup>-</sup> 0.55 V (vs. NHE at pH=7) 2H<sub>2</sub>O=O<sub>2</sub>+4H++4e<sup>-</sup> 0.8 V (vs. NHE at pH=7) であり、水酸化 クロム は酸素に酸化されて クロム 酸にな りうるし、生 成した クロム 酸は十分に銅に対し酸化力をもつことがわかる。 鉄も 2 価と 3 価で酸化還元系を形成するが、 pH=7 (中性) においては その電位は -0.15 V (vs. NHE) であり銅に対して酸化力をもたな い。したがって影響しないと考えられる。水酸化ニッケルは鉄および クロムの水酸化物にくらべると イオン 積が非常に大きいため、その添 加によって水の pH は約8 (アルカリ性) になる。そのために腐食量 が多小少なくなったものと考えられる。一般に金属の腐食は、少な くとも中性近傍では、アルカリ側で少なく、酸性側で多くなる。(著 者らの実験結果では pH=10から7 にわたって徐々に増加し、7か ら4に向って急に増加する)同じ空気溶存の場合でも、炭酸 ガスを 除去したときとそうでないときとでは後者のほうが腐食量が多いこ とを観測したが、これも pH の影響と考えられる。

なお, との実験は静止水中で行なったもので,μ-プにおけるよう な流動状態では 水酸化 クロム の影響の程度は少なくなるものと 考え られる (4 章参照)。

#### 3.8 接触腐食

一般に異種金属の接触で卑な金属(腐食されやすい金属)の腐食 が促進される。しかし腐食媒の比抵抗の増加とともにその影響は小 さくなる。したがって常識的には純木中では接触腐食は問題になら ないと考えられる。図3.15はステンレス鋼と銅のろう付け部の腐食 状況を示すが、水の比抵抗は100kΩ-cmで、純木としては低比抵 抗であるが、接触腐食は認められない。接触腐食であれば銀ろう (BAg-1a)のステンレス鋼と接触している部分がもっとはげしく侵さ れる。

なお,理論的に検討した結果では,接触腐食によって流れる電流 は酸化剤の濃度(溶存酸素濃度)にほぼ比例し,水の比抵抗の平方 根に反比例する。また,接触腐食が影響する範囲も水の比抵抗の平 方根に反比例する。

#### 3.9 長期腐食試験結果

腐食試験  $\mu$ -ブ IVを使用して実験したが、1.5 年目までの結果は、 溶存  $J_{\lambda}$  別に銅の腐食量を比較すると、空気の場合が最も少なく、 次いで水素および窒素の順であり、その腐食量の割合は流速 1.6~ 0.16 m/s の範囲では空気1 に対して水素 2, 窒素 4 の割合であった。 また、この流速の範囲では腐食量の時間による増加は 0.5 年 以後は 認められない。すなわち腐食が進行していない。図 3.16 は空気溶 存状態での実験結果であるがこのことがよくうかがえる。 5 m/s で は空気の場合は、ほぼ直線的に増加しているが、水素および窒素で は飽和する傾向を示している。流速による腐食量の差は一般に低流 速ほど腐食量が少なくなっているが、1.6~0.16 m/s では大きな差は ない。腐食試片の外観は空気溶存では黒色、水素および窒素でも多 くは黒色であるが、多少紫またはかっ(褐)色を帯びているものがあ った。 5 m/s の試片の流れの上流側先端にはいずれも 軽度の ++ビ  $_{7-f2=2 \cup ID-i2=2 \cup}$ が認められた。

図 3.17 はろう付け部の腐食量を示す。縦の線で結ばれた二つの 点は、ばらつきの範囲を表わしている。

この図から、これらのろう材 (BAg-1 a, BAg-4, BAg-6) では 0.5 年以後、腐食が進行していないことがわかる。 シルフォス 15 は図 示しなかったが、0.5 年目ですでに他のろう材の2~5 倍の腐食を 示している。溶存 ガス による腐食量の差は BAg-1 a, BAg-4, BAg -6 については 空気溶存でわずかに多いと思われる 程度でとくに差 はないが、シルフォス 15 については窒素および水素では明らかに少な くなっている。

との長期試験の腐食量は銅およびろう付け部いずれについても, すでに 3.2節 などに示した腐食試験結果とく らべ,いちじるしく 少なく,しかも,むしろ空気溶存で,腐食が少なくなっている。と の点については4章で考察を試みる。

#### 3.10 モデルコイルの腐食量

本誌別編にのべている モデルコイル では冷熱 サイクル をくり返し,腐 食量の測定も行なった。条件は下記のとおりである。

溶存 ガス : 窒素

- 水の比抵抗:1 MΩ-cm 以上 (80°C)
- 流速 : 1.6 m/s
- 温度 :85℃と約25℃の4時間を周期とするくりかえし
- 時間:60~85°Cの延べ時間 5,000時間

約 25℃ の延べ時間 8,000 時間

ループを構成している 各 コンポーネント および 配管は ステンレス 鋼であり,モデルコイル のみが銅 (OFHC および TPC) である。

モデルコイルの腐食量はコイルの重量変化から直接測定することはで きないので、フイルタおよびイオン交換樹脂その他に捕獲された銅お よびモデルコイルの中空導体内面に付着している腐食生成物の量から 推定した。この結果平均腐食量は1.5 μであった。このうち0.5 μ分 が中空導体内面に付着していたものである。中空導体内面は黒色で 腐食生成物が薄くち密に付着している。付着量は場所により多少異 なり、直線部に対してわん曲部分は1~2割少ない。中空導体内面 の腐食形態は均一腐食であり、ピッティングはまったく認められなかっ た。

中空導体の  $\wedge_{yg}$  へのろう付けは  $j_{N74\chi}$  15 で行なったが,ところどころに腐食を認めたが,  $j_{N74\chi}$  15 の腐食量としては 3.2 節などから予想される値より少なかった。

#### 4. 考 察

#### 4.1 腐食速度の推定

以上にのべた実験結果はすべて比較的短かい限られた時間で得ら れたものである。これらの結果をいかに解釈し、長時間後の腐食量 をいかに推定するかが重要な問題である。以下にこの点について検 討する。

#### 4.1.1 流水中での腐食速度則

腐食速度則として,(1)直線則,(2)放物線則および(3)対数則 がよく知られている<sup>(5)</sup>。(1)は腐食被膜を生じない場合か,できて も多孔的であったり,欠陥が多く腐食に対して保護的に働らかない 場合である。(2)は腐食被膜が保護的に働らき腐食速度が被膜厚さ に反比例して小さくなる場合であり,腐食量は時間の平方根に比例 して増加する。(3)は非常に腐食保護作用の強い腐食被膜が生ずる とき成立する速度則で不働態被膜の成長はこの速度則にしたがう。 この場合一定時間以後は腐食はほとんど進まない。

それでは、われわれが問題としている流水中での腐食速度則はど うかというと、まず多孔的な場合は直線則にしたがう。はじめから 比較的ち密な被膜が生ずる場合は腐食反応の律速過程は被膜中の物 質移動過程となり、このときは基本的には放物線則にしたがわなけ ればならない。ただ異なるところは生成した腐食被膜が流水によっ て一定速度で表面から洗い流されていることである。この点を考慮 に入れて速度式を求めると、腐食量は、はじめ放物線則にしたがっ て成長し、時間の経過とともに直線則に乗り移ってくる。すなわち、 この速度則は図4.1 に示すように、はじめは時間の1/2 乗に比例 し、時間が経過するにつれ、1 乗に近づいてきて、ついに被膜の洗 い流される速さと被膜の成長する速さ——腐食速度——が一致する と腐食量は時間の1 乗に比例する。これが流水中での特長的な腐食



図 4.1 流水中での腐食速度則 Corrosion rate law in running water.

速度則であると考える。なお、この速度則の極端な例として、非常 に短時間のうちに 1/2 乗から 1 乗に乗り移ってしまうとすると、被 膜が多孔的である場合の直線則と区別できない。区別できないとい うより、多孔的被膜の場合も当然被膜は洗い流されているわけで、 被膜のち密度が違うというだけで本質的には同じであり、流水中の 速度則の特別な場合とみることができる。

さらにち密な被膜を生じ、被膜の内部で物質移動が起こらないし、 また流木による洗い流しも起こらないとすると腐食の進行は対数則 的となる。すなわち腐食は一定量以上に進まなくなる。本来、対数 則はトッネル効果によって流れる電子が、腐食を律している場合成立 する速度則であるから、被膜厚がきわめて薄い場合にのみ成立する もので、本実験のように被膜の存在を肉眼で検知できるほど厚い場 合にはとうてい適用できない。したがって 3.9 節 にのべた実験結 果はたんに見かけが似ているだけである。したがってこの結果は、 はじめ、ち密度の低い(厳密には物質移動の起こりやすい)被膜が 生じ、これが徐々にち密になり厚くなる過程で腐食が進行し、被膜 が十分ち密(物質移動が起こらない)になり、その後の腐食は停止 したと理解できる。3.9節の結果の場合はすでに 0.5 年までの間に 被膜は十分ち密になってしまっていたために、その後の腐食の増加 が認められなかったと考えられる。

#### 4.1.2 腐食に対する種々の因子の影響の仕方

種々の因子はおのおの異なった働らきかけ方で腐食に影響する。 ある因子は(1)腐食反応の熱力学的ポテンシャル に影響し、また他の 因子は(2)腐食反応の比反応速度に、さらに他の因子は(3)腐食 被膜の性質(ち密度,密着性など)などに影響するであろう。(1) の因子は酸化剤・還元剤であり、酸化性の不純物である溶存酸素・ クロム 酸などは反応の ポテンシャル を高め腐食を促進する。窒素は前述 のように溶存酸素を除去する目的で加えたものであり、溶存酸素を 除去し腐食反応の ポテンシャル を低めることで 腐食を少なくする 効果 がある。図 3.3 および図 3.6 の腐食量の差はこの効果のあらわれ とみることができる。水素も著者らの実験の範囲では上記の窒素と 同じ効果のみであったと考える。3.9節の結果では水素溶存におけ る腐食量が窒素の場合より少なくなっているが、還元作用のためで はないと考える。還元力が発揮されたのであれば腐食被膜は存在し ないはずであるが、現実には窒素におけるとほぼ同じ外観の被膜が 生じている。腐食量の少ない原因は後にのべる被膜の性質の違いに よると考える。

(2)に本質的に影響をもつ要因は温度のみであり、 図 3.9 など

			温 땨	流 谏	腐食	速度	10 年後	の腐食量 (µ)
	溶存:	ガス	ົ(°C)ົ	(m/s)	銅	ろう付け部 (銀ろう)	銅	ろら付け音 (銀ろう)
モデルコイル	簺	紊	60~85	1.6	1.5 µ/5,000 時間		26.5	—
	空	戾	75	5	2.4 µ/1.5 年	05	16	145
	空	凤	75	1.6	0.4 µ/1.5 年	25 μ/1.5 4 <sup>2</sup>	2.7	100
	窒	索	75	5	3.5 µ/1.5 年	20 (1 .E. 45	23	133
ループ IV	簺	紊	75	1.6	2.2 µ/1.5 年	20 μ/1.5 « <sub>Γ</sub> -	15	100
	水	紧	75	5	2.9 µ/1.5 年	90 // 1 E ÅF	19	133
	*	紊	75	1.6	1.1 µ/1.5 年	20 µ/1.5 म	7.5	133
大橋氏(3)ら	空乡	8( ?	90	-	2 mdd (7 µ/年)	7 mdd (24 µ/年)	70	240
Browning <sup>(2)</sup> 氏ら	空乡	त् ?		_	0.5 μ/年	_	5	_

#### 表 4.1 腐 食 量 の 推 定 値 Estimation of corrosion amount in a long period.

(注) 腐食試験の最終時点の腐食量と原点をむすぶこう配を腐食速度とした.10年後の腐食量は時間に正比例して増加するものとして計算した。



区 4.2 卵 の 腐 度 (静止 不中) Corrosion of copper (stationary state).

に示した結果はそのあらわれであろう。

and the second

被膜の性質に影響する要因はなにか、またそれが被膜の性質にど のように影響するかについては理論的に検討しうることは少なく、 経験にたよるところが大部分である。理論的にある程度わかってい ることは被膜の バルク 中の物質移動(ミクロ 的なち密度と考えること ができる)についてであり、原子価制御の理論を適用することがで きる。これによると被膜中の銅とクロムが置換すると イオンおよび電 子の移動が起こりやすくなると考えられる。(これがクロムが銅の腐 食を促進する原因の一つと考えることもできる)

ところで3章でのべた実験結果をみると腐食試験  $\mu$ -j II での結 果は腐食量が多く、腐食試験  $\mu$ -j IV では腐食量が少ない。この原 因の大部分は腐食被膜の性質の差によっていると考えられる。すな わち、これらの腐食被膜の状態を比較すると後者は前者より一般に ち密である。このことはまた、各  $\mu$ -j において  $\eta$   $\mu$  g に付着する 腐食生成物の多少(すなわち被膜の洗い流されたものの多少)とも 一致している。これらから各場合の腐食の差は被膜の性質の差によ ることはほぼ間違いないが、いかなる因子が被膜の性質に影響する か明確でない。しいていえば、 $\mu$ -j II では  $+\gamma$ iFe-g#ij j が使用 されているが、しゅう(摺)動部分が多く、またすべての  $\eta$ ig i f ii  $\eta$  i f i g i f i f i f i f i f i f i f i f i f i f i h i f i f i f i f i f i f i f i f i f i f i f i f i f i f i f i f i f i f i f i i f i i f i って酸化剤として働らき, あるいは被膜中の イオンの移動を容易に するのみでなく, 被膜のち密度にも影響しているのではないかと考 えられる。

#### 4.1.3 腐食量の推定

著者らは前述のように種々の腐食試験  $\mu$ -プを使用して実験を行 なったが、機能  $\pi$ ストループにおける  $\pi$ デルコイル の腐食量および腐食試 験  $\mu$ -プ IV の結果をもとに 10 年後の腐食量の推定を試みる。  $\pi$ プルコイル および  $\mu$ -プ IV の腐食量を基礎にする理由は、これらが最も実機 に近い条件の  $\mu$ -プ だからである。

腐食量の計算は、いずれも最終測定時点の腐食量と原点を等目盛 の グラフ の上でむすび、そのこう配を腐食速度とした。 腐食速度は 一般に時間とともに低下するので、こうして求めた腐食速度から計 算される腐食量は実際より多い目になるはずである。ろう付け部の 腐食速度についても同様である。

表 4.1 はこのようにして求めた腐食量の推定値である。参考の ために G. V. Browning<sup>(2)</sup>氏および大橋氏<sup>(3)</sup>らの結果も示した。こ れらの実験はいずれも直径約 50 mm の円板状の試片を用いて行な っているが、実験条件の詳細はのべられていない。

著者らの実験結果にもとづくと、 この表から 10 年後の 腐食量は 銅については 数 μ からせいぜい 30 μ までであり、ろう付け部 につ いては 150 μ 前後である。これらの腐食量は実機にとって十分小さ な値である。

#### 4.2 流れの影響

流れは、すでにのべたように腐食生成物を洗い流し、腐食被膜を 薄くし、腐食速度を高めるように影響するが、この他に酸化剤を常 に金属表面に運搬し、前述の腐食反応の熱力学的 ポテンシャル を高め る働らきがある。

#### 4.2.1 静止水中および流水中における腐食の温度依存性の差

図4.2に示したように空気を溶存させた水中での腐食速度の温 度依存性は、静止水中と流水中では非常に異なる。すなわち静止水 中では 55℃ 付近を境としてそれ以上では温度が上昇するほど腐食 量は減少する。この理由は温度の上昇で溶存酸素が減少するため、 すなわち、腐食反応のポテッシャルが低下するためである。これに対 して流水中では温度が上昇するほど腐食量は増加する。この理由は 温度の上昇にしたがい静止水中と同様に溶存酸素濃度は減少するが 流れによって腐食反応に必要な酸素は十分に供給され、したがって 腐食反応のポテッシャルは常に高く維持され、温度上昇による腐食反 応の比反応速度の上昇によって腐食量が増加するものと考えられる

#### 4.2.2 窒素溶存状態での腐食

窒素を溶存させ溶存酸素をほとんど含まない水中での静止状態と 流水状態との腐食量の違いも同様に考えられる。すなわち静止水中 ではほとんど腐食が進行しないが,熱力学的にはたしかに銅の腐食 は溶存酸素(一般に酸化剤)が存在しなければ起こらない。それに もかかわらず空気溶存とあまりかわりなく,あるいはむしろ多く腐 食しうるのは,流水中においては微量ではあっても流れによって常 に酸素が供給されるので腐食は十分に進行しうるものと思われる。

#### 4.2.3 ろう付け部腐食の溶存ガス依存性

ろう付け部腐食の窒素あるいは水素溶存による腐食量の減少割合 が一般に銅素地のそれより大きいが、それはろう付け部が腐食によ ってくぼみ、その部分では流水の影響が少なくなるためと考えられ る。さらにせん孔的な腐食を示す Ag-P-Cu 系ろう材が、窒素ある いは水素溶存で他のろう材より腐食の減少割合が大きいことも同じ 理由によるものであろう。

#### 4.2.4 クロムの影響

20ムの水酸化物(酸化されて 20ム酸, すなわち酸化剤になる) の腐食促進作用は 図 3.14 に示したように 静止水中では 顕著に認 められる。著者らは銅製の腐食試験  $\mu$ -プ II を製作し, 流水中での 20ムの腐食促進作用を  $\mu$ -プ II における腐食量と比較することによ って検討したが,  $\mu$ -プ II による 腐食量がわずかに少ない 程度で, あきらかな差は認められなかった。この理由も上述と同じと考える。

すなわち, クロム酸の生成によってすでに存在する溶存酸素とあわ せて酸化剤の濃度が高まるが、静止水中ではこの濃度の上昇が直接 影響するが、流水中では流れによって、すでに十分供給されていて、 腐食速度は他の過程で律せられているので、濃度の上昇によってさ らに供給されても腐食速度はほとんど上昇しないものと考えられる。

以上にのべてきた流れの影響は腐食反応の素過程からみると,ま ず水の中を酸化剤が移動する物質移動過程と,後続して起こる金属 の酸化の過程とは大別されるが,上記の考察はいずれも静止水中で は物質移動が律速過程であり,流水中では酸化反応が律速過程であ るということに基礎をおいている。このように流れの有無で律速過 程(腐食の機構)が変わるということは,今後の研究においても十 分留意すべきことであろう。

#### 5. む す び

実機の水系統と腐食の観点から模擬した腐食試験  $\mu$ -ブを使用し, 純木(温度 40~90°C, 比抵抗 0.1~1.2  $M\Omega$ -cm)中での金属の腐食, おもに飼およびそのろう付け部の腐食について検討した。

その結果をまとめると次のとおりである。

(1) 銅、ステンレス 鋼および洋白の腐食を比較すると、最も腐食 の少ないのは ステンレス 鋼 (SUS 27) でありほとんど腐食しない。洋 白は ピッティングを生じやすく、ピッティングを生ずると銅よりはげしく 腐食するが、そうでない場合は銅より少なめである。

(2) ろう材については Ag-P-Cu 系ろう材は銀ろう (BAg-1 a, 3Ag-4, BAg-6) にくらべ腐食されやすい。

(3) 銅およびろう付け部に対する温度の影響は高温ほど腐食が 多い。ただし静止水中では 55℃ を境としてこれより高温では腐食 が減少する。流水中と静止水中のこの差は律速過程が異なるためと 推論された。

(4) 水の比抵抗の影響は比抵抗が高いほど腐食が少ない。この 夏向はとくにろう付け部で大きい。

(5) 流電の影響は銅に対しては大きく,交流(60 Hz)であって も腐食が促進される。ステンレス鋼(SUS 27)は流電に対してきわめ て強く、とくに交流 (60 Hz) に対しては実用上は腐食しないと考えてよい。

(6) ステンレス鋼(SUS 27)と銀ろうとの ガルバニック対において、 接触腐食は認められなかった。

(7) ろう付け部に残留する フラックス は水に溶解し除去されるま でに長時間を要するが、この間の腐食量は実用上支障のない大きさ であると推定された。

(8) 溶存 ガスの影響は、試験を行なう ループによって異なる結 果を得ているので一概にはいえないが、腐食反応の熱力学的 ポテンシ +ル の点から空気は腐食を大とする因子には違いない。 したがって 他の条件がすべて同じであれば空気溶存の場合のほうが窒素・水素 にくらべ腐食が大きいと考えられる。腐食に最も大きな影響をもつ のは腐食被膜の性質であると推論されたが、被膜の性質に影響する 因子が何かということは明確ではない。

(9) 腐食速度は 10 年間で銅については数 μ~30 μ, 銀ろらによ るろう付け部では 150 μ 前後と推定された。

(10) 流速5m/s では試料の先端に キャビティション エロージョン が認められた。

以上の結果から実機の水系統に対して腐食の立場から次のことが いえる。

(a) 水温は低いほど、水の比抵抗は高いほどよい。

(b) 流速は1 m/s 前後がよい。

(c) ろう材は残留 フラックス による 腐食を考慮しても Ag-P-Cu 系ろう材より銀ろう (BAg-1a, BAg-4, BAg-6) のほうがよい。

(d) 高圧が印加される部分の先端には ステッレス 鋼 (SUS 27) を 使用することがのぞましい。

最後にこの研究に際し、多くの示唆と協力をいただいた当社神戸 製作所および中央研究所のかたがた、さらに試料の準備、測定を担 当された木村 明氏に深く感謝いたします。(昭和44-2-13 受付)

#### 参 考 文 献

- (1) 秦,松岡,川岡,錦織:三菱電機技報,41,1,522~1,528(昭42)
- (2) G. V. Browning, C. H. Holly, J. F. Quinlan : AIEE Transaction 75, pt III, 791~794 (1958)
- (3) 大橋, 吉本, 土井など: 東芝 レビュー 20, 913 (昭40)
- (4) 山本, 松岡, 川岡:三菱電機技報 42, 1,612~1,617 (昭43)
- (5) O. Kubaschewsky, B. E. Hopkins : Oxidation Metals and Alloys, p. 35, 36, 2 nd edition, London Butterworths (1962)

UDC 620. 1 : 621-71 : 621. 314

# 水冷却発電機モデルコイル長期総合試験

仁 吾\*・野村 達衛\*\*・谷 原 功\*\*

### Functional Evaluation Test of Model Coils for Water Cooled Stator Windings

Central Research Laboratory

Jingo HARA · Tatsuei NOMURA · Tsutomu TANI

Aiming at manufacture of large capacity machines in the future, Mitsubishi has been developing water cooled generators by itself with much effort to improve their reliability. As one of the trials six half-coils equivalent to the stator coil of 396 MVA rating have been manufactured and given long term composite test simulated to practical operation. In this article problems on the coil and the water cooling are discussd, questions are studied in reference to actual machines and the reliability is confirmed through the long term test, which lasted for about 13,000 hours together with 2,140 heat cycles added to it. It has been proved in the test that there is no leakage with the model coils and insulation hoses.

#### 1. まえがき

発電機の大容量化がますます進み、その信頼性が最も重要になっ てきている。当社では別の論文で述べてきたように、大容量機の需 要に備え、数年前より独自で水冷却発電機を開発してきたが、かか る信頼性の確立のために多大の努力を払ってきた。その一環として 定格 396 MVA 相当の固定子 モデルコイル 6 本を製作し,実用とほぼ同 じ運転を模擬した総合寿命試験を実施した。

この試験によって上述の信頼性の確認と同時に次のような問題点、

- (1) 水冷却発電機の設計および製作上の問題点
- (2) 冷却効果

and the second

- (3) 冷却水系統の構成
- (4) 腐 食
- (5) 絶縁

について有益な知見を得ることができた。本文はその代表的なもの を紹介する。

試験は昭和40年6月より昭和42年3月まで行なった。この間延 ベ約13,000時間の長期試験を実施し、ヒートサイクル数2,140回を加え た。また上記の問題点を調べるために種々の実験を行なった。この モデルコイル 装置を使って、鉄心とコイルの熱変形挙動についても研究 しているが、ここでは触れない。

この モデルコイル の試作後も数多くの試作研究を重ね, 現在第2回 目の モデルコイル を試験しており、 当社における水冷却発電機製作技 術の万全を期している。

#### 2. モデルコイルおよび試験装置

#### 2.1 モデルコイル

定格 396 MVA 相当の固定子 コイルの モデルコイル6本を製作した。 この コイル は全中空導体式で、電流定格は 4,763 A であり、定格電 E 24 kV の絶縁を施している。図 2.1 に コイル と鉄心 スロットの断 面を示す。モデルコイルは、3スロットを有する積層鉄心に納めている。 コイル 端部において上口 コイル と同一方向に曲げた下口 コイルを用い, 図2.2に示すコイル接続を行なっている。コイルは全部直列に接続し、 直流電流によって加熱できる。 冷却水の回路は、上口 コイル と下口

コイル各1本で一つの流路を形成し、三つの並列回路となっている。

コイル 端部の電気的接続部(コネクタ と称す)は2種類の型を開発し 使用している。 絶縁 ホース (テフロン) はA社製2種とB社製1種の各 2本を使用している。また モデルコイルの各部には約90個のサーモカッ プルをつけ,温度分布を調べている。

- 図2.3は組立てた モデルコイルの写真である。
- 2.2 試験装置
- 図 2.4 に装置の ブロック 図を示す。装置は実機を模擬するために、





(a) 水返り側



(b) 水出入側
 図 2.3 モデルコイル Model coil.



図 2.4 モデルコイル 試 験 装 置 ブロック 図 Block diagram of test equipment for the model coil.

コイル に電流を流す加熱電源,実機と全く同様の冷却水循環装置など で構成されている。

加熱電源は直流 6,900 A の容量を持ち, 定格の約 1.5 倍の電流で 加熱でき,加熱電源装置はがいしで大地より浮かせ,モデルコイル主絶 縁に高電圧を印加するようにしている。また長期試験中の コイル 絶 縁特性の連続記録装置も備え,コイル主絶縁の評価試験を行なえる。

冷却水循環装置は、主回路の流量最大 100 l/min、全水量約 400 l の容量を持っている。配管・容器・弁などはすべて ステンレス 鋼を用 い、その内表面積の合計は約8 m<sup>2</sup> である。また ポンプは キャンドモータ



図 2.5 冷却水循環 装置 Cooling water circulating system.

ポップを用いた。 冷却水の処理は、イオン交換樹脂筒に分流して不純物 イオンを除去し、 主回路にはさびなどの固形物を除去する カートリ ッジ素子数6のフィルタを入れ、またモデルコイルの入口には ストレーナを 入れた。また溶存酸素の腐食に与える影響を研究するために、脱気 装置を設け、貯水そうの気相の条件を一定に保つために ガスホルダ と 称する装置を設けた。 ガスホルダ は水温の変化による貯水そう気相の 変化を吸収し、常に大気よりもわずかに圧力を高く保持し、空気が 水系統へはいらないようにする機能を有している。本文に述べる第 1回のモデルコイル 試験には貯水そうの気相を窒素 ガス に保ち、 溶存 酸素を 0.1 ppm 以下に保った。 現在行なっている二次 コイル の試験 では貯水そう気相を空気ふんい気としている。

コイル温度の制御は、冷却水の温度制御により行なう。冷却水の温 度制御は冷却器の出口に設けた電動三方弁によって制御し、コイル入 口の温度を一定に保ち、ヒートサイクルは プログラマ により設定温度を変 えて行なった。図2.5 に冷却水循環装置の写真を示す。

モデルコイル はそのふんい気温度を調節するため, 密閉した室の中に 納め, 鉄心の下部に ヒータを配置し ファン で室内の空気を循環できる ようにしている。

#### 諸特性の測定

#### 3.1 冷却効果

(1) 圧力降下特性

モデルコイルの圧力降下特性を図 3.1 に示す。中空導体中の流速が 約 0.5 m/s 付近で層流から乱流領域に変わっている。計算では Blasius の式がよく合っている。

(2) 水流分布

□イルの同一断面の素線にサーモカップルを分布させ、その温度分布 を調べ、それから各素線の水流分布が問題になるかどうか検討した。 定格の2倍の加熱を行なったときでも、各□イルともに温度は±1℃ 以内であった。□イル内の水流分布は問題にならない程度で均一であ ることを確かめた。また各□イル相互間の温度差もほとんどなかっ たので、各□イルへ均等に分流していることを確かめた。 長期試験 後も同様で異常がなかった。

(3) コイル の温度分布

コイルの温度分布測定例を水の流れに沿って展開して図 3.2 に示す。これらの測定から次のようなことを確認した。

(a) 水と導体の温度差が小さい。









(b) コネクタの温度上昇はほとんどない。

(c) 絶縁体を通る伝熱は非常に少ない。

おのおのについて補足すると(a)については、理論計算では水と 導体壁の温度差は 0.1 deg °C 以内であり、測定結果も 2 deg °C 以下 である。設計においては コイル 出口 における 流体の温度上昇のみ考 えてもあまり問題はないといえる。(b) は、 水返り側の コネクタ の 温度は コイル 導体に比べほとんど上昇していなかったことや、 水出 入口側の コネクタ の温度分布が温度の低い上口 コイル への熱伝導のた めに、下口 コイル 導体よりも下であることから確認できる。(c) は 入口水温を上げても出口の水温上昇分がほとんど変わらないこと、 また逆に周囲温度を上げても冷却水の温度はほとんど変わらないこ となどから、熱伝導の程度がわかる。

(4) 人工目づまり試験

長期試験終了後解体前に コイルの中空素線2本を人工的に 目づま りさせ、目づまりさせた素線の温度上昇を測定した結果,他の目づ まりさせない素線に対し数度に過ぎなかった。このことは2~3本 の中空素線に目づまりが発生したとしても冷却上支障はないことを 意味する。

#### 3.2 水系統の諸実験

(1) フラッシング

水系統の洗浄については温水 フラッシングが 有効なことが 報告され ている<sup>(1)</sup>。本試験においても温水 フラッシング が表面の洗浄を早める ことができたのでその経過を報告する。

水系統の各配管 (ステンレス 鋼) は トリクレン 洗浄と酸洗をあらかじめ

行ない,配管組立後最初 イオン交換水で数回洗った後,常温で水処 理 $\mu$ -プを通しながら運転をしたが,比抵抗は約 700 k  $\Omega$ -cm で飽和 して長時間の運転後も変化しなかった。水系統内に組込んでおいた 加熱器によって水温を 55°C に上げ,イオン交換樹脂筒は通水せずに 21 時間運転した後,イオン交換樹脂筒に通水したところ短時間で 2 M $\Omega$ -cm に向上した。さらに モデルコイル に通水の後は,モデルコイルの 内部洗浄が十分行なってあったため,水の比抵抗はほとんど低下し なかった。

(2) 水の電気伝導度温度特性

電気伝導度の高い水(約2μប/cm以上)においては,電気伝導は 不純物 イオンが主役であって水のイオンの伝導は無視できる。したが って伝導度の温度特性は,温度によって不純物 イオン量が変わらな いものとすれば粘性にもとづく固有のものになることが導かれ<sup>(2)</sup>, 不純物 イオンの量や種類によらない定まった変化を示す。 それゆえ 水質計の温度補償も 簡単に行なえる。しかし 不純物 イオンの少な い純水になると水そのもののイオン伝導が無視できないので,伝導 度の温度特性は純度によって異なる。すなわち電気伝導度でもって 純水の水質を測るには水の伝導度の温度特性を調べておく必要があ る。

水の電気伝導度の25℃換算式は,水のイオンの伝導と水中の不純物イオンの伝導の和と考え,不純物イオンの量が化学平衡の変化などで変わらないと仮定すれば,次のように簡単な形で導かれる。

ただし、 $\sigma_l$ は t<sup>o</sup>C における水の電導度、 $\sigma_{wt}$ は t<sup>o</sup>C における完全 純水の電導度、 $\mu_l$ は t<sup>o</sup>C における粘性である。 モデルコイル 試験装置 における水の電導度温度特性を実測した結果、 図 3.3 に示すよう に式 (3.1) で換算してよいことがわかった。

従来,市販の水質計の温度補償は温度係数を純水より相当悪い水 の値に設定しているものが一般的で不都合である。水質計の温度補 償は以上にのべた点を考慮せねばならない。



図 3.3 水の電気伝導温度特性 Characteristics of electric conductivity in water vs. temperature.



