

**MITSUBISHI DENKI**

# 三菱電機

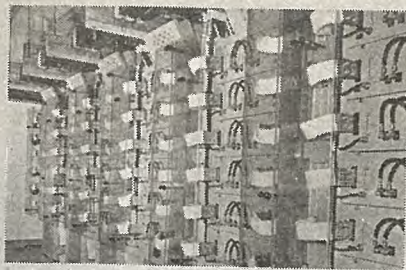


シリコン整流器（住友化学岡山工場納入）

# 8

**VOL33 1959**





MITSUBISHI DENKI

# 三菱電機

## 表紙説明

電解用シリコン整流器はゲルマニウム整流器とならんで単結晶形態の半導体整流器として最近いちじるしく注目されるようになった直流変換装置である。

当社では先に電解用直流電源として三菱化成・黒崎工場に 125 V 2,100 A のシリコン整流器を納入し好成績で運転中であるが、引き続き今回 120 V 14,000 A 1,680 kW の風冷式シリコン整流器を住友化学・岡山工場に納入した。

本器は現在日本における最大定格のものであり整流器界の新分野開拓という運命をにない、大きな期待と希望を有する機種である。

## 三菱電機株式会社

本社 東京都千代田区丸の内(東京ビル)  
(電)和倉(20)代表 1631・2331  
神戸製作所 神戸市兵庫区和田崎町  
伊丹製作所 兵庫県尼崎市南清水  
長崎製作所 長崎市平戸小屋町  
無線機製作所 兵庫県尼崎市南清水  
名古屋製作所 名古屋市中区矢田町  
静岡工場 静岡市小島 110  
中津川工場 岐阜県中津川市駒場町  
和歌山工場 和歌山市今宿青木町  
福岡工場 福岡市沖野上町  
姫路工場 兵庫県姫路市千代田町  
大船工場 神奈川県鎌倉市大船  
世田谷工場 東京都世田谷区池尻町  
郡山工場 福島県郡山市境橋町  
研究所 兵庫県尼崎市南清水  
無線機製作所 東京都世田谷区池尻町  
東京工場 札幌市北二条東 12  
札幌修理工場 東京都千代田区丸の内 2-20  
東京商品所 (三菱商事ビル 2 階)  
(電)東京(211)代表 2511  
大阪営業所 大阪府北区堂島北町 8 番地 1  
(電)大阪(34)代表 5251  
名古屋営業所 名古屋市中区広小路通  
(電)本局(23)代表 6231  
福岡営業所 福岡市渡辺通り 2 丁目(電気ビル内)(電)福岡(2)代表 6031  
札幌営業所 札幌市大通り西 1 丁目(大通ビル)(電)札幌(2)代表 7236  
仙台営業所 仙台市東一番丁 63  
(電)仙台(2)代表 6101  
富山営業所 富山市安住町 23 の 2  
(電)富山 4692・5273・2550  
広島営業所 広島市袋町 6(富国生命ビル)  
(電)中(2) 2211  
高松営業所 高松市寿町 1 丁目 4(第一生命ビル)(電)ビル代表 2-5021  
直通代表 2-4416  
小倉出張所 小倉市京町 10 丁目(五十鈴ビル)(電)小倉(5) 8234  
静岡駐在員 静岡市呉服町 2 丁目 1 番地  
(電)静岡(2) 2595(3) 2962  
岡山駐在員 岡山市浜田町 20 番地  
(電)岡山(3) 2098

昭和 34 年 第 33 卷 第 8 号

## 目次

### 乾式整流器特筆

125 V, 2,100 A 電解用シリコン整流器…松之忠義・小池吉郎・松井敏明	2
化学用大電流シリコン整流器……………加藤又彦・横畠洋志	6
電気鉄道用シリコン整流器……………加藤又彦・横畠洋志・奥村儀一	23
電力用シリコン整流体……………清水潤治・中田仗祐	38
ゲルマニウム整流器……………清水潤治・細野 勇・横畠洋志	47
バリスタ……………佐藤五郎・石井勇雄	57
電力用半導体整流器回路の諸問題(その 3)……………岡 久雄	64

商用周波数の交流専用電圧発生用電動機……………内海権三・河村寿三	71
ジルコニウムおよびその合金の高温酸化(1)……………山森末男・実 博司・中島陽三	79
耐圧防爆容器の強度計算と爆発試験……………兼平一郎・中尾伊三郎	95
IBM-650 形電子計算機による電力線事故時の通信線誘導電圧発生確率の計算(III)……………迎 久雄	100
発電機絶縁の直流試験(2)……………原 仁吾・平林庄司	113

### 技術解説

火力発電シリーズ: 運炭設備(1) 火力発電所における灰処理装置……………	123
半導体整流器の工業界への応用……………加藤又彦・細野 勇・小林 凱	135
計数形自動電子計算機(2)……………豊田準三	151

### W 社文献抄訳

最近の大きな直流負荷の需要に応じうる半導体整流器・交流発電機に組合わされたシリコン整流器・鉱山用シリコン整流器変電車・炭酸ガス溶接用の新しい電源装置……………	159
---	-----

### ニュースフラッシュ

工場直流電源用風冷式シリコン整流器完成・交直電圧用シリコン整流器完成・三菱金属鉱業(秋田、大阪)向け大容量シリコン整流器を受注・東京電力南東京変電所向け 260 MVA 主要変圧器ほか受注・高周波焼入溶解用発電機ぞくぞく完成・国鉄技研へ新形キ電用直流高速度シャ断器納入……………	161
---	-----

### 特許と新案

(新) 内燃機関着火断続器レバー (新) 自動制御装置……………	164
----------------------------------	-----

### 最近登録された当社の特許および実用新案

……………	122
-------	-----

### 次号予定

……………	70
-------	----



# 125 V 2,100 A 電解用シリコン整流器

三菱化成工業株式会社黒崎工場 松之忠義\*・小池吉郎\*\*・松井敏明\*\*\*

## 125 V 2,100 A for Electrolysis Silicon Rectifier

Mitsubishi Chemical Industry Limited  
Kurosaki Works

Tadayoshi MATSUNO  
Yoshirō KOIKE・Toshiaki MATSUI

In the middle of January, 1958, a 262.5 kW 125 V 2,100 A silicon rectifier was installed at the plant of Mitsubishi Kasei as the first unit of the kind in this country. The rectifier for a chemical plant is mostly to run continuously to the limit of its rating with high efficiency and high dependability. The result of a year and half's operation of this silicon rectifier has revealed that the foregoing requisitions have been met with satisfaction. Reduction of building cost and running expense are another advantages brought about with it because of capability installation outdoor and unattended. Various anxieties at the beginning of installation have been relieved, which promises bright future.

### 1. ま え が き

昭和33年1月中旬、シリコン整流器を設置し、連続運転1ヵ年以上を経過した。比較的小容量であるが、シリコン整流器としてはわが国で最初のものであるので、今までの実績を率直に報告し、大方のご参考に供したいと思う。この設備の特長ならびに採用の経緯は大体次のようなものである。

化学工場における整流器は、定格いっぱい連続運転されることが多く、高能率であるとともに、高信頼性が要求されるが、この整流器はこれらの条件を満足しており、さらに、無人運転方式、屋外形として、建屋および運転経費の節減を図ることができた。採用にあたっては、参考資料に乏しく、一方サージに弱い特性など、相当危惧される点もあったが、三菱電機の実験的な要望もあり、また6ヵ月という長い試験期間をとって、この間の故障については、三菱電機に修復の責をもってもらった特殊な契約のもとに、本機採用に踏み切ったものである。

### 2. 整流器の仕様

簡単に本機の仕様を述べれば次のとおりである。

入力……………3.3 kV 3φ 60 c/s  
出力……………262.5 kW 125 V 2,100 A  
運転方式……………自動定電流装置付無人運転  
冷却方式……………循環液冷式（風冷式再冷却付）

設置場所……………屋外

使用シリコンダイオード

………米国 W 社製。許容せん頭逆電圧値  
(P.I.V.) 250 V

ダイオードの結線……………三相ブリッジ

ダイオードの個数……………60 個（1 相 10 個並列）

速応ヒューズ ……30 個（ダイオード 2 個につき  
1 個）

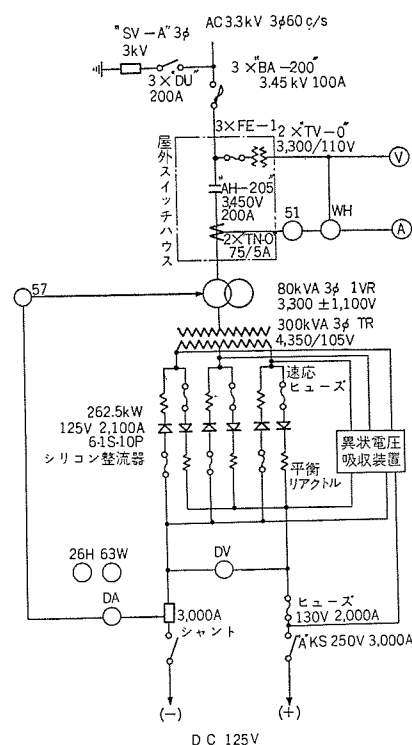


図 2.1 シリコン整流器単線結線図

Fig. 2.1 Single line wiring diagram of silicon rectifier.







