

MITSUBISHI DENKI GIHO

三菱電機技報

Vol. 47 July 1973

電子加速器/半導体特集

7

三菱ML-15M II B形 医療用ライナック





電子加速器／半導体特集

目次

《電子加速器特集》

小形医療用 ML-3 MB 形ライナックの性能

藤田彪太・長井俊彦・上富 勇・金沢正博・朝井克治・光森弘之… 683

小形工業用 ML-1 R 形・5 R 形ライナックの実用性能

藤田彪太・鈴木敏允・上富 勇・中北喜一郎・塩田 勝・桑垣範行・建石昌彦… 689

線形電子加速器用定在波形加速管の実用化研究… 入江浩一・美濃和芳文・沢田 進… 696

電子線照射装置ダイヤトロン DP-300 および DP-600

藤田彪太・上田和宏・建石昌彦・永井昭夫・広 三寿… 700

電子線による各種プレポリマの重合硬化… 鈴木康弘・角田 誠・菅野俊行・柴山恭一… 707

《半導体特集》

高耐圧プレーナ形サイリスタ… 杉岡八十一・梶原康也・山根正熙・小嶋鈴夫… 715

車両用大電力素子… 船川 繁・須川嘉幸・釜原紘一・宮嶋辰夫・川上 明… 719

安定化抵抗を有する直線増幅用高周波高出力トランジスタ

楠 和郎・亘 善彦・広瀬芳彦・西岡 直・竹内正晴・山口哲成… 724

カメラ用 IC… 大久保利美・早水弘一・山根 聰… 729

ROM 方式電卓用 MOS/LSI… 山田憲正・岩田泰昌… 733

ガスプラズマ技術の IC 製造への応用… 阿部東彦・園部幸夫・榎本龍弥… 737

MOS 構造へのイオン注入… 河津 哲・野村幸司・渡壁弥一郎・堀江和夫・赤坂洋一… 741

すず拡散による高周波トランジスタの特性向上… 中村源四郎・行本善則・亘 善彦・堀江和夫・赤坂洋一… 746

《普通論文》

熱陰極電子ビーム溶接機… 秋葉稔光・小浜太郎・奥田淹夫・大峯 恩・原 且則… 755

オーストラリア NSW 州鉄道納め 2,200 HP ディーゼル電気機関車用電気機器… 平尾新三・鈴木敏夫・古田俊久・桑村勝美・森島守人… 763

MELCOM 7500 を用いた国際電信電話(株) AUTOMEX システムの開発と試験… 坂 和磨・藤間孝雄・太田 元・飯川昭一・田窪昭夫… 771

新雷観測レーダーシステム… 西本一成・有川弘朗・近藤輝夫・山本悌三… 778

《技術解説》

拡散炎における悪臭の発生原因とその機構… 草川英昭・藤永 弥… 785

《技術講座》

超音波探傷試験法(1)… 松山 宏… 791

《新製品紹介》… 797

新形三菱エアハンドリングユニット・大形パッケージエアコン PF-100F/120F・新形“三菱クーラントポンプ” JEM シリーズ完成

《ニュースフラッシュ》… 800

ケーブル故障検出装置・関西電力(株)下小鳥発電所納め、146,000 kVA 水車発電機運転開始・漁船用全自動省力化冷凍機

《特許と新案》… 713・753

負荷開閉駆動回路・双向性半導体スイッチ・回転伝達機構・テープレコーダ・やぐらこたつ

表紙 1 三菱 ML-15M II B 形 医療ライナック

従来、ガソの放射線治療機器として、コバルト装置、ベータトロン等が使われてきたが、最近そのX線出力の大きいことで、医療用ライナックが脚光をあびてきている。写真は三菱 ML-15M II B 形医療用ライナックで、最高エネルギー 15 MeV、しかも X 線および電子線の両面治療ができることで好評を得て、すでに各地の病院等で治療に貢献している。

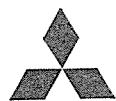
ML-15M II B 形ライナックは、マイクロ波源に三菱大電力クリストロン PV-2012 W を使用しており、その出力エネルギーおよび安定度はもちろん、治療技術の多様性およびその操作の容易なことが大きな特長である。

表紙 2 三菱ポータブル超音波探傷機

表紙 3 O. S. システム 700 三菱エレベータ

表紙 4 三菱非破壊検査用ライナック





**SPECIAL EDITION : (1) ELECTRON ACCELERATORS
(2) SEMICONDUCTORS**

CONTENTS
SPECIALLY COLLECTED PAPERS (1)

Performance of Compact Clinical LINAC Model ML-3 MB	..... H. Fujita • T. Nagai • I. Uetomi • M. Kanazawa • K. Asai • H. Mitsumori	683
Performance of Compact Industrial LINAC Model ML-1 R and 5 R	..... H. Fujita • T. Suzuki • I. Uetomi • K. Nakakita • M. Shiota • N. Kuwagaki • M. Tateishi	689
Practical Use Study on Standing-Wave Structure for Linear Electron Accelerator	..... K. Irie • Y. Minowa • S. Sawada	696
Electron Accelerators DIATRON Model DP-300 and DP-600	..... H. Fujita • K. Ueda • M. Tateishi • A. Nagai • S. Hiro	700
Electron Beam Curing of Prepolymers	..... Y. Suzuki • S. Tsunoda • T. Sugano • K. Shibayama	707

SPECIALLY COLLECTED PAPERS (2)

High Breakdown Voltage Planar Type Thyristors	..... Y. Sugioka • Y. Kajiwara • M. Yamane • S. Kojima	715
Recent Power Semiconductors for Electric Rolling Stock	..... S. Funakawa • Y. Sugawa • K. Kamahara • T. Miyajima • A. Kawakami	719
Emitter Balanced RF Power Transistor for Linear Application	..... K. Kusunoki • Y. Watari • Y. Hirose • T. Nishioka • M. Takeuchi • T. Yamaguchi	724
IC for Camera Use	..... T. Ôkubo • K. Hayamizu • S. Yamane	729
MOS/LSI with Program ROM for Desk Top Calculator	..... N. Yamada • Y. Iwata	733
Application of Gas Plasma to the Fabrication of Semiconductor Integrated Circuits	..... H. Abe • Y. Sonobe • T. Enomoto	737
Ion Implantation to MOS Structure	..... S. Kawazu • K. Nomura • Y. Watakabe • K. Horie • Y. Akasaka	741
Improvement in High Frequency Characteristics of Transistors by the Diffusion of Tin Atoms	..... G. Nakamura • Y. Yukimoto • Y. Watari • K. Horie • Y. Akasaka	746

TECHNICAL PAPERS

Hot Cathode Type Electron Beam Welders	..... T. Akiba • T. Ohama • T. Okuda • M. Ômine • K. Hara	755
Electrical Equipment of 2,200 HP Diesel Electric Locomotive for N. S. W. Government Railways	..... S. Hirao • T. Suzuki • Y. Furuta • K. Kuwamura • M. Morishima	763
Development and Test of the KDD AUTOMEX System	..... K. Ban • T. Fujima • H. Ôta • S. Iikawa • A. Takubo	771
Thundercloud Warning System	..... K. Nishimoto • H. Arikawa • T. Kondo • T. Yamamoto	778

TECHNICAL EXPLANATION

The Formation Mechanisms of the Malodorous Gases at the Diffusion Flame H. Kusakawa • W. Fujinaga	785
---	---------------------------------------	-----

TECHNICAL LECTURE

Ultrasonic Testing (1) H. Matsuyama	791
------------------------	--------------------------	-----

NEW PRODUCTS
NEWS FLASH
PATENT AND UTILITY MODEL
COVER :
Clinical LINAC Model ML-15 M II B

As a means to make use of high energy radioactive for the medical treatment of cancer, up to the present, cobalt-60 and betatrons have been in use, but recently LINAC for medical use has come in the limelight because of its high X-ray output in action. The picture shows Mitsubishi ML-15 M II B LINAC capable of operating for the treatment with both 15 X-rays and electron beams and with maximum energy of 15 MeV. Being favorably commented, a number of the sets have been operating in various hospitals and so on to contribute to the cure of the disease.

For the microwave source of M-15 M II B LINAC, is used a Mitsubishi High Power Klystron PV-2012 W and ML-15 M II B LINAC has distinctive features of its large output various therapeutic techniques and easy handling not to speak of its large output and stability.

「三菱電機技報」アブストラクト

UDC 621.384.63:616-78

小形医療用ML-3 MB形ライナックの性能

藤田彪太・長井俊彦・上富 勇・金沢正博・朝井克治・光森弘之
三菱電機技報 Vol.47-No.7-P683~688

コバルトとほぼ等価的なエネルギーをもち、しかも焦点サイズが小さく、X線出力の大きな医療用ML-3 MB形ライナックを製品化した。

新しく開発した定在波形加速管を採用しているため、装置はコンパクトであり、しかもX線出力は非常に安定している。

この装置の性能はX線エネルギー4 MVであり、最高X線出力は治療台天板上で350R/minである、すぐれた平たん(坦)度をもっている。

さらに、ライナックヘッドにシミュレータを設置し、同一治療台を使って照準が行なえることこの装置の特長の一つである。従来に比べより正確な治療が期待できる。

UDC 621.384.64:620.192

小形工業用ML-1R形・5R形ライナックの実用性能

藤田彪太・鈴木敏允・上富 勇・中北喜一郎
塙田 勝・桑垣範行・建石昌彦
三菱電機技報 Vol.47-No.7-P689~695

工業用ライナックは先に大形のML-15R形を製品化したが、この装置はX線エネルギーが12 MeVと高く、したがって厚鋼板の検査には適しているが、薄鋼板の検査では欠陥識別能が落ち、さらに低いエネルギーの装置が望まれていた。今度新しく製品化したML-1R形・5R形ライナックはX線エネルギーがそれぞれ900 keV、3 MeVであり薄鋼板の検査には最適である。しかも、前者は最高15R/min-m、後者は300R/min-mのX線出力(連続使用)をもつため、検査時間の短縮に役立ち、さらに、装置がコンパクトであり、可搬性に富んでいるため現地溶接時の検査作業が容易に行なえる。

UDC 621.372.4:621.384.64

線形電子加速器用 定在波形加速管の実用化研究

入江浩一・美濃和芳文・沢田 進
三菱電機技報 Vol.47-No.7-P696~699

長さ約30cmの側面結合形と約13cmのπモード形加速管とを、Sバンド(3 GHz)線形電子加速器用に試作し、その性能を測定した。小電力試験では、前者で 1.76×10^4 の無負荷Q、97MΩ/mの実効並列インピーダンスを、後者でそれぞれ 1.5×10^4 、46MΩ/mを得た。後者で、実効並列インピーダンスが予想よりも小さかったのは、試作した加速管の境界条件のため、πモードが励振されなかつたためと思われる。電子加速実験の結果は、いずれも加速管の平均実効並列インピーダンスは、電子の走行角効果の不適切のため、小電力試験の結果よりも小さかった。電界強度30 MV/m、外部集束なしに電子ビーム径2mm以下が得られた。

UDC 621.384.65

電子線照射装置ダイヤトロンDP-300およびDP-600

藤田彪太・上田和宏・建石昌彦・永井昭夫・広 三寿
三菱電機技報 Vol.47-No.7-P700~706

化学工業での放射線利用に適した放射線源として、電子線照射装置ダイヤトロンDP-300A(B)およびDP-600A(B)の性能、構成、各部の機能を詳述している。高電圧の発生は、DP-300では貫通CT形昇圧方式、DP-600では高周波コッククロフト形昇圧方式によっている。また、据付に便利なように寸法・重量・必要設備もまとめて示している。ダイヤトロンから取り出された電子線の特性として、電子線取出窓下での空間線量分布、物質中の線量分布、背面材質の表面部線量におよぼす効果について、豊富なデータを付し、利用者が最適な照射方法を考察する。

UDC 667.645:541.6:667.633

電子線による各種プレポリマの重合硬化

鈴木康弘・角田 誠・菅野俟行・柴山恭一
三菱電機技報 Vol.47-No.7-P707~712

電子線塗膜硬化法は、無溶剤形塗料による橋かけ硬化塗膜を加熱することなく、高速硬化させうるなど潜在的に多くの特長を有しており、無公害で塗装作業の合理化と安全性を飛躍的に向上しうる未来技術として大きな注目を集めている。この技術がクローズアップされた背景には、低エネルギーで高出力の電子線加速器の発達におよぶるところが大きい。一方、電子線用塗料はラジカル重合機構によって硬化するものであり、電子線に適した高性能の塗料開発が重要なポイントと考えられる。ここでは電子線用塗料の分子設計という立場から、キュアリング効率におよぼす諸要因について考察した。

UDC 621.314.6

高耐圧プレーナ形サイリスタ

杉岡八十一・梶原康也・山根正熙・小嶋鈴夫
三菱電機技報 Vol.47-No.7-P715~718

量産性にすぐれたプレーナ形サイリスタの著しい需要の伸びとともに、プレーナ形サイリスタの高耐圧化が望まれていた。

プレーナ接合形状、拡散技術および表面処理の工夫などにより、0.3A 400Vと2A 400Vの高耐圧プレーナ形サイリスタが開発され、その応用面の拡大とともに、生産量も日増しに増加しつつある。

高耐圧プレーナ形サイリスタは、すぐれた電気的特性と高い信頼性をもっている。この高耐圧プレーナ形サイリスタは、一般民生用機器はもちろんのこと、一般産業用機器にも広く使用されるであろう。

UDC 621.314.6

車両用大電力素子

船川 繁・須川嘉幸・釜原紘一・宮嶋辰夫・川上 明
三菱電機技報 Vol.47-No.7-P719~723

大電力用半導体素子の高耐圧化、大電流容量化は、これらの素子の応用される各分野において、装置の小型軽量化、信頼性の向上をもたらした。

車両への応用においては、その高速化、高効率化を達成するうえで、特にその効果は大きい。

ここでは、最近実用化された大電流容量のダイオード・サイリスタ・逆導通サイリスタの特長、定格と特性およびそれらの車両への応用について紹介する。

UDC 621.382.3

安定化抵抗を有する直線增幅用 高周波高出力トランジスタ

楠 和郎・亘 善彦・廣瀬芳彦・西岡 直・竹内正晴・山口哲成
三菱電機技報 Vol.47-No.7-P724~728

テレビ難視聴対策として、無線放送中継装置の設置が進められており、現在、UHF 30W出力まで全固体化装置が実用化されている。このような無線放送中継装置には、広帯域低ひずみ直線增幅特性を持たせる必要があり、直線增幅用トランジスタの出現が切望されている。

当社では、ニクロム薄膜から成るエミッタ安定化抵抗を導入し、直流破壊耐量を増大せしめ、混変調ひずみ特性を大幅に改善したトランジスタ2SC1530、2SC1510、2SC1206B、2SC1207Bを開発したので、これらトランジスタに関する設計、製造技術および特性について紹介する。

「三菱電機技報」アブストラクト

UDC 771.313:621.375.024:621.377:621.382

カメラ用IC

大久保利美・早水弘一・山根 聰

三菱電機技報 Vol.47・No.7・P729～732

最近、カメラの高級化をねらってシャッター時間を無段階に制御する電子シャッター回路が中級機はもちろん、高級機である TTL一眼レフカメラにも導入されるようになってきている。

筆者らは、この制御回路の IC 化に数年前からカメラメーカーとの共同開発により取り組んできたが、今般その開発に成功した。

本論において、これら IC の IC メーカ側より見た技術的問題点として、
1) 低電圧・低電流動作の回路設計、2) この回路設計をささえる新ウエハプロセス、3) カメラ用 IC の高信頼パッケージ等を取りあげ、その開発上の問題事項を概説した



のち、カメラ用 IC の将来性の一端に触れたい。

UDC 621.382

ROM方式電卓用MOS/LSI

山田憲正・岩田泰昌

三菱電機技報 Vol.47・No.7・P733～736

マイクロ プログラミング方式を採用した電卓（電子式卓上計算機）用 L S I を設計開発した。仕様の変更は、L S I 内部の R O M の内容を変更することにより行なう。この方式を採用することにより、多種多様な仕様をもつ電卓用 L S I を標準化する道を開くとともに、L S I の開発期間を $\frac{1}{2} \sim \frac{1}{3}$ に短縮することができる。

電卓を構成する L S I の機能プロックおよび、マイクロ インストラクションについてその概要を記述する。



UDC 621.382

ガスプラズマ技術の IC 製造への応用

阿部東彦・園部幸夫・榎本龍弥

三菱電機技報 Vol.47・No.7・P737～740

CF₄ガスプラズマによるシリコン、およびシリコン化合物のエッティング機構はほとんどわかっていないが、CF₄は反応管内で高周波電界により励起され、一部ふつ素ラジカル (F*) となり、このF*がシリコンあるいはシリコン化合物と反応するラジカル化学反応と思われる。そのエッティング量は反応管内の温度変化等により、見かけ上、エッティング時間に対して指數関数的に変化する。シリコンおよびシリコン化合物のエッティング特性は、Si>Si₃N₄>SiO₂のエッティング量の差があり、この差をうまく利用した IC 製造への応用は、従来の化学薬品（ふつ酸・りん酸等）の



場合の欠点を改善するのにすぐれた方法であることがわかった。

UDC 621.382.3.012

MOS構造へのイオン注入

河津 哲・野村幸司・渡壁弥一郎・堀江和夫・赤坂洋一

三菱電機技報 Vol.47・No.7・P741～745

イオン注入法を用いて作成した M O S ゲイオードの特性を新しい C-V 測定法である Pulse Scanning C-V 法で測定し、さらに M O S トランジスタの電気特性と対比させた。

¹²C⁺注入により表面準位が生じ、V_{FB}の移動がおこるとともに、室温で 1 イオン当たり、100 holes/s. のジェネレーション センタが発生した。400°C の熱処理で V_{FB}は注入前の値に一致したがジェネレーション センタの消滅には、700～900°C の熱処理が必要であった。

多量のイオン注入時また



は高温度での熱処理時には注入イオンの拡散効果を考慮する必要がある。この現象は C-V 特性、しきい値電圧、および実効移動度に大きな影響を与える。

UDC 628.515:628.52

すず拡散による高周波トランジスタの特性向上

中村源四郎・行本善則・亘 善彦・堀江和夫・赤坂洋一

三菱電機技報 Vol.47・No.7・P746～751

拡散導入したすずのおよびすエミッタ押出し効果への影響について報告する。ドープド オキサイド法によるすず拡散を、ボロンベース拡散、りん-エミッタ拡散に先立って行なった。エミッタ押出し効果は、すず濃度の増大とともに減少し、すず・ボロン・りんの各拡散条件を選択することによって、エミッタ吸い出し現象を起こしたトランジスタ構造の作成が可能になった。上記現象は、りん拡散によって発生した過剰空孔が優先的にすずの増速拡散に消費されたために、ボロンベース不純物への影響が低減したことによると推測される。すずを用いて、エミッタ押出し



効果をなくしたトランジスタでは、高周波特性の向上が観察された。

UDC 621.791

熱陰極電子ビーム溶接機

秋葉稔光・小浜太郎・奥田滝夫・大峯 恩・原 且則

三菱電機技報 Vol.47・No.7・P755～762

わが国では初めてのボルト形の陰極を採用した熱陰極電子ビーム溶接機を開発したので、その装置の概要およびこの試作機を用いて行なった溶接実験の結果について紹介する。

ボルト形の熱陰極は、熱電子を発生するボルト状の陰極をそのままわりに配置したフィラメントにより間接的に加熱するため、従来の方式にくらべて電極の寿命が 5 倍以上長くなる。また、陰極部をカセット化することにより、ビーム形状の再現性を高めている。

試作機を用いた溶接実験



では良好な溶接結果が得られた。

UDC 625.282-833.6

オーストラリア NSW 州鉄道 納め 2,200HP ディーゼル電気機関車用 電気機器

平尾新三・鈴木敏夫・古田俊人・森島守人・桑村勝美

三菱電機技報 Vol.47・No.7・P763～770

当社は、このほど 2,200HP クラスのブラシレス交流発電機／整流器式ディーゼル電気機関車の電気式動力伝達装置・制御装置などの電気機器を設計・製作し、NSW 州鉄道に納入した。このシステムは、主発電機のブラシレス化による保守の軽減、フランクショーバーの除去、動力伝達効率の改善などが期待できる。

現有機関車との重連運転、主回路および制御回路の簡単化、標準制御器の採用、力行および発電ブレーキの制御に 2 界磁巻線を有する交流励磁機の採用、現有機関車の機器との互換



性など、種々の特長ある設計を行なっている。このシステムは、大出力の機関車の動力伝達装置として発展が期待される。

UDC 681.3.004:621.395:34 (049) Others

MELCOM-7500 を用いた国際電信電話システムの開発と試験

坂 和磨・藤間孝雄・太田 元・飯川昭一・田窪昭夫

三菱電機技報 Vol.47・No.7・P771～777

国際電信電話株式会社が本年 3 月より国際オードメックス サービスと呼ばれるメッセージ自動交換サービスを開始した。

AUTOMEX システムは MELCOM-7500 電子計算機システムの二重系で構成され、ソフトウェアには MELCOM-RTCS が使用されている。本報告では我々が AUTOMEX システムのソフトウェアの開発と試験を通じて試みた種々の試験方法について述べる。



「三菱電機技報」アブストラクト

UDC 621.396.969.551.508.8:551.594

新雷観測レーダ システム

西本一成・有川弘朗・近藤輝夫・山本悌三

三菱電機技報 Vol.47・No.7・P778~784

昭和46年度より実用機として、田端系統給電指令所においてか(様)動してきた雷観測レーダシステムは、開発のための試験機をほとんど手を加えないでそのまま利用してきたため、実用に際しては若干の性能上の不足があり、またレーダ設置場所の地理的制約からその改善が求められていた。

一方、昭和47年末に東京電力側本店ビルが新築され、これにともない多目的な無線用鉄塔が設置されたのを機会に、雷観測レーダシステムを新規に製作し、本店に移設した。新システムは性能上の改善および最近の進歩した部品材料等を大幅にとり入れたもので ○ あり、また設置場所の特殊性から据付工事には細心の注意を払った。

UDC 628.515:628.52

拡散炎における悪臭の発生原因とその機構

草川英昭・藤永 弥

三菱電機技報 Vol.47・No.7・P785~790

拡散炎をもつ石油ストーブの排気ガスは、しばしば悪臭を発生することがある。一般に燃料とその熱分解によってできる炭化水素は、定常状態の火炎中で燃焼されている。

しかしながら、火炎やドラフト空気の流れが何かでみだされると、火炎外に燃焼系中の活性化学物質が出ることがある。また、低熱源が火炎の近くに存在すれば燃焼反応を弱めることにもなり、これらが悪臭ガス成分を生成する一原因となっている。

この報告は、拡散炎とドラフト空気の流線の関係から悪臭発生メカニズムを解析し、石油ストーブのバーナ改良について検討を加えたものである。

UDC 534.8-8:681.89

超音波探傷試験法(1)

松山 宏

三菱電機技報 Vol.47・No.7・P791~796

この講座は、超音波探傷について理解を深めてもらうとともに、この探傷分野にたずさわる技術者の参考に供することを願ったものである。なお、この講座は、6回にわたって連載を予定しており、その内容は次のとおりである。

- (1)……超音波探傷の基礎
- (2)……超音波探傷試験法の使い方
- (3)……超音波探傷に関する規格
- (4)……超音波探傷装置および探触子の構造
- (5)……超音波探傷の実際, ○ その1
- (6)……超音波探傷の実際, ○ その2

小形医療用 ML-3 MB 形ライナックの性能

藤田 彪太*・長井 俊彦*・上富 勇
金沢 正博*・朝井 克治*・光森 弘之*

Performance of Compact Clinical LINAC Model ML-3 MB

Communication Equipment Works Hyota Fujita・Toshihiko Nagai・Isamu Uetomi
Masahiro Kanazawa・Katsuji Asai・Hiroyuki Mitsumori

Clinical LINAC model ML-3 MB with an energy of almost equivalent value to radiocobalt yet a small focussing size and a large X-ray output has been brought to regular production. A newly developed standing wave type accelerating tube being in use, the new device is compact and stable in the X-ray output. It has performance of delivering 4 MV X-ray energy and the maximum output on the table top of treatment couch is 350 R/min, thus the flatness of the characteristic being excellent.

A simulator can be attached to the LINAC head so as to aim a patient by using the same treatment couch. This is one of the features of the device. Much more accurate clinical operation is anticipated with this development.

1. まえがき

わが国ではここ数年来、高エネルギー放射線治療装置としてライナックが普及し一般化してきた。当社においても、いち早くエネルギーが6 MeV、および15 MeVの治療装置の製品化を進め、数多くの病院で使用され、がん治療に大きく貢献している。しかしこれらはいずれも装置が大型であり、操作および維持が容易であるというものの専門的技術を必要とするため、治療に専念される一般の病院ではまだ相当数がコバルト治療装置にとどまっているのが現状である。

今度新しく製品化された ML-3 MB 形 小形医療用 ライナックはエネルギーがコバルトとほぼ等価的であり、装置全体がコンパクトであり、またコバルト治療装置と比較して焦点サイズが小さく半影が少ないこと、X線出力が大きいこと、さらに照準時にX線漏えい(洩)が皆無であること等多くの特長をもつ画期的な製品である。

この装置には当社で新しく開発した定在波形加速管を採用しているため加速管長は短く、従来の電子ビーム偏向方式をやめて直進形としたためX線出力の安定度はさらに良くなっている。

その他、従来治療の位置合せのため、照準装置を別室に設置するのが普通であったが、この装置では照準装置も同時に組込み、治療に機動性を持たせるとともに、経済的に安くなるよう考慮がはらわれている。同一の治療台で照準するため照準はより正確となり、治療効果がますます増大するものと期待できる。

以下この装置の構成、性能および医用データの一部をご報告する。

2. 装置の構成

ML-3 MB 形 ライナックは大きく分けて加速器本体部(電子線加速系、X線発生部、冷却装置、電源部、本体駆動系およびシミュレータ部)、シミュレータ用高圧電源、治療台、ペディカルおよび制御卓より構成されており、図2.1にこのブロック図を示す。

2.1 加速器本体部

加速器本体部は機構的には固定部と回転部に分けられ、固定部は回転部の支持台、パルス変調器、冷却装置、回転駆動用モータとその電源、ケーブル巻取装置などを含み、回転部にはパルストラ ns、マグネットロン、立体回路系、電子銃、加速管、X線発生部、X線シールド、X線

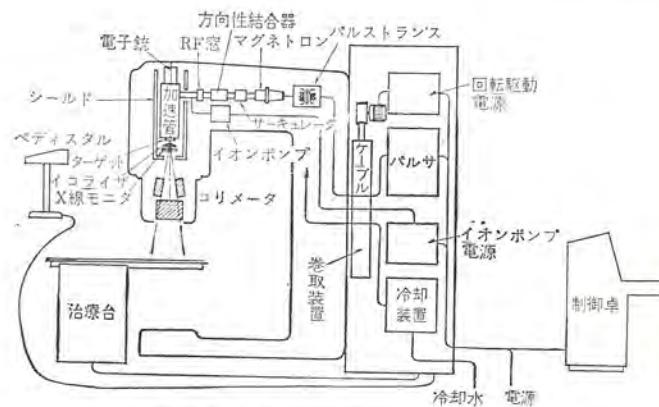


図 2.1 ML-3 MB 形 ライナックブロック図
Block diagram of ML-3 MB LINAC.



図 2.2 加速器本体部外観
General view of clinical LINAC model ML-3 MB

コリメータ、真空系、冷却配管系、シミュレータ装置およびこれらの保持部(ガントリ)から構成されている。図2.2に本体部の外観を示す。以下に順をおって各部の説明を記述する。

(1) 電子線加速系

パルス変調器のパルス出力 8 kV 500 A を 2 種類の二次巻線を有するパルストラ ns を通じて 40 kV 90 A および 17 kV 0.5 A のパルス電力に変換し、前者はマグネットロン M 190 駆動用 IC、後者は電子銃駆動

用に利用する。電子銃から 18 keV のエネルギーをもつて放射された電子線はマグネットロンから方向性結合器、サーチューレータ、RF 窓を通じて供給されたマイクロ波電力との加速管内の相互作用の原理によって加速され、加速管出口において 4 MeV のエネルギーになる。

電子銃は含浸形カソードを有する 2 極管で非常に小形化され、また加速管はサイドカップル定在波形高能率加速管で、両者を合わせてわずか 36 cm の長さとなっている。したがって電子銃、加速管は治療用 X 線の方向と平行に配置できるため、従来の医療用ライナックのようなビーム偏向系を必要とせず安定な X 線出力を得ることができる画期的なシステムである。

他に加速管、ターゲットなどを冷却するための冷却配管、立体回路系の絶縁耐圧を上げるための加圧配管、X 線漏えい線量を抑えるための X 線シールドがある。

(2) X 線発生部

加速管において 4 MeV に加速された電子線は X 線ターゲットに衝突し、X 線を発生する。この X 線はイコライザで平たん化され X 線コリメータで任意の照射野の大きさに絞られ、ターゲットから 80 cm の位置 (アイセンタ) において 350 R/min の出力となる。イコライザの後に組込まれた透過形 X 線モニタで X 線線量率をモニタし操作卓に配置された照射線量プリセットカウンタで照射線量をプリセットすることができる。

加速管として新開発の定在波形を採用しているので X 線焦点の大きさは約 1 mm ϕ となっており、また加速された電子ビームは X 線と同軸方向であるため、線量率・平たん度の安定度は非常に良く従来のライナックに使用されている平たん度自動制御回路は全く不要で、システムが非常に簡単になっている。

(3) 電源部

電源部はパルス変調器、本体回転駆動電源およびイオンポンプ電源等から構成され、本体部の支持わく内に冷却装置とともに組込まれており、非常に小形化されている。パルス変調器はライン形で加速器本体部に取付けられているパルストラ ns を通して、マグネットロンに -40 kV、電子銃に -17 kV のパルス電圧を供給しており、せん頭出力 4.0 MW、デューティ 1.5/1000 である。このパルス変調器の特長は、安定した X 線出力が得られるよう、デイキューイング回路を設け出力パルス電圧を安定化していることにある。このデイキューイング回路はチャージングチョークの二次巻線にサイリスタを接続し、その点弧位相を調整して PFN 電圧を安定化する方法で特にリーケージインダクタンスの少ないチャージングチョークを用いて入力電源電圧の変動およびパルス繰返し周波数の変化による電源のレギュレーション等の変動を最大 1/8 に圧縮している。また、高電圧整流素子の半導体化も特長の一つで装置の小形化・高信頼化に大きく寄与している。

本体駆動電源は本体を 0.5 rpm で回転させるためのもので電動機は出力 390 W で特に低慣性のミルスマートルを採用し、停止精度をあげている。

加速管を高真空中に保つためのイオンポンプ電源は昼夜運転され、放電等の負荷短絡にも保護回路が設けられており、必要に応じて操作卓でも真空度を観測できるようになっている。

(4) 本体回転駆動系

加速器本体回転部は本体固定部に取付けられ、床上 130 cm の水平軸のまわりに -190° ~ +190° の範囲で 0.5 rpm の速度で回転することができる。この回転軸の固定は 2 点支持となっているので回転中の回転中心 (アイセンタ) のずれは ± 2 mm 以内に納まっており、

経年変化はほとんどない。アイセンタとターゲットの距離は 80 cm で、このターゲットと同一円周上 ± 50° の位置に照準用シミュレータが取付けられ、治療および照準に便利なように両者の自動復帰機構が組込まれてある。またライナック自身によるライナックグラフィが行なえるようターゲットと対角の位置にフィルムカセットホルダを取付けることができる。

さらに建家シールドを少なくするためターゲットの対角の位置に X 線主線錐を 1/1000 まで減衰するような鉛対向板も取付けられている。

この本体を回転するためのモータは固定部に設置され、SCR 制御方式をとっている。

(5) シミュレータ部

シミュレータ部はライナックターゲットと同一円周上 +50° の位置に取付けられた最大 150 kVp 300 mA 5 sec の出力を有する X 線管、照射野を決定するタングステンリードおよび照射野格子目、さらに -130° の位置に取付けられた 6" イメージインテンシファイアからなる。これらはいずれも制御卓から 12" TV モニタを見ながらリモートコントロールすることができる。

2.2 シミュレータ用高圧電源

シミュレータ用高圧電源は治療室すみ(隅)に設置され 150 kVp 300 mA 5 sec; 125 kVp 500 mA 5 sec; 120 kVp 4 mA 連続なる性能を有する。この高圧出力は高圧ケーブルにて本体固定部ケーブル巻取装置を経由して本体回転部のシミュレータ X 線管に供給される。

2.3 治療台

治療台は X 線治療とシミュレーションの両目的に合致した性能を有するように設計された二重回転式で、アイセンタ回りの回転は -110° ~ +110°、支持脚中心での回転は -180° ~ +180° 手動で動かすことができる。さらに上下移動は床上 85 ~ 130 cm、前後移動幅は 32 cm、左右移動は -10 ~ +10 cm いずれもペディタルを使って電動で行なうことができる。また制御卓にも移動スイッチが配置され遠隔操作もできる。したがって患者のシミュレーションは XTV モニタをしながら行なうことが可能である。

2.4 ペディタル

このペディタルは治療台附近に配置され床面を自由に動かせる構造となっていて、この盤面に配置されているスイッチ類は本体回転スイッチ、コリメータ開閉スイッチ、フィールドランプ、デブスマインタ ON-OFF スイッチ、ライナック、シミュレータ自動復帰スイッチ、治療台前後、左右、上下移動スイッチ、ウエッジフィルタ 1 2 3 入スイッチ、シミュレータ用フィールドランプ ON-OFF スイッチ、遠隔操作切換スイッチおよび非常停止スイッチである。

したがって治療室での患者の照準はすべてこのペディタルで行なうことができる。

2.5 制御卓

この制御卓は X 線照射、ライナックグラフィ、シミュレーションという三つの機能を有し、図 2.3 に示すとく操作性の高いレイアウトでコンパクトにまとめられている。また見誤りやすい表示文字等を極力少なくして特に工夫をこらした象形文字を大幅に採用し、使いやすさを第 1 に考慮した制御卓である。

ライナック制御用としては全電源投入スイッチ、照射開始スイッチの操作のみで安定した X 線出力が得られる。照射線量は盤面に設けられたデジタル積算線量計によってパルスコントロールされる。また、照射野を設定するコリメータ制御スイッチおよび表示器や本体を任意の位置に設定する回転制御スイッチ、自動復帰スイッチ、自動回転スイッチ、本体回転角度表示器等によって全く制御卓のみでコントロールできるよ



図 2.3 制御卓外観
External view of control console

うになっている。ライックグラフィは時間計によってタイムコントロールされる。安定したX線出力が得られるよう種々の自動制御回路があり、高性能のオペレーションナルアンプや集積回路を駆使して高信頼化をはかっている。この自動制御回路としては AFC(自動周波数制御)回路、ADC(自動線量率制御)回路があり、AFC回路はマグネットロンの発振周波数を制御して加速管に供給されるマイクロ波電力を一定に保ち、ADC回路は出力X線によって電離された電流を線量モニタから取り出しパルス繰返し周波数にフィードバックして電離電流すなわち出力X線を一定に保つためのものである。その他この電離電流を増幅する微少電流増幅回路、A/D変換回路、トリガ発振回路等がありおののプリント基板にまとめられている。

シミュレータ制御用としては、撮影用X線制御ダイヤルとX線テレビジョンを一列に並べて配置しており、ワンマンコントロールが可能で、撮影および透視条件に適したX線管電圧と電流を任意に設定できる。ま

たX線管コリメータの開閉回転および自動復帰スイッチも設けられており、シミュレータとしての高い操作性と機能を有している。

さらに患者の姿勢監視用として工業用テレビジョンが設けられており、インターフォン、BGMとともに安全でしかも患者・医師の立場に基づいて設計された装置といえる。

2.6 建家

ML-3 MB 形ライナックは従来のコバルト60装置と同等のシールド室に設置できるように設計された非常にコンパクトな装置であるため、治療室床面積は約 30 m²、コンクリート壁厚さ 65 cm と少なくて済み経済的である。

図 2.4 に建家の一例を示す。

2.7 付帶設備

ライナックに必要な付帯設備は次のとおりである。

(1) 電 源	AC 200 V $\pm 10\%$ 3 ϕ 10 kVA(ライナック用) AC 200 V $\pm 10\%$ 1 ϕ 30 kVA(シミュレータ用) AC 200 V $\pm 10\%$ 1 ϕ 1 kVA(イオンポンプ用)
(2) 接 地	第1種アース
(3) 冷却水	10 l/min, 25°C 以下, 2.5 kg/cm ² 以上 井水または市水
(4) 周囲条件	室温 25°C $\pm 5\%$, 湿度 70% 以下

3 装置の性能

3.1 X 線線圖

X線線量率は焦点から 0.8 m の位置で直径 28 cm の照射野内を平坦化した場合、最高 350 R/min-0.8 m が得られた。X線の線量率の可変は、加速管に入るマイクロ波のパルス数を変えて行なっている。

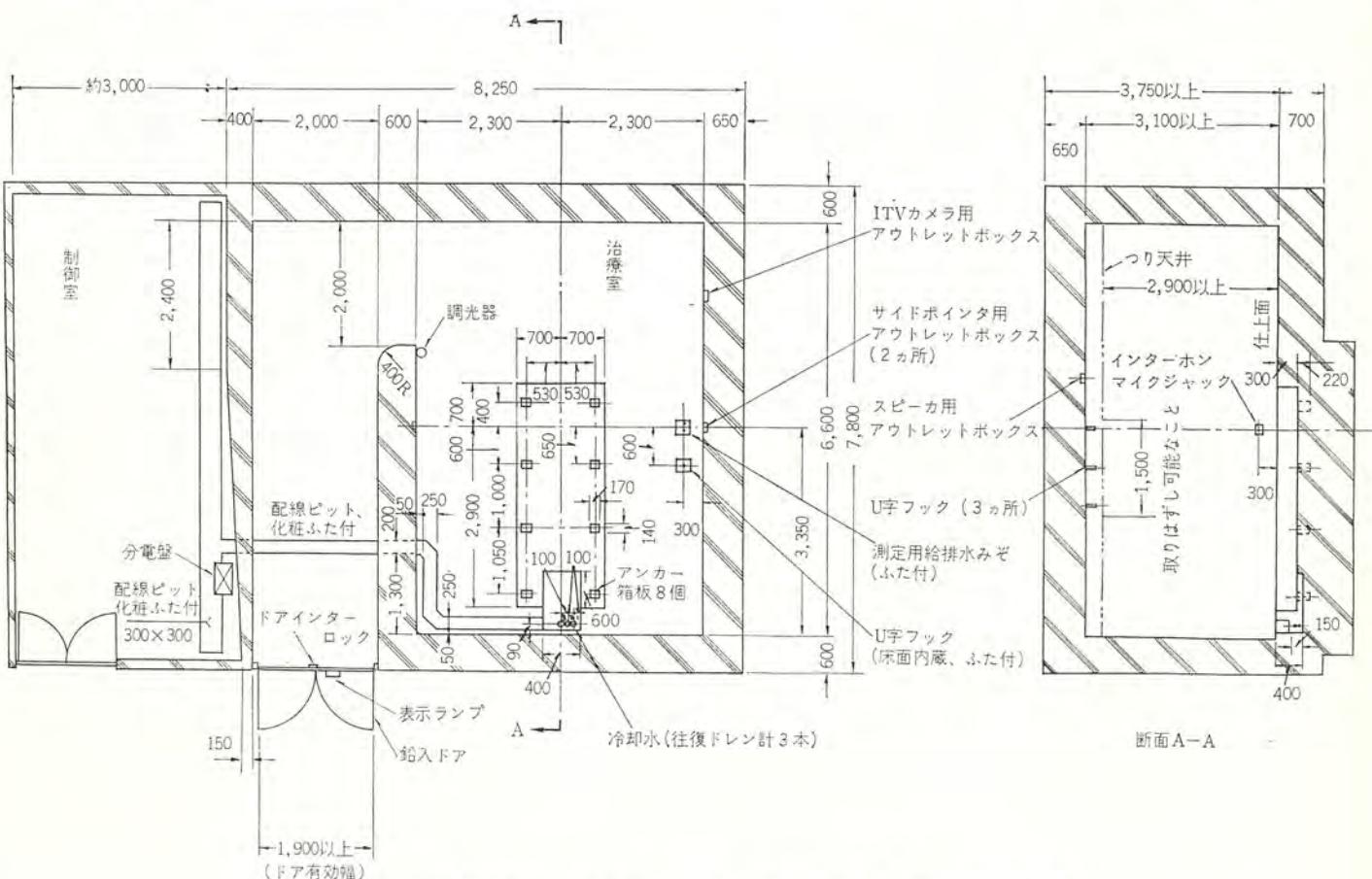


図 2.4 ML-3 MB ライナック 建家図

Building design of ML-3 MB LINAC

X線の線量率設定に対する焦点から 0.8 m での X線の線量率は、図 3.1 に示した。X線線量率の測定には Radocon 線量計を用い、プローブは Radocon 607 である。プローブには二次電子平衡が成立するようなアクリルキャップをかぶせた。測定に使用した Radocon 線量計は Co-60 照射装置で校正した。

3.2 X線エネルギー

X線のエネルギー (X線の最高エネルギーをさすものとする) は、X線ターゲットをたたく電子線のエネルギーで決めた。ターゲットをたたく電子線のエネルギーの測定は、まずターゲットを取り除き Al フォイルを取付け、窓として電子線を空気中に取出し、それを積み重ねた Al 板に入射させて、その飛程から求めた。測定結果は図 3.2 である。今電子線のエネルギーを E とし、Al 中の電子の飛程 $R_P(g/cm^2)$ は、 E を MeV 単位で表わせば、

$$R_P = 0.53E - 0.106$$

で表わされる。この式から求めた電子線のエネルギーは 3.95 MeV であった。

3.3 電子加速特性

電子加速特性に関する電子銃、加速管のテスト結果を述べる。

(1) 電子銃

本装置の電子銃は前述のごとく、小形化、high perviance を要求され、I カソード、ピアス形とし空間電荷制限領域で使用するように設計した。その結果完成された性能は下記のとおりである。

(a) 電子銃の高さ	約 60 mm
(b) アノード電圧	17 kV
(c) エミッショントン電流	380 mA (peak 値)
(d) アノード透過率	90 %

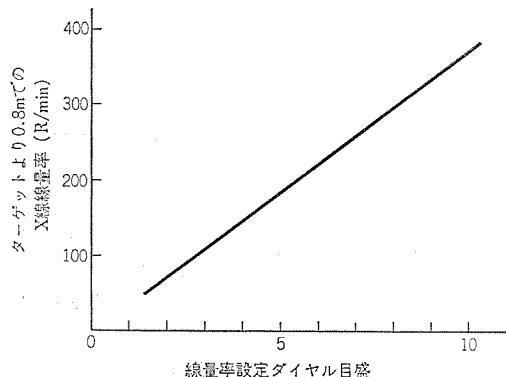


図 3.1 線量率設定ダイヤルに対するターゲットより 0.8 m での X線線量率
X-ray output vs. dial setting

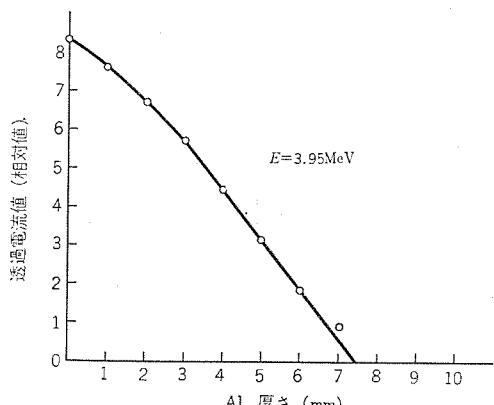


図 3.2 電子飛程曲線
Curve of electron range.

(e) 加速管入射ビーム径 約 2 mm ϕ

(2) 加速管

本装置に使用した定在波加速管の最終性能は次のとおりであった。

(a) $\frac{\pi}{2}$ モード共振周波数 $f_{\pi/2} = 2996.16 \text{ MHz}$

(b) 導波管との結合係数 $\beta = 2.5$

(c) Q 値 $Q_0 = 15 \times 10^3$

$Q_{ext} = 5.8 \times 10^3$

$Q_L = 4.2 \times 10^3$

(d) ストップバンド $\delta_f = -0.47 \text{ MHz}$

(e) 実効シャントインピーダンス $ZT^2 = 80 \text{ M}\Omega/\text{m}$

(f) 空洞間の結合係数 $k = 1.7 \times 10^{-2}$

以上の性能は設計仕様を満足するものである。本加速管の各種周波数特性を図 3.3 に示した。この図から、加速周波数を $\pm 100 \text{ kHz}$ にすれば、エネルギー、X線出力ともに $\pm 3\%$ 内におさまることがわかる。図 3.4 はビーム電流対出力エネルギーの関係図である。横軸の電流値は、電子銃印加電圧を変化させたものでビーム電流 95 mA 以下の Data は入射電圧が低くなり過ぎ、また導波管と加速管の結合係数が変化して満足なものが得られなかった。しかし最初から動作点を 10 mA 付近に選んでおけば、約 5 MeV の出力が得られるはずである。

3.4 X線線量率の安定度

X線線量率の安定度は焦点より 0.8 m のアイセンタの位置に Radocon 607 プローブをおき測定した。図 3.5 は ADC (自動線量率安定化回路) を働かせたときの X線線量率の時間安定度で、30 分間運転で $\pm 3\%$ 以内にはいっている。

3.5 X線線量率の立上り特性

図 3.6 は X線線量率の立上り特性である。立上り特性を良くす

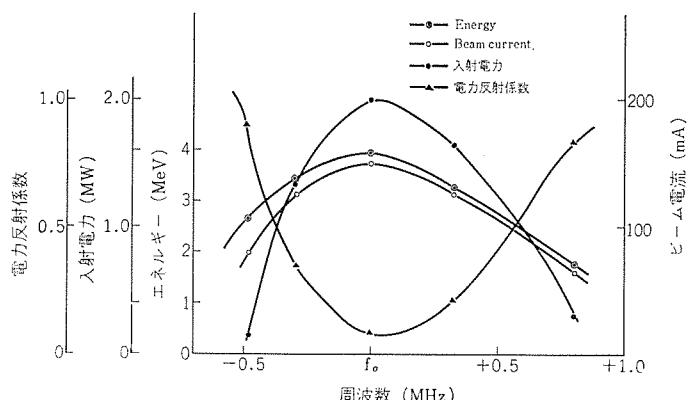


図 3.3 マイクロ波周波数によるビームエネルギー、電流およびマイクロ波電力の変化

Electron energy, current, and RF power change due to RF frequency shift

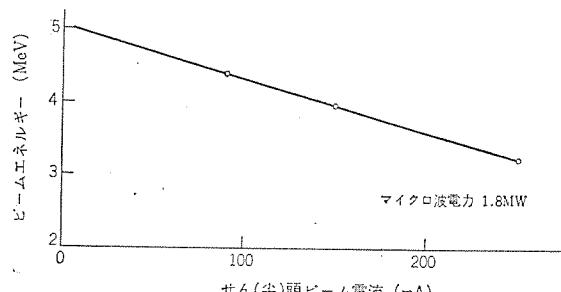


図 3.4 ビームローディング特性
Beam loading characteristics of electron energy

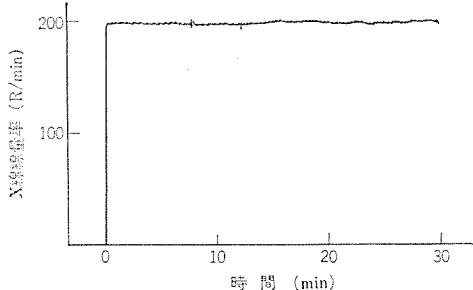


図 3.5 ターゲットより 0.8 m での X 線線量率の安定度
Stability of X-ray output.

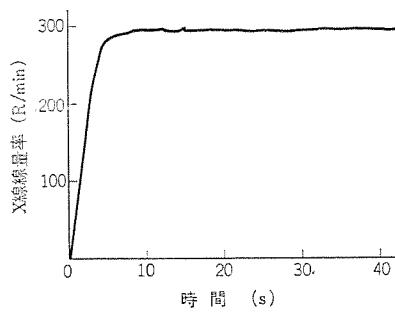


図 3.6 X 線線量率の立ち上り特性
Stability of dose rate, transient.

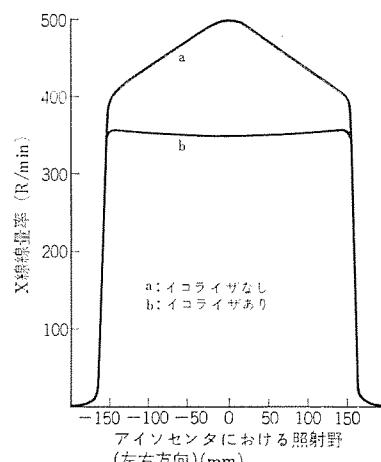


図 3.7 空中線量分布
Dose rate distribution.

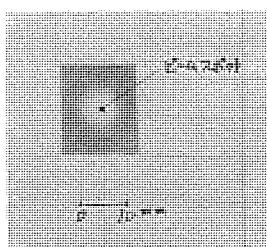


図 3.8 ビームスポット
Beam spot of 4 MeV electron beam.

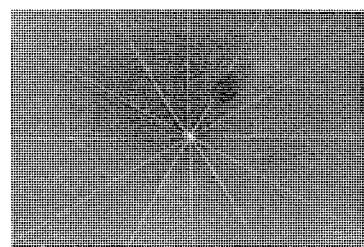


図 3.9 機械的精度
(アイソセンタの一致)
Radiograph showing isocenter

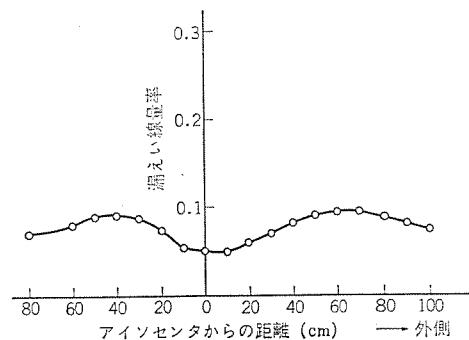


図 3.10 治療台上での漏えい線量率
Distribution of leakage X-ray on treatment couch.

4.2 ビルドアップ特性

シャローチェンバの上にポリスチレン（比重 1.00）板を積み重ねて測定したのが図 4.2 で表面線量率は最大値の 25% 程度であった。図中に 6 MV X 線のビルドアップも併記した。

4.3 等線量分布

図 4.3～4.5 に等線量測定例を示す。この測定は、Mix DT フィルムにフィルムをはさみ、フィルムの黒化度と、Radocon 線量計で測定した前述の深部率曲線から求めた。フィルムの等濃度分布は、SAKURA 自動等濃度プロッタを使って求めた。

5. むすび

小形医療用ライナック ML-3 MB の構成、性能、ならびに医用データについて報告した。従来の 360 度回転可能なライナックはすべて偏向磁石系により電子ビームを曲げて使用していたが、本ライナックはサイドカッパル形で定在波加速管を採用したことにより、偏向磁石系は不要になり、構成・構造は非常に簡単になった。一方 X 線出力性能等

るためには、応答のよい AFC と、加速管の温度上昇を低くすることであり、その設計に特に注意したが、一応目的は達成された。

3.6 X 線の照射野内の空中線量分布

焦点より 0.8 m のアイソセンタを含むビームと直角の面の空中線量分布を Radocon 線量計で測定した。イコライザにより、中心において約 30% カットした。図 3.7 は照射野を 30 cm × 30 cm に設定したときの X 方向の空中線量分布である。Y 方向の分布は X 方向と全く同じである。ビーム方向に対するこの対称分布は磁石系をいっさい使用せず、さらに磁気シールドを完全にしているためである。

3.7 X 線焦点の大きさ

X 線の焦点の大きさは X 線ターゲットをたたく電子線の広がりから求めた。図 3.8 はその広がりを示すもので、電子線のエネルギーを測定したと同様に空気中に電子線を取り出しこう紙を置いて焼いたもので約 1 mm ϕ の焦点径である。これは電子銃を含む入射系の性能が非常によいことを示す。

3.8 ライナックグラフィ

徳島県立中央病院納めの本ライナックは、前述のように、特別仕様としてライナックグラフィ装置がついており、SAKURA-NY タイプの X 線フィルムに 0.3 mm 厚の鉛スクリーンを用いた場合、約 1 R でフィルム濃度 2.0 となった。

3.9 機械的精度

ライナックの X 線焦点が小さい特長を生かし、位置決め装置による正確な位置決めを行なうためには、ライナック回転きょう（筐）体の回転中心のずれは小さい必要がある。図 3.9 は X 線をコリメータで細く絞って 45 度おきに 180 度回転させてフィルムに照射したものである。回転中心のずれは ±1 mm 以内にはいっている。

3.10 漏えい線量

漏えい X 線線量率は法律によりアイソセンタでの照射線量率の $\frac{1}{1000}$ 以下にする必要がある。また建家建築費を安価にすると同時に回転バランスをとるため、ライナック対向板を設け、装置から外部に出るすべての方向の線量率を $\frac{1}{1000}$ 以下とした。図 3.10 は漏えい線量率の測定結果である。

4. 医用データ

4.1 X 線深部率特性

深部線量率は Radocon 線量計で Radocon 607 プローブを水ファントム中で X 線方向に走査することによって求めた。図 4.1 は照射野 10 cm × 10 cm, 20 cm × 20 cm の深部特性を示す。4 MV のビルドアップ最大点は表面から約 10 mm 付近である。

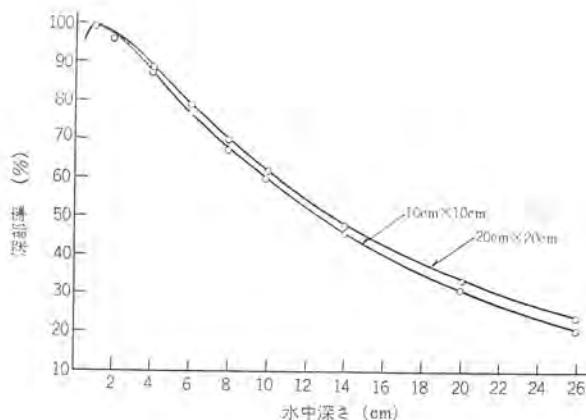


図 4.1 X 線深部率曲線
X-ray depth dose.

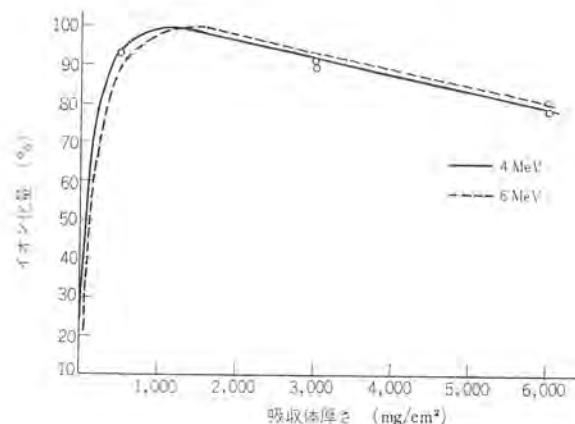


図 4.2 照射野 10 cm × 10 cm におけるビルトアップ曲線
Build up curve for 10 cm × 10 cm field at isocenter.

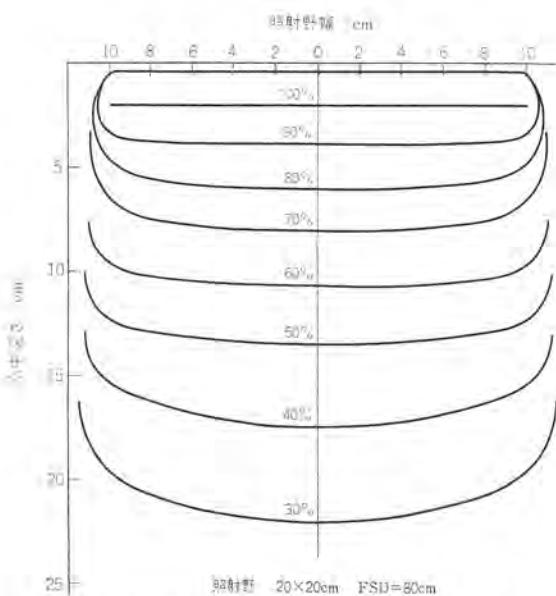


図 4.3 等線量曲線 (照射野 20 cm × 20 cm)
Isodose curves 20 cm × 20 cm.

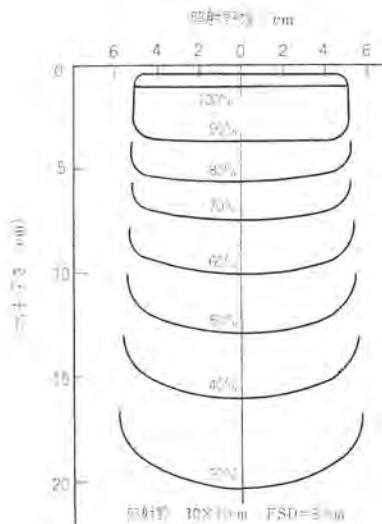


図 4.4 等線量曲線
(照射野 10 cm × 10 cm)
Isodose curves 10 cm × 10 cm.

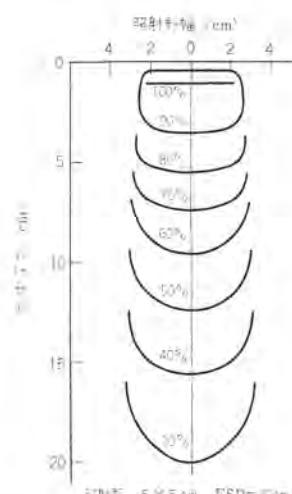


図 4.5 等線量曲線
(照射野 5 cm × 5 cm)
Isodose curves 5 cm × 5 cm.

医用データは、6 MV 級 ライナックに比較して、そんじょくなく、むしろ平たん度の安定性はよく焦点径も小さいので精度のよい治療が可能である。なお本装置は位置決め照準装置が組込まれ、一台の機械で患者を動かさずに位置決めと、治療を行ない非常に高精度の治療を可能とし、しかも治療床面積を節約した画期的な装置で、今後超高压X線治療界に貢献するところ大であると考える。

本装置の製品化にあたり、種々協力をいたいた島津製作所の関係者の皆様に深く感謝するとともに、本装置の企画、製品化に種々のご助言ならびにご協力を賜わりました徳島大学医学部放射線教室 河村文夫教授、徳島県立中央病院 放射線部 河野部長に深く感謝の意を表する。

(昭和 48-5-4 受付)

小形工業用 ML-1 R 形・5 R 形ライナックの実用性能

藤田 邦太*・鈴木 敏允*・上富 勇*
中北 喜一郎*・塩田 勝*・桑垣 範行*・建石 昌彦**Performance of Compact Industrial LINAC
Model ML-1 R and 5 RCommunication Equipment Works Hyota Fujita・Toshimitsu Suzuki・Isamu Uetomi
Kiichiro Nakakita・Masaru Shiota・Noriyuki Kuwagaki・Masahiko Tateishi

Industrial LINAC has made a debut recently by regular production of a large model ML-15R. This apparatus has so high an X-ray energy as 12 MeV, and is suited for the inspection of heavy steel plates. But applied to the inspection of light sheet steel, it has a poor flawsensitivity. A device with a lower energy has been demanded in this field. Model ML-1R and 5R LINAC newly worked out are rated to have the X-ray energy of 900 keV and 3 MeV respectively, the most well adaptable to light sheet steel. In addition, the former has an X-ray output of 15 R/min-m and the latter 300 R/min-m, which are good for cutting down of the exposure time. The compactness and portability of the units help to facilitate the inspection of welding at the job site.

1. まえがき

当社では放射線透過検査の線源として、先にML-15R形工業用ライナック⁽¹⁻⁴⁾を製品化し、そのすぐれた安定性と、最高5,000 R/min-m以上という世界最大のX線出力によって、原子力圧力容器や化学プラント用圧力容器の超厚物の溶接部検査に威力を発揮している。しかし最近特に需要の多い船用ボイラや橋りょう(梁)等の中間厚物以下の鋼板の検査に対しては、この装置ではX線エネルギーが高過ぎるため欠陥識別能の点で難があり、したがってさらに低いX線エネルギーをもつ工業用ライナックが望まれていた。

最近、新しく開発、製品化したML-5R形⁽⁵⁾、ML-1R形⁽⁶⁾小形工業用ライナックは、X線エネルギーがそれぞれ3 MeV、900 keVであり、しかもX線出力が最高300 R/min-m、15 R/min-mと大きいため上記の中間厚物以下の鋼板の溶接部検査には最適である。

特にX線エネルギー900 keVのライナックは世界最低のエネルギーであり、Portableであるため、現地溶接時の検査に適している。

以下に、これら小形工業用ライナックの構成、および性能等について報告する。

2. 小形工業用ライナックの構成

2.1 ML-1 R 形 ライナック

この装置は大別して、1) 加速器本体部、2) 電源部、3) 制御部および、4) 移動台車から構成されている。これらの各部は現地作業が容易にできるようケーブル類や冷却ホースの着脱が簡単な構造となっている。以下に各部の概要を述べる。

(1) 加速器本体部

加速器本体部には電子銃、パルスランス、加速管、排気装置、X線発生部およびマグネットロン部が組込まれている。パルスランスでそれぞれ、-70 kV、および-40 kVのパルス電圧を発生し、それぞれ電子銃およびマグネットロンのカソードにパルス高電圧を印加する。電子銃から-70 kVの電圧で予備加速された電子ビームは、加速管内でマグネットロンから供給される約800 kWの高周波の電界の波にのり加速管の中を走る間にしだいに速度を上げて加速管の出口において900 keV

のエネルギーとなる。この電子ビームは電磁レンズで集束され1 mmΦ以下の径でターゲットに衝突しX線を発生する。このX線の空間分布はほぼ等方的であるので、平たん(坦)化用フィルタを通さず直接モニタ線量計のヘッドを通過し被検査物に照射される。照射X線量はモニタ線量計で連続的にモニタされ制御器盤面上に表示される。

電子銃はカソードに真空度の影響の少ないI形カソードを用いたビアス形二極管で空間電荷制限領域で使用しビームの集束性のよい構造となっているので、電子銃を出た後の集束系が非常に簡単になっている。

加速管は進行波形で、モードとしては2/3πモードを使用しており、マイクロ波せん(尖)頭電力約800 kWで、長さ約15 cmで900 keVのエネルギーが得られる。

マグネットロンはML-1 R用に開発したせん頭出力800 kWのマグネットロンで、周波数2,998 MHzで使用している。マグネットロンで得られた大電力マイクロ波は立体回路を通して加速管に送られるが、マグネットロンの発振の安定化をはかるため立体回路にアイソレータを入れかつ標準空洞を設け自動周波数制御回路を用いた。

加速器本体部は、X線の発生のおそれのある所は照射野以外鉛シールドを施し、照射野以外の漏えい(洩)X線量を極端に少なくし、現地検査で使用しても放射線防護が簡単になるようにした。さらに加速器本体部は専用の移動台車により水平面内を移動できるほか上下移動・水平回転・垂直回転ができる構造になっている。図2.1はML-1 Rライナックのブロック図である。図2.2はML-1 Rライナックの加速器本体部である。

(2) 電源部

電源部はパルス変調器、イオンポンプ電源および電磁レンズ電源等から構成されており、図2.3がその外観である。この電源部は非常にコンパクトで、運搬には数本のケーブルをはずすだけで容易にできる。

パルス変調器はせん頭出力1.2 MWでマグネットロンおよび電子銃に、それぞれ-40 kV、-70 kVのパルス電圧を供給している。パルス幅は5 μsでパルス繰返し周波数は230 pps一定である。このパルス変調器はライン形で出力パルス電圧はメイントラスの一次巻線タップを切

換えて調整でき、最小5%である。この調整方式は最も簡単な方法であり、特に過酷な使用および運搬条件を考慮して採用している。またサイラトロン等を除いてすべて半導体化しており小形化とともに高信頼化をはかっている。

従来の装置では、パルス変調器の高電圧部は油絶縁としていたが運搬を容易にするため、乾式とし全体の重量を軽くしたことも大きな特長である。

(3) 制御器

従来のライナック制御器はライナック装置特有の複雑な制御回路が必要で大きなものが多く、ほとんどがディスクタイプのものであった。しかしML-1R形ライナックの制御器はICやオペレーションアンプを駆使してわずか3枚のプリント基板と数個のリレーで従来の性能を出すことに成功したので、図2.4に示すごとく非常にコンパクトに仕

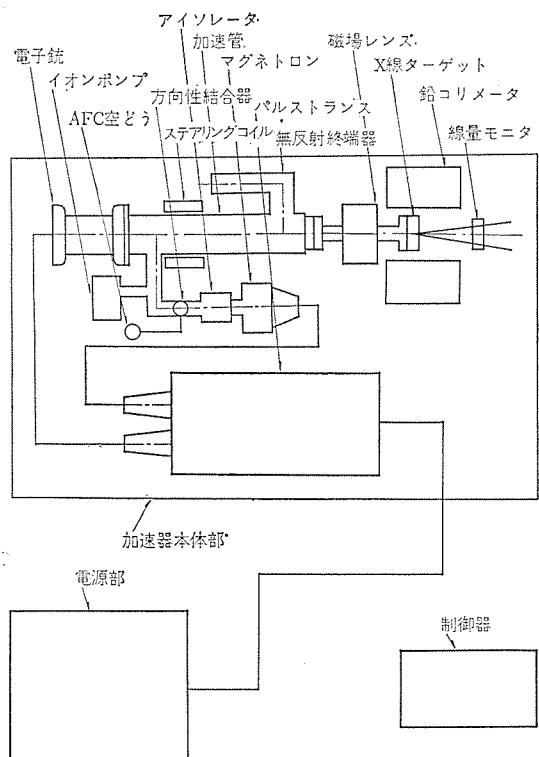


図2.1 ML-1R形ライナックブロック図
Block diagram of ML-1R LINAC.



図2.2 ML-1R形ライナック加速器本体部
Accelerator unit of ML-1R LINAC.

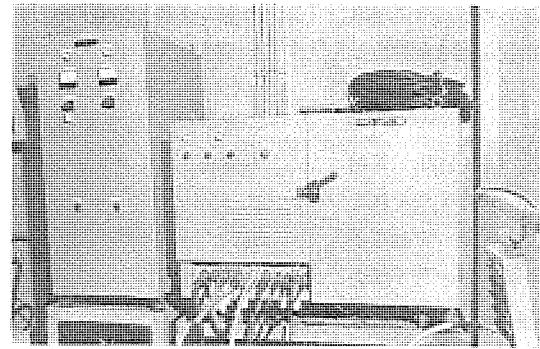


図2.3 ML-1R形ライナック電源部
Power supply unit of ML-1R LINAC.

上げることができ、重量にしてわずか20kgとなっている。この制御器盤面にはライナック全系統電源ON-OFFスイッチ、ライナックインターフ表示ランプとそのリセットスイッチ、放射線安全設備インターロック表示ランプ、X線ON-OFFスイッチ、照射線量ブリセットカウンタ、線量率表示メータ、およびマグネットロン周波数設定器などが配置され、ライナックの操作は制御室のみで1人の運転者によって安全に行なうことができる。

各部との接続はすべてコネクタ接続となっているので、ライナックを屋外使用するときなど簡単に持ち運びでき、かつ放射線安全設備とのインターロック接続が容易である。

安定したX線出力が得られるよう AFC(自動周波数制御)回路が設けてあり、マグネットロンの発振周波数を制御して加速管に供給されるマイクロ波電力を一定に保っている。

(4) 移動台車

この移動台車はML-1R形ライナック本体をとう(搭)載し、手押し・けん引・つり上げ等によって所定の検査位置まで移動させ、検査部位への位置決めは手持操作器により、ライナック本体を上下移動・水平・垂直回転させて行なうものである。外観は図2.2に示す。なお設計に際しては移動台車の小型化、移動時の安定性の増加、使用床面積の縮小を考慮してライナック本体を移動台車の中央に設置している。

構成としては

- 台車
- 上下移動機構
- 水平回転機構
- 垂直回転機構
- 手持操作器

が上げられる。

性能仕様(標準)は次のとおりである。

- 上下移動範囲 1.1~2m(床面よりの高さ)
- 水平回転範囲 $\pm 135^\circ$ (台車進行方向を 0° とする)
- 垂直回転範囲 $\pm 45^\circ$ (水平方向を 0° とする)
- 上下移動速度 約1.8m/min
- 水平回転速度 約0.5rpm
- 垂直回転速度 約0.5rpm

(5) 冷却方法

この装置では、水冷を必要とするものに加速管、ターゲット部、パルスランプ、および無反射終端器があげられるが、発熱量は少なく、したがって8l/minの水量でもって冷却は十分である。しかも現地作業の点を考慮して、市水直結でもって冷却することが可能な設計となっている。

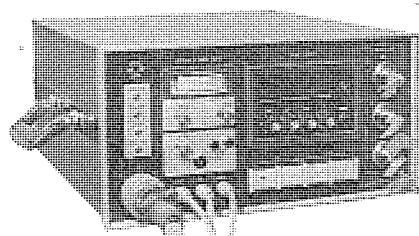


図2.4 ML-1R形ライナック制御器
Control console of ML-1R LINAC

2.2 ML-5 R 形 ライナック

この装置は大別して、1) 加速器本体部、2) 電源部、3) 冷却装置、4) 制御部および、5) 移動機、から構成されている。ただし目的によって、2), 3), は同一きょう(筐)体とすることもできる。以下各部の概要を述べる。

(1) 加速器本体部

ML-5 R 形 ライナックの加速器本体部には電子銃、パルストラ ns、排気装置、およびその電源X線発生部およびマグネトロン部が組込まれている。パルストラ ns で -70 kV および -40 kV のパルス高電圧を発生し、それぞれ電子銃およびマグネトロンのカソードにパルス高電圧を印加する。電子銃から -70 kV の電圧で予備加速された電子ビームは、加速管内でマグネトロンから供給される約 2 MW の高周波の電界の波にのり加速管の中を走る間にしだいに加速され、加速管の出口において 3 MeV のエネルギーとなる。この電子ビームは4極集束電磁石で集束され $1\text{ mm}\phi$ 以下の径となってX線発生ターゲットに衝突しX線を発生する。このX線の空間分布は前方方向にピークをもつた分布となるので平たん化用フィルタを用いて照射野内のX線の空間分布を均一にした。この平たん化されたX線は平行平板透過形のモニタ線量計で連続的にモニタされ制御器盤面上に表示されるようになっている。

電子銃は ML-1 R 形 ライナックの電子銃とほぼ同じ形のものを使用し最大エミッション電流 600 mA が得られる電子銃である。加速管は進行波形でモードとしては $2/3\pi$ モードを使っており、マイクロ波せん頭電力約 2 MW で、長さ約 50 cm で 3 MeV のエネルギーが得られる。加速管の入口部分はマイクロ波の移相速度を C より少なくしたパンチャセクションを設け、ビームのトラッピングをよくした。

マグネトロンは最大せん頭出力 2 MW のマグネトロンで周波数は ML-1 R と同じ $2,998\text{ MHz}$ を使用している。マイクロ波の伝送回路の導波管部分は絶縁ガスによって加圧され高周波窓を通して真空と結合している。

加速器本体部は ML-1 R 形 ライナックと同様、X線の発生のある所は照射野以外鉛で、放射線しゃへいを施し漏えいX線量を少なくしている。

図 2.5 は ML-5 R 形 ライナックの加速器本体部である。

(2) 電源部

マグネトロンおよび電子銃にそれぞれ -40 kV と -70 kV の高電圧

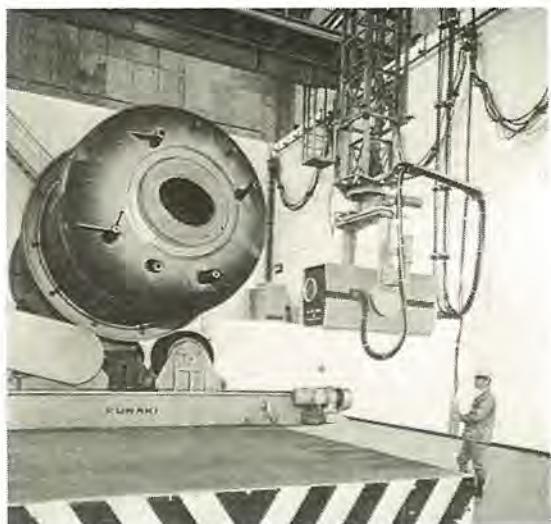


図 2.5 ML-5 R 形 ライナック 加速器本体部
Accelerator unit of ML-5 R LINAC.

パルスを供給するパルス変調器で、その出力パルスはパルス幅 $3\mu\text{s}$ 、デューティ $1.5/1,000$ 、せん頭出力 4.6 MW である。このパルス変調器の特長は高電圧整流体の半導体化と、出力パルス電圧の安定化のためにディキューイング回路を採用していることにある。PFN は4セクションでチャージングチョークとの共振周波数は 760 Hz である。ディキューイング回路は受電電圧の変動と、パルス繰返し周波数の調整による電源トランジスタのレギュレーションを補償するためのもので、チャージングチョークの二次巻線にサイリスタを接続して、その点弧位相を調整して出力パルス電圧を安定化している。このディキューイング回路の性能はほとんどチャージングチョークによって決まり、特にリーケージインダクタンスが少なくなるように巻線方法に工夫をこらし、電源電圧の変動を最大 $1/5$ に圧縮している。またマグネトロンの保護として放電を検出するシャント過電流インターロック、ディスペイク回路等を設けている。図 2.6 は電源部の外観である。

(3) 制御器

この制御器は ML-1 R 形とほぼ同様であるが、パルス PFN 電圧および加速管真空度モニタ計を設けて使いやすくしてあり図 2.7 がその外観である。

(4) 冷却装置

この冷却装置は ML-5 R 形 ライナックの発熱体を冷却し、かつ加速管入口水温を $25^\circ\pm2^\circ\text{C}$ に制御するものである。冷却装置の性能のおもなものは次のとおりである。

冷却能力	6.4 kW 以上 (5,500 kcal/h)
吐出圧力	3.0 kg/cm ²
流量	30 l/min
リザーバンク 容量	30 l
温水器発熱量	2,200 kcal/h

発熱体からの熱は冷却装置の熱交換器で熱交換され、一次側の工業用水または市水の冷却水で熱を除去する。温度制御は ON-OFF 制御で三方弁により冷却水量の調節を行なっている。

ライナックはほとんど大部分冷却装置で発熱を冷却しているので、冷却系の故障などで冷却が不能になった場合の安全対策として断水リレーによるインターロックがあり、冷却系からの故障がライナック本体の故障に波及しないようにしている。

(5) 移動機

この移動機は ML-5 R 形 工業用 ライナック 本体を所定のX線撮影位



図 2.6 ML-5 R 形 ライナック 電源部
Power supply unit of ML-5 R LINAC.



図 2.7 ML-5 R 形 ライナック 制御器
Control consol of ML-5 R LINAC.

置に移動させる装置であり、操作は移動機よりつり下げられている手持操作器により建家床上にてできるようになっている。外観は図2.5に示す。

移動機の構成はつきのとおりである。

- (1) 移動機本体
- (2) 上下移動部
- (3) 回転駆動部
- (4) 制御装置
- (5) 給電、給水装置

性能仕様（標準）は次のとおりである。

- (1) 上下移動 約 1.8 m/min 床上 1 ~ 7 m (任意の位置設定可)
- (2) 横行移動 約 3 m/min 移動範囲は建家により可変
- (3) 走行移動 約 6 m/min 移動範囲は建家により可変
- (4) 水平回転 約 30°/min ±150° 以下 (任意の位置設定可)
- (5) 垂直回転 約 30°/min +45° ~ -100° (水平方向を 0° とし上向きを +、下向きを - とする。任意の位置に設定可)

移動機は図2.5に示すように天井走行 クレーンに類似の移動機本体により水平方向の移動ができ、移動機本体に取付けられている上下移動部および巻上装置により上下方向移動、上下移動部の下部に設置された回転駆動部により ライナック 本体の水平および垂直方向の回転ができる。この移動機は ライナック 本体をつり下げた状態で移動させたときの振れを小さくするため移動機本体の走行・横行装置には緩衝起動・停止装置を使用した。また上下移動部も 4 面スライド 機構を有する骨組構造からなる テレスコープ 形式を採用し、従来の ペンタグラフ 方式に比べ移動時の振れを小さくしている。上下移動部のスライド面は ステンレス、スライドベアリングは自己潤滑性を有する プラスチックベアリング を使用し無給油で長期間使用できる構造となっている。

2.3 ライナックのしゃへい(遮蔽)室⁽⁷⁾

ライナック から発生する X 線は X 線の透過力が大きいだけでなく、発生する X 線の強度も通常の X 線発生装置に比べて大きい。したがって放射線の防護の面から ライナック を設置する場合細心の注意を払わなければならない。

ライナック しゃへい室の設計は次の手続きで行なうのが最も合理的である。

(1) 使用条件の設定

使用する ライナック の加速エネルギー、X 線の出力、被検査物の厚さ、平均フィルム枚数、ターゲット—フィルム間距離、使用するフィルムの種類などから平均一週間あたりの照射線量を割り出し、被検査物の形、大きさによって照射位置および方向、それらの位置および方向での利用率を決める。

(2) ライナック から発生する X 線の特性

ライナック の使用条件の設定に従ってしゃへいに必要な X 線の特性およびしゃへい材のしゃへい能力を求めてしゃへい建家のしゃへいの構造を決める。

ML-1 R 形および ML-5 R 形 ライナック から得られる X 線に対するコンクリートおよび鉄の 10 分の 1 倍層はそれぞれ、16 cm, 4.8 cm および 28 cm, 7.8 cm である。

(3) しゃへい室のしゃへい壁厚の決定

しゃへい室のしゃへい壁の厚さ t は次のようにして求まる。

$$t = t_0 [\log R_0(\theta) - (\log R_a + 2 \log r)]$$

ここで t_0 はしゃへい壁の材料の 10 分の 1 倍層、 $R_0(\theta)$ はターゲットから 1 m での前方向より θ の方向の X 線量、 R_a は着目している

点での許容線量、 r はターゲットから着目している点までの距離である。

(4) ML-1 R 形および ML-5 R 形 ライナック のしゃへい室

ML-1 R 形および ML-5 R 形 ライナック をそれぞれ次の条件で設計すると図2.8および図2.9のようになる。

ML-1 R 形 ライナック

照射条件

X 線出力	10 R/min-m
一週間の運転時間	12 h
しゃへい材	普通コンクリート
周囲条件	建家の壁の外側を管理区域の境界とする
ターゲットから管理区域の境界までの最短距離	

主線錐方向 3.5 m

横方向 1.5 m

ML-5 R 形 ライナック

X 線出力	200 R/min-m
一週間の運転時間	20 h
しゃへい材	普通コンクリート
周囲条件	建家の壁の外側を管理区域の境界とする
ターゲットから管理区域の境界までの最短距離	

主線錐方向 3.0 m

横方向 3.0 m

(5) 安全設備

ライナック の発生 X 線量は大きいので放射線防護には十分な措置を講じなければならない。ML-1 R 形も ML-5 R 形 ライナック も 放射線防護には放射線しゃへい壁を設けている以外に、1) 照射室の出入口にはとびら インタロック、2) 照射室内に緊急停止スイッチ、3) 照射室出入口付近に個人キーイッチ、4) 照射室内警報ベル、5) 照射室内外に運転中の回転ランプなどを設けるのが普通である。

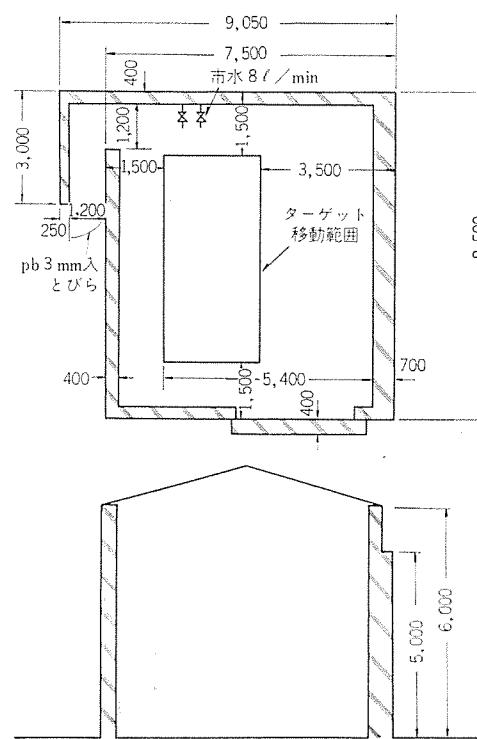


図 2.8 ML-1 R 形 ライナック 照射室参考例
Irradiation room of ML-1 R LINAC.

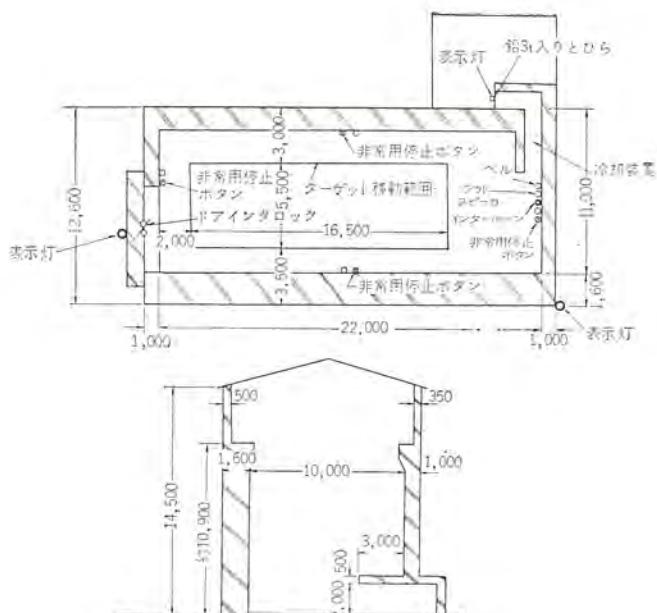


図 2.9 ML-5R 形 ライナック 照射室参考例
Irradiation room of ML-5R LINAC.

3. ML-1 R 形および ML-5 R 形 ライナックの性能

ML-1 R 形および ML-5 R 形 ライナックの定格性能を比較すると表 3.1 のようになる。以下で ML-1 R 形および ML-5 R 形 ライナックによって得られた性能について述べる。

3.1 電子線エネルギー

X線ターゲットをたたく電子線のエネルギーは Al の吸収曲線から飛程を求めて決めた。ML-1 R 形および ML-5 R 形 ライナックから得られた電子線の Al 中の吸収曲線を図 3.1 に示した。これから飛程を求めるとき、それぞれ 1.1 mm および 5.8 mm となり、これから電子線のエネルギーは、0.9 MeV および 3 MeV となる。一方 X 線を発生する電子線のエネルギーは発生した X 線の吸収曲線からも求めることができる。図 3.2 の鉄に対する露出曲線から ML-1 R 形 ライナックおよび ML-5 R 形 ライナックから得られた X 線の鉄に対する 10 分の 1 倍層はそれぞれ 48 mm および 78 mm となり、X 線ターゲットをた

表 3.1 ML-1 R・5 R 形 ライナック 比較表
Comparison table of ML-1 R and ML-5 R LINAC.

項目	形名	ML-1 R	ML-5 R
エネルギー	900 keV	3 MeV	
X線出力 (平たん化した値)	10 R/min-m	40~200 R/min-m	
照射野	30 cm ϕ at 1 m	30 cm ϕ at 1 m	
焦点の大きさ	1 mm ϕ	1 mm ϕ	
線源の移動	台車による水平移動 水平垂直回転	移動機による水平移動 水平垂直回転	
設備容量 電力	AC 200 V 3 ϕ 10 kVA	AC 200 V 3 ϕ 23 kVA	
冷却水	8 l/min	20 l/min	
X線モニタ	X線モニタチャンバと集積回路の組合せ	X線モニタチャンバと集積回路の組合せ	
露出方法	プリセッタカウンタによる積算 積量プリセッタ方式	プリセッタカウンタによる積算 積量プリセッタ方式	
適用鋼板	薄板 (20~100 mm)	中厚板 (40~200 mm)	
X線出力安定度	±10 %	±5 %	
本体長さ mm	830	1,600	
本体重量 kg	600	900	
全構成	照射部本体 電源箱 操作器 台車 (オプション)	照射部本体 電源箱 操作器 冷却装置 移動機または台車 (オプション)	

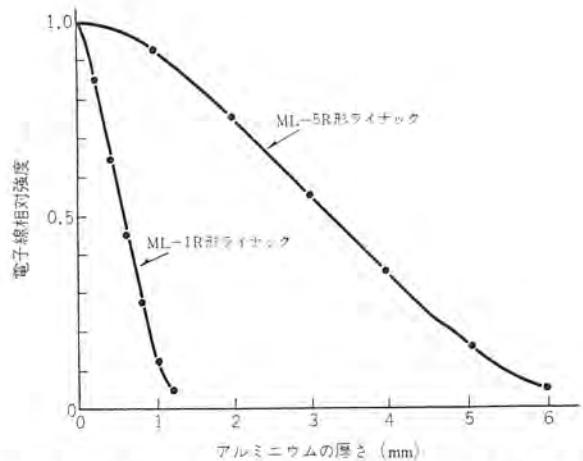


図 3.1 ML-1 R 形および ML-5 R 形 ライナックの電子線の
アルミニウム 中の飛程
Electron ranges in aluminum by using type
ML-1 R and type ML-5 R LINAC.

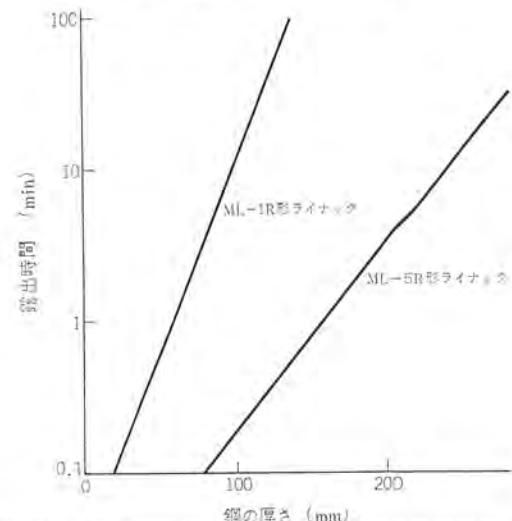


図 3.2 ML-1 R 形および ML-5 R 形 ライナックによる鋼
に対する露出曲線
Exposure chart of steel using by ML-1 R and
ML-5 R LINAC.

たく電子線のエネルギーはそれぞれ 0.9 MeV および 3 MeV となり両者から求めた値はよく一致している。

3.2 X 線々源の大きさ

高エネルギー X 線を用いたラジオクラフィは低エネルギー X 線を用いたラジオグラフィと比べて被検査物に厚いものが多い。したがって線源の大きさが像のぼけに大きく寄与する、高エネルギー X 線のラジオグラフィでは、像のぼけは上記の線源の大きさによって決まる。幾何学的な像のぼけのほかにフィルム固有のぼけが大きく、実用上 X 線の線源の大きさは幾何学的な像のぼけがフィルム固有のぼけ以下になるようにはすればよい。

放射線検査の日本工業規格 JIS・Z-3104 では特級の場合、線源と透過度計間の距離 L_1 は透過度計とフィルム間距離 L_2 の $5f$ 倍 (f は線源の大きさ) 以上 (普通級は $2.5f$ 倍以上) という規定があり、ML-1 R 形および ML-5 R 形 ライナックに $L_1=900$, $L_2=100$ および $L_1=1,300$, $L_2=200$ を適用すると $f(\text{mm} \text{ で表わす})$ はそれぞれ 1.8 mm および 1.3 mm となり、線源の大きさは 1 mm ϕ 以下であれば上記の条件で特級の検査が十分できる。図 3.3 は ML-1 R 形および ML-5 R 形 ライナックの X 線ターゲットをたたく電子線の大きさである。すでに ML-15 R 形 ライナックで X 線の線源の大きさはピンホー

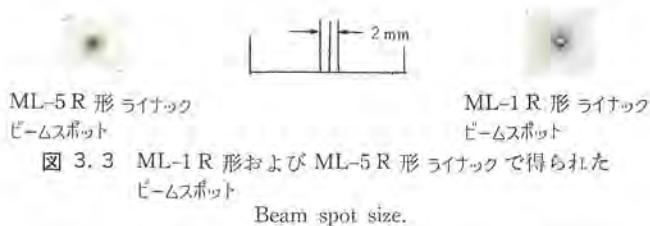


図 3.3 ML-1 R 形および ML-5 R 形 ライナック で得られたビームスポット
Beam spot size.