(3) 溶存 ガス の気相 ガス 依存性

試験装置には溶存酸素を少なくする目的で、はじめ脱気装置をつ けた。しかし貯水そうの気相中の酸素を無くすれば、水中の溶存酸 素も容易に無くなることがわかり,溶存酸素の調整には脱気装置は 不必要であった。 図 3.4 は貯水そら内の気相中の酸素を減少させ たときの溶存酸素の応答を示したものである。(a)は貯水そうの気 相中に水を戻した場合, (b)は 水面 より 下に戻した 場合である。 (a)の場合は気相と水の接触が活発であり応答は非常に速く、冷熱 サイクル の水温の変化 (図 4.1 参照) に即応している。すなわち低温 時には酸素の水に対する飽和溶解量の増加によって溶存酸素が増加 しており、高温時にはその逆に小さくなっている。 途中で窒素 ガス を流して気相を窒素に置換した後は、冷熱 サイクルの1サイクル後には 溶存酸素はきわめて少なくなり、その後はほとんど変化しない。一 方(b)の場合には、液面が静かであるので、応答は遅く冷熱 サイクル にはほとんど追従せず、長時間で気相の酸素との平衡に達する。な お溶存酸素検出部は、 水処理 ループの貯水そら入口付近にそら入し ており水温と圧力が大体一定である。図中低温 サイクルの始まるとこ ろに突起が現われているのは、このとき水温が短時間上昇するため である。

この実験から溶存 ガス は、気相 ガス の分圧に応じて容易に変化することがわかる。

#### 4. 長期試験

#### 4.1 長期試験運転経過と試験条件

長期試験は約1年半昼夜連続で行なった。この間冷却水を循環した時間は13,000時間で、このうち冷熱サイクルを加えた時間は8,560時間(2,140回)である。残りの時間は運転調整や参考試験などの時間である。試験中水系統で水の循環停止する必要のあるような事故は生じなかった。この間の試験条件は次のとおりである。

(1) 冷熱 サイクル

冷却木の温度を変えて冷熱 サイクル を コイル に加えた。冷熱 サイクル は図 4.1 に示すように,約3時間の高温 (75~85°C) と約1時間の 低温(約25~30°C)の繰り返しである。

(2) 冷却水の流速

コイル 中の冷却水の流速は、1.6 m/s とした。 これは実機に予想される値に比べ速く腐食条件としてきびしい。

(3) 冷却木の比抵抗と溶存酸素

長期運転中 イオン 交換樹脂と フィルタカートリッジ は、それぞれ 2 回交換し、水の比抵抗を 25°C 換算で4 MΩ-cm 以上に保った。



表 4.1 フィルターの 分 析 例 Quantitative analysis of the filter cartridge ash.

分析元素	<b>五 量 %*</b>
Cu	75.79
Fe	0.19
Ag	0.004
Ni	0.0025
Cr	0.004

\* 500°C 以下で灰化後 800°C にて 2 時間強熱で得た残さに対する重量比

貯水そうの気相は窒素 ガス に保ち,水の溶存酸素は約0.1 ppm 以下になるようにした。

(4) 高電圧印加

モデルコイルの主絶縁 および 絶縁  $\hbar - \lambda$  に 24 kV (常規対地電圧の  $\sqrt{3}$ 倍)の電圧を印加した。

とのような実機を模擬した長期試験の結果, モデルコイル にはなんら 事故も発生せず, 開発した水冷却固定子 コイル の信頼性に対する確 信を得た。以下長期試験による モデルコイル の腐食生成物の分析, 試 験前後に行なった漏れ検査結果などについてのべる。

#### 4.2 腐食生成物

長期試験中に冷却水系統の各部分(フィルタ、イオン 交換樹脂など) で捕集された腐食生成物を分析し腐食量を推定した。

4.2.1 フィルタの分析

試験中 フィルタカートリッジを 2 回交換して, 捕獲した腐食生成物を分析した。定量分析例を表 4.1 に示す。 その結果腐食生成物は銅成分が主成分であることがわかった。また多量に腐食生成物が付着していたものを, X 線回折分析した結果銅の腐食生成物は CuO が主 で Cu<sub>2</sub>O は少なかった。

#### 4.2.2 イオン交換樹脂の分析

試験中2回樹脂を新品に変え、使用後の樹脂を Anion 樹脂と Cation 樹脂に分離し、おのおのに捕獲されている イオンを分析した。 表4.2に分析例を示す。表からわかるように銅 イオンが主成分で、 ろう付け部分と ステンレス 鋼の腐食生成 イオン は非常に少ない。

#### 4.2.3 銅の腐食量

イオン 交換樹脂と フィルタ の捕獲物以外に水系統内の沈殿物と, 試 験後 モデルコイル から 放出した水の中に存在していたものなどから 銅 の腐食量を求める。

(1) イオン 交換樹脂による捕獲量, 銅重量を合計すると約 70g である。

(2) フィルタによる 捕獲量は、 捕獲された 腐食生成物の しゃく

566

#### 表 4.2 イオン 交 換 樹 脂 の 分 析 例 Quantitative analysis of the ion-exchange resin.

公折オキッ	舐	量 %*
11 11 1 2 2	Anion 樹 脂	Cation 樹 脂
Cu <sup>2+</sup>	0.08	2.33
Fe <sup>3+</sup>	0.008	0.03
Ni <sup>2+</sup>	0.005	0.05
PO43+	0.02	trace
Ag+	0.0003	0.0007
Cr <sup>6+</sup>	0.0005	trace

\* 乾燥樹脂に対する重量比である.

分析方法は試料を Anion 樹脂と Cation 樹脂に分類し、おのおの 800°C で2 時間しゃく熟したのちしゃく熱残さを硝酸に溶解し、 これを JIS 法に従い分析 した。

表 4.3	腐	食	生	成!	肳	中	Ŋ	銅	重	量	
Weight o	of co	ppei	in :	the	С	orre	osio	n p	rod	ucts.	

詂	獀	堨	Dī	fit fit g
1	オン交	換樹	脂筒	70
7	4	r	4	47
說	y	段	物	6.5
合			3ŀ	123.5

表 4.4 Ag イオン 捕 獲 量 の 変 化 Variation of the silver ion in the corrosion products.

	S 40/7~40	9(3か月)	S 40/10~41	/8(10 か月)	S41/8~42/2(6办月)		
	Anion	Cation	Anion	Cation	Anion	Cation	
$\frac{Ag^{*}}{Cu^{2*}}$	0.3	0,00085	0,0035	0,0003	0,0006	0.00016	

麦 4.5 Fe, Ni, Cr  $_{112}$ の 捕 獲 量 の 変化 Variation of the Fe, Ni and Cr ion in the corrosion products.

	S 40/7~40	/9(3か月)	S 40/10~41	/8(10 か月)	S41/8~42/2(6か月)		
	Anion	Cation	Anion	Cation	Anion	Cation	
$\frac{Fe^{3+}}{Cu^{2+}}$	0.61	0.117	0.1	0.0129	0.026	0.0143	
$\frac{\mathrm{Ni}^{2+}}{\mathrm{Cu}^{2+}}$	0.6	0.187	0.63	0.021	0.003	0.0041	
$\frac{\mathrm{Cr}^{6+}}{\mathrm{Cu}^{2+}}$	0	0	0.063	trace	0.001	trace	

表 4.6 水質低下速度

Contamination of the water when the ion exchange resin column was cut off.

*	温 °C	>	L RB (of the bits the	(	
コイル入口	コイ.	ル出口	不負也比速度	(µ0/cm/h)	
2	535		0.005~	0.007	
4	050		0.013~0.018		
7	5—84		0,056~	0.083	

表 4.7 実機の腐食の推定 Estimation of the corrosion quantity for the actual machine.

			腐	食	擑		μ/y	ear			
And in case of the local division of the loc		1	年			2	年	目	以	降	
	腐众皮膜		0.54					•••••			
	遊 糵 するもの		1.0					1.0			
	습 <b>라</b>		1.54					1.0			

(灼)熱残さ(渣)の全重量が 63 g で, そのうち銅は 75 % で約 47 g であった。

(3) 沈殿物中の銅重量は長期試験終了後水系統の水抜きを行なって自然乾燥し,各部の沈殿物を採集した結果 8.6g であった。 貯水そうと冷却器におけるものが主で,配管中やストレーナなどには採集できる程度の沈殿物はなかった。フィルタにおける腐食生成物の分析結果を適用し,沈殿物の75%が銅重量であるとすれば,銅は約

#### 6.5gとなる。

(4) 試験終了後 モデルコイル より 窒素 ガス によって放出させた 水中の腐食生成物を分析した。腐食生成物と思われる固形物には, 黒かっ(褐)色のものと全く沈降しない白色物とがあったが, これらは 比濁法で測定し, 23 ppm 以下で無視できる程度であった。発光分 光分析の結果黒かっ色物は銅, 白色物はけい(硅)酸塩が主成分であった。

以上(1)~(4)にのべた腐食生成物中の銅重量をまとめて表4.3 に示す。  $EF_{\mu} J f_{\mu}$ の銅内表面積は  $14 \text{ m}^2$  である。 銅表面から腐食 によって分離した銅の厚さを計算すると  $1.0 \mu$  となる。

(5) 銅表面の腐食皮膜は、コイルの一部より中空素線を抜き取り、 栗田工業製 クリーンスタ (スルホン酸+腐食抑制剤) により、銅表面に付 着していた腐食膜を溶かし出し、その前後の重量差から平均腐食皮 膜厚さを求めた。モデルコイルの各位置で、腐食皮膜には差が認められ ず、平均 0.618 mg/cm<sup>2</sup> で、腐食皮膜中の銅含有率は、75 %と仮定 して厚みに換算すると 0.54 μ となる。

#### 4.2.4 ろう付け部分の腐食

イオン交換樹脂の分析結果からろう付け部の腐食の進行状況を推定した。銀イオンと銅イオンの量比を求め表4.4 に示す。試験初期よりも後期になるほど Ag の量が少なくなっており、ろう付け部分の腐食は明らかに減少して行くことがわかる。

#### 4.2.5 ステンレス鋼の腐食

前項と同様に Fe, Ni, Cr の イオッ について調べてみると, 表 4.5 のようになる。試験後半では, Fe<sup>3+</sup> は 1/10 程度, Ni<sup>2+</sup> は 1/20 から 1/200 程度となっている。これは ステスレス 鋼からの溶出 イオッが時間 とともに減少していることを意味する。試験後の目視検査によって も ステンレス 鋼の腐食はほとんど見られず, 最初の金属光沢そのまま を示し, 溶接部分にところどころ赤い鉄さびが見られただけである。

また絶縁 ホース 継手心金の ステンレス 鋼には、 流電による腐食も認められなかった。

#### 4.2.6 水質低下速度による腐食速度の推定

冷却水中の不純物 イオン は、イオン 交換樹脂で取り除かれるが、イ オン 交換樹脂筒への通水を止めて、 水質低下速度(電気伝導度の上 昇速度)を測定すれば、不純物 イオン の発生状態がつかめる。 先に 示した分析から不純物 イオンが銅 イオン であるので、これから銅の腐 食量と イオン 交換樹脂の寿命が推定できる。表 4.6 に長期試験中に 数回測定した結果を示す。 銅 イオン  $Cu^{2+}$ が 1 ppm 溶出したとき電 気伝導度が 7.9  $\mu$  0/cm\*変化すると仮定して長期試験中の銅 イオン 溶 出量を試算してみると約 16 g となる。これは先の分析結果と オーダ 的に合っている。 今後銅 イオン 量に対する電気伝導度の増加量の正 しい値がわかればよい結果が得られるであろう。

#### 4.2.7 実機の腐食速度の推定

モデルコイルの長期試験における腐食量は、前にも述べたように銅表 面から分離したものが約 1.0  $\mu$ 、腐食皮膜となって表面に付着して いたものが 0.54  $\mu$  である。この試験の運転時間は 13,000 時間で水 温 60°C 以上の時間が約 5,000 時間であった。これを実機における 1 年の運転時間とみなせば、実機の腐食は表 4.7 のようになる。最 初の 1 年の間に腐食皮膜は鋼に換算して 0.54  $\mu$ の厚さに成長するが、 それ以後はこの厚さは変わらない。一方水中に遊離する腐食生成物

<sup>\*</sup> Cu<sup>2+</sup> イオンは Cu<sup>2+</sup>+2 OH<sup>-</sup> として、これらの移動度(Cu<sup>2+</sup> 5.6×10<sup>-4</sup> cm/s/V, OH<sup>-</sup> 20.5×10<sup>-4</sup> cm/s/V)から計算。この場合水のイオンの質量作用の法則などは 無視している。







は銅換算にして毎年約1μ/yearの割合であることを示している。 4.3 主絶縁

長期試験中は主絶縁に AC 24 kV の電圧を印加し絶縁諸特性の 変化を調べ長期試験終了後交流絶縁破壊試験を行なった。絶縁特性 は常時 tan δ · 充電電流 · コロナ を測定したが何ら異常はなかった。 水冷却固定子 コイル の絶縁に関し、特に問題はない。

#### 4.4 水抜き、乾燥および漏れ試験

#### 4.4.1 水抜き

次のような操作でほぼ完全に水抜きができた。

(1) ドレンバルブよりコイル内および管路に充満していた水を自然 流出させ、約301の水が出た。(これには配管の一部の水も含まれ る。)

(2) 水入口 ヘッシ より 2 kg/cm<sup>2</sup> の窒素 カス で水を連続的に押し 出し,約4分間で 3.1 l の水が出た。

(3) コイル 内へ 1.5 kg/cm<sup>4</sup> の窒素 ガス を詰め、 水出口側に設け た ボールバルブを急速に開く操作を 350 回繰り返した。 この操作によ って 1.44 l の水が出た。この操作の水の排出状況を図 4.2 に示す。

#### 4.4.2 乾燥

長期試験後の漏れ検査を質量分析計 He fa 吹付法 と 真空低下法 にて実験するため、真空乾燥を実施した。 乾燥度は コイル 内に窒素 ガスを 6 l/min で流し、その露点を測定した。 延べ 25.5 時間で窒素 ガスボンベの露点と同じ値に測定されたので 乾燥はできたものとみな した。図4.3 に乾燥経過を示す。

真空 ポップ は 600 I/min の容量の油回転 ポップ を用いた。 真空 ポッ プ 運転中 ドレン 口から水滴は出なかったが、ポップ の油には水分が相 当混入したと思われ、途中で油を交換したところ真空度が上った。 実機で実施する場合には 水分の害が 生じない ポップ などを考えれば

#### ならない。

#### 4.4.3 漏れ試験

モデルコイル 装置完成時と長期試験終了後に、絶縁 ホース を含めた モ デルコイル 装置の漏れ試験を実施した。

(1) 長期試験前

端部の被覆絶縁を施す前に、10 kg/cm<sup>2</sup>の窒素 ガスを詰め石けん 水塗布加圧法を実施し、質量分析計ガス 吹付法も実験した。漏れ箇 所を探したが 10<sup>-0</sup>cc/s 以上の漏れ箇所はなかった。他に質量分析計 吸収管法を実験したが、操作が困難で十分の感度を得られなかった。 (2) 長期試験後

木抜きおよび乾燥の終わった モデルコイル をさらに油拡散 ポンプによ り真空度を上げ、次のような各種漏れ試験を行なった。まず He ガス 吹付法で漏れ箇所をさがしたが、漏れは検知できなかった。その後 真空度低下法と加圧圧力降下法で全体の漏れを調べた。

真空度低下法では最初 0.045 μHg が 4 時間後には 0.37 μHg に低 下した。系の容積は 151 であるので漏れは 4.4×10<sup>-7</sup>cc/s と計算さ れる。しかし内壁の脱 ガス はまだ生じていることが推察されたので、 漏れ量はこれより小さいであろう。この方法は実機での適用が困難 であるので、それに代わる方法として加圧圧力降下法も実験した。

#### 5. む す び

結論をまとめるとつぎのとおりである。

(1) 冷却効果

各 コイル ならびに各中空素線に対する水流分布は、 温度分布から は問題にならない程度に均一であることが確かめられた。コイル の温 度分布は、冷却がほとんど水でなされているとして計算でき、水と 導体表面の温度差は無視できる程度である。モデルコイル における コネ クタ は熱放散がよく、その温度は問題とならない。

(2) 水系統

水の電気伝導度の温度特性について調べ、25℃ 換算式を示し、 純水に対する水質計に必要な温度補償について述べた。溶存 ガス は 貯水そうの気相に応じ比較的短時間で平衡に達することがわかり、 溶存酸素は貯水そう気相によって調整できることがわかった。

(3) 腐食

窒素ふんい気の条件における腐食 = -9が得られ、 銅の腐食は水 中へ遊離したものが  $1.0 \mu$ 、 導体表面に皮膜となっているものが 約  $0.5 \mu$  であった。実機の腐食は最初の  $1 = 0.5 \mu$ , 2 = 10 単  $0.5 \mu$ /year であることが推定される。

(4) 主絶縁

絶縁に関し特に問題はなかった。

(5) 水抜き、乾燥および漏れ試験

実機に適用できる多くの知見を得られた。モデルコイルには長期試験 後漏れが認められなかった。

以上のとおり、当社独自で開発してきた水冷却発電機の製作技術 の信頼性に確信をうることができた。当社では当モデルコイル 試作後 も研究を続け、現在第2回目のモデルコイルの試験を行なっており、 水冷却発電機の安全性を高めるために多くの努力をはらっている。 最後にこの試験に協力いただいたかたがたに謝意を表します。

#### 参考文献

(1) 鈴木, 吉田:火力発電 16, No. 5, p. 367~382 など

(2) 小谷他:物性物理学講座,化学物理II,共立出版

# 現在の人手でエンジン試験の能力を数倍にできる 三菱電気動力計



圧延機,工作機などの自動制御技術を 電気動力計の 自動運転にも応用しました。高速,大出力,高精度の 動力計が必要な際もご相談ください。

#### ■標準定格

#### ED形うず電流式動力計

ED- 3形	22kW	(30PS)
ED- 7形	55kW	(75PS)
ED-IO形	75kW	(100PS)
ED- 15形	I I OkW	(150PS)
ED-20形	150kW	(200PS)
ED- 30形	220kW	(300PS)
ED- 50形	375kW	(500PS)
ED-100形	750kW	(1,000PS)

#### 直流式電気動力計

3.7, 7.5, 15, 30, 55, 75, 110, 150, 220, 375, 550, 750, 1,000, 1,000kW以上

#### ■製作例

- 立形直流動力計 750kW 900~1,200rpm
- ●超高速直流動力計 460kW 50,000rpm
- ●超高速うず電流式動力計 300kW 4,500~45,000rpm
- ●シャーシダイナモメータ IIOkW 5t 200km/hなど各種
- プログラム制御自動運転装置(ディゼルエンジン、ガソリン エンジン、変速機、自動ギヤチェンジ)



フロクラム制御装置 (ディゼルエンジン,ガソリンエンジン共用)

今日もあなたと共に



お問合せは…三菱電機、株・電機第一部、東京都千代田区丸の内2-12 東京、212、6111 《大代表》 神戸製作所営業部/神戸市兵庫区和田崎町3丁目 神戸 (67)5041 またはもよりの営業所へ 大阪・名古屋・福岡・札幌・仙台・富山・広島・高松・新潟

# Cダクト採用で引出配線が安全・容易になった… 三菱E形コントロールセンタ



引出配線の安全な処理 これがいままで業界の 一番大きな課題でした。これをみごとに解決した のが三菱E形コントロールセンタです。従来のNC 形にないCダクトを採用,ワイヤーウェイとユニッ トを完全に分離,さらにユニット間の渡り配線を まったく自由にしたものです。構造も理想的,安 全で信頼性のあるJEM-B形配線にぴったり,これ は日本で最初にコントロールセンタを製作し業界 一の実績をもっ三菱の技術の結晶です。

#### 特長

- 1. Cダクト(共用縦配線ダクト)の採用。
- ユニット収納数の増加, JEM-B形配線で9段 積, JEM-C形配線で8段積。
- 3. 斬新なデザインと多くの新機構の採用。
- 4. 業界に定評のある三菱ノーヒューズ・ブレーカ とMS形電磁開閉器の組合わせ。

今日もあなたと共に

お問合せは………三菱電機株式会社本社/東京都千代田区丸の内2-12-500/三菱電機ビル/東京03<212>6111 大代表またはもよりの各営業所へ。 大阪06<312>1231/名古屋052<561>5311/福岡092<75>6231/札幌0122<26>9111/仙台0222<21>1211/富山0764<31>8211/広島0822<47>5111/高松0878<51>0001/新潟0252<45>2151



UDC 621. 039. 5

## 東京大学物性研究所納め中性子散乱回折装置

星埜 禎男\*・津田 栄一\*\*・弘中 一光\*\*・柳下 和男\*\*

# Neutron Diffractometer Delivered to The Solid State Physics Institute of Tokyo University

Tokyo University Sadao HOSHINO

Central Research Laboratory Eiichi TSUDA · Kazumitsu HIRONAKA · Kazuo YANAGISHITA

A large neutron diffractometer has been delivered to the Solid State Physics Institute of Tokyo University and set up to a JRR-3 reactor of the Japan Atomic Energy Research Institute. With this diffractometer two other small diffractometers can be put in use at the same installation. That means it is provided with a monochrometer which permits taking out three monochromatic beams from one beam hole of the reactor. There are three measuring systems of diffracted beams with the goniometer so as to reduce the measuring time of powder specimen. The measurement control circuits involve parts which are turned to solid state, module and integrated circuits, thus small size and easy maintenance being taken into consideration. It has such performance as to be claimable of nearly perfect radiation shielding ; the surface dose rate is made nearly below 2 mR/h.

#### 1. まえがき

中性子散乱回折装置は, 原子炉から得られる中性子 ビーム を利用 する物理実験装置である。すなわち, 原子炉から得られる中性子 ビ ームを単結晶の Bragg 反射を利用して単色化して, これを試料に照 射し,回折中性子 ビームの強度を角度の関数として測定し, 試料の 結晶構造や,磁気構造を解析するものである<sup>(1)</sup>。

1958年 わが国 で 初めての 中性子回折装置 が 日本原子力研究所 JRR-1 号炉に据付けられて以来, 今日までに 10 台の装置がすべて 三菱電機で製作され(2)~(5),わが国の物性物理学の研究に寄与して いる。しかし、わが国の実状からすればこれだけの数量の装置をも ってしても、中性子回折装置を用いて実験を行なら研究者にとって は不十分である。装置の増設ができないのは中性子回折実験のため に割当てられる原子炉の実験孔の数が少ないことに起因しているよ らである。このために考えられたのが、日本原子力研究所 JRR-2 号炉に据付けられた タンデム形 モノクロメータ を用いた装置で、一つの 原子炉実験孔から2本の単色中性子ビームを取出して2台のゴニオメ -- タ に入射して異なった実験が行なえるようにしてある<sup>(4)(5)</sup>。 しか し、この装置では モノクロメータ 単結晶を直列に配置するためあとから 取り出す単色中性子 ビームが、前方に配置した単結晶の影響を受け るという難点があった。さらに、別の方法として一つの原子炉実験 孔からの中性子 ビームを上下2段に分離して、二つの モノクロメータを 用い、全く独立した二つの実験が行なえるようにした複式中性子回 折装置が考えられ、これは、1965年 アメリカ アイオワ大学、1967年 ア メリカ ミズリー 大学に輸出されている(6)(7)。

中性子回折には強い熱中性子 ビームが必要であるが、これに適す る大形の研究用原子炉は、世界中にそれほど多数あるわけでなく、 また、これらの実験孔の数も十分ではない。とくに、わが国では中 性子回折に使える原子炉は、日本原子力研究所の JRR-2 および3 の2 基と京都大学原子炉実験所の KUR と合わせて3 基しかないの が現状である。今回、東京大学物性研究所に納入されたものは、日 本原子力研究所 JRR-3 号 H-3 炉水平実験孔に据付けられたもので、 以上のような観点から一つの原子炉実験孔から3本の独立した単色 中性子 ビームを取り出せるもので、 異なった三つの実験が平行して 行なえるようになっている。この装置は、基本的には従来から標準 設計化・シリーズ 化されてきた 2 軸中性子回折装置であるが、上記の 要求を満すため、いくつかの機能を付与し新しい形式のものとなっ た。

#### 2.装置の概要



図 2.1 東京大学物性研究所納め中性子散乱回折装置 Neutron diffractomer delivered to the Solid State Physics Institute of Tokyo University.

あるが, それぞれのビームがまったく独立して互いに影響しないようになっており,新しい形式のモノクロメータといえる。

放射線しゃへいに関しては、3本の単色中性子ビームを独立に取り 出せるようにするためと、原子炉に据付けるときの種々の制約のた め、モノクロメータしゃへい体は固定形となり、さらに通常、実験孔し ゃへい体と呼んでいる炉壁と、モノクロメータしゃへい体との間に設置 されるしゃへい体と一体構造のものにした。 このしゃへい体は、モ ノクロメータのための空間を完全に包囲するよう構成され、また実験孔 の炉壁周辺のしゃへいには細心の注意が払われた。

大形単色中性子ビームを用いる ゴニオメータは、通常の回折実験に用いるものと同じであるが、アームには3本の BF<sub>3</sub> カウンタ が同一木平 面内に配置され、試料による回折中性子の強度を同時に三つの角度 位置から測定できるようになっている。このため粉末試料の測定は 通常の 1/3 の時間で行なえ、マシンタイムの短縮化がはかられているの も特色の一つとなっている。さらに、中央のカウンタ は試料に対し垂 直内面にもある角度範囲で傾けることができ、これによって層線 ス ペクトルの測定が可能となり、 試料の三次元的 データ を求めることも できる。

中性子計測装置は、スケーラを除きすべて固体化 モジュール 化され、 さらに スケーラ および制御装置の論理回路は、 IC 化されて, 信頼性 の向上、小形化、保守の容易さに考慮が払われている。中性子測定 の方法は、従来の方式と同じであるが上述のように、メイン3チャネル とモニタ計4チャネルとなっており、メイン3チャネルの中性子計数は、 ゴニオメータアームおよび試料 テーブルの現在角度とともに プリッタで印字 記録され、モニタチャネルとあわせて4チャネルの計数率が打点式記録計 に記録される。制御装置の機能は、今回のものは比較的簡単なもの となっている。すなわち、測定を開始すべき角度および測定を終了 すべき角度の設定は, ゴニオメータ の アーム および テーブル ともに リミッ トスイッチ で行なわせ、測定 ピッチのみを制御盤の ロータリスイッチ で設定 させて自動送りをさせており、 中性子強度の測定, ゴニオメータアーム および テーブルの駆動, さらには試料の磁気的性質を調べるときの ァ クセサリー である スピンフリッパ 制御などの シーケンス 制御を行なわせてい る。 ゴニオメータ アームと テーブルの ピッチ 送りは、設定角度範囲内を1 回だけ行なうものと、 繰り返し行なうものとの二つの モード があり 選択できるようになっている。

#### 3. 機械装置

機械装置の構成は、図3.1 および図3.2 に示すように外観的に は通常の形式のものとかなり異なった印象を与えるものとなってい る。しかし、基本的には従来から標準設計化・シリーズ化されてきた 2 軸中性子回折装置 NX-1320 と同じであり、原子炉の実験孔から 強い熱中性子ビームを引き出す コースコリメータ、これを単一波長の中性 子 ビームにする モノクロメータ、さらに平行 ビームにそろえるための ファ インコリメータ、この中性子 ビームを試料に照射して回折像を角度分布と して精密に測定する ゴニオメータ、および実験孔の出口周辺から モノク ロメータの周辺の放射線をしゃへいするためのしゃへい体、そのほか などから構成されている。この装置の概略仕様を表3.1 に示す。

3.1 コースコリメータ

原子炉の実験孔から 必要とする 中性子ビームを引き出すために, 実験孔プラグがそう入され,その中心部には中性子ビームの通路とな る角形の中空ダクトが構成されている。このダクトを除いた部分は, 原子炉からの中性子や ガーマ線の放射線しゃへいのため グラファイト お



よび重 コンクリート (比重 4.5) で構成されている。従来 JRR-2 号炉 などの プラグでは、この ダクト の先端すなわち炉心側に グラファイト を そう入していた。 これは グラファイト が速中性子を減速させ、実験に 必要な熱中性子の比率を高めることができることを利用していたの であるが、実際には必要とする熱中性子もかなり減衰されているよ うであり、今回のものでは ダクト の先端部には グラファイト をそう入し ないこととした。ダクト は通常、実験中は中空とし、実験を行なわな いときは中性子のしゃへいのため純木が注入される。このように ダ クト は木 シャッタ も 兼ねているが、 通路として中性子 ビーム の断面積 を限定するだけでなく、ある程度の方向をそろえる作用も行なわせ ているので コースコリメータ と呼ばれる。

コースコリメータ(あるいは水 シャッタ)のうしろには、電動で遠隔操作 される鉛 シャッタがあり、 ガッマ線のしゃへいを行なわせている。す でに述べたように、 この装置では3本の独立した中性子ビームを取 り出すため、鉛 シャッタには、3本同時にビームが取り出せる開口部 や、小形ビームのみを取り出せる開口部があり、 制御盤で選択でき るようになっている。

#### 3.2 モノクロメータおよびしゃへい体

上記のように モノクロメータ で 3 本の独立した 単色中性子 ビームを取 り出すために、この装置は三つの モノクロメータ を有している。コースコ リメータ および鉛 シャッタ の開口部を通過してきた断面積 50×60 mm<sup>2</sup> の中性子 ビームは、全断面のうちの底辺部の 10×50 mm<sup>2</sup>, 右側辺部 の 50×10 mm<sup>2</sup> および残りの 40×50 mm<sup>2</sup> の各断面に区分され、ま ず横長の小形 ビーム が原子炉に向って左へ単結晶で散乱されて 10× 10 mm<sup>2</sup> の単色 ビーム が得られ、次に縦長の小形 ビーム が垂直上方に 単結晶で散乱されて 10×10 mm<sup>2</sup> の単色 ビーム が得られ、 残りの大

三菱電機技報・Vol. 43・No. 4・1969

**表 3.1** 中性子散乱回折装置機械部仕様 Specification of mechanical parts of neutron diffractometer.

1 7 - 7 7 11 4 - 4	
1. コースコリメータ (1) 実験孔 ブラク	
外形寸法	286 (最大外径)×2,735 (長さ) mm
重 量	約 300 kg
しゃへい材	重コンクリート (比重 4.5)
(2) コースコリメータ	
開口寸法	56×66 mm
開き角	40 分
ホシャック	タンク駆動方式
2.1 入形所面積単色ビーム (1) アー・ノ	
间旋额曲	0~ 60 변
中心間距離	0~00度 1.500mm (ゴニオメータ中心まで)
日盛板	1,700 mm (半径)
角度精度	土0.01 度
駆 動 方 式	手 動
(2) 結晶テーブル	
回転範囲	±180 度
角度精度	土0.01 度
<b>町</b> 段 税 出	シンクロ発信機
級 纲 刀 武 (3) 結 ఓ 云	炬 啣
○ 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2	-10 mm
Y 方向	-+ 10 mm
RX 方向	 土 4 度
RY 方向	土 4 度
単結晶装着個数	2 個
2.2 小形断面積水平ビーム	
(1) 散乱角度	28±2度
(2) 結晶テーブル	
四 號 跑 囲	土180 度
<b>月 及 稍 度</b> 伯 度 橋 山	土0.01 股
四 及 极 出 駅 勒 方 オ	シンクロの記録の
2.3 小形断面積垂直ビーム	162, 250
(1) 散乱角度	90±3度
(2) 結晶テーブル	
回転範囲	土180 度
角 度 精 度	土0.01 度
角度検出	シンクロ発信機
駆動方式	電 動
3. モノクロメータしゃへい体	
机形型法	
重量 可動部	¥4 4 t
固定部	約 9.5 t
4. ゴニオメータ	
(1) T - L	
回転範囲	30~+120 度
目盛板	直径 632 mm, 最小目盛 0.01 度
) 月 度 精 度	土0.01 度
戌 度 碩 出 町 ∞ -+ -+	シャノトエンコーダー相北モーダ
*** **/ カ エ (2) 試料テーブル	
回転範囲	土180 度
	(⊿θ:±200度)
目 盛 板	直径 620 mm, 最小目盛 0.01 度
角度精度	土0.01 度
角度横出	シャフトエンコーダ
	$(\Delta \theta : シンクロ発信機)$
直 径	518 mm
計 谷 何 進 (3) 於出器1 4 6 6 6 行	1,000 kg
水平方向司変角度	10~15 度
垂直方向可変角度	-5~+10 度
外形寸法	150 (外径)×750 (長さ) mm
五量	12 kg
しゃへい材	B4C およびカドミ板
(4) ファインコリメータ	
開角	10 および 20 分
開口寸法	40×40 mm
(5) ビームスリット 別 III - ト M	77 × 77 × 8 mm
ット ル J 法 間 ロ ナ 社	バスバスのmm 30×30mm 氏力 15 種
m F J 広 L やへい材	ポロンアクリル板、カドミ板、鉛版
	The second



図 3.3 垂直ビーム利用のための2階建家 Two storied structure available for vertical monochromatic neutron beam.