流バイアスを加えてお  
き各ダイオードをなが  
れる電流がある範囲を  
こえようとする時にリ  
アクトルの作用をあら  
わし、電流を制限する  
働きを演ずるものであ  
る。

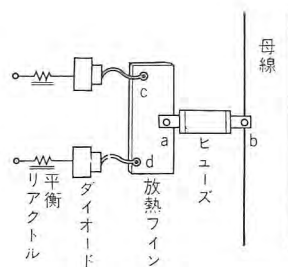


図 3.2

上記のシリコンダイオードの正方向電流の不均衡の監視は通電時の速応ヒューズの両端の電圧降下を測定して監視したり、図 3.2 に示す放熱フィンの a—c、および a—d 間の電圧降下を測定して各ダイオード間の電流バランスに注意した。この後者の方法は通電中でも簡単にできるのでこれを保守の標準方法として今日にいたっている。

#### (1) ダイオード逆電圧—逆電流特性

今回使用したダイオードは P.I.V. の値 250 V で 40 mA の逆電流定格のものであるがわれわれとしては余裕をとって 30 mA を限度としている。

ダイオードの逆電圧—逆電流特性の曲線の形を大別すると図 3.3 に示したように 2 種類に区分できる。図 3.3 中の A, B 両曲線はそれを代表しているもので A 曲線は逆電圧が 150 V までは逆電流は少ないが P.I.V. の定格値付近で増加するもの、B 曲線は P.I.V. 150 V で

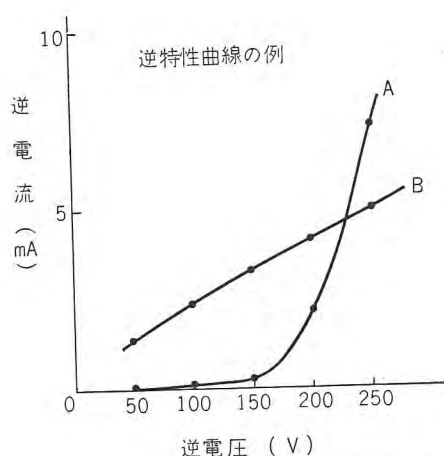


図 3.3 ダイオード逆電圧—逆電流特性曲線  
Fig. 3.3 Diode reverse voltage vs reverse current characteristic curves.

A 曲線に比して多いが絶対値からいえば少ないもので P.I.V. の値に比例して逆電流値が増加するものである。B 曲線のほうは一般に少ない。

逆電流値は上記の測定によって変化することがあることが判明した。その一例は 70 V で 30 mA である。こ

表 3.1 (P.I.V.=250 V 時)  
の逆電流値を示す

逆電流値 (mA)		個数 (個)
5 以内		19
5 超過	10 "	13
10 "	15 "	8
15 "	20 "	3
20 "	25 "	4
25 "	30 "	2
30 "		11
計		60

れはいつごろからかく低下したものか不詳であり、また現在使用しており支障なく運転できているのであるが研究のため三菱電機へ送付すべく、取換えた。

現在使用しているシリコンダイオードを定格 P.I.V. =250 V で逆電流を測定したものを表 3.1 に示す。

今回まで 3 回の逆特性の測定を行ない、4 ヶ月間における各ダイオードの特性の変化を検討することができた。その結果をいえば、逆電流の増加の傾向にあるものもあるし、また逆に減少しているものもある。測定時の諸条件と測定精度の見地からみると上記の逆電流の変化量というのは結論的にいって変化なしといえる程度である。というのは逆電圧 250 V を印加していると 1~5 mA 程度、電流値が測定時に変化するものがある。この現象の解明は行なっていないが、こういう現実であり測定もデリケートなところがある。よって上記の変化量が 5 mA 以内にはいっているため判定は困難であるといえる。ただ 1 ダイオードだけ 120 V の P.I.V. で 30mA のものがあり、これを要注意としたがこれも電流値だけからいえば、良くなっている傾向があるし、使用している現状である。

表 3.2 は A, B 2 ダイオードの代表的逆電圧—逆電流、実測値である。

表 3.2 (測定温度は 10 月 29 日は 15°C, 12 月 29 日は 9°C, 2 月 24 日は 15°C である)

電圧	A			B		
	33 年 10 月 29 日	33 年 12 月 29 日	34 年 2 月 24 日	33 年 10 月 29 日	33 年 12 月 29 日	34 年 2 月 24 日
50 V	0 mA	0.1 mA	0.1 mA	1.3 mA	1.3 mA	1.4 mA
100	0.1	0.2	0.2	2.3	2.1	2.4
150	0.25	0.3	0.3	3.3	2.8	3.3
200	2.3	1.8	2.2	4.2	3.4	4.1
250	7.7	6.8	7.3	5.0	3.9	5.0

#### (2) ダイオードの事故

1 ダイオードが破損したときにはそのダイオードは正、逆方向とも短絡状態となる。そして付属の速応ヒューズ溶断し、故障の拡大を防止し、全装置が停止することにならないので運転はつねに継続しうる状況にある。10 ダイオードが 1 相分に相当し、並列状況にあるので 5 個のヒューズが並列に接続されていることになる。各相の



溶断ヒューズがかりに各1個であればその時の定格出力は定格の4/5以内の電流でそのまま運転を続けることができる。このようにダイオードの故障の場合にも電流を若干減少して支障なく運転できることは他種の整流器たとえば接触変流機、回転変流機または水銀整流器などに比べてシリコン整流器の一つの特長であると思う。ダイオードおよびヒューズのとりかえは図2.2の写真からもわかるように簡単で、短時間である。

運転開始より今日までにダイオードの破損したものを表にしたのが表3.3である。

表 3.3

回数	年月日	故障ダイ オード数	溶断ヒュー ズ数	備 考
1	33年1月20日	1	0	正方向抵抗 10 k $\Omega$ に増加
2	3月9日	2	2	同時に 2 個パンク
3	3月23日	1	1	パンク
4	9月4日	1	1	"
5	9月29日	1	1	"
6	10月9日	2	2	同時に 2 個パンク
7	"	1	1	(6)と同じ日であるが時間が異なる。 他場所高圧回路の故障と同時刻
	計	9	8	

この表中ダイオードの2個同時に破損しているのがあるがこれの原因は詳細不明であるが一つのダイオードの破損が他へ波及したものかヒューズの溶断時のサージ現象の随伴によるものか不明である。またこのダイオードの破損と同時に工場内の他の高圧回路の事故が発生しており、サージの問題と関係あるように推定している。しかしそうでない場合もあり、冷却条件やサージ吸収装置を付加して安全率を強化して今日にいたっているが10月

9日以後は強化策の効果によるか否か不詳であるが破損は発生していない。

シリコンダイオードの破損の原因は現在までのところ的確に把握していない。今後上記のような保守をつづけてその探究を行なう予定である。

### 3.2 そ の 他

ダイオードの破損時の警報、ネオンランプ表示を行ない破損ダイオードの位置表示を行なう故障表示装置や自動定電流装置など至極順調に働き特記する事項はない。

能率は総合で95%に達する(しかし母線中の電力損失および冷却設備の電力損失は除く)、また力率はメータで95%であり、電圧変動率は12%である。

## 4. む す び

上述の125 V, 2,100 Aの無人変電所、屋外式、液冷形シリコン整流器は運転開始以来、1ヵ年余り特別な監視員もなく、屋外に放置した状況下で現場のドライな運転に耐え、大過なく今日にいたっている。起動、停止の回数もかなりあり、また高圧配電線系統の負荷の変動もかなり苛酷な状況にあるといえる。こうしたところでシリコン整流器1号器としては予想以上の成果をあげている。この間三菱電機をはじめ社内の関係各位の絶大なるご指導、ご協力に対し厚く御礼申し上げる次第である。

### 参 考 文 献

加藤又彦：電力用シリコン整流器「三菱電機」32, No. 5 (1958)



# 化学用大電流シリコン整流器

伊丹製作所 加藤 又彦\*・横 畠 洋 志\*\*

## Silicon Rectifier for High Current Chemical Industry Use

Itami Works Matahiko KATO・Hiroyuki YOKOHATA

Silicon rectifiers for electric power use, the application of single crystal form semiconductor, have made a great stride in progress recently like the germanium rectifiers. From the viewpoint of efficiency and maintenance this kind of rectifiers are almost ideal and promiss well for future. Mitsubishi has been successful in building a 120 V 14,000 A air cooled silicon rectifier for a DC power source to salt electrolysis, delivering it to Sumitomo Chemistry, Okayama Plant. This is the first and the largest of the kind in this country and its success in the test at the plant manifests forthcoming versatile applications.

### 1. ま え が き

電力用シリコン整流器は電力用ゲルマニウム整流器とならんで単結晶形態の半導体整流器として最近いじりくしく発達し、利用されるようになった直流変換装置である。この種整流器はその効率、保守上の観点からすれば理想に近いものであり、今後の発達いかんによっては直流利用分野全域にわたって使用される性格をもっている。しかし各種の半導体整流器はそれぞれ特有の材料資源、精製方法、整流体の製法、整流体の到達しうる最高の特長、寿命などの技術的かつ経済的な種々なる課題が解明されないため現在では決定的な結論がでていない。かかる問題は国情によっても、会社の技術的内容によっても左右されるが総括的にみて電力用シリコン整流器が現在のところもっとも有力なるものと考えられている。

当社では先に液冷式、屋外形、無人方式の電解用直流電源として三菱化成、黒崎工場に 125 V 2,100 A のシリコン整流器を納入し 1 ヶ年余の運転実績を有するがこれに引続いて今回日本最大の変換単位容量の食塩電解用直流電源として 1,680 kW 120 V 14,000 A の風冷式シリコン整流器を製作し、工場試験ならびに現地実測を実施してその性能、特質を確認したのでその仕様、試験結果の概要ならびに電解用電源としての半導体整流器に対する見解をご報告する次第である。

### 2. シリコン整流器の概要

今回住友化学岡山工場へ納入した風冷式シリコン整流

器は電気機器一般、ならびにこれが工事 1 式をも含めて受注し、完成したものであって、単にシリコン整流器関係機器だけの特性の問題に限定されることなく、総合的な性能を規準として設計、完成されたものである。電気機器の配列、その他については既設回転変流機変電所との関係もあって電解槽室と変電所間の中間の地区にく形形のコンクリート建屋をたててその中に風冷式シリコン整流器を格納したがシリコン整流器の冷却方式に関しては事前に数種の方式が検討されたが諸般の条件からして現在の冷凍機使用方式となったものである。よって今回の方式が食塩電解工場用直流電源としての標準方式ではないことをちょっとおことわりする次第である。腐食性ガスを含有しない空気が使用可能であれば風冷式シリコン整流器は特別な冷却装置はまったく必要でなく、もっとも経済的、かつ簡易な整流器である。

図 2.1 は岡山工場における風冷式シリコン整流器変電所の配置図である。

#### 2.1 諸機器の仕様とその特長

納入した主要機器は下記のとおりである。

##### (1) 主要機器概略

- a. 3.3 kV 受電, 60 サイクル 500 kVA 誘導電圧調整器……………1 台
- b. 2,000 kVA 油入自冷式変圧器 ……………1 台  
一次巻線三角形; 二次巻線開放三角形結線  
……………2 組
- c. 120 V 14 kA 風冷式シリコン整流器…………1 台  
1,680 kW 120 V 14,000 A; 屋内形でシリコン



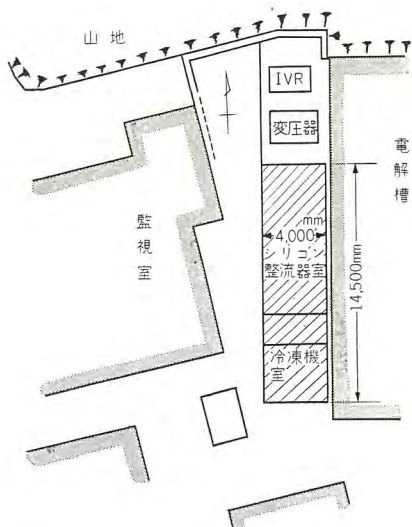


図 2.1 120 V, 14,000 A 風冷式シリコン整流器変電所配置図 IVR: 誘導電圧調整器

Fig. 2.1 Substation arrangement of 120 V 14,000 A air cooled silicon rectifier.