ル法やスリット法で求め、直接X線ターゲットをたたく電子線の大きさとよく一致していることがわかっているので、ここではX線ターゲットをたたく電子線の大きさでX線の線源の大きさを求めた。このような方法で求めた線源の大きさは ML-1 R 形 ライナック および ML-5 R 形 ライナック に対してもいずれも $1 \text{ mm}\phi$ を越えていない。

3.3 X線出力および露出曲線

ML-1 R 形および ML-5 R 形 ライナック ではX線ターゲットをたたく電子線はパルス状であり、それぞれせん頭電流値 180 mA および 150 mA、パルス幅 4.5 μs および 2.5 μs が得られた。

ML-1 R 形 ライナック はくりかえし固定で 200 pps のとき、X線出力は 10 R/min at 1 m が得られた。このライナックはX線の空間分布がほぼ等方的であるため、平たん化用フィルタを用いないのでそのままX線出力となる。

ML-5 R 形 ライナック はくりかえしが 60 pps から 300 pps まで可変であり、X線の出力は平たん化した値で 40 R/min-m から 210 R/min-m が得られた。平たん化は ML-5 R 形 ライナック の場合 30 % 減衰させているので、平たん化しない場合はほぼ 300 R/min-m のX線が得られた。

図 3.2 はこれらのライナックの鋼材に対する露出曲線であり、フィルムは Fuji #100 フィルム 前面および後面にそれぞれ ML-1 R 形 ライナック では 0.1 mm 厚、ML-5 R 形 ライナック では 0.3 mm 厚の鉛スクリーンを用いた。現像は 20°C で 6 分行なった。この露出曲線から ML-1 R 形および ML-5 R 形 ライナック から得られる X 線の鋼材に対する 10 分の 1 倍層はそれぞれ 48 mm および 78 mm となり、電子線エネルギー決定でアルミニウム飛程で求めたエネルギーとよく一致している。

図 3.4 は ML-1 R 形および ML-5 R 形 ライナック から得られた X 線の出力の時間安定度である。これらの装置では撮影の場合、露出を決める手段として積算線量計で積算線量を用いているため、X線出力の時間安定度はあまり重要ではないが、X線の出力の大幅な変動はX線の線質を変える恐れがあるので注意する必要がある。

3.4 フィルム濃度分布

X線撮影において撮影されたX線フィルムの濃度分布は、X線の空間分布と多少異なる分布をする。すなわち被検査物の厚さが増すに従って中心部の濃度が高くなる。

図 3.5 は ML-1 R 形および ML-5 R 形 ライナック で得られたフィルム濃度分布である。

被検査物の厚さが増すに従って中心部のフィルム濃度が高くなる原因は、1) 中心からはなれるに従ってX線の透過する鋼の有効厚さを増すことおよび、2) 中心からはなれるに従ってビルドアップが少なくなることによるもの、と考えられる。この傾向はX線のエネルギーが低くなるほど顕著になる。

3.5 欠陥識別度

ラジオクラフィにおいて欠陥識別度は、X線フィルムに写し出された欠陥の像の鮮銳度とコントラストによって決まる。

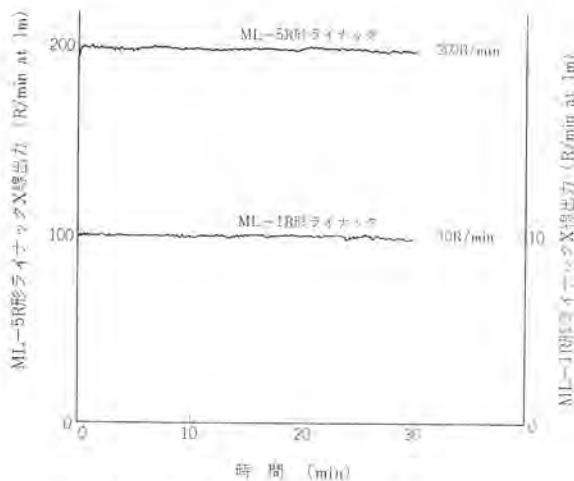


図 3.4 ML-1 R 形および ML-5 R 形 ライナック の X 線出力の時間安定度
Stability of X-ray output.

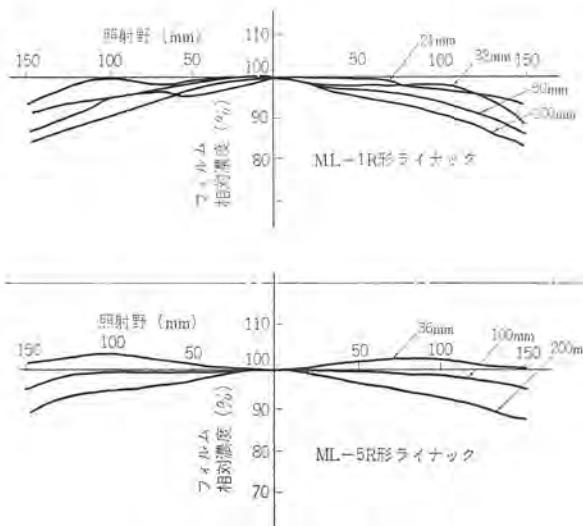


図 3.5 フィルム濃度分布
Spatial distribution of film density.

いま被検査物の厚さを t 、識別できる欠陥の大きさを Δt とすれば欠陥識別度 $\Delta t/t$ は

$$\Delta t/t = C \delta B/\mu t$$

で与えられる。ここで C はフィルムを含む定数、 δ は識別可能な最小のフィルム濃度差、 B はビルドアップ、 μ は被検査物の質量吸収係数である。

フィルムの鮮銳度 U_0 は固有鮮銳度 U_f と幾何学的鮮銳度 U_g とに分けることができる。固有鮮銳度 U_f はフィルム乳剤中や増感用スクリーン内に生ずる二次電子による像のひろがりで X 線のエネルギーの平方根に比例し次のように与えられる。

$$U_f = 0.15 E^{1/2}$$

ここで E はX線を発生させる電子線のエネルギーで、3 MeV および 0.9 MeV の電子線のエネルギーに対し U_f はそれぞれ 0.26 mm および 0.14 mm となる。幾何学的鮮銳度 U_g は、線源の大きさ f 、線源とフィルム間距離を a 、欠陥とフィルム間距離を b とすれば U_g は

$$U_g = \frac{b}{a-b} f$$

識別できる欠陥の大きさ Δt は $V \equiv a/(a-b)$ とすれば
 $V \Delta t > U_0$

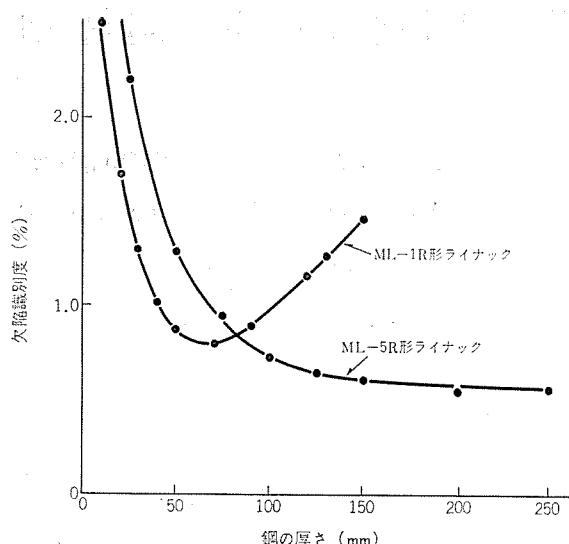


図 3.6 ML-1 R 形および ML-5 R 形 ライナックによる
欠陥識別度
Sensitivity of flaw detection.

になるような条件をみたさなければならない。ここで U_0 は

$$U_0 = [U_g^3 + U_r^3]^{1/3}$$

で与えられる。

JIS に規定された線 ペネトロメータを用いて測定した鋼板に対する ML-1 R 形および ML-5 R 形 ライナックの透過度計識別度を図 3.6 に示す。X線のエネルギーが低くなれば薄い被検査物に対して欠陥識別度が良くなってくる。しかし厚くなると逆に欠陥識別度が悪くなる。

X線のエネルギーが低くなると欠陥識別度を最良にする被検査物の厚さはある厚さになる。逆に被検査物の厚さが決まればその被検査

物の検査を最良の欠陥識別度で行なうためには、おのずから X線発生装置の加速電圧は決まつてくる。

4. む す び

以上、放射線検査装置としての ML-1 R 形、ML-5 R 形 ライナックの概要、性能等を比較しながら述べてきた。すでに前者は川崎重工業(株)神戸工場、後者は三井造船(株)玉野造船所その他に納入され安定にか(稼)動している。これらの装置の開発にあたって、種々ご協力を賜った大阪大学工学部仙田富男教授ならびに三菱電機(株)中央研究所の関係者の諸氏に謝意を表します。(昭和 48-5-4 受付)

参 考 文 献

- (1) H. Fujita et al : Design Features of 15 MeV Electron LINAC for Non Destructive Inspection "Model ML-15 R" and for Medical Therapy "Model ML-15 M", Mitsubishi Denki Lab. Reports, 9, 3/4 221 (1968)
- (2) 藤田ほか : 非破壊検査用電子 ライナック "ML-15 R 形" の性能, 三菱電機技報, 43, No. 3, 465 (昭 44)
- (3) 藤田ほか : 非破壊検査用 ライナック (ML-15 R 形) による原子力 プラント用容器の放射線検査, 三菱重工技報, 6, No. 4, 1 (昭 44)
- (4) 藤田ほか : 非破壊検査用高出力 ライナック の実用性能, 非破壊検査, 19, No. 2, 68 (昭 45)
- (5) 藤田 : 三菱工業用 ライナック について, NDI 資料, 1497 (昭 46)
- (6) 藤田ほか : 超小形・非破壊検査用 ライナック ML-1 R の性能, 非破壊検査, 21, No. 9, 550 (昭 47)
- (7) 藤田, 鈴木 : 高 エネルギー X線の空間線量分布と管理区域の設定, NDI 資料, 1,555 (昭 48)

線形電子加速器用 定在波形加速管の実用化研究

入江 浩一*・美濃和芳文**・沢田 進**

Practical Use Study on Standing-Wave Structure for Linear Electron Accelerator

Central Research Laboratory

Koichi Irie・Yoshibumi Minowa・Susumu Sawada

A side-coupled structure of 30 cm long and a π mode structure of 13 cm long have been made for trial use with a S band (3 GHz) linear electron accelerator and their performance has been measured. In low power tests, the former has yielded 1.76×10^4 unloaded Q , and $97 \text{ M}\Omega/\text{m}$ effective shunt impedance, while the latter has given the respective values of 1.5×10^4 and $46 \text{ M}\Omega/\text{m}$. The reason of the smaller effective shunt impedance than anticipated is considered due to insufficient boundary conditions of the trial accelerator for building up of π mode field. Results of electron acceleration tests have revealed that an averaged effective shunt impedance of the accelerator in every case was slightly smaller than those of the small power test because of improper transit time factor of electrons. Also electric field intensity 30 MV/m and, without using any external focusing device, the electron beam diameter of below 2 mm have been obtained.

1. まえがき

線形電子加速器の加速管は、マイクロ波から電子へのエネルギー変換器としてはたらくもので、線形電子加速器のもっとも本質的かつ重要な構成要素である。しかも線形加速器の性質から、加速管の長さが、加速器の大きさを決めてしまうことが多い。

加速管は、進行波形と定在波形とに大別される。前者は、マイクロ波の伝送線路としては遅波回路であり、導波管モードの進行波電磁界により電子は加速される。後者は、マイクロ波回路としては空洞共振器であり、その内部の定在波電磁界により電子は加速されるものである。従来は、比較的小形の線形電子加速器でも、もっぱら進行波形加速管が用いられた。これは主として、広域整合負荷の存在により、高周波電力源の動作が安定になるためであった。しかし、マイクロ波電力の有効利用の観点からも、小形の線形電子加速器では特に、高周波負荷のない定在波形加速管が有利である。

加速管の優秀さをあらわす量の一つに、与えられたマイクロ波電力に対する電子のエネルギー利得の大きさ、すなわち実効並列インピーダンスがある。従来、加速管としてもっと多く用いられてきた円板装荷形周期構造導波管を、 π モードで動作させると、高い並列インピーダンスが得られることが知られていた。しかし、 π モード形加速管では、その長さが長くなるとともに、加速管の工作精度やその加速管を励振するマイクロ波の周波数安定度にきびしい要求が生じ、さもないと電子を安定に加速することができないと考えられ⁽¹⁾、 π モード形加速管が実用されたことはなかった。一方最近、Knappらによって陽子の線形加速器に用いられた側面結合形加速管(side-coupled structure)⁽²⁾は、 π モードのみの高い並列インピーダンスをもつと同時に、 $\pi/2$ モード方式の採用により、上記の π モード形加速管の欠点はのぞかれたものであった。

著者らは、最近の医療用や非破壊検査用の小形の線形電子加速器の需要の増大に際し、加速管の小形化と高能率化をはかるため、この側面結合形加速管と π モード形加速管とに着目し、これらを低エネルギー領域での線形電子加速器に用いるべく開発研究をおこなった。すなわち、単に高い並列インピーダンスのみでなく、従来の加速管よりもはるかに高い加速電界強度をも実現しようと試みた。試作機につ

いての実測の結果、良好な性能が得られることがわかったので、ここにその一部を発表する。

2. 側面結合形加速管

2.1 特長

通常の単一周期構造(monoperiodic)の加速管は、 $\pi/2$ モードの定在波で励振されると、1周期(通常1周期は1個の空洞共振器で構成される)おきに電界の弱い空洞共振器があらわれる。この結合空洞と呼ばれる空洞共振器は、マイクロ波の伝送の役割を果すだけで、電子の加速には寄与がすくない。そこで、これを側部へずらし、加速空洞と呼ばれる電界の強い空洞共振器のみを、加速管軸上に配列したものが、側面結合形加速管である。こうすることによって

(1) 加速空洞と結合空洞との間の高周波的結合は、加速空洞の外壁に設けられるスロットによりなされる。したがって、加速空洞の形状は、その並列インピーダンスを最大とするように選ぶことができる。

(2) 加速管軸にそな長さの大部分にわたって、粒子の加速に有効な電界が励起される。したがって、加速空洞列についての単位長さあたりの並列インピーダンスが大きくなる。

(3) 結合空洞内の電磁エネルギーは小さいので、その Q や形状に注意をはらう必要がすくない。などの利点が生ずる。

この側面結合形加速管は、原理的には西川らのAPS形加速管⁽³⁾と同系統の二重周期構造(biperiodic)の加速管である。結合された共振器列の模型を考えると、加速管内の電磁界をあらわす階差方程式の解として、この二重周期構造の分散特性が得られる。この分散特性では、 $\pi/2$ モードには一般に周波数の異なる2個の解があるが(図2.3参照)、この二つの周波数が一致しないと、分散特性に伝ば(播)阻止域が生じ、正常な $\pi/2$ モード動作ができない。各空洞共振器相互間の結合係数と固有共振周波数とを適当に選択することにより、この二つの周波数は一致し、この二重周期構造は $\pi/2$ モードで最大の群速度をもつ構造となる。

$\pi/2$ モードにおける、空洞壁中の損失やビーム負荷および各空洞共振器の共振周波数の誤差の影響については、Knappらの結合された共振器列の模型による解析⁽¹⁾から次のことがわかる。



図 2.1 側面結合形加速管の外観
Exterior view of a side-coupled accelerating structure.

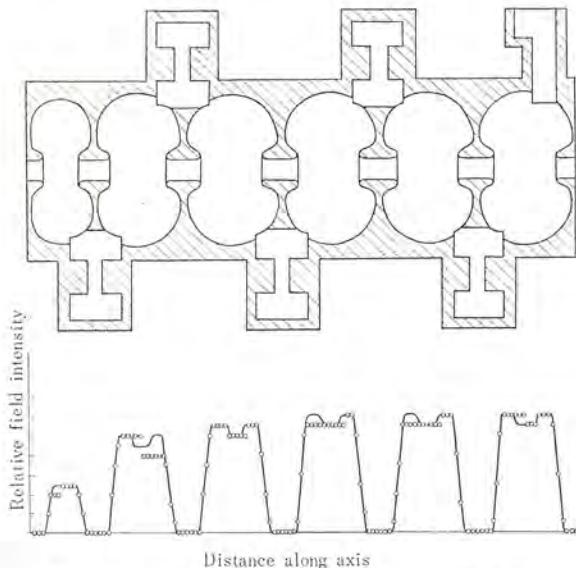


図 2.2 側面結合形加速管の断面図と摂動法で測定した軸上の電界分布
Cross sectional view of the side-coupled structure and electric field along its axis measured by means of perturbation technique.

(4) 空洞壁中の損失やビーム負荷によって生ずる加速空洞相互間の電界強度の変化はすくない。

(5) 加速空洞中の電界強度は、空洞共振器の共振周波数の誤差にはほとんど関係がない。

(6) 結合空洞中の電界強度は、それより前の加速空洞の共振周波数の誤差の累積が零のとき最小となる。この事実を利用して加速空洞のスクイズができる。

以上のように、側面結合形加速管は、その機械的構造にもとづく利点としての高い並列インピーダンスをもつと同時に、 $\pi/2$ モードを用いることによる動作の安定性が良いことに特長があるといふことができる。

2.2 性能の実例

図 2.1 は、小形医療用線形電子加速器用に試作した S バンドの側面結合形加速管の外観を示す写真である。図 2.2 は、この加速管の断面図と軸上の電界分布を摂動法で測定した結果とを示している。加速空洞の形状は、Hoyt ら⁽⁵⁾の開発した実効並列インピーダンス(ZT^2)が最大となる形状を参考にしてきめたもので、小電力試験では、 $Q_0=1.76 \times 10^4$ 、 $ZT^2=97 \text{ M}\Omega/\text{m}$ を得た。これらは、文献(4)のデータから周波数をスケーリングして得られる値よりも約 15% 大きい値である。図 2.3 の分散特性は、スクイズによって各空洞共振器の共振周波数のばらつきを $\pm 2.8 \text{ MHz}$ から $\pm 0.5 \text{ MHz}$ にした場合を示している。これにより伝ば阻止域の消失がみとめられる。導波管と加速管との結合は、アイリスの大きさで調整でき、結合係数(β)は、所定のビーム負荷があるときに、マイクロ波電力源への反射が少なくなるように、 $\beta=1.76$ の過結合となっている。

マイクロ波電力源として 2 MW 出力のマグнетロンを用い、パルスせん

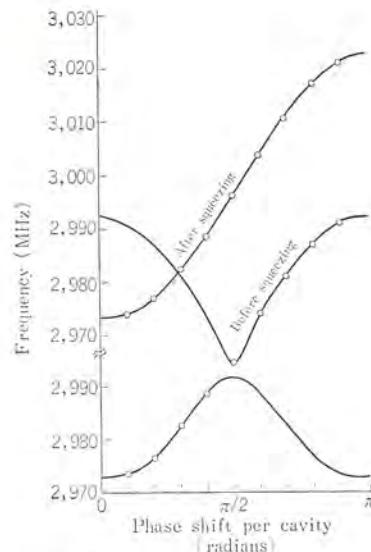


図 2.3 分散特性
Dispersion characteristics of the structure.

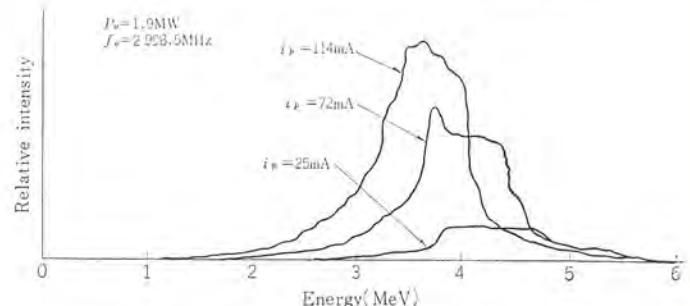


図 2.4 エネルギースペクトル
Energy spectra of electrons accelerated by means of the side-coupled structure.



図 2.5 電子ビーム取出し窓に置いた厚さ 0.1 mm の紙を透過した電子ビームの跡 (中心の黒く焼けた部分)
A trace of electron beam through a thin paper attached to beam extracting window. A great many number of electrons are concentrated in the black spot in its center.

(尖)頭値 130 mA の電子ビームを 70 keV から 4 MeV にまで加速できた。図 2.4 は、そのエネルギースペクトルの一例を示している。この結果から逆算すると、平均実効並列インピーダンスは $60 \text{ M}\Omega/\text{m}$ となる。

表 2.1 側面結合形加速管の性能
Some characteristics of a side-coupled accelerating structure.

加速管長	270 mm
無負荷 Q 値 (Q_0)	1.76×10^4
実効並列インピーダンス (ZT^2)	$97 \text{ M}\Omega/\text{m}$
隣接空洞共振器間の結合係数 (k)	1.92%
導波管との結合係数 (β)	1.76
$\pi/2$ モード周波数	2,998 MHz
マイクロ波入力	1.9 MW
マイクロ波パルス幅	$2.5 \mu\text{s}$
エネルギー利得	3.8 MeV
ビーム電流せん(尖)頭値	130 mA
ビーム直径	2 mm ϕ 以下

小電力試験の結果より小さいのは、電子がすべての加速空洞でマイクロ波電界の最適位相にない、すなわち、最大の走行角効果(T)が各加速空洞において実現されてないためと考えられる。

エネルギー利得から推定される加速管軸上の電界強度は、加速空洞の間隔(隙)で 30 MV/m に達していると考えられる。この状態でも加速管の動作は安定であり、Sバンド加速管で実用しうる電界強度の上限について貴重なデータが得られた。

また外部からの電子ビーム集束装置をなんら用いることなく、加速された電子ビームの直径は、図 2.5 に示すように、 2 mm 以下のものが得られた。これは、第一加速空洞から直ちに高電界がはたらいて、電子の速度が短距離のあいだに光速度に近づくためと考えられる。以上の性能をまとめたものが表 2.1 である。

3. π モード形加速管

3.1 特長

π モード形加速管とは、隣接空洞共振器間でマイクロ波の位相差が π ラジアンであるような加速管である。こうすると、入射波の基本波と反射波の負の第一空間高調波とが同位相で重なり、マイクロ波電力の有効利用ができる。したがって並列インピーダンスは、他のモードのどれよりも高くなる。しかし、次に述べる理由によって、実用化はすくんでいなかった。

(1) モード分離が悪い

隣接モードとの周波数の差が、他のモードの加速管にくらべて小さいため両者の分離がにくく、加速管の寸法やマイクロ波の周波数にきびしい精度を必要とする。式 (3.1)⁽⁶⁾ からわかるように、特に空洞共振器数が多いときに顕著となる。

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{k}{4} \left(\frac{\pi}{N} \right)^2 \quad (3.1)$$

ここに Δf : 隣接モードとの周波数の差

f_0 : 固有共振周波数($\pi/2$ モードの周波数に等しい)

k : 隣接する空洞共振器間の結合係数

N : 加速管を構成する空洞共振器の数

(2) 電子のマイクロ波電界に関する位相のずれ

π モードでは、マイクロ波の群速度が零であるため、加速管壁での損失やビーム負荷による電磁エネルギーの減少を補うためのエネルギーの伝はは、隣接モードによるものと考えられている。この隣接モードの励起によって、隣接空洞共振器間のマイクロ波位相差は π ラジアンよりずれ、電子の位相同期性を保つことがむずかしくなり、安定な電子の加速ができなくなる。この位相のずれ($\Delta\Phi$)は、式 (3.2)⁽⁶⁾ に示すように空洞共振器数の 2 乗に比例する。

$$\Delta\Phi = \frac{(1-k)^{1/2}}{k} \cdot \frac{N^2}{Q_0} \quad (3.2)$$

ここに Q_0 : 空洞共振器列の無負荷 Q

しかしながら、上記の欠点はいずれも、空洞共振器の数をすくなくすれば軽減されて、実用上の支障をなくすことができる。たとえば、 $N=2$ 、 $k=10^{-2}$ 、 $Q_0=10^4$ のときは、 $\Delta f/f_0=1/160$ 、 $\Delta\Phi=0.04$ ラジアンとなり、位相のずれは無視できる程度の値となる。

3.2 性能の実例

以上の観点から、著者らは、小形の π モード形加速管は実用になるとと考え、空洞共振器 3 個から構成される加速管を試作し、電子の加速試験を行なった。図 3.1 は、試作した π モード形加速管の外観を示す写真である。以下にその性能を実測した結果を述べる。

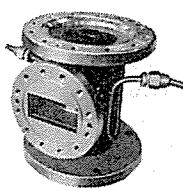


図 3.1 π モード形加速管の外観
Exterior view of a π -mode accelerating structure.

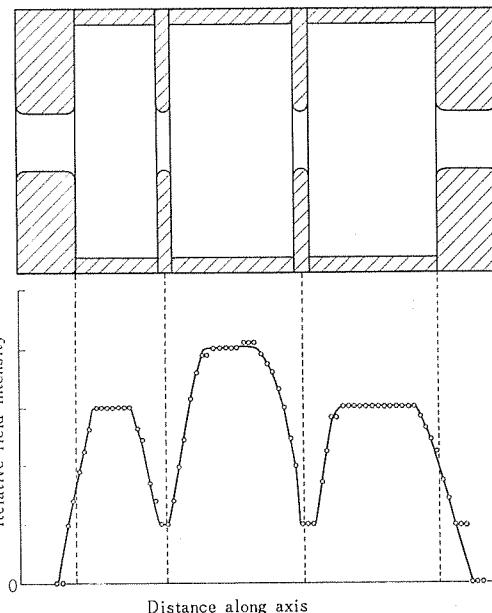


図 3.2 π モード形加速管の断面図と軸上電界分布
Cross sectional view of the structure axial field pattern.

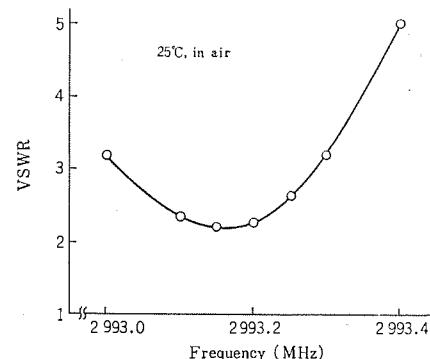


図 3.3 入力整合の周波数特性
Frequency characteristics of input matching.

(1) 小電力試験の結果

図 3.2 は、加速管の断面図と摂動法で測定した軸上の電界分布とを示したものである。これより求められる加速管の実効並列インピーダンスは、 $46 \text{ M}\Omega/\text{m}$ となる。これは、たとえば文献 (7) より予想される値より小さい。その理由は、試作した加速管が、相異なる 3 個の空洞共振器より構成されているため、境界条件と一様性の点で、 π モードの電磁界が励起されなかったためと考えられる。図 3.3 は、入力導波管より加速管をみた整合の周波数特性であり、導波管と加速管との結合は、 $\beta=2.2$ の過結合となっている。また無負荷 Q は 1.5×10^4 であった。

(2) 大電力試験(電子加速実験を含む)の結果

最大パルスせん頭出力 2 MW のマグネットロン(新日本無線製 M190)からサーキュレータ(レイセオン製 CSH-113)を経て、加速管に大電力マイクロ波を供給した。図 3.4 には、入射電力、反射電力、電子エネルギーおよびビーム電流の周波数特性を示している。加速管が高 Q の

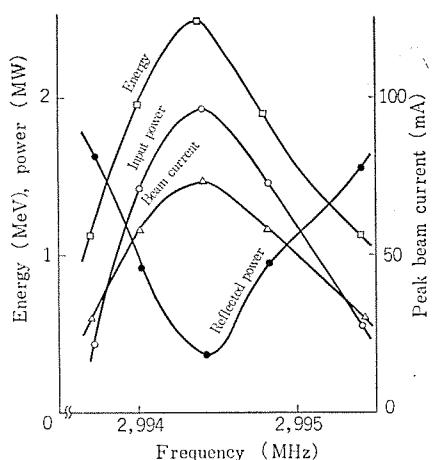


図 3.4 入射電力、反射電力、電子エネルギーおよびビーム電流の周波数特性
Frequency characteristics of input power, reflected power, electron energy and beam current.

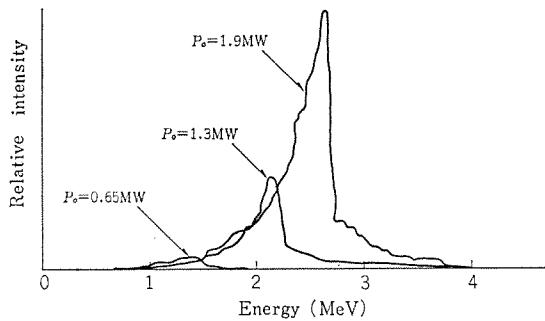


図 3.5 エネルギースペクトル
Energy spectra of electrons accelerated by means of the π -mode structure.

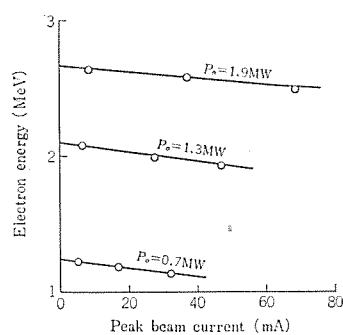


図 3.6 ビーム負荷特性
Beam loading characteristics of electron energy.

空洞共振器であるため、入力整合のバンド幅は狭く、したがって上記諸性能はするどい周波数特性を示しているが、実用上はさほど支障はなかった。図 3.5 は、分解能 1.3% の分析磁石系で測定された加速された電子ビームのエネルギースペクトルである。図 3.6 は、電子エネルギーのビーム負荷特性を示したものである。マイクロ波の入射電力 1.9 MW のとき、電子エネルギーは 2.5 MeV、ビーム電流せん頭値 72

mA が得られた。これは、加速管内の平均加速電界強度として 20 MV/m 以上が得られていることを意味している。また電子エネルギーから逆算すると実効並列インピーダンスは、 $39 \text{ M}\Omega/\text{m}$ となり、これは小電力試験の結果より低い。この理由は、側面結合形加速管の場合と同様に、理想的な走行角効果が実現されなかつたためと思われる。純粋な π モードを実現するためには、左右対称な半空洞共振器で終端された完全に一様な周期性をもつ加速管が必要であることがわかった。

この π モード形加速管にも外部的な電子ビーム集束機構を用いていないけれども、電子ビームの大部分が直径 2 mm の中に集束されていることが確認できた。

4. むすび

以上、新しく試作した側面結合形加速管と π モード形加速管について、実測された性能の一部を紹介した。側面結合形加速管については、その製作可能性が実証され、性能もほぼ設計どおりの値が実現できた。 π モード形加速管については、 π モードの励振のために周期構造の一様性が必要であることがわかり、ひきつづき改良形の試作に着手している。

いずれの加速管についても、平均加速電界強度として 20 MV/m 以上が比較的容易に得られることがわかり、これは従来のものにくらべて 2 倍以上高く、大きな収穫であった。また、加速管の電子銃側から直ちに高電界強度であるため、加速管に入射される電子ビームの集束さえ適當であれば、加速管にはなんら外部からの電子ビーム集束機構、たとえば磁場レンズ、ソレノイド・コイル、4 極電磁石などなしに十分集束された形で加速された電子ビームを得ることができることもわかった。

電子の加速管透過率については、測定結果にばらつきがあるが、側面結合形加速管では 40~50%、 π モード形加速管では 20~30% と思われる。後者では構造の改良によりさらに増大が期待できる。

(昭和 48-4-24 受付)

参考文献

- (1) E. A. Knapp : Linear Accelerator ed. P. M. Lapostolle and A. L. Septier (North-Holland, Amsterdam, 1970) p. 606
- (2) Ibid, p. 609
- (3) T. Nishikawa, et al : Rev. sci. Instrum., 37, 652 (1966)
- (4) E. A. Knapp, et al : Rev. sci. Instrum., 39, 978 (1968)
- (5) H. C. Hoyt, et al : Rev. sci. Instrum., 37, 755 (1966)
- (6) G. A. Loew, et al : Linear Accelerator ed. P. M. Lapostolle and A. L. Septier (North-Holland, Amsterdam, 1970) p. 70
- (7) Ibid, p. 94

電子線照射装置ダイヤトロン DP-300 および DP-600

藤田 龍太*・上田 和宏*・建石 昌彦**
永井 昭夫***・広 三寿***

Electron Accelerators DIATRON Model DP-300 and DP-600

Communication Equipment Works Hyoto Fujita • Kazuhiro Ueda • Masahiko Tateishi
Central Research Laboratory Akio Nagai • Sanju Hiro

Descriptions are made on the performance, construction and function of electron accelerators DIATRON DP-300 A(B) and DP-600 A(B) as radiation sources suitable for various processes in chemical industries. High voltage is generated by a through CT type rectifying system for the DP-300 and by a high frequency Cockcroft type stepping for the DP-600. The dimensions, weight and necessary equipment have been given in summarized information so as to facilitate the installation. As the characteristics of electron beams taken out of the DIATRON, copious data are provided about dose distribution below the window, depth dose in substance and surface doses of various back materials, to contribute to the suitable irradiation by the customer.

1. まえがき

放射線化学の発展とともに、その工業化が徐々にすすめられている。ポリエチレン電線やビニール電線の架橋による耐熱化加工、繊維の品質改良加工、発泡(泡)ポリエチレン・熱収縮性ポリエチレンの製造、天然木材とプラスチックスの複合材(WPC)の生産、金属・木材・プラスチックスの表面塗装の瞬間乾燥などがそれである。

これらの工業化には、大線量の放射線（主として電子線）が必要とされ、それに応じるのが電子線照射装置である。

当社では、このような分野で利用できる大電流の電子線照射装置をダイヤトロンとして製品にしている。ダイヤトロンのシリーズは、出力電子線エネルギー 300 keV から 3 MeV まで、出力容量 15 kW から 60 kW までの各種機種でカバーされているが、この報告では、それらのうち、出力電子線エネルギー 300 keV, 600 keV のダイヤトロン DP-300 A(B), DP-600 A(B) 形について詳細に紹介する。DP-300 A(B) は、その出力電子線エネルギーが低いために、照射処理できる対象も薄いフィルム、塗膜などに限られ、主たる用途は塗装の瞬間乾燥用である。DP-600 A(B) は、エネルギーが高まった分だけ用途も増し、塗装の乾燥のほか、電線の架橋、繊維の加工などにも使用される。

2. 概要および特長

電子線照射装置は、直流の高電圧により、熱電子を加速して大気中に電子をとり出し、被照射物に電子線を照射する装置で、直流形電子線加速器といわれるもののうち、電子線の出力が大きく、工業利用に適したものといっている。高電圧を発生させる方式によってコッククロフト・ワルトン形や各種トランズ形など、いろいろのタイプにわかれれるが、高電圧で電子を加速し、走査して大気中にとり出すという原理においては変わることろがない。図2.1にその原理を図示した。

ダイヤトロン DP-300 A(B), DP-600 A(B) は、いずれも高電圧発生器と電子線照射器とが分離された構造で、両者を超高電圧のケーブルで接続している。このため、1台の高電圧発生器から、1~2台の電子線照射器の接続が可能となり、その配置も自由になるため、生産ラインの構成いろいろの利点が出てくる。すなわち、生産ライン

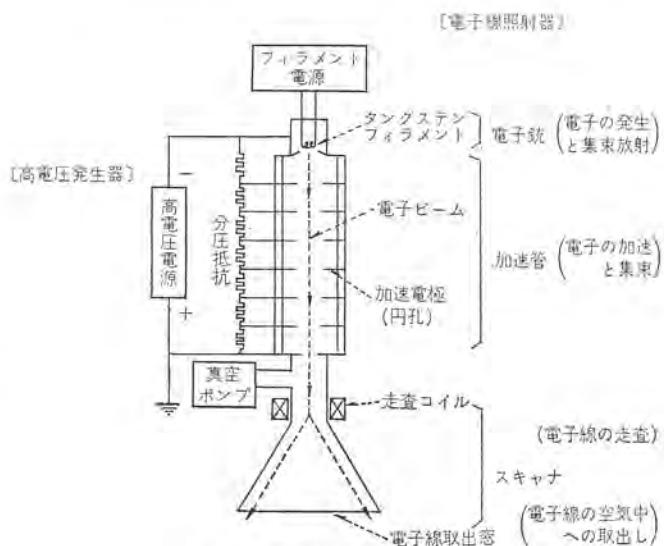


図 2.1 電子線照射装置の原理 Principle of electron accelerator.

の目的に合わせて、一つのラインに電子線照射器2台をタандем形に設備して、ラインのスピードアップをねらうことも、別々の二つの生産ラインに、それぞれ独立に設備して、2ラインを同時にはたらかせることも、いずれも可能である。図2.2, 2.3に、それぞれDP-300, DP-600の写真を示している。

DP-300 A(B), DP-600 A(B) ともに共通する特長は以下のとおりである。

(1) 長寿命の加速管

装置の心臓部にあたる加速管は、放出ガスを極度に少なくできるように独自の製作法を採用しており、イオンポンプによる連続排気とあわせて、清浄で良好な真空を維持するため、加速管の寿命を長くすることができる。

(2) 交換の簡単な電子銃と電子線取出窓

寿命部品である電子銃と電子線取出窓は、その交換性を容易にして、保守上の考慮をはらっている。電子銃は、加速管の中を通して交換する構造となっているため、電子線照射器の密閉圧力容器を開閉することなく、簡単に短時間でとりかえができる。また電子線取

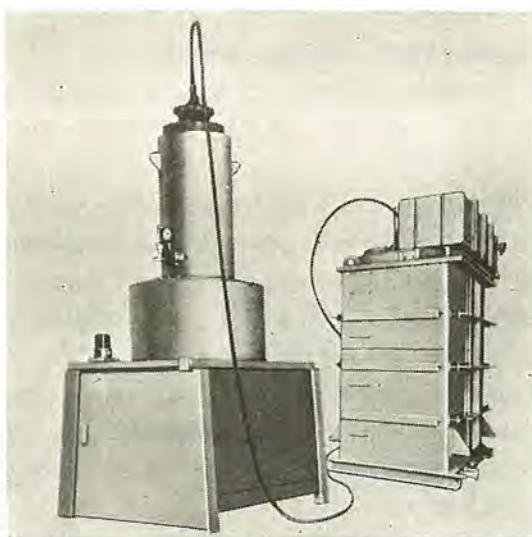


図 2.2 ダイヤトロン DP-300
Full view of DP-300.

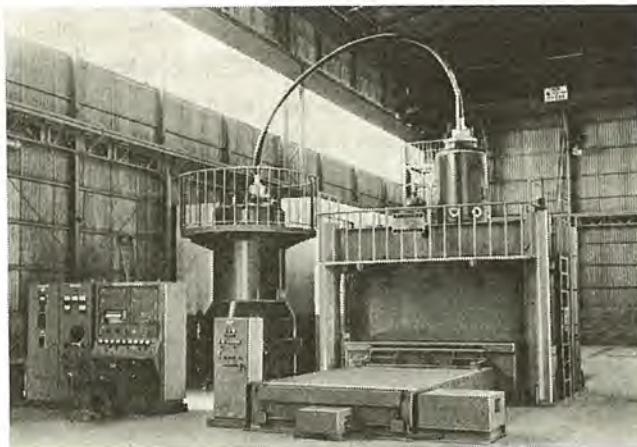


図 2.3 ダイヤトロン DP-600
Full view of DP-600.

出窓は、交換用の台車でスキャナをとりはずすことで、簡単に窓交換が行なえる。

(3) 簡単な操作

装置の運転は非常に簡単で、所定の電圧、電流値まで自動で上昇し、設定後は安定化制御がはたらいて、安定な自動運転が可能である。

3. 装置の定格

ダイヤトロン DP-300 A, DP-300 B, DP-600 A, DP-600 B の各機種について、それぞれの定格をまとめたのが表 3.1 である。

DP-300, DP-600 とも A 形は出力電流 50 mA であり、B 形は 100 mA である。電子線の出力パワーでみると、DP-600 B では、電子線のエネルギー 600 keV、電子線電流 100 mA であるから、出力パワー 60 kW となり、電子線照射装置として最大級の出力をもつものである。

表 3.1 中の電子線電流値は最大値であり、5 mA 以上最大値までが自動設定でき、設定値も連続的に可変にできる。ただし、電流の手動設定では、5 mA 以下の電流値にも設定は可能である。電子線のエネルギーは、DP-300 A(B), DP-600 A(B) でそれぞれ、300 keV, 600 keV と固定となっているが、DP-600 A(B) では、要求に応じて、300 keV から 600 keV まで連続可変にもできる。また、電

表 3.1 ダイヤトロン DP-300, DP-600 定格表
Ratings of DP-300 and DP-600.

	ダイヤトロン DP-300		ダイヤトロン DP-600		備 考
	DP-300 A	DP-300 B	DP-600 A	DP-600 B	
電子線 加速 電圧	300 kV		600 kV		
電子線 安定度	±1.5% 以下		±1.5% 以下		
電子線電流 / 照射器	50 mA	100 mA	50 mA	100 mA	
電子線電流安定度	±2.0% 以下		±2.0% 以下		
電子線 照射 幅	1,200 mm		1,200 mm		標準走査幅
照射野 均一度	±5.0% 以下		±5.0% 以下		
高電圧発生器 容量	300 kV 100 mA	300 kV 100 mA または 200 mA	600 kV 100 mA	600 kV 100 mA	
電子線照射器 続台数	1~2	1~2	1~2	1	

子線照射幅も、標準としては、1,200 mm であるが、電流値に対応させて、標準外の照射幅の装置も製作することができる。

4. 構 成

装置の構成は、DP-300 A(B), DP-600 A(B) とも、直流の高電圧を発生させる高電圧発生器、電子を発生・加速・走査して電子線取出窓から大気中に電子線を出す電子線照射器、電子線照射器に高電圧発生器からの高電圧を印加する超高電圧ケーブル、装置の運転・監視を行なう制御器または操作卓、補助電源および付属機器からできている。

図 4.1, 4.2 に DP-300A(B), DP-600 A(B) の構成をブロック図として示している。DP-300 と DP-600 とは高電圧発生器の高電圧発生の方式が異なるほかは、ほぼ同一の構成である。

4.1 高電圧発生器

DP-300 A(B) では、当社独自の高電圧発生方式である貫通 CT 形昇圧方式を用いている。図 4.3 がその原理を示す説明図である。二次巻線を付したユニットの CT 形トロイダル・トランスを共通の一次巻線で貫通させ、そのトランスの二次コイルに付した整流ユニットをカスケードで多段積み上げた昇圧方式であり、高電圧の絶縁はトランスの中心部を貫通する一次導体の絶縁によっている。この方式は、DP-300 のような比較的低い電圧(300 kV)には、特にすぐれており、大電流を容易にとり出すことができる。大きな出力を出す実際の回

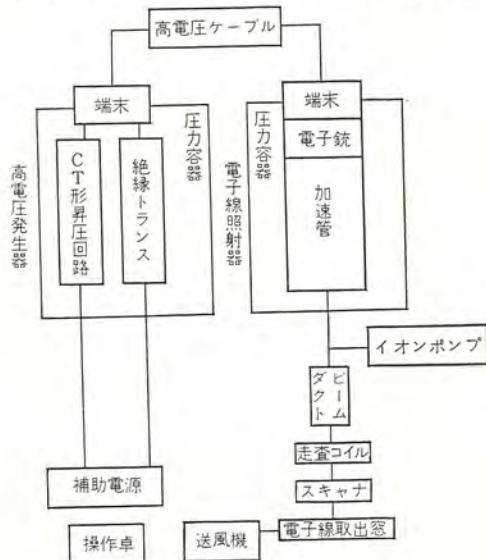


図 4.1 DP-300 ブロック図
Block diagram of DP-300.

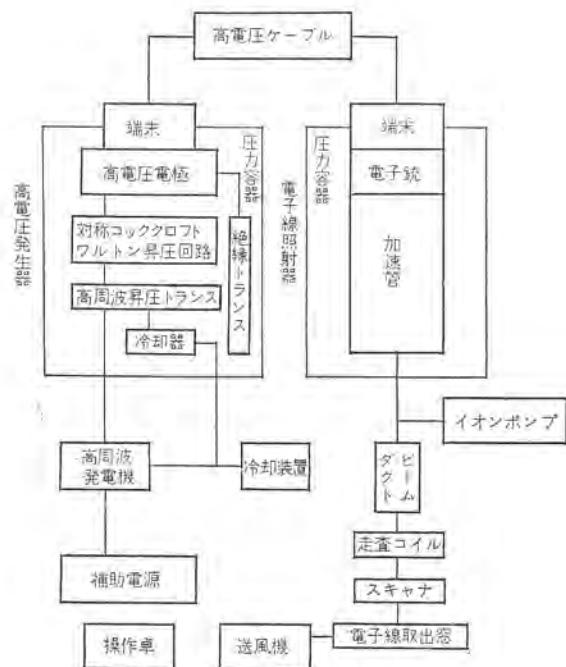


図 4.2 DP-600 ブロック図
Block diagram of DP-600.

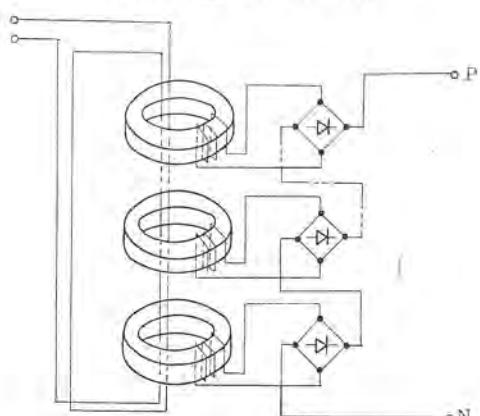


図 4.3 貫通 CT 形昇圧方式 (原理図)
Diagram showing the principle of CT type step-up transformer with through conductor primary.

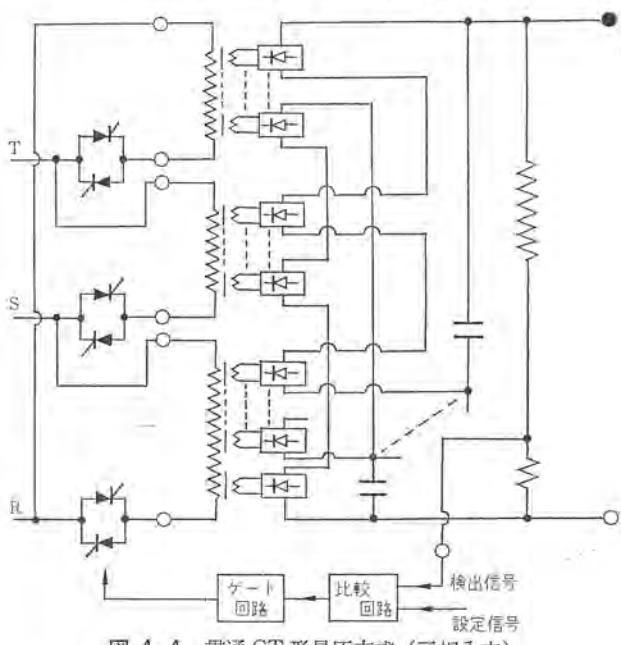


図 4.4 貫通 CT 形昇圧方式 (三相入力)
Multi-stage rectifying circuit (3 phase input)

路では、三相入力からバランスして整流することが好ましく、三相整流回路に拡張した実際の回路が図 4.4 である。

図 4.4 の回路では、段数を n 、CT 形トランスの二次コイル電圧を E (実効値) とすれば、1 段あたりの直流電圧は $2.7E$ 、全体の電圧は $2.7nE$ となる。

この方式では、トランスおよびその整流ユニットがユニット化され、全体組込では、これらのモジュール化されたユニットを所定の電圧に応じて順次重ねていける理想的な構造となっている。また、全体の絶縁は一次導体の絶縁によっているので、ユニットの部品は特に高い耐電圧のものを必要とするわけではない。

高電圧発生器は油浸形で、自然空冷で、水冷を必要としない。また、電子銃用に、高電圧上で使用する交流源の絶縁トランスを別に内蔵している。高電圧の制御は、入力三相をオープンデルタ接続にして、SCR の位相制御で行なっている。

DP-600 A(B) では、高周波コッククロフト・ワルトン形昇圧方式を採用している。コッククロフト形昇圧方式は高電圧をえるための回路としては定評があり、実績も豊富である。また、多段の場合難点であった大電流化も、電源周波数を高めることでカバーができる。DP-600 A(B) では、高周波発電機を用いて、商用三相を 10 kHz の高周波単相電力に変換し、高電圧発生器のコンパクト化をはかっている。主回路は、高周波昇圧トランスおよび対称 5 段のコッククロフト回路で、絶縁は加圧した SF₆ ガスによっている。図 4.5 に回路の概略を示す。また、電子銃用の電源には、樹脂でモールドした固体絶縁トランスをカスケードに積み上げて用いている。高電圧の制御は、出力電圧を分圧した信号を高周波発電機の界磁電流にフィードバックして行なっている。

DP-300, DP-600 とも高電圧発生器で昇圧した超高電圧を、可とう性のある架橋ポリエチレン絶縁の超高電圧ケーブルで電子線照射器に印加すると同時に、電子銃用の電力も給電している。

ケーブルの両端には、電圧破壊がおこらないよう、特別に工夫された高電圧端末が付属している。

4.2 電子線照射器

図 4.6 に電子線照射器の構成を図示している。電子線照射器は電子銃、電子銃電源、加速管、スキャナ、イオンポンプ、走査コイル等で構成

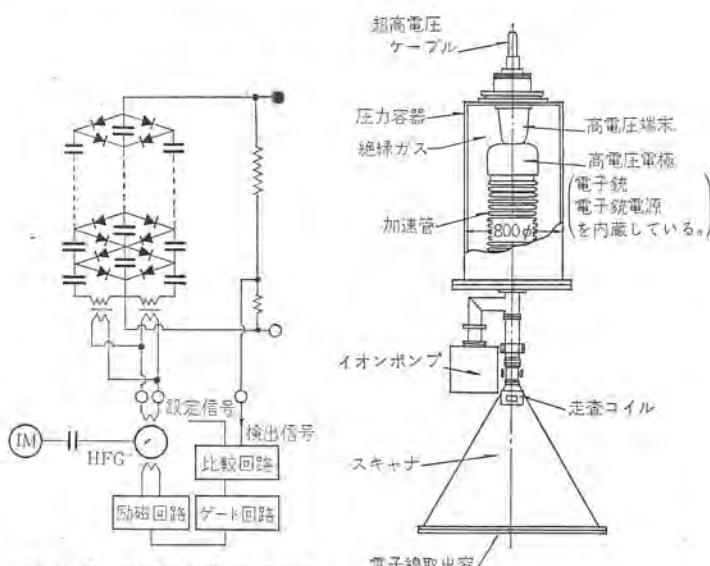


図 4.5 高周波 CW 昇圧方式
Symmetrical Cockcroft type rectifying circuit.

図 4.6 電子線照射器
Electron accelerator.

されている。電子銃は、加熱した フィラメント から熱電子を放射する もので、スパイラル に巻いた タングステン 線を フィラメント としている。 フィラメント には寿命があるため、 その部分の交換性を容易にする 必要がある。そのため電子銃の きょう (筐) 体部と フィラメント のとりついた 本体部と構造を分離し、 本体部のみ 加速管中を通して 脱離可能 とすることで、 従来のような、 密閉した 壓力容器を開放して、 電子銃の 交換をする という 労苦を除く ことができた。電子銃電源は、 フィラメント 電源と アノード 電源で、 いずれも リップル の少ない 直流電源 としている。特に フィラメント 電源の 直流化は、 電子線の 電流 リップル を 小さくする 上で 大きな効果を は としている。電子銃と 電子銃電源とは、 超高電圧ケーブル から 印加された 超高電圧の 電位に 配置されている。 加速管は 多段の 等電界形で、 高電圧が 各段に 均等に 分割して 印加されている。電子銃から出た 热電子は、 この 加速管の 多段電極の 中心軸に そって 通過する 間に、 印加された 電圧によって、 加速と 集束を 受ける。ダイヤトロン DP-300 A(B), DP-600 A(B) の 加速管は、 絶縁物の セラミック と 電極の 金属とを 特殊加工によって ろう付けした ものであるため、 構成材料がすべて 無機質で きており、 従来の 有機接着剤を使用した 加速管に 比して、 堅ろうなうえ、 真空中での 放出ガスが きわめて 少なく、 電子線や X線の 直接被ばくにも 劣化が ないなど すぐれた 特長を 有している。したがって、 清潔で 良好な 真空を 保つ ことができ、 加速管の 寿命を 長く することの ほか、 装置の 安定な 運転にも 良い 結果を 与えている。スキャナは、 走査コイルの 作る 交流磁場によって、 加速管中を スポット 状で 加速されて きた 電子線を、 照射物の 幅に あわせて、 走査し、 照射の 幅を ひろげる もので、 端的に 電子線を 大気圧中にとり出すための チタニウム はく (箔) で できた 電子線取出窓が とりつけてある。電子銃・ 加速管・ スキャナ は 内部を 真空に 排気して、 電子の 損失を 少なく している。排気は、 イオンポンプを 昼夜 連続して 使用し、 良好な 真空を 保持している。その他、 電子線の 地磁気による 偏向補正、 電子線の 集束の ため、 補助的な コイルも 設けてある。なお、 高電圧の 印加されている ケーブル 端末、 電子銃、 電子銃電源、 加速管はすべて 密閉した 壓力容器に 収めて、 SF₆ガスを 加圧して コンパクトに 絶縁している。

4.3 操作卓および補助電源

制御系は、 高電圧の 制御回路、 電子線電流の 制御回路、 走査コイル・ イオンポンプ などの 電源、 および 安全の インタロック 回路で構成され

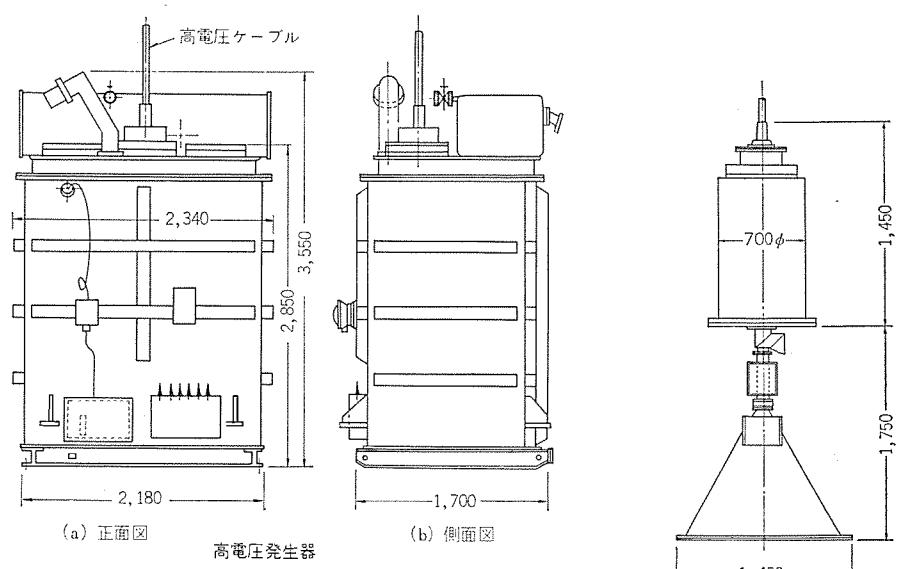
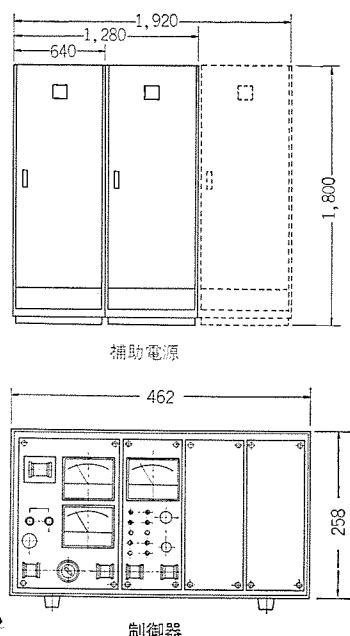


図 5.1 DP-300 の外形寸法
Outline dimensions of DP-300.

ており、 これらのうち、 直接操作に 関連するものは すべて 制御器 または 操作卓にまとめて 操作の 簡単化を はかり、 それ以外のものは 補助電源に 集めている。高電圧制御は、 高電圧の 検出信号と 設定電圧の 設定信号との 差を 入力側に フィードバックする 方式で、 DP-300 A(B) では、 三相入力の オープンデルタ 回路に入った 電力用 SCR の 位相の 制御に フィードバックし、 DP-600 A(B) では、 高周波発電機の 界磁電流にも どして、 制御および 安定化を はかっている。

電子線電流の 制御は、 電子線電流の 検出信号と 設定信号との 差を 絶縁駆動軸を 介して、 高電圧部に 設置された 電子銃の フィラメント電源に フィードバックして 行なっている。

走査コイルの 電源は、 SCR の スイッチング で 波形の よい 三角波電流を 発生させて、 電子線の 均一な 照射を 確保している。

安全の インタロックは、 人身の 安全確保は はより、 異常発生時の 装置の 破損を できるかぎり くいとめる ためにも 万全の方策が こうじられている。それらのうちでも、 真空・ 過電圧・ 過電流などの 重要な 点では 2重以上の 安全 インタロック が とられている。

4.4 付属機器

電子線照射器の 電子線取出窓の 冷却の ため、 ノズル から 風を 窓に 吹きつけて 冷却を行なっている。この 冷却風を 送る ため 送風機を 付属している。

DP-300 A(B) では、 高電圧発生器に 水冷を 要しないが、 DP-600 A(B) では、 高周波発電機および 高周波昇圧トランスの 水冷を行なっている。したがって この場合には、 冷却装置と 送水ポンプが 付属機器として 必要となる。

5. 装置の寸法および重量

装置の 据付、 利用に 参考とする ため、 各機種の 外形概略寸法 および 重量を まとめて 表 5.1 に 示す。また、 DP-300 の 外形寸法を 図 5.1 に、 DP-600 の それを 図 5.2 に 示している。

6. 必要な設備

装置を 据付けて 運転する ため に 必要となる 設備を まとめて 表 6.1 に 示す。表 6.1 中、 DP-600 で 記した 冷却水設備について、 付属機器として、 クーリングタワー、 送水ポンプを 含ませて 製作する 場合には、 原水のみの 補給で よい。

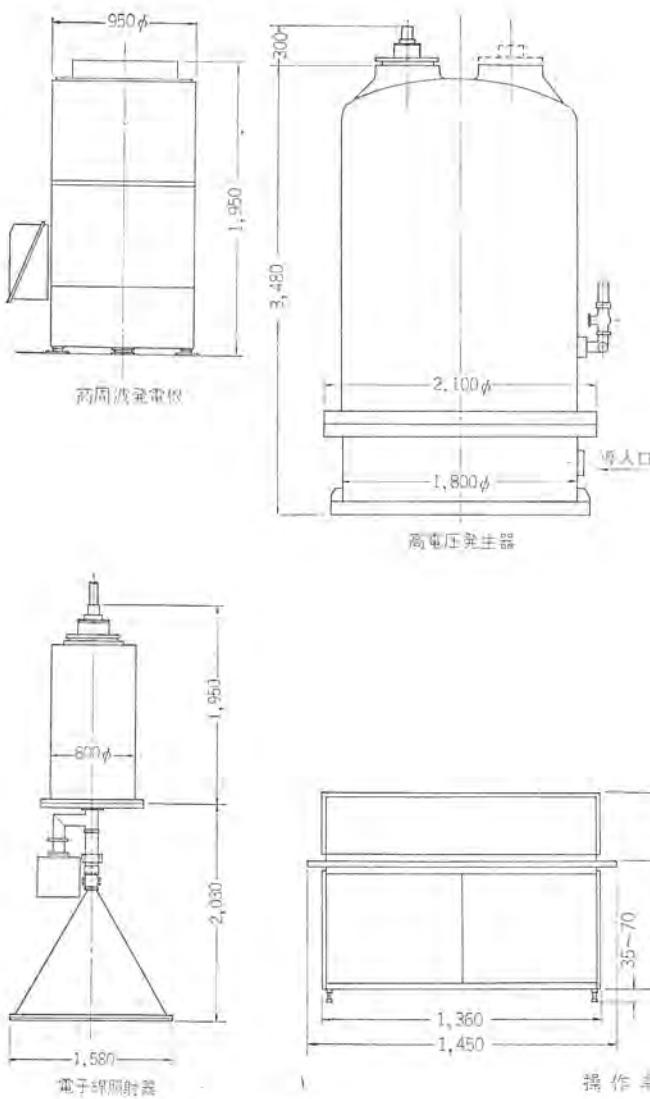


図 5.1 DP-300 および DP-600 の寸法・重量

表 5.1 DP-300 および DP-600 の寸法・重量
Dimensions and weight of DP-300 and DP-600.

(a) ダイヤトロン DP-300 A(B)

機器名	外形寸法 mm	重量
高電圧発生器	1,700×2,400×3,500 H	15 t
電子線照射器	700×1,450×3,200 H	750 kg
補助電源	650×1,300×1,800 H	400 kg
制御器	470×420×280 H	20 kg

(b) ダイヤトロン DP-600 A(B)

機器名	外形寸法 mm	重量
高電圧発生器	1,800φ×3,500 H	8.0 t
電子線照射器	900φ×1,950 H+1,450×400×1,750 H	1.0 t
高周波発電機	950φ×1,950 H	3.5 t
発電機盤	800×600×1,800 H	0.2 t
誘導電動機盤	600×600×1,800 H	0.2 t
照射電源盤	600×600×1,800 H	0.2 t
操作卓	1,450×800×1,050 H	50 kg

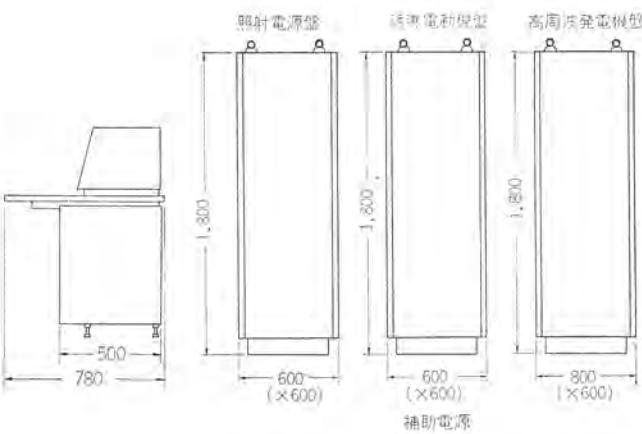


図 5.2 DP-600 の外形寸法

Outline dimensions of DP-600.

表 6.1 必要設備
Facilities requirements.

(a) ダイヤトロン DP-300 A(B) 電力設備

電力	形名		
	ダイヤトロン DP-300 A 電子線照射器 1台の場合	ダイヤトロン DP-300 B 電子線照射器 2台の場合	ダイヤトロン DP-300 A 電子線照射器 2台の場合
高電圧発生器用 kVA	23	45	45
補助電源用 kVA	1	2	1
イオンポンプ用(昼夜連続) kVA	1	1	1

(b) ダイヤトロン DP-600 A(B) 電力設備および冷却水設備

設備	形名		
	ダイヤトロン DP-600 A 電子線照射器 1台の場合	ダイヤトロン DP-600 B 電子線照射器 2台の場合	ダイヤトロン DP-600 A 電子線照射器 2台の場合
電力	400V 3φ kVA (起動時のみ)	150 (起動時のみ)	150 (起動時のみ)
	200V 3φ kVA	9	13
	200V 1φ kVA (起動時のみ)	9	11
	200V 1φ (昼夜連続) kVA	1	1
冷却水設備 l/min			
(水温 30°C 以下 水压 2 kg/cm²-g 以上 3 kg/cm²-g 以下)	70	70	70

装置の据付けに際しては、表 5.1 に記した重量に応じたつり(吊)具または搬入具が必要であるが、各部分を分解して据付・組立を行なうため、5トン程度のクレーン設備が設置されていることが望ましい。

そのほか、運転中に発生するX線のしゃへい設備、オゾンの処理設備および被照射物を搬送するコンベヤラインも必要であるが、これらは、用途ごとに異なった構造とレイアウトをとるので、個々のケースごとに最適な設計を行なっている。しゃへいの方式としては、独立した照射室に電子線照射器を据付けて、照射室外にX線のもれがないようにする方法もあるが、電子線エネルギーが600 keV以下の比較的低いエネルギーの装置では、スキャナの周辺およびコンベヤの外周を部分的にしゃへい体でとりかこんでしまう方法が一般的であり、しゃへい材料として、コンクリート・鉄・鉛などが用いられる。

7. 電子線の特性

利用者が被照射物への適切な照射が行なえるように、装置からとり出された電子線についての種々のデータが必要となる。そこで、DP-300, DP-600 でえられた電子線の特性データを以下に示す。

7.1 照射幅方向の電子線の分布

被照射物の幅にあわせて、電子線を走査し、照射幅方向に均一な電子線照射が行なえるようにする。窓下距離92 mmのコンベヤ面上での電子線の分布を測定したのが、図 7.1, 7.2 である。図 7.1

は DP-300 A で測定したものであり、図 7.2 は DP-600 A で測定したものである。図 7.1, 7.2 からわかるように照射幅方向の電子線の均一度は、それぞれ、 $\pm 3.1\%$ 以下、 $\pm 2.9\%$ 以下と良好なことが知れる。

7.2 コンベヤ移動方向の電子線の分布

コンベヤの移動方向での電子線のひろがりを DP-300 A で実測したのが図 7.3 であり、窓下の空気層の厚みがパラメータとしてとっている。

7.3 物質中での深部線量分布

空気層を通ってのち、物質中に入った電子線は、物質にエネルギーを与えていく。この際の物質の深さに対する線量分布を測定したのが図 7.4 で、DP-600 A を使って、電子線エネルギー 300 keV～600 keV の範囲で実測した。物質としては、100 μ 厚のポリエチレンテレフタレートフィルム (PETP、比重 1.3) を多数積層したものを用いた。

図 7.5 は DP-300 A を用いて、PETP 中の深部線量分布を求めたもので、窓下の距離をパラメータとしている。300 keV の電子線エネルギーでは、窓下距離によって、物質中の線量が大幅にかわることに注意しなくてはならない。

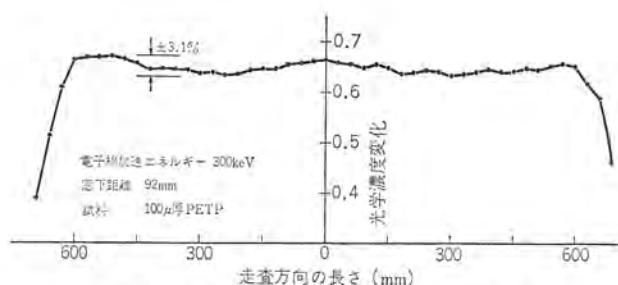


図 7.1 走査方向の電子線の均一性 (300 keV)
Uniformity of scanned beam.

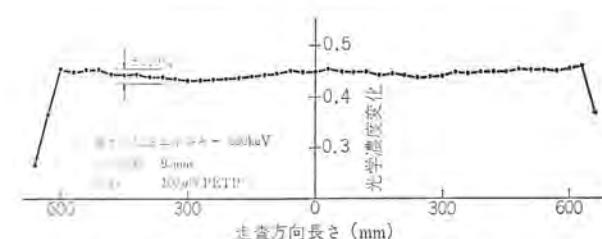


図 7.2 走査方向の電子線の均一性 (600 keV)
Uniformity of scanned beam.

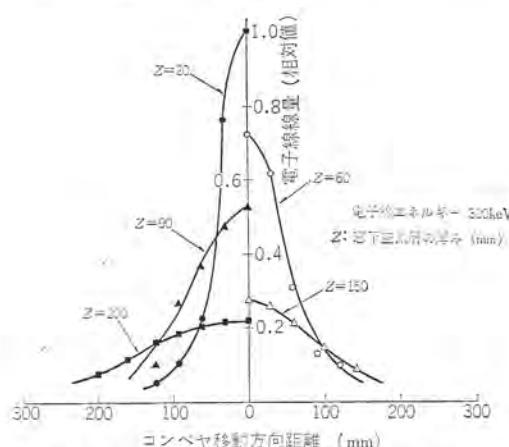


図 7.3 コンベヤ移動方向の電子線線量分布
Beam spread below window.

7.4 窓下空間での線量の空間分布

スキャナの電子線取出窓から空気中に照射された電子線が窓下空間でどのような線量分布をするかを調べたのが、図 7.6 である。測定は DP-300 A を用いて、電子線エネルギー 300 keV で行ない、空間の測定点に 100 μ 厚 PETP フィルムを線量計として配置して電子線照射を行なった。結果は図 7.6 に等線量線として図示している。窓下の空気層が厚くなれば、照射幅の有効部分が減少してしまうことがよく示されている。

7.5 背面におかれた材質による表面線量の効果

塗膜の乾燥などの場合に、塗膜での吸収線量に、背面におかれた基板の材質が大きな影響をおよぼすことが知られている。これは基板によって後方散乱された電子が、表面の塗膜に、再びエネルギーを与え、この後方散乱の割合が基板の材質によって異なるからである。各種材質の基材が表面の線量に与える効果を、基材を空気とした場合に対して求めたのが、表 7.1 である。重金属の鉛を基材とする場合には、表面の線量は空間線量に比して 50% も大きくなることに着目すべきである。

以上図 7.1 から図 7.5 までの測定はすべて、100 μ 厚の PETP

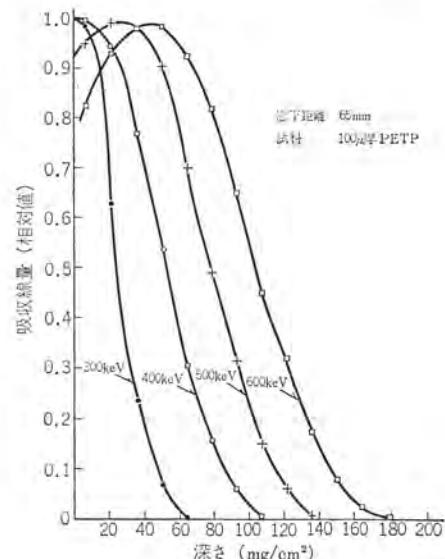


図 7.4 深部吸収線量分布
Depth dose curves.

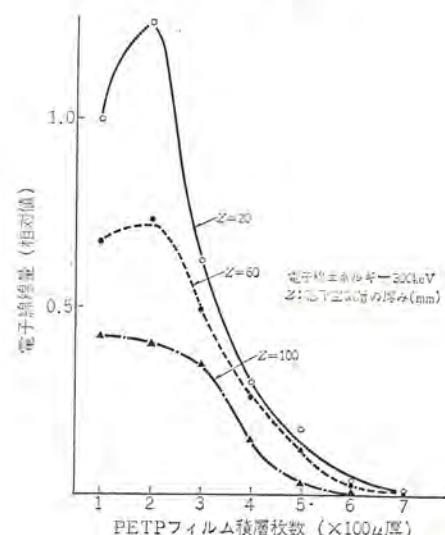


図 7.5 深部電子線線量分布
Depth dose curves.

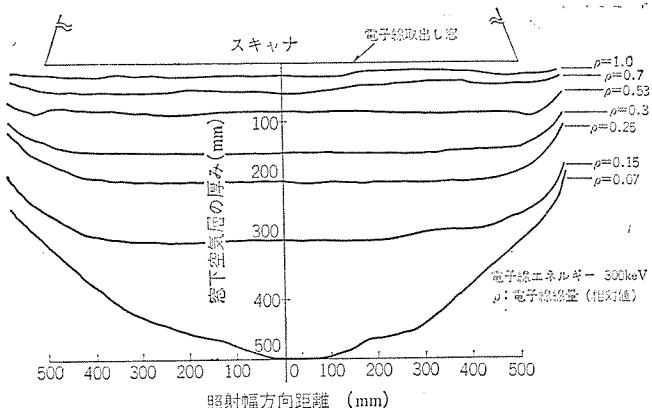


図 7.6 照射幅方向の電子線線量の空間分布
Equi-dose curves.

表 7.1 基板による後方散乱電子線の効果
Effect of backscattered electrons.

基板の種類	後方散乱電子線の効果
ペーパークラフト	1.15
アクリル	1.20
テフロン	1.21
木	1.20
アルミニウム	1.23
鉄	1.24
銅	1.30
鉛	1.51

のフィルムを線量計として使用し、照射前後の $330\text{ m}\mu$ の波長に対する吸光度の変化を分光光度計で実測し、この値を光学濃度変化 (ODC) に換算して、相対的な線量値とした。

8. 電子線の線量

塗膜のキュアリングでよく利用される電子線エネルギー 300 keV について線量の計算式を与えておく。線量は、照射の条件でかわるものなので、以下の特定の照射条件のもとでの計算式であることに注意し、他の照射条件での線量は、PETPなどのフィルム線量計から相対値で求め、フィルム線量計の検量曲線から間接に求める方法をとる。

特定の照射条件として、電子線エネルギー 300 keV；均一照射幅 1,000 mm；窓—サンプル間距離 80 mm；サンプル配置 1 mm² アルミニウム板（サンプルの基材）上りつけ；照射ふん囲気大気中；を考え、基材にはりつけた薄いサンプル（約 10 mg/cm^2 ）の表皮部分で吸収する線量を次式で与える。

$$D(\text{Mrad}) = 2.5 \times \frac{I(\text{mA})}{v(\text{m/min})}$$

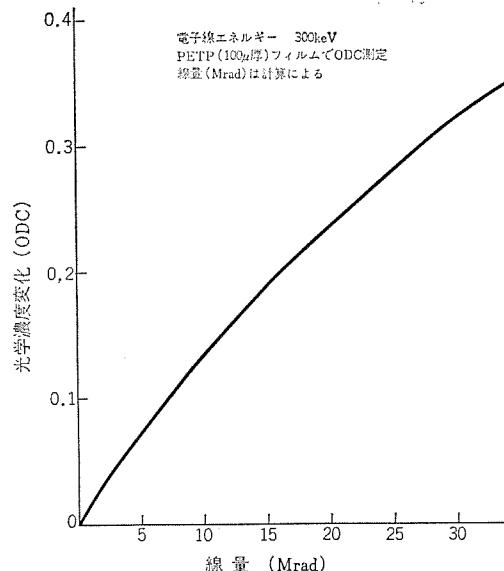


図 8.1 線量と光学濃度変化
Dose vs. optical density change.

ここで、
 $D(\text{Mrad})$ ：薄いサンプルの表皮部分で吸収する線量
 $I(\text{mA})$ ：電子線電流
 $v(\text{m/min})$ ：コンベヤの移動速度

である。この式を使って、PETPフィルムの光学濃度変化 (ODC) を線量に換算する検量曲線を求めたのが図 8.1 である。

9. むすび

放射線化学工業で用いられる電子線照射装置 ダイヤトロン DP-300 A (B), DP-600 A (B) について、利用者に便利なように解説と豊富なデータとを提供すべく本稿をまとめた。特に、電子線の特性について多くのデータを記したので、利用者は電子線の最適な照射を考慮する上で有益であると考える。

ダイヤトロンのシリーズとして、電子線エネルギー 600 keV 以上のものは、DP-900 A (B), DP-2000, DP-3000 なども製品化しているが、これらの詳細については、あらためて、別稿でとりあげる予定である。

ダイヤトロンにつき、より深い理解をえて、電子線の利用技術がより早く進展し、工業化への道がひらけることを期待しつつ、利用者各位にいささかでもお役に立ちえたならばと念じている。

(昭和 48-5-4 受付)

参考文献

(1) 上岡、姫野、関：三菱電機技報、46, No. 7, 755 (昭 47)

電子線による各種プレポリマの重合硬化

鈴木 康弘*・角田 誠*
菅野 俟行*・柴山 恒一**

Electron Beam Curing of Prepolymers

Central Research Laboratory Yasuhiro Suzuki・Sei Tsunoda
Toshiyuki Sugano・Kyoichi Shibayama

Coating industry has made a search for rapid curing methods, one of their achievements being the use of high energy electron beam radiation. Radiation curing technique has substantial merits because of its high speed, low material and operational costs, improved properties of cured films and applicability to substrates sensitive to heat. The advent of low cost electron accelerators has made possible the practical application of this method.

However, since the mechanism of radiation curing reaction is different from conventional curing methods, special new compositions have to be "designed" for this new process.

In this paper are discussed relations between the curing efficiency and the nature of prepolymers and/or irradiation conditions.

1. まえがき

放射線の化学効果を研究し、工業に利用する気運が活発化してきた。高分子合成・各種高分子材料（繊維、フィルム、プラスチックスなど）の改質さらに医療器具の殺菌などの分野では着々と工業化例が増大している⁽¹⁾⁽²⁾。

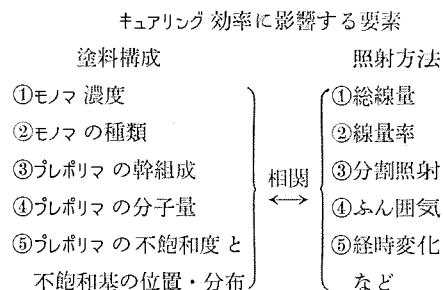
物質に化学作用をおよぼす高エネルギー放射線には各種のものがあるが、工業的に利用しうる放射線としては γ 線と電子線が代表例である。特に加速器からの電子線はエネルギーや線量のコントロールが容易で最も利用しやすいものである。

化学技術を軸とする材料の分野では放射線加工や放射線合成などは直接製品化に結びつく可能性が大きい。その理由は、放射線の化学効果が熱や触媒を用いる従来法とは異なり、1) 低温でも反応を起こすことができる。2) 固相状態でも化学反応を誘発することができる。3) 反応をコントロールする自由度が大きいなどの特長を持っているからである。

放射線技術の利用分野の一環に電子線塗膜硬化法がある。これは無溶剤型塗料による橋かけ硬化塗膜を加熱することなく、秒速硬化させうるなど潜在的にすぐれた特長を有しており、無公害および塗装作業の合理化と安全性を飛躍的に向上しうる革新的技術として大きな注目を集めている。

電子線塗膜硬化法は被照射物をバルクで処理する在来の放射線利用とは異なり薄膜照射という点に特異性があり、この技術が大きくクローズアップされた背景には低エネルギーで大出力の電子線加速器の急速な発達におうところが大きい。一方、電子線用塗料はラジカル機構に基づく重合・架橋反応によって硬化（乾燥）するものであり、電子線に適した高性能の塗料開発が重要なポイントと考えられる。具体的には、1) 塗装作業性が良好であること、2) 電子線活性にすぐれていること、3) 塗膜性能は現用塗料の水準を十分上まわったものであることなどがあげられる。これらの要求事項は互いに関連性を持つ場合が多く、電子線用塗料の基本構成としては不飽和プレポリマモノマ系からなる橋かけ高分子が主流となっている。この場合、塗料構成（化学的要因）と照射方法（条件）はキュアリング効率に対して

影響を与える要素となり、両者は強い相関を示す。この事情を要約すると次のようになる。



すなわち、高性能の電子線用塗料の開発はこれらの相関を排除しうる要請に基づいて新しいformulationの探索がなされている。

最近、電子線硬化法に関する総説⁽³⁾や文献⁽⁴⁾はかなり見られるようになってきた。ここでは、電子線用塗料の分子設計という立場から、上述したキュアリング効率におよぼす諸要因を考察してみたい。

2. 塗料構成とキュアリング効率

塗装状態で流动性を有し、塗膜物性がすぐれていることおよび硬化反応がラジカル機構であるという観点から、電子線用塗料の基本構成としては不飽和プレポリマモノマ系が主流となっている。電子線硬化法は塗料（液体）を瞬時に塗膜（固体）へと相変化さすものであり、塗料構成はキュアリング効率に顕著な影響をもたらす。以下にこれらの点について述べる。

2.1 モノマ量

塗装作業性の向上面より塗料粘度の調節はモノマ量によって行なわれる場合が多い。電子線硬化法ではモノマ量によって硬化速度は顕著な影響を受けることが知られている。図2.1にHoffmanらが行なった不飽和ポリエチルモノマ系によるスチレン濃度とゲル分率の関係を示した⁽⁵⁾。スチレン濃度が20~30%付近でキュア速度は最大となり、さらにスチレン量が増すと逆に硬化性が低下し、ゲル生成に対して最適モノマ濃度が存在することを示している。この原因としては“ゲル効果”が重要な要因となっていることが指摘されている。硬化性とモノマ量の関係は後述するようにプレポリマおよびモノマの種

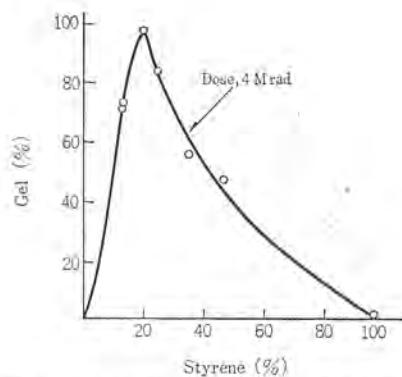


図 2.1 モノマ量の硬化性におよぼす影響⁽⁵⁾
Effect of styrene content in gel formation
Dose rate=0.25 Mrad/s.

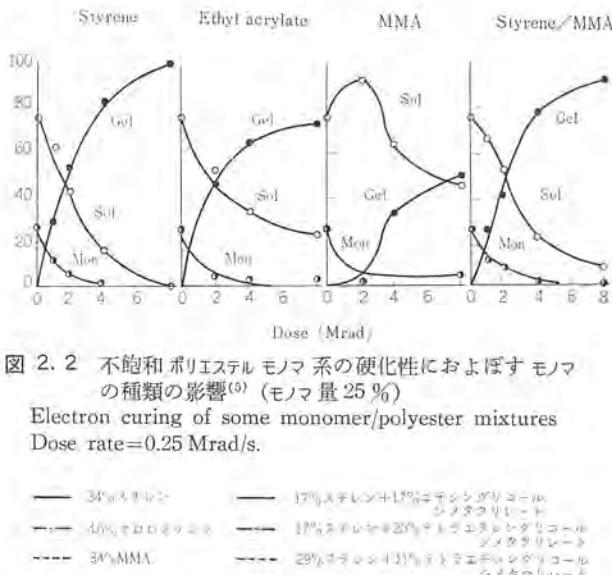


図 2.2 不飽和ポリエスチルモノマ系の硬化性におよぼすモノマの種類の影響⁽⁵⁾ (モノマ量 25%)
Electron curing of some monomer/polyester mixtures
Dose rate=0.25 Mrad/s.

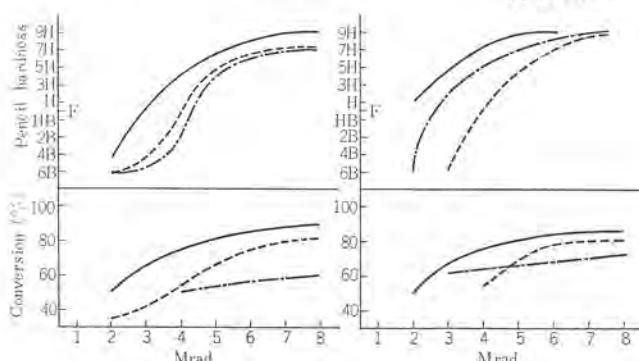


図 2.3 モノマの種類の影響⁽⁷⁾
Effect of mono and difunctional monomers
(3 MeV van de Graaff).
Alkyd from poly (propylene phthalate maleate).

類さるに照射条件などによって変化し必ずしも一定したものではない。

2.2 モノマの種類

塗膜の物理性質を変化させ塗膜性能を改良する手段としてモノマの種類を変えたり、複数種を組み合せて使用される。また活性種濃度を増大させ硬化速度を速めるために G 値の大きいモノマを添加剤的要素として用いる場合などがある。

図 2.2 に同じプレポリマ(不飽和ポリエスチル)のゲル生成に対するモノマの種類による影響が調べられた結果を示した⁽⁵⁾⁽⁶⁾。硬化速度はスチレン>アクリル酸エチル>メタクリル酸メチル(MMA)という順序と

なっており、MMA の場合モノマ反応率は高いにもかかわらずゲル分率が低いのは、分子生長末端が不均齊化反応で停止してしまうこと、および Poly (MMA) が照射により分解することに基づくとしている。一方、MMA とスチレンの混合モノマの場合にはスチレン単独の挙動に近くなる。

不飽和ポリエスチルモノマ系のモノマ差については Pietsch によっても調べられており、図 2.3 のような結果が得られている⁽⁷⁾。反応性はスチレン>MMA>クロロスチレンの順であり、ラジカル発生の G 値の大きいクロロスチレンを単独で用いた場合には、プライマリーラジカルがスプール内で再結合の機会が多くなり、結果的には反応性が低下するものと考えている。ジビニルモノマの添加効果についても調べられており、マレート系ポリエスチルについてキュア効果の良いものから並べると、

スチレン、ビニルトルエン、メタクリル酸、ジビニルモノマ>MMA>クロロスチレン、アクリロニトリルの順となる。

2.3 プレポリマの幹組成、分子量、不飽和基濃度

工業用電子線加速器を用いて、プレポリマの構成とキュアリング効率の関係を調べた報告は Hoffman らによってなされている⁽⁸⁾。プレポリマの分子鎖の種類、不飽和基濃度および分子量などの効果を表 2.1 に示した試料系を用いてしらべている。塗料構成の比較をスチレン濃度とゲル分率から求めた結果を図 2.4 にそれぞれ示した。これらの結果は次のように要約される。

(a) スチレン量の効果: スチレン量の効果については 2.1 節で述べたと同じ挙動が示されている。すなわち、ゲル生成にはスチレンの最適配合域がいずれの比較においても見られる。またこの領域の広さには不飽和度の効果が大きく反映されている。

(b) 分子量の効果: 分子量の大きい C のほうがスチレン量の多い領域でゲル生成量が小さくなっている。これは高分子量のプレポリ

表 2.1 不飽和ポリエスチルの構成と比較⁽⁶⁾
Characterization of polyester backbones and basis of comparison.