形 ビーム が最後に単色化されて  $40 \times 40 \text{ mm}^3$ の単色ビーム となって小 形水平 ビーム と反対の方向に取り出されている。 このように, この モノクロメータ では 3 本の独立した 単色中性子 ビームを 立体的に取り出 し, 空間を有効に使用しているのが大きな特長となっている。この 小形垂直 ビームの利用のため装置の上部に図 3.3 に示すような 2 階 建家を設けている。

これらの単色ビームのうち2本の小形ビームの散乱角度は、ほぼ固定されており、したがって、それぞれの波長は、使用する単結晶によって決まる一定波長のものとなる。一方、大形ビームは、その波長を連続可変にでき、モノクロメータを中心として ゴニオメータ を移動できるように アームが連結されている。この波長の設定は手動となっている。これら3本の単色ビームのほかに、ダイレクトビームの方向のしゃへい体に直径 8mmの プラグを用いて炉心からの連続 エネルギーのビームを取り出せるようにしてある。

大形 ビーム のための結晶台は, 従来の標準形式と同じく装着され た単結晶の方位を入射 ビーム に正しく調整できるように XY 両軸の 平行移動および, それぞれの軸のまわりの回転が遠隔で操作できる ものであるが, 異なった2種類の単結晶を取り付けることができ, これを遠隔で切り換えることができるようになっているのも特長の 一つといえる。

モノクロメータ しゃへい体は、3本の単色 ビーム を取り出す必要上固 定形となった。このしゃへい体は、いくつかの ブロックに分けて構成 され、モノクロメータ空間を完全に包囲するようにし、さらに目地は外 部から直接 モノクロメータ 空間を見込むことがないようにした。とくに 従来から、ややもすれば炉壁としゃへい体とのすき間からの放射線 の漏れが問題となる場合があり、今回は炉壁に密着するしゃへい体 とはまり合う段付き プラグを実験孔にそう入し万全を期した。しゃ へい体のもっとも厚いところは 750 mm で、しゃへい材料としては 2重 コュクリート・鉛・ボロュパラフィュ などが用いられた。今回のしゃへ い体で構造上問題となったのは、使用する実験孔にごく隣接して原 子炉用の計測口があり、このためしゃへい体を定期的に移動できる 構造とする必要が生じた。また垂直上方における実験の必要性もあ り、このため 図 3.1 に示すように原子炉に向って左側のしゃへい 体を分割して台車に載せ移動できるようにした。なお、この分割し たしゃへい体の接続部は段付きを設け、放射線の漏れが生じにくい ようにした。

#### 3.3 ゴニオメータ

ゴニオメータは標準形を基本としているが、かなり目新しい形状のも のとなった。すなわち従来のものと比べて、BF3カウンタを3本同一 アーム上に取り付け、これを水平面内に配置し、中央の1本は従来と 同じく アーム 中心線上に、他の2本は中心線に対しそれぞれ 10~15 度の角度範囲で試料を中心として可変としたこと、および、このま まの状態で試料を中心として垂直方向上方に10度,下方に5度の 角度範囲で傾斜できるようにしたことが特長のある点となっている。 このように水平方向に3本の カウンタを配置したことにより、粉末試 料の測定時間が 1/3 に短縮され、その効果は大きい。さらに垂直方 向の傾斜が可能であるため試料の層線 スペクトル を測定でき,三次元 データの測定も可能となった。3本のカウンタを同一アーム上に配置す るため カウンタシールドの重量および大きさが問題となってくる。従来 の標準形では、カウンタシールドはしゃへい材にボロンパラヒンを使用して、 直径が 500 mm, 長さ 550 mm, 重量が 100 kg であるので、これを 3本も取付けることはかなり困難である。そこで、ボロンカーバイド(B4 C)を用いることとし、予備実験の結果、厚さ約40mmのボロンカー バイド と 1 mm の カドミウム 板で上記 ボロンパラヒン のものと同等以上の しゃへい性能が得られることがわかり、このため カウシタの前面に配 置する長さ 250 mm の ファインコリメータ も同時に格納して, 重量は1 本あたり約12kgとなりコンパクトな形状となった。

ゴニオメータ本体は、さきにも述べたように標準形と同じであり、試料 テーブル には 1,000 kg までの大形電磁石や クライオスタット を載せる ことができる。機構的には、試料 テーブル と アーム との間にいわゆる  $\theta-2\theta$  の関係をもたせる機械的結合はなく、それぞれ 独立に 2 台の サーボモータ で駆動するようになっている。駆動角度の検出には 1/100 度の目盛板と シャフトアングルエッコーダを用いているのは、従来のものと 同じである。これらの角度精度を オートコリメータ で測定した結果を図 3.4 に示す。

3.4 ファインコリメータおよびビームスリット

ファインコリメータ は中性子 ビーム の開き角をおさえ,一定の方向にそ



Angular accuracy of goniometer.

ろえるためのものであり、従来の標準形とまったく同じ形式のもの であるが、その設置場所は、 モノクロメータ と ゴニオメータ の間、および ゴニオメータ の BF3 カウンタ の前面との2か所で、通常設置される コース コリメータ と モノクロメータ の間のものは、ほとんど効果がないという デ ータ もあり今回は省略された。

ビームスリット は、 中性子 ビーム の断面積を限定するためのもので、 従来の ビームナロワが遠隔操作で開口寸法を縦 ・ 横とも可変としてい たものを、 今回は厚さ 1 mm の カドミウム 板および鉛板と厚さ 4 mm の ボロンカーバイド を 50 %含んだ アクリル 樹脂板をはり合わせ、さらに アルミニウム 板で裏打ちした 板状のものに 所要の 断面の穴を加工した ものを用いた。 これらは ファインコリメータ の前後の開口部のところに 保持されるようになっている。

#### 4. 中性子測定装置

中性子回折実験では、 試料に入射する単色中性子 ビーム の強度が かなり低いので、統計変動の十分小さい測定を行なうには実験が長 時間にわたる傾向がある。したがって測定器の長時間の安定性は非 常に重要である。このため測定系の各回路には、ドリフトの少ない回 路が採用してある。一方、試料によって回折された中性子の強度は、 さらに低くなるので、バックグランド 計数をできるだけ少 なくして、 S/N 比を上げることが必要である。このために今回の装置では シン グルチャネル 波高分析器を使用したが、 この種装置では 初の試みであ る。

中性子測定系の ブロック 線図は、図4.1 に示すとおりであるが、 前章にも述べたように、中性子検出器の メイッチャネル が3 系統である ことと、このため4チャネルスケーラを新しく開発したこと、シングルチャ ネル 波高分析器を採用したこと以外は、 従来の方法と同じであり、 BF3 計数管、プリアップ、リニアアップ、高圧電源および計数率計からな るモニタとメインカウンタ、 さらに スケーラ、プリンタ および記録計から構 成されている。また計測法も従来と同じく、モノクロメータ から出てく る単色中性子の強度をモニタして、モニタカウンタの計数が プリセット 値 に達する間、メインカウンタの計数値を測定する方法を主体としている。

この装置に用いている各回路はすべて固体化されており、さらに メインアンプ、シングルチャネル 波高分析器、計数率計、低圧電源および高 圧電源は モジュール 化して コンパクト なものとなっている。 各 モジュール の寸法表を表 4.1 に示す。

#### 4.1 BF₃ カウンタ

使用した BF<sub>3</sub> カウンタ は、 いずれも プラト- 幅および プラト- スロープ がそれぞれ 400 V および 0.8 %/100 V 以下のものであった。メインチ



三菱電機技報・Vol. 43・No. 4・1969

#### 表 4.1 中性子計測 モジュール の大きさ Dimension of neutron measuring modules.

	「 W mm	高 さ H mm	奥 行 L mm
Main amplifier	70	150	300
l ch. pulse height analyzer	70	150	300
Count rate meter	70	150	300
Low volt power supply	140	150	300
High volt power supply	210	150	300

 $+ \lambda_{ll}$ の BF<sub>3</sub> カウンタ は、前章に述べた カウンタシールド にそう入され、 散乱中性子による バックグランドを下げている。このしゃへい体の中に おける BF<sub>3</sub> カウンタ (ND-8554-60 S)の バックグランド は、40 時間測定 の平均で1 CPM (原子炉出力 10 MW 運転時)であり、良好な結果 が得られている。この メインチャネルの3本の カウンタ は、一つの試料 を同時に3か所から測定するものであるから、とくにプラトー 幅など 特性のそろったものが選ばれている。なお、モニタカウンタ (ND-8534-60 S) は モノクロメータ しゃへい体の単色 ビーム 出口に取り付けられて いるが、これによる散乱で バックグランド が高くならないように カドミ ウム 板と ボロンパラヒン で周辺をしゃへいしてある。

#### 4.2 シングルチャネル波高分析器

波高分析器は高さの異なる パルス 群から, あらかじめ定められた 振幅の範囲の パルスのみを識別するものであり, シングルチャネル 波高分 析器は, この定められた振幅の幅が一つだけのものである。通常, メインアンプからの パルス信号から,任意に定められた パイアス電圧 E(ベ -スレベル) とそれより少し上の電圧 E + 4E (4E が チャネル 幅)の間 の波高値をもつ パルスのみを選別し, スケーラ や計数率計でその数を 測定する。

カウンタによる計数のうち バックグランド計数には散乱中性子によるも のと電気的 サージによるものとがある。 このうち,散乱中性子によ る バックグランド は カウンタ の周辺の しゃへいによって 下げることがで きる。一方,電気的 サージ は AC ライン に フィルタ を入れたり,スイッチ 接点に サージ防止回路を入れたり,あるいは,プリアンプ と メインアンプ との ケーブル を 2 重 シールド にして防止するが完全でなく,ときには 過大な サージ が測定系にはいることがある。 このときは,メインアンプ の出力圧力は その ダイナミックレンジ を はるかに越えていることが多い。 そこで波高分析器の ベースレベル を メインアンプ の定常的 ノイズレベル のお よそ 2 倍ぐらいに調整し、チャネル 幅は メインアンプ の ダイナミックレンジよ りわずかに低い値に調整する。このようにして,ほとんどすべての サージ をこの波高分析器で取り除くことができる。

#### 4.3 スケーラ

中性子測定用の スケーラ は 従来の デュアル チャネルタイプ のものと 異なり、3 組の メインチャネル とモニタチャネル をもつ 4 チャネルスケーラ を必要と するために、IC 化された標準 カード により新しく開発された。

3組のメインチャネルはおのおの十進計数回路6けたから構成され, その入力信号はリニアアンプからそれぞれ与えられている。しかし3 組のメインチャネルの中で計数内容を表示することができるのは一つ だけである。したがって、いずれのチャネルの計数内容をランプ表示 するかは表示選択用のスイッチを選択する必要がある。これら3組の メインチャネルの測定結果は測定を行なったサンプルテーブル角度, ゴニオメ -タア-6角度について図5.3に示すフォルマートで印字される。

モニタチャネル も十進計数回路6けたで構成されており, この カウンタ の計数値は プリセット が可能である。 プリセット 値は有効数字2 けたと けた数 ×1, ×10, ×100, ×1 K, ×10 K の組合わせで指示される。 計数方式としては モニタカウンタ からの信号を計数するか, 内蔵の水晶 発振器からの時間信号を計数するかにより次の三つの測定 モードが ある。

#### (1) ノーマルモード

モニタカウンタ からの信号が モニタチャネル に導びかれ プリセット 値に達す るまで各 メインチャネル でおのおの中性子を計数する。

(2) タイマモード

水晶発振器からの時間信号が モニタチャネル,各 メインチャネル のすべて に導びかれ,水晶発振器および 各 チャネル の計数回路の動作 チェック を行なう。

この スケーラ は手動, 自動の2種の モード で操作される。手動の場 合は手動 スイッチ を押すことで,また自動の場合は制御装置からの ス ケーラスタート 信号が与えられることで各 チャネル の ゲート が開き計数を 開始する。モニタチャネル の計数値が プリセット 値に等しくなる と,ゲート を閉じて メインチャネル の計数を止め 制御装置へ スケーラ 終了信号 を送 り,計数内容を プリンタ に印字させる。

各計数回路は IC を用いて標準化されており,表示 ランプ 回路つき の計数回路 DC-211 および表示なしの計数回路 DC-111, それぞれ 12 枚を主要素として構成されている コンパクト な スケーラ である。

プリアップ、メイッアップ、計数率計、高圧電源などは性能的には従来のものと同じであり、ここではその詳細は省略することとする。

#### 5. 制御装置

中性子回折実験では,測定条件の設定,回折中性子の強度測定お よびその結果の記録などの動作が繰り返し行なわれる。

この制御装置はこれら長時間にわたる一連の動作を自動的に,能 率よく行なうために開発されたもので,今回は特に論理回路を IC 化することによって,装置の信頼性の向上,調整,保守の時間の軽 減を行なうことができた。制御装置は IC 化された論理回路を中心 に,動作の指令を行なう コットロールスイッチ,各種の動作状態を表示す る プログラム インジケータ,設定角度や測定値の印字を行なう プリンター, 機械装置の駆動を行なう サーボ 増幅器,モノクロメータ 結晶台や試料 テ ーブル などの制御を行なう インジケータ およびこれに必要な電源類で構 成されており,その ブロック 図を図 5.1 に示す。

5.1 動作モード

この装置の制御方式はいわゆる シーケッス 内蔵形で,あらかじめ定められた内部 シーケッス に基づいて装置の制御が行なわれる。

(1) ノーマルモード

あらかじめ設定された測定開始角度と終了角度の間を プリセット さ れた ステップ 角度で順次 ステップ 送りを行ない, 各角度位置で中性子 の強度測定および印字を行なう。

(2) スピッフリッパモード

ノーマルモードと同じく測定開始角度からステップ送りを順次行なうが, 各設定角度の位置でスピッフリッパのオン・オフを行ない, それぞれの 状態で中性子角度の測定および記録を1回行なう。これは偏極中性 子ビームによる回折実験を行なう場合に用いられる。

(3) シングルモード

測定開始角度から終了角度までの回折実験をくり返し行なう。これは試料の温度を変化させて回折実験を行なう場合などに用いられる。

とのほかに,角度送りを自動的に行なう「AUTO」と手動送りの 可能な「MANUAL」モードがあり,とくにシーケンスをスタートさせる 場合いずれのモードにあるかにより 開始角度が 異なるようになって



図 5.1 制御系 ブロック図 Block diagram of control system.



図 5.2 シーケッスの流れ図 Flow chart of control sequence.

いる。これら一連の シーケッスの流れを図 5.2 に示す。

#### 5.2 論理回路

論理回路は コントロールスイッチ から与えられた動作 モード にしたがっ て機械装置を位置ぎめ制御し, スケーラ を自動的に スタートストップ させ て一速の シーケンス を繰り返し行なう シーケンス 制御の中心となるもの である。論理回路の主要部は 7 種類, 45 枚の IC カード で構成されて おり, これらの カードには TTL タイプの IC 約 200 個が用いられた。 また ランプ の点火, リレー の駆動には NOR カード約 20 枚を用いてい る。

図 5.1 の ブロック 図において、コントロールスイッチ によって選択され た動作 モード 信号は シーケンスコントロール 回路にはいる。 この信号に基 づいてあらかじめ定められた制御 シーケンス で動作が行なわれ,モータ の駆動・停止,スピンフリッパのオン・オフ,スケーラのスタート・ストップ な どの信号が リレーを通して送り出され, 機械装置の位置ぎめ制御, 回折中性子の強度測定を行なう。

機械装置の位置検出には シャフトエンコーダ を用い、この出力をレベル コンバータ で適当な形に変換して現在位置を表わす信号を作っている。 回折中性子の強度測定が終了するごとに、 そのときの サンプルテーブル の角度、 ゴニオメータ アーム の角度および測定値が プリントコントロール 回路 で直列信号に変換され、 プリンタ に印字される。 この出力 フォルマート を図 5.3 に示す。

#### 5.3 コントロール パネルおよびプログラム インジケータ

コントロールパネル は動作 モード を設定する コントロールスイッチ,ステップ 送 り 角度を ブリセット する デジタルスイッチ および手動操作用の プッシュボタン 群と機械装置を駆動するための リレー,ブリンタドライブ 回路が納められ ている。 プログラムインジケータ には機械装置の サンプルテーブル の現在角度 と ゴニオメータ アーム の現在角度位置が光点式表示器で表示され,その ランプ 寿命は約3万時間とされている。

#### 5.4 サーボ増幅器

機械装置の駆動を行なう サーボ 増幅器は P. W. M 方式の高性能の ものを採用している。動作としては論理回路から速度・方向に関す る指令を受けると、これに応じた入力信号が発生され、この信号と タコジェネレータ からの フィードバック 信号の 差信号が パルス 幅変調 され、 パワー 増幅されて サーボモータ に供給される。

図 5.4 はこの装置の制御盤である。

#### 6. 据付および総合調整

装置の据付けは、原子炉の運転 スケジュール に合わせて、 基礎工事、

Setting angle of sample table	Setting angle of goniometer arm	Neutron intensity measured by 3 main counters
S 0 0 1 2 0 0	G-002500	M 0 0 0 7 9 M 0 0 0 6 9 M 0 0 0 8 6
S 0 0 1 2 0 0	G 0 0 2 5 1 0	M 0 0 0 8 5 M 0 0 0 5 5 M 0 0 0 9 7
S 0 0 1 2 0 0	G 0 0 2 5 2 0	M 0 0 0 9 5 M 0 0 0 6 4 M 0 0 0 8 2
S 0 0 1 2 0 0	G 0 0 2 5 3 0	M 0 0 0 1 3 8 M 0 0 0 9 3 M 0 0 0 9 9 5
S 0 0 1 2 0 0	G 0 0 2 5 4 0	M 0 0 0 9 6 M 0 0 0 8 2 M 0 0 0 8 6

図 5.3 プリンタ 印字様式

Typical format of print-out signal.



図 5.4 制 砌 委 直 Measuring and control equipment.

実験孔 ゔ゚゠ヮ゚ そう入から始まり、全装置の調整試運転基礎測定が行 なわれた。機械部の ビーム 中心に対する据付け精度は各方向とも ± 0.1 mm 以内に納められ、モノクロメータや ゴニオメータの現地組立ては ± 0.01 度以内の角度精度が再現された。中性子計測系については炉室 内の各機器の運転による ノイズテスト が行なわれ、シングルチャネル 波高分 析器の効果が確認された。さらに制御系については、3屋夜にわた る連続試運転を行なって動作の安定性が確認された。これらの調整 終了後、原子炉出力 10 MW 運転時におけるモノクロメータ しゃへい体 の放射線漏れ検査、装置を据付けた実験孔における炉内連続 スペクト ルの測定、 および Al と Ni の標準粉末試料による回折像測定が行 なわれた。

#### 6.1 しゃへい検査

原子炉出力 10 MW 運転時におけるしゃへい検査は,図 6.1 に示 すように良好な結果が得られた。とくに炉壁としゃへい体との接触 部における漏れは、ほとんど完全といえる値を示している。これは 炉壁前面のしゃへい体を貫通して実験孔に そう入された 段付き プラ グ状のしゃへい体の効果が大きいことを物語っている。なおD点の 値が大きいのは隣接する装置からの影響であって、しゃへい体すき 間からのもれではない。一方,その他の部分の表面線量率も A,G 点を除けば十分なしゃへい能力があることがわかる。この A, G 点 は実験孔からの ダイレクトビーム\* によるものであるが 若干の鉛 などを 追加することによって十分しゃへいされることがわかった。今回の 装置で特長のある移動しゃへい体と固定しゃへい体との接触部は、 ビーム 中心に 近接していることと 構造上の制約のため 段付きの差を あまり大きくとることができないことのため、放射線の漏れが大き いのではないかとあやぶまれたが十分低い値に押えることができた。 これは接触面の方向を大形 ビームの モノクロメータ 中心からはずしたこ とによる効果と考えられる。このようにモノクロメータしゃへい体の性 能は従来のものに比べかなり良好な結果が得られた。

#### 6.2 連続スペクトルの測定

ゴニオメータ を実験孔中心線上に配置し(すなわち, モノクロメータ アームの角度を0度にし)直径8mmの ダイレクトビーム をそのまま取り出して, ゴニオメータの テーブル 上の単結晶 KBr に入射し, (hoo) 面の

\* ダイレクトビームのモノクロメータ結晶の位置における中性子線束は、全ばくの放射 化分析により熱中性子 2.05×10<sup>8</sup> n/cm<sup>2</sup>・s 速中性子 3.68×10<sup>7</sup> n/cm<sup>2</sup>・s と词定され た。このときの角度は約 1° である。



Measuring point	A	в	С	D	E	F	G	н	I
Gamma, mR/h	30	1,5	0.4	3.0	1.0	0.4	4.0	0.3	0.4
NT. mrem/h			0,02		0.01	*****	0,03		
NF. mrem/h	0.1	0.1	0,2		0.2	0.01	0.03	0.05	0.05
Total, mrem/h	30	1.6	0.6	3.0	1.2	0.4	4.0	0.4	0.5

図 6.1 中性子散乱回折装置の放射線漏れ線量率 Radiation leakage of neutron diffractometer.

Bragg 反射を利用してこの中性子 ビームの連続 スペクトル を測定した 結果が図 6.2 である。スペクトル は Maxwell 速度分布に従った, き れいな分布を示している。強度のビークは約 1.8 Å にあり、炉内の温 度から考えると多少長波長側にずれているが、 これは図の データ が 測定そのものであり、実際はいくつかの (hoo) 反射の重なり、BF<sub>3</sub> 計数管の感度の波長依存性などに対する補正を要し、これにより真 の波長分布が得られる。

#### 6.3 標準試料回折実験

ゴニオメータ の 3 本の メインカウンタ を用いて Al および Ni の標準粉末 試料の回折実験を行なった。この実験では3本の カウレヌ のうち両側 の カウュンタ をそれぞれ中央の カウュンタ に対し 15 度にして試料を見込む ようにし,ゴニオメータァームを 0.1 度 ステップ でピッチ 送りされている。 Al 試料では 25 度から 96 度まで送り,Ni 試料では 13 度から 74 度 まで送っているので,3 本の カウンタ は,かなり広い範囲にわたって 重複して測定することになり,各系統の特性がそろっているかどう か検定できる。実験の結果は良い一致を示しており,これらをまと めたものが図6.3および図6.4である。この測定には、モノクロメー タとして Cu 単結晶を用い散乱角 30° 方向における (111) 反射によ り得られた 1.08 Ă の単色中性子線を 入射線として用いている。 試 料は Al 製の カフセル に入れたため,Ni の測定結果には,若干の Al の回折線も見られる。なお測定試料は Al は 32 g, Ni は 22 g の粉 末を円筒形 カフセル に入れたものである。測定結果は,粉末試料の測 定を精度よく,短時間で行なうことができることを示している。実 際の測定のときは,3 本の カウュンタ の角度差を利用して,測定時間を かなり短縮することができるので非常に能率的である。

#### 7. む す び

今回, JRR-3 号炉に据付けた東京大学物性研究所納めの中性子







散乱回折装置の概要をのべた。

研究の経済性・効率化といった面から1本の実験孔から3本の独 立した単色中性子ビームが取り出せ、さらには原子炉の連続スペクトル 測定用のビームも取り出せるようにした多目的のモノクロメータの試み、 あるいは粉末試料測定時間を1/3に短縮できた3本のメインカウンタを 有するゴニオメータなどの試みは成功したといえる。

しゃへい体についても実験孔出口周辺のしゃへい方法,あるいは モノクロメータ空間を完全に密閉する構造により,ほぼ完全といえる性 能をうることができ,今後のしゃへい設計に有効な資料を得ること ができた。また,装置の据付け位置による制約があったため,モノク



ロ しゃへい体の側面を開放できるようにしたが、これは実験準備のためモノクロメータ単結晶の交換等にきわめて便利であった。

また、中性子計測系への シングルチャネル 波高分析器の採用、制御系 への IC の適用など新しい試みが施され、いずれも満足した結果が 得られた。

以上のように,従来にない新しい形式の中性子回折装置を製作し 多大の成果をうることができたが,この装置によってわが国の物性 物理学の研究をさらに進展させるものと確信するものである。

おわりに、この装置の設計,据付けならびに調整にあたって種々 協力をしていただいた東京大学物性研究所の石川助教授,島岡,佐 藤,遠藤各助手,高橋,茂木両技官および原研駐在の大学開放研高 橋事務官,渡辺助手に厚く感謝の意を表する。また,装置の据付け にあたっての種々の手配ならびに放射線しゃへい検査にあたられた, 日本原子力研究所東海研究所 JRR-3 管理室あるいは保健物理部の かたがた,さらにこの装置の製作にたずさわった多くのかたがたに 対し厚く感謝の意を表する。

#### 参考文献

- (1) 星埜:中性子回折,(昭36) 槇書店
- (2) 国富ほか:三菱電機技報, 35, 835 (昭36)
- (3) 三宅ほか:三菱電機技報, 36, 545 (昭37)
- (4) S. Hagihara et al : Mitsubishi Denki Laboratory Report,3, 1 (1962)
- (5) S. Miyake et al : J. Phys. Soc. Japan, 17, Suppl. B-11, 358 (1962)
- (6) 蘒原ほか:三菱電機技報, 39, 1,076 (昭40)
- (7) 津田ほか:三菱電機技報, 42, 732 (昭43)

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\*

# Experimental Study of MHD Generator Ducts for Long Operation

Central Research Laboratory

Tetsuya MORIKAWA · Yutaka MURAI · Yukito KOBAYASHI

In open cycle MHD generators, working gases passing through generator ducts are maintained at high temperature and high velocity, containing highly corrosive elements such as seed materials and ash. To protect the structure from them water-cooled wall ducts constructed of metallic elements and semi-hot wall ducts built of ceramic materials with the surface temperature controlled to remain within their permissible limits are considered for use in the MHD generator ducts of long operation. However remarkable progress has not been made with the latter construction.

This paper describes a new type semi-hot wall ducts built on a unique idea, which is proved superior to the water-cooled one in thermal and electrical characteristics.

#### 1. まえがき

MHD 発電とは、熱 エネルギー を直接電気 エネルギー に変換する,い わゆる直接発電の一つである。原理的には従来の発電機と大差がな く,磁界内に導電性をもった流体を高速で通過させると、磁界と流 体の流れ方向との両者に直角な方向に起電力を誘起するという Faraday の原理を利用している。

MHD 発電は熱源から二つの方式, すなわち, 化石燃料を熱源と して使用し, その燃焼生成物を作動気体とする オープンサイクル 方式お よび原子炉を熱源とする クローズドサイクル 方式とに大別される。本稿 では,より実用化が早いと考えられている オープンサイクル 方式に問題 を限定して論じる。

オーランサイクル 方式は 1959 年ころに米国の AVCO 社, W 社, GE 社において小規模な実験が行なわれて以来, MHD 発電の可能性が 次第に明らかにされ,世界各国で実用化の研究が活発に行なわれる ようになった。わが国においても 1962 年ころから電気試験所, 三 菱電機などで 10 kW 前後の発電に成功し,それを契機として電気 試験所を中心に, 三菱 グループ,日立,東芝などの メーカ が協力する 形で研究が進められてきた。 とくに昭和 41 年度から国家研究であ る大形 プロジェクト の一環として MHD 発電がとりあげられ,ますま すその研究規模は大形化することになった。

しかしながら, MHD 発電の実用化までには解決しなければなら ない問題点が多く残されており,大きな問題だけでも プラズマの特性 と発電出力との詳細な関係のは握,長時間の運転に耐える発電 ダクト 壁の構成法,強磁界発生装置としての大形超電導マグネットの開発, 高温空気予熱器の開発,  $\upsilon$ ード投入回収法がある。これらの問題点は それぞれ分離して研究することができる要素をもち,実際に前記の 国家研究の  $\tau$ -マ としてとりあげられ, 意欲的な研究が進められて いる。

筆者らはこれらの問題点のうち,MHD 発電機の心臓部ともいう べき発電 ダクト,とくに長時間運転用発電 ダクトの構成方法について 研究を進めているので,ダクトの構造ならびにそれを用いて行なった 実験結果を中心に記述する。

#### 2. 発電ダクトの問題点

MHD 発電 ダクト は図 2.1 に示すように、一般に多数に分割され



図 2.1 MHD 発電 ダクト の基本構造 Fundamental construction of MHD generator duct.

た電極および電極を互いに電気絶縁し同時に作動気体の通路を形成 する絶縁壁とから構成されている。 MHD 発電 ダクト の構成法とし ては、熱絶縁された耐熱絶縁材料と高温の電極とから構成するのが 理想的である。しかしながら、発電 ダクト を通過する作動気体は、 高温高速である上に、シード材としてのカリウム、燃料中の灰分など の腐食性のはげしい物質を含有するので、構成材料に要求される条 件はきわめて湿酷である。すなわち、構成材料には、耐熱性、耐酸 化性、耐食性、耐摩耗性、耐熱衝撃性、耐熱応力性など多くの性能 が要求される上に、絶縁壁の構成材料には電気絶縁性、電極材料に は導電性、熱電子放射能が要求される。このような耐熱材料の研 究は各国において活発に行なわれ、かなりの成果を上げてはいる が<sup>(1)(2)</sup>、耐熱材料を長時間、断熱状態で使用する高温壁発電 ダクト、

いわゆるホットウオールタントに対する実用化の見通しは得られていない。

そこで構成材料に要求される上記の諸特性を一挙に満足させるべ く提案されたのが米国 AVCO 社の ペジウォール 形<sup>(3)</sup>,英国 CEGB(中 央電力庁)の銅管形<sup>(4)</sup>などに代表される水冷壁発電 ダクト,いわゆる コールドウォールダクト であり,現在実用発電 ダクト として,もっとも信 頼性のあるものと考えられている状態である。しかしながら,筆者 らもあとで述べるように,水冷壁発電 ダクト を試作し,その構成法 ならびに熱的,電気的諸特性の研究を行なったが,水冷壁発電 ダクト は熱損失,電極における電圧降下,電流集束,絶縁壁の電気的特性 などに関し多くの問題点があること,したがって,発電 ダクト を耐 火物で構成し,その表面温度を構成材料の許容温度以下に冷却する, いわゆる セミホットウォールダクトを開発する必要があることがわかった。 本報告では,新しい構成方法によるセミホットウォール発電 ダクトを提案 するとともに,水冷壁 ダクトとセミホットウォールダクトを比較検討してい る。

\* 中央研究所

#### 3. 実験装置

図3.1 に実験装置の外観を示す。本装置は熱入力1MWの軽油 パーナを備え,酸化剤として酸素富化空気を使用している。燃焼室 は水冷構造で,燃焼室における熱損失を最小にするために、マグネシ ア 円筒で内張りされている。シード材は酢酸カリウムのアルコール溶液 でパーナの側面から燃焼ガスに向って霧状で添加され、燃焼ガス中 に約1mol%のカリウムを投入するように、流量計によってシード材 の流量が調節される。燃焼室で作成された動作気体は水冷ステンレス 鋼製の加速ノズルによって MHD 発電 ダクトの入口で400~700 m/s の高温高速の気流となる。動作気体の温度は酸化剤のN<sub>2</sub>/O2 比と変 えることにより 2,400~2,850 °K に変えることができる。



図 3.1 実験装置の外観 View of experimental apparatus.

#### 4. 長時間運転用ダクトの構造

#### 4.1 水冷壁ダクトの構造

発電 ダクトの絶縁壁を水冷された金属壁で構成する場合には、その電気絶縁性が問題になるが、これは金属壁を細かく分割し、これ らの小片を絶縁物の板に固定して水冷するとともに、金属片の間げ き(隙)には耐熱性絶縁物を充てん(塡)して金属片相互の絶縁をする ことにより解決できると考えられる。

図4.1, 4.2, 4.3 に実験に供した水冷壁 ダクトの外観, 内面お よび断面図を示す。この ダクト は長さ 250 mm, 断面 70×27 mm<sup>2</sup>の 等断面積形である。 絶縁壁は合成樹脂板(アセタール 樹脂)に固定さ れた 54 個の対辺距離 19 mm,高さ 30 mm の六角柱状水冷銅素子と 素子間に充てんされた耐熱絶縁材(アルミナセメント)とから構成されて いる。合成樹脂板は水冷銅素子を固定して素子を互いに電気的に絶 縁するとともに、樹脂板に設けられた多数の穴を通じて各素子に冷 却水が供給される。 銅素子は図 4.3 に示すような構造を有してい るために冷却効果がよく、したがって素子間の耐熱絶縁材、合成樹 脂板, シール用の Oリング等はそれらの許容温度以下に冷却される。 水冷銅素子の ピッチ 間隔 d は、水冷銅素子を電極とした場合の電 極降下  $V_0$  と局所電界 E との値によって決定され、 $E \times d$ の値が 𝒱₀より小さい場合素子問の絶縁は十分保たれるものと考えられる。 電極降下 Vo の値は動作条件たとえば電極表面温度, 電極表面に発 達する境界層の温度、厚さおよび電極を流れる電流によって変化す ることが報告されている(5)。筆者らの実験では水冷銅電極に関して は80~130 Vの値を得ている。本 ダクト では動作気体の導電率,水



図 4.1 水冷壁 ダクト の外観 Outside of water-cooled wall duct.