整流体を数個 1 組として引出し形箱に配置。

- d. 速応ヒューズおよびサージ吸収装置……1 式
  - e. 冷却装置……1 式  
冷凍機 MC-4UB-F 形 11 kW 誘導電動機付  
……………2 台  
冷却扇 多翼式 1.5 kW 誘導電動機付……6 台
  - f. 定電流装置………1 台
  - g. 直流側シャ断器…CL-B形気中シャ断器 1 台
  - h. 故障表示装置………1 式  
ダイオード, ヒューズの断線をネオンランプ表示。
  - i. 配電盤およびリレー盤………1 組
- (2) 主要機器外形寸法および重量
- a. シリコン整流器本体 (冷却装置を含む)  
8,095 (巾)×1,200 (奥行)×3,350 (高さ)  
重量………8,000 kg
  - b. 同上用変圧器  
2,800×2,800×3,500 (高さ)  
重量………15,000 kg
  - c. 同上用誘導電圧調整器  
1,900×1,900×3,400 (高さ)  
重量………7,000 kg
  - d. 冷凍機  
建屋寸法 3,500×4,000×4,000 (高さ)

図 2.2 は 120 V, 14,000 A シリコン整流器単線結線図である。

### (3) 特長

化学用大電流シリコン整流器・加藤・横島

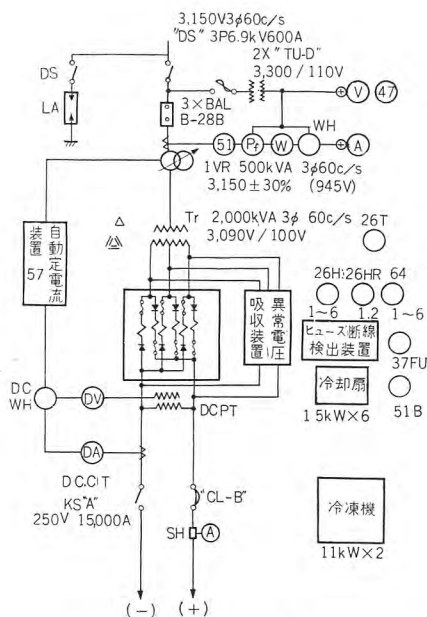


図 2.2 120 V 14,000 A シリコン整流器単線結線図

Fig. 2.2 Single line connection diagram of 120 V 14,000 A silicon rectifier.

- a. 誘導電圧調整器は直流出力電圧を 120~80 V の間調整可能な kVA を有する。
- b. 変圧器は二次側巻線は三角形結線であるが開放形であって 7 kA 巻線 2 組よりなっているため二次側ブッシングは 2 組, 計 12 本出ている。これをシリコン側で並列にして三相全波整流回路を構成している。
- c. シリコンダイオードは合計 288 個; 6A×1S×48P より編成されている。
- d. シリコンダイオード 8 個を並列接続として一つの引出し形箱 (トレイとよぶ) に挿入して負荷時でも取はずし可能構造としてある。図 2.3 はトレイの内部構造を示す。
- e. 一つのスタンドは 6 個のトレイを上下に配列し, 6 スタンドを一行横隊として各スタンドより正, 負母線を引出している。図 2.4 参照のこと。

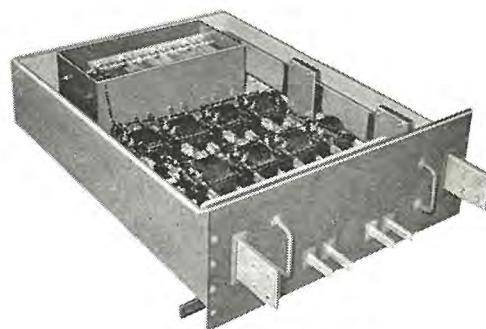


図 2.3 トレイ内部構造

Fig. 2.3 Interior construction of tray.



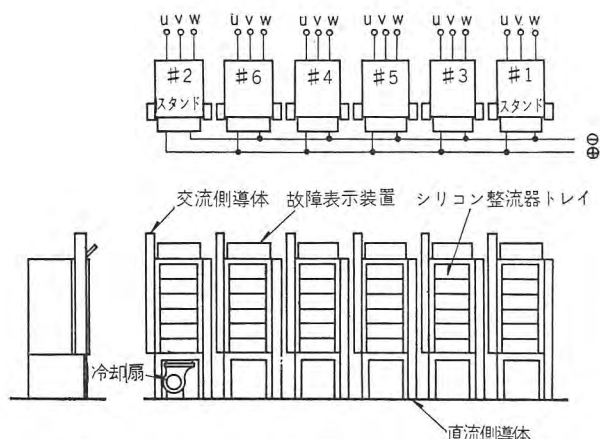


図 2.4 120 V 14,000 A 風冷式シリコン整流器外形図  
Fig. 2.4 Outline of 120 V 14,000 A air cooled silicon rectifier.

- f. トレー内の各ダイオードにはバルンサとヒューズをそれぞれ挿入し、破損時の表示をネオンランプで行なうとともにブザー警報を発する。
- g. 出力直流電流値を一定に保持するため定電流リレーを介して直流電圧を変化させて自動的に制御を行なっている。
- h. 各スタンドはそれぞれ1台の冷却扇をそなえ、冷却風を循環させる。循環冷却風は冷凍器によって冷却される。

## 2.2 シリコンダイオードの特性と整流回路

今回使用した電力用シリコンダイオードは W 社製品でその形名は N-322-E 形である。整流体の内部構造、外形寸法を図 2.5 に示す。また図 2.5 の P-N 接合体の詳細構造を図 2.6 に示す。

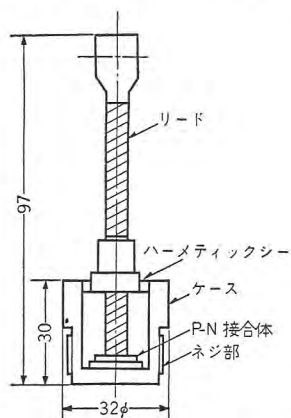


図 2.5 ダイオード断面図  
Fig. 2.5 Cross section of diode.

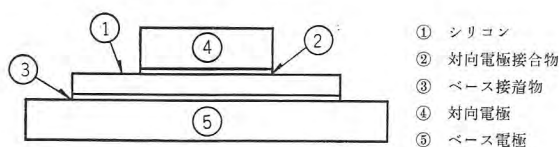


図 2.6 合金形 P-N 接合体の構造  
Fig. 2.6 P-N junction.

この P-N 接合体は合金形のものでシリコン自体の機械的性質とベース電極材料ならびに両者の接着材料の物理的性質、ことにひずみ応力と周期的温度変化に対する特性、強度がこのダイオードの寿命に関係する要素である。

表 2.1

比較項目	W 社 シリコン 整流 体	
	N-319, N-322	N-339
P. I. V. の種類	500, 400, 350, 300, 250, 200, 150, 100, 50 V	同 左
許容逆耐電圧値	350 A 冷却風 40°C	525 A 同左条件
三相ブリッジ出力電流	1,800 A	1,800 A
最大ピーク電流値 (1 サイクル)	1.24 V (100 A 負荷)	1.2 V (100 A)
正方向電圧降下	40 mA (最大定格逆電圧で 180°C)	50 mA (同左)
最大逆電流値	+190 ~ -65°C	+190°C
運転許容温度域	+200 ~ -65°C	同 左
保存温度	25 kc	1 kc
最大動作周波数	1,050 g	
遠心力		

現用の代表的シリコンダイオードの諸特性は表 2.1 に記載のとおりである。表中下記の電氣的特性がシリコン整流器装置としての設計、定格出力に関与する事項である。すなわち

### (1) 許容最大せん頭逆電圧 (maximum allowable peak inverse voltage)

この値はダイオードの逆耐電圧決定の要素であり、P. I. V. と呼ばれ、常用しうる瞬時逆電圧最大値を表示している。技術的観点からすれば過渡的 P. I. V. を含んでいることになる。またこの定格 P. I. V. はダイオードの直列個数を決定する設計条件であって式 (2.1) で律せられる。

$$\text{ダイオードの (P. I. V.)}_c = N \times Ed \times (1 + \epsilon) \times K \quad (2.1)$$

しかし  $N$  = 整流回路常数で三相ブリッジ回路では 1.05 である。相間リアクトル付二重星形結線では 2.09 である。

$Ed$  = 直流出力電圧 (V)

$\epsilon$  = 整流回路電圧変動率

$K$  = P. I. V. の安全係数

上記の  $(P. I. V.)_c$  の値が表 2.1 P. I. V./1 ダイオード

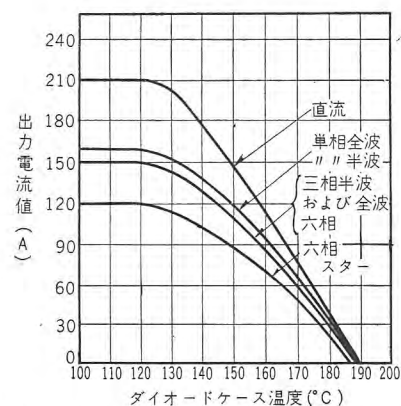


図 2.7 ダイオードのケース温度と許容出力平均電流値 1 セルの数値を示したものである  
Fig. 2.7 Maximum allowable forward current versus case temperature.