記号	組成(モル比)	分子量	比
C	IP/MA/PG = 1/1/2	2,400	分子量
H	PA/MA/PG = 1/1/2	800	
A	= 3/1/4	2,400	不飽和度
B	IP/MA/PG = 2/1/3	2,100	分子量
C	= 1/1/2	2,400	
B	IP/MA/PG = 2/1/3	2,100	分子量
D	IP/FA/DEG = 2/1/3	2,300	分子量

IP: イソフタル酸

MA: 無水マレイン酸

PA: 無水フタル酸

FA: フマル酸

PG: ブロビレングリコール

DEG: ジエチレンジリコール

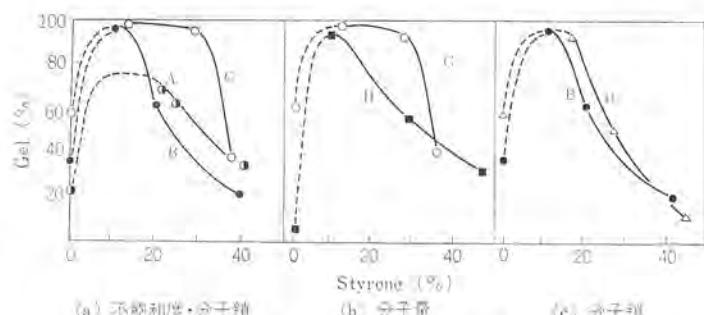


図 2.4 不飽和ポリエスチルの構成と硬化性⁽⁹⁾ (ゲル分率とスチレン量で示した (8 Mrad))
Effect of styrene content in gel formation in styrene-polyester mixtures.

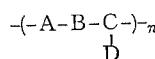
マのほうがゲル形成能が大きく、生成ポリマはより緻密なゲルとなり、微視的な層分離（ゲルとポリスチレン）を生じるためと考えている。

(c) 不飽和基濃度: 不飽和度の小さい A のほうがスチレン量の多い領域でゲル生成量が大きくなっている。この試料系列では不飽和度の小さいものほど逆にイソフタル酸量が多くなる。このため A のほうがスチレンとの相溶性が良好となり、ポリマ分子の広がりが大きくなってゲル生成量が増加するためと考えている。

(d) 分子鎖の種類：プレポリマB（プロピレングリコール）とプレポリマD（ジエチレングリコール）の比較で見られるように、分子鎖の屈曲性に富んだDのほうがガル形成能は大きい。

このように電子線硬化方式では塗料構成が電子線活性に大きく影響することが明らかである。その要因としては塗料が液体から固体(三次元網目)と分子成長する過程において、形成されたゲル内の活性種や未反応塗料の重合架橋によぼすポリマ鎖の易動性の効果が大きいことが考えられる。

プレポリマの構成と塗膜の実用性質との関係をしらべたものに、
Nordstrom らの報告がある⁽⁸⁾。プレポリマーは



(ここで A=MMA, B=エチルアクリレート, D=メタクリル酸) の化学構造を有する側鎖不飽和アクリル共重合体である。C の配合を変えることで不飽和度を変化させた場合(表2.2)には、硬度および耐溶剤性は塗膜の架橋密度とともに増加し機械的性質は低下する。次に C 量を一定とし、A と B の配合を変え主鎖のかたさ(ガラス転移温度; T_g)を変化させた場合(表2.3)には架橋密度はほぼ一定であることから耐溶剤性についてはほとんど変化はみられないが、硬度や耐衝撃性には塗膜の可とう(撓)性の効果が現われている。

表 2.2 側鎖ビニルアクリルコポリマーの不飽和度と塗膜物性⁽⁸⁾
Variation in acrylic copolymer unsaturation.
(15 Mrad, フィルム厚さ = 1.0 ± 0.1 μ)

プレポリマ組成 (モル%)				フィルム性能				
MMA	EA	GMA	DBPT*	硬度 (エンドビック)	耐溶剤性 (MEK)	マンドレル bend, In	耐衝撃性 In-lb	
36	60	4	0.4	2B	11	Pase	1/8	>80
34	57	9	0.8	F	20	Pase	1/8	40
32	53	15	1.25	H	50	Pase	1/4	<10
29	49	23	1.75	H	50	Pase	3/4	<10
25	42	33	2.35	H	50	Fail	1 1/4	<10
19	32	49	3.00	H	50	Fail	1 1/4	<10

* 分子量 1,000 当たりの二重結合の数

表 2.3 側鎖ビニルアクリルコポリマーの組成と塗膜物性⁽⁸⁾
Variation in polymer composition.

プレポリマ組成(モル%)				フィルム性能		
MMA	EA	GMA	Tg°C	硬度(エンピツ)	耐溶剤性(MEK)	耐衝撃性In・lb
	91	9	-11	B	18	50
17	74	9	+4	HB	21	50
25	66	9	+11	HB	23	40
34	57	9	+20	F	20	40
41	50	9	+28	F	23	10

3. 照射条件とキュアリング効率

電子線硬化法においては塗料の化学構成によって電子線活性は頗著な影響を受け、すぐれた塗膜物性を有する塗料開発には細密適正

な分子設計を必要とする。電子線硬化法の特色は現時点におけるプロセスエコノミーを最高度に発揮しうる技術であることおよび需要分野に対して、在来品に見られない新性能を持った材料を提供しうる技術分野でもあることである。すでに指摘したように電子線用塗料は照射条件によって硬化性および塗膜物性に影響を受けるものが多い。上述したような期待との関連からこの問題をしらべることは重要である。以下に代表的な照射条件による影響を述べる。

3.1 線量

処理能率の向上面より、当然塗料の硬化線量は低いことが要請される。線量と塗膜の硬化度（ゲル分率）の関係は塗料構成によって異なるが、一般には線量とともに増大し完全硬化にいたる。しかしながら、ゲル分率から求めた硬化度は 100 % であっても系の不飽和結合がすべて重合架橋に関与したものでない場合がある。一例として図 3.1 に多価アルコールのジアクリレートを用いてしらべた結果を示した⁽⁹⁾。このプレポリマは電子線硬化性にすぐれており、1~10 Mrad の線量域ですべてゲル分率（メチルエチルケトン中 60°C/48 h 抽出）は 100 % 近い値を示した。しかし照射後の硬化試料を差動熱量計 (DSC 測定) により昇温させていくと図 3.1 に示したように発熱ピークが観測される。これは網目構造体の中で未反応でうめ込まれていた不飽和基の熱重合に起因したものと考えられる。発熱ピーク面積の比較から、プレポリマの分子量の大きいもの（すなわち η の大きいもの）ほど残存不飽和基数は少なくなる傾向がある。これはポリマー鎖の屈曲性の程度がゲル効果に反映されているものと想像される。

塗膜の橋かけ硬化は十分に行なわれていても、照射線量によって形成される網目構造に特長的な差がもたらされる場合がある。不飽和ポリエチレン系で線量を変えて得た塗膜の粘弾性測定結果を図3.2に示した⁽¹⁰⁾。電子線硬化塗膜は十分に硬化していることが、照射試料を熱処理(150°C/10h)しても粘弾性挙動に変化がないことから確められている。図3.2からゴム弾性率の値は高線量硬化系ほど大きくなる傾向があるが、ガラス温度(T_g)の相対尺度である分散の温度位置は線量の相違によってほとんど変化しておらず、橋かけ高分子に見られる一般傾向とは異なっていることが明らかである。このような粘弾性挙動は高分子網目の中に人為的に物理的結節点(からみ合い結合)を導入した場合のものと類似性がある⁽¹¹⁾。高線量照射系は塗膜内に形成される活性種量は多いものであるから、とえばからみ合い結合などを多く含んだような網目の存在状態を

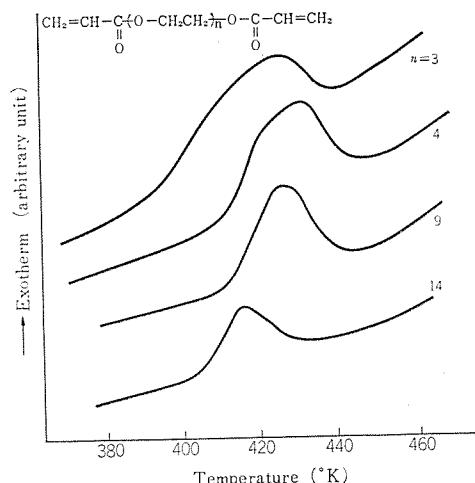


図 3.1 DSC サーモグラムに現われた後硬化量⁽⁹⁾
 DSC curves as degree of post cure by heating after irradiation
 (Dose=2 Mrad, Dose rate=1 Mrad/s, N₂ gas 中).

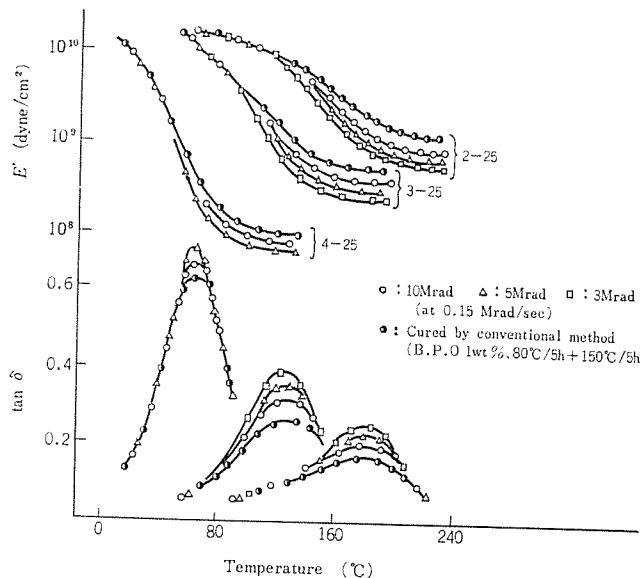


図 3.2 粘弾性温度分散に現われた硬化線量の効果⁽¹⁰⁾ (110 Hz)
Effect of total dose on viscoelastic dispersion of some polyester resins. Resin : poly (propylene · succinate · fumalate), monomer : 25 % styrene.

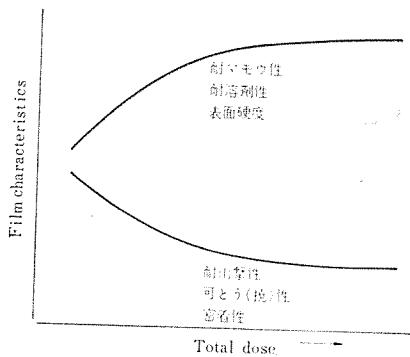


図 3.3 塗膜性質におよぼす線量の影響
Effect of total dose on film properties.

呈することが想像される。

塗膜の実用性質と線量の関係は一般的には図 3.3 のような傾向にある。諸特性のバランスができるだけ低線量照射で得られる塗料が望ましいことはいうまでもない。

硬化線量は塗料構成および線量率やふん囲気などによって影響を受ける。

低線量化の研究に、不飽和基（二重結合）の一部に三重結合を導入するなどの報告がある⁽¹²⁾。

3.2 線量率

ある硬化線量で塗膜性能が十分に規格水準を満足する場合には処理能率の向上面より高線量率下で硬化させるのが得策である。しかしながら、電子線用塗料の多くはかなり顕著な線量率依存性を示すものが多い。表 2.1 に示した不飽和ポリエチルスチレン系につき、抽出測定から線量率依存性をしらべた例を図 3.4 に示した⁽⁶⁾。10 Mrad/min 以下の線量率ではゲル生成速度は線量率にほぼ比例しているが、これを越えると重合速度は一定値に收れんしていく傾向がある。このような線量率効果については Burlant⁽¹³⁾ らによっても指摘されている。

電子線硬化法の特色の一つは短時間硬化にあり、線量率と硬化速度の関係がどのようになるかという問題を詳細には(把)握すること、および塗料開発においては線量率依存性を有しない電子線活性にす

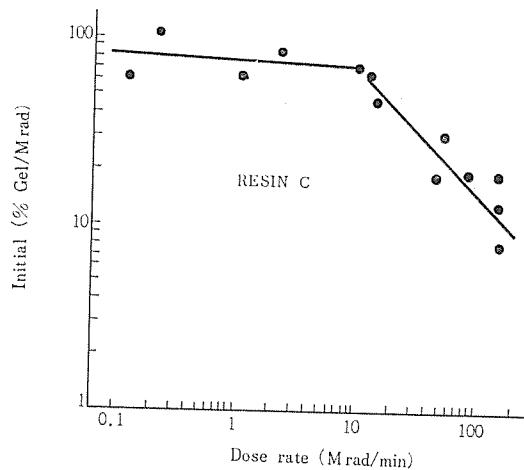


図 3.4 線量率が硬化性におよぼす影響⁽⁶⁾
Effect of dose rate on efficiency in gel formation of resin C.

ぐれを塗料構成を設計することが、この技術の工業化に対して重要な意味を持っている。

筆者らは電子線活性と塗料構成の問題をしらべる一環としてプレポリマの不飽和基の分布の効果について検討した⁽¹⁴⁾。ここでいう不飽和基の分布とは系の不飽和基濃度は同じでもその分布に不均一性のある場合をいう。このような試料系の編成は不飽和基濃度の異なる同族体をブレンドすることによって行なうことができる⁽¹⁵⁾。プレポリマとしてはフマル酸濃度 (FA) の異なる ポリプロピレンサクシナート フマラートを用意し、フマル酸量の多いポリエチル (HF 成分) とそれの少ないポリエチル (LF 成分) の組み合せを変えて所定量の不飽和度となるようにブレンドした系とストレート系の電子線硬化性を線量率とゲル分率 (可溶部) からしらべた結果を図 3.5 に示した。ここでストレート系とは合成時に所定量の不飽和基濃度となるようにフマル酸を配合して得られるものであり、ブレンド系との比較では不飽和基の分布は均一なものとなっている。

図 3.5 より不飽和基の分布の効果は電子線活性に特長的な差をもたらすことが明らかである。すなわち低線量率下での比較ではストレート系のほうが高い硬化度を示すが、逆に高線量率下ではブレンド系のほうが硬化性がよくなっている、線量率依存性も小さいものが多い。

この原因を調べるために硬化塗膜の粘弾性質を測定した結果を図 3.6 に示した。ブレンド系には $\tan \delta$ 曲線に二つの分散ピークが観測される。低温側の分散は LF 成分の分子運動に、高温側のそれは HF 成分の分子運動に由来するものと考えられ、ブレンド系の分子鎖の存在状態は不均一になっており、各成分に対応する domain を形成していることが推論される。すでに 2.1 節で指摘したように、プレポリマモノマ系ではプレポリマの不飽和結合に対するモノマ量には最適領域があり、不飽和度の高いプレポリマのほうがこの領域は大きくなる傾向がある。このような事情と粘弾性挙動との対応から、ブレンド系では HF 成分はより多くのスチレンと共重合する可能性が考えられ、LF 成分の重合架橋は最適モノマ域にもちこまれた条件で行なわれる可能性が考えられる。この場合、ゲル内で LF 成分は内部可塑剤的な作用を有し、ポリマ鎖の易動性を大きくし、系の電子線活性を向上させる効果を発揮することが考えられる。

3.3 ふん囲気効果

電子線用塗料の硬化機構がラジカル重合反応に基づくことから硬

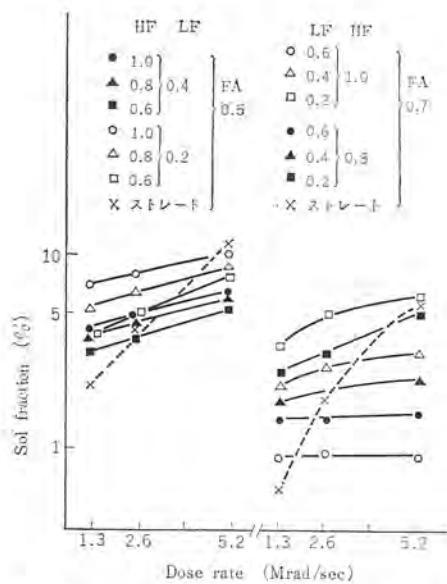


図 3.5 電子線硬化性におよぼす不飽和基の分布の効果⁽¹⁴⁾
(10 Mrad)

Effect of distribution of unsaturated group on electron sensitivity.

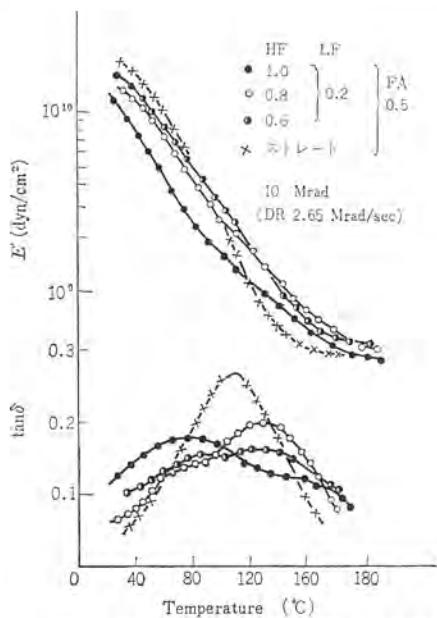


図 3.6 粘弾性挙動に現われた不飽和基の分布の効果⁽¹⁴⁾
(11 Hz)

Viscoelastic dispersions of some polyester resins (11 Hz).
X ; Straight system, other ; blended systems.

化に際しては空気(酸素)の硬化妨害作用が問題となる。とくに高速乾燥の条件(高線量率、低線量)ではこの妨害作用は重要である。このため、照射を不活性ガス下で行なう、また塗料はできるだけ酸素に対する感受性の低いタイプにするなどの検討が行なわれている。

図3.7にエポキシアクリル系塗料を用い、鉛筆硬度およびブル分率と硬化線量の関係を空気中と窒素ガス中で照射した場合についてまとめて示した⁽¹⁶⁾。窒素ガスふん囲気の効果は著しいことが明らかである。その効果は線量軸をシフトすれば重ね合せが可能なような傾向を有している。すなわち、不活性ガス中で照射すれば硬化線量を空気中での照射に比べ、約3 Mrad程度低くすることができる。ふん囲気効果は塗料組成によって異なるが、特に表面硬化性に顕著な影響をもたらすことがわかる。

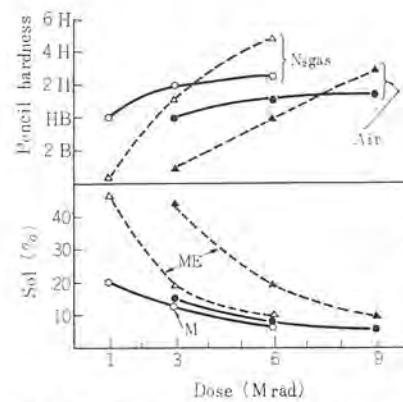


図 3.7 照射ふん囲気の効果⁽¹⁶⁾
Effect of irradiation atmospheres on some properties of cured film.

Resin : Epón 828/MAcA/THPA=1/2/0.3 (mol)
M : 40% MMA, ME : 25% MMA+15% EGDMA.

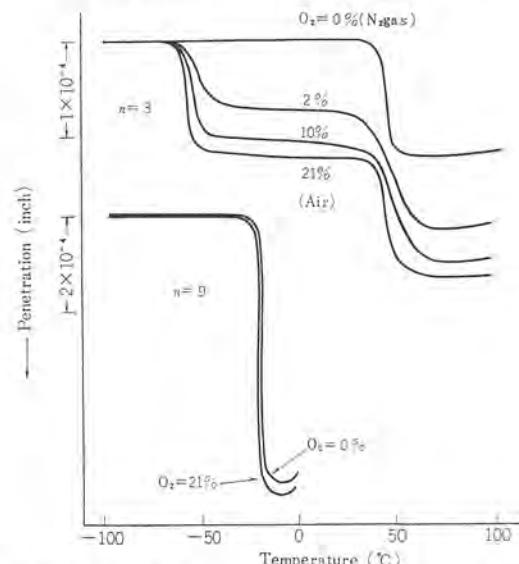


図 3.8 針入度-温度関係に現われたふん囲気の影響⁽⁹⁾
Recorder traces of TMA curves of irradiated coatings under different O₂ content atmospheres.

Prepolymer : see Fig. 2.
Curing : Dose=2 Mrad, Dose rate 1 Mrad/s
TMS : Film thickness=100±10 μ, Weight=150 g/mm²,
Scan speed=20°C/min.

不活性ガス(窒素ガス)により空気の置換度を変えた場合の塗膜の硬化性におよぼすふん囲気の影響を多価アルコールのジアクリレートを用いてしらべた結果を図3.7に示した⁽⁹⁾。図3.8は塗膜の表面層が受けるふん囲気の影響をThermomechanical Analysis法により針入度から求めたものである。n=3のプレポリマの場合には、窒素ガス中照射塗膜は高温でT_gを反映した一つの針入挙動しか示さないが酸素(空気)が存在すると明確な二つの針入挙動が観測される。低温側の針入挙動は未硬化層の存在を意味している。この場合、低温側の針入の終点と高温側の針入の開始点までの領域はよく分離されており、酸素の存在は表面層のある深さまで顕著な硬化妨害作用を有することがわかる。このプレポリマの場合には、酸素濃度2%のふん囲気下でも表面から約2μまでが未固化層となっており、表面が完全に硬化した塗膜を得るには酸素濃度をかなり低くしたふん囲気が必要である。一方、n=9のプレポリマの場合には空気中照射でも塗膜表面には未固化層は存在していない。このプレポリマは幹骨格が屈曲性に富んでおり、分子量も大きく、特長的なゲル効果が反映されたものと考えられる。

4. む す び

電子線塗膜硬化法は高性能の橋かけ硬化塗膜を無公害で塗装から製品化まで一貫したシステムとして適用できる革新的技術として注目が大きく、近い将来電子線利用分野の一つの頂点を形づくるものと期待されている。

電子線硬化法の完成には大出力照射装置（ハードウェア）の開発とともにその利用技術（ソフトウェア）の水準の高さが大きくものをいう。この中では高性能の電子線に適した塗料の開発が特に重要である。本稿では塗料の分子設計という立場から、キュアリング効率におよぼす諸要因につき、いくつかの留意点を考察した。電子線用塗料の硬化機構に由来する制約を打破し、その特長を最高度に発揮させることができ、塗料の高性能化と品種拡大のために重要なポイントであると考えられる。

現在、実用レベルの電子線用塗料が各所で開発されており、各種の実用データの集積が進められている段階にあると考えられる。

参 考 文 献

- (1) 田畠、荒木：工業技術ライブラリ、12（放射線加工）、日刊工業新聞（昭44）
- (2) 日本原子力産業会議：放射線産業利用調査報告書（昭44）
- (3) たとえば
W. Deninger, M. Patheiger : J. Oil Col. Chem. Assoc., 52, 930 (1969)
W. H. T. Davison : Ibid, 52, 946 (1969)
- (4) たとえば
A. R. T. Tawn : Ibid, 51, 782 (1968)
小林、井手：日本接着協会誌、7, No. 6, 348 (昭46)
上池：塗装と塗料、[176], 37 (昭45)
石渡：塗料と塗装、[191], 61 (昭45)
- (5) A. S. Hoffman, D. E. Smith : Modern Plastics, June (1966)
- (6) A. S. Hoffman et al : Ind. Eng. Chem. Prod. Res. Develop., 9, No. 2, 158 (1970)
- (7) G. J. Pietsch : Ibid, 9, No. 2, 149 (1970)
- (8) J. D. Nordstrom, J. E. Hinsch : Ibid, 9, No. 2, 155 (1970)
- (9) 鈴木、角田、菅野、柴山：未発表
- (10) 鈴木、上田、永井、柴山：三菱電機技報、44, No. 6, 827 (昭45)
- (11) 柴山、鈴木：高化、23, 24 (昭41)
- (12) 鍵谷：プラスチックス、22, No. 2, 1 (昭46)
- (13) W. Burlont, J. Hinsch : J. Polymer Sci., A-2, 2135 (1964); A-3, 3587 (1968)
- (14) 鈴木、柴山：第21回高分子年次大会、24D05 (昭47)
- (15) K. Shibayama, Y. Suzuki : J. Polymer Sci., A-3 2637 (1965)
- (16) 鈴木、柴山：三菱電機技報、47, No. 2, 193 (1973)



特許と新案

負荷開閉駆動回路 (実用新案登録第898545号)

考案者 茂木 充

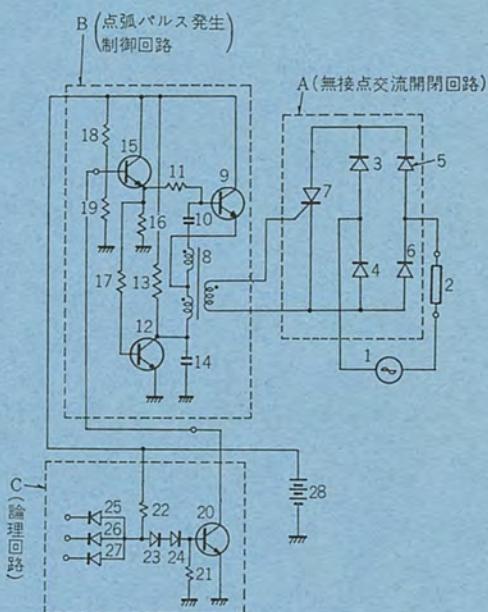
この考案は主電源に接続された交流負荷を、サイリスタ等により構成された無接点開閉回路で、開閉動作する場合における負荷開閉駆動回路に関するものである。

図のような構成において、論理回路(C)の入力端子であるダイオード(25)～(27)の入力がすべて正電位の場合、点弧パルス発生制御回路(B)の論理入力である設定用トランジスタ(15)のベースは、接地電位すなわち論理入力レベル0の状態となり、点弧パルスの発生は阻止されている。

また論理回路(C)の入力端子であるダイオード(25)～(27)のいずれか1個のダイオード入力が接地電位の場合、論理入力設定用のトランジスタ(15)のベース電位は、正電位すなわち論理入力レベル1の状態となり、点弧パルスが発生される。

図に示したように、この考案は交流開閉回路(A)との直流絶縁および発生点弧パルスの結合にパルス変成器(8)を用い、このパルス変成器(8)で点弧パルス発生制御回路(B)を構成するブロッキング発振回路を形成しているため、回路構成が簡単になり、また点弧パルス発生回路としてブロッキング発振方式を用いているため、従来の単接合トランジスタによる構成と比較して出力波形がすぐれ、しかも従来の電源供給電圧の1/3～1/4の低電圧で、従来よりも大きな点弧パルス出力がえられるから、この点弧パルス発生回路と論理回路(C)との供

給電源を共用でき、従来のような整合および電源電圧変動などに対する不利はなくなった。



双方向性半導体スイッチ (特許第649959号)

発明者 蒲生 浩・川岸 昭夫・市村 隆彦

この発明は、双方向性半導体スイッチにおいてもそのスイッチング特性を失うことなく、ゲート電極を主電極の中央部に設けた、いわゆるセンタゲート形構造としたものである。このようなセンタゲート形構造は、従来の周辺部にゲート電極を有する構造のいわゆるサイドゲート形

構造のものに比べ、高耐圧大容量化に有利であるとともに、ゲート電極と陰極中の最遠点との距離が小さくなるきわめて望ましいものとなる。しかしながら従来双方向性半導体スイッチにおいては、センタゲート形構造を達成するのは困難であった。

図は、この発明の双方向性半導体スイッチで、図1は図2、3のCにおける断面図、図2はゲート電極のある面を示す平面図、図3

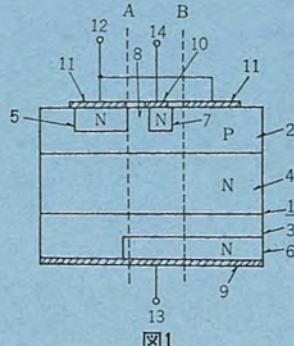


図1

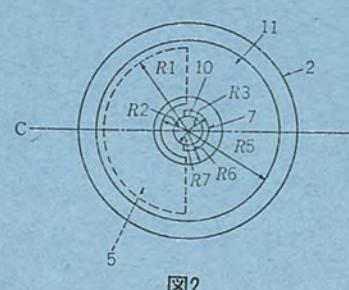


図2

特許と新案

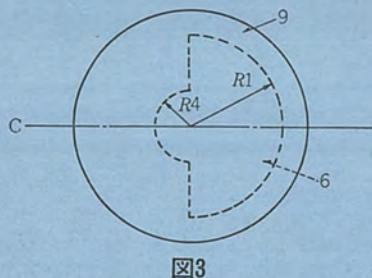


図3

は図2の反対の面を示す底面図、図4は図2の主要部を拡大した動作説明図である。

この発明は、センタゲート形にしても点弧でき、しかも特性を向上させるためにP形領域(2)、ゲート領域(7)、主電極(11)およびゲート電極(10)の相互位置および形状に工夫をこらしたものである。図4において、まず主電極(11)に対してゲート電極(10)が正である場合、ゲート電流は、ゲート電極(10)から主電極(11)へそれぞれ、

- (a) N形領域(5)の半径R2の半円弧部(15)の順バイアスPN接合
- (b) N形領域(5)とゲート領域(7)の間の間隔(8)を通じて直接主電極(11)に通じる横方向抵抗 r_1
- (c) ゲート領域(7)の下方を通じて主電極に通じる横方向抵抗 r_2
- (d) ゲート領域(7)とP形領域(2)のPN接合の逆接合抵抗 r_3

を通じて流れるが、一般に $r_1 \ll r_2, r_3$ である。この r_1 は、P形領域(2)の不純物濃度および厚み、間隔(8)の幅および長さ等を変えることによって数オームから数百オームに調整することが可能である。またこの抵抗 r_1 は、半円弧部(15)の順バイアスPN接合に並列に入ったものと考えることができる。以上から上記抵抗 r_1 をある程度大きい値に調整して

$$I_g \geq \frac{V_D}{r_1}$$

ただし、 I_g ：ゲート電流、 V_D ：障壁電圧 $0.6 \sim 0.8$ Vとすれば、半円弧部(15)における順バイアスPN接合を横切ってN形領域(5)から

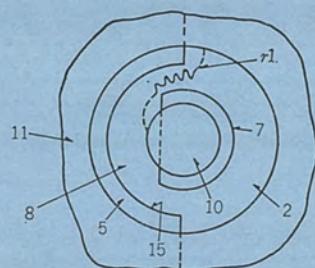


図4

電子の注入が生じスイッチを開始する。

次に主電極(11)に対してゲート電極10が負である場合、ゲート電流は主電極(11)からゲート電極(10)へそれぞれ

- (a) 半円弧部(15)のPN接合の逆接合抵抗 r_4

- (b) 横方向抵抗 r_1

- (c) 横方向抵抗 r_2

- (d) ゲート領域(7)とP形領域(2)の順バイアスPN接合

を通じて流れるが、一般に $r_1 \ll r_2, r_4$ である。またこの抵抗 r_1 は、ゲート領域(7)とP形領域(2)の順バイアスPN接合に並列に入ったものと考えることができる。以上から r_1 をある程度大きい値に調整して、同様に

$$I_g \geq \frac{V_D'}{r_1}$$

ただし、 V_D' ：障壁電圧で $0.6 \sim 0.8$ Vとすれば、ゲート領域(7)とP形領域(2)の順バイアスPN接合を横切って、ゲート領域(7)から電子の注入が生じスイッチする。

以上のように、この発明の主要部は、主電極(11)に対してゲート電極(10)の正負に関係なく、上記抵抗 r_1 をある程度大きい値に調整して、許容ゲート電流範囲において点弧動作を可能とし、双方向性半導体スイッチにおいてもセンタゲート形構造を可能としたのである。

高耐圧プレーナ形サイリスタ

杉岡八十一*・梶原康也*・山根正熙*・小嶋鈴夫*

High Breakdown Voltage Planar Type Thyristors

Kitaitami Works Yasoichi Sugioka・Yasuya Kajiwara・Masahiro Yamane・Suzuo Kojima

With the increase of demands for planar type thyristor which are suitable for mass production, it is required to develop higher breakdown voltage planar type thyristors.

The planar junction structure, diffusion technique and surface treatment are improved on. Then two kind of high breakdown voltage planar type thyristors rated at 0.3 A 400 V and 2 A 400 V are developed.

The amount of production increases day after day, as the field of application enlarges.

The high breakdown voltage planar type thyristors have excellent electrical performance and high reliability. They are applied to not only the consumer goods but industrial apparatus.

1. まえがき

プレーナ形サイリスタの登場以前にはサイリスタの応用はおもに大電力の応用に限られており、民生機器や産業機器を無接点化・小型化するという小電力サイリスタの応用は進んでいなかった。しかし、このプレーナ形サイリスタの登場はまさに小電力サイリスタの本格的な需要の幕あけとなった。幕あけはまず民生機器部門からはじまり、さらに、信頼性の向上、良好な使用実績が得られるに及んで工作機械・産業機械など各種の産業機器部門でも使用されるようになった。登場以来わずか5年の期間であるが、この期間における生産、需要の伸びは著しく、小電力サイリスタといえばプレーナ形サイリスタを連想させるにいたった。

このような背景には、価格面で市場の要求を満たせる量産性に富んだ構造の開発とプレーナ構造自体が持つ信頼性の高さがあった。しかし、このようすすぐれたサイリスタにも、高耐圧化と接合温度を高くするという点で悩みがあったが、今回の開発により、これらの悩みはみごとに克服されて、プレーナ形サイリスタは飛躍的に発展した。

本文は従来のプレーナ形サイリスタの耐圧が200 Vから400 V、また定格最高接合温度が100°Cから、従来のメサ形サイリスタと同じ125°Cまで高くできた理由について、構造、ウェーブロセス、表面処理の点から説明するとともに、定格、特性および応用について、解説する。

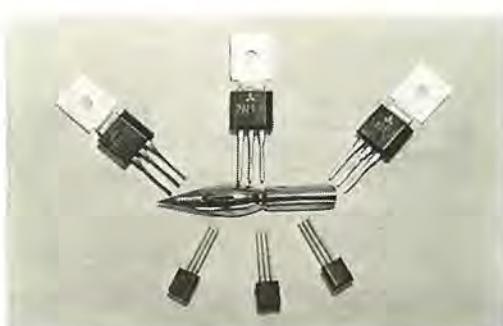


図 1.1 高耐圧プレーナ形サイリスタ
High voltage planar type thyristors.

2. 三菱高耐圧プレーナ形サイリスタの特長

2.1 構造

プレーナ形サイリスタのシリコンペレット構造を図2.1に示す。構造の特長は、接合終端面が、一つの表面に露出していて、その端面上をシリコン酸化膜のような絶縁膜によって、保護されていることである。プレーナ形サイリスタは、金ばく(箔)を用いて、圧延リードの上に、シリコンペレットを熱圧着し、金線をワイヤーボンドして、さらにシリコン樹脂でモールドすることによって、組立てられる。

プレーナ形サイリスタの耐圧に関する要因は、a) シリコン基板の比抵抗、b) N_B層幅(図2.1参照)、c) プレーナ接合の曲率半径、d) pn接合の不純物濃度(勾配)、e) 表面電界、などである。

シリコン基板の比抵抗とN_B層幅の選定は、もっとも重要である。比抵抗、pn接合への印加電圧および空乏層の幅との間には、pn接合が階段接合であると仮定すれば、

$$W = \sqrt{2\varepsilon\varepsilon_0\mu V\rho} \quad \dots \dots \dots (2.1)$$

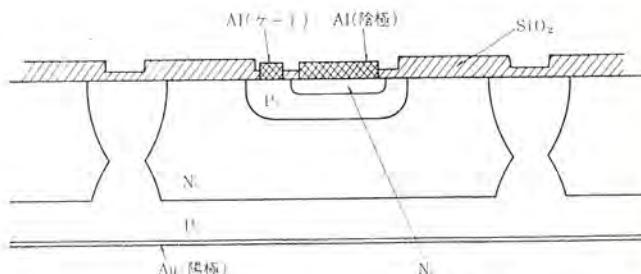


図 2.1 プレーナ形サイリスタのペレット構造
Pellet structure of planar type thyristor.

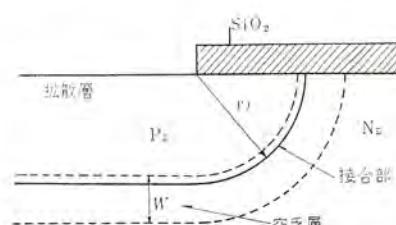


図 2.2 プレーナ接合の形状
Shape of planar junction.

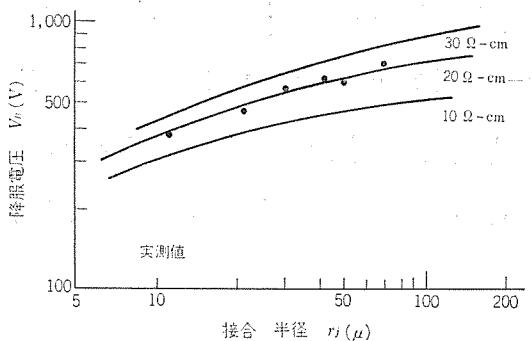


図 2.3 接合半径と降服電圧
Radius of planar junction, r_j vs. breakdown voltage V_B .

の関係がある。 W は空乏層の幅, ϵ はシリコンの比誘電率, ϵ_0 は真空の誘電率, μ は電子の移動度, V は印加電圧, ρ は比抵抗である。アーリ効果やパンチスルーが起こらないように, N_B 層幅を選ぶことが、たいせつである。

プレーナ形サイリスタの接合形状は、図 2.2 に示すように、半径 r_j のほぼ円筒形になる。このような円筒形接合の降服電圧は、

$$V_B = V_B' \left[\left\{ (2+r) r \right\}^{\frac{1}{2}} - r \right] \quad (2.2)$$

によって、示される⁽¹⁾。ここで $r = r_j/W$, W は空乏層の幅, V_B は円筒形接合の降服電圧, V_B' は平面接合の降服電圧である。図 2.3 は、式 (2.2) をグラフにしたものである。同一比抵抗に対して、円筒形接合の降服電圧は、 r_j を大きくすることにより、平面接合の降服電圧に近づけることができる。高耐圧プレーナ形サイリスタは、この r_j を大きくするように設計されている。高い降服電圧を得るためににはシリコンペレットの内部構造の工夫以外に、表面電界を極力小さくして、表面層での電圧降服を防ぐことが重要である。表面電界を弱くする方法として、ゲート制御電極構造、ガードリング構造⁽²⁾、エッチドサーフェス構造⁽²⁾およびフィールドリミティング構造⁽³⁾などが、提案されている。しかし、図 2.3 の実測データから明らかのように、定格ピーク繰り返しオフ電圧 400 V の高耐圧プレーナ形サイリスタを歩どまりよく製造するには、これらの構造を用いなくても、表面保護に用いる酸化膜の中へ侵入する不純物電荷および界面電荷を制御することによっても可能である。

2.2 ウェハプロセス

ウェハプロセスにおいては、構造設計通りの拡散深さと不純物表面濃度を制御すること、および清浄な拡散をすることが、もっとも重要である。一般にプレーナ構造の素子製造には、p 形不純物として、ボロンを用いる。ボロンによる表面濃度の正確な制御は、むつかしいものであるが、高耐圧プレーナ形サイリスタを製造するのに必要な表面濃度を $5 \sim 8 \times 10^{17} \text{ atoms/cm}^2$ 範囲内に制御する方法を確立した。さらに拡散前処理および拡散方法の工夫、酸化膜清浄化工程の導入などにより、酸化膜中に含まれる有害不純物を減少させることができた。こうしたウェハプロセスの改良により、構造設計通りの高耐圧プレーナ形サイリスタを製造することができる。

2.3 表面処理

プレーナ形サイリスタにおける表面処理は、サイリスタの表面を保護する絶縁膜の内部および絶縁膜とシリコンとの界面に存在する電荷の量を制御する目的と、外部ふん囲気中の水分の影響およびナトリウムなどの有害な不純物電荷の侵入を防止する目的のために、行なわれるものである。界面電荷制御については、たとえば絶縁膜の内部および絶縁膜とシリコンとの界面に、正の電荷が多量に存在すると、 N_B

層表面層が N^+ 化されるために、プレーナ形サイリスタに電圧が印加されたとき、表面層での空乏層がひろがりにくくなり、表面層の電界が大きくなつて、表面層内で電圧降服をひき起こして、設計通りの降服電圧が得られない場合がある。実験により高耐圧プレーナ形サイリスタを製造するためには、界面電荷の単位面積当たりの数 (N_{ss}) を $5 \times 10^{11} \text{ 個/cm}^2$ 以下にしなければならないことがわかった。すなはち清浄な ウェハプロセスにより、 N_{ss} を $5 \times 10^{11} \text{ 個/cm}^2$ 以下に保てば、表面層での空乏層は十分に広がり、降服電圧は表面層の電界よりも円筒形接合の電界によって、おこることがわかった。

つぎに降服電圧が外部ふん囲気、とくに湿気によって影響を受ける場合がある。これはサイリスタをおおう絶縁膜の表面に水分が吸着して、負の電荷としてはたらき、 N_B 層表面層が N^- の状態になり、チャネルができるためである。この結果漏れ電流が増加し、またゲートトリガ電流も変化する。このような現象を防止するためには、絶縁膜厚を厚くして、吸着電荷の影響を少なくすることおよび界面電荷を常に適当量保持していて、吸着電荷を相殺させ、吸着電荷の影響を少なくすることである。高耐圧プレーナ形サイリスタの界面電荷の数は、 $3 \sim 5 \times 10^{11} \text{ 個/cm}^2$ に制御されている。

有害不純物の侵入を防止するために、絶縁膜である酸化膜の中にりんを混入させたり、 Si_3N_4 膜でおおったりする。酸化膜中のりんの量は多いほうが、有害不純物侵入の防止には、効果が大きいが⁽⁴⁾、りんを多量に含んだ酸化膜は、吸湿しやすいことも知られている。したがって、酸化膜中に含むりんの量を適量に制御することが重要である。りんを含んだ酸化膜と Si_3N_4 膜の併用は、有害不純物侵入防止に、さらに効果的である。

2.4 信頼性

図 2.4 は、高耐圧プレーナ形サイリスタ CR 02 AM の接合温度とオフ電圧との関係を示している。接合温度が高くなると、オフ電圧も高くなっている。これは、温度上昇によって、降服電界が増大するためであり、理想的な構造設計と表面処理が、施されていることを示している。このような高耐圧プレーナ形サイリスタの降服電圧の経時変化はなく、定格最高接合温度を十分な余裕をもって、 125°C にすることができた。図 2.5 は、ゲートトリガ電流が経時変化しないことを示している。表面処理により P_B 層表面の界面電荷が制御されているので、小電流領域における電流増幅率が安定している。その結果ゲートトリガ電流と保持電流が安定しているのである。

最適な構造設計、任意に不純物プロファイルを制御できる清浄なウェハプロセス、および界面電荷制御と有害不純物電荷侵入防止をする表面処理などによって製造された高耐圧プレーナ形サイリスタは、メサ形チャンシールサイリスタとほぼ同等の高い信頼性をもっている。

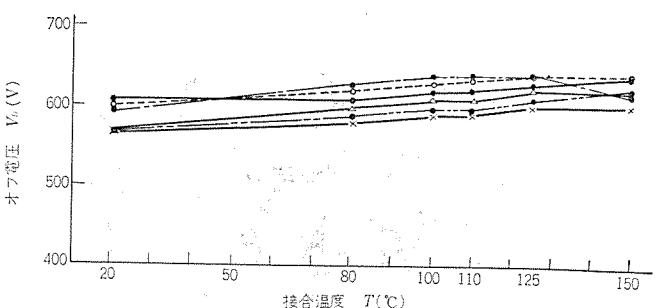


図 2.4 接合温度とオフ電圧の変化 (代表例)
Junction temperature, T vs. off state voltage V_B .

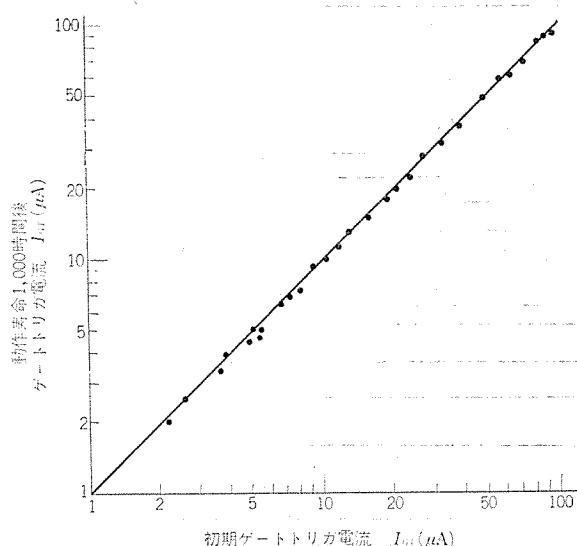


図 2.5 初期ゲートトリガ電流と1,000時間後ゲートトリガ電流
Initial gate trigger current vs. gate trigger current after 1,000 h in operational life test.

3. 定格と特性

プレーナ形サイリスタのいわゆる“プレーナ構造”といふのは、小電力サイリスタのすぐれた構造、製法の一つであるが、従来のメサ形サイリスタに比べ、定格電圧および定格最高接合温度の低い素子しか得られないという問題があった。そのため、プレーナ形サイリスタはせっかく、1) もれ電流が少ない、2) ゲート感度の良い素子が得やすい、3) 経時変化が少ない、などのすぐれた性能、高い信頼性を有していても、応用範囲が限定されてしまうため、より高い耐圧、高い接合温度の素子が望まれていた。したがって、研究もこのようない定格をアップすることに重点がおかれていたが、2章で述べたような構造、製法を採用することにより、プレーナ形サイリスタでもメサ形サイリスタと同等の耐圧と接合温度が得られるようになって、一つの技術的な壁を打破った。一例として、表3.1に三菱プレーナ形サイリスタCR02AMの主要定格と特性を示す。

3.1 定格電圧

従来市販されていたメサ形サイリスタの定格電圧の最高値は400～600Vであった。これに対し、プレーナ形サイリスタでの最高電圧は200Vであって、300V以上の素子は高耐圧素子と呼ばれ、その開発、量産も思うにまかせなかった。しかし、前述のように、プレーナ形でも定格ピーク繰り返しオフ電圧が400Vという素子が容易に得られ

表 3.1 三菱プレーナ形サイリスタCR02AMの主要定格と特性
Principal ratings and characteristics of Mitsubishi planar thyristor CR02AM.

項目	定格および特性値	単位
定格ピーク繰り返しオフ電圧	50～400	V
定格平均オン電流	0.3($T_a=30^\circ\text{C}$)	A
定格サーボン電流	10	A
定格接合温度	-40～+125	°C
最大オフ電流	100	μA
ゲートトリガ電流	1～500	μA

るようになった。また、非繰り返し電圧定格では600Vまで可能となり、メサ形サイリスタとほぼ同程度の耐圧を有するサイリスタの量産が可能になった。

3.2 定格最高接合温度

プレーナ形サイリスタの出現した初期においては、静特性で高い電圧に耐えられたとしても、動特性が十分でなかったり、信頼性の点から止むを得ず、定格最高接合温度は100°Cに抑えられていたが、その後の構造の工夫や表面処理技術の著しい進歩により、メサ形サイリスタと同じ125°Cが可能となり、プレーナ形サイリスタは性能面でもまったく、メサ形サイリスタとそん(遙)色のないものとなった。

3.3 高耐圧化が及ぼす諸特性への影響

高耐圧のサイリスタを得る一つの方法として、 N_B 層を厚くすることが考えられるが、これは他の電気的特性に悪い影響を及ぼす。たとえば、プレーナ形サイリスタの場合、接合終端面がすべて上面に露出している構造のために、 N_B 層を厚くすることは陰極の有効面積を狭くし、同じ大きさのシリコンペレットのメサ形サイリスタに比べオン電圧が大きくなる。したがって、オン電圧を大きくしないために陰極の有効面積を大きくしなければならない。これは大きなシリコンペレットを必要とする。また、 N_B 層を厚くすることは保持電流、ラッピング電流へも悪影響を及ぼす。たとえば、耐圧を200V高くするように N_B 層を厚くすれば、約1mAの保持電流の増加を招く。これは N_B 層のキャリヤのライフタイムを長くすることにより補償される。しかし、 N_B 層の厚さはゲートトリガ電流にはあまり影響を与えない。それはゲートトリガ電流は N_B 層の制御で決まってしまうからである。

このように高耐圧化がもたらす電気的特性への悪影響を緩和する手段を考えないと、実際に高耐圧素子は実現できない。

4. 応用

民生機器ではAC 100V電源で使用する機器に対しては200V定格のサイリスタで制御するが、工作機械・産業機械など高い信頼性を必要とする機器では同じ100V電源に対して300V～400Vのサイリスタを用いることが多い。したがって、300～400Vの高耐圧プレーナ形サイリスタの出現はこれら産業機械への応用を可能にした。また、サーボ電圧の保護回路を強化すれば、200V電源の使用にも可能である。一方、AC 100V電源でもDC側の回路に使用する場合には300～400Vの素子が必要になる。このほか、DC回路でもれ電流の小さい素子を要求する用途にも用いられる。具体的な応用例としては、タイマ・漏電しゃ断器・ストロボ・自動車用点火装置・ガス点火装置などがあり、このような高耐圧プレーナ形サイリスタはますます応用分野が広がるものと期待されている。

図4.1に漏電しゃ断器に高耐圧プレーナ形サイリスタを用いた例を、図4.2に写真用ストロボに応用した例を示した。図4.2の回路では、サイリスタのオフ電流の小さいものが要求されるので、オフ電流の少ないプレーナ形サイリスタが適している。

5. むすび

上記のように、プレーナ形サイリスタの高耐圧化、高信頼性の実現によりその応用分野は拡大された。

今後、さらに電流容量の大きい、高い耐圧のプレーナ形サイリスタが開発されるとともに、その用途はますますひろがってゆくものと考えられる。

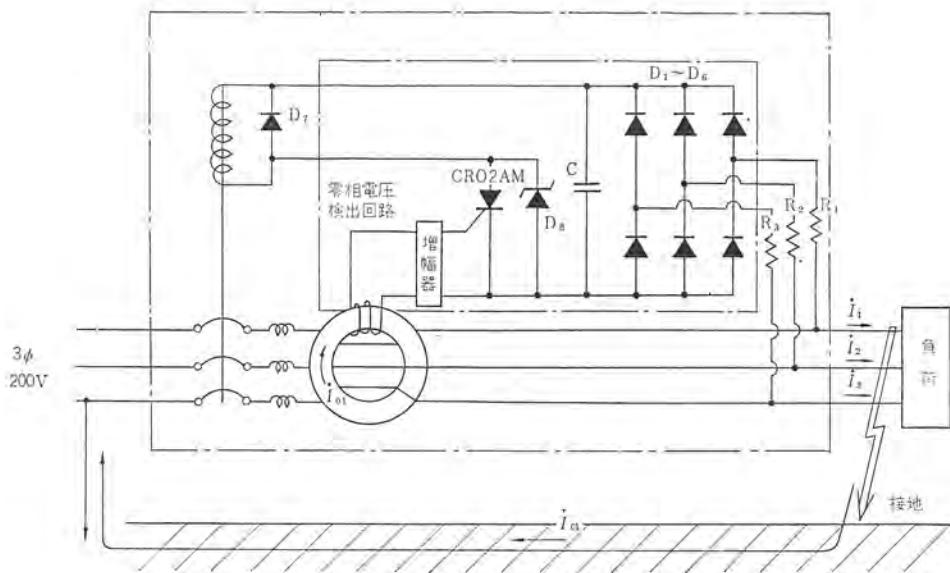


図 4.1 サイリスタ式漏電しゃ断器 Leakage breaker circuit utilizing thyristors.

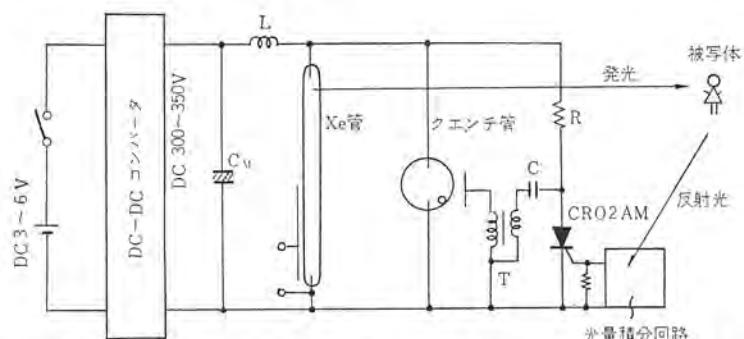


図 4.2 写真用ストロボ装置 Circuit diagram of the strobo flasher.

参考文献

- (1) S. M. Sze and G. Gibbons : Effect of Junction Curvature on Breakdown Voltage in Semiconductors, *Solid-State Electronics*, 9, 831 (1966)
- (2) O. Leistikko, Jr. and A. S. Grove : Breakdown Voltage of Planar Silicon Junction, *Solid-State Electronics*, 9, 847 (1966)

- (3) Y. C. Kao and E. D. Wolley : High-Voltage Planar Junctions, *Proc. IEEE*, 55, 1,409 (1967)
- (4) P. Balk and J. M. Eldridge : Phosphosilicate Glass Stabilization of FET Devices, *Proc. IEEE*, 57, 1,558 (1969)
- (5) 杉本ほか : 三菱電機技報, 45, 493 (昭46)

車両用大電力素子

船川 繁*・須川嘉幸*・釜原紘一*
宮嶋辰夫*・川上 明**

Recent Power Semiconductors for Electric Rolling Stock

Kitaitami Works Shigeru Funakawa・Yoshiyuki Sugawa・Kōichi Kamahara
Tatsuo Miyajima・Akira Kawakami

The attainment of higher blocking voltage and higher current capacity in producing power semiconductors has resulted in the improvement of the equipment using them in the compactness, light-weight and high reliability. In their application to the rolling stock, this achievement especially has a great effect of accomplishing its faster and more efficient operation.

Described herein are the merits, ratings and characteristics of the high current rectifier diode, thyristor, and reverse conducting thyristor which are recently made available.

Their application to the rolling stock is also explained briefly.

1. まえがき

最近、大電力用半導体素子は、製造技術の進歩により、より高耐圧、より大電流のものが実用されるようになった。

また一方では、高速スイッチング逆導通サイリスタのように、まったく新しい機能を持った素子が現われている。いずれにしても、これら大電力用素子の応用上の自由度は、非常に大きくなってきた⁽¹⁾。

素子の高耐圧化・大電流容量化は、直列数・並列数を低減し、装置の小型軽量化に対して大きな効果を有する。

また、高速スイッチング逆導通サイリスタのような新しい機能をもった素子の出現は、新しい応用分野または、大幅な回路の改善を約束する。

車両への応用においては、その高速化・高効率化を達成するうえで上記の要請は特に大きい。

ここでは、最近実用に供されて、国鉄の全国新幹線の試作電気車の、力行制御用整流器にとう(塔)載されている 2,500 V 1,600 A のダイオード(形名 FD 1,600 A), 2,500 V 1,000 A のサイリスタ(形名 FT 1,000 A), 同じ全国新幹線車両のバーニアチョッパブレーキや、帝都高速度交通営団 8 号線のチョッパ車にとう載される 2,500 V 400 A 30 μs の高速スイッチング逆導通サイリスタ(形名 FR 600 AX) の三機種について、その構造・製造技術、および定格・特性について紹介し、車両への応用について若干ふれてみたい。

2. 素子の構造と製造技術

ここで述べる三機種の特長は、ひとことでいえば従来のものに比べて、電流容量が飛躍的に増大していることである。

従来の同程度の耐圧を有する素子で、最大電流容量のものとくらべると、有効陰極面積は、1.7 倍～2.0 倍が必要であり、50 mm² 以上の大口径シリコンウエハを使用している。

これらの大電流容量の素子が製造可能となった背景として、シリコン単結晶製造技術の進歩がある。

現在では、これら大口径の無転位単結晶が、かなり安定して供給されるようになっている。

基本的構造は、全拡散により接合の形成されたベーシックエレメント

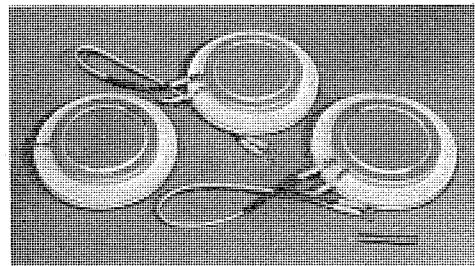


図 2.1 三菱ダイオード FD 1,600 A, サイリスタ FT 1,000 A, 逆導通サイリスタ FR 600 AX (左より)

Mitsubishi rectifier diode FD 1,600 A, thyristor FT 1,000 A, and reverse conducting thyristor FR 600 AX. (from left to right)

を、可滑動的に平形のパッケージに組立てたものである(図 2.1)。

ベーシックエレメントは、接合の形成されたシリコンウエハを、支持板として、モリブデン板にアルミニシリコンをろう材としてろう付けし、表面不動化処理を施したものであり、従来のものと比較して構造上大差ないよう思われる。

しかしながら、大電流容量の素子を効率よく使うためには、一方では電力損失を小さくするため、順電圧降下(オン電圧)ができるだけ小さくなるよう設計し、他方では冷却の効果をあげるため、熱抵抗をできるだけ小さくする必要がある。

前者の目的で、拡散工程の熱処理により低下するライタイムを、できるだけ初期の値に回復するための工程を新たに加えた。

支持板として、モリブデン板をシリコンウエハにろう付する工程では両者の熱膨張係数の差によるひずみの影響が、直径の 2 乗で、きいてくることがわかつており、開発初期においては小口径シリコンでは問題にならなかった耐圧劣化やシリコンにクラックの発生することがあったが、ろう付の際のろう材と、ろう付条件を工夫することにより解決した。その結果について、長期の温度サイクル、断続通電試験を行ない、信頼性が確認されている。

高速スイッチング逆導通サイリスタ FR 600 AX の場合は、上記的一般的な問題のほかに、実用に供するため解決されなければならない問題として下記の点がある。

(a) 2,500 V 400 A という高いオフ電圧、大きなオン電流定格と、30 μs 以下というターンオフ時間を、いかにして両立させるか。

(b) 転流時の過酷な条件によって、サイリスタが転流失敗する問題をどうするか。

(c) パルス重畠形チョップ回路に要求される良好なパルス通電能力を、いかにして確保するか。ちなみに、オフ電圧が2,500Vぐらいになると、サイリスタ部のn形ベース層の厚みの増加によって、ピーク2,000A以上、パルス幅60μs以下、繰返し周期330Hzというパルス電流は、非常にきびしい条件になる。

(a)に関して、一般に30μs以下のターンオフ時間をうるにたる量の金を拡散すると、高温動作時のオフ電流が極度に増加するとともに、オン電圧が増大し、実使用に耐えない素子となるので、金拡散に、新しい技術を開発し、高温動作時のオフ電流の減少を、はかった。また逆導通サイリスタのオン電圧は、同じオフ電圧の逆阻止サイリスタに比べて低くなり、高温におけるオフ電流が少なくなる利点がある⁽²⁾。この利点を徹底的に追求した構造設計を行なった。(b)に関しては、サイリスタ部とダイオード部の間に、十分な幅の分離帯を設け、かつ分離帯に、金を十分に拡散して、分離帯の効果を強くした。

さらに、1,000V/μs以上の高い dv/dt 耐量を与えて、しかも良好なターンオン特性のえられるパターンと不純物分布を開発して、転流特性を向上させた。また、初期ターンオン領域を大きくし、ターンオン領域の広がり速度を、FR 500 AX-26($V_{DRM}=1,300$ V)と同程度にまで改善して、(c)の問題をも解決することが可能となった。

逆導通サイリスタの特長は、同一シリコンウエハ内にサイリスタとダイオードが逆並列の形で構成されていることである。したがって、従来の逆阻止サイリスタを使用したインバータ、チョップ装置の回路方式において、サイリスタに逆並列にダイオードを組合せた回路では、逆導通サイリスタに置きかえうるものが多い。

逆導通サイリスタの導入によって、逆阻止サイリスタを使用した方式において必要であったダイオードが不要となり、回路が簡略化・小形軽量化されて、信頼性の向上が期待できる。

また、ダイオードを逆並列に結線した従来の回路方式では、ダイオード結線の配線インダクタンスにより、転流時の逆バイアス時間が減少する。ところが逆導通サイリスタ式の場合、インダクタンスによる影響が解消するので、同じターンオフ時間の逆導通サイリスタと逆阻止サイリスタを比較すると、前者は後者の1/2のLおよびCの転流回路定数で、ターンオフさせることが可能である⁽³⁾⁽⁴⁾。

3. 定格と特性

図3.1にFR 600 AXの $T_j=125^\circ\text{C}$ における、オフ状態特性の一例を示す。

図3.2にFD 1,600 Aの順特性、図3.3にFT 1,000 Aのオン状態特性、図3.4にFR 600 AXのオン状態特性を示す。

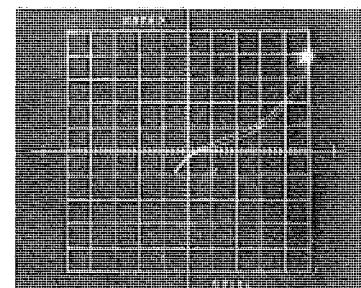
逆導通サイリスタの定格平均オン電流と、定格平均逆電流の比は用途によって、1.0~2.0と変化する。FR 600 AXは、チョップ装置への応用を、主目的として開発されたため、定格平均逆電流は150Aと小さくなっている。

すなわち、チョップ回路では、逆導通サイリスタに流れる逆電流波形は、LC共振のパルス電流の半波のみである⁽³⁾。

なお、定格平均オン電流・定格平均逆電流は、それぞれサイリスタ部・ダイオード部に独立に通電したときの値である。

図3.5にFT 1,000 Aの圧接力と熱抵抗の関係を示す。

3,000kg前後の圧接力で、熱抵抗は、ほぼ飽和していることがわかる。圧接力とオン電圧の関係についても、ほぼ同様の傾向を示す



たて軸：電流 10mA/div
よこ軸：電圧 500V/div

図3.1 FR 600 AXのオフ状態特性($T_j=125^\circ\text{C}$)の例
Typical off-state characteristics of FR 600 AX.

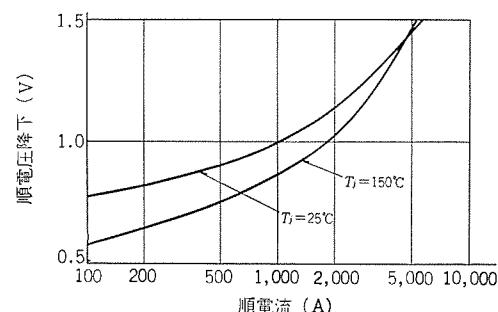


図3.2 FD 1,600 Aの順特性の例
Typical forward characteristics of FD 1,600 A.

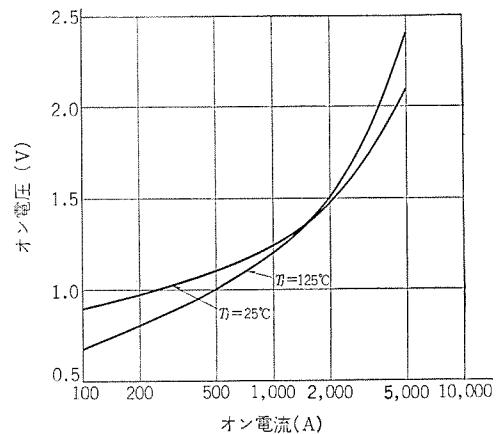


図3.3 FT 1,000 Aのオン状態特性の例
Typical on-state characteristics of FT 1,000 A.

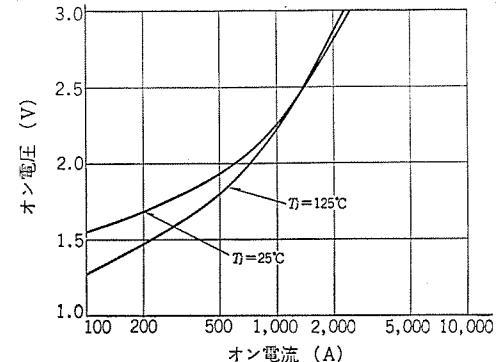


図3.4 FR 600 AXのオン状態特性の例
Typical on-state characteristics of FR 600 AX.

が、より低い圧接力でオン電圧は飽和する。

他機種についても同様の傾向である。

FT 1,000 Aにおいて、 $di/dt=200\text{ A}/\mu\text{s}$ は、 $T_j=125^\circ\text{C}$ において

商用周波の正弦半波を続流として通電した状態で、連続印加して、十分に耐えることを確認した。図 3. 6 に通電波形と条件を示す。

通常、商用周波数または、それに近い周波数において、サイリスタを位相制御する場合、ターンオフ時間の長さは問題にならないが高耐圧化してベース幅が厚くなり、かつ大電流容量化してシリコンが大口径になると、その長さが問題になってくる。

FT 1,000 Aにおいて、ターンオフ時間を測定すると、 $T_J = 125^\circ\text{C}$ において、200~360 μs の間に分布し、一般用サイリスタとしては、問題にならないことが判明した。

なお、ターンオフ時間の測定波形と条件を図 3. 7 に示す。

逆導通サイリスタのターンオフ時間の測定方法については、これまで多く紹介されている⁽²⁾。

FR 600 AX のターンオフ時間の測定は、従来から当社で採用してきた、パレスオン電流通電後、逆電流として方形波の電流を流し、この逆電流の通電幅を変化させて測定するものである。

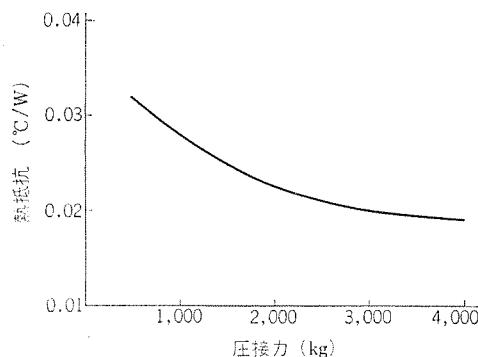


図 3.5 FT 1,000 A の圧接力と熱抵抗
Contact pressure vs. thermal resistance of FT 1,000 A.

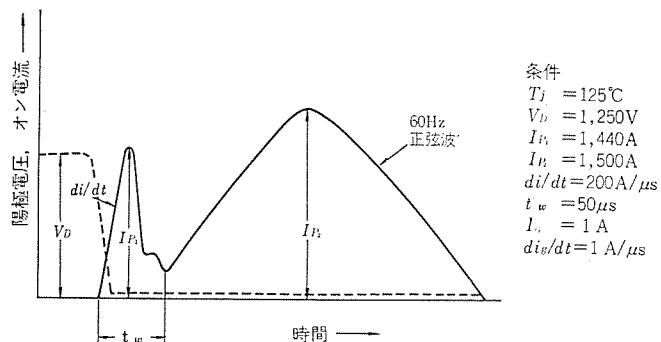


図 3.6 FT 1,000 A の di/dt 試験波形と条件
Wave forms and conditions of di/dt test for FT 1,000 A.

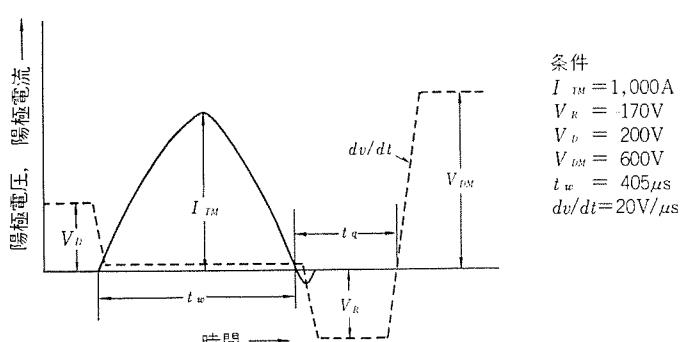


図 3.7 FT 1,000 A のターンオフ時間の測定波形と条件
Wave forms and conditions of turn-off time measurement about FT 1,000 A.

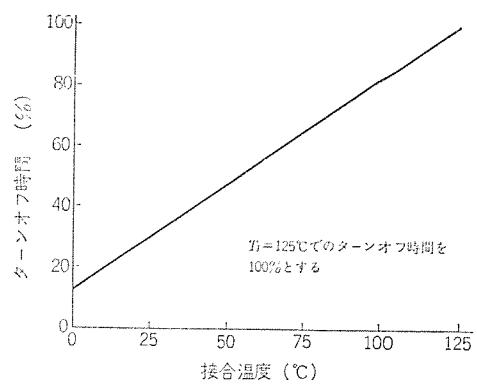


図 3.8 FR 600 AX のターンオフ時間の温度依存性
Turn-off time vs. junction temperature about FR 600 AX.

このときの条件は、 $(dv/dt)_c \geq 350 \text{ V}/\mu\text{s}$, $(di/dt)_c \geq 70 \text{ A}/\mu\text{s}$ である。

図 3.8 に、ターンオフ時間の温度依存性を示す。

転流時に素子に印加される dv/dt の値は、素子の耐圧が高くなるほど、高い値が要求される。

本素子では 350 $\text{V}/\mu\text{s}$ 以上の耐量が要求されており、出荷に当たっては、 $I_p \geq 1,800 \text{ A}$, パルス幅 60 μs , $(dv/dt)_c \geq 350 \text{ V}/\mu\text{s}$ のパルス電試験を行なっている⁽²⁾。

FD 1,600 A, FT 1,000 A, FR 600 AX の定格および特性を、それぞれ、表 3.1, 3.2, 3.3 に示す。

また、各機種の外形を図 3.9 に示す。

表 3.1 FD 1,600 A の最大定格と電気的特性
Maximum ratings and electrical characteristics of FD 1,600 A.

最大定格

項目	記号	単位	定格値	備考
ピーク繰返し逆電圧	V_{RRM}	V	2,500	
ピーク非繰返し逆電圧	V_{RSM}	V	2,800	
平均順電流	$I_{F(AV)}$	A	1,600	商用周波単相半波 180°通電 $T_J = 90^\circ\text{C}$
サージ順電流	I_{FSM}	A	28,000	商用周波単相半波 1 サイクル波高値非繰返し
接合温度	T_J	°C	-40~150	
保存温度	T_{Stg}	°C	-40~150	

特性

項目	記号	単位	特性値	備考
逆電流	I_{IRM}	mA	50	$V_R = 2,500 \text{ V}$ $T_J = 150^\circ\text{C}$
順電圧降下	V_{FIM}	V	1.60	$I_{FIM} = 5,000 \text{ A}$ 瞬時測定
熱抵抗	R_{th-f}	°C/W	0.025	接合一ファン間

圧接力	3,000±300 kg

表 3.2 FT 1,000 A の最大定格と電気的特性
Maximum ratings and electrical characteristics of
FT 1,000 A.

最大定格

項目	記号	単位	定格値	備考
ピーコク繰返し逆電圧 ピーコク繰返しオフ電圧	V_{RRM} V_{DRM}	V	2,500	
ピーコク非繰返し逆電圧 ピーコク非繰返しオフ電圧	V_{RSM} V_{DSM}	V	2,750	
平均オシ電流	$I_{T(AV)}$	A	1,000	商用周波単相半波 180° 通電 $T_j=80^\circ\text{C}$
サージオシ電流	I_{TSM}	A	18,000	商用周波単相半波 + サイ タル波高値非繰返し
接合温度	T_j	°C	-40~125	
臨界オシ電流上昇率	di/dt	A/ μs	200	$V_D=1,250\text{ V}$ 印加 $T_j=125^\circ\text{C}$

特性

項目	記号	単位	定格値	備考
逆電流	I_{RRM}	mA	80	V_{RRM} 印加 $T_j=125^\circ\text{C}$
オフ電流	I_{DRM}	mA	80	V_{DRM} 印加 $T_j=125^\circ\text{C}$
オシ電圧	V_{TSM}	V	2.1	$I_{TSM}=3,200\text{ A}$ 瞬時測定
ゲートトリガ電流	I_{GT}	mA	260	$T_j=25^\circ\text{C}$
ゲートトリガ電圧	V_{GT}	V	3	$T_j=25^\circ\text{C}$
熱抵抗	R_{th-f}	°C/W	0.025	接合-フェン間
臨界オフ電圧上昇率	dv/dt	V/ μs	200	指数関数波形 $V_D=1,250\text{ V}$ 印加, $T_j=125^\circ\text{C}$
圧接力				3,000±300 kg

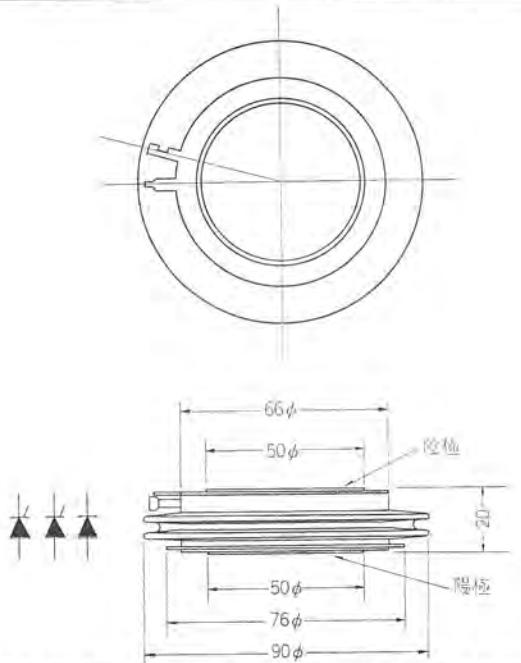


図3.9 FD 1,600 A, FT 1,000 A, FR 600 AX の外形
Outline drawing of FD 1,600 A, FT 1,000 A and FR 600 AX.

表 3.3 FR 600 AX の最大定格と電気的特性
Maximum ratings and electrical characteristics of
FR 600 AX.

最大定格

項目	記号	単位	定格値	備考
ピーコク繰返しオフ電圧	V_{DRM}	V	2,500	
ピーコク非繰返しオフ電圧	V_{DSM}	V	2,500	
平均オシ電流	$I_{T(AV)}$	A	400	商用周波単相半波 180° 通電 $T_j=80^\circ\text{C}$
平均逆電流	$I_{R(AV)}$	A	150	
サージオシ電流	I_{TSM}	A	7,000	商用周波単相半波 + サイ タル波高値非繰返し
サージ逆電流	I_{RSMS}	A	2,500	
接合温度	T_j	°C	-40~115	
臨界オシ電流上昇率	di/dt	A/ μs	200	$V_D=1,250\text{ V}$ $T_j=115^\circ\text{C}$

特性

項目	記号	単位	特性値	備考
オフ電流	I_{DRM}	mA	80	$V_D=2,500\text{ V}$ $T_j=115^\circ\text{C}$
オシ電圧	V_{TSM}	V	2.5	1,250 A 瞬時測定
逆電圧降下	V_{RMS}	V	3.0	500 A 瞬時測定
ゲートトリガ電流	I_{GT}	mA	350	$T_j=25^\circ\text{C}$
ゲートトリガ電圧	V_{GT}	V	3.0	$T_j=25^\circ\text{C}$
ターンオフ時間	t_{off}	μs	30	$T_j=115^\circ\text{C}$
臨界オフ電圧上昇率	dv/dt	V/ μs	350	指数関数波形 $V_D=1,250\text{ V}$, $T_j=115^\circ\text{C}$
転流時臨界オフ電圧上昇率	$(dv/dt)_c$	V/ μs	350	$T_j=115^\circ\text{C}$
圧接力			2,500±300 kg	

4. 車両への応用

上記の素子が、どのように車両に応用されているか、簡単に述べる。

図 4.1 は、国鉄において計画されている全国新幹線電気車の力

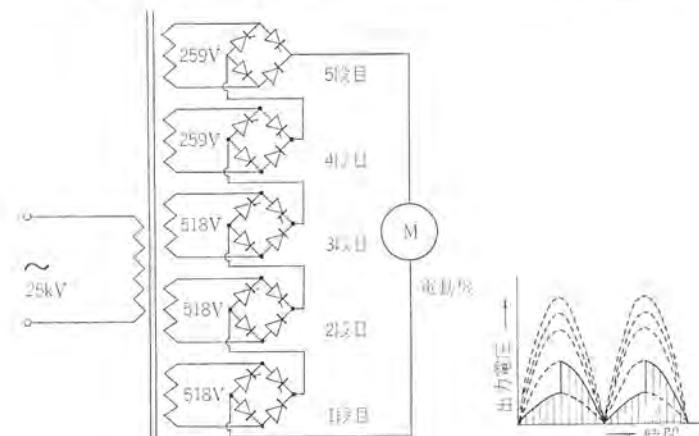


図 4.1 力行用整流器の主回路構成と出力電圧波形
Principal circuit diagram of rectifier for power running control and output voltage waveform.

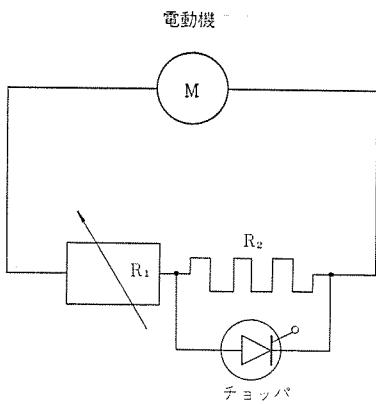


図 4.2 バーニア チョッパブレーキの主回路
Principal circuit diagram of vernier chopper brake.

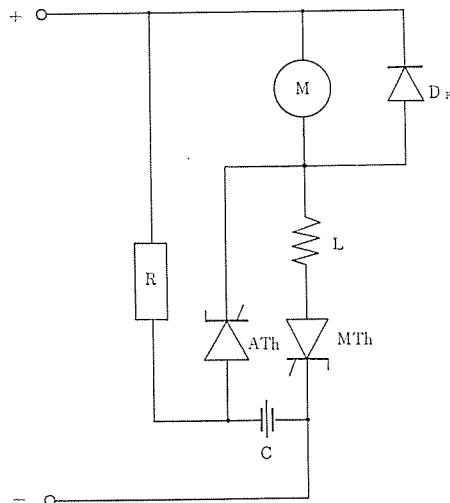


図 4.3 チョッパ車の主回路
Principal circuit diagram of chopper car.

行制御用整流器の主回路構成と出力電圧波形である。

変圧器の二次側巻線が不等 5 分割され、各巻線に混合ブリッジが構成されている。このブリッジの各アームに FD 1,600 A と FT 1,000 A がそれぞれ 2 P で使用される。

出力波形をみると、1 段目から順次、サイリスタが位相制御していく様子がわかる。図は、1 段目のサイリスタが 180° 通電、2 段目のサイリスタが 90° 通電、3, 4, 5 段目がオフ状態にあることを示している。

図 4.2 は同じく、全国新幹線車両に使用される国鉄設計のバーニア チョッパブレーキの主回路である。車両を減速させる際、電動機を力行制御回路から切離して、抵抗器を負荷として接続し、車両の運動エネルギーを抵抗器で消費させる。このとき、従来は、負荷に一定電流が流れるよう抵抗器のタップを切換えていたが、バーニア チョッパの採用により、ブレーキ電流を一定に制御できるようになり、減速をよりスムーズに行なえるようになった。

このチョッパ回路の主サイリスタ(MTh)、補助サイリスタ(ATh)に FR 600 AX が使用される。

直流電車にチョッパ制御方式が実用化されて久しいが、帝都高速度交通営団のご指導による逆導通サイリスタ式チョッパ装置は、従来の逆阻止サイリスタを用いたチョッパ装置に比べて、転流ダイオード、バイパスダイオード等が不要になって、チョッパ回路が簡単に利点がある。これらの利点を考えると今後電鉄用には、逆導通サイリスタを使用したチョッパ装置が、主流をしめるようになるであろう。図 4.3 にチョッパ車の主回路を示す。

帝都高速度交通営団 8 号線には、FR 600 AX をとう載したチョッパ車が、採用される予定である。

5. む す び

最近実用化された高耐圧・大電流容量のダイオード、サイリスタ、逆導通サイリスタの概要と、車両への応用を中心に述べた。

電力用素子の高耐圧化・大電流容量化は、装置に使用される素子数の逓減により、装置の小型軽量化、信頼性の向上に貢献するところが大きい。

また、これら機種の応用分野は、車両用ばかりでなく、溶接機・めっき電源・レオナード・各種チョッパ装置等へと、装置設計者の要求と、素子の設計、製造技術の進歩との協調により、より拡大されてゆくものと思われる。

最後に、国鉄車両設計事務所および帝都高速度交通営団の関係者のご指導、ご協力に対して感謝いたします。

参 考 文 献

- (1) 岡: 三菱電機技報, 45, No. 11, 1,449 (昭 46)
- (2) 岡ほか: 三菱電機技報, 45, No. 4, 471 (昭 46)
- (3) 北岡ほか: 三菱電機技報, 45, No. 11, 1,463 (昭 46)
- (4) 飯田ほか: OHM, 59, No. 11, 57 (昭 47)

安定化抵抗を有する直線増幅用 高周波高出力トランジスタ

楠 和郎*・亘 善彦*・廣瀬 芳彦*・西岡 直*
竹内 正晴**・山口 哲成**

Emitter Balanced RF Power Transistor for Linear Application

Kitaitami Works

Kazuo Kusunoki・Yoshihiko Watari・Yoshihiko Hirose・Tadashi Nishioka
Communication Equipment Works
Masaharu Takeuchi・Tetsuya Yamaguchi

The installation of UHF-TV translator has been carried on to get over the difficulty in clear reception of TV broadcast in remote places. At present, the translator of up to 30 W output at UHF has been turned all solid state and put into practical use. It is essential to have the UHF-TV translator of this kind possess the wideband, low distortion linear amplification characteristics. This aroused the advent of transistors for linear application.

Mitsubishi has introduced an emitter balanced resistance made up from Ni-Cr thin film to increase the resistance against high DC power dissipation and decrease the intermodulation distortion, thus making success in the development of RF power transistors 2SC-1530, 2SC-1510, 2SC-1206 B and 2SC-1207 B. In this article the description on the design, productive techniques and characteristics of these products is made.

1. まえがき

山間へき地および都市部のビル陰等のテレビ難視聴対策として無線放送中継装置(サテライト局), 共同視聴装置の設置が進められている。テレビ電波のUHF帯への移行とともに、難視聴対策は、より必要に迫られており、無線放送中継装置においては、UHFで出力30Wまで、全固体化装置が実用化されている。これら放送中継装置には、広帯域低ひずみ直線増幅特性を持たせる必要があり、出力が増大すればするほど、中継基幹局的様相を強め、端末装置のテレビ画質を良好に維持するため、低ひずみ化、高信頼性の要求が強まってきた。

当社では、これら市場の要求に答えるため、ニクロム薄膜から成るエミッタ安定化抵抗を導入し、直流破壊耐量を増大せしめ、混変調ひずみ特性を大幅に改善したトランジスタ2SC1530, 2SC1510, 2SC1206 B, 2SC1207 Bを開発したので、これらトランジスタの設計および製造技術について述べ、得られた特性について紹介する。

2. 直線増幅用 高周波高出力トランジスタの必要性

当社高周波高出力トランジスタが世に出た昭和40年以来、VHF-UHF帯の各種通信機器の固体化が急速に行なわれた。最も急速に固体化が進んだのは、警察無線等の官公庁無線やタクシー無線に代表される移動無線機の分野であった。その理由としては、

(a) 固体化による小形・軽量化のメリットが、移動無線において非常に大きいこと。

(b) 移動無線機の大部分が、B級～C級増幅の狭帯域FM方式であるため、トランジスタに要求される特性は、電力利得・飽和出力・コレクタ効率・負荷変動破壊強度といった項目に限られ、これらの要求を満たすトランジスタを比較的容易に供給できること。などがあげられる。

一方、UHF-TVサテライト局に代表されるTV放送機器関係の分野でも、積極的に固体化が進められてきた。これまで、当社高周

波高出力トランジスタ2SC976(1GHz, 28V, 1W) 2SC977(1GHz, 28V, 2.5W), 2SC978(1GHz, 28V, 5W), 2SC1206(770MHz, 25V, 9W), 2SC1207(770MHz, 25V, 15W)などを用いて、出力30Wまでの固体化が行なわれ、実用化されてきた。

しかし、これら放送機器用トランジスタに対しては、前述の移動無線用トランジスタに要求される特性以外に、混変調ひずみレベルの低減やA級～AB級増幅動作での信頼性の向上といった要求がなされ、かつ、その要求レベルは年を追うごとにきびしくなり、前記のトランジスタでは、これらの要求を満足させることができ難くなってきた。その理由は、これらのトランジスタがB級～C級増幅用として設計、製作されているため、混変調ひずみ特性が現在の要求レベルに達しないこと、直流破壊耐量が低くAB級～AB級増幅時のアイドル電流値を高く設定できないことなどである。

したがって、B級～C級増幅用に設計されたトランジスタに比べ、直流破壊耐量を増大せしめ、混変調ひずみ特性を大幅に改善した直線増幅用高周波高出力トランジスタの出現が切望された。

3. 直線増幅用 高周波高出力トランジスタの 設計と製造技術

高周波高出力トランジスタの設計上の要点としては、電力利得・ひずみ特性・直流破壊耐量等がある。ここでは、トランジスタのA級またはAB級動作時に特に問題となる、ひずみ特性・直流破壊耐量の改善方法として、エミッタ安定化抵抗を導入したので、その設計方法、およびその効果について述べる。

安定化抵抗の形成方法として、次のような方法が知られている。

- (1) エミッタ拡散層を安定化抵抗として利用する。
- (2) 蒸着薄膜抵抗を利用する。
- (3) 配線電極の一部をバランスインダクタンスとして使用する。
- (4) トランジスタペレットと外装のエミッタリード間に、抵抗物体(たとえば、シリコンペレット)を導入する。

当社では、従来から上記(3)(4)項の手段により、安定化抵抗を導入していたが、放送機器用トランジスタの開発にあたり、抵抗薄膜としてニクロム蒸着膜により安定化抵抗を形成し、検討を行なった結果、直流破壊耐量の大幅な改善が認められた。

安定化抵抗の大きさを変えた場合の、トランジスタペレット表面温度分布変化測定例を図3.1に示す。この図から、安定化抵抗値を大きくするほど、ペレット表面温度分布が均一になることがわかる。この温度分布より、安定化抵抗の値を決定できる。すなわち、接合部温度変化分を ΔT 、温度上昇による電圧変化分を ΔV 、温度係数を α とすると、

$$\Delta V = \alpha \cdot \Delta T \quad \dots \dots \dots (3.1)$$

シリコンの場合、 α は周知のごとく $2 \text{ mV}/\text{C}$ である。安定化抵抗を持たないペレット表面の最高温度 T_{\max} 、最低温度 T_{\min} とすると、安定化抵抗を採用したときの表面最高温度 T_S 、 T_{\max} が生じる接合部の電圧変化 ΔV_T の関係は式(3.1)より、

$$\Delta V_T = \alpha \cdot (T_{\max} - T_S) \dots \dots \dots (3.2)$$

したがって、エミッタのくし(樹)1本当たりの平均電流 I_E 、電流集中度を C_1 として、 T_{\max} なる表面温度にあるエミッタくしの電流が $C_1 \cdot I_E$ にて表わせると仮定すると、くし1本あたりの安定化抵抗 R_e は式(3.2)を用いて、

$$R_e = \Delta V_T / C_1 \cdot I_E \\ = \alpha \cdot (T_{\max} - T_S) / C_1 \cdot I_E \dots \dots \dots (3.3)$$

ただし、 C_1 ：電流集中が起きたときの電流密度と電流集中が起きていないときの電流密度の比

ここで、当社にて安定化抵抗を用いている2SC1510について、どの程度の安定化抵抗が必要かを計算してみよう。

$I_E = 6 \times 10^{-3} \text{ A}$ 、 $C_1 = 3$ と仮定すると、図3.1より $T_S = 105^\circ\text{C}$ 、 $T_{\max} = 205^\circ\text{C}$ であるから式(3.3)より

$$R_e = 11.1 \text{ } (\Omega) \dots \dots \dots (3.4)$$

ニクロムの必要膜厚 t 、このときのニクロムの層抵抗 ρ_S 安定化抵抗の幅を W 、長さを l とすれば、

$$R_e = \rho_S \cdot l / W \dots \dots \dots (3.5)$$

パタン寸法 $l = W = 10 \times 10^{-4} \text{ cm}$ 、 $R_e = 11.1$ を代入すれば、

$$\rho_S = 11.1 \text{ } (\Omega / \square) \dots \dots \dots (3.6)$$

ニクロムの蒸着膜厚と層抵抗の関係(図3.2)より、上記 ρ_S の値を用いて必要なニクロム膜厚 t は約 570 \AA となる。

ただし、 C_1 の値はトランジスタの製造要因や使用状態で変化するから、各トランジスタに対し実験的に設定する必要がある。

ほかにペレット表面温度分布改善方法として、エミッタくし1本あたりの消費電力を減少させる方法が考えられる。すなわち、エミッタ周辺長を一定とし、くし1本あたりの消費電力を $1/K$ に減少させるには、くし長 L を L/K にし、くし数 n 本を nK 本にすればよい。なぜならばエミッタくし1本あたりのオーミック抵抗は K 倍となり、くし1本当たりの電流値は $1/K$ となるため、消費電力は $1/K$ となり、電圧降下分は K 倍となる。したがって、負帰還効果は K 倍となり、温度分布が改善される。

ところでトランジスタの直流動作状態において、熱的不安定性等により出力特性に負性抵抗が発生するが、その負性抵抗発生点をダイオド発生点と称し、直流破壊耐量の目安とすることができる。

安定化抵抗の効果例として、安定化抵抗の有無による破壊耐量の比較を行なってみる。図3.3(a)に安定化抵抗を持つ2SC1206Bの出力特性、(b)に安定化抵抗を持たない2SC1206の出力特性を

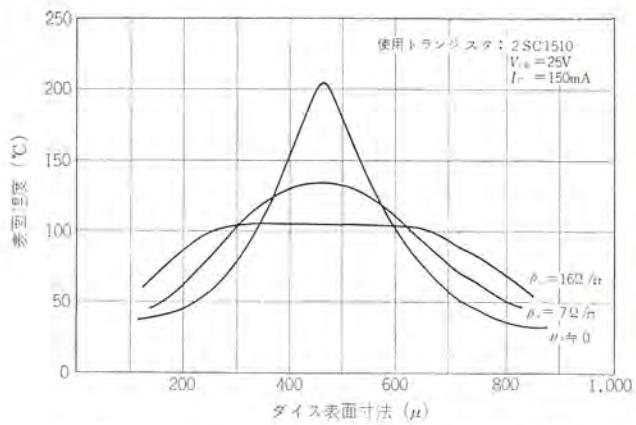


図3.1 トランジスタ表面温度分布の安定化抵抗依存性
Dependence of temperature profile of transistor die on balance resistance.