図 4.2 水冷壁 ダクトの内面 Inside view of water-cooled wall duct.



Cross sectional view of water-cooled wall duct.

冷電極の電極降下などの電気的諸特性を測定するために外部から印 加される電界の最大値に対して  $E \times d \approx 50$  V となるように  $\ell_{nf}$  間 隔 d を選んでいる。

一方,電極は 21×21 mm<sup>2</sup>の表面積を有する角柱水冷銅素子で, 本 ダクト には 10 対の電極が設けられている。電極は電極表面現象観 察用の観測窓と互換性を有しており,必要に応じて電極表面を観察 できるようになっている。電極も絶縁壁の場合と同様に合成樹脂板 に相互に絶縁されて固定され,その間隙には耐熱絶縁材が充てんさ れている。

*š*クト には動作気体の温度を測定するための観測窓, *š*クト 壁内部 の温度分布を測定するための熱電対が設けられ, また *š*クト 壁から の熱損失を測定するために, 絶縁壁, 電極の冷却水通路には流量計, サーミスタ 温度計がとりつけられている。

#### 4.2 セミホットウォールダクトの構造

セミホットウォールダクト はホットウォールダクト の特長とコールドウォールダクトの 特長とを兼備するものとして最も期待されているものであって,そ の特長は ダクトの構成材である耐熱材料をその材料の最高許容 温度 まで冷却して使用する点にある。従来耐熱材料をその許容温度まで 冷却することが技術的に困難なこと,耐熱材料の寸法がある大きさ 以上になると製作が困難である上に,運転による温度の急激な変化 の繰返しによって耐熱材料にき(亀)裂が生じ,一部飛散するなどの 問題点を有し,これまで実用発電 ダクトとしての可能性は困難視さ れていた。

筆者らは これらの問題点を解決 するために セミホットウォールダクト の 一構成法を提案しその実用化の研究を進めている。

図4.4はセミホット 形絶縁壁の基本的な構造を示すものである。 絶縁壁は多数の小片に分割された アルミナ 磁器, ベリリア 磁器, などの 耐熱材料からなり,各小片は背面を金属化(メタライズ)され,金属の 薄板を介して水冷金属基板にろう付け接着されて1枚の絶縁壁を構 成している。磁器と磁器との間げきには高温部に耐火 セメント,低温 部に合成樹脂が充てんされ シード材が内部に浸透するのを防いでい る。このような構造を有するセミホット 形絶縁壁は耐熱材料を小片に 分割することによってその熱衝撃抵抗が大きくなり,ろう付け接着 することにより効果的な冷却を行なえるので,材料の表面温度をそ の許容温度以下に制御できるとともに,熱応力,熱衝撃に対して壁 の強度を上げることができる。さらにこの方法を採用することによ り任意の形状を有する絶縁壁を製作することが可能であること,壁 を薄くできるので発電 ダクトに印加される磁界をより有効に利用で きること,水冷構造が比較的簡単なことなどの長所を有する。

図4.5,4.6はそれぞれ開発された初期のセミホットウォールダクトの 内面および断面図である。この ダクト は等断面積形で長さ 240 mm, 断面 25×70 mm<sup>2</sup> のもので、 断面は前記の水冷壁 ダクト と同寸法で ある。絶縁壁は 26 mm, 厚さ 10 mm の アルミナ 磁器から構成され ており、 モリブデンの薄板を介してそれぞれ銅製取付金具にろう付け 接着されている。これらの取付金具は冷却水通路を有する鉄製基板 にそう(挿)入, 固定され アルミナを背面から冷却する構造になってお り、冷却方法は水冷壁 ダクトの構造を応用したものである。 絶縁壁 材料としては アルミナ が耐熱性, 耐熱衝撃性, 耐熱応力性, 電気絶縁 性、メタライズ性などの総合的な特性から最もすぐれているものと考 えられる。すなわち、MHD 発電機の動作気体よりはるかに過酷な 条件を プラズマジェット 発生器により実現させ、材料、成形方法、成形 温度などを変えた種々の材料で構成された セミホット 形素子に プラズマ ジェットを長時間あてた結果、高純度、高密度の アルミナ で寸法が 16 mmø, 厚さ 10 mm の場合には、 熱流束 60~150 W/cm<sup>2</sup>, 表面温度 1,500~2,000°C の場合でも、表面から 1 mm 程度結晶構造が変化し ているのみで、き裂は生じていないことが判明した。

ー方電極は表面 24×24 mm<sup>2</sup>, 厚さ 20 mm で材料は  $ZrB_2$  系のも のを使用している。電極も絶縁壁と同様の構造で背面から水冷され ているが、絶縁 ブッシュによって取付基板とは絶縁されて固定されて いる。電極表面温度を 2,000 °C に保持して行なった数時間程度の実 験では、電極表面に 0.5 mm 以下の酸化皮膜が形成されたが、電流 特性は良好であった。

図 4.7 は改良された絶縁壁を示すものである。 耐熱材料は表面 16.5×16.5 厚さ 10 mm の アルミナ 磁器で、図 4.4 に示すように水冷 金属基板上に設けられた多数の薄肉円筒上に モリブデン板を介してろ



図 4.4 セミホット 形絶縁壁の悲本構造 Fundamental construction of semi-hot type insulating wall.



図 4.5 セミホットウォールダクトの内面(円板素子) Inside view of semi-hot\_wall duct; (disc type element).



図 4.6 セミホットウォールダクトの断面 (円板素子) Cross sectional view of semi-hot wall duct (disc type element).



図 4.7 セミホットウォールダクト(正方形素子) Inside view of semi-hot wall duct (square element type).

ら付け接着されている。この絶縁壁では, アルミナ 磁器の寸法を小さ くすることによって, 耐熱衝撃性が改善されている上に冷却構造が 簡単化されている。

#### 5. 実験結果および検討

#### 5.1 ダクト壁からの熱損失

動作気体から ダクト 壁への熱伝達量は MHD 発電機の熱効率を検 討する上できわめて重要であると同時に、ダクトの設計をする際に欠 かせない量である。

高温気体から管路への発達した流れの乱流熱伝達量 q は次式によって与えられる<sup>(6)(7)</sup>。

 $q = S_t \rho u (H_s - H_w)$  .....(5.1) ここに、  $\rho$  は気体の密度、 u は流速、  $H_s$  は気体の全  $I \cup g \mu \ell$ 、 $H_w$ は壁温度における気体の  $I \cup g \mu \ell$  である。 $S_t$  は  $\chi g \cup h \cup$  数で実験式 によって次のように表現される。

ここに  $P_r$ ,  $R_e$  はそれぞれ プランドル数、レイノルズ数である。

C C C α は管路入口からの距離の関数として表現される補正係数で

$$\alpha = 0.866 \left[ \frac{R_e^{0.2}}{(x/d)^{0.8}} \right]^{0.275}$$
(5.4)

と表現される。とこに d は管路の流力直径である。したがって、 sクト入口から x の点における スタットッ数  $S_{tx}$  は距離による補正係数  $\alpha$  を用いて

 $S_{tx} = \alpha S_t$  .....(5.5)

と表現される。 以上の式 (5.1) から式 (5.5) を用いて ダクト 入口から距離 x の点における熱損失 qx は

と表現される。

一方 ダクト 壁から冷却面への伝達量 q は次式によって与えられる。

ここに $\overline{k}$ は  $\overline{g}_{0}$ ト 材料の平均熱伝導率,l は材料の厚さ, $T_w$  は壁温度, $T_0$  は壁の冷却面温度である。

定常状態においては明らかに式 (5.6) と式 (5.7) のqは等しいから、式 (5.6) と式 (5.7) とを連立させ解くことにより壁温度  $T_w$  および熱損失  $q_x$ を求めることができる。

図 5.1 は二,三の気体について壁温度と 1 2 2 2 0 L 落差  $(H_s - H_w)$ との関係を示したものである。(A) は筆者らの代表的な実験条件, (B),(C) は実用規模の発電  $g_{2}$ トの入口,出口における条件につ いて計算したものである。図 5.2 は筆者らの実験条件(A) につい て  $g_{2}$ ト入口からの距離  $x \in \Lambda_{3,2-9}$  として壁温度と熱損失との関 係を図示したものである。図中の曲線群は図 5.1 を用いて式(5.6) から計算したもので  $\mu = 6.9 \times 10^{-5}$  kg/m·s, d = 3.68 cm,  $R_e = 4.6 \times 10^4$  を採用している。同図の破線および一点鎖線は式(5.7) から セ  $2 \pi y$ トウォールダクト,水冷壁  $g_{2}$ トの平均熱伝導率  $\overline{k}$  をそれぞれ 0.016 cal/s·cm·°C, 0.92 cal/s·cm·°C として計算したもので,いずれの場 合も  $T_0 = 400$ °K, l = 1 cm としている。図 5.2 の曲線群と直線と の交点から水冷壁  $g_{2}$ ト,セミホットウォールダクトの熱損失と壁温度とを  $g_{2}$ ト入口からの距離の関数として求めることができる。なお気体温 度は NaD 線反転法により詳細に測定している。また  $g_{2}$ ト構成材料











図 5.3 ダクト入口からの距離と熱損失との関係 Local heat flux as a function of distance from duct inlet.

の冷却面温度は 400°K に近いことを実験で確認している。

図 5.3 は水冷壁 ダクト, セミホットウォールダクト について, ダクト 壁への 熱損失の計算値と実験値とを ダクト 入口からの距離の関数とし て示 したものである。図から明らかなように計算値と実験値との間には よい一致がみられる。したがって, ダクトを設計する場合,式(5.6) と式(5.7)とを用いて ダクト 壁への熱損失を十分推定することが で きる。また図から水冷壁 ダクトを セミホットウォールダクト に置換すること によって, 熱損失が平均して 65% 程度に減少することがわかる。 なお式(5.6)から明らかなように ダクト入口直後は熱的に過酷な条

三菱電機技報・Vol. 43・No. 4・1969

件になるので, セミホットウォールダクトの実験の場合には, 入口に 50 mm 長の水冷金属 ダクトを設けている。

さて、実用規模の MHD ダクト の場合について、ダクト 壁への熱損 失を推定してみよう。一例として定断面積形の ダクト を考え、流力 直径を 2 m として、熱的条件の過酷な入口近傍と気体温度が低下し た出口近傍、すなわち (x/d) が 1 と 7 の点における熱損失を、水冷 壁 ダクト および セミホットウォールダクト について求める。ただし計算の条 件として気体温度,圧力を入口近傍で 2,600 °K,4 ata,出口近傍で 2,200 °K,1 ata とし、流速を入口で 800 m/s とする。なお壁温度は 水冷壁 ダクト の場合 500 °K, セミホットウォールダクト の場合 1,800 °K 一定 とする。図 5.1 の曲線(B),(C) および式(5.6) から容易に求め られ、水冷壁 ダクト の場合には入口近傍で 246 W/cm<sup>2</sup>,出口近傍で 118 W/cm<sup>2</sup>, セミホットウォールダクト の場合には入口近傍で 119 W/cm<sup>2</sup>, 出口近傍で 34 W/cm<sup>2</sup> と計算される。なお、このような実用規模の ダクト においてはふく射損失を考慮する必要がある。ふく射損失は次 式によって与えられる。

$$q_r = 5.67 \varepsilon_g \varepsilon_w \left\{ \left( \frac{T_g}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_w}{100} \right)^4 \right\} (W/cm^2) \dots (5.8)$$

ここに  $\varepsilon_g$ ,  $\varepsilon_w$  はそれぞれ気体および壁のふく射率であり,  $T_g$ ,  $T_w$ はそれぞれ気体および壁の温度である。上記の寸法を有する水冷壁 ダクト, セミホットウォールダクト の壁のふく射率をいずれも 0.4, 気体のふ く射率を 0.3 と仮定し,入口近傍および出口近傍のふく射損失を計 算すると,水冷壁ではそれぞれ 31 W/cm<sup>2</sup>, 16 W/cm<sup>2</sup>, セミホットウォー ルダクト ではそれぞれ 24 W/cm<sup>2</sup>, 9 W/cm<sup>2</sup> となる。したがってふ く射損失を考慮した全熱損失は,水冷壁 ダクト では入口近傍で 277 W/cm<sup>2</sup>,出口近傍で 134 W/cm<sup>2</sup>, セミホットウォールダクト では入口近傍 で 143 W/cm<sup>2</sup>,出口近傍で 43 W/cm<sup>2</sup> となり,水冷壁 ダクト と比べる と セミホットウォールダクト の熱損失は実に入口近傍で 52%,出口近傍で 32% であることがわかる。

#### 5.2 絶縁壁の電気的特性

水冷壁  $g_{2}$ トの場合には、4.1節に述べたように絶縁壁は互いに 電気的に絶縁されて固定されている水冷金属素子と、素子相互間の 絶縁を保つために間げきに充てんされた耐熱絶縁材とから構成され ている。しかしながら、この耐熱絶縁材は周囲から水冷銅素子によ って冷却されているため、その表面温度が低く、動作気体中に含有 される  $v_{-}$ ド材としての カリウムが化合物の形でその表面に付着して、 絶縁壁の絶縁抵抗劣化の原因となっている<sup>(D)</sup>。筆者らの実 験 では 実験中に  $K_2CO_3$ が絶縁壁の水冷銅素子の表面に付着し、実験後  $K_2CO_3$ が潮解して素子間に充てんされた アルミナセメットの内部に侵透 し、絶縁壁の絶縁抵抗が劣化することが判明した。

一方, セミホットウォールダクト では アルミナ 磁器が使用され, その表面 温度が 1,800 °K 程度に保持されるので,あとで述べるように アルミナ 磁器の気孔率が 0 に近い場合には,カリウム あるいは カリウム の化合物 の付着, 侵透はまったくみられず,きわめて良好な絶縁特性を有し ていることが判明した。

#### 5.3 電極の電気的特性

電極について問題になるのは電極の電子放射能と電極表面の境界 層における電圧降下である。 そこで水冷壁 ダクト では水冷銅, セミホ ットウォールダクト ではほう化 ジルコニウム 基材料をそれぞれ電極として使 用し, パッテリ を用いて外部から直流電圧を電極に印加して電気的特 性を測定した。

図 5.4 は水冷壁 ダクトの場合に、上流、中流、下流の電極につい

長時間運転用 MHD 発電 ダクトの実験的研究・森川・村井・小林



図 5.4 水冷壁 ダクト の電圧-電流特性 Typical V-I characteristics of water-cooled duct.



図 5.5 外部印加電界による セミホットウォールダクト 内の電圧分布 Potential distribution across semi-hot wall duct with applied electric field.

て電極間に印加される電圧と電極を流れる電流の関係を求めたもの である。図で曲線のこう配から動作気体の導電率を,また直線部分 の延長と縦軸との交点から電極降下を求めることができる。電極降 下は上流で 80 V,下流で 130 V という値を得ているが,これは抵 抗の大きい低温の境界層が上流から下流に向って発達しているため と考えられる。

上記の電極降下は MHD 発電機の内部抵抗となり, できるだけ小 さくすることは必要であるが, 実用規模の ダクト では誘起電圧に比 べて 1/50 程度となり,発電機の特性に及ぼす影響はかなり小 さ く なるものと考えられる。

電極降下の測定と同時に電流を流した状態の電極表面現象を観測 窓を通して観察している。すでに報告しているように<sup>(10)</sup>,水冷壁 <sup>ダ</sup>クト,セミホットウォールダクトのいずれの場合でも陰極表面には輝度の高 いスポットが出現するのに対し,陽極表面上にはこのようなスポット は全く観察されなかった。水冷壁 ダクトに用いられた水冷銅の陰極 表面上では、中心部で形成された1個のスポットが動作気体の流れ方 向に移動し、電極の下流端で消滅すると同時に電極の中心部で新し いスポットが形成されるという同期現象が観察された。これに対しセ ミホットウォールダクトに用いられたほう化 ジルコニウム 基材料の陰極表面上 には多数個のスポットが形成され、静止したままでその輝度だけが時 間的に変化するものと、動作気体の流れ方向とは関係なく比較的低 速で移動するものとが観察された。

以上のことから表面温度が低い陰極では1個の陰極点から,表面 温度が高い陰極では多数個の陰極点から電流が供給され,陽極では 表面温度に関係なく一様に電流が流入しているものと考えることが できる。したがって,セミホットウォールダクトでは水冷壁 ダクトと比較し て電極表面の利用率が高く,動作気体の実効導電率の点から有利で あるということができる。

以上に述べたように セミホットウォールダクト が水冷壁 ダクト に比べて熱的, 電気的にすぐれていることを示したが, 従来 セミホットウォールダクト の実用化の上で問題となっている諸点, すなわち耐熱衝撃性, 耐食性の問題に関する実験的研究について以下に述べよう。

#### 5.4 耐熱衝撃性

すでに述べたように セミホットウォールダクト の構成材料は耐熱衝 撃 性が良好でなければならない。そこで、図5.6 に示す耐熱衝撃性試験 ダクトを用いて、絶縁壁あるいは電極に用いられる材料の耐熱衝撃実験を行ないその特性を調べた。

試料は前記の発電 ダクトと同様に、それぞれ 0.4 mm の モリブデッの 薄板を介して取付金具にろう付けされ背面から水冷される。このよ うに構成された各試料は試験 ダクトの試料そう入口に試料の表面 が 試験 ダクト 壁と同一平面になるまでそう入される。試験 ダクト は水冷 構造で断面 70×25 mm, 長さ 300 mm の等断面積形 ダクトで、4 個



図 5.6 試験 ダクトの構造 Construction of test duct.

の試料そう入口と気体温度測定用の窓を備えている。実験は気体条 件が2,850°K,700 m/s である軽油燃焼気体を10分間ずつ断続的に 最高8回流して行ない,試料に過酷な条件を与えるために起動,停 止を可能な限り急激に行なった。試料は照射1回ごとに肉眼で詳細 に観察して クラックの有無,クラックの状態を検討した。試料への熱入 力は冷却水の流量と温度上昇とから求めた。

試料として材質,気孔率,寸法の異なる アルミナ 磁器,ほう化 ジル □ニウム 基材料を用意し実験を行なったので順を追って述べる。

アルミナ 磁器

試料の  $Al_2O_3$  含有量、気孔率がそれぞれ 95%、0% の場合、形 状寸法による耐熱衝撃性は次のとおりであった。すなわち、試料の 直径が 26 mm、 厚さが 10 mm の場合、2~3回の熱衝撃で 25 - 97が発生し、5~7回の熱衝撃で表面の一部が飛散した。

表面が 20×20 mm<sup>2</sup>, 厚さが 10 mm の場合, 4~5 回の熱衝撃で クラック が発生したが, 最高 8 回の熱衝撃でも破損することはなかっ た。

表面が 16×16 mm<sup>3</sup>,厚さが 6,10,14 mm の場合,どの試料にも 8回の熱衝撃では クラック は認められず,セミホット 形 ダクト の絶縁壁 材料として十分使用に耐えることが判明した。試料の Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含有量 が 92% の場合も上記の結果と顕著な差は認められなかったが,気 孔率が5%程度になると耐熱衝撃性が悪くなり,1~2回の熱衝撃 で クラックが発生し、3~4回で破損した。

(2) ほう化 ジルコニウム 基材料

試料としては ZrB<sub>3</sub>, 80 ZrB<sub>2</sub>-20 ZrO<sub>2</sub>, 80 ZrB<sub>3</sub>-20 YB<sub>6</sub> の気孔率 5, 15, 30%, 表面が 20×20 mm<sup>3</sup> で厚さが 10, 20, 40 のものが用い られた。いずれの材料も rルミナ 磁器と比べて耐熱衝撃性が良好で 8 回の熱衝撃では  $\rho$ 5- $\eta$  $\rho$  の発生が認められなかった。 試料の厚 さ が 10 mm の場合には比較的表面温度が低いために, 試料の表面はほと んど変化がなく, 酸化皮膜が形成されても薄くしかも表面に強固に 付着していた。試料の厚さが 20 mm になると, 気孔率 15% 以上の 80 ZrB<sub>2</sub>-20 ZrO<sub>2</sub>, 80 ZrB<sub>2</sub>-20 YB<sub>6</sub> の表面に, また厚さが 40 mm で はすべての試料の表面にもろい酸化皮膜が形成され, その一部がは がれて表面におうとつ(凹凸)を生じた。試料の厚さ, 気孔率が同じ 場合には, ZrB<sub>2</sub>, 80 ZrB<sub>2</sub>-20 ZrO<sub>3</sub>, 80 ZrB<sub>2</sub>-20 YB<sub>6</sub> の順に耐酸化性 が悪くなることが判明した。

#### 5.5 耐食性

気体温度 2,850 °K, 流速 700 m/s の動作気体に約 10 時間照射した 試料について,その形状,組成の変化を肉眼ならびに電子顕微鏡, X線回折,分光分析を用いて詳細に検討し,シード材に対する耐食 性を検討した。シード材が動作気体中に カリウムが 1 mol% 含有され ている状態で実験を行なった。以下に絶縁壁材料,電極材料につい て述べる。

(1) FUST 磁器

アルミナ 磁器は表面から 0.5 mm の深さまで灰色に変色していたが, カリウム による浸食は認められなかった。X線回折法による結果では, 表面から多量に MgO, MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> が アルミナ 磁器と カリウム との化合物 は検出されなかった。これは試料の気孔率が0 であること, 試料の 表面では カリウムの化合物が気体の状態であることなどがその原因と 考えられる。なお MgO, MgAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub> は燃焼室に内張りされているマ グネシア 円筒から蒸発した MgO の一部が試料表面に付着,あるいは 反応したものである。一方分光分析の結果では カリウムが検出された が, これは運転停止後冷気流を流した際に パーナの周辺に残留して

三菱電機技報・Vol. 43・No. 4・1969

いる未燃シード材が試料表面に付着したためと考えられる。

#### (2) ほう化 ジルコニウム 基材料

ほう化  $5_{\mu}$ コニウム 基材料の表面に形成された皮膜の主成分は  $ZrO_2$ であった。ただし、 $ZrB_2$  では単斜晶系のものが、 $80 ZrB_2-20 YB_6$ では  $YB_6$  の酸化生成物である  $Y_2O_3$  の安定化効果により立方晶系の ものが生成されていた。厚さ 40 mm の試料で、表面皮膜から  $ZrB_2$ が検出されたのは  $ZrB_2$ ,  $80 ZrB_2-20 ZrO_2$  であった。 このことはこ れらが  $80 ZrB_2-20 YB_6$  よりも耐酸化性が すぐれていることを示し ている。また  $80 ZrB_2-20 YB_6$  の表面皮膜の定量分析 (けい光X線) を行なった結果、 $ZrO_2$ ,  $Y_2O_3$  がそれぞれ 79 wt%, 15 wt% であっ た。 すなわち  $80 ZrB_2-20 YB_6$  がほぼ完全に酸化されて  $80 ZrO_3-10$  $Y_2O_3$  になっていることを示している。 カリウム は分光分析によれば かなり検出されたが、赤外吸収 による 分析結果からは  $K_2$ ,  $CO_3$ , KOH などは認められなかった。

#### 6. む す び

本稿では、従来実用 MHD 発電 ダクト として考えられてきた水冷 壁 ダクト と、水冷壁 ダクト の問題点を解決すべく筆者らが独自で開発 した セミホットウォールダクト の特性を実験結果を中心に比較しなが ら 論 じた。以上をまとめると

(1) 発電 ダクト 壁からの熱損失は本文中式(5.6),(5.7)を用い て十分推定することができる。セミホットウォールダクト では壁からの熱損 失は水冷壁 ダクト の場合と比較すると著しく減少し,実験では約65 % になった。またこの値は実用規模の発電 ダクト では 50~30% に なるものと推定される。

(2) セミホットウォールダクトの絶縁壁は、その表面温度が高温に保た れるため、水冷壁ダクトに見られるようなシード材などの付着による 絶縁抵抗劣化の現象が見られなかった。

(3) 水冷壁 ダクト では1個の陰極点から電流が供給されるの に 対して セミホットウォールダクト では多重の陰極点から電流が供給され る ことが観察の結果判明した。多重 スポット から電流が供給されること は、動作気体の実効導電率の低下を防止する効果がある。 (4) 筆者らが開発した セミホットウォールダクト は, 耐熱性, 耐食性 にもすぐれていることが実験の結果判明した。なお, この方式によ る壁構造は水冷構造が簡単化されているため大形化に適し, しかも 壁を薄く構成できるので印加磁界を有効に利用することができる利 点を有している。

最後に、本研究を行なうにあたり、セミホットウォールダクトの電極材料 を提供され、かつ燃焼実験を共同で実施された三菱金属鉱業(株)中 央研究所細田正氏および木村匡克氏、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に対し、また実験の実施にあ たりご協力をいただいた三菱重工業(株)神戸研究所の関係者各位に 対して厚く感謝の意を表します。

#### 参考文献

- Anthony A. M. and Fox M. : Proc. Int. Symp. MHD Electrical Power Generation, Salzburg, 3, 265 (1966)
- (2) Nagahiro A. et al. : Proc. Int. Symp. MHD Electrical Power Generation, Salzburg, 3, 349 (1966)
- (3) Novack M.E. and Brogan T. R. : ASME paper 63-WA-348 (1964)
- (4) Bugden W. F. S. et al. : Int. Symp. MHD Electrical Power Generation, Paris, paper 72 (1964)
- (5) Kessler R. and Eustis R. H.: 9th Symp. Eng. Aspect MHD 33 (1968)
- (6) John R. R. and Bade W. L. : ARS Journal 31, 13 (1961)
- (7) Rose P. H. et al. : J. Aero Space Science 25, 751 (1958)
- (8) McAdams W. H. : Heat Transmission, 3 rd Edition 225 (1954)
- (9) Mori et al. : Inl. Symp. MHD Electrical Power Generation, Warsaw, paper SM-107/91 (1968)
- (10) Sumida A. et al. : Proc. Int. Symp. MHD Electrical Power Generation, Salzburg, 3, 67 (1966)

# 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 官弘\*・田 中 稔\*\*・塚原 昌恭\*\*・永田 文也\*\*\*・小 村 明\*\*\*

# Central Control System of Gates for Onyu and Furikusa of Aichiyôsui Kôdan

Aichiyôsui Kôdan Fujio MATSUMOTO Sato kogyo Co., Ltd. Naoji FUJII Kurimoto Iron Works Ltd. Kôzô WADA Mitsubishi Elec. Corp., Kamakura Works Minoru TANAKA • Masayasu TSUKAHARA Mitsubishi Elec. Corp., Communication Equipment Works Bunya NAGATA • Akira KOMURA

Development and effective utilization of the water resources are indispensable undertakings in this country where abundant water power is scarcely available. Rational utilization of the resources can only be attained by employing a central control system. In this operation, if gate control stations scattered around are supervised from a central control station and "On-line-automatic conrol" is made by means of computers, central control of the highest grade is obtained.

This article describes outlines of a complete set of gate control equipment delivered to Onyu and Furikusa reservoirs of the Aichi Irrigation Public Corporation. These equipments are to carry out automatic central control with a supervisory control device using radio equipment of 70 MHz single wave and a digital computer.

#### 1. まえがき

計算機による水系制御は、今まで神奈川県企業庁向け相模水系計 算機 システム<sup>(1)</sup>,三重県企業庁三瀬谷道調 ダム 制御装置などを納入し たが、 このたび 昭和 43 年 3 月に豊川用水の一部である愛知用水公 団 大入および振草両頭首工に、ディジタル 計算機と VHF 無線装置に よる ゲート 集中管理制御装置一式を納入し運転を開始したので、 こ こにその概要をのべる。

#### 2. 計画 — 般

#### 2.1 豊川用水事業の概要

豊川用水事業は,豊川用水事業概要図,図2.1 に示すように, 天竜水系および豊川水系の水資源を高度に利用するため,愛知県東 南部すなわち東三河地方平野部と,渥美半島全域および静岡県湖西 町地域の農業用水・上水道用水・工業用水を確保するための多目的 総合開発事業である。本事業は昭和24年9月農林省により国営事 業として着工したが,昭和36年9月,事業を強力に推進するため, 愛知用水公団に引き継がれた。

この豊川用水の主水源は、豊川用水水源地概要図、図2.2 に示 すように、その主水源を、愛知県東奥三河地方に求め、天竜川本流 の電源開発佐久間 ダムから毎年5月から9月の期間に宇連 ダムの貯 水量との関連において、毎秒最大 14.0 m³/s、年間 5,000万 m³ の範 囲内で豊川用水佐久間導水路をへて豊川水系宇連川に導水するもの で、その取水施設と導入トンネルを建設した。

一方天竜川分水系の二河川すなわち,大入川と振草川からは後述 する複雑な利用計画のもとに,宇連 ダムに導入するため,大入頭首 工,振草頭首工,およびその導入トンネルを建設した。

他方,宇連川にもこれらの流域変更の流水を,自己の流域と合わ せて貯水するため コュンクリートタム を築造した。このようにして,他水





系から導入した流水を宇連川の大野頭首工から 幹線水路へ 毎秒 30 m³/s を取水する。 幹線水路は東西に分かれ, 東部幹線水路(毎秒 22.8 m³/s) は豊橋市東部を通り渥美半島を縦断して末端の伊良湖岬 まで,西部幹線水路(毎秒 7.2 m³/s) は豊川市を通って蒲郡市に至る。 その間,それぞれの幹線水路からは補助ため(溜)池,支線水路,配 水施設をへて 20,200 へクタール にもおよぶ地域に対し年間,農業用水 1.47 億 m³,上水道用水 4.5 千万 m³,工業用水 1.03 億 m³ を供給す るものである。また本事業は総事業費 488.8 億円により昭和 43 年 3 月完工した。この完成によって水田の補給,開田,開畑,畑地かん がいの導入など近代農業生産向上への期待は大きい。

#### 2.2 水源施設管理運用の特長

このように豊川用水事業は多目的総合開発事業でその施設は一応 完成を見たが、これからの水管理、運用面での期待にはさらに注目 すべき点が多い。これらの水源施設から末端配水施設まで広範囲な 水路組織の管理体系は愛知用水と並ぶ管理組織であり、全体が6づ ロックに分かれ、完全な専用ネットワークのもとにおかれている。中で も水源施設においては機械化システムの導入によって、各水門、水位、 流量の自動検出、またこれらのデータを電子科学応用による自動処 理、いわゆる集中的に総合運用することが計画された。中でも特に、 水源施設の大入頭首工、振草頭首工においては、その利水計画の複 雑性のために電子計算機による両頭首工の集中監視と遠方自動制御 方式を採用した。

#### 2.3 計算機システム導入の目的

大入, 振草両頭首工は 図2.2 に示すように, 他水系からの流域 変更である。これらの水利用は,大入川, 天竜川の発電用水, さら に天竜川下流の各種水利権者との合議によって得たものである。そ のため後述する複雑な利水制約がある。したがって,これらの合議 にもとづく運用の完全実施, 機械化 システムによる管理者の節減, 施 設の有効な活用など,水源地全体を検討する中でとくに大入,振草 においては電子計算機を中心とした制御 システムを導入し,常時自動 化,そしてこれを集中管理し,より高度の水利用と,合理的な運用 が計画実施された。

#### 2.4 大入頭首工,振草頭首工の取水計画

取水計画は図2.2の中で

(1) 大入頭首工は 2.61 m³/s を下流への 責任放流量として 優先 し,残り 5.0 m³/s を限度として大入 トンネル へ導水する。

(2) 振草頭首工においては、大入頭首工との関連によって15 m<sup>3</sup>/s を限度として下記条件により、振草トンネルを経て宇連 ダムに 導水する。

(a) 大入頭首工から導入しない場合(大干瀬流域のみ)

取水量= $\left\{(大干瀬川の流量) - 1.44 \text{ m}^3/\text{s} \times \frac{63.89}{72.64}\right\} \leq 15.0 \text{ m}^3/\text{s}$ 

(b) 大入頭首工から導水する場合(大入,大干瀬の流域を合わ せる場合)

取水量={(aの条件)+(大入頭首工からの導水量)}≦15.0 m³/s ただし,

1.44 m<sup>3</sup>/s:下流への責任放流量

63.89 : 現在地より上流に頭首工を計画したときの流域面積
 (取水の合議を行なった当初の頭首工計画地点流域面積)

72.64 : 現在地点の頭首工流域面積(計画変更後流域面積)

#### 3. 制御方式および電機設備

この ゲート 集中管理設備の特長は、出水時を除く平常時は大入, 振草両頭首工とも運転員を介さず,直接計算機による自動制御を行 なうこと,および大入頭首工が常時無人であり,一波の無線装置で 振草頭首工より遠方制御監視されていることである。ここに制御の 概要を述べる。大入および振草頭首工の平面図を図3.1,図3.2 に、振草頭首工の全景を図3.3に示す。また両頭首工一般数値を 表3.1に示す。

#### 3.1 機器の構成

図 3.4 に示すように本 システム は振草頭首工を 中央管理所とし, 大入頭首工を無線遠方制御するとともに,振草頭首工の制御も行な う。平常時は 2.4節の取水計画にもとずき 両頭首工とも定水位制 御することを主目的とし,出水時は 4.1.1項記載の制御を行なう。

この目的のため, 振草頭首工に, 流量調節 ゲートおよび油圧装置 ディジタル計算機, 無線遠方制御装置, 監視 グラフィックパネル, 大入・振 草用操作机, ゲート 制御装置, ゲート 機側盤, 木位・ゲート 開度検出器, AC 200 V 受電設備, 55 kVA 非常用 ジーゼル 発電機等を設け, 大入 頭首工には, 流量調節 ゲート 無線遠方制御装置, ゲート 制御装置, ゲート 機側盤, 木位・開度検出器, AC 200 V 受電設備, 55 kVA ジーゼル 発 電機を設けた。振草電源関係単線図を図 3.5, 振草管理室を図 3.6 に示す。

#### 3.2 制御方式

図 3.4 に示すように、本設備が公共的な設備であるので計算機, 遠方制御装置等が万一の異常時においても、ゲート操作が不能となら ぬよう種々の制御方式が可能となるよう考慮した。各種の制御方式 について述べる。



図 3.1 大入頭首工平面図 General plan of Ônyu reservior.