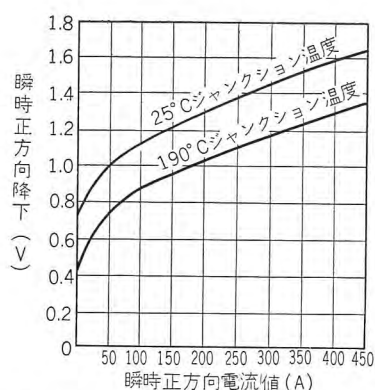


図 2.8 1 ダイオードのジャンクション温度 25°C, 190°C のときの最大瞬時正方向降下一瞬時電流値の特性曲線  
Fig. 2.8 Maximum forward voltage drop of a single cell at 25°C and 190°C, junction temperature.

ドの数値を超過すればその整数倍のダイオードを直列接続する必要性を示すものである。主回路方式の差による  $N$  の値も選定条件となる。

### (2) 1 ダイオードの平均電流

この数値は図 2.7 に示すようにダイオードのケース温度，すなわち冷却条件，主回路方式によって変化するが 1 ダイオードを通流するせん頭電流値の  $1/P$  の平均電流値を示す。三相ブリッジ結線では (出力電流)/3 である。 $(P$  は相数にもとづく係数)

### (3) 正方向電圧降下

図 2.8 に示すように瞬時正方向電流に対して瞬時電圧降下が生ずる。これはジャンクション温度によって異なるがダイオード内に発生する熱損失である。

ダイオードの電気的諸特性が上記のように決められているため所定の定格出力をうるためにはダイオードを直，並列に接続することが必然的に起こる。そのため要望条件を満足させるもっとも有効な整流回路が選定されなくてはならない。もっとも広く使用されるのは三相全波回路（ブリッジ結線回路）であるが，直流 80 V 以下の低電圧のものには相間リアクトル付二重星形結線が使用される。これは式 (2.1) に具体的な数字を代入すれば次のようになる。

#### 三相全波回路

$$1.05 \times 150V \times (1 + 0.1) \times K = 1.73 \times K = P. I. V.$$

#### 相間リアクトル付二重星形回路

$$2.09 \times 75V \times (1 + 0.1) \times K = 1.72 \times K = P. I. V.$$

$\epsilon = 10\%$  としての計算

すなわち三相全波回路では 150 V の直流電圧の P. I. V. の値は相間リアクトル付二重星形結線の 75 V の直流電圧の P. I. V. と等しいことを意味している。しかし

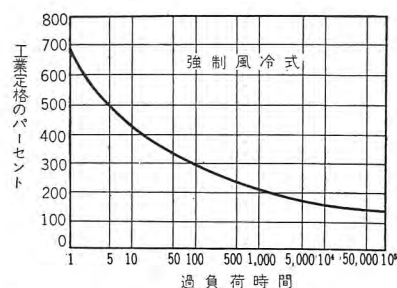


図 2.9 許容しうるパーセント過負荷耐量と時間との関係  
Fig. 2.9 Max. allowable percent overload and max. overload operating time, curve.

両主回路方式の利害にはさらにシリコンダイオードの並列所要個数の問題があり，相間リアクトル付二重星形結線回路では同一負荷電流値で三相全波整流回路に比してダイオード並列使用個数がつねに 1/2 ですむ利点がある。また 1 ダイオードの故障は三相全波整流回路では負荷側逆起電力の短絡を意味しない利点がある。なおサージ電流値（負荷側故障電流を含む）に対しては回路および負荷側の具体的内容によってそれぞれ異なるが瞬時過負荷耐量はかなり強く図 2.9 はその一例である。図 2.9 にてわかるように 5 サイクル以内では定格電流値の 5 倍は許容しうる状況にある。

## 3. 120 V 14 kA 風冷式シリコン整流器試験結果

### 3.1 工場試験

工場では図 2.2 に示す主回路結線を施したが冷凍器，CL-B 形気中シャ断器をのぞいてすべて組合わせ配線し，水抵抗負荷を使って 120 V 14 kA の試験を実施した。図 3.1 はその時のシリコン整流器，変圧器，誘導電圧調整器の配置状況を示したものである。上記の結線方式で図 3.2 に示したように 14 kA の定格負荷を 4 時間通電して後各部の温度上昇，トレー内の風速の分布，風量ならびに電流不平衡度をそれぞれ実測し，変換装置全体としての電圧変動率，能率，力率などをそれぞれ測定した。

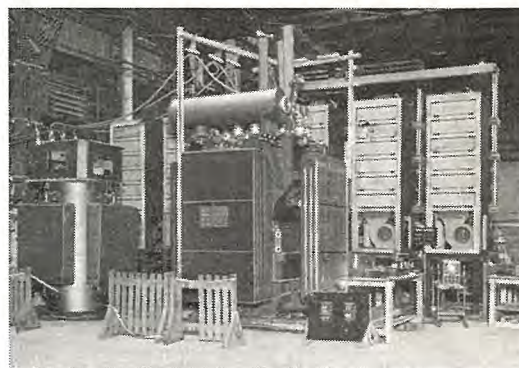


図 3.1 工場試験時のシリコン整流器，変圧器，誘導電圧調整器の配置  
Fig. 3.1 Arrangement of silicon rectifier, transformer, and induction voltage regulator under factory test.



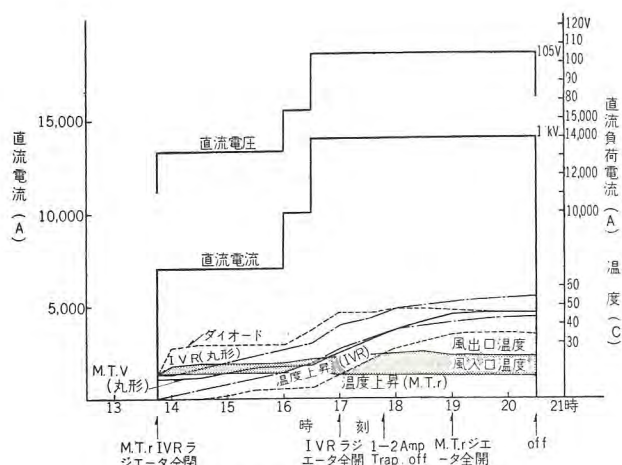


図 3.2 住友化学シリコン整流器負荷試験 B 方式の母線配線

Fig. 3.2 Silicon rectifier load test. Bus wiring of B system.

### (1) 温度上昇

工場試験における試験条件としては工場内の空気を冷却扇によって吹上げて冷却させたため現地の条件とは冷凍器のクーラの風抵抗に相当する分が相違している。この状態で 14 kA の負荷時に入口、出口風温の温度差は約 10°C で、ダイオードベース温度は上部トレーで約 50°C に達している。下部トレーのダイオードベース温度は約 10°C、上段のトレーより低い。(図 2.4 に示すトレー構造において) この件はトレーの配列上やむを得ないことであるがシリコンダイオードの特性上よりして 30°C の温度域内にあれば実用上は問題にする必要がない。またトレーの内の風速は 5 m/min であり、風速分布もほぼ一定しており、予期した程度であった。

### (2) 電流不平衡の実測

この電流不平衡の問題は図 2.4 に示す #1 から #6 ま

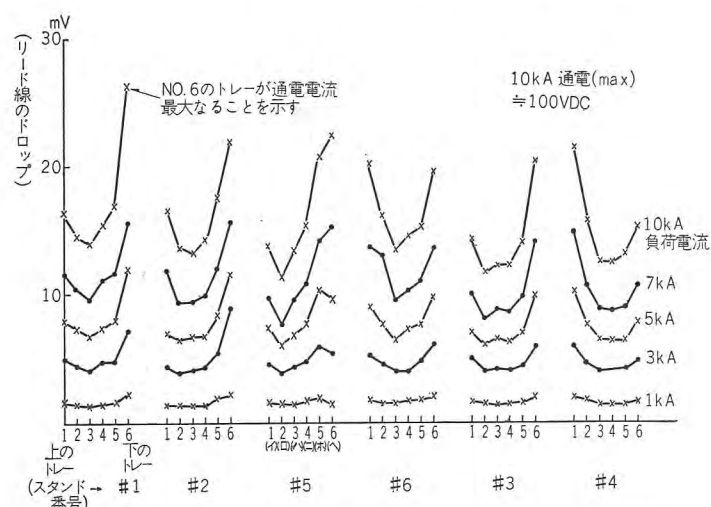


図 3.3 住友化学 120 V 14,000 A Test 母線の鉄心なしの場合の電流平衡度 (母線の配線 B 方式)

Fig. 3.3 Current balancing when coreless bus 120 V 14,000 A test.

でのスタンド間の電流不平衡と同一スタンド内のトレー間の不平衡、さらにはトレー内のダイオード間の電流不平衡とに区分することができる。前者の同一相内の並列関係にある各トレー間の電流不平衡度は変圧器とスタンドの配置ならびに母線の配列に関与し、図 3.3 にその一例を示す。これは正、負母線を変更し、研究途上の一例であって負荷電流を 1 kA から 10 kA まで変化させたとき V 字形の電流分布になり、上段、下段のトレーが大体電流分担度が大きいことを物語った一例である。配線変更によって図 3.3 に示す傾向は後述の現地試験の項で説明するように改善されているが、トレーの上下積み重ね方式では中央のトレーが電流分担度が少ないことは理論的にも認められていることである。しかし負荷電流によって大きく左右されることは図に示されているとおりである。この状況下の各トレー内通電電流の波形を図 3.4 に示す。図のように波高値が変化している。かかる諸現象の原因探究のために約 1 カ月間研究試験を実施した。この件はシリコンダイオード自体の問題ではなく、またトレーの構造の課題でもない。(これは岡山工場への納入品が立証している)。ただ問題は機器の配置と転流リアクタンス差の問題である。工場試験では数種の機器配置変更を研究的に実施し総合的検討を実施したが B 方式では定格負荷電流 14 kA で 5~14 % の不平衡は存在した。この状況下では 1 ダイオードの許容平均電流値 (図

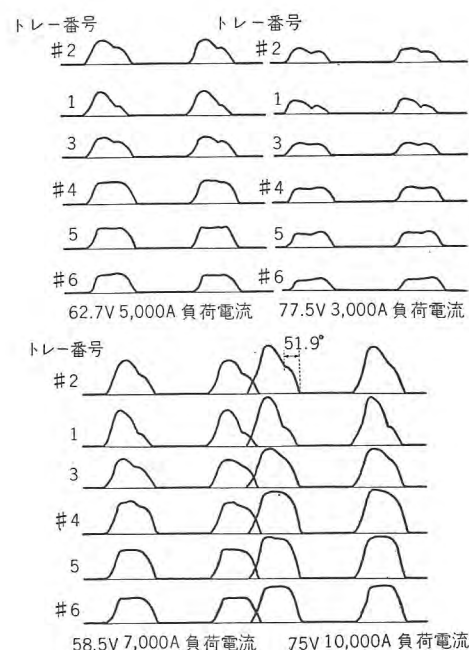


図 3.4 住友化学シリコン整流器試験時の電流波形 (B 方式、鉄心なし、リセットなし)

Fig. 3.4 Current waveform of silicon rectifier under test.