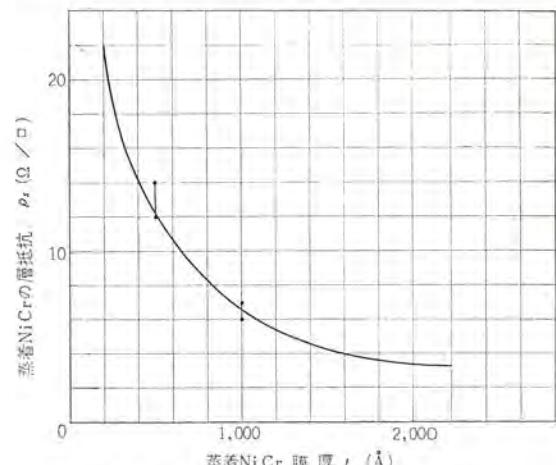


図3.2 蒸着 NiCr 膜厚と層抵抗の関係
NiCr sheet resistivity vs. film thickness characteristics.

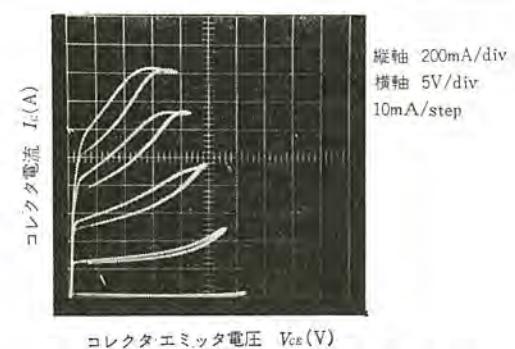


図3.3(a) 2SC1206B 出力特性
2SC1206B output characteristics with balance resistance.

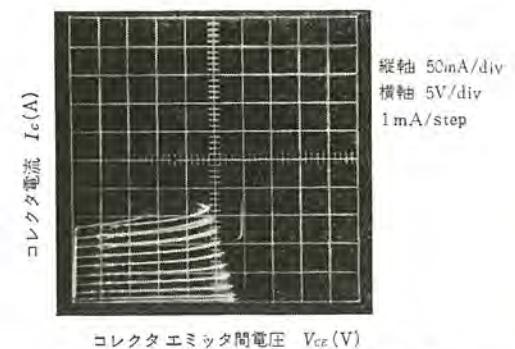


図3.3(b) 2SC1206 出力特性
2SC1206 output characteristics without balance resistance.

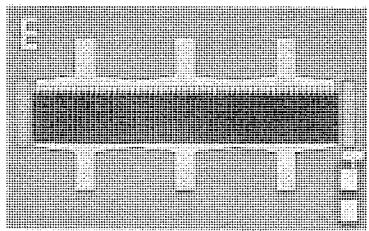


図 3.4 2SC1510 パターン写真
Electrode pattern of 2SC1510.

示す。この図から $V_C=25$ V におけるダイオード発生電流を比較すると、安定化抵抗を有する (a) では、約 1 A、安定化抵抗を持たない (b) では、170 mA であり、安定化抵抗により、直流破壊耐量が約 5 倍以上改善されていることが明らかである。

安定化抵抗を有するパターン例として、2SC1510 を図 3.4 に掲げた。

4. 電気的特性

4.1 安定化抵抗の効果

前章にて、安定化抵抗を有する高周波高出力トランジスタの設計法を述べたが、ここでは安定化抵抗の採用効果を実測例により紹介する。

4.1.1 直流破壊耐量の改善

安定化抵抗導入による直流破壊耐量向上の効果は、3 章においてカーブトレーサの出力特性を例にとって述べたが、ここでは過渡熱抵抗の電圧依存特性について述べる。

図 4.1 は、安定化抵抗 R_E をパラメータとして 2SC1206 B の過渡熱抵抗のコレクタベース間電圧特性の一例を示したものである。

安定化抵抗の効果は、きわめて顕著であって、バランスインダクタンス ($R_E=0$) の場合、電圧の上昇とともに急激に熱抵抗が増大するのに對し、安定化抵抗値が大きくなるにつれて、熱抵抗の電圧に対する変化率は、確実に減少する。 $V_{CB}=20$ V において、 $R_E=0$ と $R_E=0.11\Omega$ のときの熱抵抗値を比較すると、前者は後者の約 4 倍となっている。

以上のように安定化抵抗は顕著な直流安定化効果を発揮し、A 級～A B 級増幅動作でのアイドル電流の増大を可能にし、かつ、5 章で述べるように信頼性の面から見てもきびしい直流動作エージングが可能となり、信頼度の向上も期待できる。

4.1.2 高周波特性の改善

本節では、安定化抵抗の導入が高周波特性に及ぼした効果について述べる。

(i) C 級増幅特性

図 4.2 は、バランスインダクタンスを有する 2SC1206 と安定化抵抗を有する 2SC1206 B について、C 級増幅動作時の出力電力～入力電力特性を比較したものである。

このグラフと図 4.1 を比較すると、次のことが明らかである。

すなわち、過渡熱抵抗の電圧依存性の場合、バランスインダクタンスを採用したものと安定化抵抗を採用したものとでは、きわめて顕著な差異が認められたが、C 級増幅動作の場合、両者の差は、ほとんど認められず、高周波動作に対しては従来より採用されているバランスインダクタンスが、安定化抵抗と同様、良好なバランス効果を示すことがわかる。

また C 級増幅動作時の負荷変動破壊強度試験を行なった結果も両

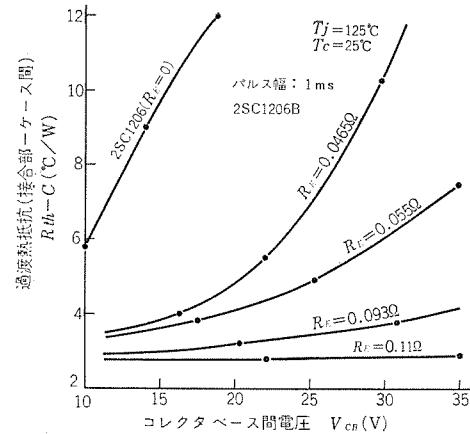


図 4.1 2SC1206 B 過渡熱抵抗～コレクタベース間電圧特性
2SC1206 B transient thermal resistance vs. collector base voltage characteristics as a function of balance resistor.

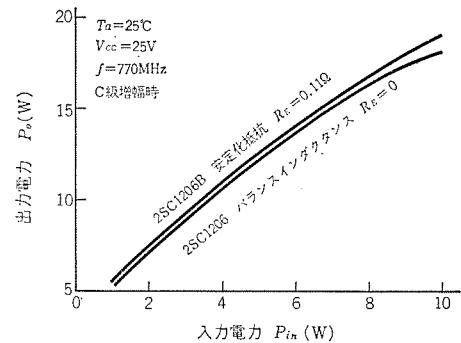


図 4.2 2SC1206 B, 2SC1206 出力電力～入力電力特性
2SC1206 B, 2SC1206 output power vs. input power characteristics at C class amplification condition.

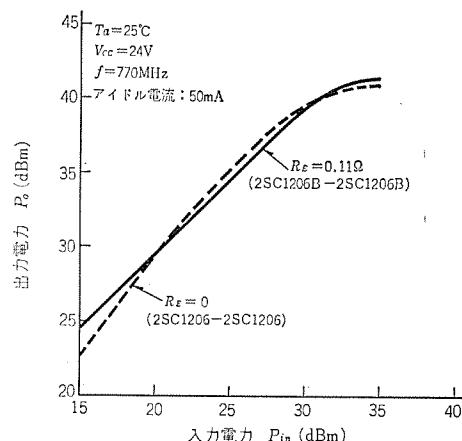


図 4.3 2SC1206 B, 2SC1206 出力電力～入力電力特性
2SC1206 B, 2SC1206 output power vs. input power characteristics at AB class amplification condition.

者の間に明確な差は認められず、この試験結果からもバランスインダクタンスの高周波でのバランス効果が確認された。

(ii) 直線性およびひずみ特性の改善

図 4.3 は、2SC1206 B を 2 段從属接続した場合の直線性のグラフである。回路は、出力 40 dBm (10 W) で調整された。安定化抵抗を有する場合には、39.5 dBm (9 W) まで 45° の直線に乘り、良好な直線性が得られている。一方、バランスインダクタンスを有する場合、45° の直線に乗らず、特に低レベルでその傾向が強い。これは、バランスインダクタンスの場合、A B 級増幅時、動作レベルにより能動領域が変化するため入力インピーダンスの変動が大きいことに原因する

考えられる。

このように安定化抵抗は、直線性の改善にも大きな効果を發揮することが確認された。そして、これは、当然ひずみ特性の改善に結びつく。

図4.4は、UHF・TVIWサテライト局送信部に2SC1510を使用した場合の混変調ひずみ特性を、従来より使用されている2SC977(1GHz, 28V, 2.5W)と比較したものである。

この混変調ひずみは、映像搬送波(f_V)と音声搬送波(f_A)と色副搬送波(f_S)よりなる三つの搬送波の三次ひずみより求めたもので、次のように定義されている。

$$\text{混変調ひずみ } IM = 20 \log \frac{E_{m1} + E_{m2} + K}{E_V} \text{ (dB)}$$

ただし、 E_V ：映像搬送波(f_V)の振幅

E_{m1} ： $f_A - f_S + f_V$ なる三次相互変調ひずみの振幅

E_{m2} ： $f_S - f_A + f_V$ なる三次相互変調ひずみの振幅

K ：色信号により決まる定数、赤色信号の場合 6dB

$$f_S = f_V + 3.58 \text{ (MHz)}$$

$$f_A = f_V + 4.5 \text{ (MHz)}$$

図4.4より、2SC977は、出力0dB(1W)にて赤色信号の場合に-31dB、青色信号の場合に-34.5dB、黄色信号の場合に-39dBとなっていっているのに対し、2SC1510は、赤色信号の場合に-40.5dB、青色信号の場合に-41dB、黄色信号の場合に-43.5dBと、すべて-40dB以上で、2SC977に比べ5dB~10dB改善されている。

なお、このグラフから明らかなように、AB級増幅の場合、回路の調整を行なった電力レベルでは、ひずみが良くなるが、他のレベルでは、必ずしも良くならない。すなわち、理論的には三次ひずみの場合、出力レベルが1dB下ると、ひずみは2dB改善されるが、AB級増幅の場合には、この法則にまったく従わず、出力レベルが下ると、かえってひずみが悪くなるという特性が得られている。これは、次のようなことに起因すると考えられる。すなわち、A級増幅動作での搬送波の出力レベルに対する位相特性を探ってみると、ほとんどの平たん(坦)で位相変化がないのに対し、AB級増幅動作の場合には、出力レベルの変化に対し大きく変化することが確認されている。このため、AB級増幅動作のある出力レベルで混変調ひずみが最良になるように回路を調整した場合、それは、ある特殊な位相条件のもとに得られており、出力レベルが変化すれば、この位相条件も変化するため、出力レベルが下ると、かえって、ひずみが悪くなると考えられる。完全にA級増幅であれば、位相条件は出力レベルに対し一定のため、先述の法則に従うと考えられる。

この関係は、図4.5に示すよう、2SC1206Bを用い、アイドル電流をパラメータとした混変調ひずみー出力電力特性を見ると明らか

表4.1 2SC1530, 2SC1510, 2SC1206B, 2SC1207Bの電気的特性
Electrical characteristics of 2SC1530, 2SC1510, 2SC1206B and 2SC1207B.

	最大定格 ($T_a=25^\circ\text{C}$)						電気的特性 ($T_a=25^\circ\text{C}$)		
	V_{CBO}	V_{CER}	V_{REO}	I_C	P_C	T_J	出力電力 P_O	コレクタ効率 η_C	条件
	V	V	V	A	W	°C	W	%	
2SC1530	50	50	4.5	0.35	5	150	1.2 (最小値)	35 (最小値)	$V_{CC}=28\text{V}, f=1\text{GHz}, P_{in}=0.25\text{W}$
2SC1510	47	47	4.5	1	10	175	4 (最小値)	50 (最小値)	$V_{CC}=25\text{V}, f=770\text{MHz}, P_{in}=1.2\text{W}$
2SC1206B	45	45	4.5	2	25	175	10 (最小値)	50 (最小値)	$V_{CC}=25\text{V}, f=770\text{MHz}, P_{in}=4\text{W}$
2SC1207B	45	45	4.5	3.5	40	175	20 (最小値)	50 (最小値)	$V_{CC}=25\text{V}, f=770\text{MHz}, P_{in}=9\text{W}$

(注) 本規格は、暫定規格で変更される場合がある。

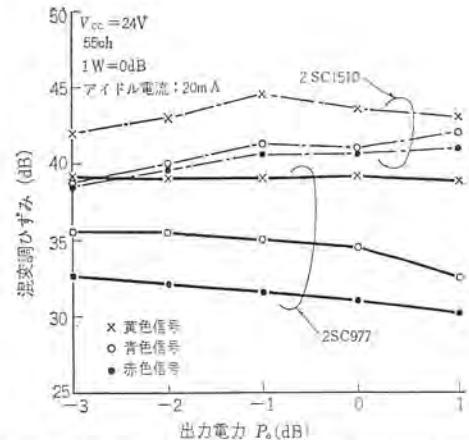


図4.4 2SC1510, 2SC977 混変調ひずみー出力電力特性
2SC1510, 2SC977 color intermodulation vs. output power characteristics at AB class amplification condition.

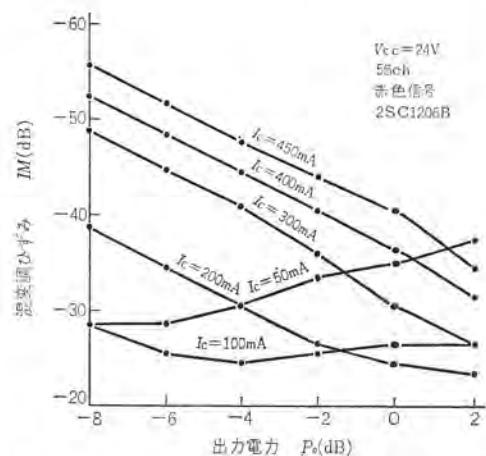


図4.5 A級～AB級増幅時の2SC1206B混変調ひずみー出力電力特性
2SC1206B color intermodulation vs. output power characteristics at A～AB class amplification condition.

である。すなわち、0dB(1W)という出力レベルを基準に考えた場合、アイドル電流が100mAまでは、出力レベルの減少とともに、ひずみは悪くなるが、電流値が大きくなつてA級増幅動作に近づくにつれて、先述の法則に従つた特性を示している。そして、450mAになると、-40.5dBの混変調ひずみが得られている。なおこのグラフのデータは、補償回路などまったくない状態で測定されたものであつて、完全な回路的調整を行なえば、5dB~10dB上まわった値となる。

以上のように、完全なA級動作で使用すれば、理想的な混変調ひずみー出力レベル特性が得られることが確認されたが、図4.5の例からもわかるように、非常に大きなアイドル電流を必要とする。すな

わち完全にA級動作させるには、1Wサテライト局で2SC1206Bクラスが必要であり、10WクラスをA級増幅動作させるには、24Vで、約5Aのアイドル電流を必要とすることになる。今後、安定化抵抗の積極的採用により、さらに直流破壊耐量の飛躍的に向上したトランジスタを世に出していく予定である。

4.2 新製品の電気的特性

表4.1に、安定化抵抗を採用し、直流破壊耐量や混変調ひずみ特性を大幅に改良した放送機器用高周波高出力トランジスタ新シリーズ、2SC1530、2SC1510、2SC1206B、2SC1207Bの最大定格および電気的特性の規格を示す。

5. 安定化抵抗を採用した高周波高出力トランジスタの信頼性

3章にも述べているように、高周波高出力トランジスタのペレットは、数多くの微小トランジスタを並列に接続したものと考えることができる。トランジスタに電流を流した場合、ペレット中央部の放熱が最も悪いため、中央部の温度が、周辺部の温度よりも高いといった熱的不

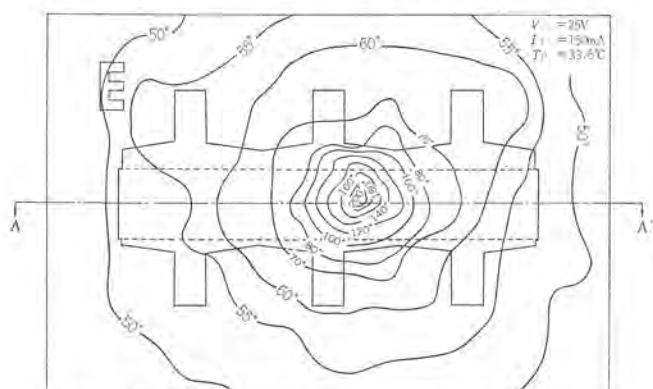


図5.1 2SC1510 溫度分布図 エミッタ安定化抵抗なし
Isothermal plot of 2SC1510 without emitter balance resistor.

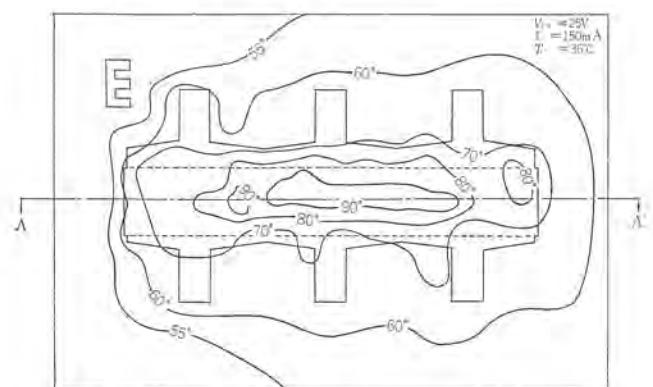


図5.2 2SC1510 溫度分布図 エミッタ安定化抵抗あり
Isothermal plotting of 2SC1510 with emitter balance resistor.

表5.1 2SC1510 信頼度試験結果
Results of reliability tests on 2SC1510.

グループ	試験項目	試験条件	試験時間	試料数	故障数
1	動作寿命	$P_c = 4.25 \text{ W}$ ($V_{ce} = 25 \text{ V}$, $I_c = 170 \text{ mA}$) $10 \times 10 \times 0.1 \text{ cm}$ アルミニウム放熱板使用	2,000 h	24	0
2	高温保存寿命	$T_a = T_{stg\ max}$ (175°C)	2,000 h	50	0
3	温湿度サイクル	-55°C ~ +150°C 各30分	50サイクル	10	0
	耐湿性	85°C, 95% RH 無負荷	1,000 h	0	0

均一を生ずる。そして、比較的温度の高い中央部の微小トランジスタは注入効率が増大してさらに電流が増加し、そのため温度がいっそう高くなるといったサイクルによって、二次的な熱的不均一を生ずる。すなわち、赤外顕微鏡で測定したペレット表面の温度分布を示す図5.1でわかるように、従来の安定化抵抗のないトランジスタでは、この二次的な熱的不均一が、ペレット中央部でしばしば現われる。安定化抵抗を設けた新しいトランジスタは、微小トランジスタの一つ一つにエミッタ抵抗による負帰還をかけた回路と考えてよく、電流は集中せず均一となって、二次的な熱的不均一を生じない。図5.2は同じ2SC1510トランジスタで、安定化抵抗を有する場合の温度分布図である。ペレット中央部の表面温度はやや高いが、最高温度は安定化抵抗のない場合と比べるとかなり低くなり、なだらかな温度分布となって二次的な熱的不均一を生じない。

このように、同一消費電力のもとでは、安定化抵抗を設けた新しいトランジスタのほうが、安定化抵抗を入れない従来のトランジスタよりも、接合部温度の最高値が低くなったため、熱抵抗を小さくすることができた。安定化抵抗による信頼性向上の効果を次に記す。

- (1) 热抵抗が小さくなったため、 $P_{c\ max}$ が大きくなり、従来より大きくデイレーティングを実施できるようになった。
- (2) 破壊耐量が向上した。特に、直流動作での破壊耐量が増加した。
- (3) A級動作、AB級動作での信頼性が増した。
- (4) 製造工程での電力エージング条件を、よりきびしくできるのでデバッグ効果が増した。

表5.1に2SC1510の信頼度試験結果を示す。

6. むすび

以上、安定化抵抗の設計技術・製造技術を中心に、放送機器用高周波高出力トランジスタに採用したときの電気的特性や信頼性の向上効果を紹介した。この技術の応用により今後、さらに高出力化を進めていく予定である。

終わりに、本技術の開発に際し、一方ならずご指導、ご助言を賜ったNHK技術本部保科副部長ほかの皆さまに深く感謝の意を表します。

カメラ用 IC

大久保利美*・早水 弘一*・山根 聰*

IC for Camera Use

Kitaitami Works

Toshimi Ôkubo・Koichi Hayamizu・Satoshi Yamane

A recent trend of cameras is to turn them as higher grade as possible in the function. No-step control of the shutter by the use of an electronic shutter circuit is a significant operation. It is applied not only to medium class cameras but also to such high class ones as TTL single lens reflex cameras. Studies have been made on the development of IC controlled circuits for these years by a joint effort of camera builders and Mitsubishi. Success has been attained recently. In this article are described (1) a circuit design of low voltage, low current operation, (2) a new wafer process to support this circuit design and (3) a highly reliable package of IC for camera use as technical themes viewed from an IC maker, and the outlines of problems under development so as to touch upon the prospect of IC for camera use.

1. まえがき

最近のカメラにはその高級化をねらって、性能向上のための電子シャッターが積極的に導入されている。35 mm レンズシャッターカメラで代表される、中・低級機分野では昭和40年ごろから、また昭和46年末からは一眼レフ高級カメラにも、まず個別トランジスタ回路で構成されたものがすでに組み込まれた。

従来、純機械的機構に頼っていたシャッター時間制御を電子回路に置換することによって、シャッター時間の、1) 高精度無段階制御、2) 正確化、3) 長秒時(約30秒)設定、4) 安定性向上が容易に達成できた。が、一方電池使用は、1) 維持費、2) 低温特性の問題を伴うが、その便益性を著しくそこなうほど重大欠点とはなっていない。当初、個別部品で組み立てられたこの電子シャッターも、性能のより高級化と収容積を狭くするため、しだいに IC 化される気運になった。特に、高級カメラではその要求機能がより複雑となってきたこともあって、従来部品での組み立てが技術的にも、また空間的にも困難となって、カメラの電子回路には IC が必ず(須)部品となりつつあるが、他方、IC メーカにとってカメラ用 IC に関しては、処女地に近い分野への進出であったため、その製造・応用上で多くの問題が解決されねばならなかった。

まず、カメラメーカー側では、1) IC 取扱い不慣れに基づくカメラへの実装上の問題、2) IC 化回路およびその応用への過大な期待、次に、IC メーカ側では、1) 低電圧・低電流動作の高性能回路の設計、2) 低電流領域における高電流増幅率と低漏電(漏電)特性のトランジスタ製造プロセスの開発、3) 高信頼および小形軽量パッケージの開発と量産等があげられるが、ここでは、これらの問題の内、IC メーカ側から見た要点をおもにその技術検討結果を記述したあと、シ



図 1.1 中級機用 IC 採用カメラ
3.5mm size bladed shutter cameras using a monolithic IC.



図 1.2 一眼レフ用 IC 採用カメラ(a)とその IC 実装基板(b)
(a) Single lens reflex camera using a monolithic IC.
(b) An applied PCB of the IC.

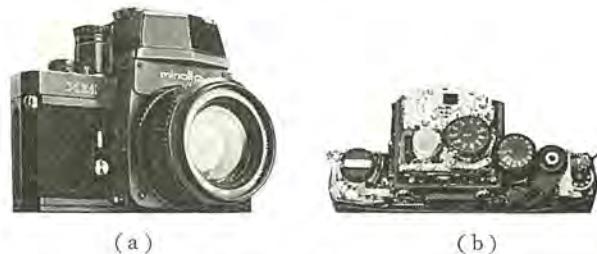


図 1.3 一眼レフ用 IC 採用カメラ(a)とその IC 実装状態(b)
(a) Single lens reflex camera using monolithic ICs.
(b) A photograph of applied condition of the IC.

シャッター制御および他の機能のカメラ用 IC の将来性に触れた。

2. 電子シャッターの動作原理

従来の機械シャッターの時間制御は、歯車列の慣性抵抗を利用した純機械式制御機構によるシャッター開放時間制御であった。電子シャッターではこの制御機構が電気的な CR タイマに置換されている。図 2.1 に示す回路が電子シャッターの基本回路で、破線内の回路部は機能的にはコンパレータ(比較回路)である。この回路により電子シャッターの基本動作を以下に述べる。

シャッターをチャージしたのちリリースボタンを押すと、まずリリース直前に電源スイッチ、 S_1 が投入される。同時に S_2 はまだ閉じており、+入力は低レベルにあるため出力点も低レベルのオン状態になり、マグネットコイルに電流が供給される。この状態ではマグネットがシャッター

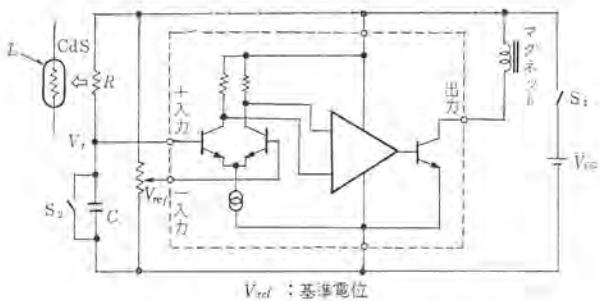


図 2.1 電子シャッター基本回路
Fundamental circuit of IC for electronic shutter.

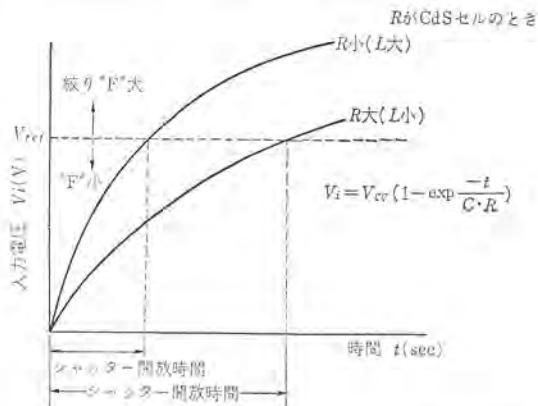


図 2.2 電位変化とシャッター開放時間(露出時間)
Input voltage variation vs. exposure time camera.

閉じレバーを吸引し、このためボタンを押し込んだリーズ後もシャッターは開放状態に保たれる。リーズと同時に S_2 が開き、 R を通して C が充電されはじめる。この充電電位は図 2.2 に示すように CR 充電曲線に沿って上昇するが、基準電位、 V_{ref} に等しくなるまでの期間は回路の出力点がオン状態を維持し、マグネットコイルへの通電によってシャッターは引き続き開放状態を保つ。

C の充電電位が V_{ref} を越した瞬間にコンパレータ出力点は高レベルとなり、マグネットコイルへの供給電流が断たれてシャッターは閉じる。したがって、シャッター開放時間、 t は C 、 R 、 V_{ref} によって決ることになり、次式で与えられる。

図 2.1において R を CdS 受光素子とすれば、CdS セルの抵抗値 R_{ens} が照度 L に逆比例するため、式 (2.2) を式 (2.1) に代入すると t と L は式 (2.3) に示す関係になる。

$$R_{Cas} = a \cdot L^{-1} \quad \text{--- (2.2)}$$

ここで、 a : CdS セルにより決まる定数

一般に、シャッター時間と被写体照度 L の関係は次式で表わされ、絞り・フィルムを定めるとその積が一定となる。

$$t \cdot L = A^2 \cdot S^{-1} \cdot K \quad \dots \dots \dots \quad (2.4)$$

ここで A ：綴り “F” 値

S : フィルム感度 (ASA 値)

K : 補正定数

式(2.4)は L が n, m 倍となれば t はそれぞれ $1/n, 1/m$ 倍になることを意味し、自動退出の基本を示すものである。

したがって、式(2.3)、式(2.4)より

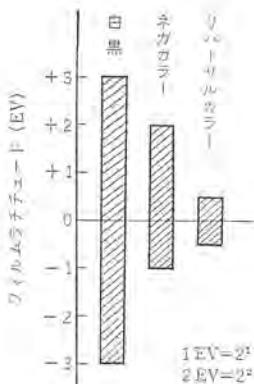


図 2.3 フィルムの ラチチュード
Exposure latitude of films.

となり、 V_{ref} はフィルム感度、 $S : \text{CdS}$ の特性、 $a : \text{絞り}$ 、 F により定まる基準電位としてシャッタースピードを制御する。

V_{ref} には絞り優先式では絞りおよびフィルム感度、プログラム式ではフィルム感度の情報が入れられる。ただし、この方式では V_{ref} が対数の真数の一部として入っているため、 A 、 S と V_{ref} との関係が非線形となる欠点があるが、現在ではコストパフォーマンスを考えて、 V_{ref} を与える抵抗の分割比を調整してこの補正を行なっている。現在、電子シャッターとしては大多数が自動露出用に使用されているが、その場合の最終性能は露出精度であり、これはフィルムの適正露出範囲(ラチチュード)によって左右される。図 2.3 に各フィルムのラチチュードを示しているが、この図より露出精度として ± 0.5 EV が最低限必要となる。この値から図 2.1 のコンパレータに要求される特性は次の項目のようになる。

- (a) 低入力電流
- (b) 高利得
- (c) 低消費電力
- (d) 高電流駆動能力
- (e) 低電圧動作が可能
- (f) 広範な温度と電源電圧範囲内での露出精度の保証

3. 中級カメラ用 IC

35 mm レンズシャッターカメラを中心とする普及形カメラに多数採用されている電子シャッター回路は、前述の図 2.1 に示した回路で、R に受光素子、硫化カドミウム CdS の抵抗を選んで自動露出としたもので、図の点線内の回路が IC に含まれ中級機用 IC として量産されている。その回路構成は初段の差動増幅器、中段の高利得増幅器、それに大容量の出力駆動段の 3 部分から成っている。初段の比較部は、モノリシック IC として最適の差動増幅器を採用し、入力電流を数 nA 程度に抑えるためバイアス電流は μA オーダにまで下げる設計をしている。高利得増幅器段は消費電流を 1 mA 以下に下げた状態で 60 dB 以上の高利得を得るべく、トランジスタ定電流負荷を積極的に利用している。この結果、能動領域幅が狭くなりコンパレータとしての誤差が減少した。出力段は 40 mA 程度のマグネットコイル電流を駆動するとともに、飽和電圧を 0.4 V 以下にする必要があり、数 W のオーディオパワー IC に匹敵するバーン占有面積を必要としている。また、出力段ではマグネットコイル電流をしゃ断する際の逆起電圧がサージとして数十 V 以上もかかるため、ワイヤーダイオードをそう(插)入して 20

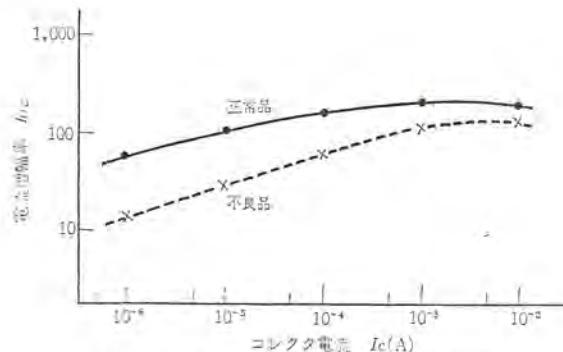


図 3.1 トランジスタの h_{FE} 対 I_c 特性
Current amplification factor h_{FE} vs. collector current, I_c .

~30 V にクリップし、トランジスタを破壊から保護している。

以上のごとく、中級機用 IC では出力段において大電流動作をしており、消費電流とサージ耐量の制約から高電流増幅率、高耐圧も同時に要求される。さらに、入力段においては上述したように、低電流動作の限界をきわめめた設計を強いられており、これら入・出力の条件から図 3.1 に示すように、 h_{FE} のコレクタ電流減少による低下はある傾斜以上になってはならない。これらは製造側にとってきびしい要求となるものがあり、その達成には製造プロセスに対して高度の製造技術と管理が要求される。

なお、中級機用電子シャッターは、それ自体では表示機能を持たないので、自動制御範囲を越える照度の場合および手振れを起こす危険のある低速秒時の場合の警告を行なう露出警告回路が必要である。

この警告回路は時間制御回路とは別回路にしてもよいが、ある場合には時間制御回路と共に用い、IC 化回路を簡単にすることもできる。

4. 一眼レフカメラ用 IC

図 2.1 で示した電子シャッターによる自動露出回路を一眼レフカメラに適用する場合、測光方式の違いによる障害が生ずる。すなわち、一般に TTL 方式を特長としている一眼レフでは、撮影レンズの透過光量を忠実に測ることによる自動露出を採用しなければ、性能上問題となる。ところが、現在のカメラでは種々の制約から撮影の瞬間には全透過光はフィルム面に照射され、ファインダーへの鏡を使った反射光はしゃ断されるため測光はできなくなる。したがって撮影直前の照度を何らかの形で記憶しておく必要がある。この点が一眼レフカメラ用電子シャッター回路を TTL 測光でない中級機のそれより複雑にする結果をもたらす。

回路形式については種々の方式が考えられ、開発を行なった M 5125 J, M 5129 K の 2 品種もカメラメーカーそれぞれの要求仕様と適用カメラの性格の違いから、特長のある異なる回路形式となっている。一例として日本光学工業の採用した M 5125 J について実際の回路構成を示すと、図 4.1 のブロックダイヤグラムになる。図の破線内が IC 部分で、102 個の素子が $2 \times 1.8 \text{ mm}^2$ の 1 チップにまとめられている。図 4.1 で動作を説明すると、まず CdS 受光素子により照度は抵抗値に置き換えられるが、さらに対数圧縮回路により対数値に変換された電圧となる。これは被写体の照度変化が 10^5 倍にもおよぶので、通常の電圧範囲では処理できないため必要となる。対数圧縮された光情報は記憶回路に入り、入力がしゃ光されてもその値が記憶され、次の演算回路に伝えられる。一方、絞り、フィルム感度の設定値が同様に対数圧縮された電圧に変換されて、この演算回路に入る。この

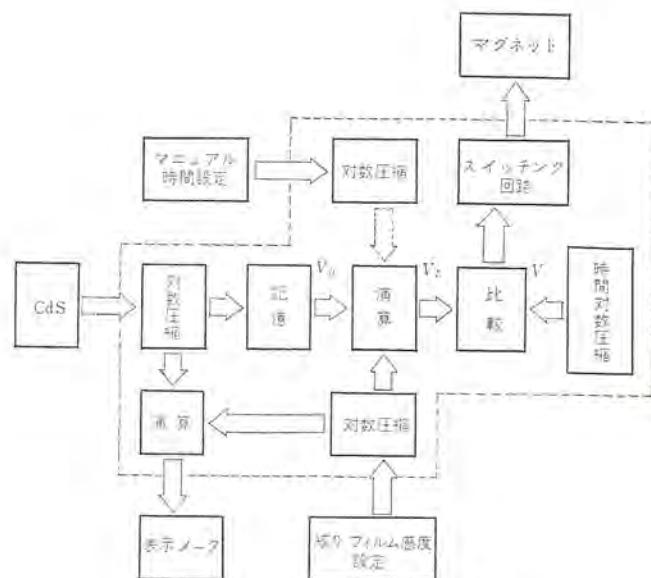


図 4.1 M 5125 J のブロックダイヤグラム
Block diagram of M 5125 J.

演算回路から適正露出となるようなシャッター時間に相当する電圧が output として得られる。

いま、この演算回路出力電圧 V_L を比較回路の一方の入力に与え、他方に時間を電圧に変換した、時間対数圧縮回路の出力電圧 V_t を入れれば、比較回路の出力は両入力が等しくなったとき反転するから、この出力にマグネットコイルを接続しておくことにより、シャッターを V_t に相当する時間で閉じさせることができる。この V_t は図 4.1 に示す時間対数圧縮回路により、シャッターレリーズの瞬間からの経過時間を電位変化に対数圧縮したものである。

なお、低速シャッター秒時では手振れなどの失敗を起こしやすいので測光値、絞りおよびフィルム感度設定のそれぞれの対数圧縮電圧を加減算してメータを駆動し、撮影前にシャッター時間を表示する機構が含まれている。また、自動と手動露出は別々の対数圧縮回路で処理できるように構成され、IC 外部でスイッチにより切り換える。

このように、一眼レフ用の回路構成は複雑にならざるを得ないが、それに伴って温度、電源電圧変化に対する安定性の確保が困難になる。図 4.1 の実際の回路はこの点を考慮して完全なバランス形式で構成され、特性変動を相殺して誤差を極力少なくするよう設計されている。モノリシック IC は素子間特性の整合が良好で、この方式は最適といえるが、特にこの電子シャッター方式では対数変換系において誤差を生じないようにするためにトランジスタの V_{BE} 対 I_c 特性が理論値に近いものでなければならない。

一眼レフ用電子シャッターとして、この他に中級機用よりは高性能だが、類似の機能をもつ IC を利用する方法がある。この方法は、記憶演算用としても 1 個 IC を必要とするが、設計に自由度もあり、カメラ全製品の電子化から見た場合には賢明な方法ともいえる。図 4.3 はミルタカメラの行なったこの方式である。

先に電子シャッター用 IC に要求される特性をあげたが、一眼レフ用 IC の場合、今後の最大の障害は電源電圧である。現在は 6 V が主流であるが、中級機用の 3 V 傾向に迎合する可能性があり、回路構成の複雑さからくる種々の障害を設計、IC 製造の両面より克服されねばならない、換言すれば、ブロック分けおよび電源電圧の問題はプロセス技術、パッケージ、コストおよび応用性等を考えた総合効果の観点から決められるべきであろう。

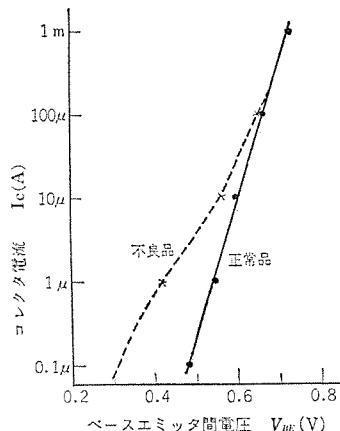


図 4.2 トランジスタの V_{BE} 対 I_c 特性
 V_{BE} vs. I_c of transistor.

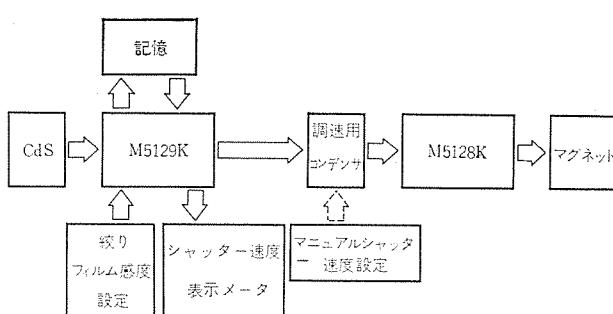
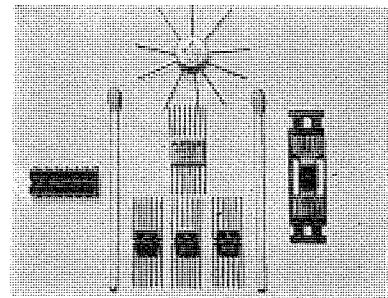


図 4.3 M 5128 K, M 5129 K 使用の一眼レフ電子シャッタ構成図
Block diagram for electric shutter of single lens reflex camera using M 5128 K and M 5129 K.



左: 14 ピン プラスチック モールド パッケージ
中央: 各種カメラ用 IC パッケージ
上より 10 ピン TO-5, 16 ピン J2, 14 ピン K2
右: 14 ピン “ミニモッド”

図 5.1 各種パッケージの外観写真
Exterior view of packages.

表 5.1 パッケージの性能一覧

Characteristics table of packages.

名 称	外部リード数 (本)	信頼性レベル	リード間絶縁性	リード1本当たりの [※] PCB 占有面積 (mm ² /本)max	リード1本当たりの 占有空間 (mm ³ /本)max	重 (mg)	高 (mm)max	取扱いの容易性
プラスチック モールド	14~	○	○	10	41	1,020	5.0	◎
メタルキャニシル	8~10~12	◎	◎	6.9	32.6	810	4.7	○
フラットパッケージ	8~10~12	◎	◎	6.9	25.7	760	3.7	○
K ₂	14	◎	◎	5.9	5.8	250	2.1	△
J ₂	16	◎	◎	7.4	8.8	430	2.1	△
ミニモッド	4~14~	?	○	4.0	4.2	60	1.7	△

* リードのはんだ付けをパッケージ本体より 2 mm 離れた点で行なうとしたときの占有面積 ○印 良好, ○印 普通, △印 ややむずかしい

5. パッケージ

カメラ用 IC の開発において、思わぬ難関となつたのは IC チップを収容する外装、すなわちパッケージである。

カメラ用 IC のパッケージは下記の条件を満たす必要がある。

(1) カメラの最低寿命 10 年を保証できる信頼性を有していること。その基本的な保証項目は、カメラの特殊な使用形態、換言すれば 1 カ月に平均、フィルム 1~2 本程度を撮影するといった使用条件を勘案した保存寿命である。

(2) カメラ内部での狭い空間に高密度実装できる小形扁平形状、軽量性および取扱いの便益性を備えていること。

(3) 全世界への輸出商品であることを考慮に入れた耐環境性。

(4) 隣接リード相互間の絶縁抵抗が $10^{10} \Omega$ 以上、静電容量が可及的に小さく、100 pA オーダの IC アンプが収容できること。このため、IC 製品についても IC チップ上の微少電流動作の素子の特性を劣化させたり、変動させないように特にその取扱いに注意する必要がある。

以上の条件を満たすパッケージとしてわれわれは図 5.1 に示したようなものを開発した。

表 5.1 は従来のプラスチックモールドパッケージから、将来その超小形のために有望視されているミニモッドまで、われわれの開発品を含めた各種パッケージの性能比較表である。

現在、当社が採用中のパッケージを構造的に見ると、絶縁抵抗を主体としたため、TO-5 で代表されるメタルキャニシルのものとセラミックを主材料としたフラットパッケージに分けられる。いずれも中空パッケージで、その信頼性・絶縁性能は過去の実績により十分裏付けられ

たものである。

6. む す び

われわれの開発したカメラ用 IC について、まず中級カメラ用は低電圧・低電流動作の高感度コンパレータとサージ吸収機能を備した数十 mA の電流ドライバを主体とし、これに種々の警告回路を付属させたものであることを、また高級カメラ用は中級用の機能をいっそく高性能化する一方、ダイオードによる対数圧縮により約 $10^4 \sim 10^5$ 倍の広範囲な信号処理を行なわせていることを述べた。さらに、IC 製造上の問題およびパッケージの面より検討した。

これらの開発経験から今後のカメラ用 IC を考察すると、

(1) 現在の CdS に置き代わる高速受光素子としてのフォトダイオードおよびそれを一体化した増幅用 IC

(2) シャッター制御信号のデジタル処理と低電圧、低消費電流動作のための CMOSIC 化

(3) メタ表示に代わる LED とそのドライバ用 IC

(4) 絞りとシャッター時間の両制御を行なわせる、またフラッシュとの連動を考慮したカメラの機能アップ IC

(5) オートフォーカス用 IC

(6) 本来の電子シャッター用“電子絞り”とその制御 IC などがあげられる。

終わりに、共同開発においてご指導ご協力を受け、資料の提供をいたいたセイコー光機(株)、日本光学工業(株)、ミノルタカメラ(株)および(株)ヤシカの関係者各位に、深甚の謝意を表します。

(昭和 48-5-28 受付)

ROM 方式電卓用 MOS/LSI

山田 憲正*・岩田 泰昌*

MOS/LSI with Program ROM for Desk TOP Calculator

Kitaitami Works Norimasa Yamada・Yasumasa Iwata

MOS/LSI for a desk top calculator supplying micro programming technique has been developed. The specification change of LSI can be done by the alteration of the ROM contents of the LSI.

By the programming technique, the LSI for desk top calculators whose specifications are diversified can be standardized and the developing term of the LSI can be shortened.

The article describes the function blocks, which constitute the desk top calculator, micro instructions, and their outlines.

1. まえがき

LSI, 特に電子卓上計算機（以下電卓と称す）用 LSI の開発に際して、開発期間の短縮が強く要求される。ユーザによって種々異なる電卓仕様に、迅速に対処することが重要なポイントである。この開発期間短縮に対する手法として、われわれは、ROM によるマイクロプログラミング方式を採用した。

この方式を採用するにあたって、電卓の動作シーケンスのシミュレーションから、ROM ゲートマスクパターンの発生までを自動的に行なう CAD システムが同時に開発された。

電卓仕様の変更は、ハードの持つ機能で規定される仕様（けた数・レジスタ数・表示方式等）を除いて、ROM の内容の変更で行なう。電卓の仕様が決定すると、インストラクションを用いて動作シーケンスのフローチャートを作成する。次にこの動作シーケンスのシミュレーションを行ない、設計が正しいかどうかチェックする。この結果正しい動作シーケンスのフローチャートが完成すると、上述の CAD システムによって、ROM のゲートマスクパターンが発生される。

この方式によって、母体となる LSI が完成すると、種々の仕様の電卓に対して、長い開発期間を要する論理設計、レイアウト設計を省略できるので、開発期間を大幅に改善でき、従来のランダムロジックによる設計方式の $\frac{1}{3} \sim \frac{1}{4}$ に短縮することができた。

現在、この ROM 方式電卓用 LSI として、10 けたメモリなし、12 けたメモリなし、12 けた 1 メモリ付き、および 12 けた 2 メモリ付き LSI の開発を完了し、量産化しているが、この方式を拡張すれば、科学技術計算用電卓・電子式計算尺・電子式会計機等にも適用できる。

ここでは、ROM 方式電卓用 LSI の一例として、このたび開発を完了した 12 けたメモリなし LSI による電卓の構成、および LSI 内部構成について記述する。

2. 電卓の構成

この LSI を用いた電卓は、図 2.1 に示したように、

- (1) キー入力部
- (2) 演算部 (MA 8614-20 B, LSI)
- (3) デコーダ部 (M 58613-81 P, MSI)
- (4) 表示部 (けい(螢)光表示管, LED, ガス放電管等)
- (5) 電源部 (直流電源, 一相クロックジェネレータ)

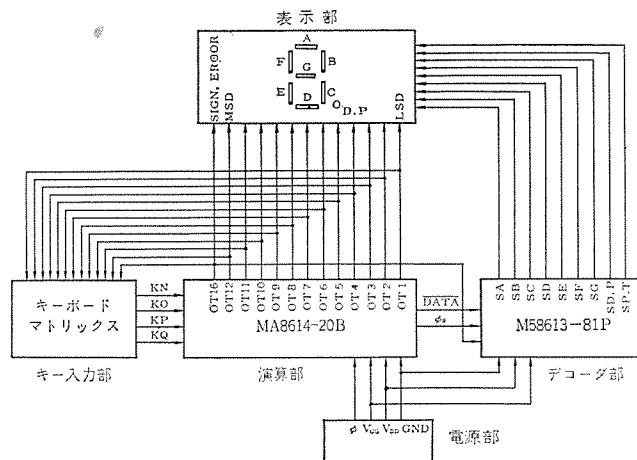


図 2.1 電卓ブロック図
Block diagram of calculator.

で構成される。以下にこの電卓の動作、および各ブロックの概要について述べる。

2.1 動作の概略

まず演算部を中心とした全体の動作について述べる。電源スイッチを入れた状態、およびキーの読み込み、演算が終了した状態では、演算部のプログラムカウンタは、あるロケーションで静止し、表示部は、表示レジスタ (X レジスタ) の内容を表示している。

ある数値キーまたは機能キーが押されると、キー入力部のキーボードマトリックスをかいして、そのキーに対応したけた指定パルスが、KN または KO ラインにあらわれ、演算部に入れられる。チャッタリング防止回路を経たあと、ROM にプログラムされた内容に従って動作する。この ROM には入力キーの解読と読み込み、判定、演算、必要に応じたチャッタリング防止等のプログラムが書き込まれており、内部 1 ワード単位で読み出され、その内容が解読され実行される。

キーの読み込み、演算が終了すると、初めの静止した状態に戻り、表示レジスタの内容がデコーダ部に送られ、解読されて 7 セグメント用表示出力が表示部に送られる。

表示部にはけた指定パルスも送られており、7 セグメント用表示出力と同期がとれたときに点灯されるようになっている。

2.2 キー入力部

キー入力方式としては、表示用のけた指定パルス OT1～OT16 を、おのののキーに対応させるスキャニング方式を採用している。

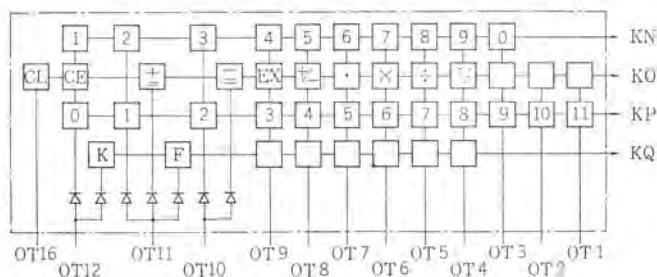


図 2.2 キーボードマトリックス
Keyboard matrix.

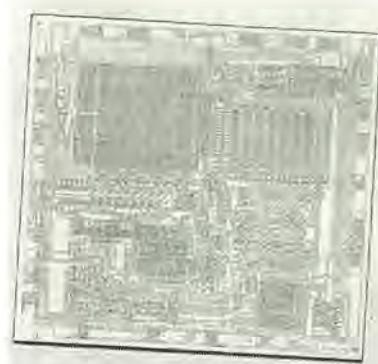


図 2.3 MA 8614-20 B パターン写真
Photograph of MA 8614-20 B.

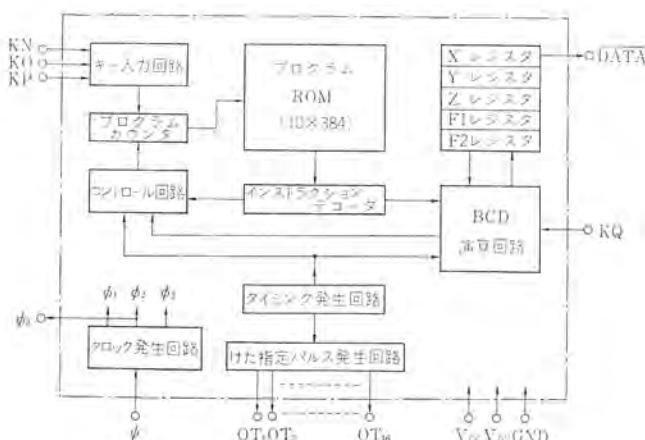


図 2.4 MA 8614-20 B ブロック図
MA 8614-20 B block diagram.

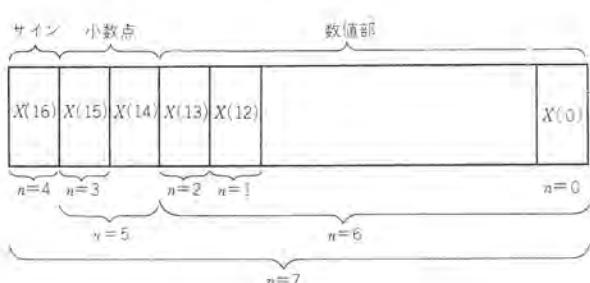


図 2.5 レジスタのデータ形式
Data format of register.

数値キーは KN ライン, 機能キーは KO ライン, モードスイッチ(定数計算用, 浮動小数点演算用等)は KQ ライン, 小数点指定セレクタは KP ラインにそれぞれ独立に接続され, この 4 本の入力ラインと, けた指定パルスとでマトリックスを形成する。図 2.2 にキーボードマトリックスを示す。

キーイッチのタイプとしては, 機械的スイッチ, リードリレースイッチ等が使用できるが, キー接触時間は最小 25 ms 必要であり, これ以下であると読み込まれないようになっている。

2.3 演算部

演算部 (MA 8614-20 B) のパターン写真を図 2.3 に, ブロック図を図 2.4 に示した。これのおもな構成要素は,

- (1) プログラム ROM (384ワード)
- (2) レジスタ (演算用レジスタ 3, フラッグ用 2)
- (3) BCD 演算回路
- (4) キー入力回路
- (5) コントロール回路
- (6) クロック, タイミング, けた指定パルス発生回路

であり, 約 5 mm² のチップにくみこまれ, 24 ピン DIL(Dual In Line)パッケージにおさめられている。

プログラム ROM に, 電卓仕様の可変部分がプログラムされており, その内容が 1 ワード単位で読み出され, インストラクションデコーダによって解読される。ROM の 1 ワードは, 10 ビット (RO 1 ~ RO 10) で構成され, 1 ワード構成ビットの機能内容は, 次のとおりである。

RO 1 : ジャンプビット

RO 2 : フラッグ用, または演算レジスタ用インストラクションの区別のためのビット

RO 3 ~ RO 6 : マシンインストラクション用ビット

RO 7 : レジスタの種類の指定

RO 8 ~ RO 10 : レジスタアドレスの指定

レジスタとして, 4×16 ビットの RAM による演算用レジスタ X, Y, Z の 3 本と, 1×8 ビットの RAM によるフラッグ用レジスタ F1, F2 の 2 本をもつ。各レジスタのおもな機能を述べると, X レジスタは表示用レジスタ, Y レジスタは一時記憶用, Z レジスタは補助用である。X および Z レジスタは加減算, シフト機能を持ち, カウントとしても用いることができる。

演算レジスタのデータ形式は図 2.5 に示すとおりであり, 4 ビットパラレルの BCD の値をとり, BCD 演算回路で加減算処理を行なう。F1, F2 レジスタはフラッグ用に使用され, おのおの 8, 計 16 のフラッグが使える。

キーの読み込みまたは演算が終了すると, 表示レジスタの内容は, シリアルな形に変換され, けた指定パルスと同期して DATA ラインから出力される。

2.4 デコーダ部

デコーダ部 (M 58613-81 P) のブロック図を図 2.6 に示す。7 セグメント表示用デコーダ, 小数点デコーダ, パンクチュエーションデコーダ, ゼロサプレス回路等で構成され, 16 ピン DIL パッケージにおさめられている。

DATA ラインにより入力された表示レジスタの内容は, パラレルのデータに戻され, 解読されてセグメント表示信号が出力される。

2.5 表示部

表示部として, けい光表示管・発光ダイオード・ガス放電管等が使用できる。表示用として, OT 1 ~ OT 12, OT 16 のけた指定パルスが演算部から, セグメント表示出力がデコーダ部から出力され, これらの

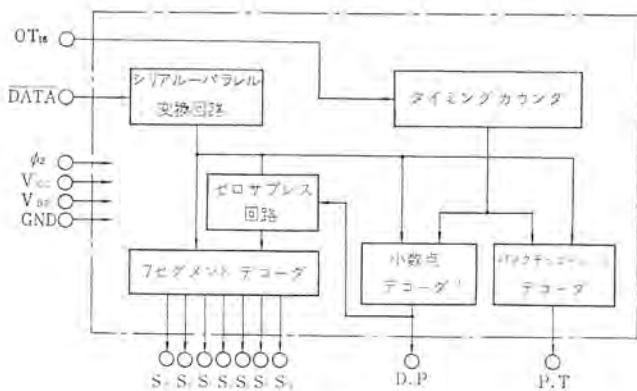


図 2.6 M 58613-81 P ブロック 図
M 58613-81 P block diagram.

デューティサイクルは $\frac{1}{16}$ 、パルス幅は標準周波数で $200\ \mu\text{s}$ であり、表示の重なり、それを防ぐために、ブランディング期間をとっている。これらの出力ドライバは、オーブンドレイン形で、耐圧 -25 V 、けた指定パルス電流は -3 mA 、セグメント電流は -1 mA の駆動能力を持ち、この規格内にあるけい光表示管を、インターフェイス回路なしに駆動できる。

3. インストラクション

インストラクションの種類は、大別すると、

- (1) ジャンプ インストラクション
- (2) 演算 レジスタ用 インストラクション
- (3) フラッグ用 インストラクション
- (4) I/O インストラクション

に分類される。これらのインストラクションの一覧表を、表 3.1 に示す。これに従って以下に簡単な説明を加える。

ジャンプ命令には、無条件ジャンプインストラクション JMP と、機能キーの読み込みに用いる条件ジャンプインストラクション JMPK がある。飛び先のアドレスは、RO 2～RO 10 の 9 ビットで指定されるが、動作シーケンスのフローチャート作成時には、英文字のラベルで指定でき、後で述べる CAD のプログラムによって、自動的に絶対アドレスに変換される。

演算レジスタ用インストラクションには、クリア命令、レジスタ間の転送命令、加減算命令、左右シフト命令、スキップ命令、インクリメント命令がある。

フラッグ用インストラクションには、セット、リセット命令、および判定用のスキップ命令がある。

I/O インストラクションは、キーの読み込みと表示に用いられるが、他のインストラクションの実行時間が内部 1 ワードであるのに対して様子が異なる。2.2 節で述べたように、キー入力は、けた指定パルスの形で入り、そのパルスがどの時間帯にあるかを知る必要がある。命令 RIN はこのためのもので、この命令によって、プログラムカウンタはある決められた時間 (OT 14) まで静止する。したがって、RIN の次に書かれた命令の時間帯は、必ず決まることになる。命令 JFKN, JJKO は、数値キーと機能キーの判別用で、入力があればそれぞれのルーチンにジャンプする。命令 INXK, INZK は、数値および指定小数点入力用のもので、入力パルスがくるまで同一アドレスで静止し、1 ワードごとにインクリメントを続け、入力がくると次のステップに進む。命令 ACL は、電源オートクリア用のものである。

表 3.1 インストラクション一覧表
List of instructions.

	アセスメント	内容
演 算	CLX n CLZ n	$X(n), Z(n) \leftarrow 0$
レジスタ用	LDX Y, n LDX Z, n	$X(n) \leftarrow Y(n), Z(n)$
	LDY X, n LDY Z, n	$Y(n) \leftarrow X(n), Z(n)$
	LDZ X, n LDZ Y, n	$Z(n) \leftarrow X(n), Y(n)$
	ADX Y, n ADX Z, n	$X(n) \leftarrow X(n) + Y(n), Z(n)$
	SBX Y, n SBX Z, n	$X(n) \leftarrow X(n) - Y(n), Z(n)$
	INX n INZ n	$X(n), Z(n) \leftarrow X(n), Z(n) + 1$
	DEX n DEZ n	$X(n), Z(n) \leftarrow X(n), Z(n) - 1$
	SZM X, n SZM Z, n	$X(n), Z(n) = 0$ ならスキップ
	SNZM X, n SNZM Z, n	$X(n), Z(n) \neq 0$ ならスキップ
	LSX Z, n	$X(6), Z(6)$ 左シフト
	RSX Z, n	$X(6), Z(6)$ 右シフト
フラッグ用	CLF $ffff$	$ffff \leftarrow 0$
	STF $ffff$	$ffff \leftarrow 1$
	STFK $ffff$	$ffff \leftarrow 1$
	SZF $ffff$	$ffff = 0$ ならスキップ
	SNZF $ffff$	$ffff \neq 0$ ならスキップ
ジ ケ ン プ	JMP $aaaa$ JMPK $aaaa$	$aaaa$ 番地にジャンプ
I/O 用	RIN JFKN $aaaa$ JJKO $aaaa$ DSPY INXK INZK ACL	本文参照

注) n : レジスタアドレス $n=0 \sim 7$

$ffff$: フラッグの名前

$aaaa$: ジャンプ先のアドレス

4. ROM ゲートパターンの作製

今回使用した ROM は、薄いゲート酸化膜と厚い酸化膜によってメモリの内容を変える方式である。ゲートパターンのあるメモリの内容は論理的に 1、ないところは論理的に 0 となり、このゲートパターンの配列によってプログラムする。

図 4.1 に、電卓仕様決定から、ROM ゲートマスク作製までの作業のフローチャートを示す。動作シーケンスのフローチャートシミュレーション以後の作業は、CAD システムにより処理され、誤りの減少、開発期間の短縮がなされている。

電卓仕様が決定すると、3 章で述べたインストラクションを用いて、動作シーケンスのフローチャートを作成する。ここでの制限条件は、

- (1) プログラムのステップ数が 384 以下であること。
- (2) フラッグの数が 16 以内であること。
- (3) キーの数の最大が、置数キー 10、機能キー 13、小数点指定スイッチ 11、モードスイッチ 8 であること。

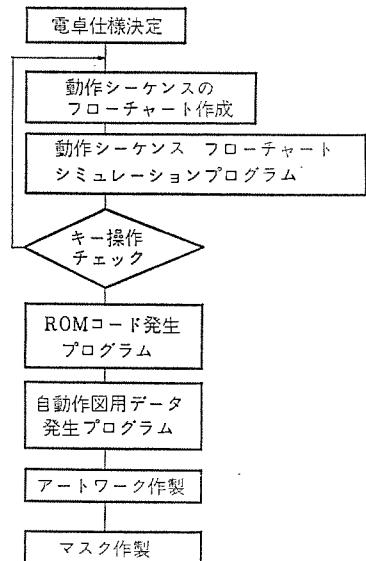


図 4.1 ROM ゲートマスク作製フロー

Flow chart of ROM gate mask making.

である。次に、動作シーケンスのフローチャートシミュレータにかけ、電卓キー操作仕様に従ってチェックしデバッグする。電卓と同様に、演算操作をテレタイプのキー操作により入力すれば、ただちに表示レジスタの内容が表示される。図4.2に、アセンブリ言語で書かれたリストの一例を、図4.3にシミュレーション結果の一例を示す。動作シーケンスのフローチャートが完全にデバッグされると、ROMコード発生プログラム、自動動作図用データ発生プログラムにかけて、自動動作図機用の入力テープを作り、作図する。

5. ROM 方式電卓用 LSI の仕様概略

現在、ROM 方式電卓用 LSI として、10 けたおよび 12 けた用の機種を量産している。メモリなしの機種として、10 けたと 12 けたの 3 機種をもつ。また、1 メモリ付き 3 機種、2 メモリ付き 1 機種をもち、おのの 12 けた用である。これらの LSI の仕様概略を表 5.1 に示したが、いずれもこのクラスの電卓仕様としては高級なものである。特に 12 けたメモリ付きの機種は、ROM のワード数が 512 と多いので、平方根計算等の機能もあり、技術計算向けにも使用できる。

6. む す び

電車用 LSI の設計にマイクロプログラミング方式を採用し、ROM の内容を可変にすることにより、多種多様な仕様に対応できる電車用 LSI

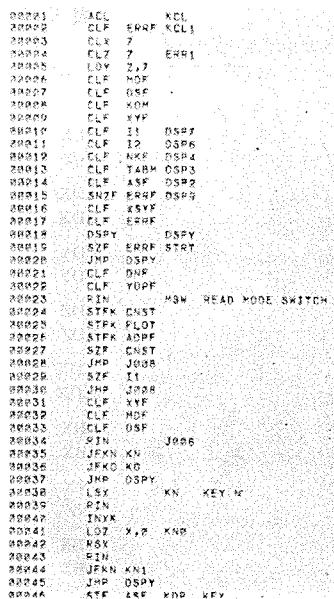


図 4.2 アセンブルリスト
Example of assemble list.

			10,000,000.11	K	T4
0273 0224		CL	0.	K	
0274 0163					
0275 0177		T2			
0283 0497					
0284 0427	1		1.	K	T2
0295 2170	0		10.	K	T2
0296 2121					
0297 2163	/		10.	K	T2
2218 3167					
2311 3152	3		3.	K	T2
2312 3161	+=		3.33	K	T2
2313 3173	-=		1.11	K	T2
0314 2173					
2315 3174	+=		1.11	K	T2
0316 3365					
0317 3172	X		1.11	K	T2
0320 3173	5		5.	K	T2
0321 3778					
0322 3366	+=		5.55	K	T2
0323 1221					
0324 4177	1		1.	K	T2
0325 3176	2		12.	K	T2
0326 2066					
0327 3244	3		123.	K	T2
0338 3245	4		1,234.	K	T2
0331 3242					
0332 3384	5		12,345.	K	T2
0333 1341	6		123,456.	K	T2
0343 3350					
0345 3163	7		1,234,567.	K	T2
0346 3167					
0347 3178	8		12,345,678.	K	T2
0348 3171	9		123,456,789.	K	T2
0341 3209					
0342 3245	+=		137,037,035.7	K	T2
0343 3122	K0				
0344 1321					
0345 2611	1		1.		T2
0346 3223	0		10.		T2
0347 2670					
0350 3470	/		10.		T2
0351 3635					
0352 3660	3		3.		T2
0353 3681	+=				

図 4.3 フローチャートシミュレーションの出力結果

Example print-out of flow chart simulation.

表 5.1 ROM 方式電卓用 LSI 仕様一覧
Specification list of LSI with program ROM for calculator.

機種	ROM ワード数	四則演算	連続乗除	定数乗除	%計算	上位優先	べき計算	開平計算	四捨五入	概算計算	ドル計算	累積計算
10けた0メモリ LSI	320	○	○	○	○		○					
10けた0メモリ LSI	320	○	○	○	○	○	○					
12けた0メモリ LSI	384	○	○	○	○	○	○			○		
12けた1メモリ LSI	512	○	○	○		○	○	○	○	○		○
12けた1メモリ LSI	512	○	○	○	○	○	○		○			○
12けた1メモリ LSI	512	○	○	○	○	○	○		○	○	○	○
12けた2メモリ LSI	512	○	○	○		○	○	○	○			○

SIを開発した。仕様の変更からくる製造過程の変更を、ROMのマスクの変更だけに止めることができになり、LSIの開発期間を従来の1/3～1/4に短縮できた。電卓市場の動向としては、開発期間の短縮はもとより、低価格化・低電力化・高機能化が要求されている。新しいプロセスの採用、マイクロプログラミング方式応用上の工夫改善、新しい回路方式の採用、集積度の向上等により、これらの要求に対応していくかなければならないと考えられる。

ガスプラズマ技術の IC 製造への応用

阿部 東彦*・園部 幸夫**・榎本 龍弥**

Application of Gas Plasma to the Fabrication of Semiconductor Integrated Circuits

Central Research Laboratory Haruhiko Abe
Kitaitami Works Yukio Sonobe・Tatsuya Enomoto

Etching mechanism on silicon and silicon compounds by means of CF_4 gas plasma is not well known. It is supposed that CF_4 gas in a reactor tube is energized by high frequency field to be plasma and partially becomes fluorine radicals (F^*) in plasma which interact with the silicon or silicon compounds. The etching depth is found to be the exponential function of the square of etching time due to the change of temperature of the substrate in the reactor. The etching characteristics of silicon and silicon compounds give difference in etching depth in the order of $Si > Si_3N_4 > SiO_2$. The plasma etching technique can be applied to the fabrication of IC and is found to be superior to the conventional chemical etching technique with using fluoric or phosphoric acid.

1. まえがき

半導体工業、特に IC 製造工程中の写真製版工程では、多くの手作業を要すると同時に、多種・多量の化学薬品が用いられている。これらの化学薬品は作業の危険性はもとより廃液処理等の問題もあり、使用を避けるべき性質のものとなっている。最近これらの弊害および化学処理技術特有の技術的欠点を改善する目的で、ガスプラズマを使用するウエハ処理方法が注目されている。酸素プラズマを用いた感光性樹脂の除去法⁽¹⁾はその一例であり、すでに IC 製造技術として定着しつつある。

本報告では、シリコン化合物のエッチングにガスプラズマを適用した結果を報告する。このガスプラズマエッチング技術は、従来のふつ酸あるいはりん酸系混合液等によるエッチング技術と違い、廃液処理の無用化および作業の安全性が得られるのみならず、工程の短縮、歩どまりの向上、材料費の節減等に多大の利点を有するものである。

2. 実験装置および方法

ガスプラズマによるシリコン化合物のエッチング法を IC 製造工程に適用するには、ウエハ内およびウエハ間のエッチングの一様性が良くなければならぬ。このエッチングの空間的一様性を良くするためには、使用する石英管(反応管とよぶ)の内径 R とウエハの直径 r との比 R/r を十分大きくとる必要があると考えられる。またガスの導入、排気法にも注意する必要がある。実験に用いた装置、およびエッチングの一様性を考慮した反応管を、図 2.1, 2.2 に示す。反応管は内径 10 cm、長さ 20 cm で二重構造になっている。内側の管壁には、直径約 2 mm のガス噴出口が 60 度おきに設けられている。高周波電力はコイルにより供給され、印加周波数は 13.56 MHz である。印加高周波電力は約 200 W である。ガスは CF_4 であり、図 2.2 の内管の管壁に設けられた噴出口から管の中心に向って噴出する。反応管の内圧は 0.16 Torr であり、実験の際は試料として 1 枚のウエハを反応管の中央部の定位置においていた。その他、使用前の反応管の温度等は一定の状態に保つよう注意をはらった。

使用した試料はつぎの条件により作成した。単結晶シリコンは(111)の結晶面で比抵抗が 4 ~ 6 $\Omega\text{-cm}$ の N 型基板、および(100)の結



図 2.1 ガスプラズマエッチング装置
Gas plasma etching machine.

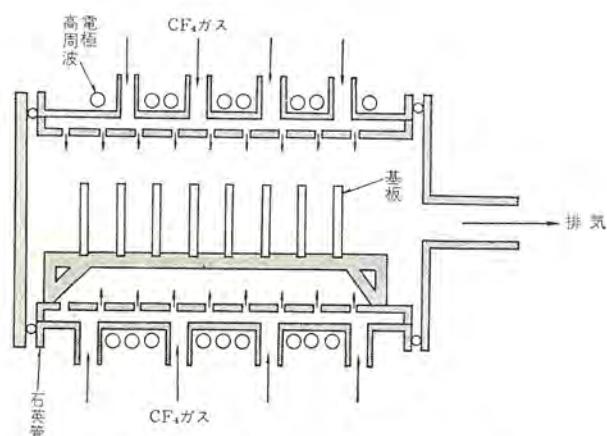


図 2.2 ガスプラズマエッチング装置の反応管
Reactor of gas plasma etching machine.

晶面で比抵抗が 10 ~ 20 $\Omega\text{-cm}$ の P 型基板を用いた。多結晶シリコンは窒素をキャリヤガスとしてシラン(SiH_4)を 710°C で熱分解して、酸化シリコン(SiO_2)上に形成した。窒化シリコン(Si_3N_4)は SiH_4 とアシモニア(NH_3)を 850°C で反応させ、シリコン基板上に形成した。酸化シリコン(SiO_2)は単結晶シリコンを湿潤酸素ふん団気中 1,150°C で熱酸化したものである。 Si_3N_4 および SiO_2 についてはエッチング前後

これらの膜の膜厚を偏光解析法により求め、また単結晶シリコンおよび多結晶シリコンについては感光性樹脂をエッチングマスクとしてエッチングし、その段差を Talystep により求め、エッチング量を得た。

3. 実験結果

3.1 エッチング特性

図 3.1 に単結晶および多結晶シリコンのエッチング特性を示す。横軸はエッチング時間 t の平方根で縦軸はエッチング量 D (Å) (膜厚) を示している。単結晶シリコンのエッチング量は結晶面によって差があり、(111)より(100)のほうが大きい。また多結晶シリコンのエッチング量は単結晶シリコンよりさらに大きい。図 3.2 は Si_3N_4 膜のエッチング特性であり、as-deposition 状態の Si_3N_4 膜を 200 W および 185 W の出力でエッチングした場合と、 Si_3N_4 を 1,150°C の熱処理により、densification した後 200 W でエッチングした場合を示している。図 3.3 は SiO_2 膜のエッチング特性である。図 3.2 から印加高周波電力によってエッチング量が変化することがわかる。この場合反応管内のガス圧は一定に保たれているので、高周波電力を増すということはプラズマ中の電子あるいはイオンの密度を増すことになる。この結果を図 3.4 に示す。

3.2 パターン寸法精度

約 2,300 Å の Si_3N_4 膜を感光性樹脂をマスクとしてパターニングした場合のエッチング寸法を図 3.5 に示す。横軸は感光性樹脂の現像寸法であり、縦軸はエッチング後の寸法である。寸法変換率は非常に少なく、現像寸法とあまり差がなくエッチングされている。一般的な Si_3N_4 のエッチング法である SiO_2 膜をエッチングマスクとして熱りん酸

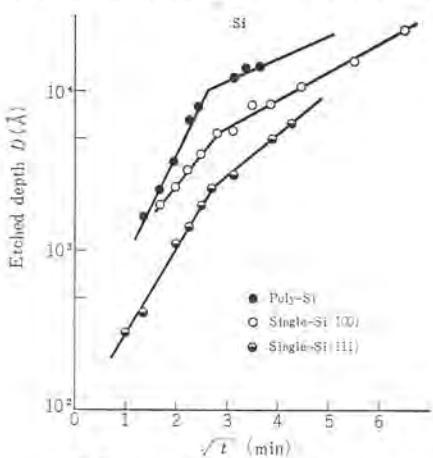


図 3.1 シリコンのエッチング特性

Etched depth D of silicon as a function of square root of the etching time.

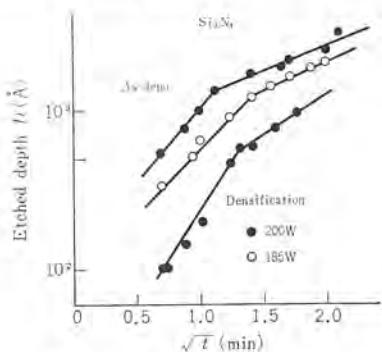


図 3.2 Si_3N_4 のエッチング特性

Etched depth D of silicon nitride as a function of square root of the etching time.

でエッチングするのと違い、この方法は、直接感光性樹脂をマスクとすることができます。プラズマエッチングの利点を生かした方法でもある。

3.3 応用例—熱酸化マスク用 Si_3N_4 膜のエッチング

3.1 節の実験結果で示したように、シリコンおよびシリコン化合物のエッチングのされやすさは $\text{Si} > \text{Si}_3\text{N}_4 > \text{SiO}_2$ の順であるため、被エッチング物質（たとえば、 Si_3N_4 、多結晶シリコン）などの下に適当な厚さの SiO_2 膜が形成されている場合には、シリコン基板そのものがエッチングされるおそれがあまり少なく、ガスプラズマエッチング法は IC 製造技術

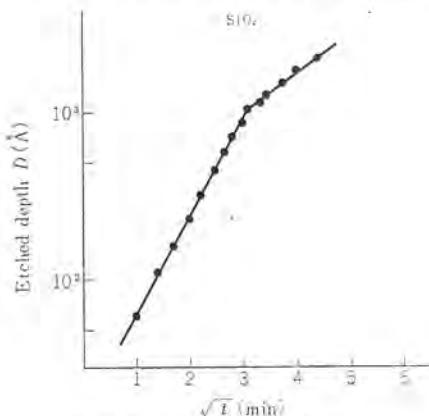


図 3.3 SiO_2 のエッチング特性

Etched depth D of silicon dioxide as a function of square root of the etching time.

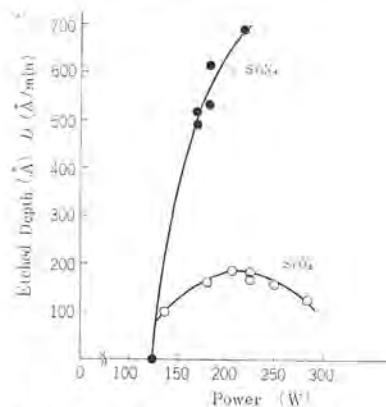


図 3.4 ガスプラズマの出力による Si_3N_4 および

SiO_2 のエッチング量

Etched depth D of silicon dioxide and silicon nitride as a function of power of the high frequency.

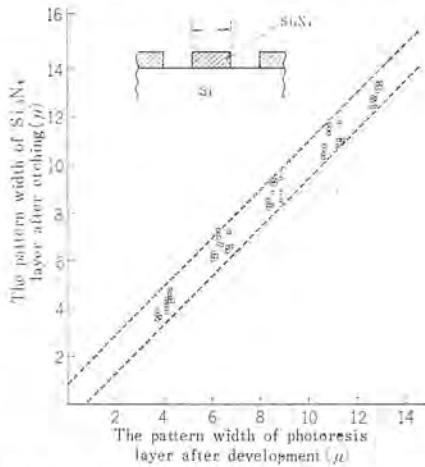


図 3.5 ガスプラズマエッチングによる Si_3N_4 の寸法精度

Relationship between pattern width of developed photoresist layer and that of etched Si_3N_4 layer.

として有効なものとなる。

ここでは MOS IC 製造工程で、熱酸化膜生成用のマスクとして使用される Si_3N_4 膜のエッティングに、ガスプラズマエッティング法を適用した例を示す。

シリコン基板上に部分的に熱酸化膜を形成する場合に、 Si_3N_4 膜を酸化マスクとして使用する方法は、選択酸化法として LOCOS 法⁽²⁾、あるいは Planox 法⁽³⁾としてよく知られている。

従来この選択酸化法で用いられる Si_3N_4 膜のエッティングは、熱りん酸溶液（約 170°C）が用いられていた。この場合、感光性樹脂を直接マスクとして利用することはその耐食性が悪いためできず、一度パターンニングした SiO_2 膜をマスクとしてエッティングしていた。このプロセス（ウェットプロセスと呼ぶ）は図 3.6 に示したごとく工程も複雑であり、マスク用 SiO_2 膜を C.V.D. 法（Chemical Vapor Deposition 法）で形成する際に、 Si_3N_4 膜に生ずるクラックやマスク用 SiO_2 膜に存在するピンホール等が、直接素子の電気的特性の劣化や歩どまりに影響する。図 3.7 に示したようにガスプラズマで Si_3N_4 膜をエッティングするプロセス（ドライプロセスと呼ぶ）では、直接感光性樹脂をエッティングマスクとして利用できるためマスク用 SiO_2 膜が不要であり、工程短縮、パターン精度の向上等多くのすぐれた効果が期待される。従来の方法と比較して、期待される効果を列記するとつぎのようになる。

- (1) プロセス時間の短縮
- (2) 工程ステップ数の減少
- (3) マスク用 SiO_2 膜の不要
- (4) (1), (2), (3)による歩どまりの向上
- (5) 热りん酸による作業の危険性、およびりん酸の廃液処理が避けられる。

(3)の効果は SiO_2 膜を C.V.D. 法で作成するときに観測される粉末状の“異物”的基板表面への付着や、 Si_3N_4 膜に発生するクラックによる素子の電気的特性の劣化を防ぐことに寄与している。

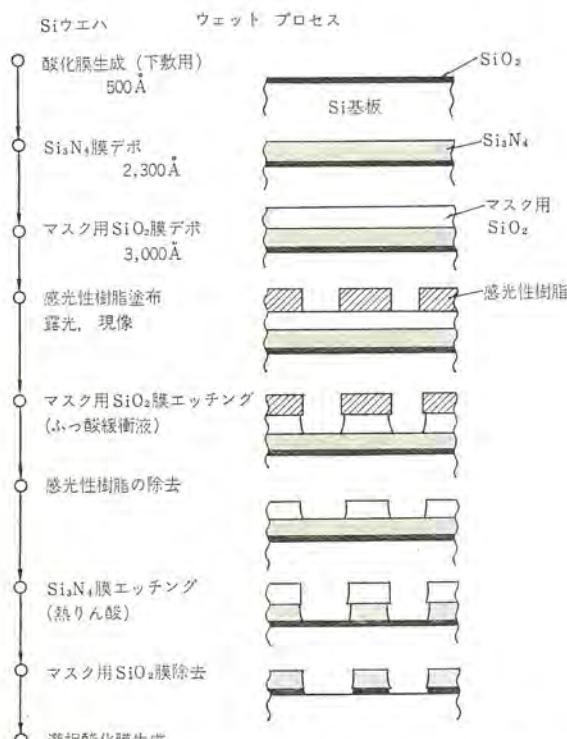


図 3.6 热りん酸による Si_3N_4 膜のエッティング工程
Sequential steps of etching Si_3N_4 layer by hot phosphoric acid.

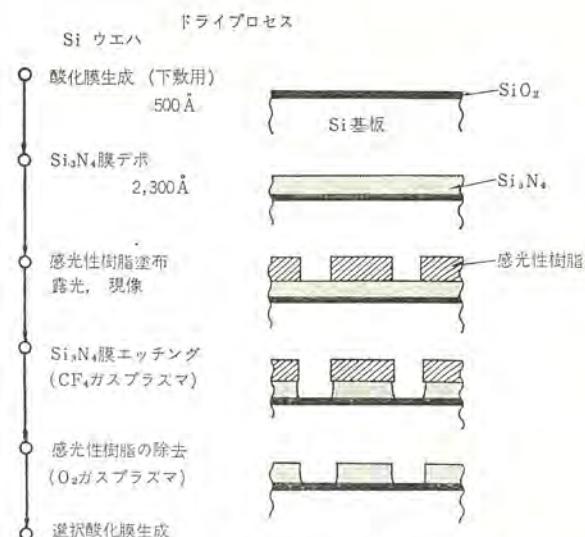


図 3.7 CF_4 ガスプラズマによる Si_3N_4 のエッティング工程
Sequential steps of etching Si_3N_4 layer by CF_4 gas plasma.

このようなプラズマエッティングプロセスを用いて作成した MOS IC の歩どまりは、従来の化学薬品を用いたプロセスにくらべて約 30% の向上が見られた。プラズマエッティング中で受けたと思われる bombardment 等のダメージの影響は、エッティング後の熱酸化を含めた数回の高温熱処理（約 1,000°C 前後）により完全に回復するため、素子の特性および BT 处理等による信頼性の評価において劣化は見られなかった。さらに各種の特性は従来の方法にくらべてばらつきのより狭い分布が得られた。

4. 検 討

シリコンおよびシリコン化合物のエッティング量は、プラズマ発生条件や、被エッティング物質の膜質によって変わるが、ほぼ多結晶シリコン>単結晶シリコン> Si_3N_4 > SiO_2 の順にエッティングされやすい。 SiO_2 膜のエッティング量を 1 とすると、 Si_3N_4 膜のエッティング量は 4~6 倍、単結晶シリコンおよび多結晶シリコンのエッティング量は 10~30 倍の関係がある。

さらにエッティング量 $D(t)$ は図 3.1~3.3 から

$$D(t) = A \exp(\alpha - \sqrt{t}) \quad \dots \dots \dots (4.1)$$

なる式に従うことがわかる。 A および α は被エッティング物質とエッティング条件に依存する定数である。

エッティング速度 dD/dt は

$$\frac{dD}{dt} = \frac{\alpha \cdot A \exp(\alpha \sqrt{t})}{2\sqrt{t}} \quad \dots \dots \dots (4.2)$$

となり時間 t の関数として表わされる。また特長的なことは特定の時間においてエッティング曲線が折れ曲ることである。図 4.1 に示したプラズマ発生中の反応管内の温度変化をみると

$$T = B \exp(\beta \sqrt{t}) \quad \dots \dots \dots (4.3)$$

の傾向をもつことがわかり、その変化は時間 t に対して指數関数的に変化している。そのためエッティング特性が時間 t に対して指數関数的に変化するのは、温度上昇による見かけ上のエッティング速度と思われる。なお図 4.1 における 3 本の温度変化曲線は初期温度の違いによるものである。

CF_4 ガスプラズマとシリコン化合物の反応機構はほとんどわかっていないが、反応式 (4.4)~(4.7) に示すとおり、 CF_4 は反応管内で高周波により励起され、一部ふつ素ラジカル (F^*) となり、この F^* がシリコンあるいはシリコン化合物と反応するラジカル化学反応と思われ

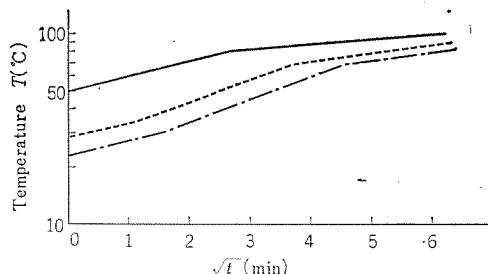
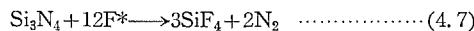
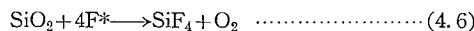
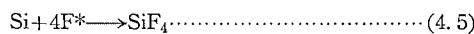


図 4.1 反応管内の温度変化
Temperature change as a function of square root of the time in the reactor.