#### (1) 自動制御

計算機による自動制御で、計算機が時々刻々の水位、ゲート開度より4.1.1項の制御方針に基づき流量を算出してゲート開度指令を出し、その設定値指令と実際のゲート開度とをゲート制御盤内の比較





器で比較し、実際の ゲート 開度を設定値となるよう ゲート を操作する 制御方式。

#### (2) 設定値制御

計算機が ゲート 開度を設定する代わりに、 操作員が設定する制御



図 3.3 振草頭首工全景 Scenery of Furikusa reservior.

表 3.1 頭 首 工 一 般 数 値 General data of reservior.

	項			国	大入頭首工	报草顾首工
流	城	面	積	km <sup>2</sup>	75.57	72.64
平	水	<b>量 流</b>	虛	m³/s	2.61	1.44
月	平	均流	鼠	m³/s	6.7	6.3
月	平均	流量の	最 大	m³/s	10.0	9.1
月	最高	流量の	平均	m³/s	34.7	39.3
绖	最高	流量の	平均	m <sup>3</sup> /s	114.8	107.6
∄ŀ	画 最	大洪ス	ĸ量	m³/s	850.0	960.0
8†	画た	ん(湛) オ	k位	m <sup>3</sup> /s	514.00	250.50
計画	頃たんオ	く位時の賄	水量	m <sup>3</sup>	26,000	36,000
計回	順たんオ	、位時の	面積	m <sup>3</sup>	11,000	17,000



図 3.4 制御系統図

Schematic diagram of control system.



区 5.5 单 脉 按 视 因 (版 平) Skeleton diagram (Furikusa reservior).



図 3.6 中央管理室 Central control room.

方式で,(1)と同様,比較器により比較制御する。 ゲート 開度設定 器は大入,振草とも, 振草中央管理室設置の ゲート 操作机上にある。 (3) 手動制御

操作員が開度計を見ながら押しボタンにより行なうゲート遠隔手動 操作方式で,押しボタンは振草の場合同所のゲート操作机に,大入の 場合同所のゲート 制御盤に取り付けてある。

(4) 機側制御

ゲート 近傍の機側盤上の押し ボタン により ゲート を見ながら行なう 操作方式。

上記各制御方式は切換え スイッチ により任意選択できる。

本 システム の遠方制御に使用した無線装置は 70 MHz 1 波で ある ので送受信同時は不可能であり,送受信は切換えて交互に行なう。 したがって一般の遠方制御のように制御所から開度計を見ながら被 制御所の ゲート を開・閉制御することはできないので, 制御所(振 草)から被制御所(大入)の ゲート制御はすべて設定値として ゲート 開度を送り、大入側で前述のように比較器により設定値と実開度と を比較制御する方式を採用した。

#### 3.3 異常時の対策

異常時, 故障時に対する考慮は システム 構成上重要な ポイント の一 つである。本 システム で考慮した一例を記載する。

(1) 異常放水防止

本  $\nu_{2,5}$  は河川の水を  $f_{-}$  によりせき止めて取水するものであ るから、貯水している水を一度に大量に放流すれば下流に被害をお よぼす恐れもあるので運営上特に注意する必要がある。計算機には 4.1.2項に示すように多くの  $2_x f_{\mu} t f_{-}$  機能を持たせているほか、  $f_{-}$  の  $\nu_{-} f_{-} t$  上や吐け  $f_{-}$  にはとくに自 動および設定値制御中に  $f_{-}$  が設定時間 (30 秒に  $t_{-}$ )以上連続 開操作されれば  $f_{-}$  操作を一時  $u_{-}$  し警報する回路を設けた。

(2) 計算機, 無線装置異常時

計算機, 無線装置などが異常になれば, 直ちに ゲート 制御を中止 し、ゲートをその位置に保持するとともに警報するようにした。

(3) 停電時

大入,振草頭首工とも,非常用 ジーゼル発電機を備え,常に電源を 確保するよう計画されているほか,万一の電気的操作不能時でも ゲ ート は直接手動にて操作できるよう計画されている(6.3節, 7.5 節参照)。

3.4 グラフィックパネル

グラフィックパネル 外観を図 3.6 に示す。

本装置には、マン/マシンのインタフェースを行なうシステム全体の締め くくりとも言うべき重要な装置である。

パネル 上部は データ 表示,状態表示および データ 記録を行なう グラフ ィック 部であり,下部とびらの内部は信号変換部および電源盤を収納 している デコーダ 部である。

寸法 高 2,300 幅 3,400 奥 350

グラフィック 部 1,800×3,400

#### 3.4.1 デコーダ部

デコーダ部は、テレメータおよび計算機からのデータ信号(2進化10進符号)を受けて、ディジタル表示管を点灯しデータ表示するための純10 進符号に変換する装置である。耐久性を考え、また実装スペースを考 感して、ワイヤスプリングリレー によるデコーダ 回路で構成されている。純 10進符号に変換されたデータは上部の グラフィック部に送られる。

#### 3.4.2 グラフィック部

デコーダ部よりの10進データ信号によりグラフィック上のディジタル表示管を点灯しデータ表示を行なっている。グラフィックパネルはモザイク状になっていて190×55の基本パネルにより構成され、大入頭首工、振草頭首工の絵が書き込まれている。データはおのおの基本パネル内に収め、絵(グラフィック)上の所定の位置に配置されている。モザイク状にしたことによりデータ位置の変更、増設に簡単に対処できるよう考慮されている。

#### 4. ディジタル計算機

#### 4.1 ソフトウェア



-トを制御する。

この項では,前記の目的のために設置された MELDAP-8000 <sub>シス</sub> テムの機能について述べる。

#### 4.1.1 システムの機能

本 システム は大入・振草両頭首工を対象として,図4.1,図4.2 に示すように,

(A) 平常時においては

(1) 大入および振草両頭首工の水位を基準値に保ち,

(2) 放流 ゲート および魚道より下流への責任放流量を流し,

(3) さらに, 頭首工流入量が(2)により放流される量以上となった場合には, 各頭首工に設けられている取水 ゲートを介して, 流域変更用のトッネルに流入させる。

(B) 出水時においては

(1) 大入頭首工については土砂吐け ゲート, 振草頭首工について は洪水吐け ゲート を優先的に利用して流量制御する。

(2) 両頭首工への流入量が(1)による制御範囲以上になった場合には、大入頭首工については洪水吐け ゲート,振草頭首工について は土砂吐け ゲート を利用して流量制御する。

のごとき制御の内,(B)(2)項以外を自動的に行ない,加えて 両頭首工の管理状況は握と記録のため,次のような機能をもたせて いる。

(a) 日報作成 水位, 流量, 積算流量, 雨量

- (b) アナロク 記録 流域変更用 トュネル 流量
- (c) グラフィック パネル 表示
- 放流流量,流域変更用トッネル流量
   (d) リクエスト機能 操作員が MELDAP-8000 に対し各種の 指令を出す。

このような機能を遂行するための データ 収集方法としては、 テレメ -タ 制御装置に内蔵されている タイマー により,規定の周期(可変)で、 まず大入頭首工に ゲート 開度設定値が3回送出され, 続いて大入頭 首工の計測 データが3回受入れられる。次に振草頭首工の計測データ を収集し,振草頭首工の ゲート 開度設定値が送出される。

4.1.2 フェイル セイフ機能

本 システム では、自動制御状態の場合には、計算機により算出され た ゲート 開度設定値にしたがって、ゲート が直接制御されるため、万 一なんらかの理由により誤った結果が算出されると、下流に洪水な どの災害をひきおこす可能性がある。このような事故を防ぐため、 次のような チェック や処置を行ない、異常と判断された場合には ブザ - を鳴らし、操作員の介入を要求し、かつ ゲート 開度設定値は現状 を保持する。

- (1) 計測 データの上,下限 チェック
- (2) 算出された ゲート 開度設定値の上,下限 チェック
- (3) 算出された ゲート 開度設定値の変化幅 チェック
- (4) 計算の中間結果の チェック
- (5) MELDAP-8000 の動作 チェック

4.1.3 MELDAP-8000 導入のメリット

ディジタル 計算機を導入して水系集中管理制御を行なった場合に は, 従来の方法による場合に比較して,次のような著しい特長をもつ。 すなわち,

(1) 制御方式(制御計算式)の変更が, プログラムの変更により比較的簡単に行なえ,制御対象の特性と制御目的に合致した制御が実現できる。

(2) 前述の フェイル セイフ 機能の チェック 幅を オペレータ コンソール から変更可能にし、操作員の介入範囲を自由に選ぶことができる。

(3) 制御計算式の内,実測により実験的に決定する必要があり, かつ,経年的に特性が変化するものについては,折線近似を利用し た。この折線 データは リクエスト機能の一つである エンター データ にて容 易に変更できる。

(4) オペレータコンソール よりの リクエスト に よ り, 操作員の要求時 にはいつでも, 計測 データ, 計算結果, 出力設定値等の データ が読み

141	月	B

日 報

		振			草			大			х	
時間	上流水位	放水路水位	放水路流量	トンネル水位	トンネル流	量 積算流量	上流水位	放水路水位	放水路流量	トンネル水位	トンネル流量	雨量
	cm	cm	10 <sup>-2</sup> m³/s	. Cin	10 <sup>-2</sup> m <sup>3</sup>	/s 10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup>	.Cm	cm	10 <sup>-2</sup> m <sup>3</sup> /s	cm	10 ~2 m 3/s	mm
I							1					
				3	य 4.3	日報	Daily rep	ort.				

取れ, グラフィックパネルの表示装置が故障した場合においても システムの監視が容易にできる。

(5) データ収集,日報作成,状態監視等の労力が節減され,作業 能率は向上することはもちろんであるが,故障時あるいは,操作時 (オペレータコンソール)の時刻,操作内容がすべてタイプライタに自動印字 されるので,同時性のあるデータ収集が可能であり,かつ,操作記 録がすべて残されるため水系の集中管理の質的向上もはかることが できる。なお日報作成様式を図4.3に示す。

#### 4.2 ハードウェア

この システム に使用されている ディジタル 計算機 MELDAP-8000 は 磁気 ドラム (約8,000 語)を主記憶装置とする小形制御用計算機であ り、中央演算制御部のおもな仕様は次のとおりである。

回路素子	トランジスタ, スタティック 回路
語構成	数値語 2進21ビット
	命令語 操作部 8 ビット 番地部 13 ビット
命令	変形11/2 番地方式,基本23種
演算 モード	ノルマル, ディレイド, オペランド
記憶装置	磁気 ドラム 8,000 語 3,600 回転
演算速度	加减算 260 µs
	乗除算, 開平算 3,200 μs

上記主制御部に対し、各入力、出力部および電源装置が付加され

て,下記の計算機 システムを構成する。

#### 計算機 システム 構成

KERCO

中央演算制御装置					
(記憶装置,ディジタル入力・出力装置を含む)					
タイプライタ IBM Model-B 16 インチ	2台				
万能入出力装置 Teletype ASR-33 TC	1台				
オペレータコンソール	1台				
M-G 式 電源装置 出力 AC 100 V 3 kVA	1台				

#### 4.2.1 ディジタル入力装置 80 点 (実入力数 71 点)

リレー,スイッチ等の接点状態を読み取る装置であり,本システムにおいてはオペレータコンソール上からの各種データ設定,各種 リクエストなどの接点,グラフィックパネル上に表示されている各種ゲート開度,水位,リミットスイッチの接点状態を読み取る。

#### 4.2.2 ディジタル出力装置 60 点 (実入力数 58 点)

計算機から リレー 接点の ON 状態, OFF 状態にて 外部に信号 を送り出すものであり,本 システム においては オペレータコンソール 上の数 値表示器への出力 データ 信号,警報信号,および グラフィックパネル 上へ

の表示 データ 信号, グラフィックパネル からの データ 読み取りにおける デ ータ 選択信号などがある。

#### 4.2.3 アナログ出力装置8点(実出力数7点)

この装置は ソフトウェア 的には前述した ディジタル 出力と大差ない が, 外部に対しては ディジタル-アナログ 変換回路を使用 して アナログ 信号 と して出力している。信号内容は記録計を駆動する 0~1 mA の電流 信号,および ゲート 開度を制御する 0~10 V の電圧信号がある。ア ナログ出力信号は制御に使用されているために計算機の動作停止,計 算機側の電源断などによっても出力状態は変化を受けないこと(現 状維持)を目的として,アナログ 出力を決定している ディジタル 信号は 双安定形の水銀 リレーを使用している。

アナログ出力用の電源は ゲート 制御盤における 制御要素と 同一電源 を使用しており、計算機側とは切りはなされている。

#### 4.2.4 テレメータ送受信装置

テレメータ 装置と計算機とは互いに異なった周波数 で データ の 取 り 扱いを直列に行なっているが、この装置との間では両者とも 1 データ 単位に並列 データ 交換を行なっている。データ 交換の タイミング 合わせ は本装置より計算機に対する割込み動作指令、 テレメータ 装置よりの 計算機に対する割込み動作指令により計算機の動作を テレメータ 装置 側の動きに合わせている。

#### 4.2.5 タイプライタおよび万能入出力装置

2台のタイプライタ は定期的な データ の記録を行なう ロギング 用, お よび不定期な情報記録を行なう アナウンスメント 用に分けられている。 万能入出力装置は紙 テープパンチ, 紙 テープリード, プリントアウト 等の機能 を有しているが, 機械の耐久性能も考慮して プログラムオペレーション 用 のみに使用を限定している。

4.2.6 オペレータコンソール

計算機と保守員との情報な	を換の場であり	,下記要素を含んでいる	5,
投影卡粉庙主于黑	粉店 4 けた	励田尚伝1日を	

又形以就但我小商	新順キリバー 100世界111×1078
数値設定用 スイッチ	10進12けた
Jクエスト 選択 スイッチ	8進2けた
Jクエスト 選択表示器	20 種
その他操作 スイッチ	4 個

#### 5. 無線機およびテレメータ装置

#### 5.1 概 要

大入頭首工の ゲート 開度設定値伝送とともに,各種水位,ゲート開度,雨量の計測および機器の動作状態表示を行なっている。さらに



#### 5.2 方 式

#### 5.2.1 大入頭首工用

伝送路は 70 MHz 帯無線機であり、制御および計測を切換えて使 用している (図 5.1)。 振草局に タイマー を有し, 設定時間 (30 分ま で任意可変)ごとに計算機より設定値を受け大入局へ送出する。計 算機故障時の バックアップは ゲート 操作盤よりの手動設定により行なう。 大入局よりの データ送出は設定値受信後に行なわれる。 制御, 計測 符号とも雑音などによる受信不能を防ぐため、数回送出しており、 送出回数は タイマー により任意に変えられるよう設計した。

#### 5.2.2 振草頭首工用装置

同一構内であるのでケーブルによる直送方式をとっている。

5.3 仕 様

a,	装置名	屋		大入	振草
	制	御	ゲート 設定	4 <u>最</u>	6 <u>最</u>
	計	測	水 位	3 量	3 <u>最</u>
			ゲート 開度	4 量	6

	同童 1堂	 11,950
h Hul Stit-te-th	状態表示 9項目	目 11 項日
D. 制御方式	設定値間仰	
c. 計測方式	制御時計測	
d. 伝送速度	50 ボー	
e. 伝送符号	データ 番号,設定値,	データとも BCD
f. 符号方式	長短符号	
g. 符号検定	ワードパリティ,総数検	定
5.4 装置構成		
5.4.1 構 成		
(1) 大 入	木位および ゲート 開度	検出器 8個
	入出力架	1架(図5.2)
	テレメータ 架	1架(図5.2)
	無線機架	1架
(2) 振 草	テレメータ 架	1架
	検出器	9 個
5.4.2 各部説	明	
ブロックダイヤグラム そ	を図 5.3に示す。	
(1) 検出器		
(a) 水位計::	フロート を特殊 テープによ	り結合させ テ–プの長さを
スプロケット の回転角	に変換している。	
(b) スルースゲー	ト 用開度計:ゲート 本体	に テープ を取付け, テープ の
長さを上記木位計	と同じく回転角に変換し	している。
(c) 転倒 ゲート	用開度計:ゲート 軸の回	回転をそのまま使用してい
<b>ప</b> .		
(d) 雨量計:]	雨量1mm ごとにますカ	が転倒し接点信号を出し,
これを精算する。		
(2) ADC		
符号板と刷子に	より検出器の回転角を	ディジタル 符号に変換してい
3.		· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
(3) PSC		
ADC 出力。 設住	定値、接点信号等の並る	別情報を テータ 番号、 検定
符号をつけて直列	パルフ符号に変換する。	JIANE J J H J, DOC
(4) SEND		
PSC 出力を吝啬	周波数に変換する FS	変調器である。
(5) REC	MUX CZEY 0	
FS 亦調速た SP	C 入力への パリュ 符号)	
z Z Z A M I X Z OI		この後期の目的であ
30 (6) SPC		
古別 ぷっ が尽き	** トの並加が具いが協	1- <del>1-</del> Z
回クリ ハルス 付写る (7) DAV	- もこい 近別付方に変換	රට <sup>6</sup> 0 ද
RCD ACTION DAY	. 0. 10 V の毎日に対な	a-ナ- Z
ロシロ 亚列行方を	: い~10 v の电圧に変換	€ງ ພ <sub>0</sub>
(0) 無線機	1 <sup>8</sup>	1 man and the second
/UMHz 帯の全	トランシスタ 1ビ テレメータ 月 イ・・・・・	1 無線機で,小形かつ消費
電刀を非常に少な	くしている。	
つつ その111		

5.5.1 他装置との信号授受

- (1) 設定値入力(計算機出力→テレメータ)
- デ−タ 並列,項目ごと直列の BCD 3 けた符号電圧受け
- (2) 設定値入力 (ゲート 操作盤→テレメータ)
- 並列 BCD 3 けた符号電圧受け
- (3) 設定値,計測出力(テレメータ→ゲート制御盤)

#### 0~10 V の ァナログ 電圧

(4) 計測出力(テレメータ→計算機)

データ並列,項目ごと直列の BCD 3 けた符号電圧渡し

5.5.2 通話

振草 ゲート 操作盤・テレメータ 架と、大入無線機架・テレメータ 架間は もちろんのこと、大入の無線機架と テレメータ 架間でも通話可能にし てある。

#### 6. 大入頭首エゲートおよびゲート操作機構

本 ゲート は本来の特長をより良く発揮させるために, その構造お よび性能に種々の考慮を払い設計した。

谷ゲートの設計仕様を表 6.1 に示す。

なお表 6.1 のほか,排砂ゲート1門を設置したが,ゲート制御には 直接関係がないので省略する。

6.1 ゲートの構造

6.1.1 洪水吐けゲート

本 ゲート は上流側に スキンプレート を配した両張出ばり式台形箱げた 断面形状を採用した。そのため スキンプレート については、けたの応力 のほかに、スチフナ を有する板が直接水圧により生ずる応力を算出し て、同方向の合計を許容応力内におさめた。

巻上げ時のゲートに働く水重および巻下げ時の浮力を防止するた め腹板には十分な注排水口および空気穴を設け、さらに据付と点検 用の人穴を備えた。

6.1.2 土砂吐けゲート

ゲートは主けた2本により全作用水圧に抗せしめ土砂吐き出しを 考えてその構造は簡潔にした。不自然な突起部を設けないで、特に ゲート下部において止水ゴム背面に導流板を設けた。

また, ゲート 背面には メーンローラー 点検用の タラップ を設けて, 給油 点検が安全にできるようにした。

6.1.3 取水ゲート

本 ゲート は作用水圧を主横けたで受け持つような構造とし、止水 方式は前面 4 方止水方式であるが、ゲート上部は波浪止め程度と考え、 その止水方式は止水木とした。このことは止水 ゴムを使用する場合 よりも機能上安全性が高いと判断したからである。また ゲート 下部 には本 ゲート が部分開放取水を行なう場合を考えて止水 ゴム 前面 に 導流板を設けた。

<i>7</i>	' — ŀ	名利	F	洪水吐け	土砂吐け	取水ゲート	放流ゲート	トレイル
形		疘		非越流形 鋼製ローラー ゲート	非越流形 鋼製ローラー ゲート	非越流形 鋼製ローラー ゲート	非越流形 鋼製ローラー ゲート	非越流形 鋼製ローラー ゲート
純	径	間	m	20,0	6.0	3.0	1.5	2.0
22	ドら(扉)	)高	m	3.8	4.3	2.4	2.0	2.1
設	置	数		1	1	1	1	1
設	計 水	深	m	3.8	4.3	2.4	1.7	2.1
± 1	砂堆積	高	m		0.4		—	
操	作水	深	m	3,8	4.3	2.4	1.7	2.1
水	密 方	式		前面3方	前面3方	後面4方	前面3方	後面4方
揚		程	m	7.5	8.0	2.4	4.2	2.1
閉	用速度	m/r	nin	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
開	閉	機		電動,手動	電動,手動	電励, 手動	電動,手動	電動,手動
操	作方	式		機倒, 手動 設定値, 一	機倒, 手動 設定値, 自動	機側, 手動 設定値, 自動	機側, 手動 設定値, 自動	機(雨, 手動

表 6.1 大 入 ゲート仕 様 Specification of Ônyu reservior.

6.1.4 放流ゲート

本 ゲート は作用水圧を主横けたで受け持つような構造とし,止水 方式は前面 3 方止水とし,流量制御が完全にできる ゲート 構造にした。

6.1.5 トンネル入口ゲート

本 ゲート は作用水圧を主横けたで受け持つような構造とし、 止水 方式は後面 4 方止水とし、 本 ゲート は部分開放として使用されるに 便なるように取水ゲート と同様にゲート 下部に導流板を設けた。

6.2 各ゲートの共通事項

(1) 主けたのたわみ

主けたのたわみは、本工事の各 ゲート はいずれも止水 ゴム を使用 しており、その水密性は前面の作用水圧を利用してその接着押圧力 を増す方式としているので、ゲート たわみによって悪影響を受けるこ とはないので、そのたわみ度は 1/800 以下とした。

(2) メーシローラ および ブッシュ

メーンローラ は各 ゲート 共4 点支持とし,全水圧荷重が均等に配分されるように配置した。

(3) サイドローラ

ゲート はすべて両側部に 2 個の サイドローラ を設け ゲートの 昇降に 安 全性を期した。

(4) 戸みぞ(溝) グループの大きさ

 $f_{-+}$ の <sub>メーンローラ</sub>の取付けは  $f_{22}$ 軸を片持ちはり(梁)とし、戸み ぞ  $J_{\mu--}$ つ大きさを 小さく 採るようにし水理条件にも できるだけ 支障のない構成とした。

(5) 戸当たり金物および止水ゴム

戸当たり金物はゲートと相関連して、その水密を高める重要な要素となるもので、その設計に当たっては本河川に適応するよう十分 剛性を有するものとした。また止水ゴムは水流にさらされることな く原則として戸みぞグループ内に納まるように考慮するとともに、そ の点検・取りはずしに便なる構造とした。

止水 ゴムのしゅう動面は SUS 27 材を使用しその水密性の完全性 を期した。

6.3 巻上機の構造

巻上機は ピヤー 上に設置し、 戸みぞ内に滑車を介して巻上げを行 なう強制平衡つり上げ方式とした。

本形式は強制的に左右の均衡を保持するものでワイヤーロープは点 検修理に便利であり、また流水に洗われないようにひ(扉)体下流側 に設けたロープカバー下を通す構造とした。また巻上機がなんらかの 原因による過負荷の場合に備え、巻上機ベース上に過負荷防止装置 を設け、自動的に巻上げを停止する構造とした。

巻上機の ドラムは2本の ロープを両端より巻取りして, ゲートを巻 上げる形式とした。滅速機構としては平歯車およびウォーム 減速機を 介して ブレーキ 付き電動機で運転する方式とした。

また電動機軸付近の切換え クラッチを切換えて,手動昇降操作がで きるようにした。この手動操作時には リミットスイッチの働きで電動用 電源が ロック され安全に手動操作できる構造とした。

巻上機は整備点検が容易にできる構造とし、効率が良く十分な安 全率を持つ堅牢な構造とした。

#### 7. 振草頭首エゲートおよび圧油制御機構

本頭首エ ゲート は河川状況, 使用目的,水理性,経済性等を考慮 して表 7.1 に示す仕様の設備とした。
		1	1	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	
ゲー	卜名称	洪水吐けゲート	土砂吐けゲート	取水ゲート	放流ゲート
形う	式	越流形 鋼製転倒ゲート	非越流形 鋼製ローラーゲ - ト	非越流形  鋼製ローラーゲ  ート	越流形 鋼製起伏ゲート
純 径 阝	ն] m	25.0	6.0	3.0	2.0
有效。	高 m	2.5	4.3	2.6	2.0
設置養	敗	1	1	1	1
設計水道	榮 m	2.5	4.3	5.5	2.0
土砂堆積高	高 m	-	1.5		-
操作水浴	榮 m	転倒時起立時共 2.5	4.3	2.6	転倒時起立時共 2.0
水密方式	đ.	前面三方	前面三方	後面四方	前面三方
揚毛	22	起伏角度 75°	9.6(m)	2.6(m)	起伏角度 75°
開閉速』	L m/min	20~30	0.3	0.3	20~30
開閉机	٥J	油圧式	油圧式	油圧式	油圧式
操作方式	et.	機砌, 手動 設定値, 自動	機側, 手動 設定値, —	機倒, 手動 設定値, 自動	一, 手動 設定値, 自動

表 7.1 振 草 ゲート 仕 様 Specification of Furikusa reservior.

なお表 7.1 のほか排砂 ゲートを1門設置したが ゲート 制御には直接関係がないため省略する。

7.1 洪水吐けゲート

ひ体は図7.1 に示すように上部箱けたおよび下部けたを配し, その前面にスキップレート12mmを張り堅牢な一体とした。ひ体背面の シリンダー支承部にはインボリュート曲線を有するローラーガイドを設け、ラ ムの直線運動に対しラムに曲げモーメントが作用しない構造とした。 開閉機は背面を3本の油圧シリンダーで支持する構造とし、万一堆砂 がはなはだしく完全転倒を妨げられてもひ体に不測の荷重がかかる ことなく、ラムだけで自重で下がるようラム式シリンダーとし、ひ体 とは結合しない方式とした。

7.2 土砂吐けゲート

土砂吐け ゲート は非越流形 プレートガーター 構造とした。 主横けたを 3本配し下部けたを極力上げ,切上げ角度を大きくとるとともに下 端の リップ 部の幅を小さくし,射流による ダウン プル および振動を防 ぐよう考慮した。メインローラー は片側 2 個計 4 個とし巻上荷重を少な くすることにより,シリンダーピット内に垂直に納めうるよう ローラー 軸 受は ローラーベアリング を使用した。

巻上機は ラム 式油圧 シリンダー をえん(堰) 柱内に垂直に格納する 形式とし頭首工全体の美観をそこなわないようにした。

7.3 取水ゲート

取水 ゲート は プレートガーター 構造とした。 スキップレート を背面に配した構造であるため,とくに ダウッ プル に留意し 下端の 切上げ 角度を



図 7.2 放流ゲート外形図



45° とした。メインローラー 軸受は土砂吐け ゲート 同様 ローラーベアリング を 用い オイルシール により軸受部の水密を保つ構造とした。

巻上機は 5ム 式油圧 シリンダー を用い, 土砂吐 ゲート けと同様横置 式 シリンダー を3門分を一室とした シリンダー 室に格納する形式とした。 7.4 放流ゲート

放流 ゲート は放流量を調整するためのゲート であるが,そのために は アンダーフロー より オーバーフロー で制御するほうが 微調整が 容易であ るため起伏 ゲート を採用した。

ひ体の構造は円筒横主けたおよび縦けたをもって組み,その前面 に スキンプレート 8 mm を張り一体とした。

駆動方式は油圧 シリンダー により、ひ体回転軸をよじる方式とし、 円筒けたと回転軸との伝達は リーマボルト によるものとした。

油圧 シリンダー は右岸側 ピヤー 内に シリンダー 室を設け, その内に格納し, アームを介して回転軸をよじる機構とした。 その 構 造 は 図7.2 に示すとおりである。

7.5 油圧制御機構

前述のとおり排砂 ゲートを除く各 ゲート はすべて油圧式とし,その 油圧制御機器は遠方操作室に設置した。

油圧 ポンプ は高圧 ベーンポンプ とし、その容量は洪水吐け ゲート、土 砂吐け ゲート および取水 ゲート (3門)を同時操作可能なものとした。 電動機は所要計算出力の 50 %以上の余裕を見込 み、予備発電機 の容量低減を計るため スター デルタ 起動方式とした。



Outline of outlet gate.



図 7.3 圧 油 系 統 図 Pres

Pressure oil system.

油圧回路は図7.3に示すとおりであが, とくに 次の点に留意して設計した。

(1) ポップ運転の指令により油圧ポップが運転した場合,所定油 圧まで上昇したことを確認した後 ソレノイドバルブが作動し,上昇しな い場合警報を発する回路を設けた。

(2) 開閉速度の調整が容易なよう,圧力補償は流量調整弁を開 閉共通で1個とし,図のような ブリッジ 回路とした。

(3) 油圧 ユニット 出口に補修用 ストップバルブ を設け, 油圧 ユニット 点検修理時にも ゲート はその状態を保持できるようにした。

(4) パイロットチェックバルブ に パイパス 回路を設け、ポップ 電動機また は電気制御回路故障時に洪水が発生しても無動力で洪 水 吐 け ゲート の転倒, 取水 ゲート の下降が可能な回路とした。

(5) 同様に土砂吐け ゲート および放流 ゲート については手動 ポン うを併置し、これにより上昇可能なよう考慮した。

#### 8. む す び

愛知用水公団大入および振草頭首工に納入した ディジタル 計算機お

よび VHF 無線装置による ゲート 集中管理制御装置一式について, その概略をのべた。

今回納入した ゲート 集中管理制御装置一式は, ゲート 制御所 2 個所, ゲート 数も 10 門の小規模なものであったが, 今後ますます水資源開 発の規模も大形化し, 制御方式も複雑化され, それに伴い集中管理 制御に使用される計算機および遠方制御装置も大形化・高級化され る傾向にあるが, 基本的にはここに記述した装置, 方式の展開およ びその応用であるので,本文が今後の水系制御の計画に対しなんら かのご参考になれば幸いである。

最後に本工事に際して多大の援助と協力を賜わったかたがたに対 し深く感謝する次第である。

#### 参考文献

(1) 城所ほか:三菱電機技報, 41, No. 5, (昭42)

UDC 539. 1. 076 : 621. 384. 6

# 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 (I)

高木高志\*·水野謙一\*

Charged Particle Trajectory and Potential Distribution in a Flat Disk Type Acceleration Tube and Einzel Lens  $\ (\ I\ )$ 

Central Research Laboratory Takashi TAKAGI · Kenichi MIZUNO

Multi stage acceleration tube is in many cases used for electro-static type accelerator, particularly for V. D. G. type accelerator. In connection with this description is made on the techniques of numerical calculation for potential distribution and charged particle trajectory necessary for the elucidation of lens action in the injection region of the tube and also on the results of calculation.