2.7 参照) と等しいかやや超過するので C. D. E. と 5 種の配線方式を実施し、それぞれについて研究試験を行ない、基本資料をうることができた。またこの改善策の研究は究極的には電圧変動率、力率および効率の改善である。

1 トレー内のシリコンダイオードを平衡させるためのバランスは動作時と不動作時とを比較研究したが次項で のべるように総合的見地よりすればその有効性は疑わしきものであった。バランスを取付けなくても他にもっと合理的な方法があると考え次第である。

### (3) 電圧変動率、力率および効率の測定

この問題はシリコン整流器の直流電圧——電流特性曲線に関係する事項と規約効率、実測効率に関する内容である。総合電圧変動率(工場における)は 13 % である。その時の実測力率は約 92 % であった。仕様書で約束した効率は規約効率であったため 95 % の効率は上記の配線方式のいかににかかわらず保証値は確保しうる状況であった。実測値はかなりまちまちであったが 90 % 程度を示した。(これは岡山の現地実測で 95 % 以上であることが実測された。)

### (4) その他

速応ヒューズ、定電流装置その他各機器の特性はそれぞれ実測された。

工場試験時のオシロを図 3.5 に示す。

## 3.2 現地総合試験

住友化学岡山工場へ各スタンドごとに分解輸送し、現地でコンクリート建屋内に 1 スタンドごと搬入して組立

て、配線工事を行なった。既設の回転変流機の設備を運休し、母線配線工事を行ないシリコン整流器に切換え運転する間、3 日間だけ電解を休止したが昭和 34 年 2 月 9 日より運転にはいって電槽側の温度上昇するにしたがって徐々に電流を増して行き 2 月 11 日には 11 kA; 12 日には 12 kA; 同日 17 時より 14 kA と定格電流値、数時間通電して割当電力量制限いっぱいでの試験を終った。その時の実測した総合効率(出力電力/入力電力の比)は 97 V, 12 kA で 96.2 %, 力率は 91.5 %; 96 V, 14 kA で 95.3 %, 力率 90.5 % であった。その後は電力事情の許す限りの最大電流値(約 12 kA 程度)で連続運転中である。

図 3.6 は現地における各スタンドとトレー間の電流平衡状況を実測した一覧表である。図に示すようにほとんど平衡状態にある。

さらに 4 月 9 日になり下記の試験条件のもとに関係者立会して総合効率を測定した。その結果は次のとおりである。

### (1) 試験条件

- 50 %, 75, 86, 100 % 負荷電流になるよう直流電圧を選定して行なった。
- 冷却条件は 11 kW 冷却器 1 台だけを使用した。よって冷却器の配置にもとづく、循環冷却風に若干の不均衡があった。
- 12 kA, 14 kA の負荷は 10 分間印加して後測定したので負荷側の温度は定常値に達していない。
- 12 kA, 14 kA 負荷時には 200 kVA のコンデンサ

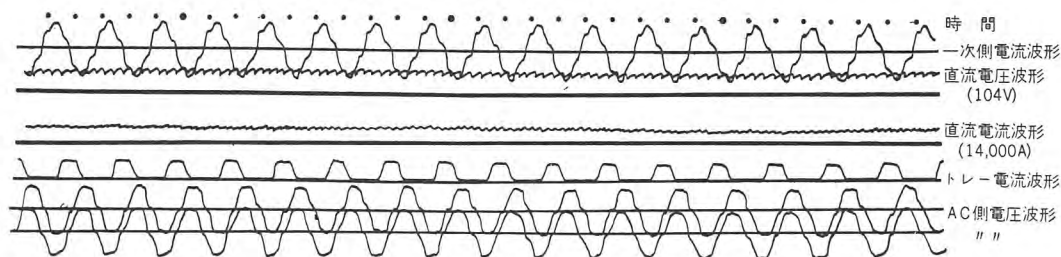


図 3.5 (a) 104 V, 14,000 A 負荷時の各部波形  
Fig. 3.5 (a) Waveform of various parts under 104 V 14,000 A load.

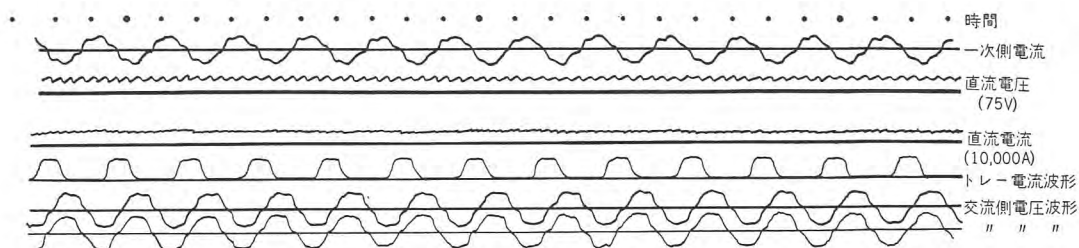


図 3.5 (b) 75 V 10,000 A 負荷時の各部波形  
Fig. 3.5 (b) Waveform of various parts under 75 V 10,000 A load.



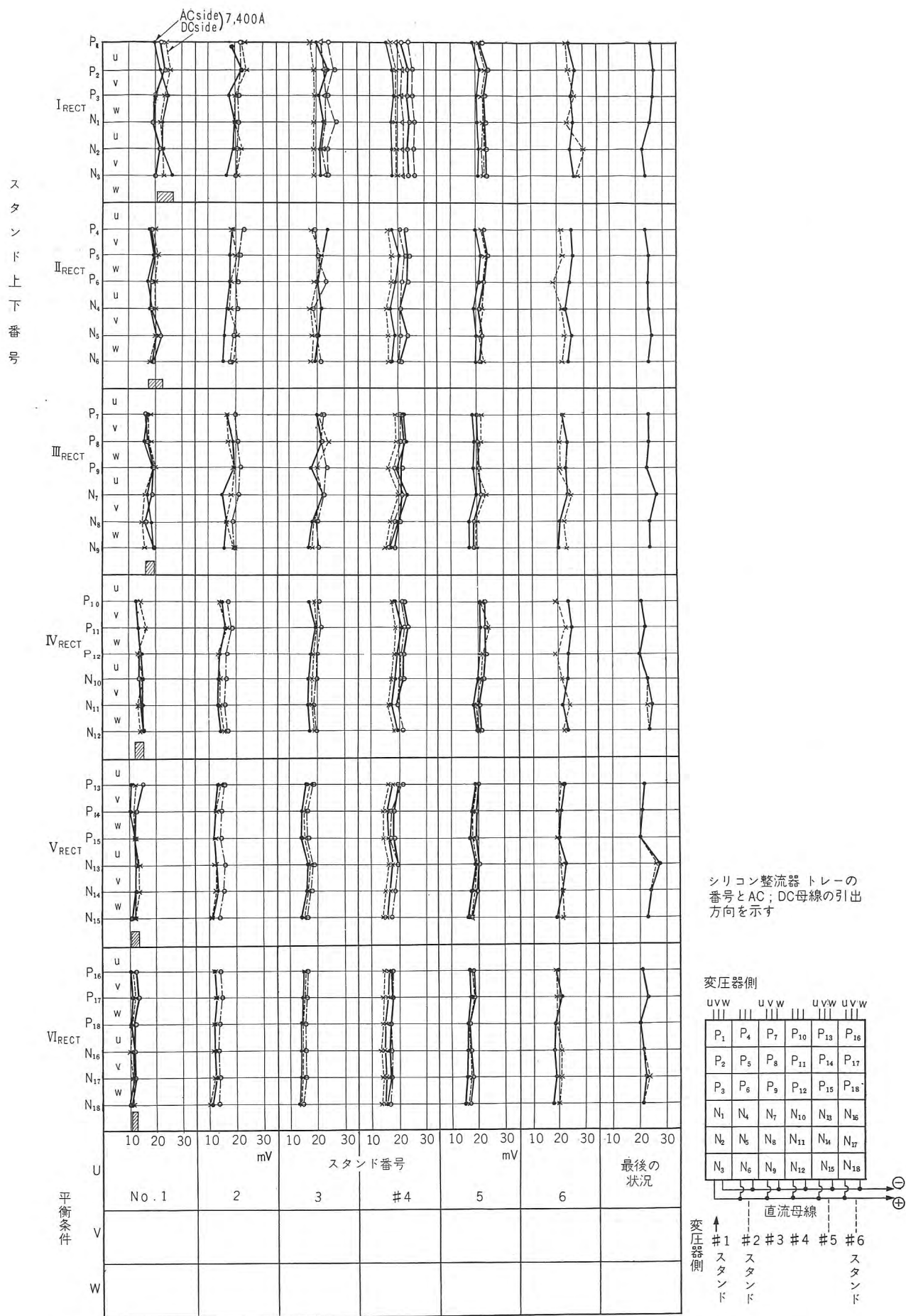


図 3.6 風冷式 120 V 14,000 A シリコン整流器住友化学岡山工場

Fig. 3.6 Air cooled 120 V 14,000 A silicon rectifier.