る。



これはイオンエッチ やスパッタリングに見られる物理的な衝撃によるものとは原理を異にしている。

このようにプラズマエッチングは化学反応であり、そのエッチング速度は反応条件により変化し、温度や反応管内のガスの圧力等はプラズマエッチングにおいて重要なパラメータとなる。さらに、図3.1および図3.2で示したように同じ被エッチング物質でも生成条件によりそのエッチング速度に差があり、実際の使用には注意深い条件の設定が必要である。

5. む す び

ガスプラズマによるシリコンおよびシリコン化合物のエッチング特性およ

びその利用法について報告したが、ガスプラズマエッチングの詳細な原理については解明するに至らなかった。しかしそのエッチング特性における $Si > Si_3N_4 > SiO_2$ のエッチング量の差等をうまく利用したIC製造への応用は、従来の化学薬品の場合の欠点を改善するのにすぐれた方法であることがわかった。今後、シリコンゲートプロセス⁽⁴⁾の多結晶シリコンのエッチング、パッシベーション用 Si_3N_4 膜のエッチング等その用途は広く、素子に対する影響等を考慮のうえ、ますます適用プロセスは増大するものと思われる。また、シリコン化合物以外の、たとえばCr, W, Mo, Al等のエッチングもエッチングガスや装置等の改良で実現可能となるであろう。

本実験に際し、多大のご教示およびご協力をいただいた北伊丹製作所ウエハ製造部のかたがたに感謝します。(昭和48-4-26受付)

参 考 文 献

- (1) Richard L. Bersin : Solid State Technology, June, 39 (1970)
- (2) Stephen M. Irving : Solid State Technology, June, 47 (1971)
- (3) J. A. Appels et al. : Philips Res. Report, 25, 118・132 (1970)
- (4) F. Morandi : IEEE International Electron Devices Meeting Session 18, October (1969)
- (5) J. C. Sarace et al. : Solid State Electronics, 11, 653 (1968)

MOS 構造へのイオン注入

河津 哲*・野村 幸司*・渡壁 弥一郎*
堀江 和夫**・赤坂 洋一***

Ion Implantation to MOS Structure

Kitaitami Works Satoru Kawazu・Koushi Nomura・Yaichiro Watakabe
Central Research Laboratory Kazuo Horie・Youichi Akasaka

The characteristics of MOS diodes made up by using ion implantation has been measured by a pulse scanning method, a new C-V system. The results have been compared with electric characteristics of MOS transistors. The implantation of $^{12}\text{C}^+$ induces a surface states, which move V_{FB} and also results in a production of generation centers of 100 holes/sec per one ion at room temperature. After a heat treatment at 400°C the value of V_{FB} has come back to the value before implantation. But a heat treatment at 700°~900°C is found necessary for the extinction of the generation centers.

Consideration must be taken on the diffusion effect of implanted ions during a large amount of ion implantation or during the heat treatment at high temperatures. The phenomena give a significant influence on the C-V characteristics, the threshold voltage and the effective mobility.

1. まえがき

半導体製造技術の進歩は非常に速く、常に新しい技術が取り入れられている。加速されたイオンを半導体中に注入する、いわゆるイオン注入法は、この新しい技術の一つとして注目されている。

通常の拡散法と比較しイオン注入法の大きな利点として、
(i) 低濃度不純物導入の制御が容易である
(ii) 低温度処理が可能である

ことがあげられる。この利点を十分に発揮し得るための半導体装置として
(i) 集積回路 (IC) 中での高抵抗⁽¹⁾
(ii) 電界効果形トランジスタ⁽²⁾ (FET)
(iii) 高周波用トランジスタ、ダイオード⁽³⁾⁽⁴⁾

などにイオン注入法が試みられている。われわれはこの中で特に有望と見なされている MOS (Metal Oxide Semiconductor) FETへのイオン注入法の適用について研究を進めている。ここではイオン注入を行なったときの半導体表面での担体の発生状態としきい値電圧を同時に測定し得る、新しい C-V 測定法 (Pulse scanning C-V 法)⁽⁵⁾⁽⁶⁾を用いて測定した結果および、イオン注入法を用いて製作した MOS トランジスタに関して得られた結果について報告する。

2. 表面状態

2.1 C-V 測定

MOS ダイオードの C-V 測定は一般に MOS 構造の表面準位を測定する方法として用いられている。MOS ダイオードにイオン注入を行なうと高速に加速された注入イオンにより、MOS ダイオードの絶縁物および半導体中に欠陥が生じる。この欠陥は一般に正の電荷を有した表面準位となるが、400°C 程度の熱処理で消滅し、通常の C-V 測定法での検出限界以下の濃度となることを確認した。また、 10^{12}cm^{-2} 以下の量のボロンイオン注入では 500°C の熱処理でほとんどのボロンが電気的に活性化し、しきい値電圧を制御し得ることも確認した。

通常の C-V 測定法でイオン注入された MOS 構造の表面特性の

概要を知ることは可能であるが、表面近傍での担体の発生度の測定、高温で熱処理をしたときのしきい値電圧測定、あるいは高濃度イオン注入時のしきい値電圧の測定等は困難である。このような場合でも MOS 構造での表面近傍での担体発生度、しきい値電圧を同時に測定し得る新しい C-V 測定法 (Pulse scanning C-V 法) の検討を行なった。

2.2 Pulse Scanning C-V 法

2.2.1 測定原理

MOS ダイオードにバイアス電圧を急に印加すると、シリコン表面近傍に空乏層を形成する。このときの C-V 特性を図 2.1 を用いて説明する。たとえば N 形シリコン基板を用いたときの C-V 特性は空乏層に正孔が存在しないという条件で求められる特性を示し、曲線(1)に沿って、a 点より c 点に達する。c 点の電圧 V_g を τ_P 時間印加し、急に電圧をゼロにもどすと、C-V 特性は c d b a の曲線に沿って移動する。一方曲線(2) a b d e は反転層に正孔が存在し、この正孔の数の増減が直流バイアス電圧には追従するが容量測定用の高周波電圧には追従しないという条件下で求められる C-V 特性を示している。

したがって、電圧を急にゼロにしたとき c → a に至る曲線が c b a を経ていれば、 V_g の電圧を τ_P 時間印加したときに反転層にたま

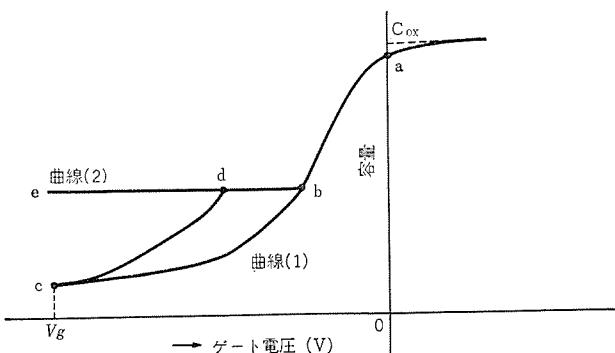


図 2.1 Pulse scanning による C-V 特性概念図
Schematic diagram of the pulse scanning C-V characteristics.

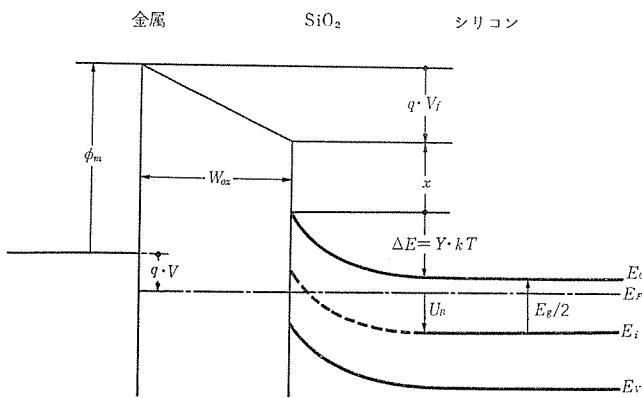


図 2.2 MOS ダイオードのエネルギー バンド構造
Energy band diagram of MOS diode.

る正孔の数はゼロであり、c d b a を経て変化すれば d 点で与えられる熱平衡状態の正孔の数と V_g の電圧を τ_P 時間印加したときに発生する正孔の数が等しいと置ける。ゆえに、d 点の電圧を求めるこ^とにより発生する正孔の数を測定することができる。

以下 C-V 特性の理論式について述べる。MOS ダイオードのエネルギー バンド構造を図 2.2 に示す。

MOS ダイオードの C-V 特性は半導体の表面でのバンドの曲り $\Delta E = Y \cdot kT$ の Y をパラメータとして表わせる。準熱平衡状態のとき、MOS ダイオードの単位面積当たりの容量 C と、ゲート電圧 V は次式で表わされる⁽⁷⁾。

$$C = \frac{dQ}{dV} = \frac{dQ}{dV_f} / \frac{dV}{dV_f} \quad (2.1)$$

$$= \frac{A(dF/dY)C_{ox}}{1 + A(dF/dY)} \quad (2.2)$$

$$V = [(AF + Y)/\beta] + \Delta V \quad (2.3)$$

ここで、

$$A = \left(\frac{W_{ox}}{\varepsilon_{ox}} \right) \cdot q \cdot n_i \cdot \beta \cdot L \quad (2.4)$$

$$L = \left(\frac{2\varepsilon_{ox}}{q \cdot n_i \cdot \beta} \right)^{1/2} \quad (2.5)$$

$$\Delta V = [\phi_m - (x + U_B + E_g/2)]/q \quad (2.6)$$

$$\lambda = n_i/n_b \quad (2.7)$$

$$F = -[\lambda(e^{-Y} - 1) + \lambda^{-1}(e^Y - 1) + (\lambda - \lambda^{-1})Y]^{1/2} \quad (2.8)$$

V_f = ゲート酸化膜に印加される電圧、 W_{ox} = ゲート酸化膜厚、 ε_{ox} = ゲート酸化膜の誘電率、 q = 単位電荷量、 $\beta = q/kT$ 、 k = Boltzmann 定数、 T = 絶対温度、 n_i = 真性半導体の担体濃度、 n_b = 不純物濃度、 ϕ_m = ゲート電極の仕事関数、 U_B = 伝導帯と Fermi 準位の差、 E_g = 半導体の禁止帯幅、 x = 半導体の電子親和力。 C_{ox} = ゲート酸化膜の単位面積当たりの容量、 E_v = 伝導帯の下限、 E_F = フェルミ 準位、 E_i = 禁止帯の中心、 E_r = 値電子帯の上限である。

ここで曲線(1)および曲線(2)の条件を考慮して、それぞれの曲線の理論式を導く。すなわち、曲線(1)の状態はシリコン表面に正孔が存在しないのであるから、 C に対しても V に対しても正孔に起因する式(2.8)の $\lambda(e^{-Y} - 1)$ 項を無視することができ、曲線(1)に対応する容量 C_1 、電圧 V_1 および F_1 は次式で与えられる。

$$C_1 = \frac{A(dF_1/dY)C_{ox}}{1 + A(dF_1/dY)} \quad (2.9)$$

$$V_1 = [(AF_1 + Y)/\beta] + \Delta V \quad (2.10)$$

$$F_1 = -[\lambda^{-1}(e^Y - 1) + (\lambda - \lambda^{-1})Y]^{1/2} \quad (2.11)$$

曲線(2)においては、半導体表面に誘起した正孔の数の増減は容量測定用高周波電圧に応答しないとの条件から、式(2.8)の $\lambda(e^{-Y} - 1)$ の項は Y の急速な変化に対しては一定値であると見なせる。したがって、

$$dF/dY = \frac{\lambda^{-1}(1 - e^Y) - \lambda}{2F} \quad (2.12)$$

で与えられる。ゆえに、曲線(2)に対する容量 C_2 および電圧 V_2 は

$$C_2 = \frac{A[\lambda^{-1}(1 - e^Y) - \lambda]C_{ox}/2F}{1 + A[\lambda^{-1}(1 - e^Y) - \lambda]/2F} \quad (2.13)$$

$$V_2 = [(AF + Y)/\beta] + \Delta V \quad (2.14)$$

で表わされる。

一方、d 点の電圧を測定することにより、式(2.14)から規格化されたバンドの曲り Y が求められ、この Y をパラメータとして、d 点における単位面積当たりの正孔濃度 P は準熱平衡状態の値として、次式で与えられる⁽⁸⁾。

$$P = n_i \cdot \lambda \cdot L \int_0^Y \frac{1 - e^y}{F} dy \quad (2.15)$$

これにより半導体表面近傍で発生する電子-正孔対の発生度 S は

$$S = P/\tau_P \quad (2.16)$$

より求められる。さらにゲートに加えるパルス電圧値 V_g を変化させて空乏層の幅 W を制御できる。 V_g を変化させることにより W を変化させて S を測定し、 S の深さ方向の分布を求めることができる。このときの W は次式で与えられる。

$$W = \left(\frac{2\varepsilon_{Si} Y}{n_b \beta} \right)^{1/2} \quad (2.17)$$

ここで ε_{Si} : 半導体の誘電率

正孔濃度を考慮に入れる V_g は

$$V_g = [(AF_1 + Y)/\beta] + \frac{q}{C_{ox}} \cdot P \quad (2.18)$$

で与えられる。

さらに、この方法を用いると、MOS トランジスタのしきい値電圧を容易に測定することができる。すなわち、C-V 曲線(1)は、正孔が存在しないときの C-V 特性を示し、曲線(2)は正孔が存在するときの C-V 特性を示しているから、正孔の存在による影響の現われる点 b を MOS トランジスタのしきい値電圧と見なせる⁽⁹⁾。したがってこの方法を用いることにより MOS ダイオードの測定から MOS トランジスタのしきい値電圧を精度良く測定できる。

2.2.2 測定法

通常の C-V 測定法より高速でバイアス電圧を変化させる必要があるので、X-Y レコーダの代わりにシンクロスコープにより測定を行なった。

その測定回路を図 2.3 に示す。この回路において、MOS ダイオードの容量 C が

$$C \ll C_C \quad (2.19)$$

$$C \cdot R \cdot \omega \ll 1 \quad (2.20)$$

なる条件を満たすとき、 C は高周波発振器の出力 ($V_0 \sin \omega t$) と直列抵抗 (R) の関数として、

$$C = V_{out}(Y)/j\omega R V_0 \sin \omega t \quad (2.21)$$

で与えられる。

この $V_{out}(Y)$ は通常 1 mV 以下であるから增幅後シンクロスコープの Y 軸に、ゲート電圧 $V_{out}(X)$ を X 軸に加えることにより C-V 特性を測定することができる。

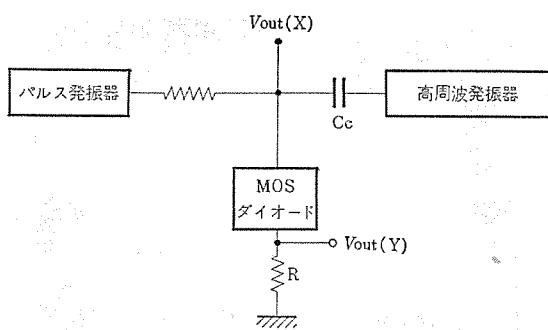


図 2.3 Pulse scanning C-V 測定装置概念図
Circuit diagram of the pulse scanning C-V measurement system.

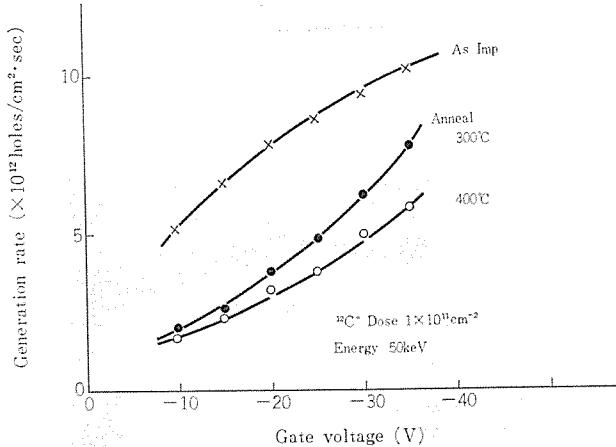


図 2.4 担体発生度のゲート電圧依存性
Carrier generation rate-gate bias characteristics of $^{12}\text{C}^+$ implanted MOS diode.

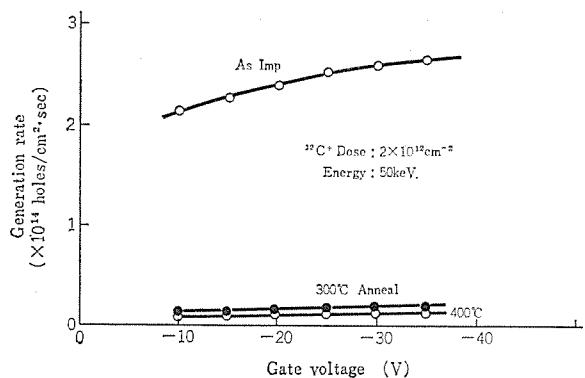


図 2.5 担体発生度のゲート電圧依存性
Carrier generation rate-gate bias characteristics of $^{12}\text{C}^+$ implanted MOS diode.

2.2.3 実験

(1) 概説

シリコン基板を用いた MOS ダイオードに III 族または V 族の元素のイオン注入を行なうと、イオン注入により発生する表面準位による C-V 曲線の移動と注入イオンの活性化による C-V 曲線の移動の効果を分離することは困難である。そこで、シリコン基板に電気的に中性な炭素をイオン注入し、注入により発生する表面準位の測定と熱処理による表面準位の消滅過程の測定を行なった。さらに III 族の元素であるボロンを用いた場合の担体の発生度の変化も併せて測定した。

(2) 炭素注入

実験に用いたシリコン基板は N 形、比抵抗 $3 \Omega \text{cm}$ のもので、1,000 \AA のゲート酸化膜形成後に $^{12}\text{C}^+$ を注入し、熱処理後アルミニウム電極を蒸着し、MOS ダイオードを作成した。

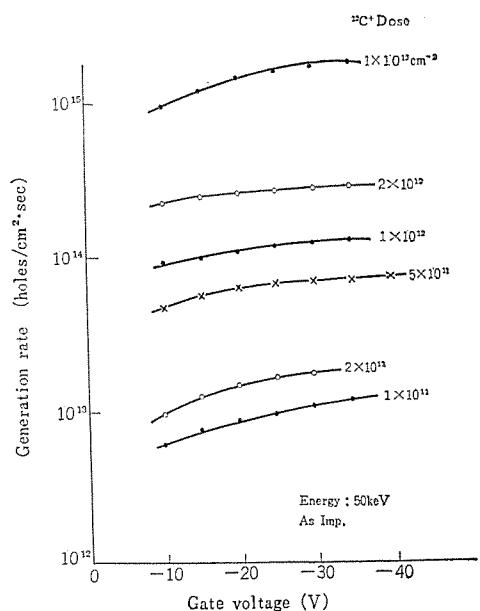


図 2.6 担体発生度のゲート電圧依存性
Carrier generation rate-gate bias characteristics of $^{12}\text{C}^+$ implanted MOS diode.

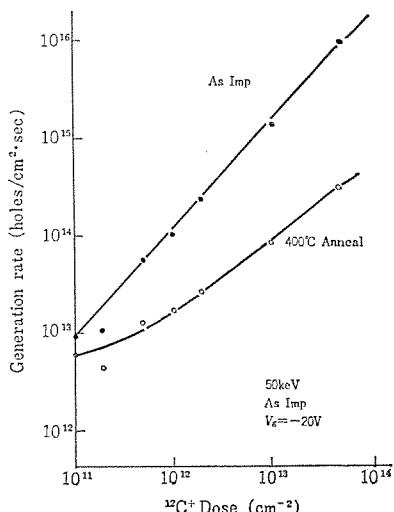


図 2.7 $^{12}\text{C}^+$ 注入による担体発生度特性
Carrier generation rate- $^{12}\text{C}^+$ dose characteristics of MOS diode.

MOS ダイオードに $^{12}\text{C}^+$ を注入したときに発生する表面準位は 200°C 程度の熱処理で消滅はじめ、 400°C の熱処理を行なうと、C-V 特性は注入前との差が認められなくなつた。しかるに、Pulse Scanning C-V 法を用いて、正孔の発生度を測定した結果、表面準位によるものとは異なる変化が観測された。

注入が $1 \times 10^{11} \text{cm}^{-2}$ と非常に少ないと、図 2.4 に示すごとく、ゲート電圧の増加とともに正孔の発生度の増加が著しく、注入量が多くなるに従って、図 2.5, 2.6 に示すごとく、ゲート電圧依存性が少なくなる。これは、シリコン内部での正孔の発生に加えて、シリコン表面近傍にイオン注入により格子欠陥が発生し、この格子欠陥によるジネレーションセンタが形成されたと考えることにより説明できる。

イオン注入により形成された格子欠陥は表面準位の数を増加させるだけでなく、正孔の発生度をも増加させることができた。 $^{12}\text{C}^+$ の注入による正孔発生度の増加は図 2.7 より 1 イオン当たり室温で 100 holes/s を得る。

熱処理による正孔発生度の減少率は図 2.4, 2.5 および図 2.7

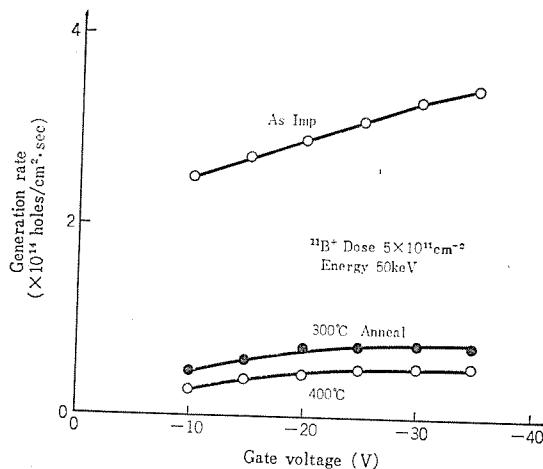


図 2.8 $^{11}\text{B}^+$ 注入による正孔発生度特性
Carrier generation rate-gate bias characteristics of $^{11}\text{B}^+$ implanted MOS diode.

に示すとく、注入量が大なるほど大きい。しかるに、イオン注入を行なわない MOS ダイオードの正孔発生度は $5 \times 10^{11} \text{ holes/cm}^2 \cdot \text{s}$ 程度の場合が多い。したがって、 400°C 30 分の熱処理では大量注入の場合もとより、 $1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ と微量注入の場合でも発生度が回復していないことがわかる。

正孔発生度が $1 \times 10^{12} \text{ holes/cm}^2 \cdot \text{s}$ 以下に回復するに必要な熱処理温度は、注入量により異なり、さらに試料ごとの差も大きいが、 $700 \sim 900^\circ\text{C}$ の範囲であった。この温度は、イオン注入により作成された PN 接合の漏れ電流を小さくするのに必要な処理温度とほぼ一致した。このことは、たんに表面準位の消滅を目安とする従来の C-V 測定法では表面状態の回復を判定するには不十分であることを示している。

(3) ポロン注入

N 形シリコン基板を用いて形成された MOS ダイオードに $^{11}\text{B}^+$ の注入を行なうと、その表面は注入量により N 形から P 形に変化する。表面が P 形化された MOS ダイオードを Pulse Scanning C-V 法で測定すると、ゲート電極でおおわれていない領域からの正孔注入現象が見られ、注入された正孔と発生した正孔を分離することは困難である。そこで、シリコン表面がまだ N 形であるような微量注入領域で測定した。この結果を図 2.8 に示す。

この場合の正孔発生度は $^{12}\text{C}^+$ の注入の場合と比較して、約 5 倍になっているが、 400°C の熱処理でも回復していない点は同じであった。したがって、多量注入の場合も $^{12}\text{C}^+$ の場合と同様により高温の熱処理が必要なことを示唆している。

シリコン基板に多量の $^{11}\text{B}^+$ を注入した場合または注入後高温で熱処理した場合には注入されたポロンの拡がりが問題になり、通常用いられているしきい値電圧の変化 ΔV_{th} と単位面積当たりのイオン注入量 N との関係

$$\Delta V_{th} = qN/C_{ox} \dots \dots \dots (2.22)$$

が成立しなくなる。このような場合の MOS ダイオードの C-V 測定を行なった。

図 2.9 はイオン注入を行なわない MOS ダイオードの C-V 特性を Pulse Scanning 法で測定した結果を示す。図 2.10 は同様の MOS ダイオードに $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ $^{11}\text{B}^+$ を注入し、 $1,100^\circ\text{C}$ 5 分間の熱処理を行なったものの特性を示す。図 2.10 では特性が電圧軸方向に移動するとともに曲線のこう配も変化している。式(2.22)が成立する注

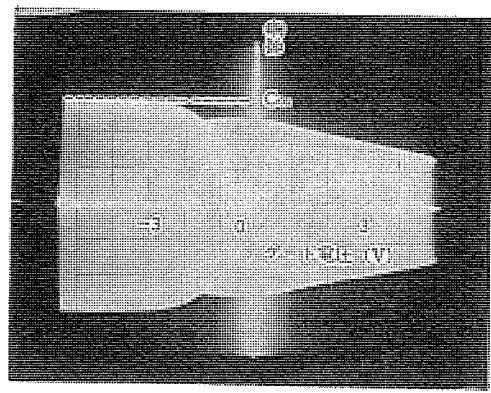
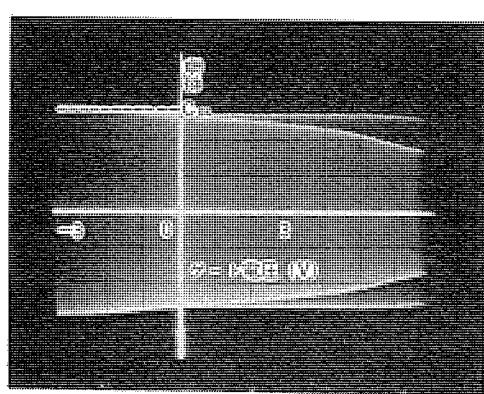


図 2.9 P 形基板を用いた MOS ダイオードの C-V 特性
Pulse scanning C-V characteristics of the non implanted MOS diode (P-type substrate).



注入条件: 50keV $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 熱処理条件: $1,100^\circ\text{C}$, 5 min
縦軸: 任意目盛 横軸: 1 V/div

図 2.10 ポロン注入 MOS ダイオードの C-V 特性
Pulse scanning C-V characteristics of $^{11}\text{B}^+$ implanted MOS diode.

入量範囲では C-V 曲線は電圧軸方向に平行移動するのみであり、図 2.10 で曲線の形の変化したことは注入されたポロンが MOS トランジスタ動作時の空乏層の幅より深く拡散していることを示している。注入イオンが深い部分にまで分布していることは、同時に作成した MOS トランジスタの基板—ソース間に電圧を印加したときのしきい値電圧の変化からも確認した。このように Pulse Scanning C-V 法により、注入不純物が MOS トランジスタ動作時の空乏層より深い部分にまで分布している試料でも MOS ダイオードでしきい値電圧を容易に精度良く測定できる。さらに不純物の広がりをある程度推定することも可能である。図 2.10 で C が C_{ox} の $1/2$ 近傍では C の変化率が大きくなっている。この現象は $C > C_{ox}/2$ の領域では注入ポロン濃度で C が定まり、 $C < C_{ox}/2$ の領域には注入ポロンが存在していないことによると考えられる。よって、注入ポロン濃度の広がりの範囲は $C = C_{ox}/2$ を与える空乏層の幅を W_{S_i} として

$$W_{S_i} = \frac{\varepsilon_{S_i}}{\varepsilon_{ox}} \cdot W_{ox} \dots \dots \dots (2.23)$$

で与えられ、この場合 $W_{S_i} \approx 3,000 \text{ \AA}$ を得る。この値は $1,000 \text{ \AA}$ の SiO_2 を通して 50 keV のエネルギーで注入されたポロンの分布幅の理論値より相当に大きいことを示している。

3. MOS トランジスタ

3.1 しきい値電圧

MOSトランジスタのしきい値電圧を与える規格化されたバンドの曲りは $Y = 2 \log \lambda$ で与えられ、均一な不純物濃度を有する基板を用いたとき、実験と良く一致する⁽⁹⁾。イオン注入によりしきい値電圧を制御する場合、微量注入範囲では注入による基板の不純物濃度の変化を考慮する必要がなく、表面準位と同様に取り扱え、注入量で決まる式(2.22)と良い一致を得る。しかし、高温度での熱処理あるいは多量のイオン注入時には注入イオンの広がりを考慮する必要がある。このとき、しきい値電圧の変化は表面準位と同様な取り扱いはできず、注入イオンの濃度分布の影響を強く受け、注入量に対するしきい値電圧の変化は小さくなる。1,100°Cで熱処理を行なった場合の結果を図3.1に示す。

N形シリコン基板を用いて作成したMOSトランジスタに $2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 程度の $^{11}\text{B}^+$ を注入したときに、ゲートに正の大きな電圧を印加しても電流をしゃ断させることができず、接合形FETに似た電流が流れれる。この電流はソース・基板間に逆方向電圧を印加することによりしゃ断し得た。このように多量注入時、または高温熱処理時には、MOSトランジスタ動作時の空乏層幅より深い部分にまで注入イオンが分布していることがわかった。すなわち、しきい値電圧および基板ソース間電圧によるしきい値電圧の変化は注入イオン分布の影響を常に考える必要がある。

3.2 実効移動度

MOSトランジスタの実効移動度は表面散乱、不純物散乱、および格子散乱の影響を受ける。シリコン基板の不純物濃度が $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 以

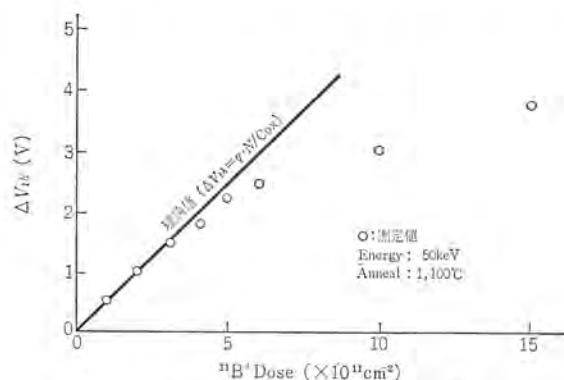


図3.1 $^{11}\text{B}^+$ 注入によるしきい値電圧の変化
Threshold voltage shift- $^{11}\text{B}^+$ dose characteristics.

上のときには不純物散乱による影響が大きい。

式(2.22)が成立する範囲ではイオン注入による移動度の変化は少ない。しかし、多量のイオン注入時または高温処理で注入イオンの広がりが問題になるときにはシリコン表面での不純物散乱の影響を受け、実効移動度は未注入試料の1/2以下になる場合もある。このように実効移動度は、イオン注入条件および熱処理条件により著しく影響を受ける。したがって、実効移動度の減少を最小にするしきい値電圧制御技術を開発する必要がある。

4. むすび

イオン注入法を用いて作成したMOSダイオードをPulse Scanning C-V法で測定し、さらにMOSトランジスタの電気特性を測定した結果、次の結論が得られた。

(1) $^{12}\text{C}^+$ 注入により室温で1イオン当たり100 holes/sの正孔発生度を有するジェネレーションセンタが発生し、 $^{11}\text{B}^+$ 注入によるその値は約500 holes/sであった。

(2) しきい値制御に使用される範囲のイオン注入を行なったとき、発生するC-V特性に影響を与える表面準位は400°C程度の熱処理で消滅する。しかし、表面近傍に発生するジェネレーションセンタの消滅にはさらに高温度の熱処理が必要である。

(3) 多量のイオン注入を行なったときまたは高温度の熱処理を行なった時には注入イオンの拡散効果により、MOSトランジスタ動作時の空乏層より深い部分にまで注入イオンが分布する。このイオン分布は、しきい値電圧、実効移動度、およびC-V特性などに影響を与える、高不純物濃度基板を用いた場合と同様な結果となる。

(昭和48-5-12受付)

参考文献

- (1) J. D. Macdougal, et al. : Proc. IEEE, 57, 1,538 (1969)
- (2) K. G. Aubuchon : International Conference on Properties and of MIS Structure, Grenoble, France, June 17-20 (1969)
- (3) G. F. Fax ball, et al. : IEDM, 20, 3 (1969)
- (4) T. E. Seidel, et al. : Proc. IEEE, 58, 1,135 (1970)
- (5) 河津ほか : 第19回応用物理学会関係大会, 31a-H-1(昭47)
- (6) 河津ほか : 第33回応用物理学会, 29a-K-1(昭47)
- (7) C. G. B. Garrett, et al. : Phys. Rev. 99, 376 (1955)
- (8) H. C. Pao, et al. : Solid State Electron, 9, 927 (1966)
- (9) 河津ほか : 三菱電機技報, 44, 679 (昭45)

すず拡散による高周波トランジスタの特性向上

中村 源四郎*・行本 善則*・亘 善彦*
堀江 和夫**・赤坂 洋一***

Improvement in High Frequency Characteristics of Transistors by the Diffusion of Tin Atoms

Kitaitami Works Genshiro Nakamura・Yoshinori Yukimoto・Yoshihiko Watari
Central Research Laboratory Kazuo Horie・Youichi Akasaka

Investigation has been made on additionally diffused tin atoms affecting on the emitter dip effect in an NPN transistor. Tin atoms were successfully diffused into silicon crystals from a doped oxide source. The emitter dip reduces with the increase of the concentration of tin atoms in the emitter region. This concentration required for the complete elimination of the emitter dip effect is slightly above the one for the compensation of the strain caused by the emitter-and base-impurities. The profile of tin atoms is significantly altered after the diffusion of phosphorus. This suggest that the excess vacancies generated by these diffusions are consumed to enhance the diffusion of tin but not of the base impurity.

High frequency characteristics are greatly improved in the transistors fabricated with the diffusion of tin atoms.

1. まえがき

半導体材料であるシリコンの電気的性質は、含まれる不純物の種類、含有量に依存して異なるとともに、半導体素子が構造敏感であるために、素子製造プロセス中に導入される種々の欠陥によっても影響を受ける。現在シリコン中への不純物導入には拡散法が多く用いられており、この拡散工程の半導体素子製造工程にしめる役割は大きく、技術的開発、改良が積極的に進められている。

一般に、拡散により得られた不純物分布が、拡散の推進力は濃度こう(勾)配であるとして求められた理想的な拡散方程式(Fickの第一、第二法則)からずれる現象は、異常拡散現象と呼ばれており、その原因および除去方法の研究が積極的に進められている。この異常拡散現象の一つとして、トランジスタの2重拡散構造において、エミッタ下部のベース不純物の拡散速度が、エミッタのない領域よりも局部的に速くなる現象があることは、よく知られている。一般にこの現象は、エミッタ押出し現象と呼ばれている。高周波トランジスタでこのエミッタ押出し現象が発生すると、ベース幅の縮少が困難になって周波数特性の向上がむずかしくなる。さらに、エミッタ、コレクタ間に局部的な電流集中が起こりやすく、耐圧の低下、リーキ電流の増大などの原因になることが知られている。現在ベース層をボロン不純物、エミッタ層をりん不純物という組み合わせによってnpnトランジスタを作成する方法が広く用いられているが、この方法では、エミッタ押出し現象を消滅させることはできない。

今回我々は、シリコン中では電気的に不活性な4族原子のすずを利用することによって、エミッタ押出し現象を制御する方法を開発した。すずによってエミッタ押出し現象を制御する方法は、置換形不純物の拡散を律速する空孔を優先的にすず原子に吸収させることができ、すずが空孔の優先的な吸収源として作用する現象はこれまで知られていなかった。またこの方法を用いることによって、高周波トランジスタの理想的な構造とされている、エミッタ吸い出し現象を起こした構造のトランジスタが製作可能となった⁽¹⁾⁽²⁾。

2. 2重拡散構造における異常拡散現象

図2.1はエミッタ押出し現象およびエミッタ吸い出し現象を生じたトランジスタの断面構造模型図を示す。図2.1(a)は、Fickの法則にしたがって不純物が拡散したときのトランジスタの断面構造で、図2.1(b), 2.1(c)は、それぞれ、エミッタ押出し現象、エミッタ吸い出し現象が生じたときの断面構造模型図である。エミッタ押出し幅 Δx_j は、図2.1(b)のごとくエミッタ下部のベース、コレクタ接合の接合深さ $x_{jB'}$ と、エミッタのない領域でのベース、コレクタ接合深さ x_{jB} との差で

$$\Delta x_j = x_{jB'} - x_{jB}$$

である。したがってエミッタ吸い出し現象の起きているところでは、エミッタ押出し幅は負になる。

高周波トランジスタの性能を表わす指標として、しばしば性能指標という言葉が使われている。この指標 F は、次式で表わされる。

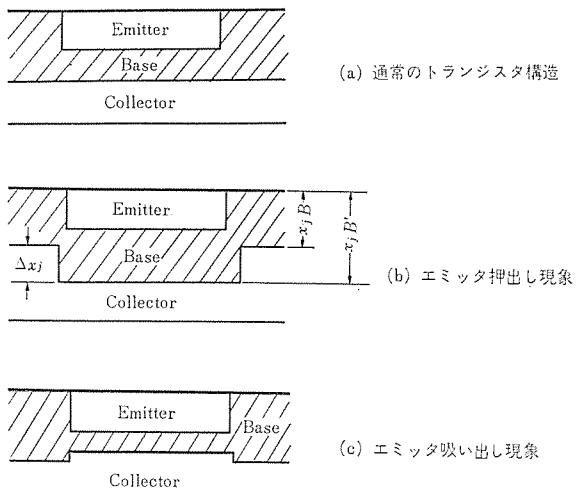


図2.1 2重拡散構造での異常拡散現象
Anomalous diffusion phenomenon in sequential diffusions of base and emitter impurities.

$$F = \frac{\alpha_0 \cdot f_T}{8\pi r_{bb} \cdot C_c} \quad (2.1)$$

ただし、 α_0 はベース接地電流増幅率 α の直流値、 f_T はしゃ断周波数、 r_{bb} はベース広がり抵抗、 C_c はベースコレクタ接合容量である。

したがって性能指数を向上させるには、 f_T を大きくすること、 $r_{bb} \cdot C_c$ を小さくすることが有効である。 f_T を大きくするにはできるだけ素子の寸法を小さくするとともに、できるだけ薄い拡散接合を作成して、ベース幅の縮少を行なう必要がある。この f_T の増大に限れば、高周波トランジスタの理想的な構造としては、図2.1(c)にしめしたエミッタ吸い出し現象を生じた断面構造が考えられる。

はじめてエミッタ押出し現象が報告されて以来、12~13年の間に考えられるほとんどすべての不純物原子の組み合わせに対して、2重拡散を行なったときに発生するエミッタ押出し現象が検討されている^{(3)~(8)}。1968年ごろまでは、エミッタ押出し現象、あるいはエミッタ吸い出し現象の現象解析についての研究が中心で、特にボロン、りんを組み合わせたときに発生するエミッタ押出し現象は、Gereth⁽⁴⁾らにより詳細に報告された。1969年ごろから、高周波トランジスタの需要の増大にともない、浅い2重拡散構造を作成する必要から、エミッタ押出し現象をなくする拡散方法の開発が進められてきた^{(9)~(11)}。近年、高周波トランジスタ製作において、エミッタ層を、ひ素拡散で作成したり⁽⁹⁾、あるいはベース層をボロンスラン注入法により作成したりして、エミッタ押出し現象を低減する方法が行なわれている。

シリコン中のボロン、りん、ひ素の拡散が、空孔を媒介とした拡散であるので、局部的にベース不純物の拡散が速くなることは、エミッタ拡散によって空孔濃度が熱平衡での空孔濃度よりも多くなったことをしめしている。したがって、エミッタ押出し現象の発生を説明するモデルとしては、大部分がこの過剰空孔の生成機構に関してであり、次のようなものが提唱されている。

(1) 不純物原子とシリコン原子との共有結合半径の差によって生じる応力を緩和するために発生した転位の上昇運動によって、過剰空孔が発生する⁽⁴⁾⁽¹²⁾⁽¹³⁾。

(2) 空孔がアクセプタとして作用するところから、エミッタ層のドナー濃度の高い領域で空孔濃度が増大する⁽¹⁴⁾。

(3) 高温時の n^+ シリコン領域において、複合空孔(divacancy)とかE-centerが生成して拡散に寄与する⁽¹⁵⁾。

上記の過剰空孔の発生モデルのうち、(1)に述べた転位の発生による効果が、エミッタ押出し効果の支配的な要因と考えられている。りん原子の単独拡散において観察される異常増速拡散とか、りんエミッタ拡散において観察されるエミッタ押出し現象の説明に、このモデルが用いられ、理論計算と実測値のよい一致が報告されている⁽¹³⁾。またこのモデルは、ひ素を用いた拡散で、エミッタ押出しを低減する現象の説明にも用いられている。

一方、エミッタ吸い出し現象のモデルとしては、イオン化したボロン原子とりん原子の電界によって、ベース、コレクタ接合近傍のベース不純物の拡散が減速されたため、とするモデルがある。この効果は通常内部電界効果と呼ばれている⁽⁸⁾⁽¹⁶⁾。

実際のトランジスタ構造に発生する異常拡散現象には、上記の各モデルによる効果が複雑に作用しあっていると考えられ、異常拡散現象の解明を困難にしている。

3. すずドープによるエミッタ押出し現象の制御

従来シリコンへのすず原子の応用としては、すずがシリコンよりも

共有結合半径が大きいことから、シリコンよりも共有結合半径の小さいボロン、りん原子によって発生する応力を緩和して、転位の発生を抑制する方法として用いられている。 $(r_{Si} \approx 1.17 \text{ \AA}, r_{Sn} \approx 1.40 \text{ \AA}, r_B \approx 0.88 \text{ \AA}, r_P \approx 1.10 \text{ \AA})^{(17)~(18)}$ Yeh⁽¹⁷⁾らは、ボロンとすず、およびりんとすずの真空封止拡散法を用いた同時拡散法における、すずの拡散係数、不純物分布、あるいはすずのおよぼすボロン、りんの不純物拡散への影響について報告している。また、この同時拡散法を利用したときに転位の発生が抑制されることも電子顕微鏡観察によって確認されている⁽¹⁸⁾。

我々は、すずを拡散した試料内にボロン、りんの2重拡散を行なったとき、エミッタ押出し現象が低減することを見出した。この現象は、すずの導入によりひずみ緩和を行なうという従来の機構と異なり、転位発生を生じさせない拡散方法においても生じるエミッタ押出しを減少させ、さらにエミッタ吸い出し現象をも生じさせることができる点に特長がある。また従来は、すずの拡散は真空封止拡散であり、作業性に問題があったが、我々はすずのトープドオキサイドを用いた拡散方法を確立して、実験を行なった。

3.1 実験

すず拡散およびトランジスタ作成には、アンチモンを高濃度ドープしたn形(111)面シリコン単結晶に、比抵抗0.7~1.2 $\Omega \cdot \text{cm}$ のn形シリコンを約7 μm 成長させたウエハを用いた。またこの基板の転位密度は500/ cm^2 以下である。

すずのドープドオキサイド膜作成は、シリコン(SiH₄)と酸素、および窒素を反応管中で熱分解する方法を用いた。すずの不純物源は4塩化すず(SnCl₄)を用い、窒素をこの4塩化すず中でバブルさせた後、反応管中に導入した。酸化膜中のすず濃度の制御は、モル比(SnCl₄/SiH₄+SnCl₄)を変えて行なった。シリコン結晶中のすずの導入は、すず拡散法とともに、すずをドープしたシリコン結晶を引上げ法で作成した。引上げ結晶は、りんドープのn形0.7~1.2 $\Omega \cdot \text{cm}$ で、すずのドープ量は、 $2 \sim 8 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ である。

ボロンおよびりんの拡散は、それぞれBBr₃およびPOCl₃を不純物供給源として用いる気相拡散法と、各不純物を含んだシリカフィルムを不純物源として用いる方法で行なった。このシリカフィルム拡散法は、ドープドオキサイド法と同等の効果が得られ、取扱いはより簡単である。

ボロン、りん拡散層の接合深さの測定、およびキャリヤ分布の測定は、グルーピング法と、陽極酸化法によるステップエッチから求めたシート抵抗分布を用いて行なった。

シリコン中のすずは、通常深いドナー準位を持っているといわれているが、浅いアクセプタ準位が多量にある場合を除いて、ほとんど電気的には不活性であることが知られている。シリコン中のすずの定量には、放射化分析法が知られているが、この方法ですずの不純物分布を求めるには、陽極酸化法によるステップエッチを行なう必要があり、簡便な測定は行なえない⁽¹⁷⁾。

我々は、ヘリウムイオン(He⁺)の後方散乱法を用いて、すずの定量を行なった。すなわちヘリウムの後方散乱法によって、非破壊的にシリコン中およびシリコン酸化膜中のすず濃度分布の測定や、置換形すずの割合などについての情報を得た⁽²⁰⁾。

すずを応用したトランジスタは、ボロン、りん拡散の前にすず拡散を行ない、その後従来技術にて作成した。これらのトランジスタの高周波特性の測定は、Sパラメータを用いて行なった。

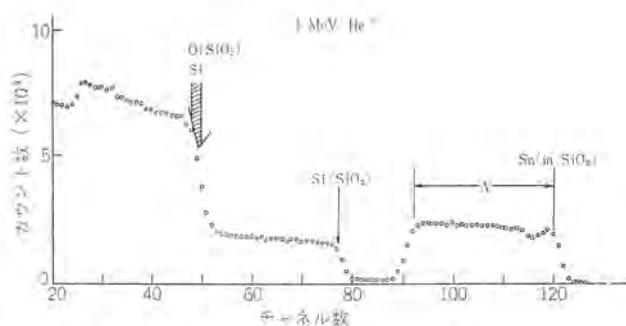


図 3.1 すずドープドオキサイド膜の後方散乱スペクトラム
Backscattering spectrum of tin doped silicon oxide.

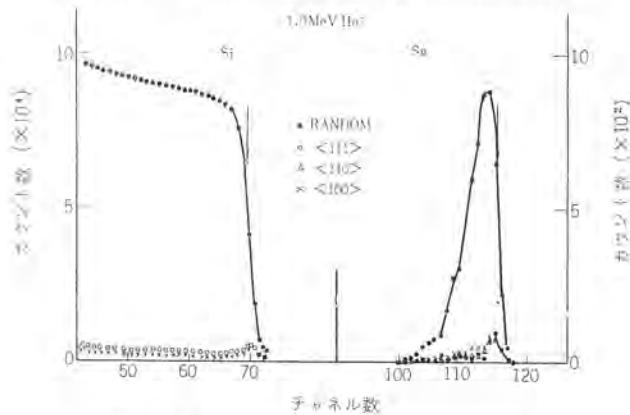


図 3.2 すず拡散層の後方散乱スペクトラム
Backscattering spectrum of tin diffused silicon.

3.2 実験結果および考察

3.2.1 すず拡散

図 3.1 は、すずドープドオキサイド膜の代表的なヘリウム後方散乱スペクトルである。横軸はチャネル数で、散乱されたヘリウムイオンのエネルギーをしめし、縦軸は、そのカウント数である。図 3.1 の A でしめた領域のスペクトルは、酸化膜中のすずの濃度分布に対応する。このスペクトルが平たんであることは、酸化膜中のすずの濃度分布が深さ方向に均一であることをしめしている。

また酸化膜中のすず濃度は、シリコン基板のシリコン濃度に対応したカウント数と比較することによって求められ、約 $1.4 \times 10^{21}/\text{cm}^3$ であった。酸化膜中のすず濃度が $\sim 2 \times 10^{21}/\text{cm}^3$ まで得られることと、その濃度が均一になることは、このようにして得られたすずのドープドオキサイド膜が拡散源として使用できることをしめしている。

図 3.2 は、すず拡散後の代表的な後方散乱スペクトルである。●印は、シリコンのランダム軸方向にヘリウムビームを入射させたときのスペクトルで、チャネル数 100 から 116 の範囲におけるスペクトルは、シリコン中のすずの濃度分布に対応している。このランダムスペクトルは、シリコン中に含まれるすべてのすず濃度に対応したものになるが、特定の結晶軸方向にヘリウムビームを入射させたときのすずのスペクトルは、一般には、その軸方向に含まれる格子間位置のすず濃度に対応したものが得られる。図 3.2 に、<111>、<110>、および<100>軸方向に入射したときのスペクトルを合わせてしめしておく。

図 3.3 に、後方散乱スペクトルから求めた代表的なシリコン中のすずの濃度分布をしめす。●印は、1,200°C、3時間拡散した試料で、○印は、1,100°C、3時間拡散した試料である。各試料のモル比は、約 3×10^{-2} でこの条件では溶解度近傍のすず表面濃度が得られる。図 3.3 において×印は、置換形位置に含まれるすずの濃度分布をしめしたもので、●印と×印との差は、格子間位置に含まれるすず

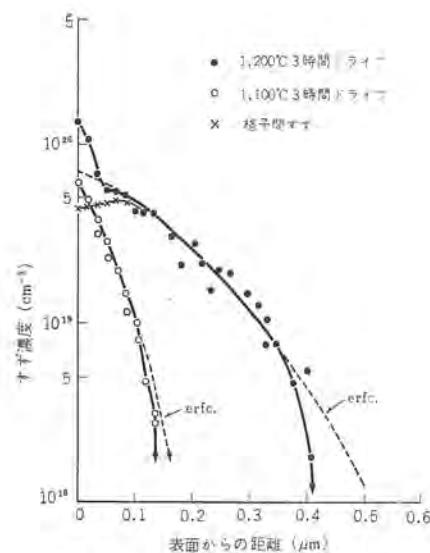


図 3.3 シリコン中のすず分布
Concentration profiles of tin atoms in silicon crystals.

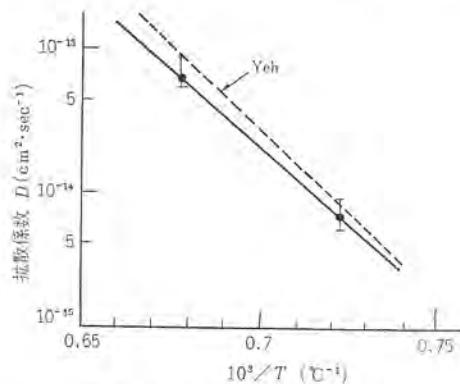


図 3.4 すずの拡散係数
Diffusion coefficients of tin in silicon crystal.

濃度に相当する。1,200°Cで拡散した試料では、表面近傍ですずの蓄積現象が生じやすく、この領域では約40%の格子間位置のすずが含まれることがあるが、結晶内部では90%以上が置換形位置である。結晶引上時にすずをドープした試料でも、90%以上のすずは通常の置換形位置にある。図 3.3 に点線でしめしたように、すずのシリコン結晶内部分布は、次式にしめす補誤差関数分布とよく一致するが、低濃度領域では拡散係数の濃度依存性があらわれてこの分布からずれてくる。

$$C(x) = C_s \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \quad \dots \dots \dots (3.1)$$

ただし、 $C(x)$ は表面から距離 x の所での不純物濃度、 C_s は表面不純物濃度、 D は拡散係数、 t は拡散時間である。

図 3.4 に各温度でのすずの拡散係数の値を、従来報告されている拡散係数と比較してしめす⁽¹⁷⁾。今回我々の測定した拡散係数は、Yeh⁽¹⁷⁾らの報告と比較して若干小さいが、比較的よく一致した。

シリコン中にすずを拡散すると、すずとシリコンの共有結合半径の差によって、結晶中にひずみが導入される。しかしながら、今回エミッタ押出し現象の制御に用いたすずの拡散条件では、すずによる転位の発生は観察されなかった。これは、すずの拡散深さが浅くてすずの総量が少ないためと思われる。 $(\sqrt{Dt} \approx 2.5 \sim 2.6 \times 10^{-3} \text{ cm})$

3.2.2 すずのおよぼすエミッタ押出し現象への影響

ボロンおよびりんの拡散条件、拡散方法あるいは接合深さ等のおよ

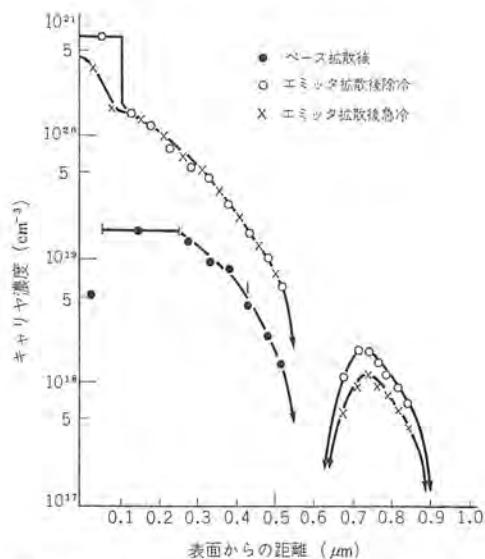


図 3.5 気相拡散法を用いたときのキャリヤ分布
Carrier concentration profiles in the silicon crystal diffused with boron and phosphorus from gaseous impurity sources.

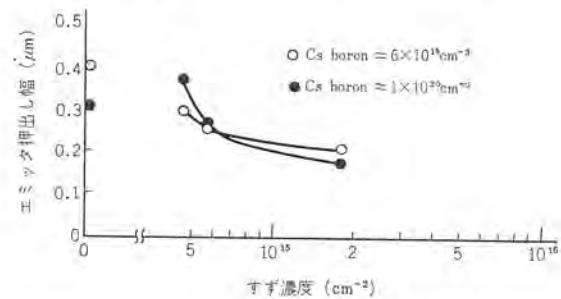


図 3.6 すず濃度によるエミッタ押出し幅の変化
Variations of the emitter dip length as a function of tin contents.

ぼすエミッタ押出し現象への影響は、数多く報告されている。ボロン、りんの2重拡散を気相拡散法で作成したときと、シリカフィルム法で拡散したときのエミッタ押出し幅を比較すると後者のほうがはるかに少なくなる。

エミッタ押出し現象等の異常拡散現象を検討するには、個々の不純物分布を詳細に知る必要がある。図3.5に、ベース、エミッタ共に気相拡散法でnpn構造を作成したときのキャリヤ分布を陽極酸化法で求めた結果を示す。ボロン拡散は、1,000°C、りん拡散は1,100°Cにて行なった。●印はベース拡散後のキャリヤ分布で、○印および×印は、ボロンベース拡散後、りんでエミッタ拡散を行なった後のキャリヤ分布である。エミッタ押出し幅 Δx_j は、●印で示したベース層キャリヤ分布の接合深さと、○印および×印で示したベース層接合深さとの差に相当し、この拡散方法では0.4 μmが観察される。○印と×印は、それぞれりんをエミッタ拡散後、徐冷した試料と急冷した試料について示したもので、表面近傍でのキャリヤ分布およびベース層中のキャリヤ分布に若干の差が観察される。徐冷した試料では、エミッタ下部のベース不純物の拡散長が増大してエミッタ押出し幅が増大していることは、Gereth⁽⁴⁾らの報告と傾向が一致している。

図3.5においても観察されているように、気相拡散法でりんエミッタ拡散を行なうと、試料表面近傍約1,000 Åにおいて不純物濃度こう配の一様な領域が生成しやすくなる。この領域では放射化分析法による観察から、電気的に不活性なりんが、活性なりん濃度以上に多数存在しているのが知られている⁽²¹⁾。この電気的に不活性なりんは、

格子間位置に入り活性化されるさいに転位ループを形成し、お互いに相互作用を起こして三次元分布を持つ転位網を形成したり⁽²²⁾、あるいは複空孔、E-center等の放射が行なわれ、エミッタ押出し現象の一因になりやすいことが、Kendallらによって指摘されている⁽¹⁵⁾。

上記のボロン、りん拡散の前にすずを拡散導入しておいたとき、エミッタ押出し幅は低減する。図3.6に、拡散導入したすず濃度の積分値に対する、エミッタ押出し幅 Δx_j の変化を示す。○印は、ベースの表面濃度 $C_s(\text{boron}) \approx 6 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 、ベース接合深さ $x_{JB} \approx 0.74 \mu\text{m}$ の試料について示したもので、すずを導入しないときのエミッタ押出し幅 Δx_j は、0.4 μmになる。同様に●印はおののおの、 $C_s(\text{boron}) \approx 1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 、 $x_{JB} \approx 0.56 \mu\text{m}$ 、 $\Delta x_j \approx 0.29 \mu\text{m}$ である。両者ともエミッタ表面濃度は、約 $7 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ である。エミッタ押出し幅 Δx_j はすず濃度の増大にしたがって減少し、すず濃度が $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ ($C_s \approx 4 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 、 $\sqrt{Dt} \approx 1.07 \times 10^{-1} \text{ cm}$) 試料では、エミッタ押出し幅は0.2 μm程度に減少する。

さらによぼすボロン、りん分布への影響として、ボロン、りんによる各接合深さも変化するのがわかった。ボロン、りんの不純物分布が補誤差関数分布になっているとして、各接合深さから求めた拡散係数 D' の平均値は次のとおりであった。

ボロンベース拡散 $D'/D \approx 0.887$

りんエミッタ拡散 $D'/D \approx 1.51$

ただし、 D' はすずを導入した試料における拡散係数で、 D はすずなしのときの値である。すずがボロン拡散によぼす影響は微少であるが、りん拡散ではその拡散係数が増大しているのは明らかである。

シリコン中のすずは、ボロン、りんの不純物分布に影響してエミッタ押出し現象を低減させるだけではなく、上記の試料表面近傍ではすずの異常増速拡散が観察される。このすずの異常増速拡散は、りん、エミッタ拡散によるもので、ボロンベース拡散後では何らすず濃度分布の変化は観察されない。図3.7にすずを1,200°C(○印)および1,100°C(●印)拡散した試料で、ボロン、りん拡散後のすずの濃度分布を示す。表面近傍の不純物分布は、ボロン、りん拡散前の補誤差関数分布から大きくずれて、その濃度こう配は非常にゆるやかになっている。このすずの濃度こう配がゆるやかになっている領域では、りん拡散(条件)(950°C, 20 min)によってすずの拡散係数が約400倍増大して再分布しているのがわかった。Gereth⁽⁴⁾らは、エミッタ押出し現象の生じているところでは、りん拡散によって、ボロンの拡散係数が約500倍増大されると報告している。すずの拡散係数が増大している割合とほぼ一致するのは興味深い。

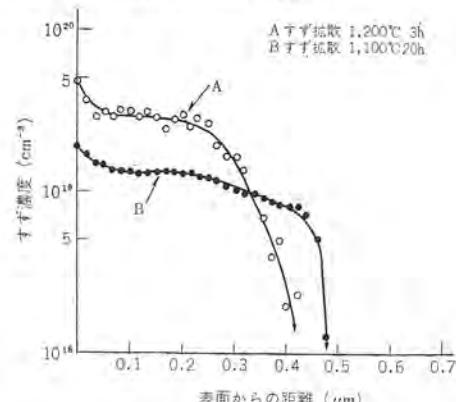


図 3.7 りん拡散後のすずの分布
Profiles of tin after diffusion of phosphorus.

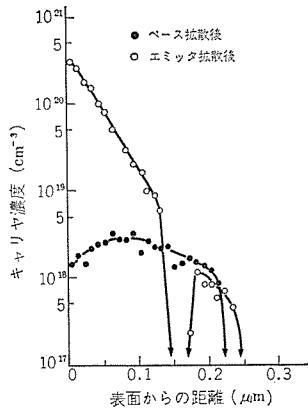


図 3.8 シリカフィルム拡散法を用いたときのキャリヤ分布
Carrier concentration profiles in the silicon crystal diffused from doped silica films.

上記の観察結果は、すずによってエミッタ押出し現象を低減する方法が、すずを導入したことによって転位の発生が抑制されたために、過剰空孔の発生が低減したというモデルでは説明できないことをしめしている。すなわち、ボロン、りん、すずの過剰空孔濃度を、すずを拡散しない試料でのエミッタ押出し現象に寄与する過剰空孔濃度と比較するには、りん拡散層中のボロン濃度分布を厳密に求める必要がある。すずの拡散係数の増大する効果と、Gereth⁽⁴⁾らの報告しているボロンの拡散係数が増大する効果がほぼ等しいことは、りん拡散によって発生した過剰空孔濃度自体は減少していないことをしめしている。

不純物原子の大きさが、溶媒原子の大きさと異なるためにおきる格子ひずみが与える不純物拡散への影響については、Swalin⁽²³⁾や堂山⁽²⁴⁾らによって考察されている。空孔の周囲における応力場を考慮した場合上記の結果は定性的には、りん拡散によって発生した過剰空孔が、すずの周囲に発生したシリコン格子を圧縮する膨張ひずみによる自由エネルギーの増大を減少させるために、優先的にすずを吸収されやすいことが原因であると思われる。その結果過剰空孔は、すずの増速拡散に消費されて、ボロンベース不純物への影響が低減したのであろう。

すずに吸収された過剰空孔は、すず自体が濃度こう配を持っているときは、すずの増速拡散に消費されるが、一方すずの濃度分布が一様であれば、すずドープを行なわないときと同様にベース領域に供給されて、ボロンの増速拡散に消費されるであろう。

3.2.3 すずの濃度分布のエミッタ押出し現象への影響

我々は、上記考察を検討するために、シリカフィルム法によるボロン、りん拡散法において、すずを一様にドープした試料と、すずを拡散法にてドープした試料で、すずのおよぼすエミッタ押出し現象への影響について検討した。

図 3.8 は、シリカフィルム拡散法で形成したベース接合深さ 0.25 μm の npn トランジスタ構造に対するキャリヤ分布をしめす。●印は、ボロンベース拡散のみのときのキャリヤ分布で、○印はエミッタ拡散後のキャリヤ分布である。この図 3.8 から明らかのように、エミッタ押出し幅 Δx_j は、前述した気相拡散法と比較して少なく、0.02 μm に減少するが、しかし消滅させることはできない。このシリカフィルム法でりん・エミッタ拡散を行なうと、気相拡散法において観察される試料表面近傍の濃度が一定の領域を、発生させないことが特長とされている。したがって気相拡散法の場合に発生しやすい、析出物あるいは転位ループ等の影響がなくなるとともに、不純物の総量を転位発生に必要

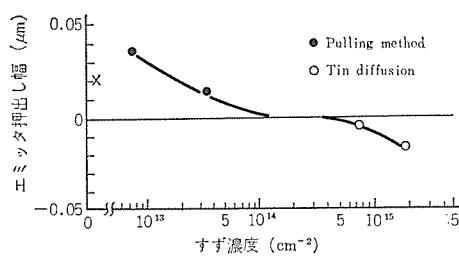


図 3.9 すず濃度によるエミッタ押出し幅の変化
Variation of the emitter dip length as a function of tin contents.

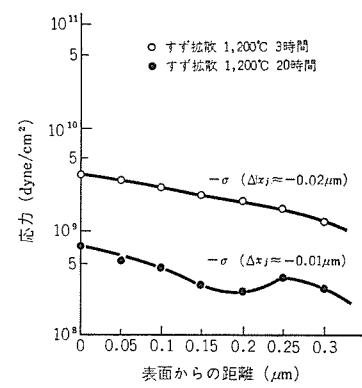


図 3.10 すず拡散試料の応力分布
Stress distributions in tin diffused silicon crystals.

な臨界濃度以下におさえられること等が、エミッタ押出し現象低減に寄与していると思われる。このシリカフィルム拡散法でも、なお 0.02 μm の押出し幅が残る原因としては、ドナー不純物(りん)によって、アクセプターレベルを持つ空孔濃度が増大したためと思われる。

図 3.9 に、すずを拡散導入した試料(○印)、および結晶引上時にすずを一様にドープした試料(●印)に、図 3.8 と同じ条件でボロン、りん拡散を行なったときのエミッタ押出し幅 Δx_j の変化をしめす。横軸は便宜上、ベース接合深さ 0.25 μm 中に含まれるすず濃度の積分値でプロットした。エミッタ押出し幅は、すず濃度の増大とともになって減少し、特に拡散法ですずを、 $6 \sim 7 \times 10^{14}/\text{cm}^2$ 以上ドープした試料では、エミッタ押出し幅はマイナス、すなわち遅延拡散構造になるのがわかった。一方一様にすずをドープした試料ではエミッタ押出し幅はあまり変化なく、低濃度試料においては、すずなしの場合よりも若干の増大が観察された。

この実験結果は、前述したすず分布のおよぼす過剰空孔への影響についての我々の予測を裏付けるものである。なおエミッタ吸い出し現象を生じるのは、ボロンイオンとりんイオンによる内部電界効果によるものと考えられる。我々は、すず濃度によって、エミッタ吸い出し現象を定量的に解釈するため、図 3.9 にしめしたすず拡散試料についての残留応力の理論計算を行なった。

すず、ボロン、りんの各不純物原子による応力範囲は、弾性ひずみ内で、また応力の加法の原理が成立するとして求めた応力の結晶内分布を、図 3.10 に示す。おのおのの不純物によって結晶中に導入される応力(σ)の基本式は、次式を用いた⁽²⁵⁾。

$$\sigma(x) = \frac{\beta \cdot EC(x)}{1 - \gamma} \quad \dots \dots \dots (3.2)$$

ただし、E はヤング率、γ はポアソン比、β は solute lattice contraction coefficient である。ボロンおよびりんに対する β の値は、Cohen⁽²⁶⁾ らの報告している値 ($\beta_{\text{boron}} = 2.3 \times 10^{-24} \text{ cm}^3/\text{atom}$, $\beta_{\text{Bphos}} = 7.2 \times 10^{-25} \text{ cm}^3/\text{atom}$) を用い、またすずの β の値は、Yeh⁽¹⁷⁾ らの報告している、すず濃度と格子定数の関係から求めた。 $(\beta_{\text{Sn}} \approx -3.5 \times 10^{-23} \text{ cm}^3/\text{atom})$ 図 3.10 から明らかのように、エミッタ吸い出し現象の生じた試料では、ベース、エミッタ全域にわたって、すずによって発生した膨張ひずみ(−σ)が中心で、エミッタ吸い出し現象が顕著なものほど、すずによる応力が支配的になっているのがわかる。このことは、過剰空孔をすずに優先的に吸収させて、エミッタ吸い出し現象を起こさずには、すず濃度分布としては、ボロン、りんによる応力を緩和さす濃度以上の高濃度でかつ濃度こう配をつけて導入を

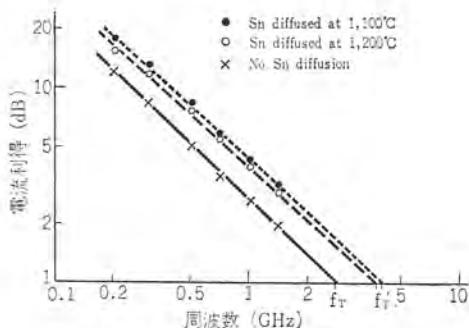


図 3.11 トランジスタの周波数特性
Frequency characteristic of the transistors.

行なうことが有効である。

3.2.4 高周波特性

従来のトランジスタ作成工程に、すずを応用してエミッタ押出し現象のおよぼす高周波特性への影響を検討した。ボロンおよびりんの拡散は、シリカフィルム拡散法で行ない、表面濃度はおのの $6 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ と $3 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ で、ベース接合深さは、約 $0.4 \mu\text{m}$ である。すず拡散は、それぞれ $1,100^\circ\text{C}$ 、20時間、および $1,200^\circ\text{C}$ 、3時間行なったが、このすず拡散条件では、後者のほうがエミッタ吸い出し現象は顕著であった。

図 3.11 に従来のボロン、りん拡散で作成したトランジスタの特性と比較して、各トランジスタの動作周波数に対する電流利得をしめす。図 3.11 から明らかなように、エミッタ押出し現象をなくしたトランジスタでは、明確に電流利得の向上が観察され、また、エミッタ吸い出し現象が顕著なものほど、この効果は大きい。

4. む す び

ボロン、りんのシリコン中での挙動に対する物性研究は、現在までにかなり明確にされており、ボロン、りん拡散によってトランジスタを作成する方法は量産法として確立されている。このボロン、りん拡散によって作成したトランジスタ構造に発生するエミッタ押出し現象は、濃度こう配を持つすずの導入によって、制御できることがわかった。

この現象は、すずがシリコンよりも原子半径が大きく、かつ濃度こう配を持っているために、りん拡散によって発生した過剰空孔の優先的な吸収源として作用することに寄因している。また、この効果は、すず濃度分布として、ボロン、りんによる応力を緩和さす濃度以上に導入したものほど、より有効に作用する。この方法を用いることによって、トランジスタ構造を理想的なエミッタ吸い出し現象を起こした構造にすることができ、周波数特性の向上が容易になった。

最後に、この研究テーマ遂行にあたって、測定、実験にご協力いただいた、関係各位に深く謝意を表します。

(昭和48-5-12受付)

参 考 文 献

- (1) 中村、行本、亘、堀江、赤坂：半導体・集積回路の生産技術講演要旨集、第4回シンポジウム（昭48-4）
- (2) Y. Yukimoto, G. Nakamura, Y. Watari, K. Horie, Y. Akasaka : The Second International Symposium on Si Materials Science and Technology, hold 13-18, at Chicago, May (1973)
- (3) Y. Sato and H. Arata : Japan J. appl. Phys., 3, 511 (1964)
- (4) R. Gereth, P. G. G. Van Loon, and W. Williams : J. Electrochem. Soc., 112, 323 (1965)
- (5) J. E. Lawrence : J. appl. Phys., 37, 4106 (1966)
- (6) J. E. Lawrence : Brit. J. appl. Phys., 18, 405 (1967)
- (7) M. Okamura : Japan J. appl. Phys., 7, 1,067 (1968)
- (8) M. Okamura : Japan J. appl. Phys., 7, 1,231 (1968)
- (9) H. N. Ghosh, et al. : IBM Res. & Dev., 15, 457 (1969)
- (10) K. Fujimura, T. Sakamoto, T. Abe, K. Sato and Y. Ohmura : Proc. 1-st Conference on Solid State Devices, Tokyo (1969)
- (11) 中山、上岡、寺田、高木：半導体・集積回路の生産技術講演要旨集、第2回シンポジウム（昭47-4）
- (12) N. D. Thai : Solid State Electronics, 27, 315 (1966)
- (13) S. M. Hu and T. H. Yeh : J. appl. Phys., 40, 4,615 (1969)
- (14) M. H. Millea : J. Phys. Chem. Solids, 27, 315 (1966)
- (15) D. L. Kendal and Dule B. DeVries : Semiconductor Silicon, 358 (1969)
- (16) T. Klein and J. R. A. Beale : Solid-State Electronics, 9, 59 (1969)
- (17) T. H. Yeh, S. M. Hu and R. H. Kastel : J. appl. Phys., 39, 4,266 (1968)
- (18) T. H. Yeh and M. L. Joshi : J. Electrochem. Soc., 116, 73 (1969)
- (19) K. Yagi, N. Miyamoto and J. Nishizawa : Japan J. appl. Phys., 9, 246 (1970)
- (20) 赤坂、堀江、行本、中村：第20回応物講演予稿集、29 a M 3 (昭48-3)
- (21) Joseph C. C. Tsai : Proc. IEEE, 57, 9 (1969)
- (22) 行本、中村：三菱電機技報, 44, 675 (昭45)
- (23) R. A. Swalin : Acta Met., 5, 443 (1957)
- (24) M. Doyama : Phy. Rev. 160, 681 (1967)
- (25) S. Prussion : J. appl. phys., 32, 1,876 (1961)
- (26) B. G. Cohen : Solid State Electronics, 10, 33 (1967)

当社の特許

登録番号	名 称	発 明 者	登録番号	名 称	発 明 者
626850	直流電源回路装置	飯田 隆彦	634920	イメージ ラン方式の単結晶帶触装置	荒居 徹・井戸 猛夫
626847	定電圧電流回路	大久保永造			山田 幸慶
626848	ビデオマスキング 装置	橋本 直樹・横内 通憲	634909	電解加工装置	古池 一成・四井 昭雄
626855	位置制御用 サーボ 装置	遠藤 義昭・尾形 良征	634906	電解加工装置	斎藤 長男・葉石 雄一郎
628530	無電解銅 メッキ 方法	星野 正弘・小林 功	637511	相順弁別装置	太田 久雄
629173	水分散形 ワニス を用いて電気泳動により被覆を施す方法	大西洋一郎・末武 隆	637513	寸法および形状測定装置における較正装置	大川 清人
626854	磁歪遅延装置	猫塚 正道・上坂 達生	637515	ブリッジ 回路型増幅器	早水 弘一
630229	揚水発電所の低周波同期起動制御装置	梅名 茂男・横田 浩	637520	液面 レベル計	稻荷 隆彦・益田 長之進
630233	高電圧装置	白井 満	637509	放電灯用電極	土井 貞春・伊藤 弘
630237	温度制御装置	早川 照馬	637512	会計機	宮井 隆
630232	回転伝達機構	相田 利光			加藤 義明・今村 恒浩
630230	回転整流機の不良整流素子検出方式	新良 由幸・高橋 卓夫	637516	近接検出装置	渡辺 秀也
630228	電気はさみ	佐々 静男・西堀 弘	637517	選択式接触 スイッチ	寺園 成宏
631470	負荷時 タップ 切換装置	西山 喜順	637518	液面 レベル計	増田 元和・酒井 勝正
631471	熱処理装置	上田 時芳・岡山 元昭	637570	長短 パルス 発信装置	中原昭次郎・立川 清兵衛
630234	超電導合金	小俣虎之助・田中 光雄	637510	リバーシブルシフトレジスタ	小畠 哲男
		菅原 宏	637514	極低温装置のリード線	島田 政代士
630235	起電導コイル 装置	岩本 雅民・佐藤 隆			河本 晴夫
630236	レーザ 装置	安東 滋	637519	巻上機の起動装置	岩本 雅民・佐藤 隆
631469	電磁 ポンプ	近藤 博通・小倉 新三	637508	巻上機の起動装置	金関 直弥
630231	データ通信方式	松永 宏	639066	給電用 シミュレータ の周波数表示装置	宮城 晃・高村 明
634900	機関点火用信号発生装置	大西 正義	639068	電界効果トランジスタ およびその製造方法	安西 伸夫
634901	パレスモータ 駆動装置	武田 克己・三好 明好			高村 明・安西 伸夫
634902	急変検出繼電方式	斎藤 功・久松 章三	639067	温度制御装置	林 重雄・山田 邦夫
634903	モータ 特性距離繼電装置	津川 和夫・山岡 順太郎	640072	ネットワークプロトコル	土佐 雅宣・西海 宏
634904	最大需用電力超過予防装置	武田 克己・佐藤 安俊	640073	内燃機関点火装置	高木 義夫
634905	交流安定化電源	民井 精三・徳富 義宏	640075	巻出し装置	熊沢 裕
		前田 聰	640076	内燃機関点火装置	梅本 隆司・宮田 泰之
634910	周波数変換装置	赤松 昌彦	640077	メカニカルスター	浅山 嘉明・大西 正義
634911	電動工具の スイッチ 装置	小井川 茂・西堀 弘	640078	周波数継電装置	浅野 哲正
634913	パルス 発生装置	佐藤 安俊	640081	半導体装置	日野 利之
634914	光磁気共鳴磁力計	大川 清人・久保 高啓			井上 巧
634917	同一 コード による同期式 5, 6 進可変 パルス 計数装置	奥村 章夫・岡本 登	640082	製氷機	野沢 輝夫・鈴木 健治
634899	照明器具用 セード の製造法	小田 切満寿雄・山崎 肇	640069	交流定電圧装置	三宅 康明
634907	分数関数発生器	石田 哲爾・金子 弘美	640071	タイム スイッチ	酒井 誠記・山 健三
634908	自動列車制御装置	石田 哲爾・鳥井 健太	640079	放電加工面の変質層を除去する方法および装置	貞森 将昭
634912	関数発生器	石田 哲爾・金子 弘美	640083	アーチ 溶接装置	酒井 誠記・山 健三
634915	車載用速度検出装置	阿部 寿夫・中村 泰而	640080	冷蔵庫	貞森 将昭
634916	通電加工用電極の修正装置	斎藤 長男・小林 和彦	640084	ダストシュート	久慈 陽一・三上 英一
634918	電解加工装置	久慈 陽一・古池 一成	640068	導電体用被覆組成物	神本 明輝
634919	電解加工装置	四井 昭雄			斎藤 長男・加藤 強
		久慈 陽一・古池 一成			宇川 彰
		四井 昭雄			岩岸 聰
					西崎 俊一郎・古橋 靖夫



特許と新案

回転伝達機構 (特許第630232号)

発明者 相田利光

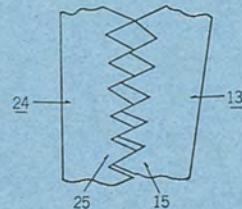
この発明は、最大需用電力計などに用いるかみ合いクラッチの改良に関するものである。

かみ合いクラッチをいったんはずして再結合した場合、クラッチの歯先同士が当たって、歯がかみ合わないことも考えられる。この場合、歯先が相手の歯底にかみ合うまでから(空)回りして回転誤差となる。この発明は、駆動側と被駆動側のクラッチ歯の数を1個だけ異なすことにより、回転誤差をなくしたものである。

図において、(13)は駆動子、(24)は従動子であって、この両者のクラッチ歯の数は1個だけ異なる。したがって、ある一点が歯先が突

き当たっていれば他の歯は図のようのかみ合い、駆動子(13)は傾いて従動子(24)と結合される。

(幸島記)



テープレコーダ (実用新案第936277号)

考案者 井芹彰男・近藤武・床並規秀

この考案はテープレコーダのテープパット部において、そのばねアクションを改善するようにしたものである。

すなわち図に示すように、コ字形状のテープ案内(11)、このテープ案内の両端に支持された板ばね(12)からなるテープパット部(5)にお

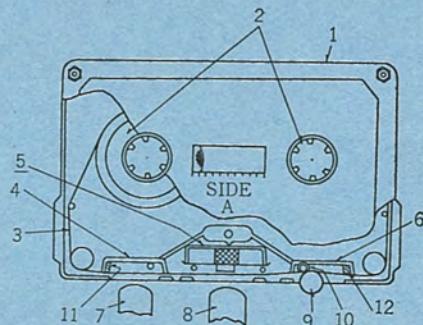


図1

いて、上記テープ案内(11)と板ばね(12)との間に屈とう(撓)性の弾性材、たとえば軟質フォームであるポリウレタンフォーム(15)を設けている。このような屈とう性の弾性材を設ければ、板ばね(12)自体のばね圧を強くして機械的性能に悪い影響を与えることなく、テープ(3)をヘッド(8)に圧着する板ばね(12)のテープパット圧を強くできる。

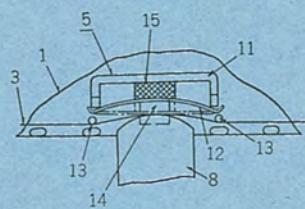


図2

特許と新案

やぐらこたつ (実用新案第 937723 号)

考案者 長沢重雄

この考案はわく(枠)体における側方の可動わくを、中央固定わく間へ水平移動してわく体を小さくたたむようにすることにより、こん(枠)包蔵積を減少させ、かつ通常の使用状態に比べて、小形のやぐらこたつとしても使用できるようにしたやぐらこたつに関するもので、そのわく体の強度を増すようにしたものである。

すなわち図に示すように、下面に発熱部(2)が装着される中央固

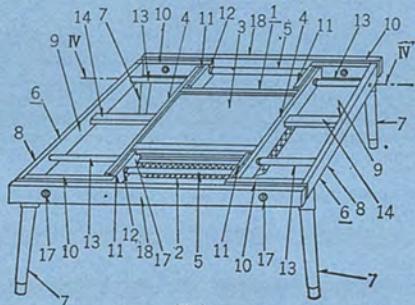


図1

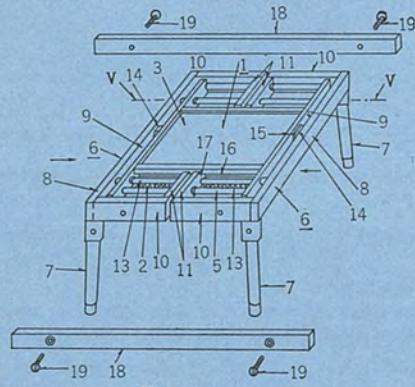


図2

定わく(1)と、すみ(隅)部に支持脚(7)が取付けられる側方可動わく(6)、(6)とを備え、この側方可動わくを中央固定わく(1)の両側にスライド機構(5)、(13)を介して連結し、側方可動わく(6)、(6)が中央固定わく(1)の両側にあって、その両者が同一平面を形成する通常の使用状態と、この通常の使用状態から、側方可動わく(6)、(6)を水平移動させて、中央固定わく(1)間にたたみ込むたたみ使用状態とに任意選択的にしあるにしたやぐらこたつにおいて、上記中央固定わく(1)と側方可動わく(6)、(6)の互いに対向する内外側面にみぞ(溝)(16)とこれに係合して上記水平移動時にしゅう(摺)動する突起(17)とを設けている。このようなみぞ(16)と突起(17)とを設ければ、中央固定わく(1)と側方可動わく(6)、(6)をスライド機構(5)、(13)だけで連結する場合に比べて、わくに荷重が加えられても変形するこがないようにされ、また中央固定わく(1)のみぞ(16)に沿って側方可動わく(6)、(6)の両端部(11)、(11)が水平移動するのでそのしゅう動を円滑にできる効果がある。

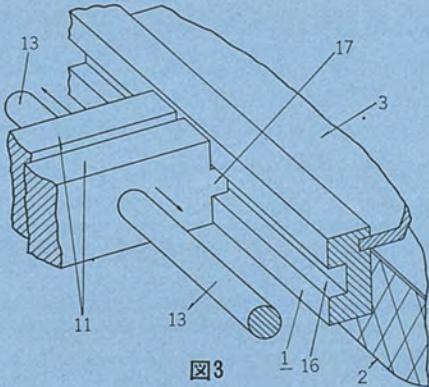


図3

熱陰極電子ビーム溶接機

秋葉 稔光*・小浜 太郎**
奥田 滉夫*・大峯 恩*・原 且則**

Hot Cathode Type Electron Beam Welders

Central Research Laboratory Toshimitsu Akiba • Taro Ohama
Manufacturing Development Laboratory Takio Okuda • Megumi Ômine
Itami Works Katsunori Hara

Hot cathode type electron beam welders with a bolt type cathode being developed by Mitsubishi, herein are introduced the outlines of the devices and the result of welding experiment by using a trial unit.

The bolt type cathode is the one in the shape of the bolt and emits thermions when heated indirect with filaments arranged around it. This indirect heating makes the electrode last longer than the one of the direct heated cathode, enabling the life to be more than five times of the conventional unit. The cathode is also made up in cassette construction to heighten the reproducibility of the beam shape.

In the welding test with the trial machine, successful results have been made available.

1. まえがき

電子ビームはエネルギー密度がきわめて高く、制御しやすいなど、熱源としてすぐれた性質を持っており、これを溶接の熱源に利用すると、これまでの熱源では得られなかつたような深い溶込みや、精度の良い接合部が得られる。

溶接に用いられる電子ビームの発生方式には、熱電子放出によるものと、プラズマ放電によるものとがある。当社では後者については、5年ほど前から開発を手がけ、すでに実用化しているが、このたびわれわれは前者の方式で、とくにわが国では初めての傍熱形（ボルトカソード形）電子銃を用いた熱陰極電子ビーム溶接機を開発した。ボルト形の熱陰極は、熱電子を発生するボルト状の陰極をそのまわりに配置したフライメントにより間接的に加熱するため、従来のヘアピンあるいはリボン形陰極に比べて5倍以上寿命を延ばすことができる。また、陰極部をカセット化し、取換えを容易にするとともに、陰極の相対位置の変化を防ぎ、ビームの再現性を高めている。

以下、このたび開発した装置の概要と、この試作機を用いて行なった密接実験の結果の一端を紹介する。

2. 電子ビーム溶接の原理と特長

電子を高速度 v_0 cm/s に加速して物質に衝撃すると、電子は物質原子と衝突をくり返しながら速度を失っていく。表面から x cm の深さに達した電子の速度は一般にその大きさも方向も初めとは異なっているが、初めと同じ方向のものについては v_0 より小さい速度 v のまわりに分布している。光速 c cm/s に対する電子の速度を $\beta = v/c$ とするとさらに厚さ dx の物質を通過する間に失う電子の速度 $d\beta$ は、Lenard⁽¹⁾ によれば、 $0.1 < \beta < 0.6$ の範囲で

$$-\frac{d\beta}{dx} = \frac{2.2}{\beta^3} \quad \text{.....ccccccccccccccccccccccc.....} \quad (2.1)$$

で表わされる。 v_0, v, x の間の関係は式 (2.1) を積分した形

$$v_0^i - v^i = ax \quad (2.2)$$

で、 $0.18 \leq \beta \leq 0.29$ の範囲で Whiddington⁽¹⁾ の法則として知られて

表 2.1 Whiddington の a の値
Whiddington's a -values.

	空 気	Al	Sn	Cu	Ag	Au	Pt	単位 cm^2/s^4
α	2.0×10^{10}	7.3×10^{12}	14.9×10^{12}	15.3×10^{12}	16.9×10^{12}	25.4×10^{12}	28.9×10^{12}	

いる。ここに a は物質の種類によってきまる定数で、そのいくつかを表 2.1 に示す。電子の速度に上述の分布があるので、電子の到達しうる最大の深さを定義することはむずかしいが式(2.2)で $v=0$ とおいた x の値をとると、

となる。ここに c は光速で、 $3 \times 10^{10} \text{ cm/s}$ である。また、Shonland は ρ を物質の密度、 $R\rho$ を g/cm^2 で測った深さとして次式を掲げている。

ここに c_0 は物質に無関係な係数で $\beta=0.2, 0.6, 0.99$ に対して $c_0=0.6, 0.4, 0.26$ である。

電子ビーム溶接機では普通、電子は数十 keV から百数十 keV 程度のエネルギーに加速されるから、試みに 10.25 keV で金属アルミニウムを衝撃したときに達する深さを計算すると、 $\beta=0.2$ であるから式 (2.3)、(2.4) からそれぞれ、 $x=1.78 \mu$ 、 $R=0.9 \mu$ を得る。また 128 keV、 $\beta=0.6$ では式 (2.4) から、 $R=75 \mu$ となる。ここにアルミニウムの密度は 2.67 g/cm^3 とした。 $\beta=0.2$ の場合、式 (2.2)、(2.3) の結果に差はあるが、いずれにしてもこのように計算する限り、電子ビームは被溶接物の表面のごく薄い層しか達することができます。およそ現実とは似つかない結果を与えてしまう。

これは電子ビーム電流が十分小さいか、被溶接物の冷却が十分行なわれていてまったく温度上昇を作わないとしているからで、現実には電子はこの計算からは予想できない深さまで到達し、厚い被溶接物の溶接を可能にしている。すなわち、実際に得られる電子ビーム溶接の深溶込み現象についてはつぎのように説明されている。

一般に R がビーム半径 r に比べて十分小さいときは、表面熱入力

とみなして温度解析がなされ、熱平衡時にビーム半径 r の表面が融点に達する熱入力密度 q cal/cm²・s は

$$q = \pi K \theta (0.414 \pi r^2) \quad \dots \dots \dots \quad (2.5)$$

で与えられる⁽⁶⁾⁽⁷⁾。ここに、 K : 热伝導率 (cal/C·cm·s), θ : 融点 (°C), たとえば鉄鋼の場合, $\theta = 1,490^\circ\text{C}$, $r = 0.01\text{ cm}$ とすると $q = 1.9 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$ 程度となる。したがってこの程度以下の電子ビーム入力密度であると溶融部の温度はそれ以上にならず、溶融は球面状となって広がっていく。入力密度がさらに大きくなると、溶融層の深さ R のところでは電子ビーム入力のため溶融点をこえて蒸発温度に達し、ついに気ほう(泡)(キャビティ)を発生する。内部に一度気ほうを発生すると、この部分は密度が低いからつづいて投射される電子ビームは容易に気ほうを貫通して気ほうの下の溶融層に侵入し、 R だけ入ったところで再び気ほうを発生する。このような現象が順次行なわれて、電子ビームのせん(穿)孔作用が達成されるのである。気ほう中の金属蒸気は通過電子ビームによりプラズマ化されるため、電子の侵入はさらに容易になる。

電子ビーム溶接は上記のような現象で得られたせん(穿)孔穴を維持しながら熱源と被溶接物を相対的に移動させることにより達成される。図 2.1 は電子ビーム溶接における溶込み機構を示すものである。最初に被溶接物表面に電子ビームを照射すると (a) に示されるように表面の溶融が開始する。ついで (b) に示されるように後方への溶融金属の移動が行なわれ、ビーム照射部分の溶融金属が排除されるため、せん孔穴はだんだん深くなっていき、(c) において定常状態に達する。この後は (d) に示されるように一定深さのせん孔穴を維持しつつ溶接が続行される。定常状態のせん孔穴は図 2.2 に示される種々の力の平衡関係で維持される⁽⁵⁾。すなわち、せん孔穴を保持しようとする力 (F_U) としては F_1 , F_2 , F_3 , F_4 および F_5 があり、せん孔穴を埋めようとする力 (F_D) としては F_3' , F_6 および F_7 が考えられる。そして $F_U = F_D$ なる平衡関係を保ちながらビーム流の進行方向の前面の金属を溶融し、これを後方に移動させることにより

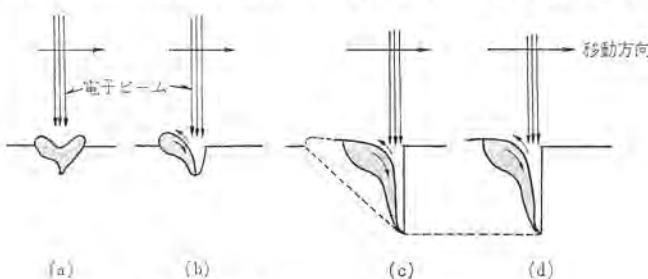


図 2.1 電子ビーム溶接の溶込み機構
Penetration mechanism of electron beam welding.