As an application of these techniques calculation is made on the focussing action of Einzel lens that is a kind of focussing lenses so as to obtain data to be used in general for focal length and the like, brief explanation being made as follows.

In (I) of this issue are given the calculation techniques on the potential distribution and the results obtained, and (II) will cover the charged particle trajectory.

#### 1. まえがき

現在, 静電形加速器において多く用いられている加速管は, いわ ゆる多段形といわれているもので, 加速管内の電界が加速軸に平行 であり, 強度も分布が一様になるよう電極を多段式に構成したもの である。一度管内にはいった荷電粒子は, この一様電界にて軸方向 に加速されるだけであると,考えられる加速管だとも言える。した がってこの種加速管の荷電粒子に対する収束作用は, 加速管入口お よび出口における電界のみだれのみが一議的にきくことになる。特 に, 加速管への入射時, すなわち粒子の低 エネルギー時点にては, 入 口近傍における電界のみだれは,その後の荷電粒子軌道に大きな影 響をもつのである。多段形加速管のレッズ 設計の基本は, したがっ て, 次の原理式に基づく

(入射域のレンズ作用)×(一様電界での加速作用)

> $\frac{1}{f} = \frac{E_1 - E_2}{4\zeta V}$ .....(1.2)<sup>(1)</sup> f : 焦点距離 V : 電極電圧 (粒子電圧) $\zeta : 補正因子$

式(1.2)は、非常に荒い近似式であり、穴の形状、大きさによって大きく異なる補正因子 (の算出には慎重を要する。

 $g_{\nu}F_{\Delta}$  形 V, d, G のように発生負  $4\pi_{\nu}$  を 高圧電極内にある  $\pi_{\nu}$ J<sub>ッ</sub>パ- 細管 (約5 mm $\phi$ ×800 mm) に 7 m 先からねらって入れ る に は、この  $\nu_{\nu}$  作用を厳密に求める必要がでてくる。 この要求から、 入射域の電位分布の形状およびその中に、各種の条件で荷電粒子を 入射したときの,粒子の軌道運動を電算機を用いて求めた。入射域 であるため非相対論取扱いに限定し,また,空間電荷の存在は無視 したものであるが,得られた結果は,設計値として重要な役割をは たした。また,電位分布および軌道運動の電算機において求める手 法は,加速管ばかりでなく,静電収束レンズで一般に適用できる。 ここでは Einzel Lens において適用したので,その計算例をのべる。 これらの結果はさらによく整理された形で,設計データとして,は ん(汎)用できるものとなっている。Einzel Lens は,加速管入射域 のレンズ作用と荷電粒子源との結合に最も重要な Lens であり,構 造の簡単さと収束性の良さのために,広く用いられている静電形収 束レンズである。その反面,特性はあまり良く解析されておらず,実 際の設計にあたり,データ不足が目だっている。ここで述べる計算に よって,かなりのはん用性ある結果が一応でた。特殊な場合におけ る値も,この結果から類推することも可能である。

この種の数値計算は一般に時間ばかりかかって, ……と言うこと になっているが, ここでの方法は, かなり経済的な手法であったこ とを付言しておく。

ページ数の関係上本号に全部掲載できないので,来月号に荷電粒子の軌道について述べることとし,本号では,電位分布の計算法とその結果について述べる。

#### 2. 電位分布の計算

2.1 Laplace 方程式の差分式

加速管内の電位分布 φ は,空間電荷による影響を 無視 す れ ば, Laplace の方程式 (2.1) で表わすことができる。

加速管の加速中心軸を z 軸とする円筒座標 ( $z, r, \theta$ ) を設定すれ ば式 (2.1) は式 (2.2) となる。

加速管の電極構造は、z軸を中心軸とする対称構造であるため、 内部の電位分布  $\phi(z, r, \theta)$  も軸対称分布であると考えられる。



-





したがって、 $\phi$ は (z, r) 方向のみの関数であり、式 (2.2) も式 (2.3) のようになる。

式 (2.3) が、とこで問題にする偏微分方程式である。一般に、式 (2.1) で表わされる偏微分方程式は、 だ円形偏微分方程式であるの で、 解は境界値問題として得られる。

加速管の解くべき領域に (z, r) 面を置き, その面上で特定の境 界を設定するが, この場合, z 軸が一つの境界である。この境界で は, 電場は z 方向のみに存在し, r 方向には存在しない。電位分布 がこの軸に対称だからである。すなわち, z 軸方向の電位分布は次 の偏微分方程式で表わせる。

式 (2.3) および式 (2.4) を電子計算機で数値計算をするのに,一 般のだ円形の場合によく用いられる方法を使用した。これは,境界 内に平面格子を作り,その各格子点上での偏微分方程式,式 (2.3) 式 (2.4) を差分式で表わし,それによってできる連立方程式を解く 方法である。この連立方程式の元は格子点の数と等しい。連立方程 式を解く方法は種々あるが,電子計算機に最も便利な方法,すなわ ち反復法を用いることにした。

境界内部に図 2.1 のように,平面格子を形成した場合,各格子点 上での式 (2.3) 式 (2.4) に含まれる徴分の差分式は次のようになる。

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} \end{pmatrix}_{i,j} = \begin{pmatrix} \frac{\phi_{i+1,j} - \phi_{i,j}}{\Delta z_2} - \frac{\phi_{i,j} - \phi_{i-1,j}}{\Delta z_1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{2}{\Delta z_1 + \Delta z_2} \end{pmatrix} \dots \dots (2.5)$$

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} \end{pmatrix}_{i,j} = \begin{pmatrix} \frac{\phi_{i,j+1} - \phi_{i,j}}{\Delta r_2} - \frac{\phi_{i,j} - \phi_{i,j-1}}{\Delta r_1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{2}{\Delta r_1 + \Delta r_2} \end{pmatrix} \dots (2.6)$$

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial \phi}{\partial r} \end{pmatrix}_{i,j} = \begin{pmatrix} \frac{\phi_{i,j+1} - \phi_{i,j-1}}{\Delta r_1 + \Delta r_2} \end{pmatrix} \dots (2.7)$$

ただし、ここで Az、Ar は図 2.1 で定義された格子間距離である。 境界内に取るべき平面格子を設定すれば、Ar、Azの値は決まる。

式 (2.3),式 (2.5),式 (2.6),式 (2.7)より (i, j)点における 電位  $\phi_{i,j}$ は相となる4点での電位  $\phi_{i-1,j}$ , $\phi_{i+1,j}$ , $\phi_{i,j-1}$ , $\phi_{i,j+1}$ によ り次のように表わされる。r=Rとし,Rはiおよびjにより変わ る。

$$\phi_{i,j} = \frac{1}{\varDelta z_2(\varDelta z_1 + \varDelta z_2)} \frac{1}{\left\{\frac{1}{\varDelta z_1 + \varDelta z_2} + \frac{1}{\varDelta r_1 + \varDelta r_2}\right\}} \phi_{i+1,j} + \frac{1}{\varDelta z_1(\varDelta z_1 + \varDelta z_2)}$$
$$\frac{1}{\left\{\frac{1}{\varDelta z_1 + \varDelta z_2} + \frac{1}{\varDelta r_1 + \varDelta r_2}\right\}} \phi_{i-1,j} + \left\{\frac{1}{\varDelta r_2(\varDelta r_1 + \varDelta r_2)} + \frac{1}{2R(\varDelta r_1 + \varDelta r_2)}\right\}$$

$$\frac{1}{\left\{\frac{1}{\varDelta z_{1}+\varDelta z_{2}}+\frac{1}{\varDelta r_{1}+\varDelta r_{2}}\right\}}\phi_{i,j+1}}$$
  
+ 
$$\left\{\frac{1}{\varDelta r_{1}(\varDelta r_{1}+\varDelta r_{2})}-\frac{1}{2R(\varDelta r_{1}+\varDelta r_{2})}\right\}\phi_{i,j-1}$$
.....(2.8)

2.2 多元連立方程式の解法 (Accelerated Liebmann 法) 一般に、二次元における Laplace 方程式、式 (2.9) を格子点での 差分方程式でかくと、式 (2.10) のような多元連立方程式となる。

 $V^{2}\phi=0$  (2.9) 4 $\phi_{i,j}-\phi_{i-1,j}-\phi_{i,j-1}-\phi_{i+1,j}-\phi_{i,j+1}=0$  (2.10) 式 (2.10) をかきかえると、

となるが,反復法では式 (2.11) の右辺の すべての 値に第 k 近似を 入れて,左辺の値の第(k+1)近似をうるのである。すなわち

となる。この方法は簡単であるが誤差の小さい解をうるには、反復 の回数 k を大きな値としなければならない欠点がある。そこで、H. Liebmann は式 (2.12) における  $\phi_{i-1,j}$  および  $\phi_{i,j-1}$  の値、すなわ ち四格子点のうち、 $\phi_{i,j}$ のすぐ手前の二つに対し、計算されたばか りの第 (k+1) 近似値を直ちに使用することを考えた。すなわち、

とする反復法である。

この方法は式 (2.12) の方法に比べて解の 収束は早く, したがっ て反復回数が少なくてすむという利点がある。しかし, 格子点の数 が増加すると, この方法でも収束が非常におそくなってくる。たと えば, く(矩)形領域で各辺を *I*, *J* 分割した場合, *e* けたの精度で 解をうるのに必要な反復回数 *N* は, 式 (2.14) で与えられると言わ れている。

式 (2.14) からの推定では、格子間隔をhとすると、Nは $h^{-2}$ で増加する。また、式 (2.13) で与えられる方程式の数は $h^{-2}$ で増加するので、計算の数は全体として $h^{-4}$ で増加することになる。これが収束をおそくする理由である。

これを改良したのが, いわゆる加速 Liebmann 法 (accelerated Liebmann 法, extrapolated Liebmann 法) である。次のような方 法である。

式 (2.13) で与えられる Liebmann 法を, k 次での残差 R<sup>k</sup><sub>i</sub>; すな わち

 $R_{i,j}^{k} = \phi_{i,j}^{k+1} - \phi_{i,j}^{k}$ =  $\frac{1}{4} (\phi_{i-1,j}^{k+1} + \phi_{i,j-1}^{k+1} + \phi_{i+1,j}^{k} + \phi_{i,j+1}^{k}) - \phi_{i,j}^{k} \cdots \cdots \cdots \cdots (2.15)$ 

で表わすと式 (2.16) になる。

に修正した方法である。

解の収束を最もよくするには,式(2.11)を行列表示した式(2.18) の行列 M の最大固有値  $\lambda_m$  によって式 (2.19) により計算される  $\beta$ を使うとよい。

597

$$\phi = M\Phi \qquad (2.18)$$
  
$$\beta = 2(1 + \sqrt{1 - \lambda_m^2})^{-1} \qquad (2.19)$$

式 (2.19) で得られるβの値は一般に,

二次元平板の場合,

三次元平板の場合,

$$\beta = 2 - \sqrt{2} \left\{ \left( \frac{\pi}{I-1} \right)^2 + \left( \frac{\pi}{J-1} \right)^2 + \left( \frac{\pi}{K-1} \right)^2 \right\}^{1/2} \dots \dots (2.22)$$

円筒座標(回転対称)

ただし, *I*, *J*, *K* は各次元での格子の分割数である。加速管の場合の β は, 式 (2.23) に, *I*=160, *J*=55 を代入すれば,

j=1のときは $\phi_{i,j+1}^{(k)}=\phi_{i,j+1}^{(k)}$ として式 (2.25)を用いる。

加速管の場合,各格子点での電位の計算の方向は,図2.2 に示 すように右端(*i*=2)から下(円筒軸)より上(*j*の増加する方向) へ計算を進め、上限に達すると、*i*=3の線上に沿って、下から上 へ計算を進める。これをくり返して、左へ(*i*の増加する方向)計算 を進める。

## 2.3 加速管の場合

## 2.3.1 差分式

加速管については 図 2.2 のような Geometry の第 1 段のみを考 えて計算を進める。軸方向の格子間隔は  $1 \leq i \leq I_0$  では  $\lambda$  とし  $I_0 \leq i$  $\leq 160$  では  $2\lambda$  とする。半径方向の格子間隔は  $1 \leq j \leq J_0$  では  $\lambda$  とし  $J_0 \leq j \leq 55$  では  $2\lambda$  とする。 $\lambda = 0.5$  mm とした。式 (2.25) を用いる と、各領域における差分式は次のようになる。

(1) 
$$i < I_0, j < J_0 \ (\hbar c \hbar c \ c \ j \neq 1)$$
  
 $\exists r_1 = \lambda, \ \exists r_2 = \lambda, \ \exists z_1 = \lambda, \ \exists z_2 = \lambda \ \hbar c \ j > b$   
 $\phi_{l,j}^{(k+1)} = \frac{\beta}{4} \left\{ \phi_{i-1,j}^{(k+1)} + \frac{(2j-3)}{2(j-1)} \phi_{l,j-1}^{(k+1)} + \phi_{i+1,j}^{(k)} + \frac{(2j-1)}{2(j-1)} \phi_{l,j+1}^{(k)} \right\}$ 



$$\begin{array}{ll} (6) & i = I_0, \ j > J_0 \\ & \varDelta r_1 = 2\lambda, \ \varDelta r_2 = 2\lambda, \ \varDelta z_1 = \lambda, \ \varDelta z_2 = 2\lambda \ \not \subset \not \supset \not \supset \not \supset \\ & \phi_{i,j}^{(k+1)} = \frac{2}{3}\beta \bigg\{ \frac{2}{3}\phi_{i-1,j}^{(k+1)} + \frac{2j - J_0 - 2}{4(2j - J_0 - 1)}\phi_{i,j-1}^{(k+1)} + \frac{1}{3}\phi_{i+1,j}^{(k)} \\ & \quad + \frac{2j - J_0}{4(2j - J_0 - 1)}\phi_{i,j+1}^{(k)} \bigg\} - (\beta - 1)\phi_{i,j}^{(k)} \quad \dots \dots \dots (2.31) \end{array}$$

- (9)  $i>I_0, j>J_0$  $\varDelta r_1=2\lambda, \ \varDelta r_2=2\lambda, \ \varDelta z_1=2\lambda, \ \varDelta z_2=2\lambda$  だから

$$\begin{split} \phi_{i,j}^{(k+1)} &= \beta \bigg\{ \frac{1}{4} \phi_{i-1,j}^{(k+1)} + \frac{2j - J_0 - 2}{4(2j - J_0 - 1)} \phi_{i,j-1}^{(k+1)} + \frac{1}{4} \phi_{i+1,j}^{(k)} \\ &+ \frac{2j - J_0}{4(2j - J_0 - 1)} \phi_{i,j+1}^{(k)} \bigg\} - (\beta - 1) \phi_{i,j}^{(k)} \quad \dots \dots \dots (2.34) \end{split}$$

- (10)  $i > I_0, j=1$   $\varDelta r_1 = \lambda, \ \varDelta r_2 = \lambda, \ \varDelta z_1 = \lambda, \ \varDelta z_2 = \lambda \ \overleftarrow{r} \in \overleftarrow{\mathcal{P}} \xrightarrow{\mathsf{P}} \overleftarrow{\mathcal{P}}$  $\phi_{i,1}^{(k+1)} = \frac{\beta}{4} \left\{ \phi_{i-1,1}^{(k+1)} + 2\phi_{i,2}^{(k)} + \phi_{i+1,1}^{(k)} \right\} - (\beta - 1)\phi_{i,1}^{(k)} \dots (2.35)$
- (11)  $i = I_0, j = 1$   $\varDelta r_1 = \lambda, \ \varDelta r_2 = \lambda, \ \varDelta z_1 = \lambda, \ \varDelta z_2 = \lambda, \ \breve{\mathcal{L}} \overset{*}{\mathcal{D}} \overset{*}{\mathcal{D}}$   $\phi_{i,1}^{(k+1)} = \frac{\beta}{3} \left\{ \frac{2}{3} \phi_{i-1,1}^{(k+1)} + 2\phi_{i,2}^{(k)} + \frac{1}{3} \phi_{i+1,1}^{(k)} \right\} - (\beta - 1) \phi_{i,1}^{(k)}$
- (12)  $i = I_0, j = 1$   $\Delta r_1 = \lambda, \ \Delta r_2 = \lambda, \ \Delta z_1 = 2\lambda, \ \Delta z_2 = 2\lambda \ \hbar \varepsilon \not \to \dot{\Sigma}$   $\phi_{i,1}^{(k+1)} = \frac{2}{5} \beta \left\{ \frac{1}{4} \phi_{i-1,1}^{(k+1)} + 2\phi_{i,2}^{(k)} + \frac{1}{4} \phi_{i+1,1}^{(k)} \right\} - (\beta - 1) \phi_{i-1}^{(k)}$ ......(2.37)

#### 2.3.2 計算条件および Flow Chart

上の各式の計算における境界条件は次のとおりである。

<i>i</i> = 1,	$j = 1 \sim 55$	で	$\phi_{i,j} = 1.5$
$i=2\sim 22$ ,	j = 55	で	$\phi_{i,j} = 1.5 - \frac{i-1}{44}$
$i = 23 \sim 29$ ,	$j = 15 \sim 55$	で	$\phi_{i,j}=1$
$i = 30 \sim 72$ ,	j = 55	で	$\phi_{i,j} = 1 - \frac{i - 29}{44}$
<i>i</i> =73~79,	$j = 15 \sim 55$	で	$\phi_{i,j} = 0$
$i = 80 \sim 160$ ,	j=55	で	$\phi_{i,j}=0$
<i>i</i> =160,	$j = 1 \sim 55$	で	$\phi_{i,j} = 0$

出発値は、上の条件に出てくる (i, j) 点以外の (i, j) 点について  $\phi_{i,j=0}$  とした。

上述の各式の計算機による計算 program の flow chart は図 2.3 のとおりである。

#### 2.3.3 結果および考察

Disk 形加速管の入射領域における電位分布の形状を計算値から plot すると、図2.4 に示すようになった。この結果を用いて、荷 電粒子を入射したときの、その軌道を求める手順となるが、それは 3 章にのべ、ここでは電位分布について考察する。計算値を種々の 立場で処理することによって、いろいろな結果が得られるが、一般 的な結論は次のとおりである。

(1) 電位の はみ出し

電位の はみ出しは、電極の穴径と電極間隔によって異なるが、電 極孔の半径の約3倍の点で約1/1,000 になっている。

入口領域以外での電極間げきでは、ここで用いた電極穴および間 げき程度では、等電位分布(一様電界)とみなせる。電極の厚みの 効果については、電極穴が小さいほど大きいが、この計算では問題 にしていない。

これらの考察から、この種加速管は入口領域の電位のはみ出し、 つまり、1枚電極(aperture lens)における電位分布によって、レッズ 作用が大きく変化することが判明する。これは1章でのべた M. M. Elkind<sup>(1)</sup>の近似計算法の正当さを示す。

(2) 電極の edge 効果

計算の便宣上, 電極 edge は直角としたが, 電極穴をあまり小さくしないかぎり (ビームの径に比べ) 問題とならないであろうが, 厳



図 2.3 加速管電位分布計算の Flow chart Flow chart of potential distribution calculation in acceleration tube.



Potential distribution in the injection region of acceleration tube.

密な設計のうえでは,考慮する必要がある。多段形加速電極では, この効果が積算されるからである。

(3) 電極問電位は, r≥1.3 r₀(r₀:電極穴半径) においては, 軸方向に直線的に増加している。

次に計算手段としては、

(4) くり返し数(&の値について)

この計算では、反覆回数を1,000としたがそのときの絶対誤差は 10<sup>-4</sup>で、相対誤差は0.01%である。各反覆回数での誤差の値をout put させてみると、くり返し数200ぐらいで誤差値は最低近くにほ ぼ収れん(斂)してしまう。したがってこの場合のように格子点を もつ差分式の解は反覆回数が200程度でよいものと結論できる。



図 2.5 Einzel lens の構成および dimension Geometry and coordinate grid of Einzel lens.

表 2.1 Einzel lens の dimension 一覧表 Dimensions of Einzel lens.

種	類	値	半径指数
ם		$\begin{array}{rrr} 30 \text{ mm} & (D/2=15) \\ 40 \text{ mm} & (D/2=20) \end{array}$	a=30 a=40
d		20 mm $(d/2=10)$ 30 mm $(d/2=15)$	b=20 b=30
W		20 mm 40 mm	c=40 $c=80$

(5) 境界の問題

z 方向(特にはみ出し方向) r 方向とも、かなり広範な領域を設定して計算したが結果から考察すると、意味のない領域も含まれている。たとえば電極の長さは電極間隔と同じ程度、 z 軸の0電位方向は 6ro 程度とれば十分と考えられる。これによって、計算時間が短縮できる。

2.4 Einzel lens の場合

2.4.1 差分式

Einzel lens の Geometry は図 2.5 に示すとおりである。Einzel lens の Geometry は、中間電極により左右二つに分割され、 左右 対称であり電位分布も左右対称であるとしてよい。したがって、分割された一方のみについて計算を進める。

図 2.5 に従い計算する電極寸法を表 2.1 に示す。これからわかるように 8 とおりの Geometry について計算する。加速管の項で導入した式に基づき  $dz=\lambda$ ,  $dr=\lambda$ , ( $\lambda=0.5$  mm) として計算を進める。

今の場合 I=170, J=70 だから

$$\beta = 2 - \sqrt{2} \left\{ \left( \frac{\pi}{I-1} \right)^2 + \left( \frac{2.405}{J-1} \right)^2 \right\}^{1/2}$$

より B=1.94 となる。

- したがって式 (2.25) より
- (1) j $\pm$ 1 のとき (i $\pm$ 171)

$$\phi_{i,j}^{(k+1)} = 0.485 \left\{ \phi_{i-1,j}^{(k)} + \frac{2j-3}{2(j-1)} \phi_{i,j-1}^{(k)} + \phi_{i+1,j}^{(k+1)} + \frac{2j-1}{2(j-1)} \phi_{i,j+1}^{(k+1)} \right\} - 0.94 \phi_{i,j}^{(k)} \qquad (2.38)$$

(2) j=1 のとき

 $\phi_{i,1}^{(k+1)} = 0.485 \left\{ \phi_{i-1,1}^{(k)} + 2\phi_{i,2}^{(k+1)} + \phi_{i+1,1}^{(k+1)} \right\} - 0.94\phi_{i-1}^{(k)} \cdots (2.39)$ 

- (3) i=171のとき (j = 1)
  - 式 (2.25) において、  $\phi_{i+1,j} = \phi_{i-1,j}$  とおいて

(4) *i*=171, *j*=171 のとき

式 (2.25) において  $\phi_{172,1}=\phi_{170,1},\phi_{171,j-1}=\phi_{171,j+1}$ とおいて

## 

#### 2.4.2 計算条件および Flow chart

計算の方向は、まず i=171 において、 $j=\alpha$  より j=1 まで計算 し、次に i=170 において、 $j=\alpha$  より j=1 まで計算する。このよ うにして順次 j の小さいほうへ計算を進める。i=171, j=171 では 等電位線が z 軸に直角とならない(特異点である)。本計算ではこの 点において、 $\phi_{172,1}=\phi_{170,1}, \phi_{171,j-1}=\phi_{171,j+1}$  とした。図2.5 に示さ れる geometry の Einzel lens の境界条件は次のとおりである。

- (1)  $i=1, 1 \le j \le 71, \phi_{i,j}=0$
- (2) 1<*i*<171-*c*-4, *j*=71,  $\phi_{i,j}=0$
- (3)  $171 c 4 \le i \le 171 c + 4, \ b + 1 \le j \le 71$  $\phi_{i,j} = 0$
- (4) 175- $c < i \leq 154, j = 71$

$$\phi_{i,j} = \frac{i - 175 + c}{c - 20}$$

(5) A 領域(図 2.5) では  $\phi_{i,j}=1$ ,上の格子点以外の格子点に ついて  $\phi_{i,j}=0$ とおき,これを出発値とし上に求めた差分式を用い て、  $\phi_{i,j}$ を求める。最後の格子点についての計算が終わると、再び 最初の格子点から計算を始め、誤差が設定値以下になるまでu-3計算を始める。これの Flow chart を図 2.6 に示す。

#### 2.4.3 結果および考察

図 2.7 に Einzel lens の一例における電位分布図を示す。特に 目だった結果ではなく,推定とおりの電位分布を示している。一般 に、Einzel lens は、滅速→加速形で用いられる。すなわち、粒子 の入射の方向からみて、最初の電極間げきは、荷電粒子に対し減速



図 2.6 Einzel lens 電位分布計算の flow chart Flow chart of potential distribution calculation in Einzel lens.

作用をし、次の間げきで同じ量だけ加速する方法で用いられている。 さらに、その滅速は、粒子 エネルギーをほとんど失なうまでに用いる のが普通である。 この方法によれば、強い レッズ 作用を粒子にささ えうることが、電位分布図からみて容易に推定できるであろう。

(1) 中間電極中心の直下において電位曲線は軸と傾交する。す なわち, この点は Singlar point である。

(2) Singlar point での電位は、中間電極電位よりも小さい。 したがって、中間電極に印加できる滅速電圧は、荷電粒子 エネルギー 相当電圧よりも大きくてよいことがわかる。

(3) 電極穴近傍の電位は、かなり Irregular である。レンズ 作用 としての幾何学収差はここで発生する。

(4) 中間電極穴が大きいと, Singlar point における電位 が さらに小さくなる。

(5) 計算手法上電極 edge 形状を角状としたが、収差等を問題 にする場合は、厳密な形状で計算する必要がある。

(6) 計算の反覆回数は、加速管の経験から、200回としたが、 このときの相対誤差は~10<sup>-4</sup>である。この場合十分すぎる精度であ る。



(7) 電極形状 (穴径など) の異なる場合における計算手法とし て *a*, *b*, *c* なる構造因子を導入したが, これによってかなり簡素化 された計算となった。

(つづく)

#### 参考文献

(1) M. M. Elkind : R. S. I. 24, No. 2, 129 (1953)

UDC 621. 3. 027. 5 : 621. 382. 2

# 400 A 2,500 V 平形高耐圧大電力サイリスタ

岡 久雄\*·船川 繁\*\*·中田仗祐\*\*

# 400 Amperes (Average) 2,500 Volts Flat Packaged High Voltage High Power Thyristors

Kitaitami Works Hisao OKA · Shigeru FUNAKAWA · Jôsuke NAKATA

Flat packaged high voltage high power thyristors of average forward current 400 A and blocking voltage 2,500 V are now produced in quantities and good many of them are in use for industry. These thyristors are epochal products having such an excellent characteristic and rating as critical rate of rise of off-state valtags of 200 V/ $\mu$ s and critical rate of rise of on-state current of 200 A/ $\mu$ s. This article outlines new technical problems posed in the design and manufacture of thyristors by describing their ratings, characteristics and reliability.

#### 1. まえがき

道阻止3端子サイリスタ(当時, S. C. R)が商品として市場に出て から10年余が過ぎた。この間,材料と素子製造技術の進歩ならび に素子設計パラメータの解明により高耐圧大容量化への推移はめざま しく,またその応用においても電源機器はもとより,電動機制御お よび電力系統での順道変換器として,ますます拡大浸透して素子に 対する高性能・高信頼度・低価格が要求されるようになった。

素子の高耐圧大容量化に伴う新らしい技術の方向として、耐圧と 順電圧降下ならびに スイッチング特性間 にある 本質的に相反する因子 を設計と製作技術の双方から、より高度に協調させることと、エレメ ント とこれを収容する外装の機械的な結合方法、 ならびに平形構造 による放熱能力などの改善をあげることができる。

本文においてはすでに量産中である当社の高耐圧大容量 サイリスタ, FT-500 A (順・逆阻止電圧 2,500 V,平均順電流 400 A) に関する 上記新らしい技術上の諸問題の一端と、その定格と特性・信頼性に ついて紹介する。

#### 2. サイリスタ エレメントの構造

電力用のサイリスタとしては従来主として拡散法と合金法を併用し て PNPN 接合を形成する方法が採用されていた。しかし合金法に よる接合形成は不純物密度とその分布に対して自由度が少ないうえ に,拡散層における合金深さの精密なコントロールや接合の平たん度を よくすることが,技術的に限界がある。FT-500 A は高度な最適値 設計が得られるものとして全拡散方式を採用しその製作に成功した。

この方式によって、陰極 エミッタには多数の小さな シートドット を設けた エミッタ短絡形構造とするとともに、各層の不純物密度の大きさならびに分布を、耐圧、臨界順電圧上昇率 (dv/dt)、順電圧降下、 サージ電流耐量、臨界順電流上昇率 (di/dt)、ゲート 点弧特性などの諸特性に対し最も協調のとれたものになるように設計、製作できた。

図 2.1(a) にその断面構造を示す。また ゲート に近接する エミッタ 領域の一部を陰極 コンタクト からずらし初期 ターンオン 領域の拡張を計 った。図 2.1(b) はその構造と ターンオン 電流の流れ方を示す。 A 点で点弧した電流が B 点に向って エミッタ 層内を流れると、 V なる 電圧降下を生じ、 ターンオン 領域を B 点へ電界によって移行せしめる 機構により、 ターンオン の広がりを早め *di/dt* 耐量を増加させる。 これは センターゲート 構造の改良された新らしい方式である。 高耐圧の 条件を 満すため シリコン の端面を二つの 傾斜角に分けて ベベリング した。 ゆる やかな傾斜は順阻止接合に対し行なわれとくに 高精度を保っている。この エレメント は表面を不活性処理し, シリコン ゴム を被覆して平形密封構造の ケース に収容される。図 2.2 はその 外観を示す。











図 2.2 大電力平形サイリスタFT 500 A Flat packaged high power thyristor FT-500 A.