表 3.1 実測効率試験結果 (力率をも追加)

パーセント負荷 (%)	50	75	≒86	100	
直流電圧 (V)	90	106	108	108	セルの数を かえた
直流電流 (A)	7,000	10,500	12,000	13,800	
#1 回目の 効率測定値 (%)	94.77	96.26	95.62	94.56 (95.00)*	*印は120 V に換算した
#2 回目の 効率測定値 (%)	94.00	96.51	95.00	94.81 (95.28)*	
#3 回目の 効率測定値 (%)	94.69	96.3	94.87	94.63	
力率 実測値 (%)	92	92 コンデン サなし	92 コンデン サなし	93.8 200kVA のコンデ ンサ挿入	93.5 200kVA のコンデ ンサ挿入

を挿入して力率を測定した。

- e. 直流電圧，電流値の測定は精密級の計器を使用した。

## (2) 試験結果

試験結果は表 3.1 のとおりである。

以上の実測結果に対して計器類の誤差はできうる限り

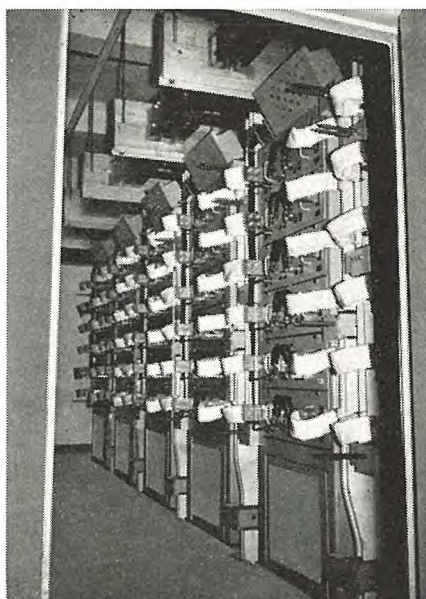


図 3.7 岡山工場にすえ付けた風冷式シリコン整流器  
Fig. 3.7 Air cooled silicon rectifier installed at Okayama factory.

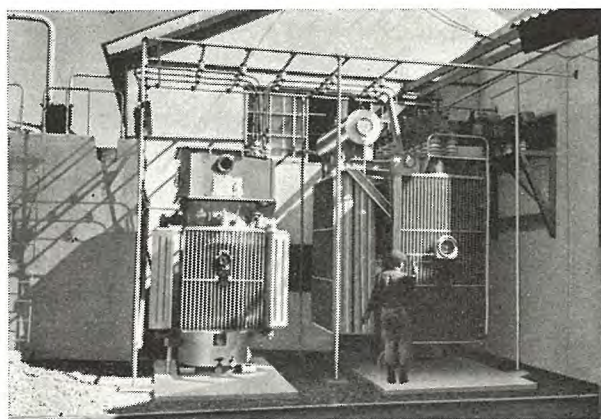


図 3.8 シリコン整流器用変圧器および誘導電圧調整器  
のすえ付状況  
Fig. 3.8 Transformer and induction voltage regulator  
for silicon rectifier under installation.

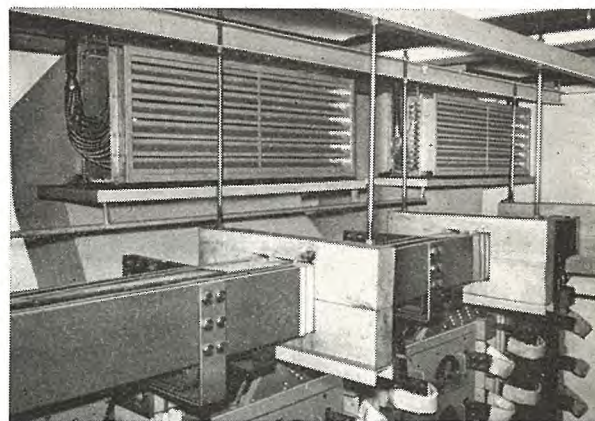


図 3.9 冷凍器クーラの設置を示す  
Fig. 3.9 Installation of refrigerator cooler.

修正したものであり，大きな誤差はないと思う．工場試験時に問題となった機器の配置と母線の配線とは工場での試験結果にもとづいて修正すべき箇所を修正したため実用上はなんら問題とならなかった。

120 V, 14 kA 風冷式シリコン整流器の契約時に申出た効率，(90～94 % 程度)，力率 (90～93 %) の数値とよく一致しておりすべて満足すべきものであった。

図 3.7 は現地すえ付のシリコン整流器，図 3.8 は変圧器の写真である。

またシリコン整流器室の冷凍器のクーラ配置状況を図 3.9 に示した．このクーラはシリコン整流器の上部に設置してある。

## 4. 試験結果に対する考察

電力用半導体整流器中低電圧，大電流出力 (たとえば 300 V 以下，10,000 A 以上のもの) の整流器では設計上，電気的特性上つぎの二つの課題があると思う．すなわち

- (1) シリコンダイオードの特性の均一化と配列構造の問題……設計基本条件
- (2) 高能率と高力率との確保の課題

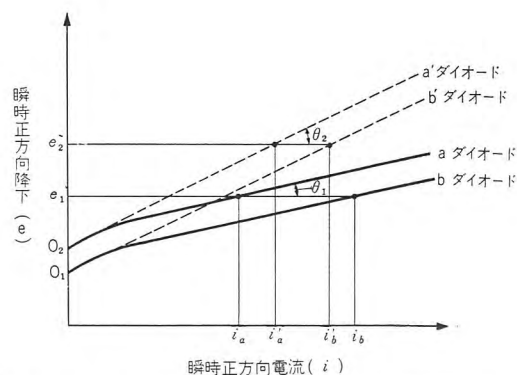


図 4.1 2 個のダイオードの特性差による瞬時電流分担差  
Fig. 4.1 Difference of momentary current sharing due to difference of characteristics of two diode.



上記中 (1) のダイオード間の電気的特性中瞬時正方向降下の不均一性の問題は図 4.1 に示すように瞬時正方向降下一瞬時正方向電流特性曲線の差異 (図 2.8 に示すジャンクション温度特性差による要素を含む) は a, b 2 個のダイオードに  $i_a, i_b$  の瞬時正方向電流値の負荷分担差が生ずる。図 4.1 の “ $e-i$ ” 特性曲線を直線と仮定すれば

$$e = \tan \theta_1 \cdot i + C \quad \dots\dots\dots (4.1)$$

しかし  $e$  = 瞬時正方向降下 (ボルト)

$i$  = “ 電流値 (アンペア)

$\theta_1$  = 上記特性曲線の傾斜角

$C$  = 常数 (=0.1 V)

図 2.8 のジャンクション温度 25°C のものでは  $\theta_1 = 22$  度に相当し  $\tan \theta_1 = 0.4$  で a, b, 2 個のダイオード回路に 0.1 V の瞬時電圧差が生じうるものと仮定すればその不平衡度は 23 % に達する。この不平衡度を 20 % 以下におさえるには式 (4.1) の  $\theta_1 = 25$  度以上にする必要がある。すなわち

$$e = 0.46i + C \quad \dots\dots\dots (4.2)$$

余裕をみて  $\theta_1 = 30$  度とすれば式 (4.3) となる。

$$e = 0.57i + C \quad \dots\dots\dots (4.3)$$

かくすれば不平衡度は 16.7 % 以下になる。

また上記の件についてはバランスを挿入することが考

えられるがこの件については別項で検討する。

さらに上記の不平衡度はトレイの配列によって大きく左右されることは図 3.3 に示したとおりである。これは図 4.2 に示すように調整することができる。この調整はすえ付現場の立地条件、および冷却条件を考慮した内容がはいるので現地調整に依存することになる。

この問題は定格電流値および電圧値、すなわち並列ダイオード数、直列個数に関連することであってなお今後の経験にまたなくてはならないが並列ダイオード数が 20 個をこえるときには配置にもとづくトレイ内電流の平等化は実的に無理である。それを防止する方法は各種あるが実用上から見てリアクタンス降下を利用した均等化方式がもっとも適切であるがその反面電圧変動率、すなわち最終的には力率の低下をきたす結果となる。

つぎに (2) の高能率と高力率確保の課題は他種整流器との優劣を比較する上の重要決定要素であるため諸種の見地から検討し、実測能率については 2 方式を比較したが両者とも得心しえず、冷却風温度上昇からする逆算方式で検討するも裏書きすることができなかった。よって現状では直流出力電流の計測精度不十分とリアクタンス降下 (熱的損失でない) とが主要要因で規約効率で契約時の効率を律するのがもっとも妥当であろう。力率は受電電源状態にもよるが波形のひずみがいちじるしい時には計算提出方法も考えられなくてはならない。またその方法が実測よりも妥当でもある。

#### 4.1 シリコンダイオード運転許容温度の課題

シリコンダイオードの運転許容温度は瞬時過負荷時の許容温度と連続定格時のものと 2 種類に区別することができる。工場試験を基盤として各種の整流回路および方式による運転時の温度上昇による定格出力は図 2.7 に示すとおりであり、ダイオードケース温度としては  $(190^\circ - \alpha)^\circ\text{C}$  である。運転時のジャンクション許容最高温度は一応  $190^\circ\text{C}$  とされており、運転状況下の熱的平衡式が成立する。

$$190^\circ\text{C} - T = P(R_1 + R_2 + R_3) \quad \dots\dots\dots (4.4)$$

しかし  $T$  = 周囲冷却風温度 ( $^\circ\text{C}$ )

$P$  = シリコンダイオードの発生熱 (W)

$R_1$  = ジャンクションよりケースへの熱抵抗 ( $^\circ\text{C}/\text{W}$ )

$R_2$  = ケースより放熱片への熱抵抗 ( $^\circ\text{C}/\text{W}$ )

$R_3$  = 放熱片より空気への熱抵抗 ( $^\circ\text{C}/\text{W}$ )

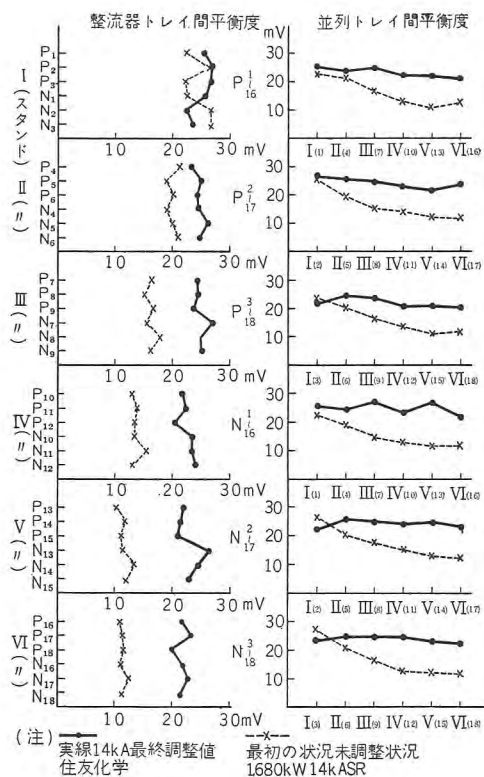


図 4.2 住友化学 1,680 kW 14 kASR

Fig. 4.2 1,680 kW 14 kASR.