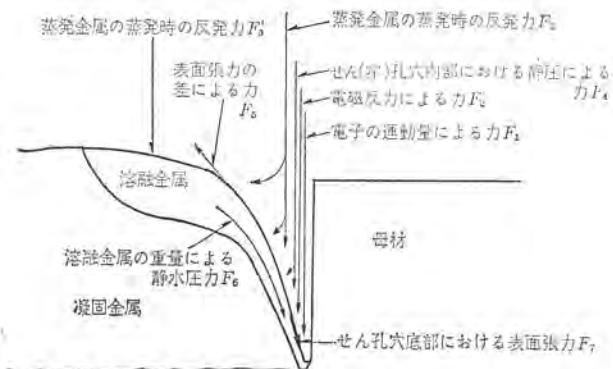


図 2.2 電子ビーム溶接中の溶融金属に作用する力
Illustration of force occurred in molten metal during electron beam welding.

連続的に溶接が行なわれていく。もし上記の平衡が破れ $F_U < F_D$ となればビード表面の溶融金属がせん孔穴中に流入して穴径は狭くなろうとするが、すると溶融金属への電子ビーム流の照射が増すため液温が上昇して F_5 および F_4 が増加するので F_U は増加してふたたび穴径は拡大され平衡関係は維持される。

3. 電子ビーム溶接機の構成

熱陰極電子ビーム溶接機は、その外観を図 3.1 に示すように、中央部約 1 m 立方の溶接室を中心に、その上部に位置する電子銃、溶接室と電子銃内部の気体を排気する排気系、電源および制御盤から成っている。電子銃で発生した電子は写真の下方向に加速され、溶接室に導かれて、溶接室内に置かれた被溶接機に供給される。

3.1 電子銃

電子ビーム溶接機の中で最も重要な部分で、技術的にも多くの注意が払われている。高電圧給電系、電子ビーム誘導用電磁レンズ系を含めた電子銃の断面を図 3.2 に示す。中央部陰極が熱電子の発生源で、ここで発生した熱電子はただちに陰極と約 30 mm の間隔をおいて対向している陽極の方向へ加速され、陽極孔を通ってビーム誘導用第一電磁レンズへ入る。陰極部の詳細については後述するが、陰極全体は周囲のアース電位にある電子銃室(筐)体に対しては十分絶縁されている。通常、負の数十 kV の電位で使用される。この陰極の負の高電位および陰極内部で消費する電力は、電子銃上部の高電圧ケーブルを通して給電され、絶縁油中で陰極端子に接続している。

電子ビームは第一電磁レンズの作用でほぼ平行ビームとなり、反射鏡の中心を素通りし、第二電磁レンズを通過して目的の被溶接機に達する。このとき、電子ビーム径が一般に被溶接物の表面近くで最小径になるよう、第二電磁レンズの強さは調整される。

電子ビームを発生させる陰極は熱陰極形を採用した。後述するようにフィラメントを有し、また陰極・陽極間には高電圧が印加されているので、電子銃室内の陰極・陽極附近は $10^{-4} \sim 10^{-5}$ Torr 程度の高真空中を常に維持する必要がある。しかるに実際、溶接実験を行なう場合、溶接室ではひん(頻)繁に被溶接材を出し入れする必要があるため、第一電磁レンズの直下にゲートバルブを設け、被溶接物の取り換え時に閉めることで電子銃室を高真空中に保てるようにした。

被溶接物表面の溶接状況を観測しながら溶接実験ができるよう、

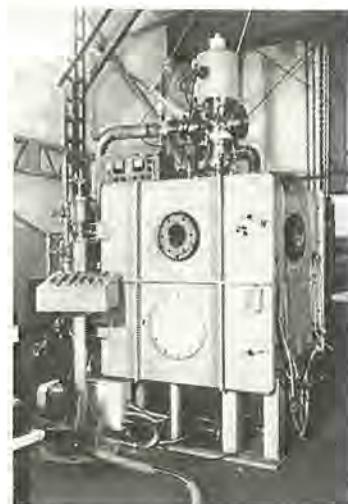


図 3.1 電子ビーム溶接機の外観
Exterior view of a hot cathod type electron beam welder.

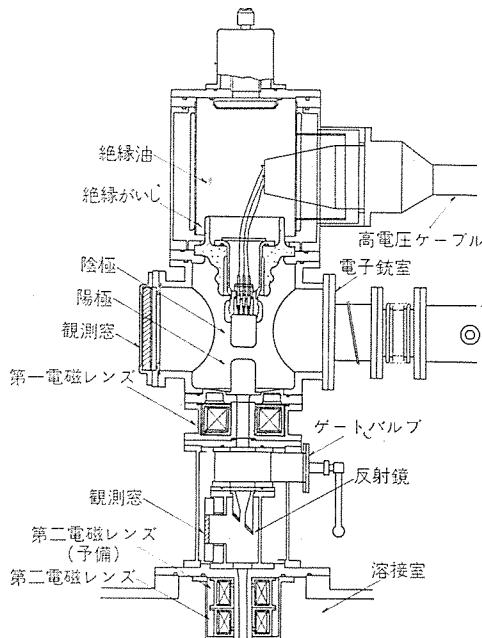


図 3.2 電子銃の断面図
Cross sectional view of the electron gun.

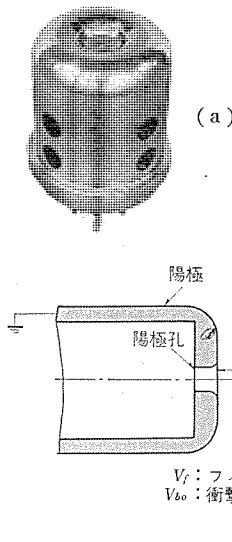
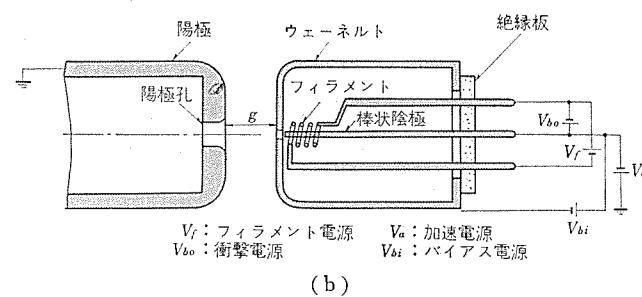


図 3.3 電子銃の陰極部の構造と電位
関係
Detail around the negative electrode
of electron gun.



ゲートバルブと第二電磁レンズの間に反射鏡を入れている。鏡の面は電子ビームの軸と図示のように 45° の傾きをもつていて、電子ビーム軸と直角方向から肉眼または専用望遠鏡を取りつけて被溶接物表面を観測することができる。また、電子銃室の高い真空中に比べて溶接室の真空中度は $10^{-1} \sim 10^{-3}$ Torr 程度で一般にそれほど高くする必要はないが、この反射鏡の部分の細いビーム通路が、高真空中の電子銃室と溶接室との圧力差を保つ働きをも兼ねている。

電子銃の中でも特に重要な陰極部は図 3.3(a), (b) に示す構造になっている。この電子ビーム溶接機の熱陰極の特長は、一般によく使われているヘアピン形やリボン状のフィラメントを直接陰極に使用するのではなく、フィラメントから放出する電子を利用して熱したタンゲステン製の棒状陰極(ボルトカソード)を使っていることである。そのため、細い破損しやすいフィラメントの部分が、溶接時に逆流していくイオンの衝撃にさらされることはなく、堅固で長時間安定に電子ビームを放出することができる。

陰極内部および陽極の電位関係は図 3.3(b) に示すようになっていて、棒状陰極はその周囲に巻かれたフィラメントで間接的に加熱されるが、これだけでは棒状陰極は熱電子放出に十分な温度には到

達しないので、陰極を正、フィラメントを負に 200~300 V の直流電圧をかけ、フィラメントからの電子を陰極に衝撃している。したがってこの衝撃電圧を制御して棒状陰極から放出される電子ビーム量を設定することができる。

ウェネルト電極は陰極に対し、ゼロまたは負の電位にすることができる、棒状陰極から放出される電子ビームの量を制御することができるとともに、ビームの形成に役立っている。棒状陰極、ウェネルト、陽極で電子銃は一つの三極真空管を形成している。加速電圧 V_a に対する電子ビーム電流 I_b 、(厳密には電子ビーム電流は陰極から放出される全電流のうち、ビームとして有効に陽極孔を通過したものであるが、この電子銃では両者はほぼ等しい) の関係を、ウェネルトのバイアス電位がゼロ、ウェネルト陽極間距離 $g = 21$ mm の場合について測定した 2~3 の例を図 3.4 に示す。棒状陰極を衝撃する電力が大きく、陰極の温度が十分高い領域では、加速電圧 V_a を上昇していくと、陰極から放出される電子ビームは、ほぼ、ラングミュアの $3/2$ 乗則に乗って増大している様子が示されている。また $g = 30$ mm について、加速電圧 V_a をパラメータに衝撃電圧の増加に対する電子ビーム電流の変化の様子を図 3.5 に示す。寿命による陰極部の交換は図 3.3 のウェネルトの部分からフィラメント、棒状陰極一体で簡単に行なえる。

電子ビームを被溶接物まで誘導する第一および第二電磁レンズは、

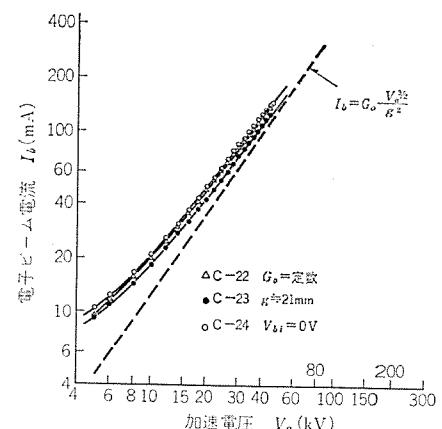


図 3.4 加速電圧に対する電子ビーム電流の変化
(空間電荷制限状態での動作)
Relation between accelerating voltage (relative)
and electron beam current.

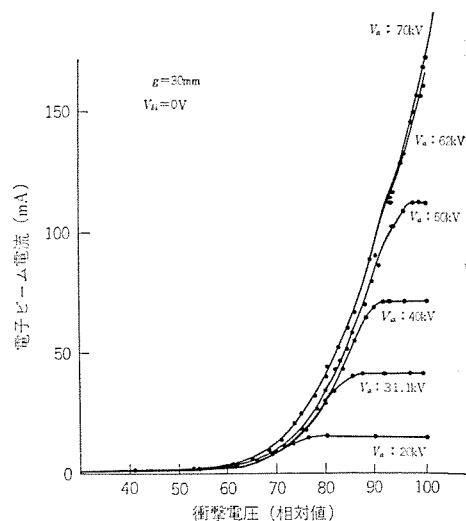


図 3.5 衝撃電圧 (相対値) と電子ビーム電流の関係
Relation between bombarding voltage (relative)
and electron beam current.

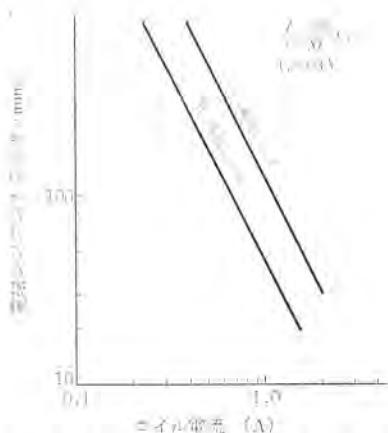


図 3.6 第二電磁レンズ軸上の磁場分布
Magnetic field distribution along an axis of the second magnetic lens.

通常のギャップレンズで、電子の加速電圧を V_a ボルト、電磁レンズのコイルの巻数を N ターン、それに流す電流を I アンペアとすると、電磁レンズのギャップ (中心から測った焦点距離 f mm) は近似的に、

$$f = \frac{98}{(NI_f)^2} V_a \quad \dots \dots \dots (3.1)$$

で表わされる¹²⁾。ここに r はレンズの中心軸から測ったギャップの内径である。60 keV の電子ビームに対して第一電磁レンズでは、コイル電流 $I_f = 0.6$ A で $f = 134$ mm、第二電磁レンズでは $I_f = 1.0$ A で $f = 126$ mm となる。図 3.6 は式 (3.1) を $V_a = 60$ kV について図示したものである。

3.2 電源および制御部

この部分は、高圧絶縁の必要上、油そう内に収容された高電圧電源部、電源と電子鉢をつなぐ高電圧ケーブルおよび高電圧を制御するサイリスタ制御ユニット、定電圧回路、定電流回路、シーケンス制御回路などを含んだ制御部の三部分より構成される。

3.2.1 高電圧電源

高電圧電源は電子を加速する加速電源およびその電子を発生させるためのいくつかの補助電源、すなわち フィラメント電源、バイアス電源および衝撃電源により構成される。以下におのおのの概略仕様を示す。

(i) 加速電源

定格 : DC 180 kV, 60 kV 切換, 250 mA

リップル ($\alpha=0$) : 1 % (rms)

電圧精度 : 1 %

(ii) フィラメント電源

定格 : DC 15 V 30 A

リップル : 5 % (P-P)

(iii) バイアス電源

定格 : DC 800 V 0.1 A

(iv) 衝撃電源

定格 : DC 300 V 1 A

(a) 加速電源

加速電源の基本回路を図 3.7 に示す。この電源は次の二つの特長を有している。その一つは図 3.8 に示す貫通 CT 形昇圧方式であり¹³⁾、原理的には変圧器による一段昇圧であるが、従来の変圧器方式と根本的に異なる点は、主回路の高圧絶縁を巻線間の絶縁によらず変圧器中心部を貫通する一次導体の絶縁のみに依存するように

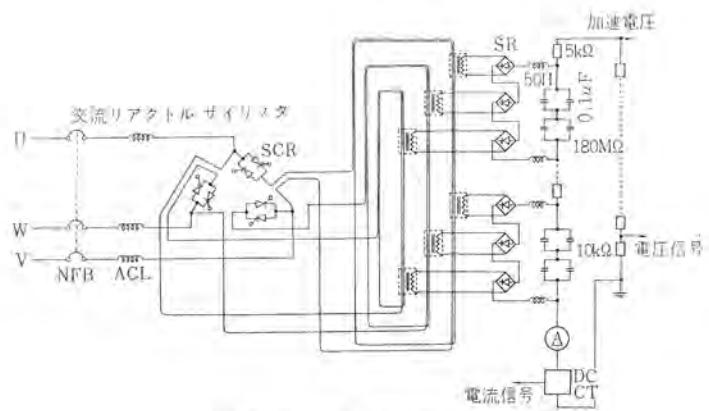


図 3.7 加速電源の基本回路
Basic diagram of accelerating power source.

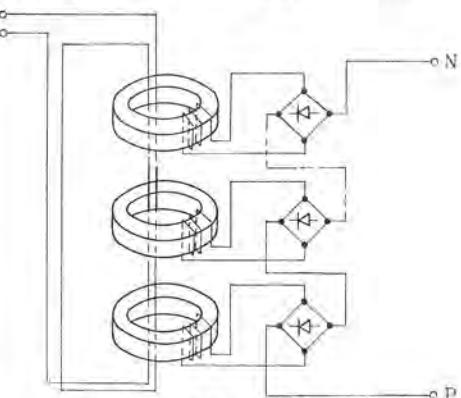


図 3.8 貫通 CT 形昇圧方式
Diagram showing the principle of CT type step up transformer with through conductor primary.

して、全体の構成を簡明にしていることである。CT 形変圧器は、一般的には大きい漏れリアクタンスのため、負荷電力を取れないような大きい電圧降下を生ずる懸念があるが、今回は変圧器二次巻線と鉄心間を無端ソレノイド¹⁴⁾にすることにより理想的な磁気結合を得る一方、一次貫通導体と鉄心間は、比透磁率 (μ_s) の高い鉄心を使用することにより、漏れ磁束を十分に小さくすることができる。たとえば $\mu_s = 10,000$ の場合鉄心間磁束 (Φ) と電流による総磁束 (Φ_0) との比は 0.997、また $\mu_s = 3,000$ の場合は 0.992 となり三相あるいは六相トランクの磁気結合と同程度の結合を得ることができる。もう一つの特長は、図 3.7 に示すとくオーブンデルタに単相全波整流回路を三相分重ね合せることにより、三相全波整流回路の波形よりも位相制御を行なったときのリップルが小さくなる点にある。この位相制御時の波形の違いを図 3.9 に示す。たとえばオーブンデルタ制御方式の $\alpha_2 = 30^\circ$ による電圧 ($\alpha = 0$ 時の 89% 電圧) を、ライン制御により得ようとすれば、 $\alpha_1 = 21^\circ$ となり、このときの両者のリップル波形 (P-P) を比較すれば、前者が 25% であるのに対し後者は 37% となりリップル分を減らすには明らかに前者のほうが有利である。

(b) 補助電源

フィラメント電源は、ボルト加熱用熱電子の供給源であるフィラメントに平滑化された DC 15 V 30 A までの電流を供給する。衝撃電源はフィラメントから飛び出す熱電子がボルトを衝撃するエネルギーを決めるもので、この電圧を変化させることによりボルトの温度を変えて、電子ビームの電流を制御できる。バイアス電源は三極真空管のグリッド電圧に相当する電圧を電子鉢に与えるもので、この電圧を変えることによっても、電子ビーム電流を制御できる。以上三つの電源自身は、低電圧用のもので良いのであるが、加速電源の高圧側につながって

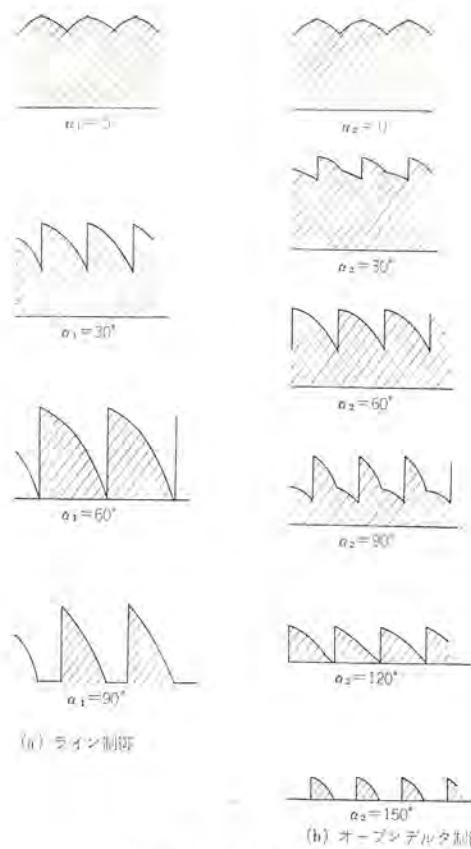


図 3.9 整流波形
Wave forms of rectified voltage.

いるため、トランスの一次側と二次側の間には高電圧の絶縁をする必要がある。本装置においては加速電源と同様 CT 形絶縁変圧器を用いて必要な電力を供給している。またこれらの電源は加速電源につながっている関係上、電子銃の放電時には立上りの早いサージ電圧がかかるおそれがあるので半導体などの部品の保護には十分注意がなされている。

3.2.2 制御盤

制御盤は、加速電源の交流入力電力の制御に必要なサイリスタ装置を納めたサイリスタ盤、加速電圧の定電圧制御回路、電子ビーム電流の定電流制御回路、モータ制御回路、シーケンス制御回路などを納めた制御盤および操作盤により構成される。これらにより電子ビーム電力の制御を行なうのであるが、そのおもな要素として加速電圧の定電圧制御と電子ビーム電流の定電流制御があげられる。

(a) 定電圧制御回路

加速電圧の定電圧制御回路のブロックダイヤグラムを図 3.10 に示す。加速電源は高電圧で整流された後、リップル分を除去するため L-C フィルタをそう入している。この回路の無負荷時におけるコンデンサの負荷抵抗による放電時定数は、リップル周波数に対して十分に大きい値であり、無負荷出力電圧は、整流波形のピーク値の約 1.15 倍となる。一方負荷時には、サイリスタの点弧位相を固定した場合、負荷インピーダンスの減少により、コンデンサの放電時定数が小さくなることに加え、転流によるリアクタンス降下、電源内部のインピーダンス降下などが重なり、レギュレーション特性は非常に悪いものとなっている。しかも低電流領域と定格電流付近ではレギュレーションの傾きが違うため、定電圧制御はむづかしくなる。このような非線形領域の補正には、しばしば電圧マイナーラグが効果的であるが、今回回路方式では、電圧の変化が遅いうえ、高電圧であるのでこの方法は不適当である。よって本装置においては電流の変化に対して、レギュレーションによる電圧降下

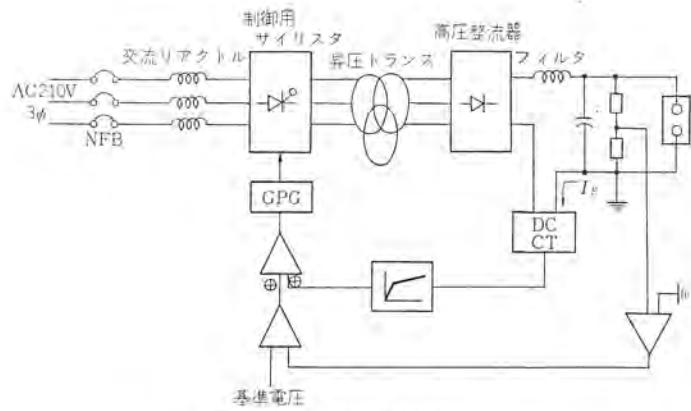


図 3.10 定電圧制御回路
Block diagram of constant voltage control.

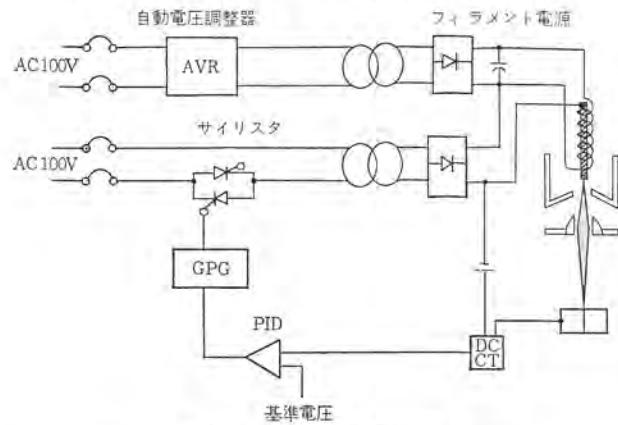


図 3.11 定電流制御回路
Block diagram of constant current control.

を越えない範囲で関数発生器を用いて電流の正帰還を行ない、定電圧制御系を補正した。

(b) 定電流制御回路

電子ビーム電流を制御するには、前記の衝撃電源の電力を変える方式(温度制御)と、バイアス電源の電圧を変える方式(三極管制御)とがあるが、本装置では、図 3.11 のブロックダイヤグラムに示すごとく、負荷電流が基準電圧に一致するように衝撃電源の一次側電圧を変えることにより制御している。

3.3 溶接室、排気系、X線シャッター

溶接室は前述のように約 1 m³ の内容積をもち、溶接室内に第二電磁レンズのギャップ中心から下方約 735 mm の位置に溶接台を設けている。溶接台のテーブルの面積は 45 × 45 mm² あり、溶接室外の制御テーブルから 0.3 ～ 2.5 mm の間の任意の速度で図 3.1 の前後方向に走向させることと、またこれと直角方向にテーブルの位置を移動させることができるのである。溶接室の二つの側面(図 3.1 の前面とその反対の面)は全面とびらになっていて、被溶接物の出し入れを容易にしている。

溶接室は電子銃の重さを十分さきえることはもちろん、溶接室を真空中にしたとき、大きな表面積をもつ溶接室自身が大気圧に耐えなければならない。この溶接機では 23 mm 厚の軟鋼板を用い、図 3.1 に見られる補強を施している。

電子銃室の真空中は前述のように 10⁻⁴ ～ 10⁻⁵ Torr 程度の高真空中を維持しなければならないので、公称 550 l/s の排気速度をもつ油拡散ポンプと 275 l/min の油回転ポンプを直列に接続して排気している。これに対し、溶接室の真空中度は 10⁻² ～ 10⁻³ Torr 程度でよく、それほど高真空中を要さないが、溶接室の体積が大きいので、メカニカル

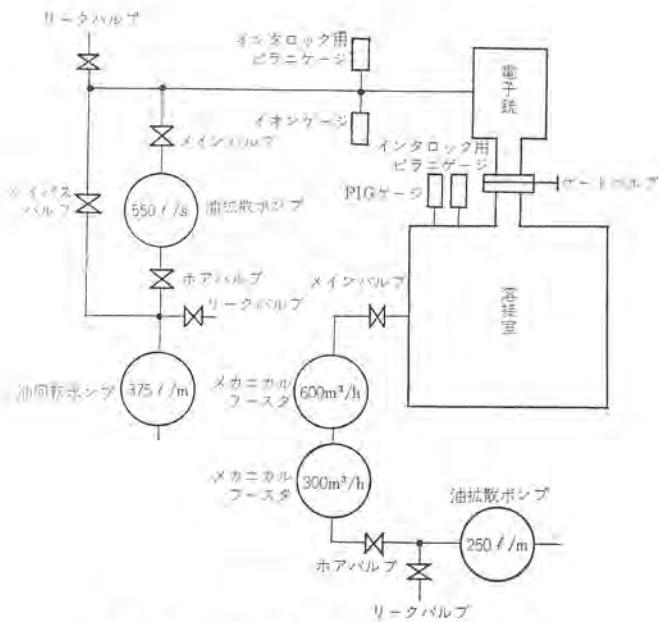


図 3.12 排気系の構成 Vacuum system.

一スタポンプ 2 台と油回転ポンプを直列にして使っている。これらポンプの排気速度は、それぞれ $600 \text{ m}^3/\text{h}$, $300 \text{ m}^3/\text{h}$ と $250 \text{ l}/\text{min}$ で、約 15 分ぐらいで溶接作業を開始することができる。図 3.7 に排気系の構成を示す。

高速度に加速された電子が金属に衝突すると、そこから X 線が発生するが、電子ビーム溶接機では溶接室の被溶接物から溶接時にかなり強い X 線が発生する。しかしながら、電子ビーム溶接機に使う数十 keV 程度の電子では、発生する X 線のエネルギースペクトルの主成分が被溶接物に衝突する電子のエネルギーよりずっと低い所に分布し、さらに、低いエネルギーの X 線に対する金属の吸収係数が一般に大きいので、X 線のしゃへいはたいした問題ではないと考えられる。これを定量的に検討するところのとおりである。

溶接に伴って発生する X 線の強度は被溶接物の材質に依存し、また、電子ビームの進行方向を対称軸に角度分布をもっている。さらに、実際の溶接では、被溶接物や溶接室が固有の形状をもち、発生した X 線が溶接室の内壁面に達するまでに一部吸収、散乱されるため、溶接室外壁面上の X 線の強度分布はきわめて複雑で推定しにくいものであるが、簡単のため、溶接点から直接に壁面に達するとして概算した。

Thoraeus⁽³⁾ のデータを参考にすると、70 keV の電子ビーム 1 mA をタングステンにあてたとき、ビーム軸と 90° 方向に発生する X 線強度は、標的から距離 1 m の位置に置いた厚さ 3.6 mm の鉛の吸収層を通過後約 10^{-7} r/h となることを示している。標的の材料を普通用いられる被溶接物の主成分である鉄におきかえるための係数 $26/74$ (74 はタングステンの原子番号、26 は鉄の原子番号) と距離を考慮すると、電子ビーム電流 250 mA のとき 0.07 mr/h となる。標的で発生する X 線のエネルギースペクトルは連続スペクトルであるが、Thoraeus のデータで鉛の厚さ $x_{pb} = 3.6 \text{ mm}$ で X 線の強度 $R = 10^{-7} \text{ r/h}$ となるみかけの単色 X 線を仮定すると、その初期の強度 R_0 は約 $I_0 = 0.4 \text{ r/h}$ となるため、このみかけの単色 X 線に対する鉛の吸収係数 μ_{pb} (詳しくはエネルギー吸収係数であるが近似的に全吸収係数を使った) は、

$$\mu_{pb} = \frac{1}{x_{pb}} \ln \frac{R_0}{R} = 55 \text{ cm}^{-1}$$

となる。この X 線のエネルギーを求めるとき約 53 keV である。溶接室

の構造材は鉄であるため、鉛 3.6 mm に相当する鉄の厚さ x_{Fe} を求めると、53 keV の単色 X 線に対する鉄の吸収係数が 12.6 cm^{-1} であるから、

$$x_{Fe} = \frac{\mu_{pb}}{\mu_{Fe}} x_{pb} = 15.7 \text{ mm}$$

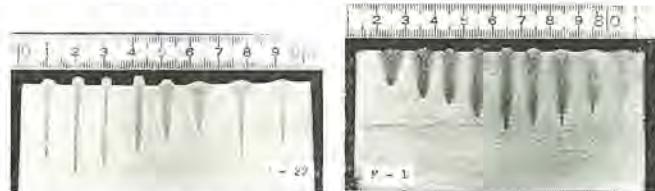
となる。溶接室は構造上、厚さ約 23 mm の材料を用いていて、実際の溶接時においても溶接室外壁面上での X 線測定で測定器にかかるといない。

4. 溶接実験

ステンレス鋼 (SUS 304) および軟鋼 (SS 41) にビード試験を施し、溶接諸元の溶込みにおよぼす効果を検討した。

4.1 電子ビーム収束条件の影響

電子ビームの収束条件 (第二電磁レンズ電流値) を変えて E-ド試験を施した結果を図 4.1 に示す。収束条件を変化させると電子ビームの収束位置が変わるが、これと被溶接機との相対的位置関係に従って溶込み形状が大きく変化することがわかる。このことを模型的に表わしたのが図 4.2 である。(a) に示されるようにビームの収束位置が被溶接機表面よりも上方にあるときは幅の広いビードで深い溶込みが得られ、溶込みの底部の形状は丸みを帯びている。収束位置が表面に接近するに従ってビード幅は狭くなり、溶込みは深くなっている。また溶込みの底部の形状はだんだんとがってくくる。(b) に示されるように収束位置が表面にきたときビード幅は最も狭くなる。収束位置が表面よりも下方にいくとビード幅は再び広くなっているが、溶込みはさらに深くなり、底部はますますとがっていき、底部に cavity が発生しやすくなる。そして (c) に示されるように収束位置が表面から数 mm～数十 mm 下方にきたとき最も深い溶込みが得られる。さらに収束位置が下方にくると (d) に示されるように溶込み深さは再び浅くなる。



(a) ステンレス鋼 (SUS 304) (b) 軟鋼 (SS 41)

図 4.1 電子ビーム収束条件の影響
(溶接条件 60 kV , 100 mA , 290 mm/min)
Effect of beam focussing.

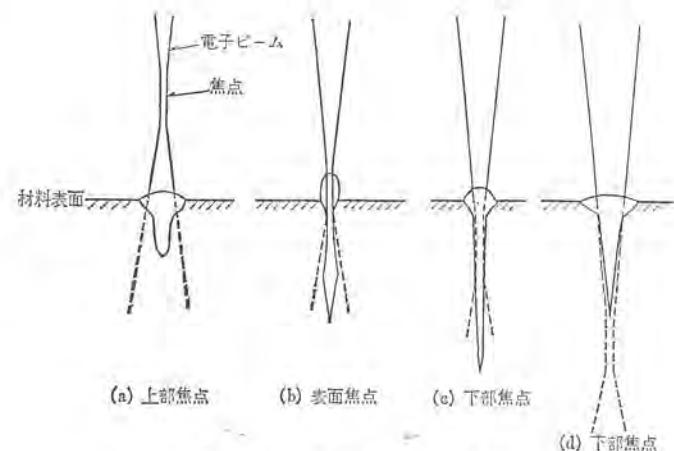
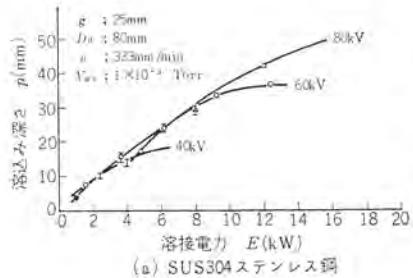
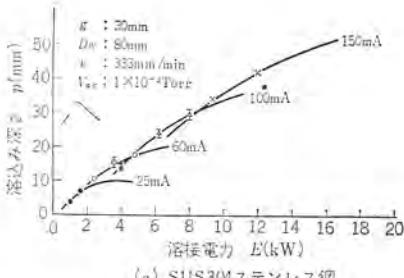


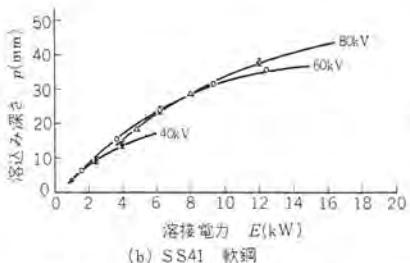
図 4.2 ビーム収束位置と溶込み形状
Effect of beam focussing on penetration shape.



(a) SUS304ステンレス鋼



(a) SUS304ステンレス鋼



(b) SS41 軟鋼

図 4.3 ビーム電流の溶込み深さにおよぼす影響

Effect of beam current on penetration depth.

4.2 溶接電力の影響

電子ビームの溶接電力は加速電圧とビーム電流の積で与えられる。したがって溶接電力は加速電圧、ビーム電流のいずれを変化させても変えることができる。一般に溶込み量は溶接電力を増すことにより増加するが、加速電圧を増加させた場合の溶込み量の増加とビーム電流を増加させた場合の溶込み量の増加は同じではない。

当社製の電子ビーム溶接機について、加速電圧、ビーム電流の組合せによる溶込みにおよぼす効果を検討した。他の溶接諸元 (A-C gap, 加工距離、溶接速度、溶接真空度など) を一定に保ち、加速電圧あるいはビーム電流のいずれかを変化させて、おののの条件で得られる最大溶込み深さ (すなわち 4.1 節で記述されるように、ビーム収束位置を表面より数 mm～数十 mm 下方に設定したときの溶込み) を求めた。結果を図 4.3, 4.4 に示す。図 4.2 は加速電圧をパラメータとして、溶込み深さと溶接電力の関係を示したものである。加速電圧 60kV の曲線をみると、電力 (すなわち電流) が増加すると溶込みは単純に増加していくが、曲線のこう(勾)配 (dp/dE) は減少する傾向が認められる。他の曲線 (加速電圧 40kV および 80kV) についても同様のことがいえる。したがってビーム電流のみを増加させても溶込み深さの増加には限界がある。図 4.3 はビーム電流をパラメータとして、溶込み深さと溶接電力の関係を示したものである。たとえばビーム電流 100 mA の曲線についてみると、電力 (すなわち電圧) が増加すると溶込み深さはやはり単純に増加するが、曲線のこう配は減少する傾向がある。したがって加速電圧のみを増加させても溶込み深さの増加には限界がある。一方、たとえば溶接電力 4 kW のときの溶込み深さをみると、加速電圧、ビーム電流の組合せが異なると溶込み深さが違ってくる。以上のことから最小の電力で所定の溶込み深さを得るためにの加速電圧とビーム電流の最適な組合せが存在する。溶接電力 (E)、ビーム電流 (I_b)、溶込み深さ (p) の間の関係を実験的に求めると、ステンレス鋼の場合、

$$E=0.43 \exp \{0.014I_b + 0.19p \exp (-0.013I_b)\} \quad (4.1)$$

となる。ただし、

$$E=V_a \times I_b \quad (4.2)$$

したがって、最小の電力で所定の溶込み深さを得るためにのビーム電

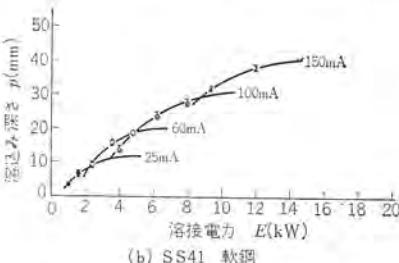


図 4.4 加速電圧の溶込み深さにおよぼす影響

Effect of accelerating voltage on penetration depth.

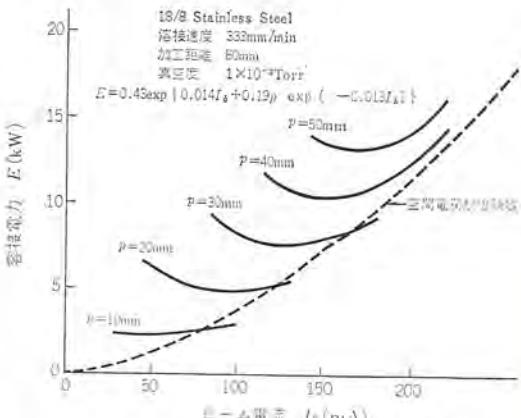


図 4.5 溶接電力と溶込み深さの関係
Relation between input power on penetration depth.

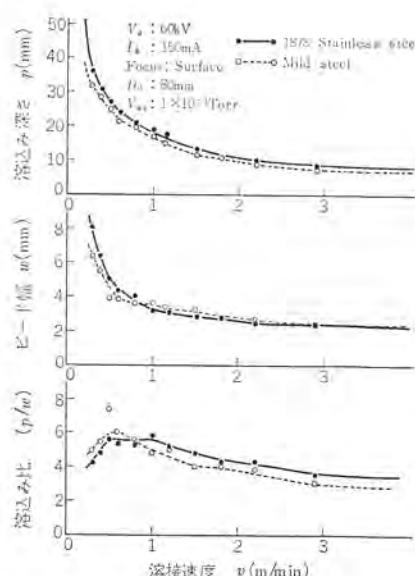


図 4.6 溶接速度が溶込み形状におよぼす影響
Effect of welding speed on penetration shape.

流と加速電圧の組合せは、式 (4.1) より $dE/dI_b=0$ として、

$$p=5.67 \exp (0.013I_b) \quad (4.3)$$

式 (4.3) を式 (4.1) に代入して

$$E=0.43 \exp (0.014I_b + 1.07) \quad (4.4)$$

となる。

溶込み深さをパラメータとして、溶接電力とビーム電流の関係を示したのが図 4.5 である。

4.3 溶接速度の影響

溶接速度を変えてビード試験を施した結果を図 4.6 に示す。溶込み深さ (p) と溶接速度 (v) との間には $0.3 < v < 3.5$ m/min の範囲で $p \propto v^{-0.6}$ なる関係が、またビード幅 (ω) と溶接速度との間には $1.0 < v < 3.5$ m/min の範囲で $\omega \propto v^{-0.4}$ なる関係が認められる。したがって溶込み比 (p/ω) と溶接速度の間には、 $1 < v < 3.5$ m/min の範囲で $p/\omega \propto v^{-0.2}$ なる関係が得られ、溶接速度の増加に従って溶込み比は小さくなる傾向がある。これは溶接速度の増加によって単位溶接長

当たりの電子ビーム量が減少し、エネルギー密度が小さくなるためである。

溶接速度をかえて溶接された試料の断面を図4.7に示す。溶接速度が小さい場合は、溶接線に対して横方向への溶融金属の対流が生じ、熱源の後方で溶融金属の熱により材料表面が溶かされるためビード幅が広がるが、溶接速度が大きくなると、縦方向への溶融金属の対流がおもになるため熱源の後方でほとんど材料表面を溶かすことがなくなるため、ビードのワインカッピング部を形成しなくなり、またアンダカットを生じやすくなる。

4.4 加工距離の効果

第二収束レンズ（第二電磁レンズ）端面から被溶接物表面までの距離を加工距離（ワークディスタンス）と称する。加工距離が大きくなると電子ビームの飛行行程が増加するため、電子の相互の反発、気体分子との衝突あるいは金属蒸気との衝突などによって電子ビームは広がり、エネルギーの一部を失なう。したがって加工距離が大きくなるとビード幅は広くなる。



図4.7 溶接速度の影響 (ステンレス鋼 SUS 304)
290~3,120 m/min
(溶接電力 60 kV, 100 mA, 表面焦点)

Macro-photograph showing effect of welding speed.

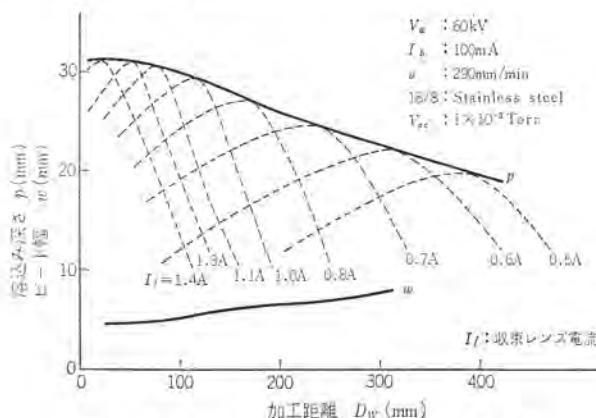


図4.8 加工距離が溶込み形状におよぼす影響
Effect of work distance on penetration shape.

図4.8は他の溶接諸元を一定に保持し、第二収束レンズ電流値と加工距離を変えてビード試験された結果を示す。加工距離が大きくなると溶込み深さは減少し、加工距離が100 mmのときの溶込み深さに対し、250 mmのときの溶込み深さは20%程度減少している。一方ビード幅は加工距離が100 mmから250 mmに変わることによって50%程度増加している。

加工距離の増加による溶込み深さの減少（あるいはビード幅の増加）の度合は加速電圧あるいは真空度を上げることにより緩和することができる。

5. むすび

以上われわれが開発した傍熱形電子銃を備えた熱陰極電子ビーム溶接機について、その装置の概要と溶接実験の結果を紹介した。

陰極の寿命が短いということは電子ビーム溶接機の泣きどころの一つであったが、本文で紹介したボルト形陰極を採用した電子銃を用いることにより、陰極の寿命を40時間（実溶接時間）程度に延ばすことができた。また、ボルト形陰極はヘアピン形陰極に比べて熱電子の放出面積が大きいため、ビードを十分に絞りきれないという心配も予想されたが、溶接結果からも明らかなように、ヘアピン形のものと比べてそん色のない性能が得られた。

今後、電子ビーム溶接の用途開発が活発に行なわれるであろうが、今回開発したボルト形熱陰極電子ビーム溶接機が、適用分野の拡大に役立てば幸である。

最後に、この試作機の製作にあたり、ご指導、ご協力をいたいた、生産技術研究所・自動機開発部および伊丹製作所・整流器製造部のかたがたに謝意を表します。
(昭和48-4-4受付)

参考文献

- 野中：核物理学（四版）（昭35）培風館
- 管田：電子顕微鏡（昭31）オーム社
- 日本放射性同位元素協会：エネルギー3 MeVまでのX線ならびに密封線源からのβ線およびγ線に対する防護（昭37）
- 上岡ほか：三菱電機技報、46, No. 7, 756 (昭47)
- 橋本・松田：溶接学会誌、33, No. 12, 22 (昭39)
- 谷口：機械の研究、21, No. 7, 943 (昭45)
- 谷口：機械の研究、21, No. 8, 1085 (昭45)

オーストラリア NSW 州鉄道納め 2,200HP ディーゼル電気機関車用 電気機器

平尾 新三*・鈴木 敏夫*・吉田 俊久*・桑村 勝美*
森 島 守人**

Electrical Equipment of 2,200HP Diesel Electric Locomotive for N. S. W. Government Railways

Itami Works

Sinzo Hirao・Toshio Suzuki・Yasuhisa Furuta・Katsumi Kuwamura
Nagasaki Works Morito Morishima

Mitsubishi has designed and built electrical equipment comprising a brushless alternator with a silicon rectifier, an electric transmission system and control equipment to be mounted on a 2,200 HP diesel electric locomotive, delivering them to the N. S. W. government railways in Australia. This system is anticipated to effect the reduction of maintenance, the elimination of flash over and the improvement of a power transmission efficiency by applying the brushless alternator.

This proposition involves a number of specific designs such as capability of multiple units operation with existing locomotives, simplification of the power circuit and the control circuits, employment of standard control equipment, taking up of AC exciter with two field windings for power running and dynamic braking, and interchangeability with the machines in use on the existing locomotives. This system is expected of future development as a power transmission system of high power locomotives.

1. まえがき

オーストラリアの NSW 州鉄道 (PTC) では、2,000 HP クラスの ディーゼル電気機関車が主幹線用として多数使用されているが、それらの動力伝達方式は直流発電機方式である。当社では、このほど 2,200 HP クラスの ブラシレス交流発電機／整流器式ディーゼル電気機関車の電気式動力伝達装置・制御装置などの電気機器を設計・製作し、NSW 州鉄道に納入したので、その概要を紹介する。

交流発電機／整流器式動力伝達方式を採用したので、主発電機のブラシレス化による保守の簡易化、小形軽量化、整流子せん絡の除去および動力伝達効率の改善が期待できる。最近の機関車出力の増大傾向に対し、また、無保守化傾向に対しても ブラシレス交流発電機方式はその技術的要要求を満足させることができる。

当社では、さきに 1,050 HP クラスの交流発電機／整流器方式の動力伝達装置を量産したが、今回の 2,200 HP クラスについては、大出力機としての回転機・制御装置に最新技術を採用するとともに、現有機関車と重連運転ができる回路システムを採用したほか、当社の標準制御器を最大限に使用できるように考慮を払った。

これらの電気品は、現地の車両メーカーである A. E. GOODWIN 社で機関車に取り付けられた後、NSW 州鉄道に納入されたもので、今後の車両輸出の方向を示唆するものと思われる。

2. システムの特長

当社の提案したシステムは、ブラシレス交流発電機／整流器方式であって、従来の直流発電機方式に置き換わるものである。この電気式動力伝達システムおよび電気機器には、次のような特長がある。

(1) 鉄道の標準機関車に適合するように設計されているので、(機)装上の変更は最少限でよい。主要回転機は、従来の直流発電機方式のものと取付上の互換性がある。

(2) ブラシレス交流発電機／整流器方式を採用したので、主発電機の保守の軽減、フラッシュオーバーの除去、動力伝達効率の改善などが

期待できる。

(3) 主回路の主電動機群は永久接続にしたので、主電動機群の直一並列接続切換の除去による主回路および制御回路の簡易化、接觸器数の減少による保守の軽減と信頼度の向上、さらに機関車の引張力の変動を最少限におさえることができる。

(4) 下りこう配における抑速運転用発電ブレーキ制御に、ブレーキ電流のフィードバック系を採用して過電流保護を確実にしてある。

(5) 最大 4 重連運転が可能で、現有機関車との重連運転もできる。当社の交流発電機／整流器方式と、現有機関車の直流発電機方式との重連運転が可能である。

(6) 主交流発電機は、片軸受形式のブラシレス励磁方式であって、機軸と直結できる。補助発電機も交流発電機であるが、主発電機軸から歯車駆動される。

(7) 主シリコン整流器は、主電動機送風機から強制風冷されるが、従来の制御箱の一部にコンパクトにまとめて配置されている。主シリコンダイオードは、わずか 24 個使用されているだけで、直列個数は 1S であるが、保護ヒューズは除去されている。

(8) 機関車の定格速度と最高運転速度との比率は、実に 6.7 倍の高率であるが、これを、主電動機群を永久接続にして、主交流発電機の電圧制御および 2 段の弱め界磁制御で行なっている。

(9) ブラシレス交流励磁機の制御方式として、2 界磁巻線を設け、力行時の主発電機の出力制御、および発電ブレーキの過電流保護を容易にしている。

(10) 主回路、補助回路および制御回路の構成にあたって、当社の標準制御器を最大限に利用できるように留意してある。さらに、現有機関車との重連運転を考慮し、運転操作を同一にするように配慮した。

3. 機関車性能および電気機器要目

当社の電気機器は、2,200 HP, C₀-C₀, 108 ton, 最高運転速度 70 mph のディーゼル電気機関車に積載されるが、この機関車の速度一引

張力曲線を図 3.1 に、発電ブレーキ特性曲線を図 3.2 に示す。機関車性能および電気機器の主要要目を次に示す。

形 式 :	箱形、両運転台
軸配置 :	C ₀ -C ₀
運転整備重量 :	108 ton
軸 重 :	18 ton
軌 間 :	4'-8½" (1,435 mm)
機関車性能	
連続定格引張力 :	57,700 lbs
連続定格速度 :	10.5 mph
最大引張力 :	80,000 lbs
最高運転速度 :	70 mph
車輪径 :	40 inch (1,016 mm)

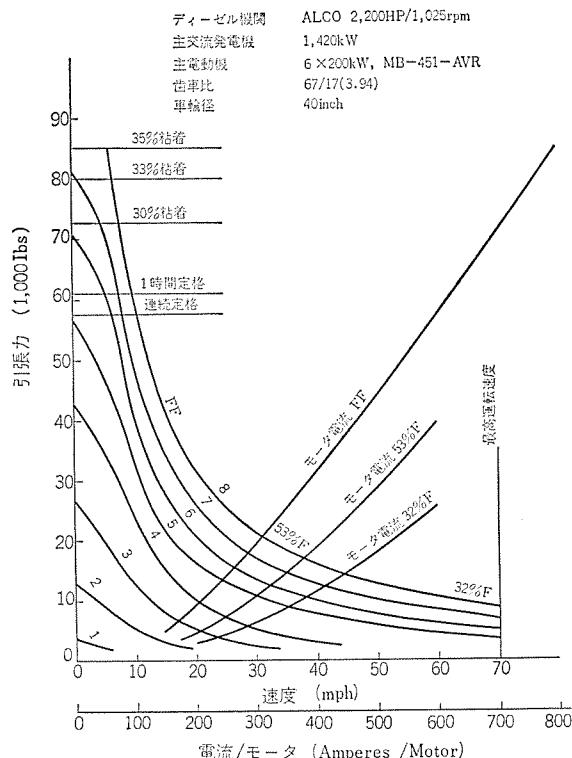


図 3.1 速度一引張力曲線
Tractive effort vs. speed curves.

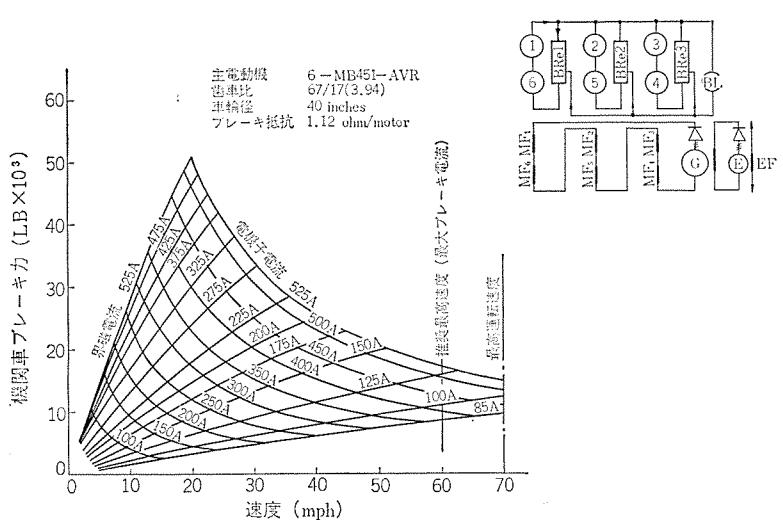


図 3.2 発電ブレーキ特性曲線
Dynamic braking characteristic curves.

主要機器

ディーゼル 機関 :	ALCO-251 B 1 台
連続定格	2,200 HP/1,025 rpm
主交流発電機 :	ブラシレス 三相交流発電機 1 台
連続定格	1,500 kVA AC 625 V
	1,385 A 1,025 rpm
主シリコン 整流器 :	三相 ブリッジ 接続 1 台
連続定格	1,470 kW DC 780 V 1,890 A
主電動機 :	丸形 ヨーク つけ式 6 台
連続定格	200 kW 390 V 610 A
	352 rpm 歯車比 = 3.94
補助交流発電機 :	回転界磁形三相交流発電機 1 台
連続定格	14/12 kW AC 60 V 141 A 2,050/800 rpm
主要制御器	
主回路機器	電空式単位 スイッチ, 逆転器, 制動転換器, 弱め界磁接触器, 弱め界磁抵抗器, 緊急器類
補助回路機器	自動電圧調整器, 保護继電器類
制御回路機器	主幹制御器, 磁器増幅器, トランジスタ増幅器, 制御继電器, 制御抵抗, ダイオード
制御回路電圧	DC 75 V
制御空気圧	5 kg/cm ²

4. 電気式動力伝達方式

4.1 システムの概要

図 4.1 は、主回路および補助回路の概要である。最近のディーゼル電気機関車に対する要求は、単位輸送量の増大による大出力化および高速化であるが、さらに、保守の簡易化が要求されている。交流発電機には、直流発電機のような整流限界はなく、また、実用上に高速化に対する制限もない。一方、シリコン整流器については大容量素子が容易に入手でき、高効率整流ができる。主交流発電機の回転界磁は、同一軸上に配置された交流励磁機より回転整流器を通して励磁する、いわゆるブラシレス励磁方式を採用して保守を容易にした。シリコン整流器の信頼度は高くて保守もほとんど必要としないので、最近の無保守化傾向を満足することができる。

ブラシレス交流発電機は、エンジンのクラクク軸に直結され、その三相交流出力は、三相ブリッジ接続された主シリコン整流器で三相全波整流され、直流主電動機に供給される。6 台の主電動機群は、各台車の全動輪軸につりかけ装備され、電気回路的には 2S3P の永久接続にし、主回路および制御回路の簡易化、断流器類の減少による保守の簡易化を図り、さらに、直並列渡りの除去による機関車の引張力変動の減少を行なっている。

主シリコン整流器の交流側の CT を介して過電流继電器を設け、シリコン整流素子の短絡事故電流および直流負荷の過電流を検出し、断流器によって過負荷しゃ断を行なうほか、励磁器の界磁回路を開放して保護するので、主シリコン整流器から全面的にヒューズを除去して保守・点検を容易にした。

ブラシレス励磁機の励磁方式として 2 界磁巻線を設け、力行および発電ブレーキの制御を容易にすることことができた。できる限り標準制御器が使用できるように回路構成を行なった。

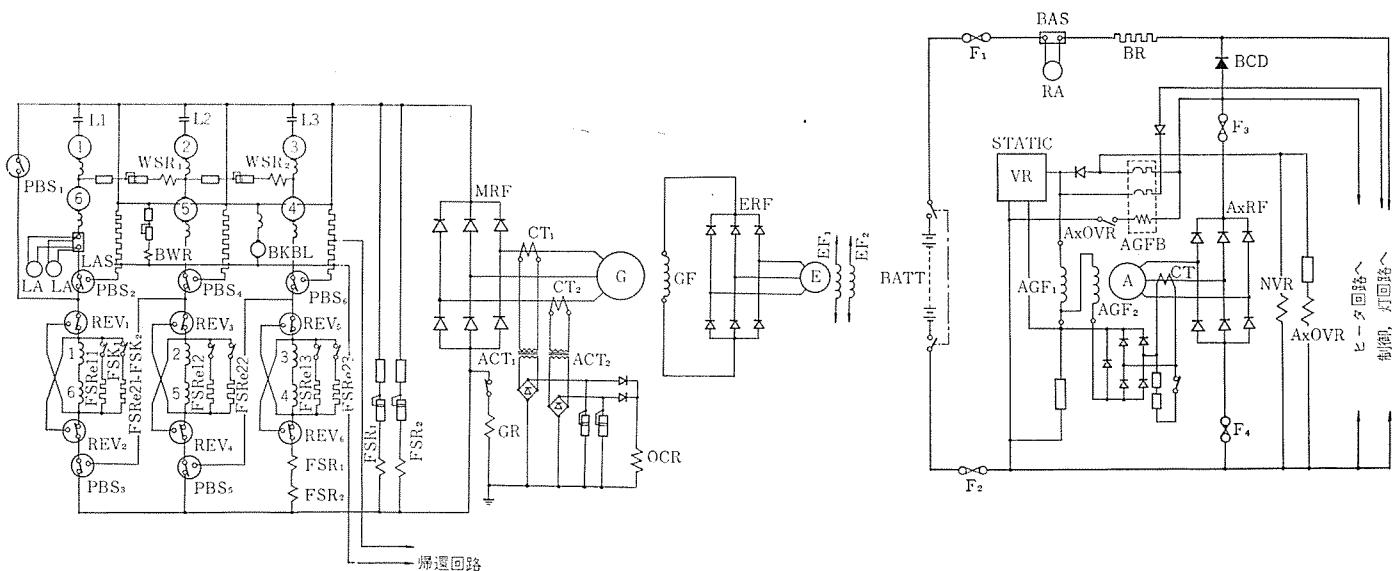


図 4.1 主回路および補助回路
Schematic diagram of power and auxiliary circuit.

1,025rpm 780V 1,800A 2.3mH

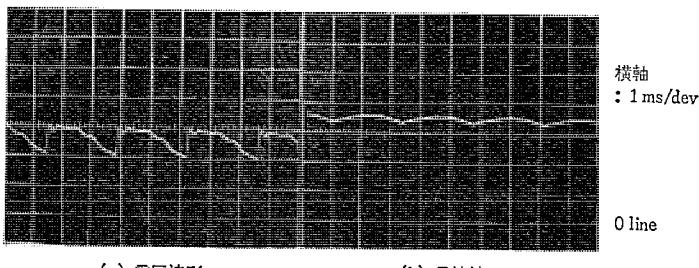


図 4.2 定格点における三相全波整流波形
Rectified output wave at the rated point.

4.2 等価組合せ試験

各電気機器単体の試験のほか、主交流発電機、主シリコン整流器、等価負荷および一部の制御器を使用して、等価組合せ試験を行ない、主発電機の特性試験、主発電機-励磁機系の過渡特性、主シリコン整流器の三相全波整流波形測定、全負荷しゃ断による開閉サージ電圧の測定などを実測した。主発電機の特性曲線については、BS 173 規格の許容誤差内に収まるように励磁機の界磁電流を調整し、図 5.2 に示す特性を得た。

主シリコン整流器の定格点における出力電圧および出力電流波形を図 4.2 に示す。これは、DC 780 V 1,800 A における出力電圧(図 4.2(a))および出力電流(図 4.2(b))であるが、回路の等価インダクタンスが 2.3 mH の場合で、電圧リップル率 20 %、電流リップル率 3 %程度が観測されている。この電圧および電流波形は、出力電圧および電流領域によって変わるが、波形観測によれば電圧が高くて電流が少なくなると、電圧リップルが減少して電流リップルが増す傾向である。

この脈流波形は、主電動機の整流上、変圧器起電力および補極磁束の追随性に影響を及ぼすが、整流安定度が問題になる高速の弱め界磁領域では界磁は抵抗分路されており、リップル分はバイパスされ、一方、三相全波整流した脈流の周波数は、最高ノッチで約 410 Hz 程度で、補極磁束の追随性は積層しても効果は期待できないので、ヨークおよび補極はシリードのままにしてある。

過渡特性の一つとして、最大の発電ブレーキ電流を流している状態で、励磁機の界磁電流をしゃ断した後、主発電機電流が減衰する模

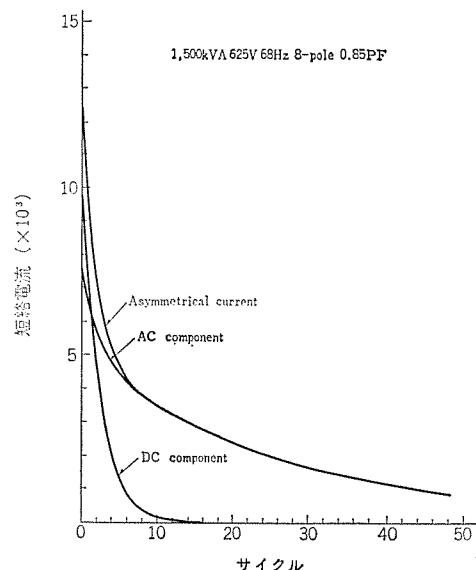


図 4.3 三相短絡電流 3-phase short circuit current.

様をオシロで測定した。これは、発電ブレーキ時に主電動機の界磁群はすべて直列に接続され、主発電機から主シリコン整流器を介して励磁されるが、この回路に断流器を有しないため、主回路を力行回路に切り換える際にこの減衰時間が問題になるので、実測したのであるが、2 秒以下で減衰しており、実用上カムスイッチで良いことが判明した。

一方、断流器による全負荷しゃ断試験において、主発電機の最高電圧点 1,350 V 1,050 A の点で、等価インダクタンス 2.3 mH の点からしゃ断した場合、断流器のアーカ電圧 2,600 V DC 出力電圧のピーク値 1,920 V で、約 142 % の開閉サージ電圧が、主シリコン整流素子端子で観測されたが、PIV 3,000 V の素子を使用してあるので、十分余裕があることがわかる。

4.3 過電流保護

主交流発電機の最大電圧点からの三相短絡電流(非対象分)の計算値を図 4.3 に示すが、実効値で 12,800 A が最大短絡電流である。最大電圧点からの線間短絡電流(非対象分)の計算値は、実効値で 11,700 A である。主シリコン整流素子は、これらの短絡電流に対して短時間過負荷耐量で耐えるようにアーム当たり 1S × 4P 接続にし

である。過電流遮断器のセット値は、AC 2,100 A (DC 側 2,820 A) であって、10 サイクル程度以下で、主交流発電機の励磁機界磁回路を開放するとともに、主回路の断流器を開放する。すなわち、主電動機のフラッシュオーバー、過電流、主シリコン素子短絡等に対して耐えるので、主シリコン整流素子の保護ヒューズを除去し、故障検出装置を取り付けないことにした。

発電ブレーキ運転の場合、主電動機は他励発電機になるが、高速域では弱め界磁率が高くなるので、整流困難になる場合が考えられるため、70 mph ではブレーキ電流を 400 A 程度に制限する。

5. 主要機器

この機関車用に特に設計された主交流発電機、補助交流発電機、主シリコン整流器、主電動機および制御装置などの仕様および構造について以下に概要を述べる。

5.1 1,500 kVA ブラシレス主交流発電機

ディーゼル電気機関車の発電機は、通常の発電機と比べて電気的特性面でシビアな性能を要求されるとともに、スペースの点で非常に制約されるので、構造面でも全長を短くする等のいろいろな考慮を払った。励磁方式としては、交流励磁機と回転整流器とを組み合わせてブラシレス化を図り、ブラシ部の保守・点検を不要にした。このブラシレス方式は、一般の交流発電機に昭和 38 年より採用して多数の納入実績があり、信頼性が高い。ディーゼル電気機関車用のブラシレス発電機についても、昭和 42 年にニュージーランド国鉄に納めた 64 台の実績があり、なんらトラブルもなく、好調に運転されている。主発電機および補助発電機の組立完成品を図 5.1 に示す。

5.1.1 仕様

(1) 主交流発電機

形式：回転界磁形三相交流発電機、開放自己通風形、F 種
絶縁、ブラシレス方式

定格：1,500 kVA (1,420 kW) 625 V 8 P
1,025 rpm 68.5 Hz

(直流側：連続定格 1,400 kW 780 V 1,800 A)
(最大電圧 1,350 V、最大電流 2,400 A)

(2) 交流励磁機

形式：回転電機子形三相交流発電機、主発電機に内蔵、F 種絶縁

定格：21.1 kVA (20 kW) 200 V 16 P 1,025 rpm 137 Hz

(3) 回転整流器

構成：三相ブリッジ (グレーツ結線)、2S×1P×1A、シリコン素子形名 FD 200 B-16

(4) 規格 BS 173

5.1.2 特性

主発電機の交流側出力を整流器で直流に変換した後の直流側特性を図 5.2 に示す。この直流側電圧・電流は、交流励磁機の界磁電流によって制御されるが、界磁巻線を 2 巻線方式にし、一方を各ノッチごとに変化させ、他方を一定励磁にした。界磁を 2 巻線方式にしたのは、発電機を駆動するディーゼル機関馬力が一定になるように動作する負荷調整器に余裕を持たせるとともに、ブレーキ時には差動としても使用できるようにするためである。BS 規格では、最大電圧点の電圧と、最大電流点の電流とは、許容誤差 5% 以内との規定があるが、主発電機は最大電圧点と最大電流点の励磁機の界磁電流が同じになるように設計されている。このようにすると、制御方



図 5.1 主交流発電機および補助交流発電機
Main alternator and auxiliary generator.

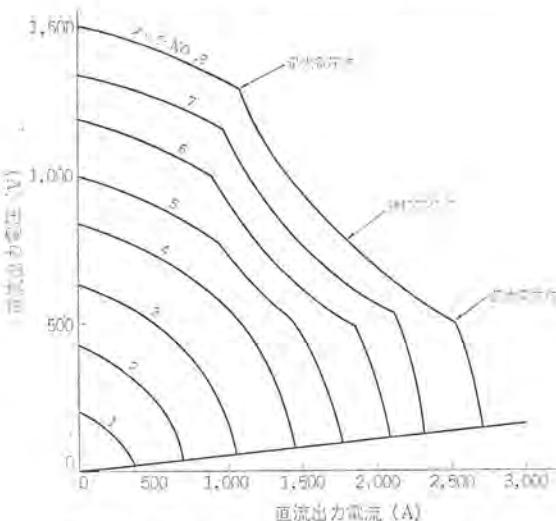


図 5.2 主発電機出力特性 (整流器出力側)
Characteristic curves of main generator.

式は簡単になるが、発電機を設計する上にはかなりきびしい条件である。また、ブラシレス方式にした場合、交流と直流との関係が非線形である整流器が、主整流器と回転整流器との 2 か所あり、そのうえ、直流出力に対して励磁機の界磁電流を計算するには、各ノッチによって電圧・電流・回転数が大幅に変化し、三相全波整流が第 1 モード・第 2 モード・第 3 モードにまたがるため、非常にめんどうであるが、コンピュータを使用して能率化を図った。実測効率は、主整流器を含めて 94.85% と非常に良かった。

5.1.3 構造

構造断面図を図 5.3 に示す。主発電機のフレーム内に交流励磁機および回転整流器があり、ギヤを介して軸端に補助発電機と、送風機駆動用軸を取り付けた構造である。発電機の軸方向長さには、機関車のスペースの点から制限があり、軸方向長さを短くするために次のような考慮を払った。

- (1) 主発電機および交流発電機とは、コア外径を大きくして長さ方向を短くするとともに、コイルエンドを極力短くした。
- (2) 片軸受にして機関本体に発電機フレームを取り付け、完全にオーバーハングさせて共通ベッドを省略した。
- (3) 通風方式は片吸込みにし、ファン径を大きくして幅をせまくし、カッティングとファンボスを兼用させた。
- (4) 交流励磁機を主発電機のフレームに内蔵した。
- (5) 回転整流器には信頼性の高い素子を使用して点検スペースを切りつめた。
- (6) 補助発電機は、ブーリー駆動を廃して歯車駆動にした。

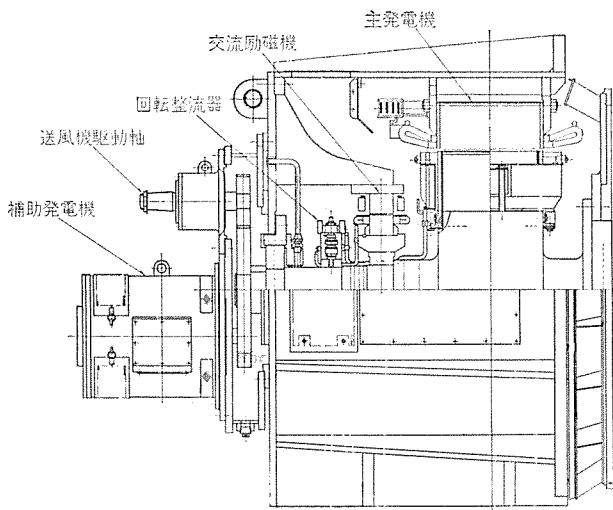


図 5.3 主交流発電機組立断面図
Vertical cross section of main alternator.

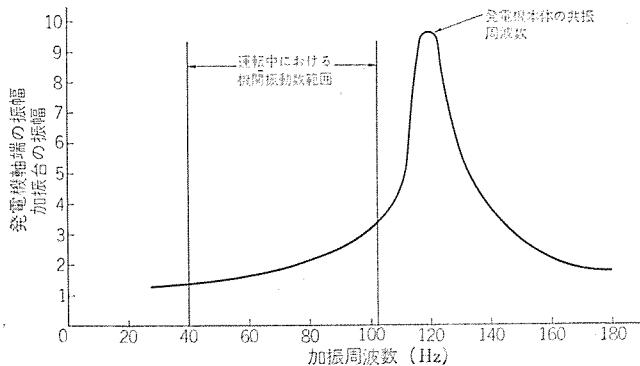


図 5.4 発電機の共振周波数の測定
Resonance frequency of main alternator.

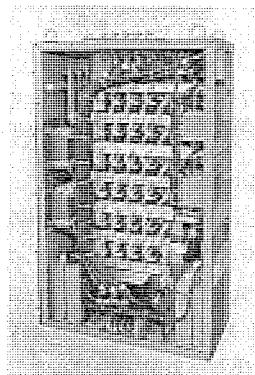


図 5.5 主シリコン整流器箱
Main silicon rectifier unit.

上述のように、機関フレームに発電機フレームをオーバーハングさせ、さらに歯車を介して補助発電機を取り付けた構造であり、そのうえ、機関の発生する振動や、走行中の機関車の振動が発電機の振動として直接影響を受けるなどときびしい条件になっている。このような構造で小形機の製作実績はあるが、本機のような大形機の製作経験がないこともあり、1/3縮尺のモデルを製作し、実機と同じ取付状態にして、フレームの剛性、固有振動などの測定を行なった。この測定結果から、機関の爆発による振動数と共振しないようにフレームの外周をリブで補強するなどしてフレームの剛性を高めた。固有振動数の測定結果を図 5.4 に示す。補助発電機駆動用歯車には、騒音を少なくしてかみ合いを良くするためにヘリカルギヤを使用して油浴潤滑方式にしたが、周速が 22.4 m/s と高速で油浴潤滑の限界に近いので、

歯車の材質を上げた。軸受には、機関からのスラストを考慮してころ軸受を使用した。また、歯車箱に面した主発電機の軸受、補助発電機および送風機駆動軸の軸受には、グリース潤滑にした場合にグリースが歯車油で流れだす危険があるので、歯車の回転によって生ずる油のしづきによる潤滑方式を採用し、試験においても良好な結果が得られた。回転子の各部は、回転数が常時変化するので、疲労について十分に考慮されている。主整流器によって交流側に発生する高調波成分は、計算上では 18 % 程度あり、これによる電機子銅損の増加を減らすために素線の太さを小さくしてある。また、この高調波成分を吸収するダンパーの構造についても十分に考慮が払われている。

5.2 14 kW 補助発電機

補助発電機も交流発電機を使用し、この出力を整流して負荷に直流を供給する。整流子がないので、保守については直流発電機よりも軽減される。仕様は次のとおりである

形 式：回転界磁形三相交流発電機、開放自己通風形、F 種絶縁

定 格：14 kW 60 V 12 P 2,050/800 rpm (直流側で 14 kW 75 V)

この補助発電機は、主発電機の軸端より歯車を介して駆動される。励磁装置は、界磁巻線を 2巻線にし、一方は CT によって交流出力に比例した電流を、他方は AVR によって供給する方式にし、AVR の容量を小さくした。AVR は、トランジスタを用いた無接点式で、全使用回転数、およびあらゆる負荷のもとで直流出力の電圧変動率は十分に小さい。

5.3 シリコン整流装置

この整流装置は、主シリコン整流器と、補助回路用の補助シリコン整流器および発電機界磁用シリコン整流器で構成されており、これらは一括してキューピックに収納された風冷式構造で、主電動機冷却用送風機によって共用冷却される。

主整流器用素子には、3,000 V 400 A の高耐圧、大電流ダイオードが使用されている。主整流器は三相全波結線で、主発電機出力に接続されており、外來サージ電圧は受けないので、前述の大容量素子の使用とあいまって装置はコンパクトにできている。素子構成は 1 S × 4 P × 6 A で、素子保護ヒューズは使用していない。したがって、素子が故障した場合には交流側電流で検出して主発電機の界磁回路をしゃ断するようにしてあり、整流器の健全アームは、主発電機短絡電流が減衰するまでの過電流耐量を有するように設計されている。

図 5.5 に内部構造を示す。主整流器ダイオードは、4 P ごとに一体化されたアルミ冷却片に取付けられて 1 整流アームを構成し、6段に積み重ねて三相全波結線にしてある。素子冷却片によって素子背面側に風洞を形成する構造にしてあるが、前述の 1 アームで形成される段間に空げきを設けて冷却風の一部を吸い込むようにし、冷却風入口側と出口側素子の冷却条件を均一化するようにしてある。

この整流装置のおもな仕様は、次のとおりである。

(a) 主シリコン整流器

定格出力： 1,470 kW

定格直流電圧： 770 V (max 1,570 V)

定格直流電流： 1,890 A

定 格： 100 % 連続、132 % 1 min

結 線： 三相全波結線

素 子： SR 400 C-60 (定格平均順電流 400 A, 定格せん頭逆電圧 3,000 V)

素子構成： 1S×4P×6A

冷却方式： 強制風冷

(b) 補助シリコン整流器

定格出力： 14 kW

定格直流電圧： 75 V

定格直流電流： 187 A

定格： 100% 連続

結線： 三相全波結線

素子： FD 200 B-16 (定格平均順電流 200 A, 定格せん頭逆電圧 800 V)

素子構成： 1S×1P×6A

冷却方式： 強制風冷

(c) その他

発電機励磁用整流器： ダイオード・スティック DS 20 BK-H

500 Vpeak, 30 A

蓄電池回路ブロック用ダイオード： SR 400 C-8 (定格平均順電流 400 A, 定格せん頭逆電圧 400 V)

5.4 主電動機

主電動機・歯車装置は、定められたスペース内でディーゼル電気機関車用として十分な性能を發揮するように最新の技術を取り入れ、小形化を図った。特長は次のとおりである。

(1) 電機子絶縁にはH種を採用し、信頼性・耐久性にすぐれている。

(2) 10.5 mphにおいて電動機当たり定格引張力 9,600 lbs を出す大トルク主電動機である。

(3) 定格速度は 10.5 mph であるが、大幅な弱め界磁・過電圧を許容して 70 mph まで最大出力を発揮することができる。

(4) 主極ギャップの形状をいわゆる「くさびギャップ」に近い形状にし、弱め界磁の状態における磁界のひずみ、整流子片間電圧ピーク値を小さくする等の整流に対する考慮を払っている。

試験は、BS 173 に従って実施され、満足な結果が得られた。この主電動機の要目を表 5.1 に、特性を図 5.6 に、外形写真を図 5.7 に示す。

5.5 制御装置

5.5.1 特長

(1) 今後の標準の制御機器を使用して回路システムを構成してある。主回路および制御回路は、できるだけ単純化して信頼度の向上に示す。

表 5.1 MB-451-AVR 形主電動機要目

Main data for type MB-451-AVR traction motor.

形 方 式 極 数	名 称 MB-451-AVR 直巻直巻補助付 4
通風方式	他力通風式
装架方式	つりかけ式
絶縁種別	H種
定格出力	連続 200 kW
電圧	390 V
電流	610 A
回転数	352 rpm
車輪径	40 inch
車両比	67/17 (3.94)

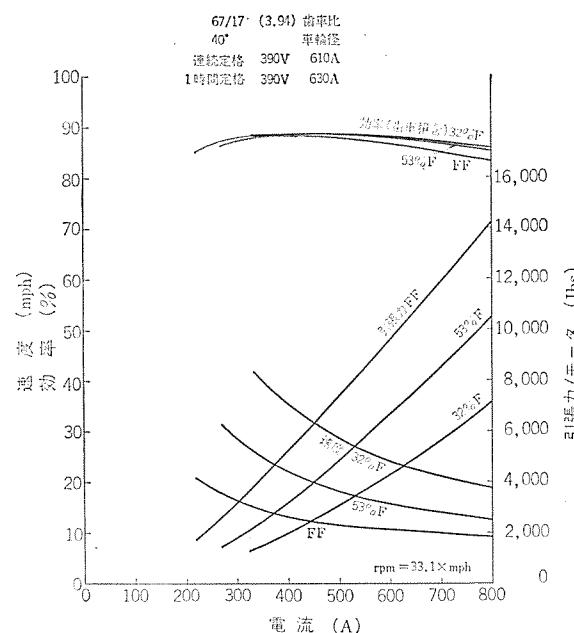


図 5.6 MB-451-AVR 形主電動機特性曲線
Characteristic curves of type MB-451-AVR traction motor.

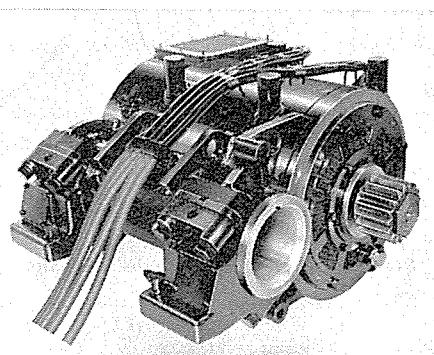


図 5.7 MB-451-AVR 形主電動機
Type MB-451-AVR traction motor.

および保守の簡易化を図っている。たとえば、弱め界磁接触器には 3 極の接触器を使用し、3 回路 2段の弱め界磁回路を 2 個の接触器 (定格は DC 50 V 300 A MD-300) で構成している。

(2) 一方、発電ブレーキの制御回路にトランジスタ増幅器および磁気増幅器などを使用した新方式を採用した。

(3) 主幹制御器 (KL-S 216) は、現有車との重連運転を考慮して運転操作方式を現有車のものと合わせてある。力行制御のスロットル、ハンドル、ブレーキ制御用のセレクタハンドルおよび逆転ハンドルを備えるほか、発電ブレーキ指令用パタン発生器を付属している。

(4) 各制御機器の補助接点は、すべて防じん(塵)構造にして、接触不良を防止している。

(5) 電空単位スイッチ (UP-643 C)、逆転器 (RV-8 LA-12 CA)、制動転換器 (DE-8 MA-12 CA) などの主回路用制御器の定格電圧・電流は、それぞれ DC 1,500 V および 600 A である。

(6) 弱め界磁繼電器 (LA-S 618/S 619)、接地繼電器・過電流繼電器 (UT-S 569 Y)、空転繼電器・ブレーキ警報繼電器・補助過電圧繼電器 (UG-S 8106 A) および補助制御繼電器 (SD-11) などの電磁繼電器およびリードリレーが使用されている。電磁弁は、VM-S 2117-CE に統一した。

(7) 制御回路電圧は DC 75 V、制御空気圧は 5 kg/cm² である。

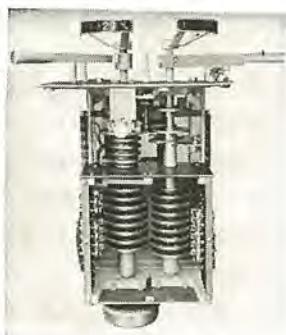


図 5.8 主幹制御器
Master controller.

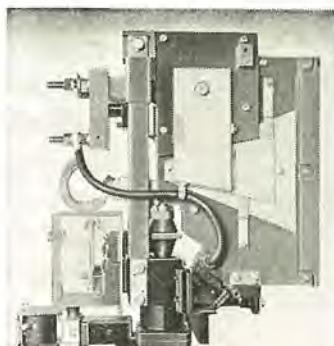


図 5.9 電空単位スイッチ
Power contactor.

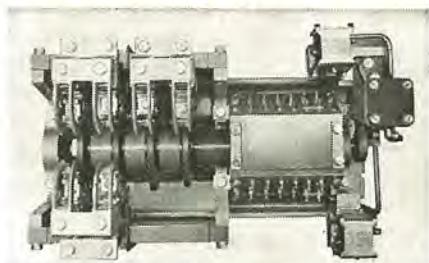


図 5.10 逆転器
Reverser.

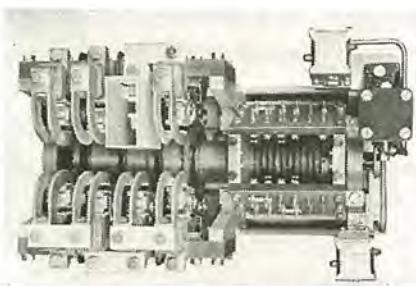


図 5.11 制動転換器
Power brake switch.

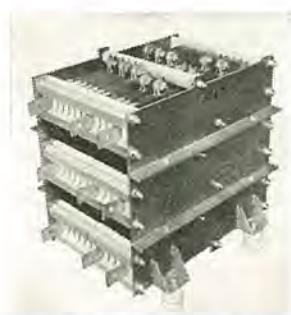


図 5.12 弱め界磁抵抗器
Field shunting resistor.



図 5.13 磁気増幅器
Magnetic amplifier.

5.5.2 主要制御器

主幹制御器の外観を図 5.8、電空単位スイッチを図 5.9、逆転器を図 5.10、制動転換器を図 5.11、弱め界磁抵抗器を図 5.12、磁気増幅器を図 5.13 に示す。

6. 制御方式

6.1 特長

(1) この機関車の動力伝達方式は、主交流発電機のブラシレス交流励磁機の励磁制御により、力行時の定出力制御、機関の回転数制御、発電ブレーキの他励界磁制御などを行なうが、直流発電機方式の現有機関車と重連運転ができるように制御方式が構成されている。

(2) 力行ノッチ数は 8 ノッチで最終 4 ノッチは自動弱め界磁制御を行ない、主交流発電機の電圧制御とあいまって幅広い速度制御が行なわれる。機関車は最高速度まで最大出力を出すことができる。

(3) 機関の回転数制御は、調速機の速度調整ソレノイドの組合せによるが、その指令を利用して、励磁機の界磁が機関の回転数に比例して変化するようにした。

(4) 発電ブレーキの制御には、主幹制御器により、ブレーキバーン電圧を指令して励磁機の界磁制御を行なうが、連続制御が可能である。発電ブレーキ電流が過大にならないように、ブレーキ電流に比例した信号を負帰還する。

(5) 機関は、蓄電池から供給される 2 台のスタートモータによって始動される。機関始動後、補助交流発電機は定電圧制御され、32 セルの鉛蓄電池を浮動充電する。

6.2 力行時の制御

力行制御回路の原理図を図 6.1 に示す。

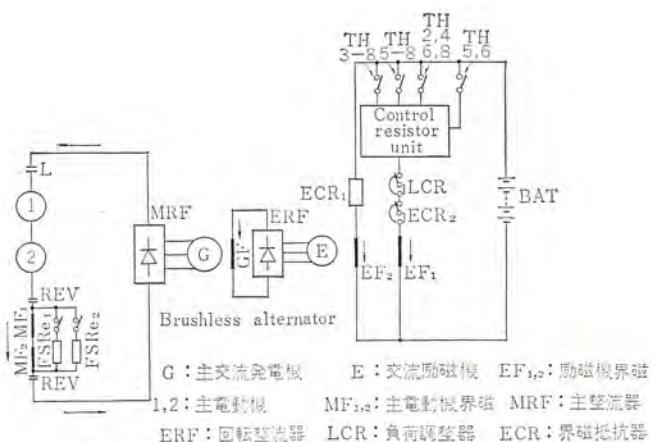
交流励磁機には 2 界磁巻線があり、その一方は一定励磁され、他方の界磁は機関出力（速度）に応じた励磁が主幹制御器から与えられる。この可変励磁制御は、機関の速度指令線を利用して、制御抵

抗ユニットの組合せ制御で行なわれるが、機関回転数が指令速度に達するには、時間遅れがあるので、可変励磁制御回路に時素を使用して機関の過渡的な過負荷を防止している。

主交流発電機は、その電機子反作用による大きな垂下特性を持つので、定出力制御上に有効であるが、その励磁容量はレップ式直流発電機のそれよりもかなり大きいので、励磁機の 2 界磁巻線励磁方式は、機関調速機連動の負荷調整器の容量増大を防止するのに有効である。

主交流発電機の最大発生電圧は、励磁機界磁の最大励磁電流によって制限され、各ノッチによって変わる。定出力制御は、負荷調整器によって励磁機界磁の励磁量を調整して行なわれる。このようにして主交流発電機の出力は、高ノッチ域で定出力に制御され、機関発生出力から補機馬力を差し引いた全出力を吸収する。

主電動機の界磁は、機関車の高速域で回路電圧および電流を検出して、弱め界磁繼電器により自動弱め制御される。



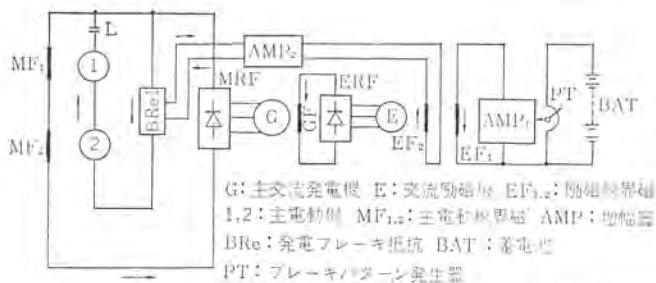


図 6.2 発電ブレーキ回路 Dynamic braking circuit.

6.3 発電ブレーキ制御

図 6.2 は発電ブレーキの原理図である。

発電ブレーキの場合、2台が直列接続された主電動機電機子群は、ブレーキ抵抗器に接続され、全直列接続された界磁は、主交流発電機から主シリコン整流器を介して他励磁される。

主幹制御器にブレーキパターン発生器を設け、このパターン信号はトランジスタ増幅器で増幅されて交流励磁機の一方の界磁に供給される。励磁機は、主交流発電機の界磁を励磁するので、主交流発電機は電圧を確立し、主電動機の界磁は主シリコン整流器を介して他励磁される。この他励制御は、機関車単機および重連運転の場合に連続制御できるので、主電動機を発電機としてブレーキ電流を発生させ、これをブレーキ抵抗器中で消費させて、任意の抑速バランス速度を得ることができる。

励磁機の他方の界磁は、ブレーキ抵抗器のブレーキ電流に比例して差動励磁されるようにし、ブレーキ電流が許容最大値を越えた場合、この負帰還回路によって、自動的に許容電流以下になるように制御される。すなわち、この差動励磁量は、ブレーキ電流が許容電流値を越えると増加して励磁機の出力電圧が低下し、ついには主交流発電機の出力電圧も減少するので、主電動機の他励界磁電流が減少する。このため、主電動機の発生するブレーキ電流が減少することになる。このようにして最大ブレーキ出力は、主電動機およびブレーキ抵抗器の許容最大電流以内に自動的に調整される。

発電ブレーキ制御回路の設計にあたり、励磁機の励磁電流と、主交流発電機の発生電圧との関係は、電機子反作用の影響などで直線関係が成立せず、また、主電動機の他励電流と発生電圧との関係は、磁気飽和の影響で非直線特性になることなどを考慮する必要がある。

ブレーキ電流の負帰還回路に磁気増幅器を使用し、主回路一制御回路の絶縁とともに、増幅作用も得ることができると好結果が得られた。



図 6.3 2,200 HP ディーゼル電気機関車
2,200 HP diesel electric locomotives.