#### 3. サイリスタ エレメント設計上の問題

高耐圧 サイリスタ をうるための条件の中には、順電圧降下や dv/dt, di/dt などの スイッチング 特性の改良と、本質的に相反する設計 パラメ -- タを含んでいる。 ここではこれらの特性と設計 パラメ-- タ ならびに エレメントの構造との関係について述べる。

#### 3.1 雷圧阻止能力

サイリスタの電圧阻止能力は、まず基板 シリコン に形成した個々の P-N 接合の アバランシェ 降伏電圧によって最高値が規制される。

P-N 接合の降伏電圧は、基板 シリコンの比抵抗とその 内部に生ず る電界強度の大きさで決まる。 基板 シリコン として N 形を用い, C れに P 形不純物を拡散して得た P-N 接合の アパランシェタイプの降伏電 圧  $V_B(V)$  とその基板 シリコン の比抵抗  $P_N(\Omega \cdot cm)$  との関係は、わ れわれの実験結果によると常温で次の実験式に従う。

(ただし $P_N > 15 \Omega \cdot cm$ )

ててに

Press of

 $V_B = 126 \rho_N^{0.63 \pm 0.01} \dots (3.1)$ 

この関係式で決まる P-N 接合の耐圧は ダイオード の場合, 基板の 厚みが十分あればそのまま維持できるが, サイリスタ ではその構造上 から,接合間にトランジスタ作用が働き電圧阻止能力を低下させる。

図 3.1(a) は FT-500 A サイリスタ を例にした シリコン 内部の不純 物分布図である。一般に高耐圧 サイリスタ は比抵抗の大きいN形基板 シリコン に、順方向と逆方向の電圧阻止接合を、一つの拡散 プロセス で 同時に作るのが普通である。その結果全く対称的な PNP 構造がで き, 二つの P-N 接合自体の降伏電圧は等しくなる。もう一つの P-N接合は、拡散された一方の表面からN形層を形成して作られるが、 その耐圧は他の二つの接合に比べると小さく問題にならない。

図 3.1 (a)(b) はこのような構造をもった サイリスタが, それぞ れ逆方向阻止,順方向阻止状態になるように電圧印加された場合の 空乏層の広がりを示したものである。

N形 ベース層内の空乏層は近似的に次式で表わされる。

 $d = [2K\mu_n \rho_N (V_D + V_a)] \dots (3.2)$ 

K: 
oline 
oμn:電子の易動度 -Nº|ドーピング砲度 (湖田教区 ž (a)不純物分布 G N. (+)(-)P<sub>B</sub>  $N_{\rm E}$ ۰C Ne P.\* (b)逆方向阻止状態  $-W_{c}$ W. G W (-)(+) $P_{E}^{+1}$   $P_{E}$ Pв Ne • C Ac (c)順方向阻止状態 空ラ層



#### V<sub>D</sub>: 接合の拡散電位

サイリスタ が逆方向に バイアス された状態における電圧阻止能力 V<sub>RB</sub> は図 3.1(b) から, 接合 J1 を コレクタ とし接合 J2 を エミッタ とした PB-NB-PE 部分の トランジスタ の耐圧で決まる。 この場合の電流増幅 率を α<sub>PNP</sub>, J<sub>1</sub> 個有の耐圧を V<sub>B</sub> とすると P<sub>B</sub>-N<sub>B</sub>-P<sub>E</sub> から得られる 耐圧 VRB は次式で表わされる。

$$V_{RB} = V_B (1 - \alpha_{\rm PNP})^{1/n}$$
 .....(3.3)

ここに n: 定数 (3~6)

サイリスタ の逆電圧阻止能力は接合 J』の耐圧が小さいから式 (3.3) の耐圧によって表わされると考えてよい。

電流増幅率 α<sub>PNP</sub> は接合 J₂の注入率 (γ₂) と,J₂ から J₂ への正孔 の輸送率(β<sub>PNP</sub>)の積である。輸送率(β<sub>PNP</sub>)は N<sub>B</sub> 層の実効 ヘース 厚 ( $W_N-d$ )、正孔の拡散長 ( $L_P$ ) と次の関係がある。

$$\beta_{\rm PNP} = \frac{1}{\cosh\left(W_N - d/L_P\right)} \dots (3.4)$$

γ2 は P-N 接合 J2 における不純物密度比, ライフタイム, ベース 幅な どによるが,高耐圧が要求される P–N 接合では, これらの因子に よって γ₂ 自体を任意に設計する自由度は少なく, 大体 0.8 以上が普 诵である。

式 (3.4)を用いると,式 (3.3)は次式になる。

$$V_{RB} = V_B \left[ 1 - \frac{\gamma_2}{\cosh\left(W_N - d/L_P\right)} \right]$$
(3.5)

一方順方向電圧阻止能力 (VFB) は図 3.1(c) 図に示された状態 で J₂ を共通の コレクタ とし,P<sub>E</sub>-N<sub>B</sub>-P<sub>B</sub> と N<sub>E</sub>-P<sub>B</sub>-N<sub>B</sub> の二つの トラ ンジスタ を組合わせた場合の耐圧と考えられる。前者の電流増幅率を α<sub>PNP</sub>, 後者のそれを α<sub>NPN</sub>, 接合 J<sub>2</sub> 個有の耐圧を V<sub>B</sub> とすると 図 3.1 (a)の不純物分布では順電圧阻止能力 (VFB) は次のようにな る。

 $V_{FB} = V_{\rm B} (1 - \alpha_{\rm PNP} - \alpha_{\rm NPN})^{1/n} \dots (3.6)$ 

図 3.1(c)において J1の注入率と実効 ベース 層厚はそれぞれ(b) 図のそれと同等と考えることができるので,式 (3.6) は式 (3.3) よ り α<sub>NPN</sub> が加わった分だけ低下すると考えてよい。

したがって順電圧阻止能力を大きくするためにはまず逆電圧阻止 能力を大きくすることであり、次に anpn の影響を抑制することで ある。

P-N 接合 J<sub>1</sub>, J<sub>2</sub> が所定の 降伏電圧 V<sub>B</sub> をもっているとき, 逆電 圧阻止能力の設計上調整できる パラメータ は  $W_N - d/L_P$  である。し かし W<sub>N</sub>/L<sub>P</sub> は順電圧降下の面からは小さいほうが望ましいので, これらとの間に最適化設計が必要である。

aNPN は PB 層における電子の輸送効率と接合 Ja の電子の注入率 γ3 の積である。 しかし J3 は耐圧を高くする必要がないから, エミッ タを部分的に短絡して,実質的な注入率を低下させることができる Iミッタを短絡しないで注入率を低下させると順電圧降下を十分下げ ることができなくなるから, 多点短絡形の エミッタのほうが望ましい

電流増幅率 appp, app にはともに電流および温度依存性がある 順方向 ブレークオーバ 電圧が高温において低下し ターンオン する現象は, 漏れ電流が温度上昇とともに 増加して  $lpha_{
m PNP}+lpha_{
m NPN}=1$  になるから である。したがって,漏れ電流を小さくするとともに, ターンオン 条 件が成立する ァノード,カソード 間の ターンオン 電流をある程度大きくす ることが温度特性を改良するうえで必要である。

P-N 接合の漏れ電流 (I<sub>R</sub>) は, (1) 飽和電流, (2) 空乏層内発生 電流,(3)表面漏れ電流からなっており,とくに(2),(3)を小さ くすることが技術的に重要である。ライフタイムを長く保つことはサイ リスタの ターンオフタイムを長くするが、漏れ電流、順電圧降下などの改 善にとって必須条件である。

表面漏れ電流は、 ヘヘリュシ により表面の電界強度が低減され、 これを下げるのに役だつが広くなった接合部表面の不活性化処理と、 被覆保護する テクニック の向上が伴わなければならない。

ベベルの角度とその位置はとくに順阻止接合に対しては重要で、高 耐圧化につれてより小さい傾斜角が要求される。しかし シリコンウェフ ァの通電に有効な接合面積が減少するので、協調を図る必要がある。

## 3.2 順電圧降下

シリコンウエファの厚みは耐圧設計から最小必要値が定まるが、 高耐 圧化に伴う厚みの 増加に対して キャリアの拡散長を 伸ばすことは技 術的な限界があるために、順電圧降下の増加の割合は加速的である。 したがって ライフタイム をできるだけ長く保つとともに 厚みを最小限 にとどめることが要求される。

大電力用 サイリスタ における順電圧降下の問題は、定格電流および サージ電流における電流密度 70~2,000 (A/cm<sup>2</sup>)の範囲での検討が重 要である。このような電流密度における  $I \ge u > x$  から n - x への注入 キャリア の密度は、n - x 層の不純物密度をはるかに上回る u < u に達 しており、 P+NN+ 形 i < t - 1 における大電流 u < u の + y + y - y 分布 とほとんど変わらなくなる<sup>(1)</sup>。

図 3.2(a)(b) に サイリスタ, ダイオードの不純物分布と大電流 レベル における電子・正孔の分布を示すが, サイリスタ の接合 J<sub>1</sub>, J<sub>2</sub> の電圧降 下は打消され, J<sub>0</sub> での電圧降下の影響が現われる。また  $\langle - \chi \rangle$  層に おける電子・正孔の易動度は ++ リアー++ りア 散乱のために低下し同 じ値に近づくので, それぞれの拡散係数は等しくなる。このときの



図 3.2 サイリスタ, ダイオードの構造と大電流レベルにおける 電子,正孔の分布

Structure and electron, hole distribution at high conducting level in thyristor and diode.

.....(3.10)

ととに

 $V_0$ ,  $V_3$ :  $J_0$ ,  $J_3$ の電圧降下

 $V_{(P_E^*)}, V_{(N_E^*)}: P_E^+, N_E^+ 圕の電圧降下$ 

 $V_{(P_E^N_B^P_B)}$ :  $P_E - N_B - P_B$ 領域の電圧降下

K:ボルツマン 定数

- **T**:絶対温度
- Q:電子の電荷
- D: 両極性拡散定数
- L: 拡散長
- ni:真性半導体の キャリァ 密度

なお  $P_{E}$ + 層と  $N_{E}$ + 層の厚みと不純物密度は等しい場合で、それ ぞれ  $W_3$ ,  $N_E$ + で記した。

順電圧降下は設計 パラメータ のうち、 $P_{E}$ + 層、 $N_{E}$ + 層の不純物密度 を大きくすること(少なくとも $N_{E}$ +,  $P_{E}$ +>10<sup>19</sup> 1/cm<sup>3</sup>)と拡散長 *L* を大きくすること(++リアのライフタイムを伸ばす)が必要である。一 方、中間層 ( $P_{B}$ - $N_{B}$ - $P_{E}$ )の厚みを耐圧上必要な最小の大きさにおさ えることが重要である。これらの可能性は素子の基本構造と製作技 術によるところが非常に大きい。その他、シリコンとの 1-2-ックコンタ クトや電極における電圧降下も式(3.7)に加えられる。

3.3 順電流上昇率 (di/dt)

サイリスタの順方向導通領域はダイオードと異なって点弧電流により 最初に小さな導通領域が作られ、そこから周辺に波及して接合全域 に導通領域が広がる過程をたどる。このため順電流上昇率が大きい 負荷電流に対し導通領域の電流密度が定常状態より増大し、ホットス ポットを生ずる。高耐圧大電流用サイリスタのシリコンは、厚みが大きい ために単位面積当たりの順電圧降下が増加し、面積が大きいために 導通領域の広がりが完了するまでの時間が長くなることにより、 *di/dt* 耐量と矛盾する要素をもっている。

導通領域を広げる駆動力は、 導通領域の ベース 層に蓄積された過 剰の正孔と、電子が未導通領域へ向う拡散および ベース 層横方向の 電界によっている。したがって *di/dt* 耐量を向上させるためには、 エレメント における広がりの駆動力を高めることが重要であり、 これ には次の事項が関係している。

- (1) III (PE, NE 層)の注入効率とその電流依存性
- (2) ベース 層の厚み
- (3) キャリアのライフタイム
- (4) appr/anpn の電流依存性
- (5) ベース 層の シート 抵抗
- (6) 接合面の平たん度と結晶内欠陥
- (7) ゲート 電極の配置と近接部分の エミッタ 構造
- (8) エミッタの ショートドットの パターン

これらの事項には電圧阻止能力, ターンオフタイムの方からの要求と



矛盾しているものがあるので設計の最適化が必要である。しかし (6),(7)項は *di*/*dt* 以外の特性と独立して考えられるものがあり, この面からの改善は重要である。

di/dt 耐量は ゲート 点弧電流の大きさ,立ち上がり率,パルス 幅に よっても異なる。初期導通部分を大きくし,かつ広がりの駆動力を 高める方法として High gate Drive を行なうことがある。したがっ て ゲート 構造は大きな電流 パルス に耐えられることも要求される。

#### 3.4 順電圧上昇率 (dv/dt)

チョッパ や逆変換装置などに使用した際には、dv/dtの大きい順電 圧が サイリスタ に加わる。そのために低い電圧で  $g_{-v}$ なッ することが ある。このような dv/dtの高い回路でも サイリスタの使用電圧が低下 しないために サイリスタの構造,設計 パラメ-タ について十分検討して おかなければならない。dv/dtによる  $g_{-v}$ なっ は順方向阻止接合の 空乏層の急激な拡張に対応する充電電流によって引き起こされるも のである。 充電電流は  $I \equiv vg$ から +vリアを注入するように働き, 電流増幅作用を増して順電圧阻止能力を低下させ、 $g_{-v}$ なっ に至ら しめる。dv/dtを大きくする因子の条件としては,

- (1) ブレークオーバ 電流を大きくする。
- (2) ベース層の厚みを大きくする。
- (3) ベース層の ライフタイム を下げる。
- (4) エミッタの注入効率を下げる。
- (5) 接合容量を小さくする。

があげられる。しかしここでも他の特性における要求と相いれない ものがある。現在最も効果的な手段は エミッタを短絡して 実質的 に (4)項の条件を満足させることである。

図 3.4 は陰極側の  $I = v_{2,9,9}$  (N<sub>E</sub> 層) を多数の小さな  $F_{0,9}$ ト により  $v_{3-}$ ト した FT-500 A 形 サイリスタ の カット 図を示す。dv/dt に伴う 充電電流の レベル において  $I = v_{2,9,9}$ の 注入率を小さく保ち,  $g = v_{3,7}v_{3$ 







図 3.5 エミッター 短 絡 電 流 Current flow in the shorted emitter region.

- (1) III メ 接合 J3 の拡散電位
- (2) ショートドット がない場合の Ja の注入率の電流依存性
- (3) P<sub>B</sub> 層の シート 抵抗
- (4) 充電電流の大きさ

#### 4. 製造技術とその問題

設計のできる範囲,設計パラメータの最適化などは素子の製造技術 と表裏一体の関係がある。またシリコン単結晶を初めとする材料の品 質レベルや製造設備は,高耐圧化大容量化において重要な役割を果 している。一方 エレメントの耐圧,熱発生量の増加に対する外装構造 の設計と組立ての技術は,サイリスタの定格と信頼性にとってきわめ て重要である。

#### 4.1 シリコン単結晶

シリコン単結晶は, FZ, N 形 シリコン単結晶を用いた。現在安定し て入手しうるこの種単結晶の直径は 33 mm~40 mm である。大口径 シリコンを用いて高耐圧をうる目的から最も重要なのは比抵抗の ウェ ハ間のばらつきとともに ウェハ 面内の ばらつきである。 こ れ ら は 3.1 節で述べた実効 ペース 幅に偏差を生じさせる結果となるので, 可能な限り小さく押えることが必要である。

次に素子における キャリア の ライフタイム は,素子特性に影響する パ ラメータ として,きわめて重要である。単結晶素材の ライフタイム では 1,000 µs もありうるが,拡散 プロセス では通常 10~50 µs にまで低下 する。拡散 プロセス における重金属不純物の拡散を, できるだけ少な くすることが必要である。また転位密度, リニエイジ も結晶の性質を 表わすものとして重要である。これらの数の大きい結晶を用いた場 合, プロセス 中に耐圧の低下するものがみられ,素材に含まれる結晶 欠陥により,異常拡散や重金属類 (Cu, Au, Fe, Mn) などの析出 がおこる。これは,高温での阻止状態で発生電流を顕著にし,ライフ タイムを低下している場合が多い。 シリコン の厚さ,平たん度のばら つきは加工の精度により左右されるが,これは比抵抗のばらつきと 同様に サイリスタの特性に影響し,高度の加工精度を要するとともに,加工後の洗条処理も重要な問題である。

#### 4.2 接合の形成とサイリスタ基体の製作

従来の1,200~1,300 V 級の電力用 サイリスタ では, N 形 シリコン に P 形不純物拡散を行ない, 片面に金一アンチモン はく(箔)を合金して PNPN 接合を形成するいわゆる拡散合金形が普通であった。 しか し金一アンチモン により N 形層を作る場合,接合面の平たん度の精度 を上げることが困難であり,不純物密度,平面的幾何構造の点で, 設計上とりうる自由度が少ないなどの欠点があった。この欠点をな くし,高耐圧,大電流化に伴って要求される諸特性を実現するため, 全拡散による接合形成の方法をとった。 この方式は,中小容量 サイ リスタ には,めっきとそれに続くソフトソルダによるマウント と言う方式 が量産性にすぐれているところからすでに用いられてきたが,大容 量 サイリスタ では,熱疲労の問題が重要視されるので,その実用は画 期的なものである。

図4.1 に全拡散方式による接合の不純物分布を示す。 この 不純 物密度分布は3章で述べた設計上の問題を最も効果的に満足 せ し めるようにされている。 順および逆の電圧を阻止する按合  $J_2 \ge J_1$ の不純物密度の傾斜をゆるやかにすることにより,内部の降伏電圧 を高め,かつ表面の電器強度を低減させ,特に負  $\sqrt[4]{n}$  をもつ  $J_2$  の 高耐圧化を実現した。P 形拡散層の接合  $J_3 \ge 接した部分は = 1$  抵







図 4. 2 ジリシ と又持板の接合によるのすみ Strain on the fusion of silicon with supporting electrode.

抗を低くし, di/dt, ならびに dv/dt の設計上の要求を満足するの に役だっている。ちなみに  $di/dt \ge 200 \text{ A}/\mu\text{s}$ ,  $dv/dt \ge 200 \text{ V}/\mu\text{s}$  の特 性定格値は、電力用 サイリスタ としては、応用上、理想に近いもので ある。 リン 拡散による N 形層は  $1 \times 10^{20}$  atoms/am<sup>3</sup> 以上の 表面密度 をもち、大電流 レベル における  $I \ge yg$  効率の低減を少なくするとと もに、P 形拡散中に拡散した有害不純物を fygan し、 ライフタイムを 向上させて、順電圧降下を小さくするのに役だった。

拡散によって形成した接合をもつ シリコンウェハ を モリブデン,あるい は タングステン などの支持電極に接合する場合,高耐圧化,大容量化 とともに、シリコン の径も大きくなり,局部的 クラック や残留応力によ る特性劣化の問題は,無視できなくなる。図4.2 は,支持電極と シリコン の線膨張係数のわずかの違いによっても、シリコン が湾曲し, 内部応力をうけることを示している。この影響を避けるため、シリコ ン に対するろう材,支持板の材質,厚みについて,後述の外装の設 計とともに,力学的検討を加え,最適な協調を図り,十分な裕度を とって信頼性を高めた。

表面処理においても、正 ベヘル、負 ベヘル のおのおのの角度, なら びに位置の正確な加工技術を開発した。これにより表面の不純物密 度分布に応じた ベヘル 面の設計値を確実に実現し、順阻止, 逆阻止と も、シャープ なそろった降伏特性をうることができた。また特殊な不 活性化処理は、表面の チャネル 形成キ、イオン 電流を防止し、 接合面 積が大きく、耐圧が従来の素子に比べ、いちじるしく高いにもかか わらず高温時におけるもれ電流を小さくすることができた。その結 果、高温阻止電圧加速試験, ダイナミックテスト などにおいて、良好な結 果を得、信頼性が高度に高いことが証明された。

#### 4.3 平形構造

高耐圧大電力用素子に適用される外装に伴う問題として、

(1) サイリスタエレメントからの熱放散を効果的にする。

(2) 断続負荷の際,外装からサイリスタエレメント に与える熱ひずみ による機械的応力の影響を最小にする。

(3) 電極間の絶縁を外装の内部外部とも、 ライフサイクル 中確実に する。

の三つの要求が満たされねばならない。FT-500 A はこれらの基本 条件を満たした設計がなされ, 図4.3 に示す 平形圧接構造をとっ ている。この構造は従来のスタッド形が片面のみ冷却する設計であっ たのに対し,両面から冷却されるように設計され,接合部一冷却媒 体間の過渡ならびに定常熱抵抗がいちじるしく減少した。図4.4 は,その過渡熱抵抗曲線を示す。過酷な負荷変動による温度変化は、 サイリスタエレメント と外装との結合部で,両者の熱膨張係数の違いから、 ひずみを生ずる。この問題はサイリスタエレメントの接合径が大きいほど, 過酷となり,ろう材による結合の場合は ンルダ疲労を生ずる。当社



図 4.3 FT-500A の 構 造 Cross section of the FT-500 A thyristor.

では早くからこの問題と取組み, すでに CR-250 A 形 サイリスタ などの電力用素子に適用し, 信頼性の高いことが フィールド において実証 された ソルダを用いない加圧接触方式を用いた。

半導体 エレメントの加圧接触は、単に電気的な接触をうる目的だけ でなく、いかに熱的・機械的に良好な、安定した接触状態を作るか が重要な技術である。このため接触物の材質、表面状態、圧接圧力、 予想される温度 サイクル での サイリスタエレメントの隣接銅電極との間の 滑動作用についての力学的な解析と、豊富な実験的データを用いて、











Outline dimensions of the FT-500 A thyristor.

外装の設計を行なった。FT-500 A は、冷却体によって両面から圧 接力を加えて装置に組込まれる。圧接圧力を変化した場合の接合部 一冷却体間の熱抵抗の変化を、陽極側、陰極側に分けた場合と、ま た合成熱抵抗( $\theta_{if}$ )の場合とについて図 4.5 に示す。

外装における絶縁の問題は、内部においては、平形構造は全高さ が小さく、陽極一陰極間、とくに陽極一ゲートリード線間の距離も小さ いので、その間の耐圧をできるだけ高くとれるような形状に設計す ることである。これは温度分布、シュミレーションなどの方法により最 適設計を行なった。また外部表面は、じんあい(塵埃)などに汚染 され、沿面放電、漏れ電流の増大の原因となる。セラミックシールには ひだをもうけ、陽極一ゲート間の沿面距離を 40 mm 以上になるよう 設計し、過酷な環境条件における長期間の使用も考慮して、絶縁性 を強化した。図 4.6 に FT-500 A の外形寸法を示す。

## 5. 定格と特性

FT-500 A 形 サイリスタの定格と特性の一覧表を表5.1 に示す。 これら定格・特性の各項目のうち,特に FT-500 A に顕著な特性定 格は,次のとおりである。

(1) 阻止電圧が高いのみでなく,臨界順電圧上昇率 *dv/dt* が高く, 200 V/µs 以上である。代表例を図 5.1 に示す。

表 5.1 FT-500 A の 最 大 定 格, 特 性 Maximum ratings and characteristics of the FT-500 A thyristor. (a) 最大定格

	-•	
項 目	単位	FT-500 A -32 -36 -40 -50
せん頭顧阻止電圧	v	1,600 1,800 2,000 2,500
せん頭逆耐電圧	v	1,600 1,800 2,000 2,500
平均胍電流	A	400 (単相半波, 180 度通電, 抵抗負荷, ケース温 度 82°C)
サージ電流	Α	7,000 (商用周波半波1 サイクル波高値非録返し)
せん頭ゲート入力	w	16
平均ゲート入力	w	3
せん頭ゲート電流	A	4
せん頭ゲート順電圧	v	10
せん頭ゲート逆電圧	v	5
臨界顧電流上昇率	A/μs	200 (定格顧阻止電の 1/2 を印加し, ハイゲートド ライブにてトリガさせる. <i>T</i> <sub>j</sub> =25°C)
动作接合部温度	°C	- 40~125
保存温度	°C	- 40~150
臣 接 臣 力	t	1.5 (推奨値 1.2)
重 量	g	230

(b) 動作特性

項目	単 位	FT-500 A -32~-50
平均願漏れ電流	mA	30 (単相半波,平均值)
平均逆電流	mA	30 (単相半波, 平均値)
顧電圧降下	v	2.2 (順電流 1,250 A, 接合部温度 125°C, 瞬時 測定)
トリガゲート 電流	mA	350 (接合部温度 25°C)
トリガゲート電圧	V	4.0 (接合部温度 25°C)
非トリガゲート電圧	v	0.20 (接合部温度 125°C)
保持電流	mA	30 (代表值)
ターンオン時間	μs	1~10 (代表値)
臨界願電 圧 上 昇 率	V/µs	200 (指数関数波形 T <sub>1</sub> =125°C 定格顧阻止電圧 の 1/2 を印加)
熱 抵 抗	°C/W	0.05 (接合部ケース間, 定常値)





機軸 1µssc/div 図 5.2 *di/dt* 測定波形 *di/dt* waveform.

(2) 臨界順電流上昇率 *di/dt* は 200 A/µs という大きな 値 である。図 5.2 に ターンオン 時の電圧,電流波形の一例を示す。

(3) 非トリガゲート 電圧は最高接合部温度において 0.20 V である。 これは、この クラス の電流容量の市場にある一般品に比べ、 倍も大 きい値であり、雑音による誤点弧を防ぐうえから回路設計者には大 きな利点となっている。

#### 素子の信頼性

#### 6.1 劣化機構

素子固有の劣化機構のおもなものとして次の三つがあげられる。 その第一は表面劣化であり、症状としては順方向または逆方向のも れ電流の増加,阻止電圧の低下を示す。原因は表面処理の不適当, 外装の封じ後のもれなどが考えられる。 第二は バルク 劣化であり, 素子の応用技術とも関連し,最大定格を越えた場合に 生 ずる ケース が多い。取り付け方法や、回路における動作状態の違いから、多少 の相違はあるが、耐圧の低下がまず生ずる。電圧定格を越えた場合 のみでなく, 高耐圧大容量 サイリスタ では, di/dt による ホットスポット の形成、逆もれ電流の局部集中による二次降伏、などが生じ、劣化 の原因となる。また過度の熱ひずみ、低温保存または低温時におけ る運転開始に生ずる機械的応力,などによって生ずる シリコンの クラ ックも主要な バルク劣化の原因となる。次に圧接構造における接触面 の劣化が考えられる。この原因としては、組立時圧接不備による圧 接面の接触状態の変化,接触圧の不均一,冷却体の変形などがあげ られ、熱抵抗の増大,順電圧降下の増加、サージ電流による耐圧劣化 などが生ずる。

#### 6.2 信頼性試験と結果

上述の劣化機構の考察のもとに、一連の信頼性試験を行なった。 その項目と、試験結果を表6.1に示す。たとえば内蔵する表面劣 化機構の要因を検出するには、熱電圧印加 エージング、高温保存試験、 連続通電試験などが有効である。これら多くの項目の試験は、信頼 性試験として1回だけ行なわれるのではなく、各生産 ロットが、常 に一定水準以上の品質にあることを保証されていなければならない。

この目的で行なわれているのが品質保証試験である。これらの信 頼性試験・品質保証試験の体系は、ヘリウムリークテストのような信頼性 に密接に関連する常規試験とともに、きわめて高い水準の信頼度を FT-500 A が具備していることを実証するのに役だっている。

表 6.1 に示した試験条件からわかるように、最大定格での試験 で得られた結果から、従来当所で製作してきた大電力用高耐圧 サイリ スタの試験結果と比較するとき、FT-500 A 形 サイリスタの信頼度は 非常に高いということが言える。また従来のサイリスタの使用実績と その信頼度試験の結果の一致を考慮することにより、FT-500 A サイ

#### 表 6.1 FT 500 A 信 頼 性 試 驗 一 覧 Reliability test of the FT 500 A thyristor.

·····			
試験項目	試料数	不良数	
<i>di/dt</i> 試 験	_		★ $V_{AK}$ =1,200 V, $di/dt$ =200 A/µs $I_f$ =400 A
過電流試験		_	★ I <sub>n</sub> =8,000 A (半サイクル) 限界試験 I <sub>p</sub> =10,000 1∼5 Hz
圧接荷重試験	-	-	Vr, θ <sub>ff</sub> の飽和点を求める
扳助試験	20	0	振動数 200 cpm, 振幅 1.5 mm X, Y, Z 各方向各 64 h
振動通電試験	10	0	J <sub>a</sub> =80 A,自冷 T <sub>3</sub> ⇒125°C 振動条件は上記と同じ,各方向各 32 h
温度サイクル 試 験	20	0	ー40°C(30分)~25°C(10分)~150°C(30分)を 1 サイクルとして 300 サイクル
熱衝撃試験	20	0	0°C の冷水中に 10 分間浸し た後直ちに 100°C の熱 湯中に浸す. これを 1 サイクルとして 50 サイクル
附温度試驗	20	0	T <sub>a</sub> =65°C, 温度 95 %の中に 100 h 放置
塩水噴霧試験	20	0	Ta=35°C, 5%(重量) 食塩水噴霧中に 48h 放置
低温導通試験	20	0	Ta=-40°C, Iav=400 A 流し, 2分 ON, 2分 OFF 自冷フィン使用 500 h (Ti≑125°C)
連続通電試験	20	0	<i>I<sub>ar</sub></i> =400 A 連続通電( <i>T<sub>f</sub></i> ≒125°C) 風冷;1,000 h
短期寿命試験	20	0	<i>I<sub>av</sub></i> =400 A 1分40秒 ON ( <i>T</i> 1 ≒125°C) 2分間 OFF 風冷; 500 h
長期寿命試験	20	0	上記と同条件 2,000 h
高温保存試験	20	0	Ta=155°C のふんい気中に 500 h 放置
低温保存試験	20	0	T <sub>a</sub> =-45°C のふんい気中に 500 h 放置
熱電圧印加 エージング	20	0	T <sub>a</sub> =125°C で AC の定格電圧を 1,500 h 印加する
ON, OFF サイクル	20	0	水冷型のフィンに組みとみ Ia=600 A を 1 秒間 ON (T₁≑125°C), 4 秒間 OFF し, 5 万回
へ リ ウ ム リークテスト		_	★ 10 <sup>-8</sup> cc/s 以下

★ 印のものは常規試験

リスタの信頼度は、故障率が優に 10<sup>-9</sup>/h を下廻る程度であることが 推定できる。加速寿命試験を行ない、 その結果から Weibull chart により、寿命劣化領域に至る使用年限を考慮すると、累積不良が5 %になったときを寿命劣化と判定するにしても、この信頼度は数十 年の寿命を推定するのに十二分のものである。

#### 7. む す び

サイリスタ は高耐圧大容量化とともに スイッチング 損失耐量も 相応 して向上しなければ、使用上大きな メリット が発揮できない。

しかし設計上は本文でも指摘したように相反する要求関係にある ため,設計の最適化と高度な製作技術が必要である。われわれはこ の問題に対していくつかの新らしい試みを行ない本文で紹介したよ うに順・逆阻止電圧 2,500 V, 平均順電流 400 A と高耐圧・大容量 化したにもかかわらず  $di/dt = 200 \text{ A}/\mu\text{s}$ 以上,  $dv/dt = 200 \text{ V}/\mu\text{s}$ 以 上を実現して,各特性間の総合的なパランスを図り,他に比類ない大 電力用 サイリスタ の量産に成功し,またその信頼性の高いことも確認 した。この大電力用 サイリスタ はすでに多量に工業用途に使用されて いる。これらの素子が工業用途のみならず,電鉄車両などにも大き な貢献をまもなくすることが期待できる。

本文の執筆を終わるに当たり,筆者らは, この サイリスタの開発から量産に至る間,常に大きな励ましと,有益な Disucssion をしていただいた北伊丹製作所の各位に深甚の謝意を表します。

(昭和 43 – 10 – 14 受付)

#### 参 考 文 献

- (1) A. Herlet and K. Raithel : Solid State Electronics 9, 1,089~1,105 (1966).
- M. Otsuka : Proc, IEEE, 55, No. 8, (1,400~1,408(August, 1967).

UDC 535, 12, 084

# コアギュレータ用レーザ装置

福家 皎\*·菅野 勉\*

## Laser Oscillators for Photocoagulators

なり、発振波長も紫外より遠赤外領域にまでひろがっている。

質が普通の光とは非常に異なっているためである。

レ−ザが新しい光としてあらゆる方面への応用が考えられ 無 限 の

可能性を秘めた光源として話題にされているのは,レーザ光のもつ性

レ-ザ光と普通の光,すなわち,自然放射の光とをくらべて大きく

である。コヒーレンスについては電波を想像すると理解が容易である。

電波と光は共に電磁波であり,電波は波動性をもっているが,光は

巨視的にみると波動性を示さず、微視的にみた場合に波動性を示す。

そして,自然放射の光は波の位相が揃っていないため特殊な方法に

よらなければ波動性をみることができなかったが, レーザ光では波の

Kamakura Works Akira FUKE · Tsutomu SUGANO

Laser oscillators captioned are the ones used for laser photocoagulators in the operation for the exfoliation of retina by oculists. The devices consist of a laser oscillator and a power supply. A laser head that is most important part of the laser oscillator is of wholly dipped water cooling closed type that is small sized and yet of good laser output energy efficiency and of little fluctuation of laser output energy. Furthermore, all the assembling of the apparatus is made compact and provided with a safety device to the power supply preventing it from the explosion of laser, thus handling is well safe-guarded.

The equipment is also applicable as an energy source to laser drilling machines and laser welding machines.