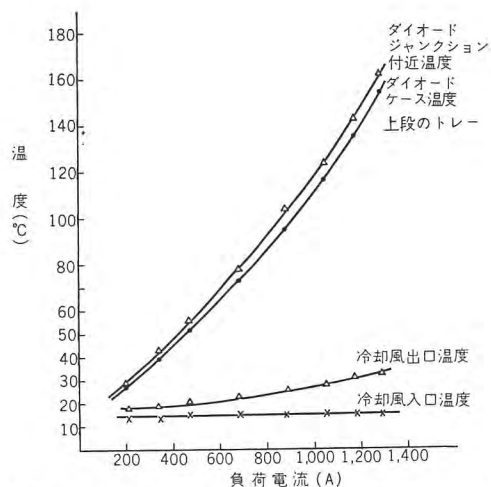


図 4.3 風冷式シリコン整流器の加速負荷試験時のダイオード温度測定

Fig 4.3 Measurement of diode temperature during acceleration load test of air cooled silicon rectifier.

上記の式 (4.4) は「本誌」Vol. 32, No. 5, 1958 の“電力用シリコン整流器”という論文の式 (8) に相当するものであり、図 4.3 に示した風冷式シリコン整流器の加速負荷研究試験の結果と一応一致する。図 4.3 ではジャンクション温度が  $190^{\circ}\text{C}$  の限界値に達していないとみなされている。なお図 4.3 の試験は 40 分間かかって、1,290 A まで 1 分間隔で上昇させており、最終値はダイオードケース（上部トレイのもの）が  $154^{\circ}\text{C}$ ；下部トレイのダイオードケース温度は  $143^{\circ}\text{C}$  に達している。したがってこの資料より判定すればダイオードケース温度で  $90^{\circ}\text{C}$  の連続運転は妥当であり、せん頭過負荷値で  $160^{\circ}\text{C}$  は保証しうる値である。

またダイオードの構成材料の特性からする制限は構成材料の溶融点によってパルス過負荷時許容温度上昇が限定される。その他逆方向電流は接合体のバリヤの温度上昇とともに指数関数的に増加するからこの点からも温度上昇を制限する一つの理由がある。1 サイクル間の短絡電流波高値とシリコンダイオードのせん頭逆電流との関係を W 社の資料で示したものが付録図 A である。

シリコンダイオードの運転時の許容温度は上記のとおりであるがこれを冷却条件より検討してみると水冷式（三菱化成、黒崎工場へ納入した 125 V, 2,100 A の液冷式と同一構造）と油入浸漬形冷却とが相当効果的であるということができよう。とくに 100kA 級以上のものでは風冷式は風の流れ、風量、騒音の観点からみて液冷式がすぐれているともいえる。

#### 4.2 並列ダイオード間通流電流の平衡の課題

シリコンダイオードの正方向特性は実測した結果は図

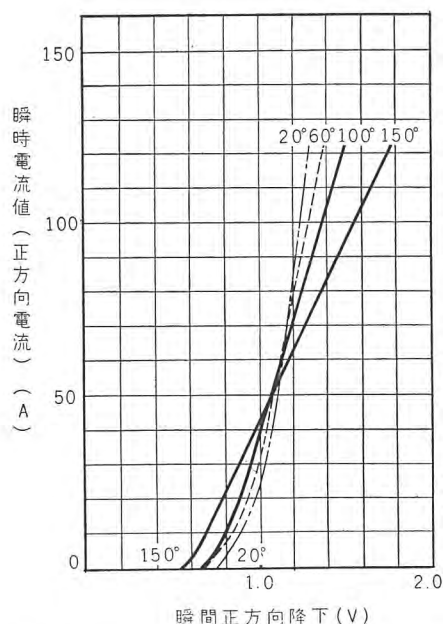


図 4.4 シリコンダイオードの正方向特性

Fig. 4.4 Positive direction characteristics of silicon diode.

4.4 に示すとおりである。この図に示したとおり冷却条件によっても、なお 0.1 V の正方向降下でもかなりの正方向電流の差異がみとめられる。この並列ダイオード負荷電流の不均衡をなおすためにバランスを挿入するのが普通使用される。この課題に関する分析は「本誌」Vol. 33, No. 5 1959, “電力用半導体整流器回路の諸問題（その 2）”という論文に掲載されているからここでは省略するが、筆者の意見では 10,000 A 以上のシリコン整流器においてはダイオードの並列個数が約 40 個であるため風冷式では図 2.4 に示したように上、下トレイ構造にならざるをえないと考えられる。その場合各並列ダイオードにそれぞれバランスを挿入して電流平衡作用をもたしめても隣接ダイオード間不平衡率 ( $u$ ) は実用上 0~3%

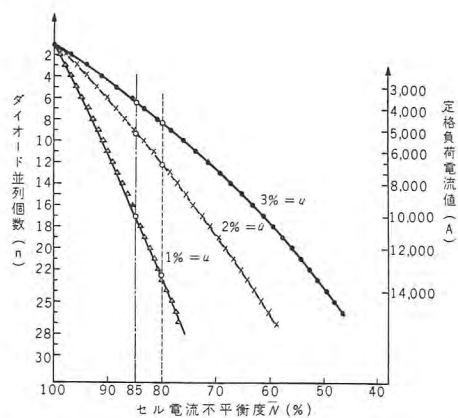


図 4.5 ダイオードバランス不平衡率 ( $u$ ) によるダイオード電流不平衡度 ( $N$ )

Fig. 4.5 Diode current unbalancing degree ( $N$ ) due to diode balance unbalance factor ( $u$ ).



程度であり、負荷電流の磁界の影響をうければさらに  $u$  の値は大きくなることがある。

この場合並列間ダイオードの最小電流値とダイオード平均電流値 ( $I$ ) との比率をセル電流不平衡度 ( $N$ )% とすれば式 (4.5) が成立する。

$$N = (100 - u) \frac{n}{2} \dots\dots\dots (4.5)$$

しかし  $n$  は並列全ダイオード数  
式 (4.5) の関係をグラフにしたものが図 4.5 である。この図からすれば実用上の限界として  $N=80\%$  をとることにしたい。しかし裕度をみて  $N=85\%$  とする。換言すれば 1 シリコンダイオードの定格電流平均値を 15% 下げて設計するならば  $u$  の値により次表のとおり有意か否かが決定される。すなわち

$u$	定格出力電流	判定	備 考
3%	4,000A まで	有意	4,000A 以上は無意味である
2%	5,500A まで	有意	5,500A 以上は無意味である
1%	10,000A まで	有意	10 <sup>4</sup> A 以上は無意味である

またバランス挿入の要否を経済的見地から検討すれば次のようになる。

$$R = \frac{(\text{バランスありの価額})}{(\text{バランスなしの価額})} = \frac{N(a+b)}{a} \dots\dots (4.6)$$

しかし  $a=1$  ダイオードの価額 (円)

$b=1$  バランスとそれを入れたためによるキュービクルの価額の増し方を含む価額 (円)

式 (4.6) を  $N$  を変数として描けば図 4.6 となる。この曲線群は  $N=80\%$  ではすなわちダイオード電流容量を定格値より 20% 低減した設計条件下でもバランスの価額がダイオードの 1/4 以下の価額でないときは有意でないことを意味している。よって結論としてはダイオード間の電流はできる限りバランスさせる必要はあるがその方法は図 4.1 の実例もあってバランスを挿入すること

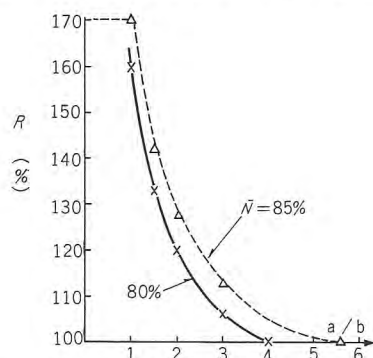


図 4.6 バランスの有意を決定する曲線

Fig. 4.6 Curves to determine the meaning of balance.

が必ずしも最適の方法ではないことは実験的にも、理論的にも推定可能である。この課題はシリコン整流器の過負荷耐量定格の要、不要にも関連して論究されなくてはならないことがらである。

### 4.3 過負荷耐量と並列運転

シリコンダイオード単体の過負荷耐量は電鉄用シリコン整流器で述べたが化学工業用部門の電解用直流電源としてのシリコン整流器の過負荷定格は負荷の性質によってそれぞれ変わってくる。図 4.7 は食塩電解槽の直流電圧——電流特性曲線である。この図中直流電圧 80V, 120V, 250V の 3 種の代表的電解槽の特性を方程式で示した。すなわち

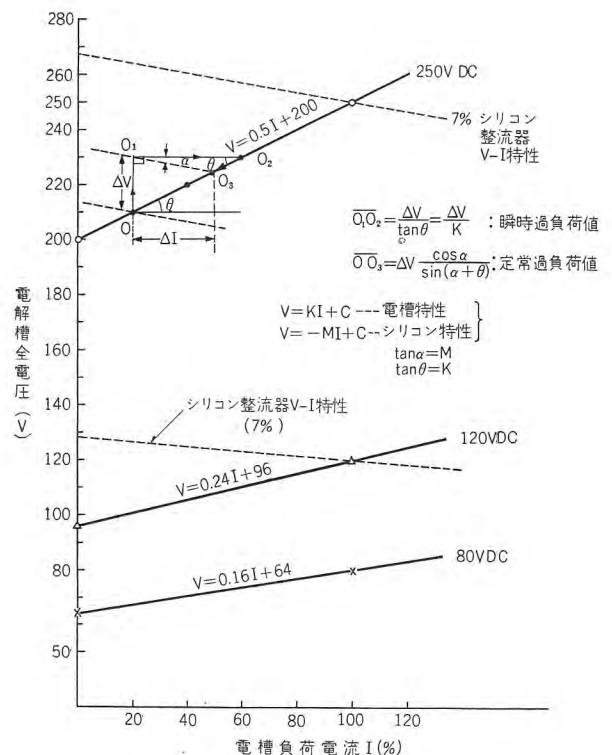


図 4.7 食塩電解槽の電圧—電流特性

Fig. 4.7 Voltage-current characteristic of salt electrolytic cell.