発電ブレーキ制御を行なう際には、空気ブレーキを自動的に開放して機関車の動輪のスキッドを防止している。

6.4 拘束回路

拘束発電機も交流発電機であり、拘束回転機、制御回路、灯回路、ヒータおよび蓄電池充電回路等に整流回路を介して供給する。回転数変動および負荷変動に対して、出力電圧をほぼ一定に保つため、トランジスタ形自動電圧調整器を使用しているが、制御容量を軽減するため、拘束交流発電機を回転界磁形の複巻方式にして、分巻界磁のみを制御する。初期励磁回路を設けて電圧確立を容易にしている。

機関の始動は、蓄電池を電源とする2台のスタータモータによって行なわれるが、主交流発電機に取り付けられているリング歯車を駆動する。

主電動機用送風機は、主交流発電機の歯車箱の補機駆動軸より駆動され、主電動機および主シリコン整流器を冷却する。空気圧縮機、機関放熱器用送風機などの主要拘束回転機は、機械駆動式である。

6.5 保護および警報回路

(1) 主回路の接地および過電流の検出は、同形式の繼電器によって行なわれ、主回路が開放されるとともに、機関はアイドル回転になる。

(2) 空転検出はリードリレーで行なわれ、警報と同時に主交流発電機の出力低下および自動砂まきが行なわれる。

(3) 発電ブレーキ回路の過電流に対しては、ブレーキ電流負帰還回路が設けられているほか、リードリレーを使用した警報繼電器が警報を出すと同時に、主交流発電機によって主電動機の他励界磁電流を自動的にしほる。

(4) 拘束交流発電機の保護は、無電圧繼電器による警報、および過電圧繼電器による拘束発電機回路の開放による。

(5) 制御空気圧の低下は、気圧スイッチによって検出され、機関のアイドル回転および主回路の開放が行なわれる。

(6) 機関保護として、潤滑油油圧低下および冷却水位低下を生じた場合に警報を出すとともに、機関を停止させる。冷却水過熱の場合に警報を発する。過速度の場合にはガバナトリップ機構によって機関を停止させる。

(7) 低圧回路は、NFBおよびヒューズによって保護される。

7. む す び

交流発電機/整流器式動力伝達方式は、その出力規模が大きくなるほど、従来の直流発電機方式と比較して、種々のメリットが顕著になる。今回、2,200 HP クラスのディーゼル電気機関車の電気機器を設計・製作したが、最近の機関車出力の増大化および高速化傾向に対応してこのシステムの発展を期待したい。

なお今回の輸出形態は現地の車両メーカーに対して、システムおよび電気品を供給する方式であるが、今後の車両輸出の一つの方向を示すものであろう。

最後に、このシステムの設計にあたり、いろいろご指導をいただいたかたがたに対し厚くお礼申し上げる次第である。

参 考 文 献

- 高橋、平尾、ほか：三菱電機技報、42、739～747（昭43）
- 平尾、森島：昭和48年電気学会全国大会、878

MELCOM 7500 を用いた国際電信電話(株) AUTOMEX システムの開発と試験

坂 和磨*・藤間 孝雄*・太田 元*
飯川 昭一*・田窪 昭夫*

Development and Test of the KDD AUTOMEX System

Kamakura Works Kazuma Ban・Takao Fujima・Hajime Ôta
Shôichi Iikawa・Akio Takubo

The International Telegraph and Telephone Co. (KDD) has begun a message switching service called International Automatic Message Switching Service in March, 1973. The AUTOMEX System has been constituted of a duplex system of MELCOM 7500 computers with MELCOM-RTCS software.

This report makes a description on various test tool used in the development and test phase of AUTOMEX software system.

1. まえがき

昭和46年公衆電気通信法の一部改正にもとづいて、国際電信電話株式会社が提供される国際間におけるデータ通信サービスの一環として、メッセージ自動交換サービスが本年3月から開始された。このメッセージ自動交換サービスは、国際オートメックスサービスと呼ばれ、利用者の海外および国内の専用回線をKDDのAUTOMEXシステムに収容し、これらの回線をつうじ流れるメッセージを自動的に交換する業務である。

AUTOMEXシステムはMELCOM 7500電子計算機システムの二重系で構成され、ソフトウェアにはMELCOM-RTCS(Real Time Communications System)が使用されている。MELCOM-RTCSは標準ソフトウェアと業務内容に依存して作成されるソフトウェアから成っており、今回AUTOMEXシステム用のソフトウェアが新規に開発された。

ソフトウェアの開発と試験を短期間に能率よく進めるために、我々が試みた種々の試験方法について以下に述べる。

2. ソフトウェアシステムの構造

MELCOM-RTCSは、蓄積交換形電文処理システムで、そのソフトウェアシステムは、図2.1に示されているように、電文交換の迅速性、電文保護の信頼性を主眼として設計されている。

システムで処理される電文は、すべて、高速ディスク(RAD:Rapid Access Disc)と、磁気テープに二重に記録され、電文保護の安全性を高めるとともに、との再送処理を助けている。また、電文は、待ち行列を介して各種電文処理プログラムに受け渡され、同時に複数個の電文の処理が進められることにより、迅速性およびスループットの高揚がもたらされている。

回線からの送受信電文は、入力ハンドラ・出力ハンドラ(総称してTSS:Telecommunication Support System)で処理される。受信

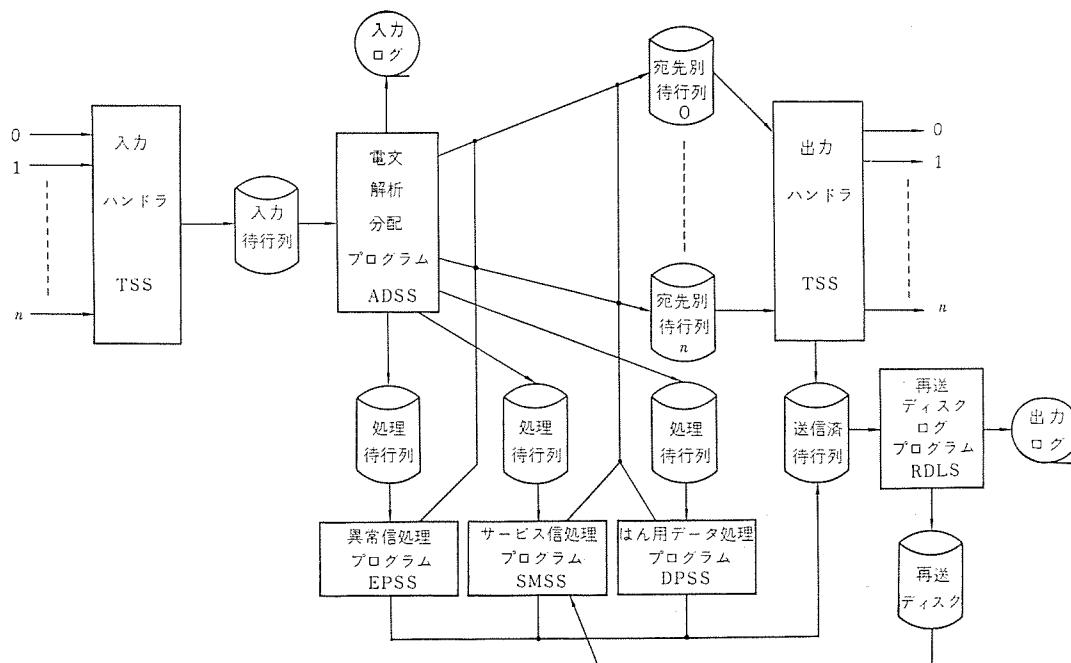


図 2.1 MELCOM-RTCS による電文交換処理の流れ
Message processing flow of MELCOM-RTCS.

電文は高速ディスクに記録されると同時に、電文解析・分配プログラム(ADSS: Activity Distributor Sub System)の入力待行列に登録される。

ADSSは電文を磁気テープに記録し、電文のヘッダを解析する。通常電文はそのまま、宛先コードに従って対応する宛先別待行列に登録する。異常電文および各種サービス信は、それぞれ、その処理要件に応じて、種々の電文処理プログラムの処理待行列に登録される。

電文処理プログラムは、次のサブシステムに分かれている。

(1) 異常信処理プログラム(EPSS: Error Processing Subsystem)
受信電文の各種エラーおよび回線、端末の異常に伴う処理を行なう。

(2) サービス信処理プログラム(SMSS: Service Message Sub System)——各種サービス信のうち、スーパーバイザコマンドや、レポート信のごとく、速い応答を要求する電文を処理する。

(3) はん用データ処理プログラム(DPSS: Delayed Processing Sub System)——電文の再送を要求するサービス信など、SMSSで処理される以外のサービス信を処理する。

宛先別待行列にある電文は、出力ハンドラにより回線に送出されたあと、のちの再送に備えて、電文の後処理を行なう再送ディスクログプログラム(RDLS: Retrieval Disc Logging Sub System)の送信済み待行列に登録される。

RDLSは、送信済み電文を再送ディスクに書き移すと同時に、磁気テープに出力ログをとる。

3. ソフトウェア試験

MELCOM-RTCSの各プログラムは、互いに独立で、単に待行列を介して接続されている。これは、各プログラムの併行処理を可能にするとともに、試験という立場からも、その容易性・簡潔性の面で、大いに寄与している。

ソフトウェア試験は、大別して、MELCOM-BPM(Batch Processing Monitor)での試験と、MELCOM-RTCSのうえでの試験の2種類に分けられる。

BPMでの試験は、各プログラムの部分(モジュール)を指定して容易にできるようになっている。

RTCSでの試験は、さらに各プログラムの個別(ユニット)試験と、各プログラムを組合せたマルチユニット試験に分けられる。

3.1 モジュール試験

プログラムのモジュールをBPMで試験するため、図3.1に示すように、二つのデバッグパッケージが用意されている。

(1) モジュールテスト(XMMT)

デバッグに必要な制御情報および、モジュールへの入力情報をカード読取装置から読み込み、モジュールの実行状況をトレースし、結果をラインプリンタに印出する。

(2) RTCSシミュレータ(DEBUGGER)

RTCSエグゼクティブをシミュレートするパッケージで、プログラムとRTCSエグゼクティブでのデータの交換を模擬し、それをラインプリンタに印出する。

上にあげた二つのデバッグパッケージとともに、BPMに用意されているデバッグプロジェクトを併用することにより、試験をより完全に進めることができとなる。

XMMTでは、カードで指定されるとおり初期データをセットし、指定されている番地へコントロールを渡す。プログラム実行中における

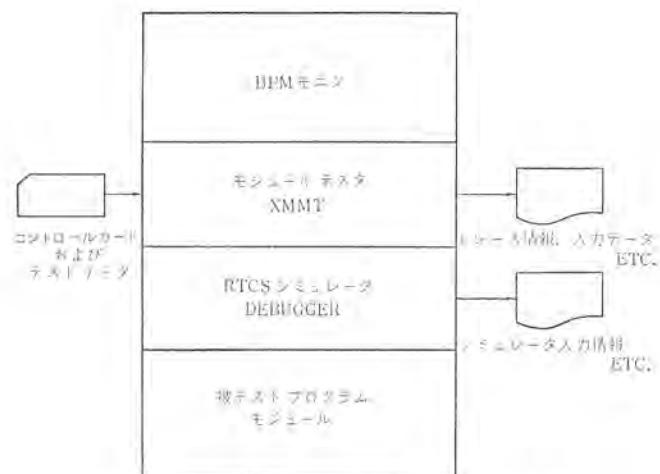


図3.1 モジュールテストの方法
Procedure of module test.

RTCSエグゼクティブへの制御情報は、その都度、DEBUGGERにより、ラインプリンタへ出力される。実行中におけるプログラムの中間データ類は、BPMのデバッグプロジェクトを用いて、ラインプリンタへ印出される。

XMMTには、任意の点でプログラムの実行を停止する機能が設けられている。再びXMMTへ制御の返されたとき、新たにプログラムへの初期データをカード読取装置より読み込み、それを指定された領域にセットし、プログラムの実行を行なうこともできる。

あらかじめ、XMMTとプログラムのコントロールの受け渡しを細かくスケジュールすることにより、プログラムの実行を実際に制した形で動かすこともでき、また、データをいろいろとかえて、プログラムの特定部分をくり返して実行することもできる。

3.2 ユニット試験

入出力ハンドラ、電文処理プログラム、およびバックアップモニタのそれぞれで、異なる試験方法がとられる。

(1) 電文処理プログラムの試験

図3.2に示されるように、電文入力処理をシミュレートするテストデータドライバ(TDD)、電文送信処理をシミュレートするTSSシミュレータと、被テストプログラムをタングルに接続して、RTCSエグゼクティブのもとで動かすことにより、個々のプログラムでの電文の流れを試験する。

TDDは、テスト電文をカード読取装置または磁気テープより読み込み、所定の被テストプログラムの処理待行列に登録し、同時にラインプリンタにモニタ印字する。

TSSシミュレータは、宛先別待行列に登録された電文を読み出し、送信済み待行列に登録し、それをラインプリンタに印出する。

(2) 入出力ハンドラの試験

図3.3に示すように、入出力ハンドラの試験には、その試験専用に用意されているADSSシミュレータ、COCシミュレータ(Character Oriented Communication Controller)、COC用テストデータドライバ(COCTDD)、およびうえで用いられたのと同じTDDが使用される。まず、TDDよりテスト電文を供給することにより、出力ハンドラの試験を行なう。このとき、COCシミュレータおよびその下で動作する端末シミュレータは、その端末の制御シーケンスおよびデータ受信機能をシミュレートする。このシミュレーションに際し、制御シーケンス、受信データなどの必要情報のモニタ印字がラインプリンタになされる。次に、COCTDDを介して、COC/端末シミュレータに入力電文を供給

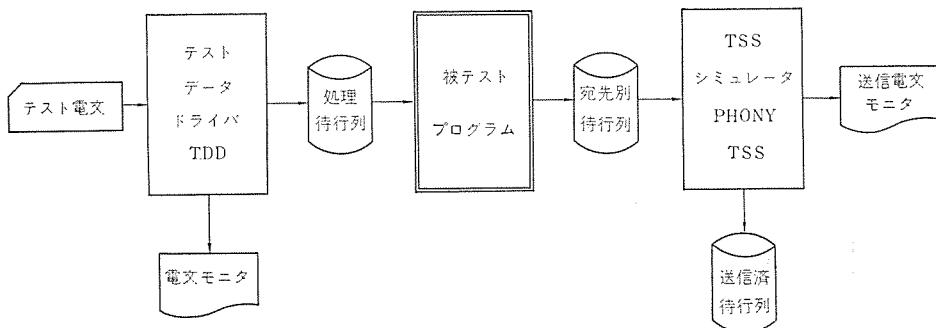


図 3.2 ソフトウェアユニット試験 (1)
Software unit test (application software).

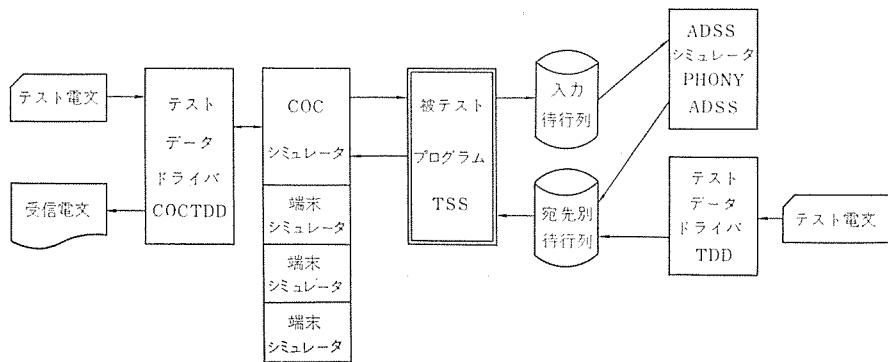


図 3.3 ソフトウェアユニット試験 (2)
Software unit test (communication software).

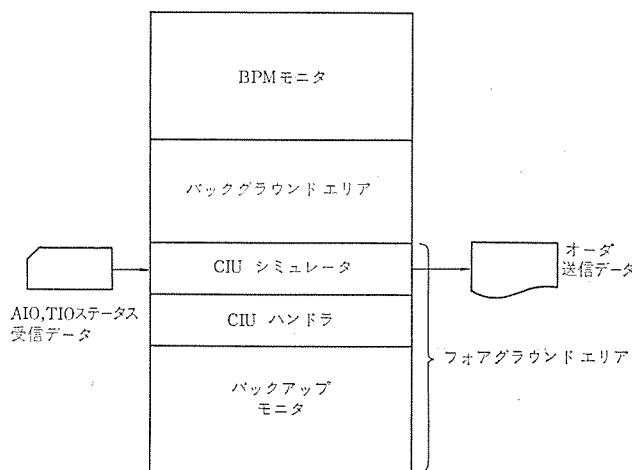


図 3.4 ソフトウェアユニット試験 (3)
Software unit test (CIU handler).

することにより、入力ハンドラの試験を行なう。この入力ハンドラにより受信された電文は、ADSSシミュレータにより宛先別待行列へ中継され、出力ハンドラを介してCOC／端末シミュレータに送られる。以上のパスにより、TSSの試験がひととおり行なえることになる。

COC／端末シミュレータは、正常な制御シーケンスおよび送受信動作をシミュレートするだけでなく、各種の制御シーケンスエラー、および回線障害などを、指定したタイミングで発生させることができ、ほぼ完全なテストを実施することが可能となっている。

(3) バックアップモニタの試験

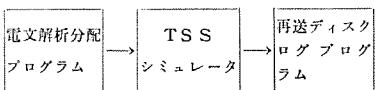
スタンバイ系では、BPMモニタのもとに、オンライン系の状態監視を行なうバックアップモニタが動作する。オンライン系およびバックアップ系を接続するのには、CIU(Channel Interface Unit)が使用される。したがって、このバックアップモニタの試験のためには、この両系間のデータの受け渡しをシミュレートする、CIUシミュレータが用意されている。

CIUシミュレータは、CIUを制御するチャネル制御のシーケンスにまでわたり、テストデータをカード読取装置より読み取り、シミュレートする。また、バックアップモニタからのCIU制御動作を、ラインプリンタへモニタ印字する。

このシミュレータの存在により、二重系の計算機を使用せず、単独でプログラムデバッグを行なうことが可能となっている。

3.3 マルチユニット試験

図2.1のMELCOM-RTCSにおける電文交換処理の流れに見るように、入出力ハンドラ、および各種電文処理プログラムは磁気ディスク上の処理待ち行列によって、互いに接続されている。たとえば、正常交換電文について見れば、一通の電文は、



というように、いくつかのプログラムでの処理を受けて中継交換される。電文はこれらのプログラムの間を処理待ち行列によって渡されていくが、電文にはモニタプログラムおよび各処理プログラムで正しく処理されるのに必要な制御情報が付されている。したがって電文が正しく中継交換処理されるためには、各プログラムでの処理を受けるたびに変更される制御情報の内容の受け渡し、すなわち、各プログラム間のインターフェースが正しくなければならぬ。

マルチユニット試験はこのようなプログラム間のインターフェースのチェックを主目的として行なわれる。オートマックスシステムでは、プログラムの性格および並行して開発作業を進めていくというスケジュール上の観点から、マルチユニット試験を、図3.5、3.6の二つの形式に分けて進めた。

3.3.1 マルチユニット試験 (1)

この試験は、次の五つの電文処理プログラム間のインターフェースのチェックをおもに行なう。

- (a) 電文解析分配プログラム
- (b) 異常信処理プログラム
- (c) サービス信処理プログラム
- (d) はん用データ処理プログラム
- (e) 再送ディスクログプログラム

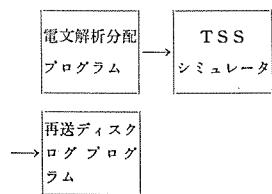
図3.5に示すようにテストデータドライバおよびTSSシミュレータがテストエイドとして使用されている。TSSシミュレータは出力ハンドラの動作をシミュレートするもので、待ち行列に電文があると、それをラインプリンタに印出して電文を送信済み待ち行列に移していく。

試験はテストデータドライバによって電文を入力待ち行列に入れるによって開始され、再送ディスクログプログラムによって、再送ディスクおよび出力ログに書かれることによって終了する。試験の途中経過は電文処理プログラムに埋め込まれたダイナミックスナップショット(後述)によるコアダンプおよびTSSシミュレータが印出する電文によって、チェックされる。

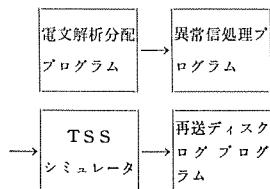
テストデータドライバによって投入される電文の種別によって、次の

ようないくつかの組合せ試験ができる。

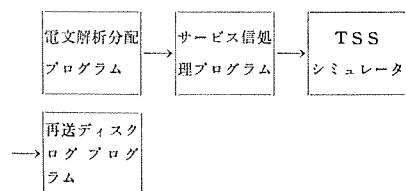
(a) 正常電文



(b) エラー電文



(c) サービス要求電文



3.3.2 マルチユニット試験(2)

この試験では、入力ハンドラおよび出力ハンドラとハードウェアのインターフェースのチェックを主目的としている。図3.6に示すように、電文解析分配プログラムシミュレータおよび試験回線網制御プログラム等のテストエイドが使用される。

電文解析分配プログラムシミュレータは、入力された電文のヘッダ部に含まれる符号の組合せによって、中継表を使わずに宛先回線および多宛先あるいは優先順位を決めて簡単に電文を中継交換する機能を持ったプログラムであり、試験回線網制御プログラムはシステムに組込まれている回線の状態を、カードリーダから読み込んだ指示データに従って制御するためのプログラムである。

試験はハードウェアの回線群に接続された実端末から電文を送信すると、入力ハンドラによって受信され、電文解析分配プログラムシミュレータで宛先別待ち行列に入れられ、出力ハンドラによって宛先回線の実端末に送信されるという流れで行なわれる。

3.4 インテグレーション試験

インテグレーション試験は、マルチユニット試験(1)によってチェックされた各種電文処理プログラムと、マルチユニット試験(2)において動作が確認された入出力ハンドラと一緒に動作させてチェックする最終組合せ試験である。

マルチユニット試験では、入出力ハンドラの入っていないマルチユニット試験システム(1)と、電文処理プログラムの入っていないマルチユニット試験システム(2)は、別々にシステムジェネレーションされたが、インテグレーション試験ではおのののマルチユニット試験で使用したテストエイドは除いて、図2.1と同じ構成でシステムジェネレーションされた。ただし、これ以後の試験では同時並行動作するマルチプログラム相互間の干渉のため、デバッグが困難になるので後述するシステム試験のサポートのためのトレース機能がシステムに組込まれて十分に活用された。

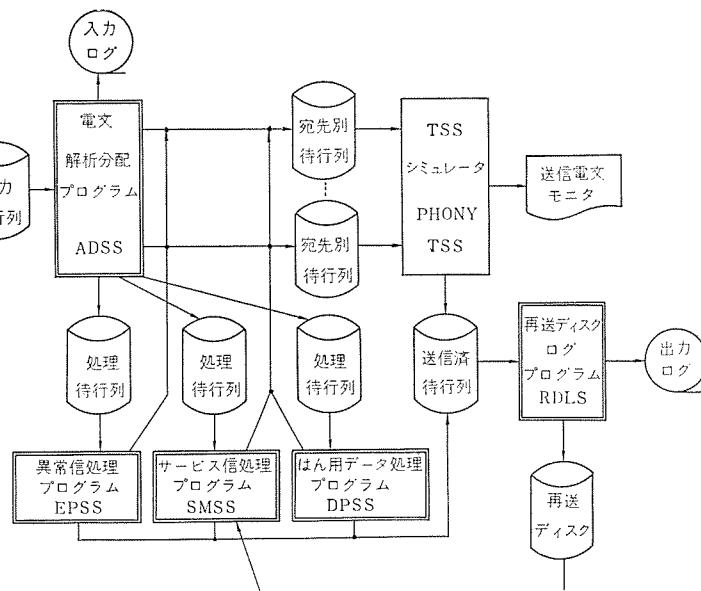


図3.5 ソフトウェアマルチユニット試験(1)
Software multi-unit test (application software).

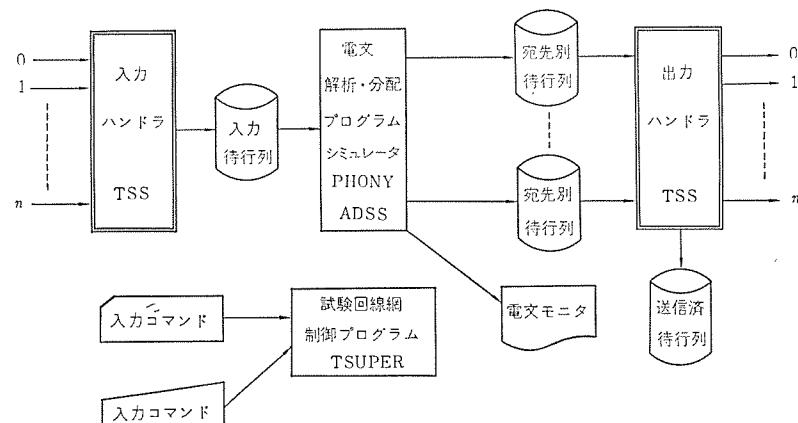


図3.6 ソフトウェアマルチユニット試験(2)
Software multi-unit test (communication software).

また、インテグレーション試験のためのシステムジェネレーションの段階で初めて全ソフトウェアを完全な形でそろえねばならず、各種のシステムパラメータ類も統一して定義され、相互に矛盾がないことが確かめられる。

このように、インテグレーション試験はすべての機能を組んだシステムを使って実端末から電文を入力して行なわれるので、オートメックスシステムの機能仕様はこのテストにおいて一応すべて確認される。

3.5 ソフトウェア試験およびシステム試験のサポート機能

きわめてモジュラに作成され、複雑に入り組んで同時に動作するプログラム群より、システムが構成されている場合、それらのプログラムの動作軌跡、動作状況を適確には(把)握することが重要となってくる。

MELCOM-RTCSでは、エグゼクティブだけでも8レベルのマルチプログラミング状態で動作し、TSSは3レベル、および8レベルのハードウェア割込みルーチンに分かれ、一部は回線単位でのサブタスク動作を行なっている。またユーザプログラムも4レベルに分かれ動作している。したがってこれらマルチプログラミング制御される各種プログラムのタスクスイッチング状況、その他を知ることは、プログラム作成段階、システム試験および実運転に入るすべての段階においてきわめて重要な問題とな

っている。

このため、MELCOM-RTCS では、次に述べる各種トレース機能、プログラムモニタ機能が準備されており、ソフトウェアのデバック時間の短縮に大いに役立っている。

3.5.1 トレース機能

トレース機能としては、エグゼクティブの下で制御される各種プログラムの動作状況を示す「イベントトレース」、TSS の 100 以上に及ぶモジュールの動作状況を示す「モジュールトレース」、TSS で使用される各種バッファの使用状況を記録する「バッファトレース」、磁気テープに残される各種ジャーナルの状況をオンラインでトレースする「ログトレース」の 4 種が設けられている。

(1) イベントトレース

エグゼクティブの主要部分に埋め込まれたトレースリクエストに応じて、次に列挙する各種情報がプッシュダウンスタックに残される。

(a) 各種エグゼクティブサービスコール：サービスコールの種別、リクエストを出したプログラムのレベル、そのロケーション、リクエストパケットロケーションなどの情報が残される。

(b) タスクスイッチング状況：新しいリクエストに応じてデスペッチされるとき、内部的なリクエストの完了により、ウェイトの解けるとき、上位レベルによりサスペンドされるとき、およびサスペンドの解かれるときなどの各種タイミングで、プログラムレベル、デスペッチロケーション、パケットロケーションなどの情報が残される。

(c) I/O デバイスコントロールトレース：各種周辺装置に対する起動、終了割込みの状況を、デバイスアドレス、ステータス等を合わせて記録する。

(d) その他：クロック割込み、オペレータコンソールからの割込み、その他エグゼクティブ内でのタスク制御情報の変更等のタイミングで、各種必要情報が残される。

(2) モジュールトレース

TSS は、通信制御装置よりの割込み処理、プログラム制御による割込み処理、各種はん用サブルーチン群、各種 I/O オペレーション終了処理ルーチン群、端末ハンドラモジュール群等、約 100 個に及ぶモジュールで構成されており、それがきわめてからみ合って動作することになる。これの障害解析はきわめて多難であり、その再現性のむずかしさにより、障害発生時に、できる限り正しく動作状況を把握することが要求される。

このため、TSS 専用のモジュールトレース機能が準備されており、メッセージ送受信に伴うモジュールの流れを適確に捉えることが可能となっている。ここでは次の情報が残される。

- (a) モジュール識別符号
- (b) モジュールの動作レベル
- (c) モジュールの処理している回線番号
- (d) 回線の制御ステータス情報
- (e) モジュール固有のキー情報

このモジュールトレースは、そのトレース情報を残すか否かを、回線単位に制御できる。これにより、特定端末のタイプの端末制御ロジックのみをトレースすることが可能となり、より効果的な使用が行なえる。

(3) バッファトレース

TSS ではメッセージの送受信に使用されるラインバッファのみならず、ディスク等へのステーディングに使用されるバッファ、各種コントロールバッファをすべてプールしておき、必要に応じて、ゲット/フリーを行なうダイ

ナミック管理方式を採用している。

このため、特にプログラム開発の初期においては、バッファの解放忘れ、解放したバッファの二重使用等の問題が発生する。このような問題を解決するため、次の使用状況記録および、チェックを行なっている。

(a) バッファを解放したことの履歴

(b) フリー バッファプールのリンクエージチェックことに後者の機能は、かなりのオーバヘッドを生じる可能性があるので、それを行なうか否かを、ダイナミックに制御する機能を設けている。

(4) ログトレース

電文交換等の処理を行なった結果、システムの動作に何らかの疑問点の発生することがある。このような場合、システムでの処理動作状況は、入力ログ、出力ログ等のジャーナルデータが磁気テープに残されているので、そのデータに基づいて、システムの動作状況をトレースし、再現させることが求められる。

このため、オンラインでジャーナルテープを検索し、条件に合致するログデータのみを抽出し、そのデータを基に、動作状況を再現することが必要となる。

このログトレース機能は、上記の目的のために設けられたものである。

3.5.2 ダイナミックプログラムモニタ機能

プログラムモニタ機能としては、プログラムの実行状態の監視および修正をダイナミックに行なえる次の各種機能が準備されている。

(1) ダイナミックパッチ

プログラム実行時に外部からパッチ情報が与えられておれば、それに基づいて、パッチ（プログラム修正）を入れることができる。

これにより、プログラムライブラリの修正を行なわずに、プログラムを試験的に修正し、テストすることが可能になる。

(2) ダイナミックスナップショット

プログラム実行時、外部からの指定により、スナップショットを指示することができる。これにより、プログラムを特に修正することなく、プログラム実行中隨時必要なところで、スナップショットを行なうことができる。

(3) ディスクファイルダンプ

オンライン処理と並行して、電文待ち行列、各種ファイル等のダンプを隨時行なうことができる。

4. ソフトウェア総合試験

AUTOMEX システムではシステムの定性的・定量的評価を目的として、種々の面から約 3 カ月にわたって試験が実施された。以下ではこれらの試験の概要を、1) 運転試験、2) 負荷試験、3) 性能評価試験の 3 項目に分けて述べる。

4.1 運転試験

AUTOMEX システム用オンラインプログラムは、モジュール試験からインテグレーション試験にわたるソフトウェア試験によって一応テストされてきたが、オンラインシステムの動作はこの運転試験によって総合的に確認される。

AUTOMEX システムの運転試験は次の 2 点を主眼に行なわれた。

(1) オンラインプログラムの総合デバッグを通じてシステムの安定性を向上させる。

(2) 二重系運転、システム回復処理等を繰り返し行なわせてか（稼）動性向上のためにシステムが持っている諸機能の定量的評価を行な

う。

システム運転試験には実システムと同程度のトラフィックをかける必要があるが、回線を通じて数多くの端末を入出力を行なうオンラインリアルタイムシステムではデバッグあるいはシステム評価の実施に実際の端末を使用することは人手を多く要し、また投入するトラフィックのコントロールも困難である。

AUTOMEXシステムはデュプレックスシステムで予備のCPUを有するので、これを図4.1のようにCOC対向で接続し予備側のCPUをトラフィックジェネレータとし被テストシステムに擬似的な呼を発生させる方法が考えられた。

トラフィックジェネレーションシステムは図4.2に示すように構成されている。モニタプログラムおよび入出力ハンドラは被テストシステムと同じものが使われるが、電文処理プログラムのおもな機能は次のとおりである。

(a) MTまたはCRからテスト電文を読み込んで電文プールにセットする。

(b) 宛先回線ごとに送信間隔の時間をコントロールする。

(c) 送信済みの電文に送信時刻を付して送信ログに記録し、電文は電文プールに戻す。

(d) 被テストシステムで交換処理された電文を受信し、受信時刻を付与して受信ログに記録する。

4.2 負荷試験

4.2.1 送信トラフィック

トラフィックジェネレータは前述の運転試験に用いられるとともに負荷試験にも使用されるので、單一回線モード(Sモード)、通常試験モード(Nモード)およびオーバランテストモード(Oモード)の三つのモードがある。SモードとNモードでは実際のトラフィックをシミュレートするために、各回線上の電文の到着がポアソン分布になるようにタイミングをコントロールしている。試験の開始に先立ち運転者は、次のトラフィックに関するパラメータをコンソールターミナルおよびカードに入力する。

(a) テストモード

(b) トラフィック量 α (アーラン/回線)

(c) 平均電文長 L (キャラクタ数)

(d) 回線数 n (回線)

(e) テスト回線指定 ABLE/DISABLE

上記のパラメータ指定に従ってトラフィックジェネレータは送信トラフィックを次のようにコントロールする。

ある回線に着目した場合平均保留時間 $E(h)$ と平均空き時間 $E(V)$ 、呼量 α の間に次の関係がある。

$$\alpha = E(h) / [E(h) + E(V)]$$

したがって $E(V)$ は次式によって計算される。

$$E(V) = E(h) \times (1 - \alpha) / \alpha$$

ここで平均保留時間 $E(h)$ は回線の伝送速度と電文長によって決まる。いま回線の伝送速度が 75 BPS、平均電文長が L キャラクタであるとすると、1文字は 7.5 単位であるので

$$E(h) = (7.5/75) \times (L + \alpha) \text{ 秒}$$

である。ここで α は電文に付される ヘッダ

およびエンタの字数によって決まる一定値である。

したがってある回線上で電文を送信して、次に電文を送信するまでの周期の平均値 $E(t)$ は次のように計算される。

$$E(t) = E(h) + E(V)$$

ポアソン分布のトラフィックをジェネレートするときは平均空き時間 $E(V)$ を乱数で修飾して空き時間を制御している。

トラフィックジェネレータプログラムは電文プールから電文をある回線の宛先別待行列に入れると、その回線に対して次回に電文を入れるべきまでの時間を前記の $E(t)$ によって算出しタイマにセットする。

AUTOMEXシステムのトラフィックを見ると平均電文長を400字として一日の入電文取扱通数は40,000通/日であるので、平均時トラフィックは約1,670通/時、最繁時トラフィックは集中率10%といわれているので4,000通/時であり、重負荷状態のトラフィックは6,000通/時と考えられる。

トラフィックジェネレータで上記のトラフィックを発生させるには、たとえば100回線をCOC対向で使用するとすれば4,000通/時のトラフィックは回線当たりに換算すると40通/時となる。75 BPSの回線でフルスピードで電文を送信すると400字の長さの電文は90通/時まで送信できるので、40通/時のトラフィックは $\alpha = 40 / 90 = 0.44$ (アーラン) のトラフィックとして規定できる。

4.2.2 データ解析プログラム

トラフィックジェネレータで出力された送受信ログにはすべての送受信電文が時刻を付されて記録されているので、これをオフラインで解析

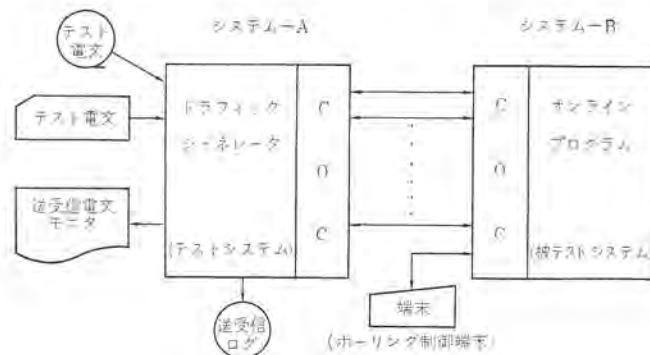


図 4.1 ソフトウェア総合試験
Total software system test.

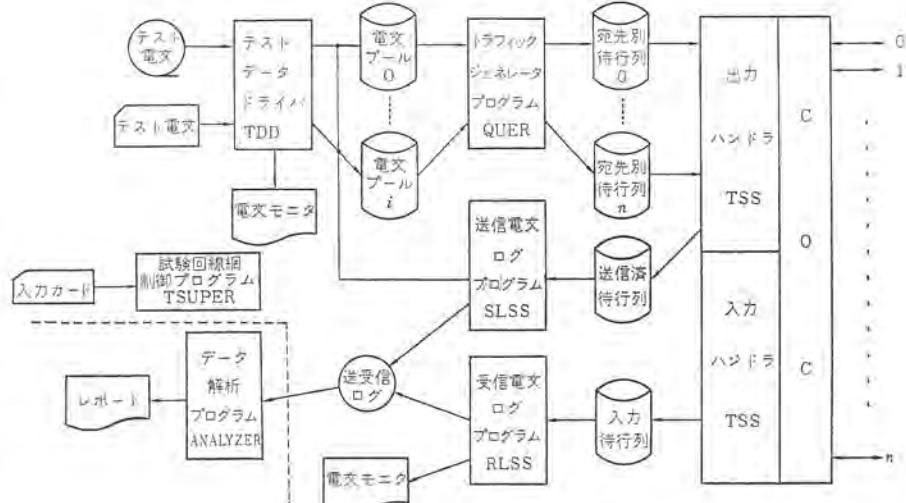


図 4.2 トラフィックジェネレーションシステムの構成
Configuration of traffic generation system.

しリストとして出力することができる。

解析プログラムで出力するリストには次のようなものがある。

- (a) 送受信つき合せリスト
- (b) レスポンスタイムリスト

4.3 性能評価試験

システムの機能試験を進めるとともにシステムの性能を各方面から測定することは、システム設計の評価および将来の拡張性を知ることなどのことよりぜひ必要とされる。このため MELCOM-RTCS には以下に述べる各種測定機能が埋め込まれており、システム性能評価試験が有効に行なうことが可能となっている。

4.3.1 CPU 利用率

CPU (中央処理装置) の利用率はコンピュータシステムのかなめとなる値である。このためマルチプログラミングの対象となる個々のタスクごとに次のデータを収集している。

- (a) タスクスイッチングの回数
 - (i) 新しいリクエストによるデイスパッチ
 - (ii) ウェイト条件の解けたことによるデイスパッチ
 - (iii) サスペンド状態の解けたことによるデイスパッチ
- (b) タスクの走行時間
- (c) タスクがウェイトしている時間
- (d) タスクがサスペンドされている時間

以上のデータを総合することにより全体での CPU 利用率および各種のデータを得ることが可能となっている。

4.3.2 チャネル/デバイス利用率

RAD (固定ヘッドディスク)、磁気テープ等のアクセスに伴う次のデータを収集することができる。

- (a) アクセス回数
- (b) アクセスタイム

MELCOM 7000 はすべてのデバイスをマルチプレクサチャネルに接続するためチャネルの占有率は通常問題とならない。すなわち個々のデバイスには専用のチャネルが設けられていると考えてよい。したがってここではアクセス回数およびアクセスタイムより個々のデバイスの利用率を求めるだけで十分である。

4.3.3 バッファ利用率

TSS で使用する各種バッファの使用状況を収集する機能が入れられている。これには次のものがある。

- (a) バッファの使用率が一定限界を越えた回数
- (b) バッファの使用率が一定限界を越えている継続時間
- (c) バッファオーバーロードの発生回数

以上のデータをそのバッファの種類ごとに収集している。

4.3.4 電文待行列の状況

電文はシステム中では各種の待行列として存在している。この待行列の状況について次のデータを収集することができる。

- (a) 各種待行列中の電文数
- (b) 待行列に対するキューリング等の処理時間

4.3.5 電文に関する統計データの収集

交換される電文について次の各種統計データを収集することができる。

- (a) 送信/受信電文数
- (b) 送信/受信文字数
- (c) 伝送制御上の割込み回数
- (d) 総送受信文字数 (伝送制御シーケンスも含む)

5. むすび

以上述べたような試験はプログラムの試験および性能評価を効果的に行なうことを可能にしたもので、異常等通信のあらゆる形態を含むシステム試験については現時点では実端末等を併用して行なわざるを得ず、さらに本方法を発展させる必要があろう。

国際オートメックスシステムは47年12月以降24時間試運転を行ない、48年3月下旬より営業運転に入っており、現在までのところソフトウェアの原因によるダウンはきわめてまれな状況にあり、安定したか動状況を確保している。

これはひとえに国際電信電話株式会社のオートメックス担当者をはじめとして、三菱電機(株)鎌倉製作所ソフトウェア技術部の関係者一同の協力の賜であり、紙上を借りて感謝の意を表したいと思う。

現在このMELCOM-RTCSシステムにトランザクション処理オプションを追加開発中である。ここにおいても各種ソフトウェア試験サポート機能を開発中であり、いずれ発表する機会を得たいと考えている。

新雷観測レーダシステム

西本一成*・有川弘朗*
近藤輝夫**・山本悌三**

Thundercloud Warning System

The Tokyo Electric Power Co, Inc. Kazushige Nishimoto • Hiroaki Arikawa
Mitsubishi Electric Corp., Communication Equipment Works Teruo Kondo • Teizo Yamamoto

A lightning radar has been in operation at Tabata load dispatching office as practical application since 1971. It is in the state of original design for trial and has a little inadequate performance for practical purposes. It needs improvement for the sake of geographical restriction with the place of radar setup. On the other hand a radio tower for multipurposes was built at the end of 1972 on the head office of the Tokyo Electric Power Co., and a new lightning observation radar system was constructed for the installation on this new location. The improved system has taken up the most up-to-date, advanced component parts and materials for the betterment of performance. Circumspect attention has been given to the construction work from the viewpoint of special nature of the installing place.

1. まえがき

昭和42年度から東京電力(株)と当社との共同研究で開発、実用化された雷観測レーダーシステムは昭和48年2月まで東京電力田端系統給電指令所で順調にか(稼)動してきたが、昭和47年末に東京電力(株)の本店ビルが新築され、またこれにともない多目的な無線鉄塔(地上高約200m)も設置されたのを機会に、つぎの理由により本店中央給電指令所に設置場所を移し、本年5月よりか動に入ったので、ここにご紹介する。

(1) 電力系統の中核として全系を総括指令している中央火電指令所が、雷観測レーダーシステムの運用を直接管轄する必要があること。これはまた現在の東京電力(株)の情報伝送系は、本店を中心としたネットワークで構成されているので、情報の発信源を本店にもってすることにより情報伝送系を単純化することができ信頼性を高め、かつ経済的であること。

(2) 後にのべるようによこのシステムは、多目的利用の一環として気象観測の能力も備えているので、台風や豪雨など非常災害時によりいっそう有効に活用することができる。

(3) 地勢上本店に設置するのが有効であること。すなわち現在の田端系統給電指令所に設置した状態では、南西方向約1.5km付近の台地によって観測に障害をきたし、この方向は雷雲がひんぱん(頻繁)に発生する神奈川および沼津方面の約80度の範囲であることから設置場所を本店の鉄塔上に移し、あわせて将来高層建築物が出現しても見通しを確保する必要があること。

工事は機器の設計ならびに工事設計を昭和45年末より開始し、ほぼ無線用鉄塔および建屋の進歩に合わせて機械の搬入据付をおこなってきた。機械の最終搬入は47年12月中旬で、その後48年2月、電波監理局の検査に合格した。

この間、空中線の設置位置の関係や送信電力の強大なことなどから、他の無線局に与える妨害を懸念し、まえもってこの問題を解決しておるために47年10月にレドーム、空中線、空中線制御装置および送信装置を用いて妨害試験をおこない、他局への妨害のないことを見認した。これはレーダの周波数の選定ならばにレーダ側に装着し

た大電力 スピアス 除去 フィルタ によるところが大であった。またこの妨害試験実施に先立ち、最も妨害を受けやすいと考えられた TV 放送用 FPU 装置を日本放送協会より借用し、当社鎌倉製作所においてその被妨害特性を測定し、あわせて レーダ 側に使用すべき スピアス 除去 フィルタ の特性決定をおこなった。この測定のための ラインアップ は図 1. 1 にしめすように FPU 送信機と FPU 受信機を導波管系でつなぎ、導波管系の途中にそう(挿)入した方向性結合器から擬似スピアス 発生源として、RF 信号発生器から、電力をそう入できるようにし、妨害の有無は FPU 受信機に接続した モニタ、ディスプレイ および シンクロスコープ で判定した。測定方法は FPU 送信機からの電力 レベル を減衰器を利用して一定 レベル に設定し、その レベル で信号発生器の周波数と レベル を変化させ妨害の有無を調査した。FPU 送信機の受信機における レベル は -70 , -60 , -40 および -20 dBm のそれぞれで測定し、また信号発生器からの レベル は最大 0 dBm まで印加した。

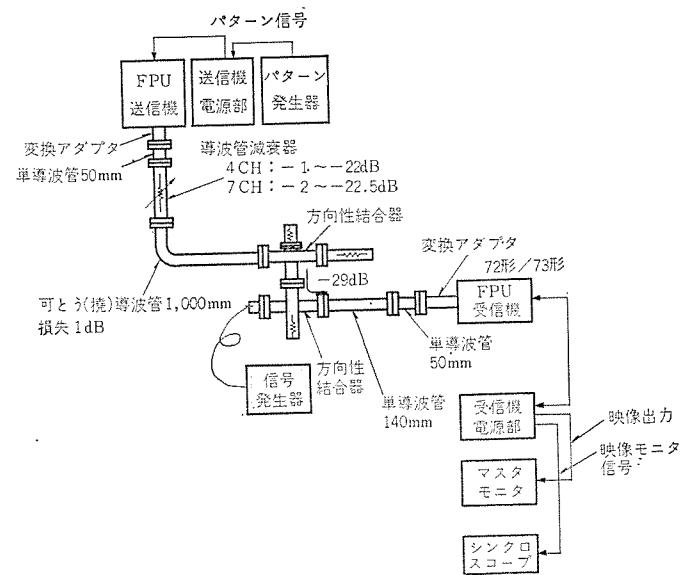


図 1.1 測定回路
Block diagram of interference test set.

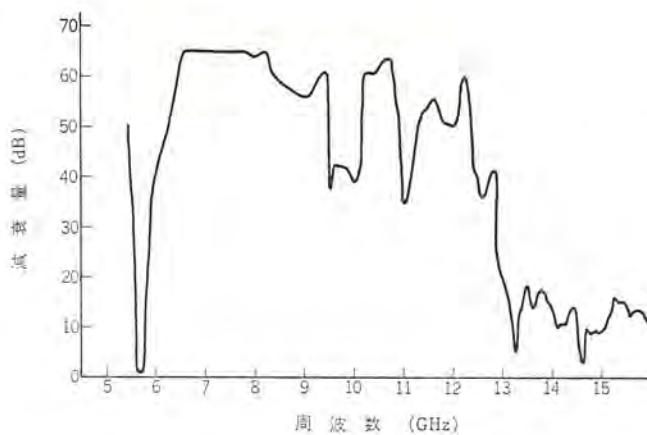


図 1.2 スピアス除去フィルタ特性
Attenuation characteristics of spurious rejection filter.

この結果からレーダに許容されるスピアス発射レベルは、ほぼ FP U の使用周波数では -85 dBm 以下、その付近を除く他の周波数帯では -20 dBm 以下であることがわかった。これにより製作したスピアス除去フィルタの特性を図 1.2 に示す。

このシステムを完成させるにあたり特に留意した点は、上記妨害関係のほか、下記のような事項であった。これらの詳細は順次本文中に述べる。

- (1) システムの操作の自動化を計ること
- (2) 動作を安定にし、かつ長時間運転に耐えるものとすること
- (3) 広範な故障の自動検出と外部への雷情報の自動送出およびしゃ(遮)断の制御
- (4) システムの多目的利用をはかること
- (5) 送・受信装置と空中線間の距離が配置上 約 100 m になるため、この間の導波管による RF エネルギーの損失を最小に抑えること
- (6) 鉄塔に沿って布線するケーブルの本数削減と耐環境性を考慮したケーブルシースの採用
- (7) 直接外気にさらされるレドームおよび工事用材料の耐環境性および防せい(錆)
- (8) レドームの耐風性の確保
- (9) 耐震性を考慮した装置の据付け

最後にこのシステムの雷雲判定の詳細等についてはすでに本誌上に紹介している⁽¹⁾ので、それらの関係については参考願いたい。

2. システムの概要

このシステムは 48 年 2 月まで田端系統給電指令所においてか動していたシステムとまったく同様な原理に基づき、雷雲発生の予知を行なうものであるが、過去 2 年間で得られた運用面における改善要求を盛込んでいた。この項ではこれらの旧システムとの相違点およびハード上の重点事項につき説明する。

2.1 新システムで改善した点

- (1) 性能上の改善点
- (i) 観測距離の拡大

従来は高々度および低高度のいずれの観測高度においても、観測距離は 150 km であったが、これでは猪苗代地域および塩尻地域が観測不能となっていた。これを改善するため高々度での観測範囲のみを 200 km まで拡大した。これにより東京電力管内のほとんど全域をカバーできるようになった。

(ii) 送信電力の増強

上記観測範囲の拡大ならびに後に述べるように送信装置と空中線間の距離の増大に対処するため、送信電力を 60 kW から 175 kW に増強した。

(iii) 発雷ランプ表示器の表示区分の細分化

発雷ランプ表示器は雷情報を多数の支店ならびに発電所等に表示するためのもので、従来は全観測地域を 3 分割して大まかな表示をおこなっていたが、これを 14 分割にし直し、きめ細かい情報のサービスが行なえるようにした。

(iv) 雷観盤および自動通報装置の区分数の増加

観測範囲を 200 km に拡大したことにより、雷観盤の表示区分を低高度雷情報の表示では 140、高々度雷情報の表示では 155 個とした。すなわち高々度の表示区分は 15 個追加したことになる。また自動通報装置の区分数は低高度雷情報については以前と変わりなく 77 個、高々度については 8 個増加させて 85 個とした。

(2) ハード上の改良点

(i) レドームの設置による空中線の負荷軽減と作業性の向上、空中線をレドーム内に収容することにより空中線の環境条件が著しく緩和され、長時間運転を容易にするとともに作業性の向上もはかった。

(ii) 装置の大幅な半導体化

従来は送信装置、受信装置および等エコー装置に真空管を使用していたが、全面的に半導体化をはかり、真空管の使用はマグネットロン、サイラトロン、クライストロン TR 管高輝度変換装置の変換管および CRT のみに限定した。

(iii) 高性能演算增幅器の採用

従来は真空管を用いた演算增幅器であったため安定性、ならびに精度の面で若干問題があったが、今回は半導体による高性能の演算增幅器を採用して上記問題点の改善をはかった。

2.2 システムの基本設計思想

このシステムは次の基本設計思想に基づいて製作した。

(1) 機器は最小限の操作により運転できるように自動操作方式を採用すること。機器の操作にあたっては、複雑な手順を一つ一つ実行しなくてすむように、システムの操作を行なえる場所を通常の指示装置前面の他にもう 1 個所設け、ここからは操作開始のスイッチのみを操作すれば以降の操作は自動的に進行し観測に移行することができる。

(2) 動作の安定化と連続運転

前述したように半導体化ならびに高性能演算增幅器の積極的採用、さらには使用部品の負荷軽減と電源の常時印加により動作の安定化をはかっている。電源の常時印加は電源 オン・オフ 時の過渡状態でトラブルの原因が発生するのを防ぐことを目的としている。

また連続運転への対策としてはか動ひん度の高い機械部品を電気部品におきかえること、短寿命部品をできるだけ長寿命のものにすることおよび保守性の向上をはかってこの目的の実現を目指している。

たとえば機械部品については全面的に無接点スイッチの採用を、短寿命部品についてはたとえば大電力 TR 管を用いたデューブレクサ方式をサキュレータ方式に変えて小電力 TR 管の採用による長寿命化を、保守性の向上については空中線のグリースアップを遠隔操作で容易に行なえるようにするなどが具体的な内容である。これらの対策の結果、本システムの MTBF は大幅に改善された。

(3) 広範な故障の自動検出と外部への雷情報の自動送出および しゃ断の制御

機器の故障を防止し、また故障発生の場合にはすみやかに対策が講じられるように、つぎの故障検知項目とその表示およびブザーを指示装置に設けている。

(i) 各装置の一次および二次電源、低圧直流出力回路のヒューズ断

(ii) 空中線過負荷およびオーバラン(通常の走査範囲から逸脱した場合)

(iii) 空中線制御装置過負荷

(iv) 送信装置過負荷

(v) TR 管電流異常

(vi) 信号処理装置プログラム停止

また本システムでは作成した各種の雷情報を、広範な地域に散在する支店や発電所等に伝送しているので、装置の故障により誤情報が発生した場合には、その誤情報の送出を防ぐため故障の状況に応じて情報送出をしないようになっている。

(4) システムの多目的利用をはかる

通常は、本システムは雷観測の目的のため、一定のプログラムにしたがった運用が行なわれているが、異常気象時には気象レーダとしても運用できるように、気象観測のための機能を備えている。また指示装置に表示されるパターンを撮影するため、ポラロイドカメラおよびフィードが用意されている。

2.3 システム構成

本システムの構成を図2.1に、主要装置の設置状況を図2.2から

図2.6に示す。このシステムでの操作については前述したように指示装置前面で操作できるほかに、中央給電指令所に設けた制御パネルでも遠隔操作でき、このパネルの「運転」スイッチを押すことにより自動的に機器は観測状態に入る。各機器の機能を簡単に述べると、送信装置で発生した5GHz帯のマイクロ波パルスは一度受信装置内のサーキュレータを経由して空中線に導かれ、空間に放射される。一方電波の伝播途中で雷雲により反射された電波は、その一部分がふたたび空中線に捕捉され、受信機内のサーキュレータにより受信装置内に導かれる。

受信装置内でマイクロ波から30MHzのIF信号に変換された後、適当な増幅度をもつ対数増幅器で増幅されビデオ信号に変換されて受信装置の出力となる。このビデオ信号は信号処理装置において等エコー処理を行なった後、観測高度からのエコーのみが選択されて自動警報装置(A)に入る。信号処理装置はこの他にも空中線の動作を命令する機能ももつ。自動警報装置(A)では、まず雷雲判定条件の一つであるエコーの強さを1kmごとに検定し、判定強度を越える1kmの区間が何個あるかを計算して雷観盤上の表示区分のアドレスをもつメモリにストアする。

全観測区分のデータ収集を完了すると、空中線の動作を命令する信号処理装置から観測終了信号が与えられ、表示区分ごとにストアされていたメモリの内容が、ある基準の数と逐次比較されて基準の数をこえる表示区分について雷雲と判定し、自動警報装置(B)に雷情報(雷雲発生または消滅)とそのアドレスが送られる。自動警報装置(B)では表示区分ごとにシリアルに送られてくる雷情報をICメモリにストアし、この内容にしたがって出力リレーを駆動する。こ

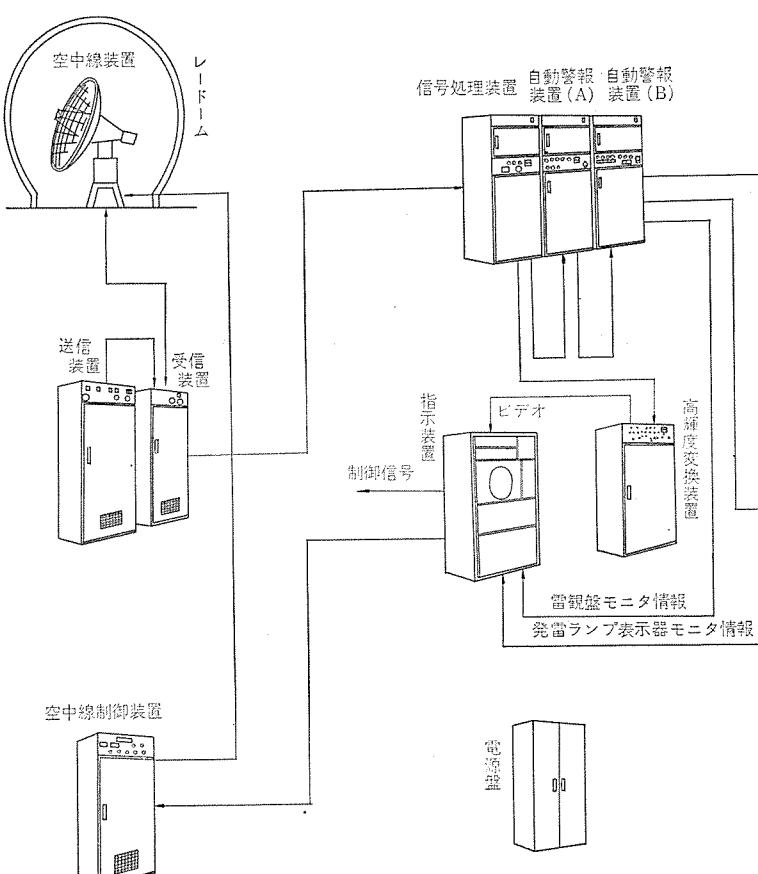
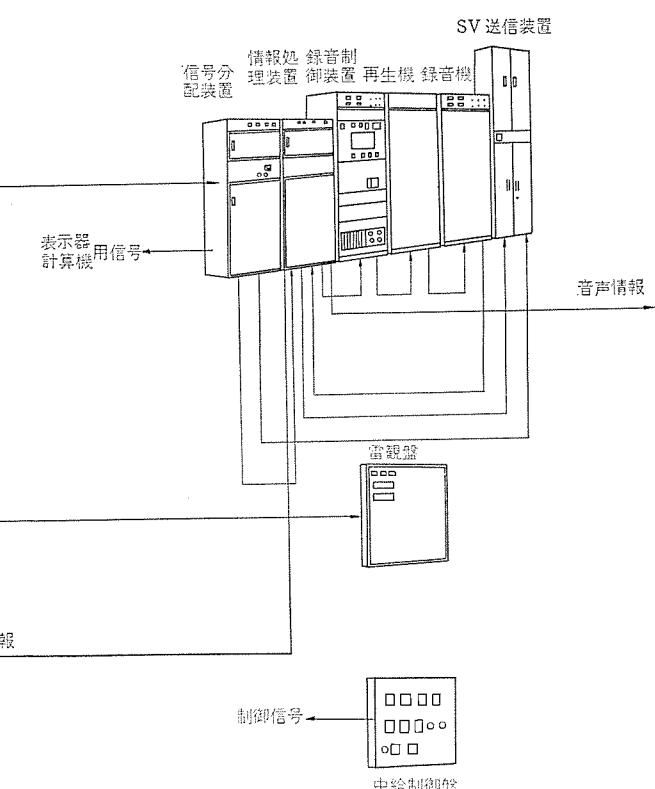


図2.1 構成図
Blockdiagram of the thundercloud warning system.



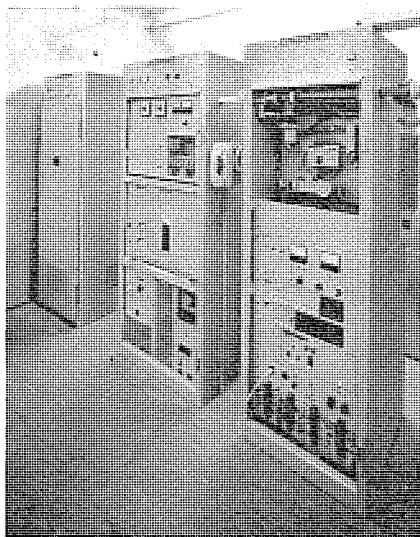


図 2.2 空中線制御装置、送信装置および受信装置（左から）
Antenna control unit, transmitter and receiver (from left to right).

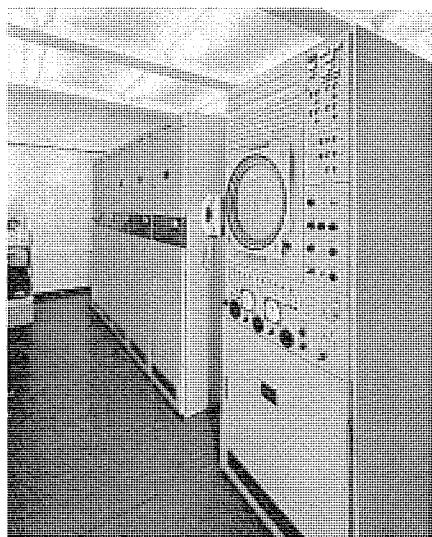


図 2.3 信号処理関係機器および指示装置
Signal processors and operating console with indicator.

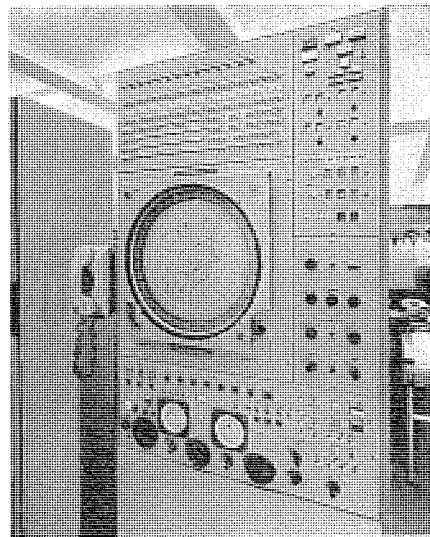


図 2.4 指示装置
Near view of operating console with indicator.

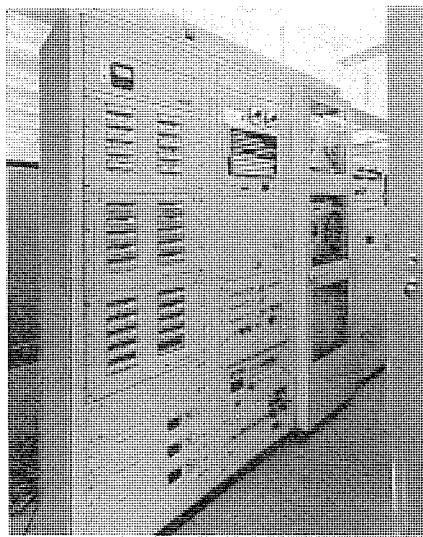


図 2.5 自動音声編集装置
Automatic announce machine.

の出力リレーからは雷観盤、指示装置のモニタパネルおよび次段の信号分配装置へ雷情報が分岐される。信号分配装置へ分岐された雷情報は情報伝送回線により遠隔地に雷情報を表示するため SV 送信装置（電気学会の CDT-第1方式による受渡し条件）にわたされる。またこれと同時に本店内の主要な個所に概略の雷情報を表示するための信号が作成され、表示器に送られる。この表示器の表示区分は、雷観盤の表示区分を再編成してほぼ県単位に直したものである。情報処理装置へは信号分配装置の出力端でオアをとり近接する区分のほぼ 2 個を 1 個としたものが与えられ、自動通報装置での編集順序に応じたフォーマットが作成される。このシステムでのビデオ表示は、指示装置の PPI 指示機でおこなわれるが、表示されるビデオ信号は受信機等からのビデオ信号を一度高輝度変換装置に入れ、ここで蓄積管を用いて $r-\theta$ 座標で与えられる信号から X-Y 座標の信号への変換ならびに高速読み取りによる表示の高輝度化をおこなったものである。表示装置ではその他に手動操作用のレーダ制御パネルをもち、中央給電指令所の制御パネルを用いない場合のコントロールセンタの機能ももつ。最後に空中線制御装置は外部からの空中線の駆動命令を

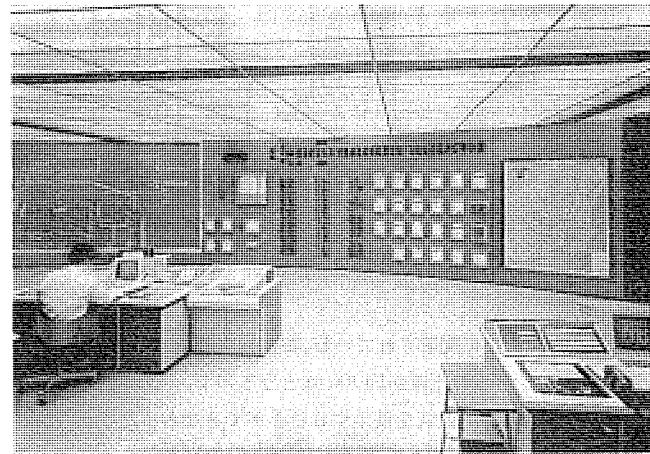


図 2.6 雷観盤据付状況（右前方）
Interior view of observation room (graphic indication panel installed on the wall).

うけ、電力増幅をおこなって空中線を駆動するパワーを発生させることである。

3. 機器の配置と導波管系およびケーブル

3.1 概要

このシステムを設置する建物は図 3.1 に示すように、14 階の屋上に約 2 階分に相当するペントハウスがあり、このペントハウス屋上から約 50 m の長方形の鉄塔基部がのびている。この鉄塔基部の内部をさらに 3 本の円柱で構成する鉄塔が地上 200 m までのびている。これらの円柱は直径 1.6 m で三角形の一辺は 5.5 m となっている。鉄塔最上部には空中線およびレドームを設置するための直径約 10 m のリングが設けられ、またそのまっすぐ下には空中線やレドームの保守をおこなう際、要員が待機するための待機室が設けられている。さらに鉄塔基部の最上部には無線機室がありマイクロ無線機器とともにレーダ送、受信装置および空中線制御装置が設置されている。これらの機器はシールドルームに収容され、同一フロアの他の無線機器への妨害を防止している。

その他の機器は 13 階にあるが、中央給電指令所の制御パネルおよ

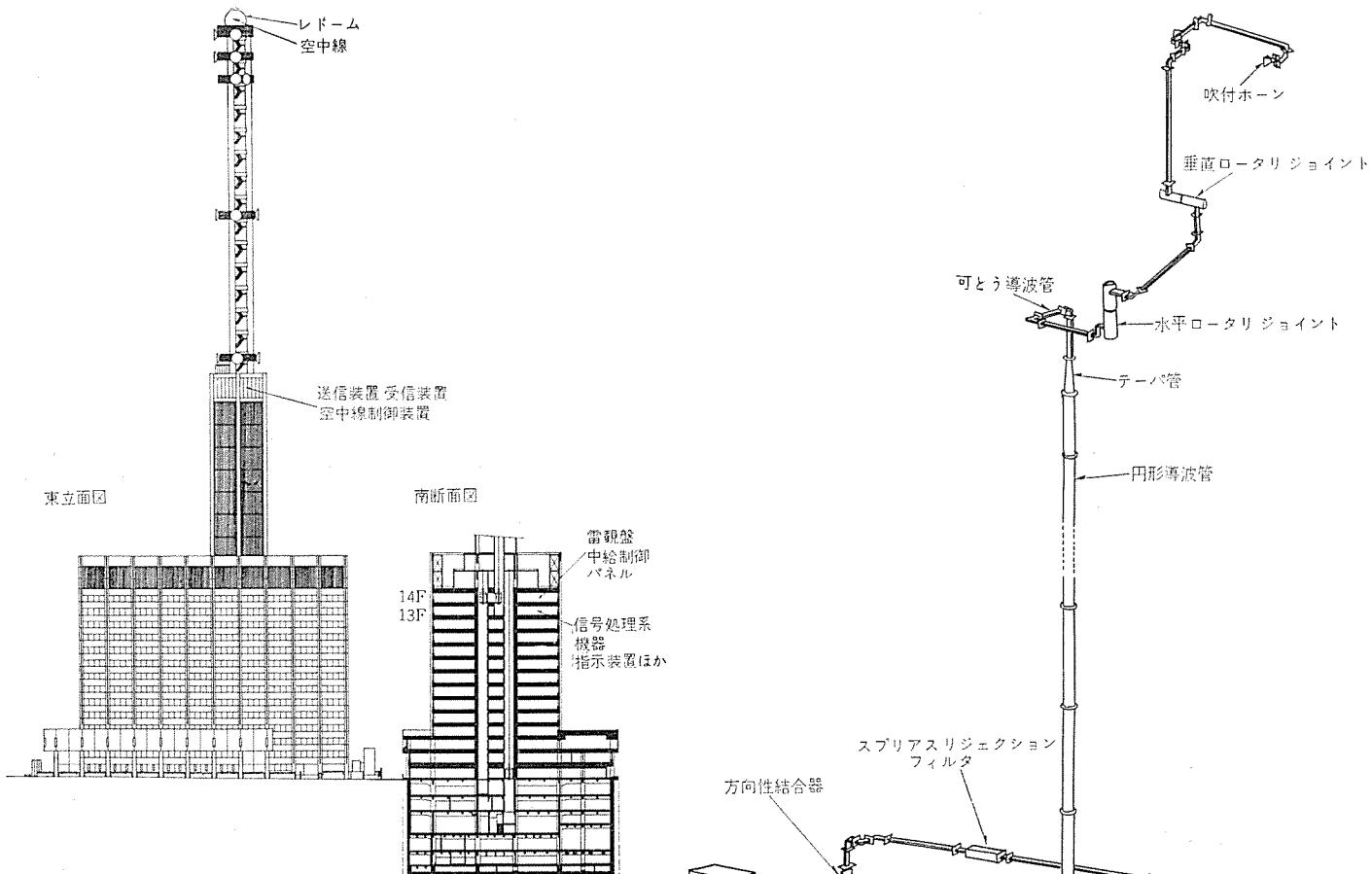


図 3.1 建屋構造および機器配置
Building and equipment layout.

び雷観盤は 14 階に配置されている。この配置でわかるようにまず送、受信装置と空中線の距離が約 100 m となるので、この間を通常のレーダで使用される導波管を使用することができなかったこと、また空中線から無線機室およびペントハウスまでは直接外気にさらされる構造なので、ケーブルは特に耐候性に留意した材質のものを用いる必要があったこと。さらにケーブルは近くに布線される電力ケーブルや近隣の放送局からのハムや妨害から、これを完全に保護する必要があったことなど、配置の特殊性に基づく多くの留意事項があった。これらの事項をつぎに簡単に説明する。

3.2 導波管系

通常レーダで用いられる導波管は方形導波管であり、このレーダの場合には使用周波数が 5 GHz 帯であるので、WRJ-5 が用いられる。しかしながら WRJ-5 の減衰量は単位当たり 0.035~0.04 dB であり、これにより導波管系を構成すると導波管だけで約 3.5~4 dB の減衰となり非常に効率の悪いシステムとなる。そこでこの減衰を軽減するため、方形導波管の代わりにオーバーサイズの円形導波管を使用することとした。ここで使用した円形導波管は管長 4.5 m、内径 69 mm ϕ 、公称単位 m 当たり減衰量 0.01~0.012 dB のもので、これを 20 本用いて鉄塔垂直部に配管した。この導波管より空中線側はまず 65 cm のテーパ管で方形導波管 WRJ-6 に変換して空中線に接続し、送受信装置側は同じく 65 cm のテーパ管で方形導波管 WRJ-5 に変換して送受信装置に接続している。空中線側に WRJ-6 を用いる理由は、空中線内部では WRJ-5 より細い WRJ-6 の方が空中線の電気的特性および構造上有利であるためである。

その他、導波管系には方向性結合器、高電力スプリアスフィルタ、加

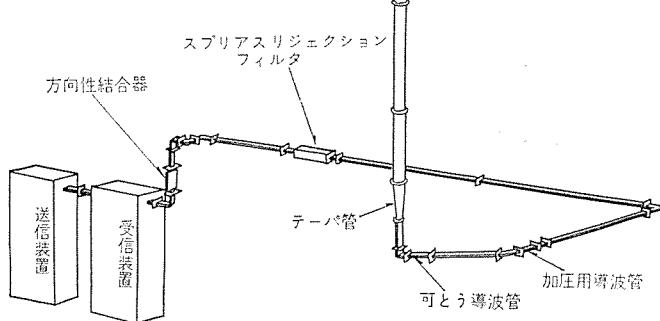


図 3.2 空中線ならびに給電線(導波管)系統図
RF transmission line.

圧用導波管および 5 GHz、6 GHz 用可とう(撓)性導波管を用いている。この導波管系の系統図を図 3.2 に示す。この系の電気的特性は実測の結果、減衰量約 1 dB、インピーダンス約 1.1 帯域 ± 20 MHz となり、予想どおりの好結果を得ることができた。

3.3 ケーブル系

ケーブル系では前述の事項のほか、特に垂直部では布線工事の作業量の軽減および占有スペースの削減のため、所要ケーブルを電力ケーブルと信号ケーブルのグループに分け、同グループのケーブルはできるだけまとめて 1 本の複合ケーブルとなるように考慮した。この結果、通常は空中線と無線機室間および無線機室と 13 階間でそれぞれ約 10 本と約 20 本程度を必要としていたものが 4 本と 6 本とに大幅に削減することができた。またケーブルの耐候性を確保するため、ケーブルシースにはカーボンブラック混入のポリエチレンを使用し万全を期している。シース材料の耐薬品性の比較表⁽²⁾を表 3.1 に示す。つぎに妨害対策のため電力および信号用の複合ケーブルの各構成ケーブルにはまず編組線によるシールドを、さらにこれらが集合した複合ケーブルには一括シールドとして銅および鉄テープ各 1 回巻を施したものを使用した。これらのケーブルを用いて動作させた結果、特に妨害による影響をうけやすいビデオ信号系および空中線の駆動をおこなうための命令系のいずれも妨害をうけることなく、安定な動作を示した。

表 3.1 シース材料の耐薬品性
Anti-chemicals characteristics of cable sheath materials.

品名	ネオブレン	PVC	PE	品名	ネオブレン	PVC	PE
稀硫酸	○	○	○	ガソリン	○	○	○
濃硫酸	×	△	○	二硫化炭素	×	△	△
稀硝酸	○	○	○	四塩化炭素	×	○	△
濃硝酸	×	×	×	クロロフルム	×	×	△
稀硝酸	×	△	△	トリクロレン	×	△	△
濃硝酸	×	×	×	フレオシン	12	○	○
りん酸	○	○	○	フレオシン	22	×	
稀硫酸	○	○	○	DOP	×	△	○
濃硫酸	△	×	○	シクロヘキサン	×	×	○
亜硫酸ガス	○	○	○	ベンゾール	×	△	○
アンモニアガス	○	○	○	トルオール	×	×	×
稀アンモニア水	○	○	○	フェノール	△	○	○
濃アンモニア水	△	○	○	アニリン	○	○	○
稀か性ソーダ	○	○	○	フルフラール	○	△	○
濃か性ソーダ	○	○	○	クレゾール	×	○	○
塩素ガス	×	×	×	クレオソート油	×	×	△
過酸化水素	×	○	○	ASTM 1号油	○	○	○
硫酸水素	○	△	○	ASTM 2号油	○	○	○
食塩水	○	○	○	ASTM 3号油	○	○	○
アセトン	△	×	○	変圧器油	△	○	○
エチルアルコール	○	○	○	重油	×	○	○
エチレングリコール	○	○	○	植物油	○	○	○
エチレンエーテル	×	×	△	シリコンオイル	○	○	○
フォルマリン	△	△	○	アスファルト	○	○	○
グリセリン	○	○	○	さく酸エチル	×	△	○
ヘキサン	△	△	○	ヘブタノン	○	○	×
石油エーテル	×	×	○	ヘキサン	△	△	○

表記記号説明

○: 調整はほとんどなく使用可 ×: 調整大きく使用不可
△: 条件によっては調整あり、使用は避けたほうが良い

4. 据付工事

機器の据付法および工事材料等で特に注意を払ったのは、屋外機器の耐風性ならびに導波管、ケーブルの据付け、材料の耐食性および屋内機器の耐震性である。

4.1 レドームの耐風性

レドーム設置高200 m における最大風速は過去のデータから 85 m/s と設定し、これに耐える構造のレドームとするべく当社標準のレドームの改造をおこなった。すなわち当社標準のレドームは最大耐風速 75 m/s のものであるが、これを 85 m/s にグレードアップするため、サンドイッチ構造のスキンの厚みを増加させるとともに各部の補強を行なってこれに対処した。また風荷重の増加に対してはレドーム基部のアンカーボルトの本数および径を増加させている。

4.2 耐食性

耐食性に特に考慮を払う必要のあるものは前述のとおりレドーム、導波管およびケーブルの据付材料であるが、空中線についても十分対策を施している。空中線はレドーム内に収容され一応直接外気との接触はないが、レドーム内は自然通風により換気されており、外気の侵入があるためである。

(i) レドーム: レドームはボルトおよび基部のベースリング以外は非金属であり、金属部に対しては溶融亜鉛めっきを施している。ベースリングにはさらにポリウレタン塗装をおこなって万全を期している。

(ii) 空中線: 空中線には鉄および耐食アルミを使用しており、鉄に対しては溶融亜鉛めっき後銀粉塗装3回塗りを、耐食アルミに対しては銀粉塗装2回塗りをおこなっている。ただしギア関係は除外している。

(iii) 据付材料: 導波管の据付材料は3種類のハンガとボルト、ナット類であり、基本的にはこれらに対しても溶融亜鉛めっきを施しているが、寸法的にこのめっきが使用できない小さなものは材料と

してステンレスを使用した。またケーブル関係のは(把)持金具とボルト、ナットは同じく溶融亜鉛めっきを施している。

4.3 耐震性

耐震性が最も問題となるのは鉄塔頂上に設置する空中線で、これに対しては M 16 ボルト 12 本で床面に固定し、約 7G の加速度に対しても十分耐えることができる。つぎに無線機室および 13 階ではこれらの床がアクセスフロア構造となっているため、直接床面に装置を固定することができない。そのため 50×50 のアングルで装置の固定架を製作し、これを床下に沈めてその上にアクセスフロアのパネルをおき、この上に装置を置いて固定している。これにより耐震性 1.0 G の要求に対し、十分な安全率を見込んだ上で 2G 以上の耐震性を有することとなった。

5. システムの機能および性能

5.1 機能

(1) 作成する雷情報

雷観盤用

音声情報用

卓上表示器用

発雷ランプ表示器用

モニタ用

(2) 情報更新時間

雷観盤、モニタ 約 7 分ごと

および卓上形表示器

音声情報および発雷ランプ表示器 每 15 分

(3) 観測高度および高度設定範囲

低高度および高々度の順次繰返し観測

低高度 3 km～15 km

高々度 3 km～15 km

(4) 観測範囲

低高度 150 km まで

高々度 200 km まで

(5) 観測区分

雷観盤 低高度 140 区分

高々度 155 区分

音声情報 低高度 77 区分

高々度 85 区分

卓上表示器 低高度および高々度とも 11 区分

発雷ランプ表示器 低高度および高々度とも 14 区分

モニタ 雷観盤および発雷ランプ表示器に同じ

(6) ビデオ表示

高輝度ビデオによる PPI 表示

5.2 性能

(1) 空中線

反射鏡 3 mφ パラボラ形

利得 40 dB 以上

ビーム幅 1.7° 以下

サイドローブ -25 dB 以下

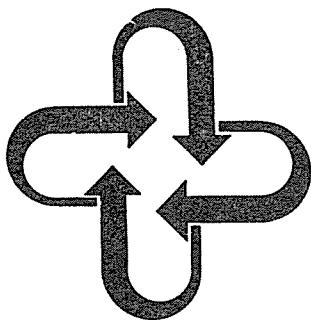
周波数 5,685 MHz

偏波 水平

空中線走査範囲 水平 360°

垂直 0°～85° ただし 90° まで可能

(2) 送信装置		高 度	低高度 500 m ステップ で 11 km まで。 15 km までは 1 km ステップ 高々度は 1 km ステップ
マグネットロン 出力	175 kW		
パルス 幅	2 μ s		
周波数	5,685 MHz		
パルス 繰返し周波数	250 Hz		
(3) 受信装置		(7) 自動警報装置 (A) および (B)	
最小受信電力	-105 dBm 以下	計算範囲	1 km ~ 200 km
雑音指数	9 dB 以下 (ただし ミキサ 入力にて)	距離量子化単位	1 km
中間周波帯域	1.6 MHz	観測範囲距離区分	25 km ステップ
受信機特性	対数特性	観測範囲方位区分	32 等分割
対数特性範囲	60 dB 以上。± 2 dB 以内	ビデオ 量子化 レベル	1.5 mm/h 相当 レベル
精 度	± 2 dB 以内	(8) レドーム 構造	円形 ドーム。サンドイッチパネル 使用
局発調整	AFC および手動	寸 法	直径 5.5 m
(4) 空中線制御装置		電力透過率	平均 90 % 以上。最低 85 % 以上
空中線走査 モード	水平および垂直とも自動および手動	耐風性	85 m/s 以上
空中線走査速度	水平 10 rpm		
	垂直 最大約 9°/s		
空中線停止精度	水平 ± 1° 以内	5.3 環境条件	
	垂直 ± 0.3° 以内	(1) 周囲温度	空中線装置および レドーム -20°C ~ +50°C
制御方式	サイリスタレオナード 方式		その他の機器 25°C ± 10°C
(5) 指示装置		(2) 湿 度	空中線装置および レドーム 最大 100 %
表示形式	高輝度 ビデオ による PPI 表示		その他の機器 最大 95 %
走査方式	X-Y 方式	5.4 所要電源	
CRT 直径および	16 インチ 丸形	(1) 電 壓	AC 100 V ± 10 % および AC 200 V ± 3 % 三相
特 性	P 2	(2) 周波数	50 Hz ± 3 Hz
表示範囲および距離	50, 75, 100, 150, 200 km	(3) 消費電力	15 kVA 以下 (AC 200 V) 3 kVA 以下 (AC 100 V)
目 盛	各距離 レンジ とも 5 本		
表示範囲	距離目盛間隔 距離目盛数	6. む す び	
50 km	10 km 5 本		以上ご紹介したように 48 年 2 月 まで 田端系統給電指令所においてか動していた機器を更新し、本格的な実用機としての要素を盛込んだ機器を完成させ、現在順調にか動中である。
75 km	15 km 5 本		この工事にあたっては建物の特殊性ならびに電波上の制約が非常にきびしい環境ではあったが、関係当局の適切な指導ならびに日本放送協会をはじめとする民放各社のご協力により、無事工事を完成することができたことを心から感謝いたします。
100 km	20 km 5 本		またこのシステムは開発より実用機完成まで長期にわたり、東京電力(株)電子通信課をはじめ中央給電指令所、中央通信所、田端系統給電指令所、技術開発研究所電力研究室、ならびに三菱電機(株)の関係各部門など多数のかたがたのご指導、ご協力をいたいたことを心からお礼を申上げる。
150 km	30 km 5 本		
200 km	40 km 5 本		
走査線数	945 本		
(6) 信号処理装置		参 考 文 献	
機 能	ISO および CAPPI 处理		
ISO 計算範囲	6 km ~ 200 km	(1) 青木、御法川、小林、山本：雷雲予知システムと情報伝送、三 菱電機技報、45、No. 2 (昭 46)	
受信 エコー 補正項目	大気減衰および距離減衰	(2) アルミニウム ケーブル の腐食と防食について、大日電線時報、24 号 (昭 38-4)	
雨量強度計算範囲	200 km において 1.5 mm/h 以上		
ISO 計算精度	± 5 % 以内		
空中線制御命令	0° ~ 55° をつぎの 17 ステップ で走査させる自動命令および手動命令		
	55°, 48°, 42°, 36°, 30°, 25°, 21°, 18°, 15°, 12°, 9°, 7.5°, 6°, 4.5°, 3°, 1.5° および 0°		
CAPPI による 観測高度および設定	低高度および高々度とも 3 km ~ 15 km		



技術解說

UDC 628.515 : 628.52

拡散炎における悪臭の発生原因とその機構

草川 英昭*・藤 永 弥*

1. まえがき

発熱とともに酸化には爆発と燃焼があり、前者は連鎖反応によるものである。燃焼には固体・液体・気体の燃焼があり、気体の燃焼には火炎をともなう。火炎はさらに2種に分類される。

その1は予混気炎 (Pre-mixed flame) で、火炎面に対してあらかじめ燃料ガスと酸素(空気)が均一に混合された反応気体が、適当な速さで移動するような状態での燃焼であり、他の一つは燃料ガスと酸素(空気)とが接しながら移動し、その接触面で反応が進行する拡散炎 (diffusion flame) である。すなわち、ブンゼンバーナを空気を入れて燃焼させたときにできる火炎は予混気炎で、(燃料ガスはノズルからジェット状に噴出している)、一方、空気を入れないで燃焼させたときにできる火炎が拡散炎である。

予混気炎はその燃焼までの範囲は流体力学の領域であり、燃焼面での問題も反応速度的な問題より熱拡散的な問題が多く、定量的取扱いが比較的簡単なため解析しやすく、これらにもとづく燃焼機器類も多い。最近三菱電機によって開発されたクリーンヒータもこの応用といえる。

これに反し、拡散炎は燃焼を規制する パラメータ が定量化できにくいため、ファラデーの“ろうそくの科学”⁽¹⁾以来の進歩が少なく経験的なものが多い。

わが国における暖房機として石油ストーブが最も多く利用されているが、これの燃焼はそのほとんどが心を用いた拡散炎である。

このため、心におけるタルの析出、燃焼廃ガスのにおいといった問題も多く、その解決は経験と偶然とによってなされている状態である。この論文は拡散炎についての諸現象をできるだけ簡単なモデルに置きかえ、拡散炎を用いた燃焼の問題点の定量化を計ろうとするためのもので、現在まで理解されていることを中心に、これらを基にして推定できることをまとめたものである。

2. 拡散炎 1 ブンゼンバーナの炎

もうそく・あんどん・石油ランプなどの火炎は典型的な拡散炎であるが、これらに入る前にブンゼンバーナの場合を考えよう。ブンゼンバーナの気孔を閉じて火炎をつくる。そうして火炎の上方に z 軸を、火炎の半径方向に r 軸をとれば z_1 , z_2 を図2.1のように決め、 r による燃料濃度・酸素濃度(空気中の20%の O_2 量を100として)の分布と温度分布を示すと図2.2(a), (b), (c), (d)となる。

また $z=0, r=0$ の点を $x=0$ とし, θ, ϕ (ϕ は同心円で対称となるので省略できる) の極座標によって燃料濃度と温度とを表わすと図 2, 3 (a), (b) となる。

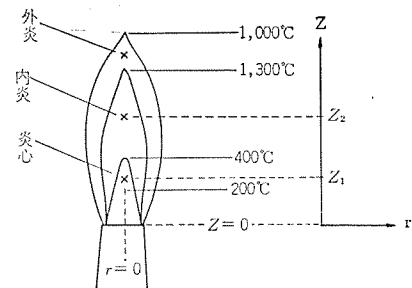


図 2.1 拡散炎の構造

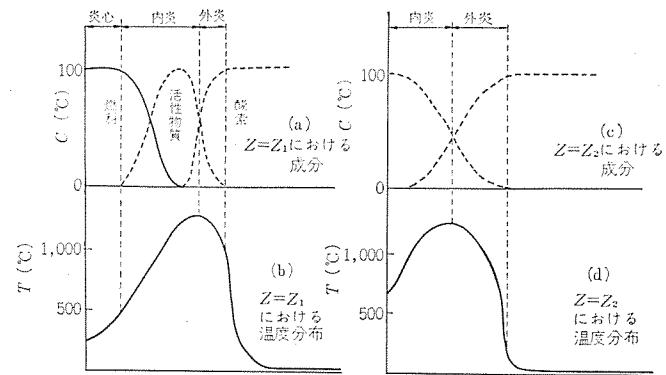


図 2.2 拡散炎中の成分分布および温度分布

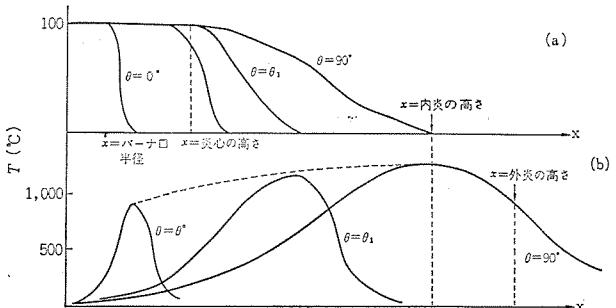


図 2.3 前図 $z^2 + r^2 = x^2$ 方向における燃料分布 (a) と温度分布 (b)