#### 1. まえがき

1

1960 年 Maiman によって ルビー による レーザの発振に成功して以 来 レーザ 技術は急速に発展してきた。そして、レーザ を使った応用装 置として レーザ 加工機、レーザ 測距装置、 レーザアライナー、 無接触なら い計測装置などの製品がすでに市販されており、さらに新しい応用 面についての研究開発がおこなわれている。レーザの応用面としては 加工・測距・測量・通信・写真・医療・計算機その他あらゆる分野 にわたっている。

レーザの医療への応用は眼科の分野からはじめられた。眼科への応 用としては網膜はく(剥)離の凝固用(はく離した網膜を再び眼底に 癒着させる)のものである。すでに米国では実用機が商品化されて おり、わが国にも紹介されている<sup>(1)(2)</sup>。レーザの医療への応用として はこのほか外科手術用・歯科治療用としても考えられているがまだ 商品化されていない。

網膜はく離用の凝固装置は一般に  $\exists r \neq \exists U-g$  (Coagulator) と呼 ばれている。光  $\exists r \neq \exists U-g$  (Photo-Coagulator) は従来も網膜はく 離治療用に使用されていたが,従来の光  $\exists r \neq \exists U-g$  は光源として ク セノン 放電管を使用していた。 $U- \forall \exists r \neq \exists U-g$  (Laser-Coagulator) は この クセノン 放電管を  $U- \forall$  光におきかえたものであって,従来の ク セノン 放電管式にくらべて患者に対する副作用がないことおよび 患 者に苦痛を与えないという利点がある。

とこで述べる コアギュレータ 用 レーザ 装置とはこのような眼科の網膜 はく離手術用の光 コアギュレータ に使用する レーザ 装置である。したが って、この装置には光学系が付属していないが適当な光学系を付け ることによって、レーザコアギュレータ として、また、レーザ 加工機、レー ザ 溶接機としても使用することができる。

#### 2. コアギュレータについて

#### 2.1 レーザの性質

レーザ (Laser) とは メーザ (Maser) の理論を光領域にまで 拡大した もので "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation" のかしら (頭) 文字をとったものであり, "誘導放出による光増幅" と いう意味である。レーザ は最初  $\mu$ ビー を用いて発振に成功したがその 後 He-Ne の気体をはじめとして各種の気体, さらには液体, 半導 体など種々の形状の物質を用いても発振させることができるように

or) と呼 位相が揃っているため波動性を簡単に観察することができる。この 網膜はく 位相が揃っていることをコヒーレンスという。

異なっている点は,

(3) 指光性

(4) エネルギー 密度および集中度

(1) コヒーレンス(2) 単色性

コヒーレッスには時間的 コヒーレッス (Temporal Coherence) と空間的 コヒーレッス (Spacial Coherence) がある。時間的 コヒーレッス とは空間 のある一定の位置において,時間  $\Delta t$  だけ隔たった二つの時刻,  $t \geq$  $t + \Delta t$  における電界または磁界が相関関係を もっていることであり, 空間的 コヒーレッス とはある時刻において,距離  $\Delta r$  だけ隔たった二 つの位置,  $r \geq r + \Delta r$  における電界または磁界が相関関係をもって いることである。 単色性は時間的 コヒーレッス に関係したものであり, 指向性は空間的 コヒーレッス に関係したものである。レーザ 光はこのよ うに コヒーレット であるため単色性, 指向性にすぐれているが エネルギ - 密度も非常に高い。 コモーレット な レーザ 光は適当な レッズ を用いて 集束することにより非常に高い エネルギー 密度の スポット を簡単に得る ことができる。

#### 2.2 コアギュレータ

レーザの医学への応用の最初は コアギュレータ であった。 コアギュレータ とは先にも述べたように眼の網膜はく離手術用の装置であり、従来 の クセノン 放電管式の光 コアギュレータの光源を レーザ 光におきかえたも のが レーザコアギュレータ である。

レーザ光の生体に対する作用効果についてはまだ不明な点が多いが、一般に熱・圧力・光・電磁界の四つの効果が考えられており<sup>(3)</sup>

コアギュレータはレーザ光の熱効果を利用したものである。レーザ光はコ ヒーレントであり、しかも、エネルギー密度が非常に高いため、適当なレ ンズで集束することによって径の非常に小さい、しかも、エネルギー密 度の非常に高いスポットを得ることができる。レーザコアギュレータはこれ を利用したものであるが、コアギュレータの場合はビームの集束用にレ ンズを用いなくても眼の水晶体がレンズの働きをしているため、眼に 平行光線が入射すると網膜上に焦点を結ぶようになっている。その ため、眼に入れるレーザ光は平行であればよい。

光 コアギュレータの場合考えておかなければならないことは 眼の水 晶体の光に対する透過率である。水晶体の光に対する透過率が小さ いことは逆に吸収が大きいことであって、それだけ網膜に達する光 エネルギーが減少し、また、水晶体で吸収された光 エネルギーが熱とな って水晶体内部の温度上昇がそれだけ大きくなることを意味してい る。そのため、光 コアギュレータ用の光源としては水晶体による吸収が できるだけ小さい波長を選ばなければならない。

水晶体の各波長の光に対する透過率を図 2.1 に示す<sup>(4)</sup>。す な わ ち,水晶体は 6,000 Å 前後の光に対して透過率が最も大きいため,  $\exists r_{=1}^{+} = \nu - \varphi$ 用の  $\nu = f$  光としては波長が 6,000 Å 近辺で発振するも のが望ましい。現在すでに製品化されている  $\exists r_{=1}^{+} = \nu - \varphi$ の  $\nu = f$  光 源としては  $\mu = \nu - f$  がほとんど大部分を占めているが,  $r\mu = \delta - f$ ス  $\nu = f$  を使ったものもみられる<sup>(5)</sup>。

レーザコアギュレータ と従来の クセノンコアギュレータ を比較したものを,表 2.1 に示す<sup>(6)</sup>。 それぞれ一長一短はあるが,総括的にみれば レーザ コアギュレータ のほうがすぐれており, 特に レーザ 光の発振時間が短い ことから手術時間が短く,また,単色光であることと相まって患者 は レーザ 光の照射をあまり感じないため患者に与える 苦痛が 少ない



表 2.1 レーザコアギュレータ と クセノンファギュレータ の比較 Comparison between laser coagulator and xenon coagulator.

	レーザコアギュレータ	クセノンコアギュレータ
長 所	<ol> <li>① 患者に与える苦痛が少ない.</li> <li>② 散どう(腔)以外に手術の前処 設が不要.</li> <li>③ 小さい凝固スボットが得られる.</li> <li>④ 然の眼内への停帯が少ない.</li> <li>⑤ 凝固点の色素沈着,はんこん (級旗)化が早い.</li> </ol>	<ol> <li>光源が安定しており凝固点の コントロールが容易。</li> </ol>
短所	<ol> <li>表面凝固,血管の凝固が困難 である。</li> <li>光学系が複雑,観察照準系を 別に必要とする。</li> </ol>	<ol> <li>              ・             送留が大形,高価.          </li> <li>             光の波長範囲が広い.         </li> <li>             ※超時間が長い.         </li> <li>             小さいスポットを得るのが困 難.      </li> </ol>

こと。前処置がほとんど不要であるため手術が非常に簡単であるこ とのために、レーザコアギュレータは今後、ますます普及すると考えられ る。

#### 3. コアギュレータの構造

レーザコアギュレータの構造の一般的なものを図3.1 に示す<sup>(7)</sup>。ルビー ロッドから発生したレーザ光(ルビーレーザ波長6,943Å)はスポット全面 がかならずしも一様なエネルギー密度をもっているとは限らない。そ のため、散乱板 D を通して均一なエネルギー密度をもった光束にす る。この散乱板は大きな凝固点を得ること、どう(瞳)孔面において 光束の分布を均等にして虹彩その他の損傷を少なくする働きもして いる。S は安全用 シャッター で Operating スイッチ とトリガスイッチ に連 動されており Operating スイッチ を押すとまず シャッター が上り、そ れから シャッターの先についている レーザ発振用のトリガスイッチ が押さ れるようになっている。そして、レーザ光がなんらかの ショック で爆 発したような場合 レーザ光が患者の眼にはいることを防いでいる。







図 3.2 レーザコアギュレータ光学系 Optical schematic of laser coagulator.

秒程度で非常に短いため、あらかじめ凝固する場所を観察し凝固位 置と凝固 スポットの大きさを決めておかなければならない。Viewing Light は眼底内を照射するための光源, Aiming Light は凝固位置 および凝固 スポットの大きさを決めるための光源である。 $M_1$ および  $M_2$  は  $\nu$ -ザ 光だけを透過する ダイクロイックミラ-,  $M_3$  は  $\nu$ -ザ 光だけ を反射する ミラ-, I は手術中に  $\nu$ -ザ 光が観察者の眼にはいらない ようにするための安全 フィルタ- である。

図3.1のような光学系のほかに図3.2に示すようなもっと簡単 な光学系もある<sup>(8)</sup>が、いずれの場合でも雑音によってレーザ光が爆 発する可能性があるため、また、誤まってOperating スィッチが押さ れる可能性もあるため、患眼および観察者の眼にそれらの爆発した レーザ光がはいらないように十分安全装置を考えておかなければな らない。

#### 4. コアギュレータ用レーザ装置

この装置は第1節で述べたように光学系は含んでいない。この装置は凝固に必要な エネルキー のレーザ光を発生する発振部 および その 電源から構成されており、その外観を図4.1 および図4.2 に示す。 性能は次のとおりである。

413

松

	1:3:	HE
(1)	発振方式	通常発振 ルビーレーザ 光
(2)	発振波長	6,943 Å
(3)	発振光 エネルギー	0.02 j $\sim$ 2 j/pulse
(4)	発振持続時間	$0.03 \sim 1 \text{ ms}$
(5)	発振繰返し時間	0.02 j~1.0 j 1 秒
		1 j~2 j 10 秒
(6)	連続発振	100 回連続発振可能
(7)	出力偏差	±15%以内
(8)	環境条件	
	周囲温度	$+10^{\circ}C \sim +30^{\circ}C$
	相対湿度	80 %
(9)	寸 法	
	発振部	$80 \text{ mm} \times 86 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$





図 4.2 電 源 Power supply.

# (10) 重量 発振部 4.5 kg 電源(操作部含む) 70 kg

電源には Viewing および Aiming 用光源のための電源, レーザ光 発振の準備が終ったときに ラップ 表示すると 共に Operator に Operating スイッチ を押しても良いということを知らせる ブザー,レーザ発 振回数を  $f_{x,y}$ クする カウッタ,レーザヘッド 冷却用の冷却水貯蔵 タック と ポップ も内蔵している。この他,安全装置として レーザ 光発振準備が 終っていないときに Operating スイッチ を押しても レーザ 光が発振し ないような構造になっている。電源の ブロック 図を図 4.3 に示す。

レーザ光を発生するための発振部はトリガトランス, ミラー, レーザヘッド から構成されており,レーザヘッドは発振繰返しを速くして, しかも, 安定な出力を得る必要から水冷を採用している。レーザヘッド はルビー





図 4.4 レーザ光 出 力 特 性 Laser output energy characteristics.

と励起用 フラッシュランプを集光系内に封入しており フラッシュランプの光をできるだけ効率よく ルビー に集光させるようにしたものである。

レーザヘッドの水冷として一般におとなわれている方法はフラッシュラ っプとレーザロッドを別々に水冷ジャケット中に入れ,更にそれらを集光 系の中に入れ,冷却水はジャケットの中を流すようにしたものである が,この装置のレーザヘッドは装置を小形にすることと励起入力に対 するレーザ光出力をできるだけ多くして電源を小形にする必要から、 ルビーとラップを密着させ、冷却水は集光系内部全体に流す全浸型レ ーザヘッドの方式<sup>(0)</sup>を採用している。このため、装置の小形化と共に 冷却効果が非常によく、レーザ光出力の安定度は連続発振時において 数パーセット以下であった。図4.4 はこの装置の出力特性を示した ものである。

5. む す び

レーザの性質、コアギュレータとはどういうものか、 そして、コアギュレ ータ用として製作した レーザ装置を説明してきたが、とこで述べたレ ーザ装置は必ずしも コアギュレータ だけに使用されるものではなく、 適 当な光学系を付属させることによって、レーザ加工機、レーザ溶接機 として、また、高速度写真・ホログラフィ用の光源として、さらに物性 研究・非線形光学研究用のレーザ装置としてその応用範囲は非常に 広い。

最後に本装置の製作に際しご協力いただいた関係各位に感謝致し ます。

#### 参考文献

- (1) 野寄ほか:臨床眼科, 19, 9, 1109
- (2) 野寄: 医療器械学雑誌, 35, 10, 731
- (3) 渥美ほか: 医用電子と生体工学, 41年10月号, 370
- (4) C. H. Swope (\$ ): Applied Optics, 4, 5, 523 (1965)
- (5) Spectra Physics 社 カタログ
- (6) 野寄:臨床眼科, 1965年6月号, 811
- (7) 野寄: 臨床眼科, 1965年11月号, 1395
- (8) N. S. Kapany : Applied Optics, 4, 5, 517
- (9) 田村ほか:昭和43年電気四学会連合大会予稿集,1676





# 14 PS-4600 U 形三菱ソリッドステート オールチャネルテレビ (愛称:マッハライン 14)発売

当社では、従来から発売している 14 形 ソリッドステート 白黒 テレビ "マッハライン 14" シリーズの 一環として、 買増・買替需要に適した最高級 14 形 オールチャネルテレビ「14 PS-4600 U 形」が 3月10日から発売されている。

 月賦正価
 至 54,900 (12 回払)

 発売時期
 3 月 10 日

 月産台数
 5,000 台

#### 圖特 長

(1) 木目の美しい最高級 ウォールナット 材を使用した デラックス な ポータブル オールチャネルテレビ である。

(2) Uチューナ は, スライドインジケータ を使用しているので選局が簡単にできる。

(3) スイッチオンとともに画面と音がでるインスタントオン回路を採用している。

(4) 超高性能集積回路(IC)を使用しているので、故障率は大幅に減少した。

(5) チャネル ごとに一回だけ微調整を行なえば再調整のいらない電子頭脳 (MFT) を採用している。

(6) 高性能 シリコントランジスタ を重要回路に 86.5% も使用しているので高感度となり,

すぐれた性能が持続できる。

```
(7) イヤホーンポケット がついているので,イヤホーン や ヒューズ の スペァ などのしまい忘れ,
```

置き忘れの心配がなくなった。

#### 圖定 格

受信方式	インターキャリア 方式 VHF 1~12 ch UHF 13~62 ch
アンテナ	外部 アッテナ 300 Ω
	自蔵 <sub>ロッ</sub> ドァ <sub>ンテナ</sub> 75 Ω
電 源	交流 100 V 50/60 Hz
消費電力	30 W
スピーカー	ダイヤトーンスピーカー1個 8×12 cm だ円形
音声出力	1.3 W
ブラウン 管	直角14形
真空管	1 球
集積回路	1 個
半 導 体	39 石
外形寸法	幅 471×高さ 328×奥行 240 mm
重量	11.5 kg



14 PS-4600 U 形 テレビ

# 新製品紹介

#### 維持費ゼロの画期的な新製品三菱除鉄器 IF-30 形-------

井戸水にかなけ(鉄分)が含まれていると……

(1) 不快な味・臭いがある。

(2) 洗たくすると白地のものが黄色くなる。

- (3) ふろの タイル などが赤くよごれる。
- (4) 衛生上飲料に不適である。
- (5) 水が濁る。

など日常生活がまったく不愉快になるが、三菱除鉄器は、このかなけを薬品や電気などを 使用しないで除去するまったく新しい方式の除鉄器である。

家庭用水だけでなく, 事務用・学校・一般工場・病院・養魚・クリーニング・レストラン など 広い用途に使用できる。

#### ■ 仕 様

形	形名			IF-30			鉄	作皆	力	20 ppm 以下		
re .			入	Ц	۱B		167	br.		10	20	30 l/min
			出		斑	ÐL 0.1 0.4 0.8 kg/cm <sup>4</sup>						
		Ē	排	水	1 B	最	大	流	鼠		/min	
			k	レン	1 B	3	過	能	力	5	/1,000	mm まで
耐	水	Æ		6 kg/cm <sup>2</sup>			-Ba	重	獄		9(	lkg
直結	直結できるポンプ 250 W 以下											

備考) 1 ppm とは水 1 l 中に鉄分が 1 mg を含む量をいう.

#### ■ 性 能

Ī			つぎの成分の鉄分 20 ppm までを 0.3 ppm 以下に						
Contraction of the second s	除	鉄	<ul> <li>         重 炭 酸 第 − 鉄         ・くみあげたときは透明でも放置すると濁ってくる。         ・洗たく物やタオルなどが着色し、お茶が紫色になる。         ・洗たく物やタオルなどが着色し、お茶が紫色になる。         ・</li> </ul>						
And and a support of the local division of t			水 酸 化 第 二 鉄 ・くみあげたときは白く,または赤く濁っている. (上記鉄分のどれかと共存する場合が多い)						
	3	過	水中の異物, 濁りなどの固形物, (5/1,000 mm まで)を除去できる.						

注) つぎのような場合は三菱除鉄器は使用できないので、据付け前に必ず調べる必要がある.

木の PH が 5~9 の範囲外にあるとき。

(2) PH 5~9の範囲内でも多量の炭酸ガスを含む場合。

(3) 木にいおうの奥気(どぶ臭い)があるとき,その他異常な臭いがある場合.

(4) 有機鉄(紅茶のような色がついている場合は一般に有機鉄が含まれている.とくに泥炭地域に多い.)およびコロイド鉄(白濁している場合.1日放躍しても変化しない水は一般にコロイド鉄を含んでいる.)

[福岡製作所]



図1 IF-30形 除鉄器



現金定価 49,800 円

月賦定価 53,800 円



# NEWS FLASH

三菱2点切り SFL 形単一圧力式ガスしゃ断器---

当社では十年以上前から SF<sub>6</sub>  $f_{JZ}$  による  $r-\rho$  の吹消しについて研究を続けてきた 努力 が実を結び,昭和40年には二重圧力式のしゃ断電流 50kA 大容量  $= j_{J-J}(SFH \mathcal{B})$  とし て、72kV 5,000 MVA から 550 kV 45,000 MVA に至るしゃ断器の系列が実用化され, ひきつづき単一圧力式  $f_{JJ,T}$  方式の中容量 72/84 kV 3,500 MVA,同じく 120 kV 5,000 MVA (SFL  $\mathcal{B}$ ) が完成した。SFH 形はすでに 80 台,SFL 形は 200 台実用運転に入り関 係需要家の好評を得ている。

今回形式試験を実施するものはこの単一圧力式 SFL 形消弧室を2個直列につなぎ,168 kV 7,500 MVA,204 kV 10,000 MVA,240 kV 10,000 MVA,300 kV 15,000 MVA,定 格電流2,000/3,000 A としたもので,このたびの形式試験によって,ガスしゃ断器の系列と して SFH 形大容量 シリーズのほかに,72 kV 3,500 MVA から300 kV 15,000 MVA の SFL 形中容量 シリーズが完成したことになる。

このしゃ断器は  $5 \text{ kg/cm}^2$  程度の SF<sub>6</sub> ガス を封じ切りにしておき、可動 コンタクト と連動し て動く パッファピストン によって ガス 流を発生させ、r-ク を ノズル 部で消弧させるというきわ めて簡単な構造の採用により、 SF<sub>6</sub> ガス の絶縁および消弧能力をもっとも能率よく利用し たしゃ断器で、つぎのような特長があげられる。

(1) 簡単な構造ときわめてすぐれたしゃ断性能

消弧室は ノブル と パッファピストン だけという非常に簡単な構造で、しかも キロメートル 故障, 脱調しゃ断など、過酷な条件でのしゃ断に対してすぐれた性能を示す。 (2) 低騒音

しゃ断時に ガスを外部に放出することがないため、爆発音が全くない。したがって都心 や人家に近い屋外に設置されても騒音に対する心配は皆無である。

(3) 良好な絶縁協調

SF<sub>6</sub> ガス中の電流さい断レベルは著しく低く、変圧器励磁電流のようなおくれ、電流のしゃ断に対しても有害な異常電圧は発生しない。

(4) 縮小された外形寸法

SF<sub>6</sub> ガス 消弧室を使用しているので、120 kV までは一点でしゃ断でき、300 kV でも2 点と従来の空気しゃ断器に比べてはるかに少ないしゃ断点ですみ、大容量の圧縮空気発生 装置も不要であるから、据付面積はきわめて小さくなる。

(5) 良好な耐震特性

頭部の消弧室が軽量であり、補強がいしの支持方法も十分な耐震試験の結果を検討のう え設計してあるので、今まで起こったいかなる地震にも十分耐える強度をもっている。

(6) 容易な保守点検

しゃ断点が従来の空気しゃ断器の半分ないし四分の一であり、 コンタクト の消耗が非常に 少ないので,保守点検の手数が省け,点検問隔も長くとれる。

(7) 高い安全性

SF<sub>0</sub> ガス は無害無臭で化学的にきわめて安定かつ不活性であり、 生理的に安全であることはもちろん、不燃性であり、むしろすぐれた消火剤として知られているもので、屋内用しゃ断器として、もちろん安心して使用できる。

最近,変電所機器全体を母線とともに SF<sub>6</sub> ガス 中に入れて寸法縮小をはかろうというい わゆる ガス 絶縁変電所が実用化の段階にはいり,ガス しゃ断器はこれら絶縁媒体と同一気 体を消弧にも使用する点からも非常に有利であると考えられ,海外では従来空気しゃ断器 を主力製品としていた メーカー も漸次 ガス しゃ断器にきりかえつつある現状である。また,

SFL 形単一圧力式ガスしゃ断器

NEWS FLASH ZI-KZZZZ NEWS FLASH ZI-KZZZZ

国内においても、 SF<sub>6</sub> ガス 中 r-クの消弧に関する基本特許が 44 年 1 月中旬に効力を失な った関係もあり、各 メーカー とも ガス しゃ断器発売の準備を進めているとみられ、ガス しゃ 断器はますます普及される情勢にある。 当社の ガス しゃ断器は、このたびの中容量 SF シリーズの完成によって、大容量 SFH シリ ーズ とともに、現在需要のあるすべての定格を網羅できるようになった。 これらによって、 従来よりも一段と広く顧客の要求にこたえることが可能となり、ガス しゃ断器の普及にい っそうの拍車がかかるものと考えられる。

[伊丹製作所]

## 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 ===

ブラウン 管の ソリッド 化という ことは テレビメーカ の一つの夢であったが、当社では、このほど中央研究所において EL (エレクトロルミネッセンス)発光板を用いて映像しうる"ブラウン 管のない テレビ"を試作し、商用の テレビ 放送を受像することに成功した。

EL 板は 10 数年前 アメリカ で開発された新しい照明方法で、 わが国でも表示装置や面照 明に用いられてきたが、EL 板を用いて テレビ 放送を受像したのは世界でも初めての こ と である。

従来から EL 板は輝度が低く、テレビの受像には適さないとされていたが、当社では長年 にわたるけい光物質および EL 板製作法の改良研究により、輝度を飛躍的に増大させると ともに、さらに回路にも特殊なメモリーを導入してけい光体の発光時間を伸ばすことに成功 した。その他当社技術分野の総合結集がこの成功をもたらした。

映像板は XY マトリックス 電極(一方は透明) でサッドイッチ 状をした EL 板であり, テレビの 映像信号が メモリー 回路を通して,その電極に印加され,信号に応じて XY の交点が順次 発光して映像を結ぶようにしてある。

当社では今度の試作成功を足がかりとし、さらに画面寸法の拡大や、鮮明度の増大、コ スト 低減を意図するなど、 商品化研究を他の方式の研究とともに継続する計画である。

今回試作に成功した性能はつぎのとおりである。
 映像面寸法 100×75 mm
 解 像 度 80×80本
 明 る さ 5 FL
 階 調 5 段階の判別可能





[中央研究所]

# 本社・営業所・研究所・製作所・工場所在地

 $\mathbf{i}$ 

P

社	東京都千代田区丸の内2丁	目12番	地(三菱電機ビル)		100)	(電)	東京(03	3)212局 6111	番
---	--------------	------	-----------	--	------	-----	-------	-------------	---

本 社	東京都千代田区丸の内2丁目12番地(三菱電機ビル) (西	00)(電)	東京(03)212局 6111番
	十原本华冈桥田野鸟来华(市原体化生)	(377-530)	(雷) 大阪(06) 312局 1231番
天 阪 宮 耒 所		(350) (37.450)	(電) 2古屋 (052)561局 5311番
名占座名朱所		(@ 810)	(雷) 福 岡 (092) 75局 6231番
他问名未川		(研 852)	(雷) 長 崎 (0958)23局 6101番
女 呵 <b>山 </b> 坂 川 七 覘 逆 巻 武	文 呵 川 え 准 一 0 番 14 う 1 認 吉 北 2 冬 而 4 丁日 1 番 地 (北 海 道 ビ ル)	(〒060-91)	(雷) 札 幌 (0122)26局 9111番
机脱名采用		(〒 060)	(電) 札, 幌 (0122)23局 5544番
化忧土场	他 会 志 士 町 A 丁 目 175 番 地 (新 仙 台 ビ ル)	(= 980)	(電) 仙 台 (0222) 21局 1211番
(山) 古 未 /) 宮 山	同一一一个小小小小小小小小小小小小小小小小小小小小小小小小小小小小小小小小小小	(  930)	(電) 富山(0764)31局 8211番
亩 山 占 未 M 広 良 党 業 所	面 田 冊 役 ホ 50 ~ 面 20 5 広 島 市 中 町 7 番 32 号(日本生命ビル)	(〒730)	(電) 広島(0822)47局5111番
岡山出張所	岡山市西長瀬字村北122番地の1(三菱電機岡山ビル)	(	(電) 岡山(0862)24局0331番
高松堂業所	高松市鶴屋町5番地の一	(760)	(電) 高 松(0878)51局 0001番
東京商品営業所	東京都千代田区丸の内2丁目!2番地(三菱電機ビル)	(  100)	(電) 東(京(03) 212局 6111番
中央家電営業所	東京都千代田区丸の内2丁目12番地(三菱電機ビル)	(- 100)	(電) 東(京(03) 212局 6111番
城北家電営業所	東京都文京区大塚 3 丁目 3 番   号 (新 茗 溪 ビ ル)	(  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)	(🐨 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)	( 🐨 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	(  232)	(電) 横 浜(045)251局 2226番
大宮家電営業所	大 宮 市 寿 能 町 I 丁 目 37 番 地(大宮公園ビル)	( 🐨 330)	(電) 大 宮(0486)41局 5324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)	(ᡂ 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I	(     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	( 🐨 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)	( 🐨 450)	(電) 名古屋(052)561局 5311番
静岡出張所	静 岡 市 七 間 町 9 番 地 の 10 (池 田 ビ ル)	(1 420)	(電) 静 岡(0542)53局 9186番
福 岡 商 品 営 業 所	福 岡 市 天 神 2 丁 目 12 番 I 号(天 神 ビ ル)	(3810)	(電) 福 岡(092) 75局 6231番
札 幌 商品営業所	札幌市北2条西4丁日1番地(北海道ビル)	(〒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)	(😇 980)	(電) 仙 台 (0222)21局 1211番
富 山 商品営業所	富 山 市 桜 木 町 I 番 29 号	(硬 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)	(壺 730)	(電) 広島(0822)47局5111番
岡 山 出 張 所	岡山市西長瀬字村北122番地のI(三菱電機岡山ビル)	(壶 700)	(電) 岡山(0862)24局 0331番
高松商品営業所	高 松 市 鶴 屋 町 5 番 地 の I	(1 760)	(電) 高 松 (0878) 51局 0001 番
新潟営業所	新 潟 市 東 大 通   丁 目  2 番 地 (北 陸 ビ ル)	(  950)	(電)新潟(0252)45局2151番
中央研究所	尼 崎 市 南 清 水 字 中 野 80 番 地	(35661)	(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	(  247)	(電) 鎌 倉(0467)46局 6111番
—————————————————————————————————————		(〒 652)	(雷) 袖 豆 (078) 67局 5041番
一种 产 娶 1F 所 一	一种 / · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	(∞ 661)	(雷) 大 阪 (06) 491局 8021番
		(〒669-13)	(雷) 三田(07956)局 4371~5番
— 円 工 物 長 峙 則 作 斫		(37850-91)	(電) 長 崎 (0958)23局 6211番
超限製作所	稲 沢 市 井 之 口 町 1100 番 地	(〒 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) 和歌山(0734)23局 7231番
鎌倉製作所	鐵 倉 市 上 町 屋 325 番 地	(3 247)	(電) 鎌 倉(0467)46局     番
通信機製作所	尼 崎 市 南 清 水 字 中 野 80 番 地	(1 661)	(電) 大 阪(06) 491局 8021番
北伊丹製作所	伊 丹 市 大 鹿 字 主 ヶ 池 I 番 地	(     664)	(電) 伊 丹(0727)72局 5131番
熊 本 工 場	熊 本 市 竜 田 町 弓 削 720 番 地	(3 862)	(電) 熊 本(0963)62局 72日番
名 古 屋 製 作 所	名 古 屋 市 東 区 矢 田 町 I8 丁 目 I 番 地	( 🐨 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	(西819-01)	(電) 福岡今宿(09295)6局0431番
福山製作所	福山市緑町   番 8 号	(     720)	(電) 福 山(0849)21局 3211番
姫 路 製 作 所	姫 路 市 千 代 田 町 840 番 地	(क 670)	(電) 姫 路(0792)23局  25 番
相 模 製 作 所	相 模 原 市 宮 下 I 丁 目 I 番 57 号	(  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 I 番 I5 号	(壶 154)	(電) 東 京(03) 414局 8111番
静岡製作所	静岡市小鹿 110 番地	( 🐨 420)	(電) 静 岡 (0542)85局     番
中津川製作所	中 津 川 市 駒 場 町 I 番 3 号	(🐨 508)	(電) 中津川 (05736)5局 2121番
大 船 製 作 所	鎌倉市大船5丁目1番1号	(壶 247)	(電) 鎌 倉(0467)46局6111番
郡 山 製 作 所	郡 山 市 栄 町 2 番 25 号	(  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	(〒370-04)	(電) 太 田 (0276) 22局 4311番
藤岡工場	藤岡市本郷字別所 1173 番地	(     375)	(電) 滕 尚 (02742) 2局 1185番
京都製作所	□ 京都府乙訓郡長岡町大字馬場小字図所丨番地 □ □ は → ★ ま ↓ □ → B → 20 平 世	( ( 100 617 ) · ·	(電) 京都四山(U/5)921局4111番
フジオエ場	尼哈市南 滨水子 甲野 80 番 地	( 🐨 bb   )	(电) 入 阪 (Ub) 491 局 8U21 審



三菱電機技報 Vol. 43. No. 5.

生活の快適化特集

## 《特集論文》

1. 基礎編		○ 深夜電力利用電気温水器
○ 文化生活と健康		○ 電気衣類乾燥機
○ 皮膚の美容と電気器具の利用		○住宅用照明器具
○住宅設備の問題点と将来		○ 家庭用理容機器(回転機応用品)
○ 快適な空調		○ 家庭用理容機器(電熱応用品)
○音と生活		○ 脈拍数計(ハートペット)
○ 住宅照明における快適性の追求		○ 三菱医学用テレメータ装置 PT-270 形
○ 暮らしと色彩		《普通論文》
2. 機器編		○ 加速管(平析形) および Einzel 形収束 Lens 内に
○ 住宅の冷暖房システム		おける電位分布および荷電粒子軌道(II)
○ 冷水温水による住宅冷暖房機器		○ 静止形電圧調整継電器(変圧器制御用)
○ 冷暖房用ポンプ		○ 大電力スイッチング用サイリスタ
○ 家庭用ファンコイルユニット		○ 高エネルギー電子ビームモニタの特性
○ 住宅用ルームクーラ		○ マイクロ波プリント基板
○ 換気扇		○ 三菱大容量クレーンモートル
○ 深夜電力利用蓄熱暖房器		
	<b>苯 雨 檪 井 却</b>	炉 佑 禾 吕 스
<b>—</b>	炎 电 依 仅 取	福 朱 安 貝 云

委員長	小	倉 弘	毅	겉	官任委	溳	鈴	木	正	材
副委員長	片	岡 高	示		"		祖	父之	[ 晴	秋
常任委員	明	石	精		"		IЦ	田	栄	-
"	石	川理	+		"		樹	Ц		茂
"	上	田重	夫	君		員	尾	火田	雷	行
"	字	佐 美 重	· 犬		"		北	垣	成	
"	大	野 寛	孝		"		南	Ε	達	郎
<i>!!</i>	神口		邇		"		林	昇		寿
"	北	川『和	人		"		松	元	雄	蔵
"	小	堀富次	雄		"		和	田	義	勝
								(山)	上 50 著	[順]

昭和44年4月22日印刷 昭和44年4月25日発行「禁無断転載」 定価1部金100円(送料別)

編集氵	兼発行	人									
東京都千代田区丸の内2丁目12番地							小	倉	弘	毅	
ED	刷	所									
	東京	都新	宿区市谷	<b>〉加賀町</b> (	1 丁目 1 (郵	2 番地 便番号:	162)	大日	本印吊	川株式	会社
ELI	刷	者									
	東京	都新	宿区市谷	加賀町	1 丁目 1:	2 番地		高	橋	武	夫
発	行	所									
	東京者	<b>祁千代</b> 日	田区丸の内	习2丁目1	2番地(	郵便番号	<b>芬</b> 100)				
			三 菱	電機	株式	会 社	内	ſΞ ∄	慶 電 梼	幾技執	₹社」
							(電)(0	3) 212 局	6111番	(内線)	2498)
発	売	元									
	東京	都千日	代田区神	田錦町	301	(郵便番	号 151)	株式会	会社 オ	ーム社	書店
							(電	) 03-291	-0912	辰替東京	10018