図 2.3 (a) で燃料の濃度 C を

とおけば、単位時間に供給される燃料の量 Q_F が

で計算できる。いま Q_F を変化させて火炎の長さと幅とを測定すれば、 Q_F による ℓ と w の関数関係

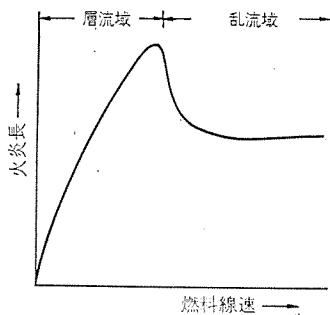


図 2.4 Hoffels による実験結果

が求められる。実際にこの関係を求めたのは Hoffel⁽²⁾ であつて、彼らによると流速によって層流域より乱流域まで変わり、層流域では酸素の拡散律速であるといわれている。そして火炎伝ば(播)速度より流速が速くなると消えることを示した。

乱流拡散炎 (turbulent diffusion flame) の場合は、界面における乱流拡散が燃料ガスの線速に比例するため、火炎長は燃料ガス線速に依存しなくなるのである。

3. 拡散炎 2 ろうそくの炎

ろうそくのように心を用いる燃焼は非常に古くから使用されているが、その燃焼の機構になると複雑な要素が組合されるため解析は困難である。心を用いた燃焼を各ステップにわけると

- (1) 毛細管現象による燃料吸上げ
- (2) 心より気中への燃料の蒸発
- (3) 拡散による酸素との接触と反応
- (4) 火炎の形成

と四つの段階をへてはじめて燃焼するため、先の気体燃料よりもさらに取扱いにくい。

3.1 毛細管現象による燃料の吸上げ

毛細管現象は表面張力 σ と重力とのバランスによって規定される。

$$2\pi r\sigma = \pi r^2 hdg \quad \dots \dots \dots (3.1)$$

ここで r は毛細管半径、 h は液柱の高さ、 d は液密度、 g は重力加速度である。式を簡単にするため σ は温度 T に対して反比例、 d は T^2 に反比例すると仮定すれば

$$h = 2\sigma/dg \quad \dots \dots \dots (3.2)$$

$\sigma_T = T_1$ のとき

$$d = \int_{r,t}^{T_1} \left\{ \frac{4d(T)}{4T} \right\} / \int_{r,t}^{T_1} dT$$

であるから極端な温度こう(勾)配がなければ、 h は温度の上昇によって下ることはない。すなわち毛管現象が燃焼反応律速になることはないと考えられる。

3.2 蒸発速度

心温度によって毛細管現象による吸上げがあまり大きく影響を与えないと考えられるのに対し、もっとも大きく影響するものが蒸発

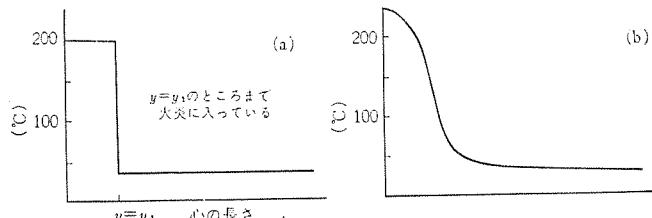


図 3.1 井戸形温度分布 (a) とより実験的な温度分布 (b)

速度であろう。

いま心の面を一様に燃料液体が潤っているとして、蒸発量 Q_F は表面積 A と温度 T とに比例するから比例定数を k とすれば⁽³⁾

$$Q_F = k \cdot A \cdot T \quad \dots \dots \dots (3.3)$$

ろうの成分にはいろいろな成分が入っているから

$$Q_F = \sum k_i \cdot A \cdot T \quad \dots \dots \dots (3.4)$$

いま横幅 l の心の温度分布 (厚味方向には依存しないとして) を簡単にするために、井戸形の温度分布をとるとすれば単位時間内に蒸発する量は

$$T = T(y) \quad A = l \cdot y$$

$$Q_F = \sum k_i \cdot l \cdot y T = \sum k_i \cdot l \int_{r,t}^{T_{\max}} T(y) dy \quad \dots \dots \dots (3.5)$$

k_i は燃料液体の潜熱によって定まる。

ここで火炎におおわれる心の部分の長さを変数としてろうそくの重量減をプロットすれば、 $\langle k_i \rangle \int T(y) dy$ が求められる。このとき y に対して Q_F が直線的であれば、 T は y によらない定数であり、 $Q_F = Q_F(y)$ であれば、 l を単位長さとすれば

$$T = T(y) = dQ / \langle k_i \rangle dy \quad \dots \dots \dots (3.6)$$

となって T と y の関係が実験的に求められる。また y に対して T を実験的に求めて Q_F を計算し、測定値としての Q_F と比較することができる。

火炎を円筒と考えると、ここでろうそくの火炎とブンゼンバーナの火炎と同様に考えると心の長さ y に対して火炎長が測定できる。そして、単位時間当たりの蒸発量とブンゼンバーナにおける供給量との火炎長の比較から、相関関数を求めることができる。

4. 心形石油ストーブ対称拡散炎

一部ろうそくの拡散炎で考察したことがそのまま利用できる。すなわち心出しと火炎長および燃料消費量をプロットすれば、式 (3.5) が求められ、この図より式 (3.6) を算出。ブンゼンバーナとの相関関数を求め、層流域・乱流域を決めることができる。また、このとき写真等によって火炎の形を決め、火炎の表面積を計算で求めることもできる。

わかりやすくするため、火炎を半径 r 、高さ z の円筒と仮定すれば (図 4.1 参照)、 C を燃料濃度とし、 C_{O_2} を酸素濃度、 D を分子拡散係数、 ε を乱流拡散係数とし、燃焼反応速度を C, C_{O_2} の積に

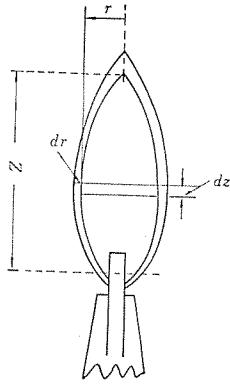


図 4.1 拡散炎の円筒模型

比例するとすれば、火炎体積が $r^2 dz$ 中での単位時間当たりの反応速度は

$$-dc/dt = kC_{O_2}C \quad \dots \dots \dots (4.1)$$

で表わされる。一方、このとき、いま考えている円筒の表面より外側に拡散されていく量は、

$$\left. \begin{aligned} 2\pi r dr \left(\frac{D+\varepsilon}{dr} \right) dz \frac{dC}{dr} &= \pi r^2 dz \frac{dC}{dt} \\ &= -\pi r^2 dz \frac{dC}{dr} \\ 2(D+\varepsilon) \frac{dC}{dr} &= -krC_{O_2}C \end{aligned} \right\} \quad \dots \dots \dots (4.2)$$

z を固定して $r=0$ から r まで、 $r=0$ のとき C を $C(z)$ とすれば積分して

$$C(z, r) = C(z) e^{-\frac{k C_{O_2}}{4(D+\varepsilon)} r^2} \quad \dots \dots \dots (4.3)$$

ここで k 、 D 、 ε は温度の関数でもあるため平均値をとり、 C_{O_2} も平均値をとった。

ここで C_{O_2} についても近似的に

$$C_{O_2} = C_{O_2}(r_0) e^{-\alpha \left(\frac{r_0}{r} \right)^2} \quad \dots \dots \dots (4.4)$$

とおけば、より近似を高めた式 (4.2) は

$$\left. \begin{aligned} 2(D+\varepsilon) \frac{dC}{dr} &= -krC_{O_2}C \\ -\frac{dC}{C} &= \frac{kC_{O_2}(r_0)C(z)}{2(D+\varepsilon)} r e^{-\alpha \left(\frac{r_0}{r} \right)^2} dr \end{aligned} \right\} \quad \dots \dots \dots (4.5)$$

を解くことになり、図 4.2 に近くなることがわかる。 α は酸素の拡散係数を含む項である。

式 (4.5) の解は複雑なため、式 (4.3) で考察を進める。一般に k は

$$k = K \exp(-E/RT) \quad \dots \dots \dots (4.6)$$

で表わされ、温度 T が下がると急激にその値を小さくする。また乱流拡散係数 ε は燃焼が激しくなるほど大きくなり、式 (4.3) の尾 (tail) の部分を $r=r_0$ の外に引き出す作用をする。いま燃料濃度の

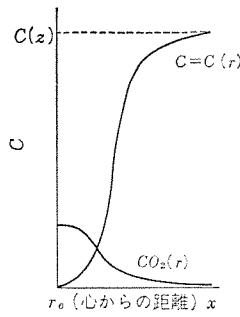


図 4.2 円筒模型より求めた C の r 分布

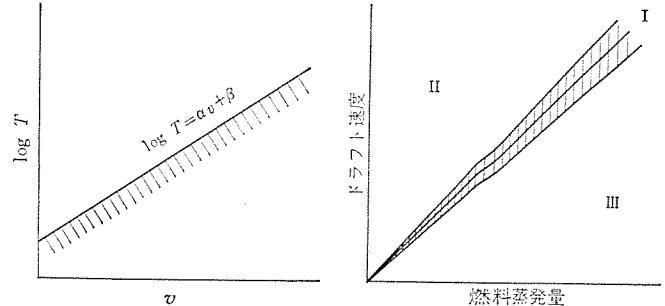


図 4.3 燃料流速と発火温度

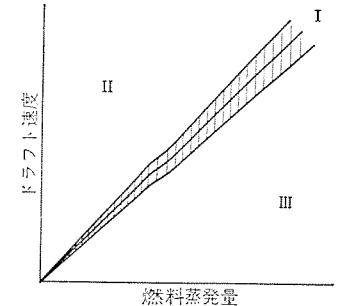


図 4.4 燃料消費量とドラフト速度

r による分布曲線の尾の部分が、 $r=r_0$ の空気気流中にかかれば燃料臭が外にもれることがわかる。したがって、 ε が大きいか、 T が十分大きいかを測定することにより臭気発生の防止法をつかむことができる。また、式 (4.3) より $D+\varepsilon$ と T との関係は、 $D+\varepsilon$ が乱流域での流速 v (この場合燃料の流出速度と空気のドラフトによる流速とは等しいことを仮定している) に比例するとすれば、Patterson や Mullen らによる流速と発火温度との関係 (一般に発火温度は予混気の流速が大きいほど⁽⁴⁾⁽⁵⁾、また加熱面積が小さいほど高くなる) も理解でき、その関係を簡単なために比例するとすれば

$$\log T = \alpha v + \beta \quad \dots \dots \dots (4.7)$$

となって、図 4.3 となる。

この図 4.3 で斜線をほどこした範囲では燃焼が起こらず、燃料臭がすることは明らかで、これを火炎の場合に適用して燃料供給が T によって決まり、 T の上昇によって燃料供給がふえても、 v が変わらなければ酸素供給不足が起こってすが発生する。したがって燃料蒸発量と流速との関係についてプロットすれば図 4.4 のごとき関係となり、I が望ましい燃焼状態、II が立炎範囲、III が燃料臭発生領域となる。I の直線を求めるには、臭気を発しないストーブを各種集めてプロットして求めなければならない。このとき注意しなければならないのは、この関係は拡散炎本来の状態での比較であって、火炎近くに異物質の存在があるときはこの関係は成立しない。

5. メタンの燃焼

メタンの予混気炎は Fristrom によって詳細に調べられている⁽⁶⁾。ここではその Out line を示し、メタンのようなもっとも簡単な炭化水素 (hydro carbon) の燃焼でも、非常に複雑であることが理解されよう。

図 2.1, 2.2 に戻り、炎心にはメタンと酸素だけが存在したときに、内炎 (inner core) では酸化反応が起こって中間生成物がつくれている領域であり、外炎は中間生成物が酸化されている領域である。いま火炎の中心 ($r=0$) の点を z 軸に沿ってみれば、図 5.1 のようになる。 z 軸方向のエネルギー収支の方程式をたてると式 (5.1)

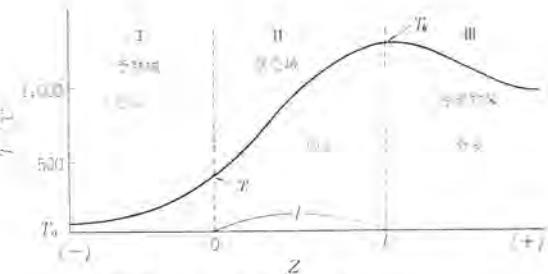


図 5.1 火炎の Z 方向の温度分布

となる。

$$\lambda \frac{d^2T}{dz^2} + C_p \rho v \frac{dT}{dz} + q\omega = 0 \quad (5.1)$$

ここで λ は熱伝導率, C_p は熱容量, ρ は密度, v は流速, q は反応熱, ω は反応速度である。ただし, λ , C_p , ρ , v は温度 (すなわち z) の関係であり, 微分の演算子はこれらにもかかるべきであるが簡単にするためにこれらは定数とした。

I の領域では $\omega=0$ だから式 (5.1) は

$$\left. \begin{aligned} \lambda \frac{d^2T}{dz^2} - C_p \rho v \frac{dT}{dz} &= 0 \\ \lambda \frac{dT}{dz} - C_p \rho v (T - T_0) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (5.2)$$

$$T - T_0 = (T_f - T_0) \exp(C_p \rho v z / \lambda) \quad (5.3)$$

となって, I の領域では \exp で温度が上昇していくことがわかる。II の領域では, 式 (5.1) を解くことができないので, 実験的に dT/dz を求めると,

$$\frac{dT}{dz} = \beta \frac{T_b - T_i}{l} = \frac{C_p \rho v}{\lambda} (T_i - T_0) \quad (5.4)$$

これが式 (5.3) の $z=0$ における温度の微分係数 (dT/dz) $z=0$ に等しいとおき, 式 (5.4) が求められる。

一方, 反応領域での物質収支より, 反応領域の $z_0 - z_i = l$ での反応は単位時間内に供給される燃料の量, $\pi r^2 v C$ であるから 1 g 当たりの発熱量を q とし, 単位時間内に

$$\pi r^2 v C = \int_{z=0}^{z=s} \omega dz = \bar{\omega} l = -\pi r^2 \int \frac{dC}{dt} dz \quad (5.5)$$

となって, 式 (5.4) と (5.5) より l を算出すれば

$$v^2 = \frac{\bar{\omega} \beta (T_b - T_i)}{C_p \pi r^2 C (T_i - T_0)} \quad (5.6)$$

となり, 式 (4.2) との関係も説明できる⁽⁶⁾。

また, 式 (5.6) は図 4.4 の理論的根拠を与えるものである。

メタン-酸素系の内炎中で検出されている物質(正確には化学種といふ)は CO , CO_2 , H_2O , CH_4 , O_2 , N_2 , アルデヒドなどの分子や OH , H , CH , C_2 , HO_2 などのラジカルがある。このときの各による分布を図 5.2 (a), (b) に示した。

メタンの酸化はつきのように進行し, 壁のような温度の低い固体

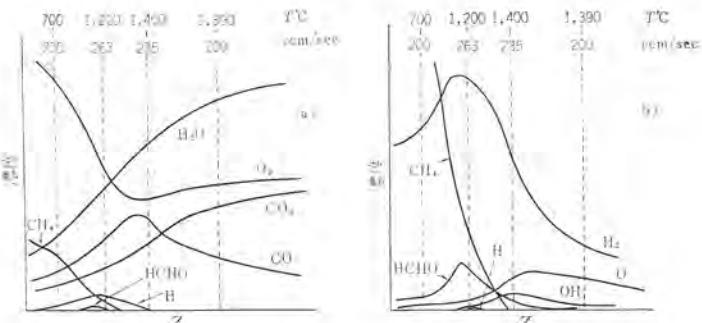
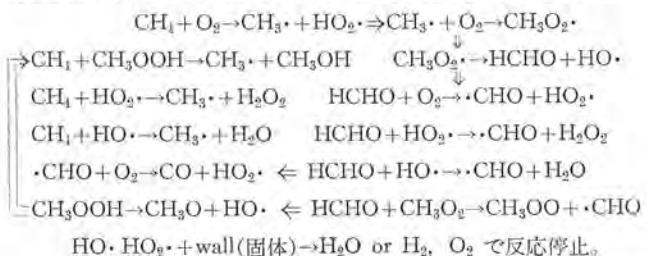


図 5.2 内炎中の安定な分子濃度 (a) と
不安定なラジカル濃度 (b)

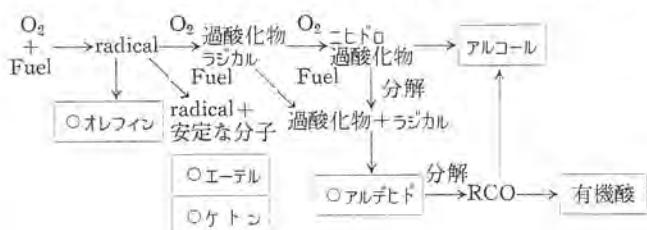
にあたって停止する。(反応式中 CH_3 などはラジカルを示す)



6. 炭化水素 (Hydro Carbon) の燃焼

炭化水素の酸化反応は圧力と温度の影響をうけるが, ここでは 1 気圧下での燃焼をとりあげる。

前項で述べたように酸化燃焼はつきのようないくつかのステップで進行する。



すべてのラジカルはなにかのきっかけで炭化水素, オレフィンに戻ることができる。上記のものでわく囲いしたものは臭気をもつものである。

これらの分解生成物は一般には内炎内に閉じこめられているが, なんらかの原因で流線が乱れたり, 温度が下ったりするときにはその濃度分布の尾の部分が気流に出てきて臭気のもととなる。

流線の乱れが温度を下げる原因の一つに火炎中あるいは火炎近傍に大きな熱容量をもつ物体を入れることで, とくに表面が活性の固体は内炎中の活性なラジカルを安定させる傾向があるため好ましいことではない。

いま火炎に対して種々の物質を近づけ CO 濃度変化, 炭化水素濃度変化, 臭気の発生などを調べることによって, その物質の火炎に

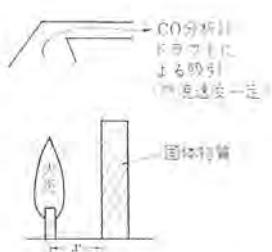


図 6.1 Wall による火炎に対する影響測定法

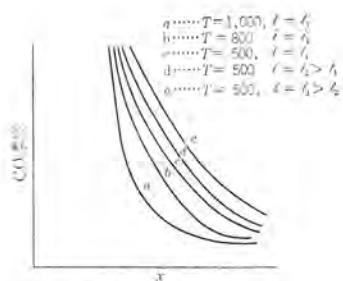


図 6.2 予想される結果

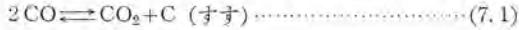
与える影響を調べることができる実験法とその予想される結果を図6.1, 6.2に示した。

これと同じような実験を流線中に吹込んだ空気の温度と量との関係として求めることも、意味あることであろう。

7. すすの発生

すすの発生は燃料-酸素比-温度に依存するもので、輝きをもった火炎中には必ず炭素微粒子を含む。実際には (酸素原子数) / (炭素原子数) の比が 1 より大きいところですすが発生するが、これは

$$2\text{CO} \rightleftharpoons \text{CO}_2 + \text{C} \quad (\text{すす}) \quad (7.1)$$



の平衡反応の存在を表わす。この平衡状態は低温ですすむ発生の方向へ、1,000°K以上になると、左のCO発生の方向へ移動すると考えられている。このことからパラフィン系炭化水素よりも燃料弁に多くの炭素原子をもつ芳香族炭化水素が立炎しやすいことが予想でき、実際もそのとおりであるが、これだけの理由だけでなく、さらに複雑な反応があると考えなければならない。

すすの生成にはつきのステップが考えられ、その検討も行なわれているが

炭素核の生成→核へ種々の化学種の吸着→すすの成長

この第2のステップでは核とそこに吸着された物質は強い反応性をもち、触媒作用をもっているといわれている⁽⁷⁾。

火炎内には、炭素(すす)が $10^6\sim10^9$ 個/cm 存在し電荷を運ぶ。また火炎に電界をかけるとすすの発生が影響を受ける。これらのこととは、すすの形成に静電気力がそのプロセス中になにかの作用を及ぼしていることが考えられる。

8. 心のタール発生メカニズム

心を用いた拡散炎ではできるだけ自然の炎にすることが必要であり、いわゆる拡散燃焼に欠くことのできない空気量の最適値を選択し、温度を下げる要因となるようなものを排除しなければならない。これらの問題を解決したのちのもっとも大きな問題は心である。図 8.1 は燃焼中の心の近傍における温度分布の推定図である。これら の根拠となる現象および仮定はつぎのようなものである。

(1) 灯油の沸点は 150~300°C/atm

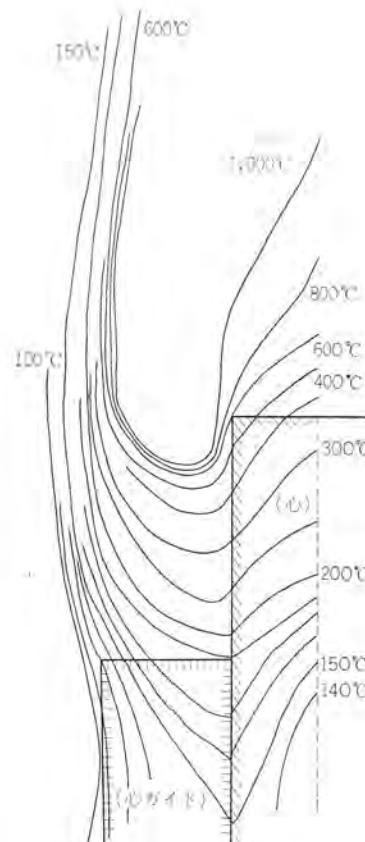


図 8.1 心近傍の温度分布

(2) 火炎は300~400°Cより見られる。
(3) ふく射による熱移動よりも心を通しての伝導のほうが大き
い。

一方、炭化水素の酸化反応は複雑で、その現象は完全につかむことはできないが、100°C ぐらいから酸素あるいは溶存酸素濃度下でも酸化されはじめる。そして、その反応速度はいわゆる 10°C 上昇温ごとの 2 倍で 350°C あたりまでいくことが知られている。

炭化水素の主体であるアルキル系のC-C結合は、350°Cからランダムに主鎖開裂がはじまることはよく知られており、酸素不足の条件下でさらに温度を上げると二重結合をもつものに変化し、さらに高くなると三重結合などもつくるといわれている。すすの発生には三重結合をもつアセチレンの重合体が大きな役割をはたすという説もある。

200°C 付近より活性水素をもつ部分が酸化を受けはじめ、ラジカルが生成し、そのラジカルが未励起の分子と反応してさらに大きいラジカルをつくり、ラジカル同志が反応して脱活性するとのときに油溶性より不溶性の樹脂状物質ができる。250~300°C 付近の温度でこの反応が最高となり、300°C 以上では、C-C 結合のランダム開裂などによって樹脂状物質の生成は減少する表面はなんの触媒作用もないものとすれば、心の先端を 0 として心の中心をオイル面に向つ

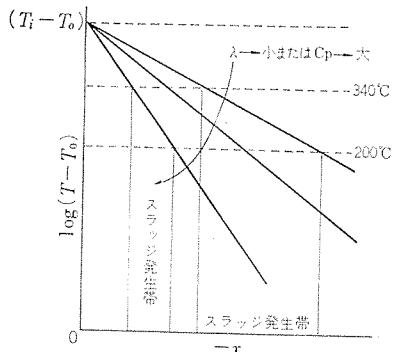


図 8.2 心物性値によるスラッジ発生帯の変化

て(一)に取り、熱収支をとれば、

$$\lambda \frac{d^2T}{dx^2} - C_p \rho v \frac{dT}{dx} - kT = 0 \quad \dots \dots \dots (8.1)$$

ただし、 k は単位面積あたりの発散係数であり、他は式(4.9)と同じである。式(8.1)は簡単に解けるが x と T との関係は複雑になる。このため $k=0$ として解けば式(4.10)となり、その関係を図8.2に表わす。

いまタール生成温度を230~330°Cとすれば、この範囲に入る x は熱伝導度(λ)が大きいほど大きくなり、タールが発生しやすくなることがわかる。

つぎに綿心はタール発生量がガラス心に比べ少ないことが経験的にわかっている。綿を構成するセルロースは活性水素をもつため、180~200°Cより分解がはじまり着色してくる。このようにセルロースラジカルは主鎖が固定されているため自由に動きまわることがなく、燃料中にできたフリーラジカルとの反応しかできないとすれば、そのような作用をもたないガラス心に比べ、タール発生量の少ないことが定性的に説明できる。これを定量的に測定するには、燃料オイルをガラス綿や木綿などと共存させた状態で200~350°Cでの燃料の着色・酸度などを測定することによって求めることができる。また心にラジカル重合防止剤や低温酸化剤を添加する案などが提案されているが、これもこのような処理をほどこした心を入れた耐圧試験管によって、その有効程度を推定する実験データがえられる。

9. 自動車排ガスとの相関性その他

内燃機関は燃料を空気によって噴霧状にし、これを断熱圧縮して昇温、プラグで点火するものであるが、その燃焼温度とCO、炭化水素発生量は定性的に図9.1の関係にある。拡散炎は内燃機関における燃焼(爆発)とはだいぶ趣きを異にするが、過剰空気の存在にもかかわらずCO発生量が多いのは、拡散炎の一部が異常に低いことを意味するものと考えることができる。そして、心にタールが出るとこのタールに火炎の一部がかかり、熱分解を行なってタールが表面から網目状になる。そして、内に含まれた燃料液体は一部が気体となり、一部はさらに網目状の構造をつくって多孔質なタールを形

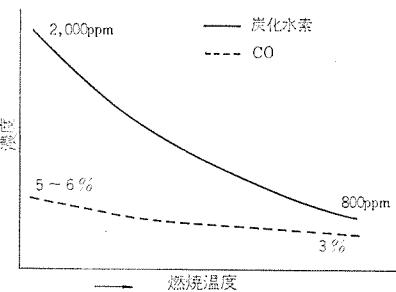


図 9.1 内燃機関の燃焼温度による炭化水素、CO量の変化

表 9.1 自動車排ガス分析表

回転数 rpm	アイドリング	定速運転			加速運転		減速運転	
		40	60	80	0→20	40→50	60→40	20→0
炭化水素量 ppm	5,076	1,463	97	895	4,448	2,165	2,826	4,113
CO量 %	6.5	3.8	3.1	4.0	5.0	8.0	6.2	7.3
炭化水素排出量 g/h	206	108	104	142	363	208	62	62
CO排出量 g/h	1,755	1,653	2,014	3,844	2,360	4,376	815	239

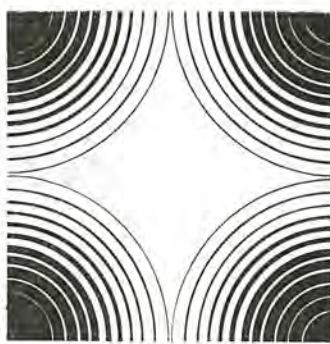
成する。ここに燃料液体が入ったり出たりするが、このとき一部は突沸的に噴き出し、その蒸気の一部が流線にかかる火炎の外側を通って排気ガス中に検出されるようになる。このためタールの付着によって燃焼火炎の温度に関係なく燃料臭が発生するようになるのであろう。

またタールの付着によって心内部温度の上昇、表面積、熱伝導率の上昇などがあり、タールの一部が火炎にかかる部分の温度をあげるような現象も考えられる。

このため燃料にラジカル発生剤(アンチノック剤)的な作用をする物質を添加することによって、タール生成をおさえる可能性を検討できる。

参考文献

- (1) M. フララデー(矢島訳)：“ロウソクの科学”，岩波書店
- (2) H. C. Hottel, W. R. Hawthorne : 3rd Symp. on Combustion, 254 (1949)
- (3) 小林：日本機械学会論文集 20, 837 (1954)
- (4) S. Paterson : Philips Magazine, 30, 437 (1940)
- (5) J. W. Mullen, J. B. Fenn, M. R. Irby : 3rd Symp. on Combustion, 317 (1949)
- (6) R. M. Fristrom : 9th Symp. on Combustion, 560 (1963)
- (7) J. N. ブラフドレー(須賀, 北村訳)：“火炎と爆発”，p 102(昭47) 三共出版
- (8) 西田：“自動車排ガスによる大気汚染とその防止”(1968)



技術講座

UDC 534.8-8 : 681.89

超音波探傷試験法(1)

松山 宏*

1. まえがき

今日の社会は、生産された工業生産物が、十分に機能・性能を発揮しているという信用のうえに成立っているといつて過言ではないであろう。今日のわれわれの手近な工業生産物の例(鉄道レール、汽車や電車、自動車、航空機、船舶または高圧ガスタンクなど)は、その構成品、すなわち部品や外かくが、それぞれ正常にその役目をはたしている、または有害な欠陥がないと信用して使用しているわけである。それであればこそ、事故はこの信用の裏切りであり、大きな社会問題となると考えることはいなめない。この生産物の信用を維持する行為こそ、非破壊検査であることを深く認識されなければならない。

非破壊検査の技術は工業生産物の性能向上とともに向上し、今日では生産物について、または生産物の保守について、この検査を実施することは常識化するに至っている。

非破壊検査の手法としては、X線検査・超音波検査・磁粉探傷・渦流探傷など多くの種類がある。このなかで超音波探傷は、最近とくに非破壊検査手法のなかでも工業的に重要な地位を占めてきているが、これは次のような特長があることが理由であろう。

(1) 超音波を良く伝ば(播)する材質であれば、すべて超音波により検査しうる。

(2) 欠陥検出の感度が高く1~数mmの小さい欠陥の検出もできる。とくに機械強度的に問題のある材料の不連続部分(たとえばクラック)に関する検出感度が他の検査手法に比較して高い。

(3) 超音波をよく伝ばする、鉄やアルミなどでは10mにおよぶ距離からの反射波が得られるので、他の検査手法では、できないような厚い材料の内部検査が可能になる。

(4) 超音波探傷は、検査の結果をきわめて短時間に入手することができる。

(5) 放射線などのように人体に対する障害がない。

(6) 装置は可搬形もあり、現場で容易に使用することができる。

このような特長を超音波探傷法は有しているため、今後ともますます広く使用されることには疑う余地はない。

本講座では、超音波探傷について理解を深めてもらうとともに、この探傷分野にたずさわる技術者の参考に資することを願って執筆する。なお本講座は、6回にわたって連載を予定しており、その内容は次のとおりである。

第1回 超音波探傷の基礎

第2回 超音波探傷試験片の使い方

第3回 超音波探傷に関する規格

第4回 超音波探傷装置および探触子の構造

第5回 超音波探傷の実際、その1

(1) 装置の選び方と使い方

(2) 探触子の選び方

第6回 超音波探傷の実際、その2

(1) 探傷例

(2) 探傷上の諸問題

2. 超音波探傷の基礎

2.1 なぜ超音波が使われるか

音を使って物体の内部の様子を外側からさぐることは、古から行なわれてきた。たる(樽)をたたいて中の液量を知ったり、医者が患者の胸部を診断するような例は身近にみられる。

これらは、いずれも人間の聴覚による判断を主体としており、相当の熟練が必要であり、またその測定もきわめて大まかになることはさけられない。音を使って物体内部の様子を正確にさぐろうとして、既存の音響工学とレーダ技術の進歩が結びつき、従来の音響検査よりも定量的な音波探傷法が発達してきた。その結果、より小さな欠陥を、より正確な位置でとらえようとする要求から使用する音波の周波数がだんだん高くなり、超音波といわれる領域の音波を使用するようになってきた。

超音波とは、可聴音波(周波数が約20Hz~20kHzくらいの音波で健全な耳なら聞える)より周波数の高い音波であって、今日普通の材料検査には、400kHz~10MHzの周波数が使われている。音波の周波数が高い、すなわち波長の短い超音波を使うと、そのエネルギーの分散角度を数度以内にすることができる、鋭い音波ビームを物体内部に投射することができるようになる。このため送信の能率が増すとともに欠陥の位置の検出精度が高められる。

また、超音波は、空気中は伝わりにくく、液体や固体などに比較的よく伝わるという性質があり、この性質を利用して材料内部の探傷に広く使われている。

2.2 波動の種類と音速

超音波探傷を考えるときには、超音波の性質を知っている必要がある。ちょうど電波と光とX線が同じ電磁波でありながら、かなり異なる性質を持っているように、超音波もわれわれが日常親しんでいる「音」とは、いくぶん異なる性質を持っているので、この性質を超音波探傷と関連させて説明する。

(1) 縦波 (Longitudinal wave)

空気中を伝ばし、人間の聴覚に感じるのはこの波である。縦波は、媒質内の粒子が、外力によって圧縮または伸長の密度変化を起こして、次々とこの状態が伝わるから別に粗密波とも呼ばれる。超音波のうち、伝ば速度は最大である。(たとえば鋼鉄では 5.85×10^5 cm/s)

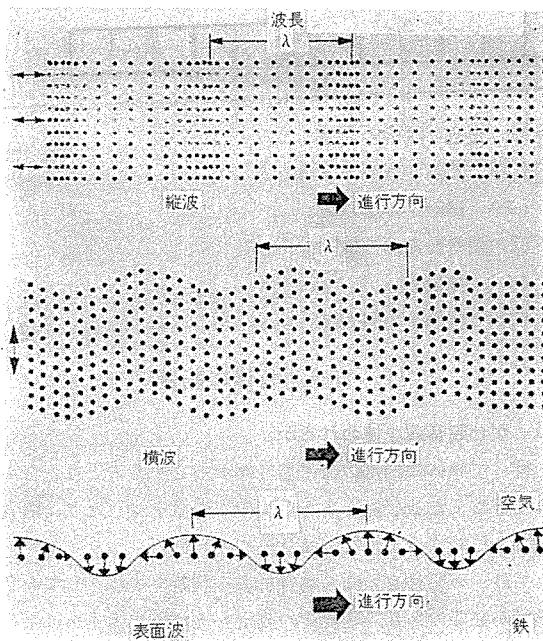


図 2.1 各種波動の粒子の動き

縦波の波動は図 2.1 に示すように、粒子の運動と波の伝ば方向が同じであり、固体でも液体でもすべての物体に伝わる性質があるため、超音波探傷では広く用いられている。

縦波の音速は次式で表わされる。

$$\text{縦波音速: } \sqrt{\frac{E}{\rho} \times \frac{(1-\sigma)}{(1+\sigma)(1-2\sigma)}}$$

上式で、 E : ヤング率 [N/m^2] ρ : 密度 [kg/m^3]

σ : ポアソン比

(2) 横波 (Shear wave)

柔らかいゴムやこんにゃくの端を上から押したり、放したりすると、その振動が順次横に伝わっていく。

このように外部からの振動が固体のようにせん(剪)断応力をもつ媒質に働くと、図 2.1 に示すように波の伝ば方向と直角方向に粒子の運動を起こす。これは形だけが変化して、粒子の間隔は変わらない。このような波を横波と呼ぶ。この波はせん断応力のあるものにのみ存在するので、液体や気体などの流体には存在しない。

伝ば速度は大略縦波の半分で(たとえば鋼鉄では、 $3.23 \times 10^5 \text{ m/s}$)同じエネルギーで発生しても、縦波は密度変化のため早く減衰するが、横波はこれがないので、より遠くまで伝ばする。横波は、振動源の振動方向と波の伝ば方向が異なるため、被検査材の検査面と直角の方向に存在する欠陥(たとえば、金属溶接部のクラックなど)の検査などに利用されている。

横波の音速は次式で表わされる。

$$\text{横波音速} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \times \frac{1}{2(1+\sigma)}}$$

表 2.1 各種物質の音速と縦波波長

材料	密 度 $\rho(10^3 \text{ kg}/\text{m}^3)$	縦波音速 $C_p(\text{m}/\text{s})$	横波音速 $C_s(\text{m}/\text{s})$	縦波波長 λ (mm)		
				2 MHz	5 MHz	10 MHz
鋼 鉄	7.70	5,850	3,230	2.93	1.17	0.58
アルミニウム	2.70	6,260	3,080	3.13	1.25	0.63
真ちゅう(錫)	8.50	4,640	2,070	2.32	0.93	0.46
銅	8.90	4,700	2,260	2.35	0.94	0.47
鉛	11.40	2,170	700	1.09	0.43	0.22
重フリントガラス	4.60	3,760	2,220	1.88	0.75	0.38
有機ガラス	1.18	2,720	1,460	1.36	0.54	0.27
ポリスチロール	1.05	2,340	1,150	1.17	0.47	0.23
ベーカライト	1.40	2,590	—	1.29	0.52	0.26
エボキシ樹脂	1.18	2,700	—	1.35	0.54	0.27
木	1.00	1,480	—	0.74	0.30	0.15
油	0.92	1,390	—	0.69	0.28	0.14
空 気	0.0012	330	—	0.165	0.066	0.03

表 2.2 鋼中および水中の波長

周 波 数 MHz	波 長 (mm)		
	水 中		鉄 中
	縦 波	縦 波	横 波
1	1.48	5.85	3.23
2	0.74	2.93	1.62
3	0.49	1.95	1.08
5	0.3	1.17	0.65

(3) 表面波 (Raleigh wave)

表面波は、液体や固体の表面をおもに伝わる波で、いくつかの種類が存在するが、普通は、レーレ波と呼ばれる波で代表している。これはちょうど縦波と横波を合わせたような形で伝ばする。すなわち、波の山の部分の粒子は密に、谷の部分は粗になって表面に垂直な振動をする。この波は金属の表面欠陥を検出するときに使われる。表面波の伝ば速度は、横波よりわずか(約10%)遅くなる。

$$\text{表面波の音速} = \text{横波音速} \times \frac{0.87 + 1.12\sigma}{1 + \sigma} \text{ (近似式)}$$

各種の物質の音速を表 2.1 に示す。

2.3 波長と周波数

波動とは、媒質のある状態の部分がある方向に反復して生じていることをいう。一つの状態の場所と、そのすぐ隣りあう状態の場所との距離を波長という。音の伝ば速度を C とすれば、波長 λ と周波数 f との間には次の関係がある。

$$C = f \times \lambda$$

鋼中および水中の波長を表 2.2 に示す。また各種材料の縦波波長を表 2.1 に示す。

このように超音波探傷に使用される波長は可聴音波の場合に比べてかなり短い。これが超音波探傷の探傷精度、分解能を高める要である。ただし、あまり波長が短くなると、探傷面のおうとつ(凹凸)が大きく探傷結果に影響するようになり、また超音波を発生するために使用する振動子が薄くなりすぎて、工業的に使い得るのは 15 MHz ぐらいまでである。

また材料中の超音波の減衰も波長が小さくなるほど増加するので、

鉄・非金属などでは、やむを得ず 0.5 MHz 以下を使っているものもあるが、波長が長くなるほど、欠陥の分解能（近づいて二つ以上存在する欠陥を別々に識別する能力）が低下するので普通工業的に使用されるのは 1~10 MHz である。

2.4 指向性

超音波は波長が短いので、十分遠方へ伝ばするとき、音は一定の方向へ強く放射される。これを指向性といふ。

半径 a (cm) の振動子を用いたとすれば、大部分の超音波エネルギーが集中する円すい(錐)の頂角 $2\theta_0$ は次式で表わされる。図 2.2 参照

$$\theta_0 = 68 \times \frac{\lambda}{2a} (\text{度})$$

λ : 試料中の超音波の波長 (cm)

普通に使用される振動子の直径は、15~20 mm ぐらいなので音波のエネルギーは数度以内に集中でき、欠陥の位置を正しくはあく（把握）するのに役立つ。この指向性は、音源から十分に遠方で論ずる問題であって、音源の近くでは、音源がある面積をもっているため複雑な干渉帯が生じ、図 2.2 に示すように音場は乱れており上記の式はあてはまらない。

近距離音場の長さ x_0 (cm) は円形の振動子の半径を a (cm)、波長を λ (cm) としたとき、近似的に次式で表わされる。

$$x_0 = \frac{a^2}{\lambda} (\text{cm})$$

近距離の干渉帯の中では、距離と放射エネルギーの強さが必ずしも

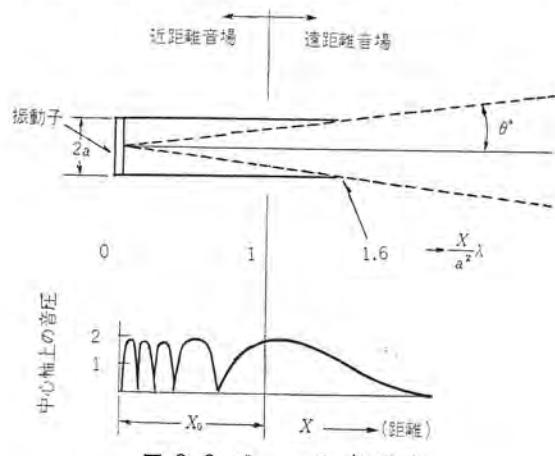


図 2.2 ビームの広がり

表 2.3 指向角および近距離音場の長さの計算例
(振動子 20 mm, 縦波の場合)

周波数 MHz	指向角(度)		近距離音場の長さ (mm)	
	鋼 中	水 中	鋼 中	水 中
1	20	4.8	17	70
2	10	2.4	34	139
3	6.5	1.6	51	208
5	3.9	1.1	85.5	344

比例しないから、超音波探傷法においては、この特異性を十分認識しておく必要がある。表 2.3 に指向角と近距離音場の長さの計算例を示した。

2.5 平面における超音波の垂直反射

超音波探傷法で最も広く使われている方法は、パルス反射法である。（詳しくは後述する）これは“山びこ”の現象と同じように物質の不連続部から音波が反射する性質を用いて、材料中の不連続部すなわち欠陥を発見する方法である。

このように音波は物質の不連続部で反射するが、この不連続部とは、本来の材料の物質と異種の物質、たとえば空気の層との境界面が存在するということである。このような境界面に垂直に音波が当たるときは、音波はそこで反射する成分と透過する成分とに別れる。その割合はそれらの物質の音響インピーダンスによって決まる。

いま図 2.3 に示すように、物質 I から物質 II との境界面に音波が当たったとき、その音圧を P_0 とする。そうすると、その瞬間に物質 I 側に P_r 、物質 II 側に P_t という音圧が生じ、それぞれの方向に音波が進行する。このときの音圧の割合は、それぞれの物質の音響インピーダンスの関係で決まる。音響インピーダンスを Z とし、音速を C 、密度を ρ で表わすと $Z = \rho \cdot C$ となる。

ここで境界面で反射する方向の音圧 P_r と透過(通過)する方向の音圧を P_t とし音圧 P_r の音圧 P_0 に対する割合、すなわち音圧反射率を V_r とすれば、 V_r は次式で与えられる。

$$V_r = \frac{P_r}{P_0} \times 100 = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \times 100 (\%)$$

ここで、 Z_1 : 物質 I の音響インピーダンス

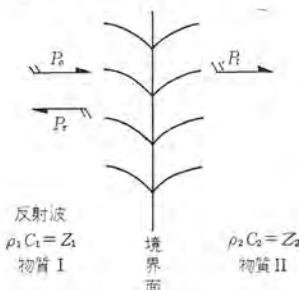


図 2.3 平面の垂直反射

表 2.4 各物質間の音圧反射率

物質	音響インピーダンス kg/m²s	音圧反射率 %				
		油	水	有機ガラス	ベーカライト	アルミニウム
鋼 鉄	4.51×10^7	94	93	86	85	45
真ちゅう	3.94×10^7	93	93	84	83	40
アルミニウム	1.69×10^7	86	85	67	65	0
ベーカライト	0.36×10^7	45	40	4	0	
有機ガラス	0.32×10^7	45	40	0		
水	0.148×10^7	6	0			
油	0.128×10^7	0				

技術講座

Z₂ : 物質IIの音響インピーダンス

この式の意味することは、二つの物質の音響インピーダンスがほとんど同じになると分子がゼロ、すなわち反射する音圧がなくなり、その逆に、二つの物質の音響インピーダンスの差が大きいと、分子と分母はほとんど同じになり、音圧反射率が1、すなわち100%になることである。

いくつかの物質間の音圧反射率を表2.4に示す。

一例として、鋼鉄にクラックがあると境界面が空気層であるから、この場合100%の音圧反射率となる。もしこの間に水がぎっしりつまっていたとすれば93%の反射率となり7%は透過することになる。

2.6 屈折と反射

次に超音波探傷を行なう場合に、超音波が斜めに入射したときに、その角度にどんな変化が起きるかを知っておく必要がある。

超音波は光と同じように、それぞれ音速の異なる境界面では屈折・反射する。したがって超音波に対するレンズ・ミラー・プリズムなどを作ることが可能である。

超音波の場合は振動姿態がたくさんあるために境界面で振動姿態の変換が起こり、縦波の入射ビームから横波や表面波を作ることができる。

図2.4に液体から固体への入射の例を示したが、ここでは ϕ_1 なる角度で入射したビームが、一部は法線に対称な角度で反射し、一部は縦波、横波それぞれ異なる角度で屈折する。

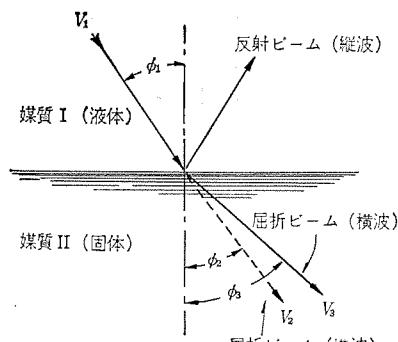


図2.4 屈折と振動姿態の変換

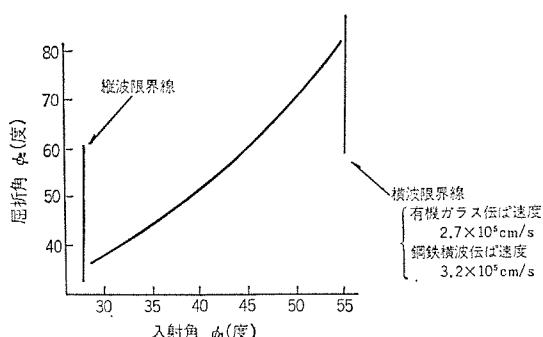


図2.5 有機ガラスから鋼中への入射角と屈折角

入射角と屈折角の関係については、光の場合と同じスネルの法則が成り立ち、それぞれのビームの音速を V_1 , V_2 , V_3 とすれば

$$\frac{\sin \phi_1}{V_1} = \frac{\sin \phi_2}{V_2} = \frac{\sin \phi_3}{V_3}$$

となる。

横波は縦波より音速は小さいから ϕ_2 は ϕ_3 よりも小さくなる。超音波探傷法ではビームを斜めに入れて使う場合、横波を使用する。 ϕ_3 が90度以上になるまで(臨界角) ϕ_1 を大きくすれば、もはや縦波の屈折ビームは生じないから、欠陥からの反射波形も単純な形になります、また横波の発生効率もよくなる。

実際に超音波探傷の斜角法(次章で述べる)では、屈折縦波について臨界角以上の入射角を使用する。斜角法では、音波を被検査物に斜めに入射するために有機ガラス製のアタッチメントが多く使用されているので、図2.5に入射側を有機ガラス、屈折側を鋼鉄とした場合の入射角と屈折角の関係を示す。

表面波は ϕ_2 が90度を越えるところから発生はじめる。

3. 超音波探傷の原理

3.1 超音波探傷法の分類

超音波探傷法を方法と目的で分類すると次のようにになる。

(1) 探触子法	直接接觸法	垂直法	内部欠陥、ラミネーション
		斜角法	溶接部、板、管等の探傷
		表面波法	仕上良好な面の表面欠陥
		板波法	うすい板、管等の探傷
(2) 探触子法	分割形探傷法	水浸法	未仕上面からの検査
		近距離の探傷等	
(2) 探触子法	水浸法	透過法	減衰の大きな物質の探傷
		減衰の大きな物質の探傷	

3.2 1 探触子法

1探触子法は、すべて超音波が物質内の不連続部分で反射してもとの送信点へ戻ってくる性能を用いている。超音波探傷法ではもともと一般的な方法であり、不連続部分、すなわち欠陥の位置と広がりを最も正しく測定することができる。

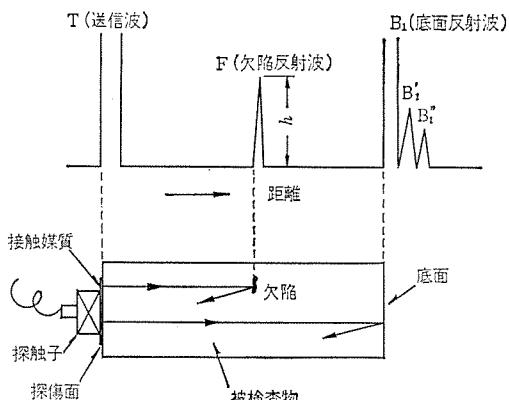


図3.1 超音波探傷の基本図(垂直探傷)

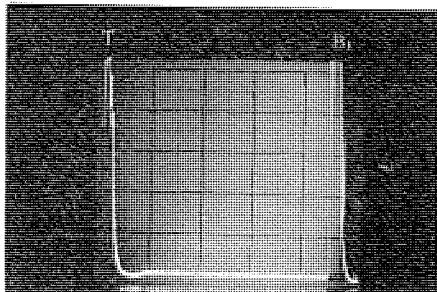


図 3.2 欠陥なしの探傷图形

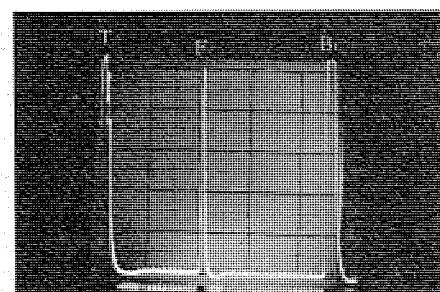


図 3.3 探傷面から 40 mm 位置の探傷图形

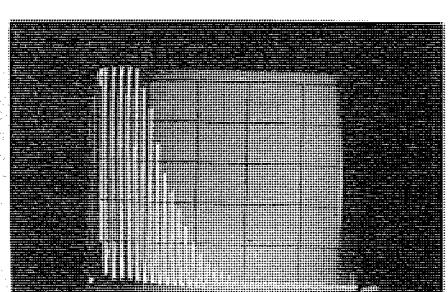


図 3.4 正常な場合

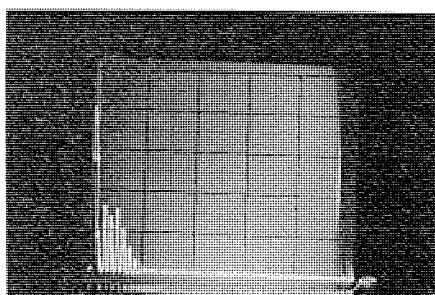


図 3.5 異常のある場合

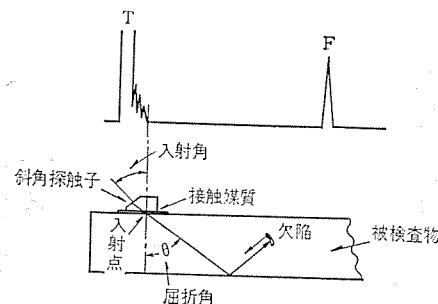


図 3.6 斜角探傷法の基本図

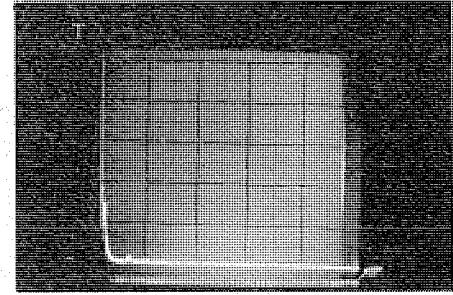


図 3.7 欠陥なしの探傷图形

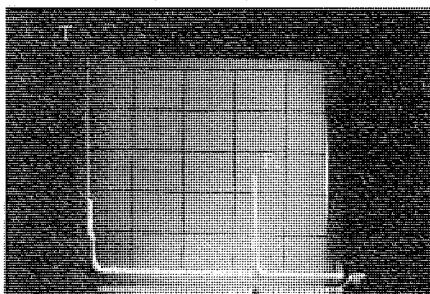


図 3.8 欠陥ありの探傷图形

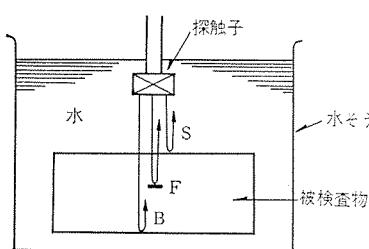


図 3.9 水浸法

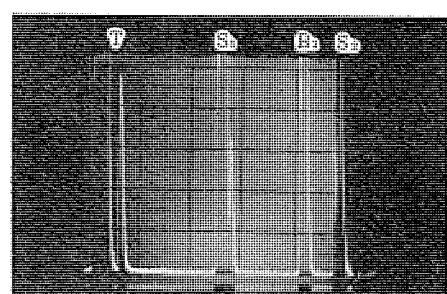


図 3.10 欠陥なしの場合

(1) 垂直法

垂直法は、探傷面へ垂直に音波を送信し、欠陥があれば音波が反射され、装置のブラウン管上に欠陥の信号として表示する方法である。

図 3.1 は探傷の基本図である。探触子から放射された超音波は被検査物中を直進し、もし欠陥が存在すれば、その欠陥(F)に超音波が当たり反射して、ふたたびもとの探触子のところへ戻ってきて受信される。

この反射して戻ってくるまでの時間および反射波の高さをおのとのブラウン管上の横軸と縦軸として表示したものである。

図 3.1において、Tは送信波、Fは欠陥からの反射波、B₁は被検査物の底面からの反射波であり、T、F間は欠陥までの距離を表わし、Fの高さ(h)は、欠陥によって反射された音の強さ(音圧)を表わしている。

この探傷面より欠陥までの距離を表示しうる点と、探傷面より数メートルもの深部の欠陥を検出できる点が垂直法のもっとも特長とするところである。

図 3.2 は欠陥のない場合のブラウン管波形を表わし、図 3.3 は探傷面より 50 mm の位置に欠陥のあることを表わす波形である。

普通は、ブラウン管波形は図 3.1 の形で観測できるように、装置(超音波探傷器)の時間軸を調整すればよいが、B₁以下の波形は被検査物の形状寸法の影響で表われてくることがあるため、特別な場合を除き、判定の対象としない。

垂直法の特別な例として、薄い板材などを探傷する場合、B₁以後の多重反射を判定に供する多重反射法がある。多重反射法で行なった探傷图形を図 3.4、3.5 に示す。

(2) 斜角法

斜角法は、探傷面へ斜めに超音波を送受信させる方法をいう。通常斜角法では被検査物内の超音波は横波を使用する。(垂直法の場合は縦波である)

図 3.6 のように、斜角探触子から被検査物へ斜めに音波を入射させると、入射点で屈折し、縦波が横波に変換され、被検査物内へ伝ばする。通常屈折角θは 40°~80°(法線に対し)の範囲が広く使

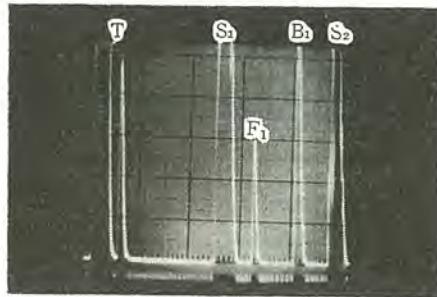


図 3.11 欠陥ありの場合

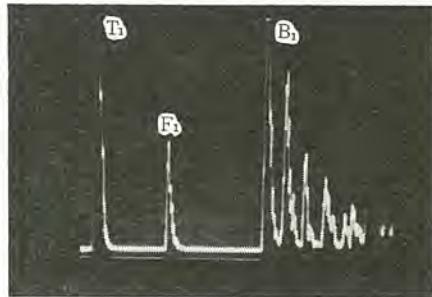


図 3.12 分割形探触子法で探傷面より 1 mm 位置の欠陥を探傷した波形

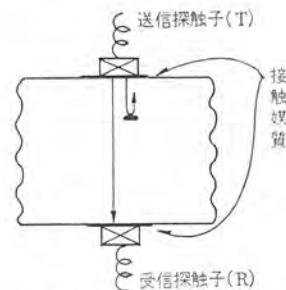


図 3.13 透過法

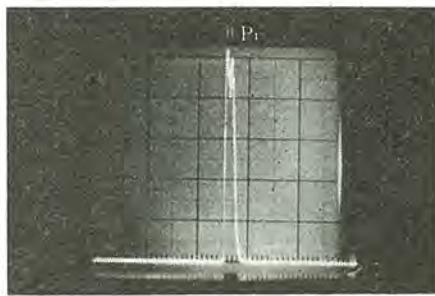


図 3.14 欠陥なしの探傷図形

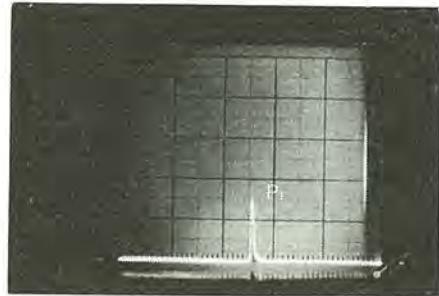


図 3.15 欠陥ありの探傷図形

われている。

斜角法はおもに溶接部の探傷に使用されるが、板・管・丸棒・軸類などにも使用されている。

図 3.6 は斜角法の基本的な探傷方法と探傷波形を示す。欠陥が存在しない場合は、送信波(T)のみが表われ、欠陥が存在すれば欠陥からの反射波(F)が表われる。図 3.7, 3.8 に実際の斜角探傷を実施したときの探傷図形を示す。

(3) 水浸法

水浸法は図 3.9 に示すように、被検査物を水中に入れて探傷する方法で、探傷波形は図 3.10, 3.11 に示す。

すなわち、水浸法は探触子から送信された超音波をある程度長い距離の水中を伝ばせたのち被検査物に入射させる方法である。

水浸法は、探触子と被検査物が直接接触しないので、超音波の送受が安定に行なわれる。

直接接触法では探触子と被検査物の探傷面とは油などの接触媒質の薄膜を介して接触するので、油膜の厚さおよび探傷面の面あらさによって超音波の送受の能率が変動して、パルス反射法では、その波形が変化するほど微妙な影響をうける。しかし水浸法では超音波はまず探触子から水中に送信されるため、超音波の送受はきわめて安定になる。

また被検査物表面のあらさはもちろん探傷波形に影響を与えるが、直接接触法と比べると、はるかにこの影響は少なくなる。このように水浸法は安定に探傷でき、しかも接触摩耗がないので自動探傷の

目的に広く用いられている。

また水浸法では被検査物に対する探触子の向きを自由に変えることができる、斜角探傷も容易に行なうことができる。

3.3 2 探触子法

2 探触子法は、1 探触子法と同じように物質内の不連続部分での反射を受信する方法と、物質内の不連続部分で反射した残り、すなわち物質を透過した超音波を受信する方法があり、いずれも 1 探触子法ではみられない特長を有している。

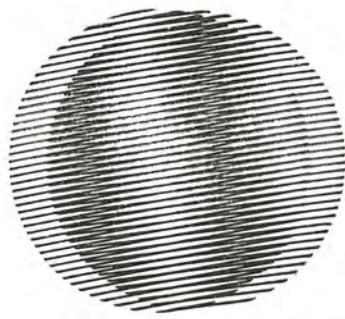
(1) 分割形探触子法

これは送信用および受信用の探触子を別々に設けて、送信波が直接受信增幅部に導入されないようにする。このようにすると、ブラウン管上で送信パルス波形の広がりを狭くすることができる。表面のごく近くの欠陥の検出が可能になる。図 3.12 は探傷面下 1 mm の位置にある欠陥を探傷した場合の波形を示す。

(2) 透過法

透過法は図 3.13 に示すように、被検査物をはさんで二つの探触子を設け、被検査物を透過してきた超音波エネルギーを受信して、欠陥の有無を判定する。

今まで述べた他の方法はすべて、欠陥があればブラウン管上欠陥波が表示されたが、この方法では逆にブラウン管上の波形は低くなるところが大きく異なる。図 3.14, 3.15 に実際の探傷波形を示す。
(昭和 48-4-4 受付)



新製品紹介

新形三菱エアハンドリング ユニット

近年、空気調和は急速に普及し、もはや私達の生活に欠くことができないといつても過言ではない。一方、地価の高騰は著しく、このため建物の床面積は最大限に利用されるようになり、機械室の機器据付スペースは、ますます小さくなってきた。

当社ではこのたび、これらの状勢に対応し、高性能多翼形送風機、高性能波形フィンコイル、エアフィルタ、加湿器、およびエリミネータ等よりなり、チーリングユニット、ボイラ等と組み合わせて空気調和（冷暖房、温湿度調節、および空気清浄）を行なうことができる、三菱エアハンドリングユニット新形シリーズ10機種（AD 50 S, AD 70 S, AD 100 S, AD 150 S, AD 200 S, AD 300 S, AD 400 S, AD 500 S, AD 650 S, AD 800 S）を完成した。

■特長

- (1) コンパクトで据付が容易
 - (i) 従来の縦形、および横形をコンパクトな新しい形状に統一した。
 - (ii) 従来のものよりさらに小形軽量化し、据付スペースの大幅節約および現地据付の容易化を実現した。
- (2) 高性能波形フィンコイル
当社独特の波形フィンを採用しているので、熱交換性能がとくにすぐれている。
- (3) 高性能送風機
 - (i) 理想的設計の高効率両吸込多翼形送風機を使用しているので静肅な運転を行なう。
 - (ii) 高効率のため消費電力が少なく経済的である。



エアハンドリングユニット AD 200 S

【長崎製作所】

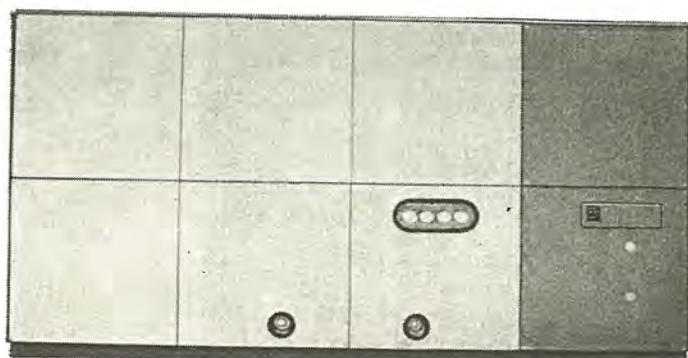
大形パッケージエアコン PF-100 F/120 F

大形パッケージエアコン業界をリードする当社は、さらに小形・軽量化したパッケージエアコン PF-100 F/120 Fを開発し発売を開始した。

本ユニットは従来のものに比べ据付面積、重量で大幅減少を達成したのをはじめ、広範囲の負荷に対して効率の良い運転を行なうように多段の容量制御機構を有するなどの特長をもつパッケージエアコンである。

また、最近特に要求がきびしくなってきた騒音に対しても、圧縮機吐出管に消音器を取り付けて騒音の低下を計っている。

そのほか、特殊仕様のユニット（オールフレッシュ形、高風圧形など）も含め、ビルやスーパーの空調から、工場冷房、病院の手術室まで、あらゆる空調にマッチしたユニットを取りそろえている。



PF-100 F

新製品紹介

■ 特長

- (1) 小形・軽量で、据付面積はこのクラス最小。
- (2) 運転音が小さく、静謐な冷房を行なう。
- (3) 4ステップサーモを内蔵し、きめ細かな温度制御が可能。
- (4) 遠方操作が簡単にできる。
- (5) 冷却水、暖房器(オプション)の配管は、左右いずれからでも接続できる。
- (6) 起動電流がわずかである。(PF-100Fは順次起動、PF-120Fは入-△起動)
- (7) 空気冷却器は当社独自の特殊波形 フィンを使用。
- (8) 色はブルーと深いグレーのツートンカラー。

■ おもな仕様

項目	形名	PF-100 F	PF-120 F
電 源		200/220 V, 50/60 Hz	
外 形 尺 法	高さ mm	1,850	1,850
	幅 mm	3,610	3,960
	奥行 mm	1,485	1,505
外 装		マンセル 5YR 8/0.5, 10B 5/8 のツートンカラー	
性 能	冷房能力 kcal/h	275,000/300,000	330,000/360,000
冷媒回路	圧縮機形式×台数	密閉×2	密閉×1
	電動機出力 kW	34×2/36×2	84/90
	凝縮器形式×台数	シェルアンドチューブ式×2	シェルアンドチューブ式×1
	空気冷却器	波形プレートフィン	
	冷媒制御器	温度式自動膨張弁	
	冷媒	R-22	
送風機	送風機形式×台数	シロッコファン	
	風量 m³/min	900	1,040
	機外静圧 mmAq	30	30
	電動機出力 kW	18.5	22
冷却水	水量 32°C m³/h	57.6/72	72/90
起動方式	直入起動(順次起動)	入-△起動	
保護装置	高低圧開閉器、溶栓、圧縮機、送風機、過電流リレー		
	※油圧開閉器、※巻線保護サーモ、※安全弁		
エアフィルタ		サランハニカム綿	
温度調節器		4ステップサーモ	
標準外取付可能機器		蒸気・温水暖房器、加湿器、断水開閉器	
重量	kg	3,700	3,850

注) (1) ※印はPF-120のみ

(2) 仕様は改良のため予告なく変更することがある

[長崎製作所]

新形“三菱クーラントポンプ”JEMシリーズ完成

三菱オイルポンプは、工作機械をはじめ各種産業用機械の切削剤・研削剤等の循環ポンプとして採用され好評を博しているが、このポンプについては従来業界の規格がなく、電気機器製造業者が独自の仕様で製造していた。今回使用者側である工作機業界よりポンプの取付寸法を統一し、互換性を持たせると同時に、出力・特性等の規格化を要望され、電機工業会において“JEM-1242”として規格化された。このため現行オイルポンプはJEM規格によるクーラントポンプに代ることになり、次のような特長をもつ、新形“三菱クーラントポンプ”JEMシリーズを完成了。

■特長

(1) JEM-1242準拠

規格化された寸法、構造である。

(2) 豊富な吐出量

(i) 清水特性は規格値を十分満足している。

(ii) 高粘度(油)特性も抜群である。

(iii) NQ形(浸漬形)で油面が低下しても空気を吸入する事なく流量が低下しない。

(3) 完全な軸封装置

NP形(自吸形)に信頼性の高いメカニカルシールを使用しているので非常に寿命が長い。

(現行のメカニカルシールの2倍の寿命となっている)

(4) あらゆる機械にマッチするスマートなデザイン

写真のように円すい(錐)をベースとしているので全体に安定感がある。

(5) E種モートルの採用で耐久力がすぐれている。

■機種

表のようにNP形・NQ形各5機種で呼び名として、形名の後に“JEMシリーズの“J”をついている。



形名	モートル仕様、三相かご形モートル				
	出力W	極数	電圧V	周波数Hz	構造
自吸形	NP-60J	60	2	200/200/220	全閉形
	NP-100J	100	2	200/200/220	全閉形
	NP-180J	180	2	200/200/220	全閉形
	NP-250J	250	2	200/200/220	全閉外扇形
	NP-400J	400	2	200/200/220	全閉外扇形
浸漬形	NQ-60J	60	2	200/200/220	全閉形
	NQ-100J	100	2	200/200/220	全閉形
	NQ-180J	180	2	200/200/220	全閉形
	NQ-250J	250	2	200/200/220	全閉外扇形
	NQ-400J	400	2	200/200/220	全閉外扇形

[名古屋製作所]

正誤表

本誌 Vol. 47 No. 6 の表紙および背文字の特集題名に誤りがありましたので訂正いたします。

正	配線用しゃ断器および制御器特集
誤	配電用しゃ断器および制御器特集

NEWS FLASH



ケーブル故障検出装置

ケーブル故障検出装置というものは、再閉路装置付きの送電線で、一部にケーブル部分がある。ケーブル部分の故障で再閉路装置を自動的にロックする目的で設置されるものである。ケーブル部分の故障は一般に永久故障が多く、再閉路させたばい失敗になるのみでなく、ケーブル事故点の損傷が大きくなる傾向がある。最近そのような系統が多く、本装置の需要が増加している。

ケーブル部分の故障を検出する方法としては、方向地絡リレーを使用して架空側の故障かケーブル側か判断する方式が考えられるが、当社ではいかなる系統にも使用可能でしかも信頼度の高い表示線継電方式を採用している。

現在までに約200端子製作し納入した。

■仕様

1. 方式 表示線継電方式（地絡保護を採用）、区間内充電・流補償式

2. 装置の大きさ

故障検出端 700幅×2,300高×600奥（箱形）

ケーブル立上り端 630幅×2,030高×800奥（屋外箱形）

3. 故障検出感度

2端子系で0.15~0.6A

4. 検出時間

200%入力で 約60~80ms

5. 装置VA

CT 1.3Ω PD三次 約5VA



図1 ケーブル故障検出側装置
(2回線分収納)
表示線監視装置付



図2 ケーブル立上り側装置(屋外)
(2回線分収納)

関西電力(株)下小鳥発電所納め

146,000kVA水車発電機運転開始

関西電力(株)下小鳥発電所向けに製作した146,000kVA水車発電機の官庁検査が、このほど好成績にて終了し営業運転を開始した。

この発電機は三菱重工(株)製の146,000kWフランシス水車と直結され、発電専用機としてはわが国最大容量のものである。

とくに発電機については経済性追及のため、工場における全組立検査および回転試験をいっさい省略し、工場製作から現地における据付調整および試運転にいたるまで、一貫した品質保証活動をおこなって、信頼性の向上と初期故障の絶滅につとめた。その結果、短納期にもかかわらず、1ヵ月以上も運転開始を繰上げることができたことは、その輝かしい成果であり、48年夏季の電力需要ピーク時には多大の貢献を果すことができる。

そのほか、この発電機の特長として

(1) スラスト軸受

油そう(槽)外に油冷却器を設置し、軸受潤滑油の循環はランナに設けられたポンプホールによっておこなわれる、いわゆるセルフポンプ方式を採用



した。また軸受は当社標準のキングスペリ形で、油そう外周の点検窓より容易にパッドを交換できる構造とした。

(2) 固定子コイル

新型エポキシ樹脂絶縁を採用した。商用周波およびインバ尔斯破壊試験ならびに各種非破壊試験に優秀な成績をおさめた。

(3) 効率試験

工場試験を省略したため、効率試験は発電所にてカロリー法をもちいておこなわれる。などがあげられる。

なおおもな発電機仕様はつぎのとおりである。

形 式:	半かさ形回転界磁全閉内冷形(空気冷却器つき)
容 量:	146,000 kVA
電 壓:	16,500 V
電 流:	5,110 A
力 率:	97 % おくれ
周波数:	60 Hz
回転数:	277 rpm
はずみ車効果:	4,200 t-m ²
励磁方式:	サイリスタ励磁

【神戸製作所】

漁船用全自動省力化冷凍機

漁船においても資源の減少、乗組員の不足など企業環境が悪化するにつれて、その装備に対する合理化・省力化の要求が高まってきた。とりわけ冷凍設備は漁船における最も重要な装備の一つでありながら、従来より省力化の最も困難な機器とされ、今日に至るまで必ずしも満足のできる状態にはなかった。

そこで当社では数年前よりこの問題と取組み種々研究開発を行なってきたが、このたび従来とはまったく異なる新しい冷却システムとそれに使用する画期的な全自動省力化冷凍機を開発し、これを宮崎県漁業試験船「みやざき丸」に納入したので紹介する。

本システムおよび冷凍機の特長は次のとおりである。

(1) 従来の直膨式冷却システムに代えて、ブラインを使用する間接冷却システムを探用している。このためシステムとしての信頼性が飛躍的に向上する。

(2) ブラインシステムでは冷媒系統を独立したユニットとして工場で製作できるので、冷凍機としての信頼性が向上する。

(3) 現場における据付は電源・冷却水配管・ブライン配管の接続のみでよい。またブライン配管は従来の冷媒ガス配管に比べて格段に容易である。このため、現場据付工事の大幅な省力化が可能である。

(4) ブライン冷却ユニットではゴミ、油上り、波戻り等の問題がなく、また押しボタン操作による完全自動運転ができるので、運転、メンテナンス両面にわたって大幅な省力化が可能である。

【長崎製作所】

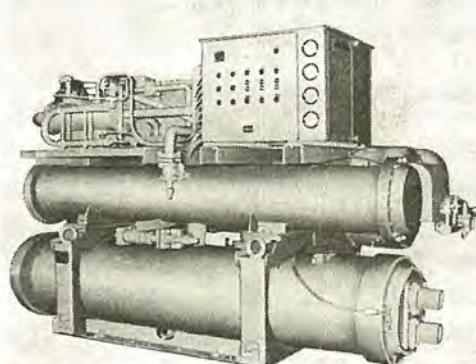


図 1 船用全自動省力化冷凍機 (BCS-120 形)



図 2 宮崎県漁業試験船「みやざき丸」

当社の登録実用新案

登録番号	名 称	考 案 者	登録番号	名 称	考 案 者
961803	自動換気扇	佐々木武敏	965886	ダイオードマイクロ波回路	白幡潔・武富大児
961805	自動換気扇	佐々木武敏	965888	レンジフード	立山茂
961807	自動換気扇	牛越康徳	965885	食器洗浄機の洗浄液噴射装置	吉村宏
961808	自動開閉シャッタ付き換気扇	神谷昭美・田口幹雄 川淵勇	965884	食器洗浄機の洗浄液噴射装置	小川昇・村岡和典
961810	トースター	島弘三	965883	食器洗浄機の洗浄液噴射装置	関根文男
961811	トースター	島弘三・鶴田剛司	965882	浮遊防材	村岡和典・関根文男
961812	トースター	島弘三・鶴田剛司	965887	浮遊防材	木名瀬武男・内田勉
962888	電気掃除機	武井久夫・加藤悟 田山勇	965889	冷凍装置	木名瀬武男
963743	角のみの保護装置	神信昭仁・弘瀬潔	965890	冷凍装置の受液器	森光幸次・三浦隆
963740	無整流子形電動機装置	赤松昌彦	965891	乾燥器の取付装置	中村雄二・藁科公彦
963742	論理演算素子	壺井芳昭	965894	空気調和装置の冷媒回路	大石建治
963744	トレーサヘッドの軸受装置	奥田安男・永瀬勇	965895	水管の凍結防止用自動排水装置	玉山殿
963745	帶域阻止濾波器	中川幹雄・森田忠男	965892	熱ポンプ式空気調和装置	大谷泰昭・安立博樹
963746	自動溶接機用開光ガイド機構	鶴鉢順・平松正穂	965893	熱ポンプ式空気調和装置	玉山殿
963749	トランジスタ増幅器	早水弘一・堀場康孝	965897	動圧形浮動磁気ヘッド支持装置	佐藤喜一
963741	車輌用冷房装置	清水一朗・和栗靖矩	965909	換気扇取付装置	東山昇・小川芳徳
963747	注入発泡絶縁冷蔵庫の内箱	駒形栄一	965901	換気扇	菊地清秋
963748	冷蔵庫扉	駒形栄一	965902	室内空気循環機	長瀬卯三郎
965860	サーキュレータ	中原昭次郎・川端俊一郎	965907	自動シャッタ開閉装置付換気扉	田口幹雄
965861	サーキュレータ	中原昭次郎・川端俊一郎	965903	換気扇取付装置	藤井学
965862	無整流子電動機装置	赤松昌彦	965904	換気扇取付装置	田口幹雄・川淵勇
965865	エスカレータまたは移動通路の停止装置	鬼頭勝巳	965905	換気扇取付装置	田口幹雄・川淵勇
965868	整流回路	岡村宗和	965906	換気扇のシャッタロック装置	田口幹雄・川淵勇
965869	エレベータの非常停止用スイッチ	牧野克巳	965908	換気扇	川淵勇
965871	パルス変換装置	佐藤安俊・余村信雄	965910	自動開閉シャッタ付換気扇	川淵勇・田口幹雄
965872	半導体装置	奥泰二・三井茂 高見良典	964542	巻上げ機の位置表示装置	神谷昭美・吉村宏
965874	コロガリ軸受のグリース排出装置	村山茂	964543	避雷器	木内修
965875	クラッチモートル	横山昌弘	964544	フリップフロップ回路	岡田昌治・永井信夫
965876	移動手すりの出入口安全装置	鬼頭勝巳	964545	冷蔵庫の塞ぎ板装置	加来勲
965878	インジケータ	藤原修	964546	冷蔵庫扉	壺井芳昭・松原要
965880	線源容器	津田元裕	965900	窓据付型換気扇	鈴木正高
965881	半導体素子用液冷放熱器	山本勇	968976	交流電動機用速度制御装置	名倉利男・杉山悦朗
965896	レール装置	尾花健一	968977	整流子電動機の制動装置	鈴木欽三・日置深夫
965898	冷温水機	飛田徹二・渡辺靖	968978	誘導電動機の減速装置	小野健一
965864	計算機	加藤義明・中村忠教	968979	増幅器	酒井勝正
965866	電気掃除機の集塵量表示装置	加藤悟・南日国伸 荒木郁夫	968980	やぐらこたつの保温装置	酒井勝正
965867	再書き込み抑止回路	畿田博靖	968983	採暖いす	武井久夫
965870	販売スタンド	清水顕・山越明秀 吉田明彦	968984	採暖いす	山田英樹・加太義武
965873	録音再生増幅器	寺田武	968996	変圧器鉄心	内田武士・長沢重雄
965877	浮遊防材	宇川彰	968985	リモート兼用本体スイッチ付き電気掃除機	長沢重雄
965879	偏差検出器	石田哲爾・金子弘美	968987	採暖いす	富樫義弘
965899	ボールクラッチブレーキ	奥田安男・今泉尚			内田武士・山田英樹 加太義武

本社・営業所・研究所・製作所・工場所在地

本社 東京都千代田区丸の内2丁目2番3号(三菱電機ビル) (番 100) (電) 東京 (03) 218局2111番

大阪営業所	大阪市北区梅田町8番地(西阪神ビル) (番 530)	(電)	大阪 (06)	343局1231番
名古屋営業所	名古屋市中村区広井町3丁目88番地(大名吉屋ビル) (番 450)	(電)	名古屋 (052)	565局3111番
静岡出張所	静岡市伝馬町16の3番地(明治生命静岡支社) (番 420)	(電)	静岡 (0542)	54局4681番
福岡営業所	福岡市中央区天神2丁目12番1号(天神ビル) (番 810)	(電)	福岡 (092)	72局2111番
長崎出張所	長崎市丸尾町7番8号(長崎底曳会館) (番 852)	(電)	長崎 (0958)	61局6101番
札幌営業所	札幌市中央区北2条西4丁目1番地(北海道ビル) (番 060-91)	(電)	札幌 (011)	212局3711番
仙台営業所	仙台市大町1丁目1番30号(新仙台ビル) (番 980)	(電)	仙台 (0222)	21局1211番
富山営業所	富山市桜木町1番29号 (番 930)	(電)	富山 (0764)	31局8211番
広島営業所	広島市中町7番32号(日本生命ビル) (番 730)	(電)	広島 (0822)	48局5311番
岡山出張所	岡山市駅前町1丁目9番地(明治生命館) (番 700)	(電)	岡山 (0862)	25局5171番
高松営業所	高松市鶴屋町2番1号 (番 760)	(電)	高松 (0878)	51局0001番
新潟営業所	新潟市東大通1丁目2番23号(北陸ビル) (番 950)	(電)	新潟 (0252)	45局2151番
東京商品営業所	東京都千代田区丸の内2丁目2番3号(三菱電機ビル) (番 100)	(電)	東京 (03)	218局2111番
関東商品営業所	大宮市大成町4丁目298番地(三菱電機大宮ビル) (番 330)	(電)	大宮 (0486)	65局3211番
大阪商品営業所	大阪市北区堂島北町8番地の1 (番 530)	(電)	大阪 (06)	344局1231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(大名吉屋ビル) (番 450)	(電)	名古屋 (052)	565局3111番
福岡商品営業所	福岡市中央区天神2丁目12番1号(天神ビル) (番 810)	(電)	福岡 (092)	72局2111番
札幌商品営業所	札幌市中央区北2条西4丁目1番地(北海道ビル) (番 060-91)	(電)	札幌 (011)	212局3777番
仙台商品営業所	仙台市大町1丁目1番30号(新仙台ビル) (番 980)	(電)	仙台 (0222)	21局1211番
北陸商品営業所	金沢市小坂町西97番地 (番 920)	(電)	金沢 (0762)	52局1151番
広島商品営業所	広島市中町7番32号(日本生命ビル) (番 730)	(電)	広島 (0822)	48局5311番
高松商品営業所	高松市鶴屋町2番1号 (番 760)	(電)	高松 (0878)	51局0001番
東京機器営業所	東京都港区北青山1丁目2番3号(青山ビル) (番 107)	(電)	東京 (03)	404局0336番
大阪機器営業所	大阪市北区堂島北町8番地の1 (番 530)	(電)	大阪 (06)	344局1231番
名古屋機器営業所	名古屋市中村区広井町3丁目88番地(大名吉屋ビル) (番 450)	(電)	名古屋 (052)	565局3111番
静岡機器営業所	静岡市小鹿2丁目1番22号 (番 420)	(電)	静岡 (0542)	82局2061番
浜松機器営業所	浜松市海老塚町479の1 (番 430)	(電)	浜松 (0534)	54局4121番
中央研究所	尼崎市南清水字中野80番地 (番 661)	(電)	大阪 (06)	491局8021番
生産技術研究所	尼崎市南清水字中野80番地 (番 661)	(電)	大阪 (06)	491局8021番
商品研究所	鎌倉市大船2丁目14番40号 (番 247)	(電)	鎌倉 (0467)	44局6111番
神戸製作所	神戸市兵庫区和田崎町1丁目1番2号 (番 652)	(電)	神戸 (078)	671局5041番
伊丹製作所	尼崎市南清水字中野80番地 (番 661)	(電)	大阪 (06)	491局8021番
三田工場	三田市三輪町父々部85番地 (番 669-13)	(電)	三田 (07956)	3局4371番
赤穂工場	赤穂市天和651番地 (番 678-02)	(電)	赤穂 (07914)	3局2221番
長崎製作所	長崎市丸尾町6番14号 (番 850-91)	(電)	長崎 (0958)	61局6211番
稻沢製作所	稻沢市菱町1番地 (番 492)	(電)	稻沢 (0587)	32局8111番
和歌山製作所	和歌山市岡町91番地 (番 640-91)	(電)	和歌山 (0734)	36局2111番
鎌倉製作所	鎌倉市上町屋325番地 (番 247)	(電)	鎌倉 (0467)	44局1111番
通信機製作所	尼崎市南清水字中野80番地 (番 661)	(電)	大阪 (06)	491局8021番
北伊丹製作所	伊丹市瑞原4丁目1番地 (番 664)	(電)	伊丹 (0727)	82局5131番
熊本第一工場	熊本市竜田町弓削720番地 (番 862)	(電)	熊本 (0963)	38局7211番
熊本第二工場	熊本県菊池郡西合志町御代志997 (番 861-11)	(電)	熊本 (09624)	2局0151番
名古屋製作所	名古屋市東区矢田町18丁目1番地 (番 461)	(電)	名古屋 (052)	721局2111番
旭工場	尾張旭市下井町下井 (番 488)	(電)	尾張旭 (05615)	3局5101番
福岡製作所	福岡市西区今宿青木690番地 (番 819-01)	(電)	福岡今宿 (09295)	6局0431番
福山製作所	福山市緑町1番8号 (番 720)	(電)	福山 (0849)	21局3211番
相模製作所	相模原市宮下1丁目1番57号 (番 229)	(電)	相模原 (0427)	72局5131番
姫路製作所	姫路市千代田町840番地 (番 670)	(電)	姫路 (0792)	23局1251番
静岡製作所	静岡市小鹿3丁目18番1号 (番 420)	(電)	静岡 (0542)	85局1111番
中津川製作所	中津川市駒場町1番3号 (番 508)	(電)	中津川 (05736)	6局2111番
大船製作所	鎌倉市大船5丁目1番1号 (番 247)	(電)	鎌倉 (0467)	44局6111番
郡山製作所	郡山市栄町2番25号 (番 963)	(電)	郡山 (0249)	32局1220番
群馬製作所	群馬県新田郡尾島町大字岩松800番地 (番 370-04)	(電)	尾島 (02765)	2局1111番
藤岡工場	藤岡市本郷字別所1173番地 (番 375)	(電)	藤岡 (02742)	2局1185番
京都製作所	京都府乙訓郡長岡町大字馬場小字岡所1番地 (番 617)	(電)	京都 (075)	921局4111番
長野工場	長野市大字南長池字村前 (番 380)	(電)	長野 (0262)	43局1101番
札幌営業所	札幌市中央区北2条東12丁目98番地 (番 060)	(電)	札幌 (011)	231局5544番

次号予定

三菱電機技報 Vol. 47 No. 8

電子計算機応用システム特集

《特集論文》

- タービンカーネルの計算機制御システム
- 立体自動倉庫の計算機制御
- 火力発電所計算機制御の動向
- 鉄鋼プラントにおけるマイクロコントローラ MELMIC の応用
- 三菱工作機械群管理システム
- 造船工業における自動製図システム
- 最近の計測データ処理システム
- MELCOM 7500 による人工衛星試験のソフト
- ウエアとその運用
- 國際専用交換システム AUTOMEX
- MELCOM 80 シリーズ電子計算機とその応用
- パターン処理システム(IV)
—統計的パターン認識の理論—
- FD-210 P 形 超音波探傷器
- カラーグラフィカルディスプレイ装置
- 超音波探傷試験法(2) —感度標準試験片—

三菱電機技報編集委員会

委員長	正木茂雄	常任委員	湊武雄
副委員長	神崎道	"	武藤正
常任委員	上田重夫	"	吉松誠一
"	宇佐見重夫	委員	粕谷一雄
"	北川和人	"	武田忠夫
"	古賀亨	"	中尾致一
"	外野範吾	"	林昇寿
"	塚本信雄	"	待鳥正
"	福家章	"	吉武正彦
"	藤永敦	"	若宮佐三
"	堀謙二郎		(以上 50音順)

昭和48年7月22日印刷 昭和48年7月25日発行「禁無断転載」定価1部 金200円(送料別)

編集兼発行人

東京都千代田区丸の内2丁目2番3号

正木茂雄

印刷所

東京都新宿区市谷加賀町1丁目12番地
(郵便番号 162)

大日本印刷株式会社

印刷者

東京都新宿区市谷加賀町1丁目12番地

高橋武夫

発行所

東京都千代田区丸の内2丁目2番3号 (郵便番号 100)

三菱電機株式会社内

「三菱電機技報社」

(電話) (03) 218局2323番

発売元

東京都千代田区神田錦町3丁目1番地(郵便番号 101)

株式会社 オーム社書店

(電話) (03) 291局0912番 振替口座 東京 20018番