$$V = 0.16 \cdot I + 64 \dots\dots\dots (4.7)$$

$$V = 0.24 \cdot I + 96 \dots\dots\dots (4.8)$$

$$V = 0.5 \cdot I + 200 \dots\dots\dots (4.9)$$

一般式としては式 (4.10) となる。

$$V = K \cdot I + C_0 \dots\dots\dots (4.10)$$

これに対してシリコン整流器の直流電圧——電流特性は式 (4.11) で示される。すなわち

$$V = -M \cdot I + C \dots\dots\dots (4.11)$$

式 (4.10), (4.11) の交点が運転時の直流電圧、電流を表わしている。その場合に直流電圧が  $\Delta V$  上昇したと



図 4.8 1,500kW シリコン整流器外形図

出力	1,500 kW
直流電圧	250 V
直流電流	6,000 A
整流回路	三相全波
定格	全負荷連続



き、または1電解槽を切り離したとき(電解槽の陽極グラフィットが落下したようなときを含む)などには図4.7に示すように  $\overline{0_1 0_2}$  だけの瞬時的過負荷を生ずる。

$$\overline{0_1 0_2} = \frac{4V}{K} \dots\dots\dots (4.12)$$

その後は定電流装置があれば制電流値に復旧するがそうでない場合には  $\overline{00_3}$  の定常値におちつく。

式(4.7)、(4.8)、(4.9)の3式において上記の変化条件を考えると式(4.7)の直流電圧80Vのときがいちばん、瞬時的過負荷が発生する。80V、120V、250Vの場合を比率で示せば250Vを100%とすれば120V時は200%、80V時は300%の割合となる。

よってシリコン整流器の過負荷定格は低電圧、大電流のものほど荷酷なことになり、それに対応すべく設計する必要がある。

上記の諸条件を勘案してシリコン整流器同志の並列運

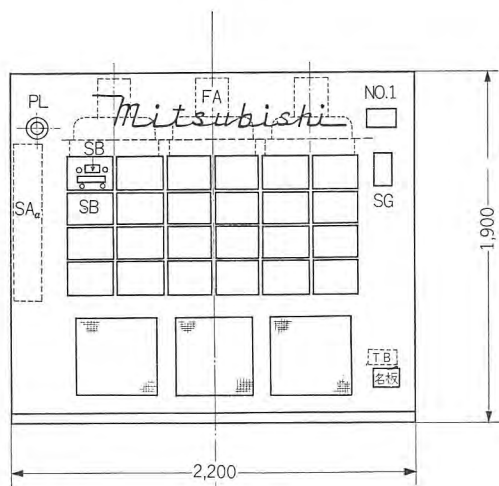
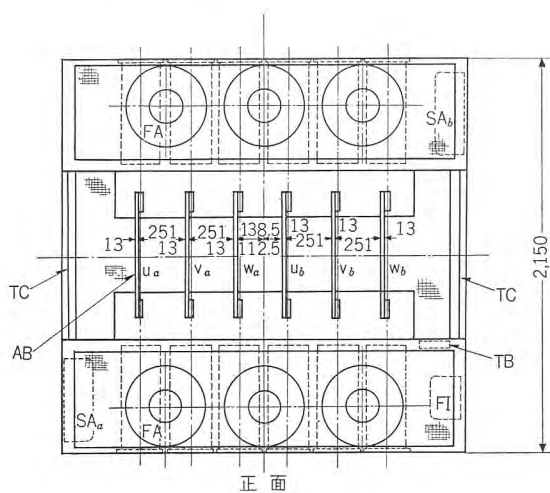
転、また他種整流器との並列運転を考える必要がある。

現在は他種変換装置と並列運転を実施した経験はないが目下製作中のものに回転変流機と並列運転を行なうものが3件ある。この問題は旧設備の合理化計画の線にそって考えられるべきことである。その代表例としてはアメリカで300V、10,000Aの水冷式シリコン整流器が300V、5,000A2台の回転変流機ならびに300V、5,000Aの接触形変流機1台とそれぞれ並列運転している。詳細は付録によられたい。この実例からみて、他種の既設整流装置との並列運転はつねに可能であるといえる。

#### 4.4 シリコン整流器の外形と構造

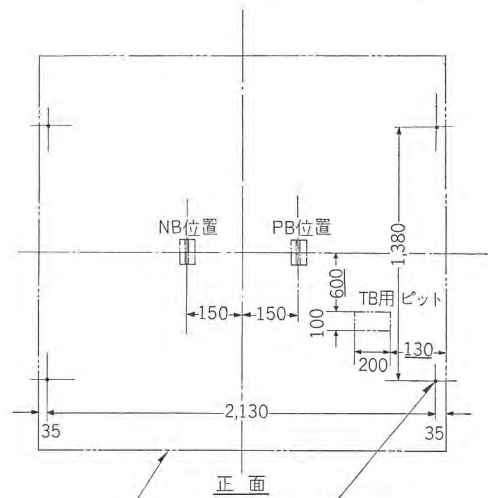
住友化学、岡山工場へ納入したシリコン整流器は上記のとおり一列横隊のスタンドを6台ならべたがその他の方式として代表的な2種類を説明しよう。

風冷式シリコン整流器で直流電圧250V、6,000Aの



出力 1,120 kW  
直流電圧 140 V  
直流電流 8,000 A  
整流回路 三相全波  
定格 全負荷連続

記号	名	称	箇	備	記号	名	称	箇	備
AB	交	流 端 子	6		SB	整	流 器 箱	48	
FI	故	障 指 示 装 置	1		TB	補	助 回 路 端 子 板	1	
NB	直	流 負 極 端 子	1		FA	冷	却 用 排 気 扇	6	0.4kW 220V
PB	直	流 正 極 端 子	1		SG	故	障 指 示 装 置 補 助 リ レ ー	1	
PL	運	転 表 示 灯	1		TC	点	検 用 カ バ ー	2	950×1,850
SA	異	常 雷 圧 吸 取 装 置	2						



整流器わく 4-W $\frac{1}{2}$ ×180Aキノホルト

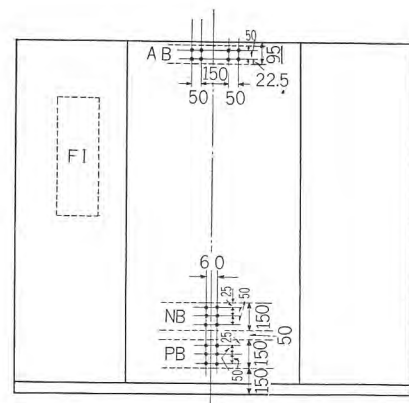


図 4.9 SF 形シリコン整流器外形図  
Fig. 4.9 Outline of type SF silicon rectifier.



定格で回転変流機またはゲルマニウム整流器と並列運転する条件の水冷式再冷器付風冷式シリコン整流器を図 4.8 に示す。本器は回転変流機をとりのぞいた跡にすえ付け、階下に水冷式再冷器室を作って冷却風を閉路循環式風冷式構造としたものでシリコンキュービクルの内に H. S. C. B(54 P)を設置している。また風冷式シリコン整流器の代表例として図 4.9 に 1,120 kW 140 V 8,000 A の定格のものを示す。これは整流器室の中央に図のようなキュービクルをすえ付けただけでキュービクル下部から室内の空気を取入れて冷却する方式である。

電気化学用直流電源としての運転責務上、または生産活動の基礎条件を満足させるためにシリコン整流器の設計、構造は一定の制限を受けざるを得ない。その一つがトレー構造方式である。この構造は運休を絶無とし、変流装置の合理化計画の遂行に対処しうる手法を提供したものであるがなお研究すべき内容を介在させている。

#### 4.5 そ の 他

昨今の電解用直流電源の傾向としては低電圧、大電流の方向へ発展しつつある。その場合生産計画と能率の両方面からみてもっとも合理的な直流電圧が考えられなくてはならない。なぜならば式 (2.1) に示した方式でシリコンダイオードの直列枚数が選定され、その直列枚数に応じて効率が段階的に変化し、(その一例を付録図 E に示す) またシリコン整流器の価額がダイオード使用個数に比例して増すからである。この問題はダイオードの P. I. V. の値が将来向上すればそれに応じて変化することは明らかである。

直流出力電圧および出力電流の調整方式であるが現在では出力電圧を随時制御して出力電流を一定にしている方式が考えられている。一般に次の 4 方式があるが大電流 (120 kA) になると技術上なかなか困難な問題が発生し、特別な方式が研究されている。

- (1) 誘導電圧調整器による方式。
- (2) 直流励磁可飽和リアクトル方式。
- (3) 負荷時電圧調整器による方式。
- (4) (2) と (3) との組合わせ方式。

将来はシリコンダイオード自体による調整方式が研究されている。以上の方式は負荷の性格と電解工場の設備の状況によってそれぞれ異なって一律にきめることは困難である。したがって付録表 1, 表 2 の調査書による内

容は少なくとも提示されて、当方で経済設計の範囲を明示する方針である。

半導体整流器変電所設計という課題は大電流容量のものにあってはかなりの難題をようしている。しかしこれらの問題も時間がすべて解決してくれると筆者らは信じている。いな、解決しようと努力している一人でもある。そしてこれの実例は筆者の一人が「オーム」という電気雑誌に掲載しているから参照されたい。

#### 5. む す び

以上のべた 120 V, 14,000 A 風冷式シリコン整流器は現在日本における最初にして最大定格のものであり、新分野への開拓という運命をになっているだけに特筆すべき製品である。本文で説明したように今回は特殊事情によって冷凍機付風冷式としたがこれが風冷式シリコン整流器の標準の姿ではない。またシリコンダイオードの P. I. V. として 250 V のものを使用して直流電圧 120 V を出したがこの点も今後の進歩に留意することにした。

今回の食塩電解用シリコン整流器としては 4 カ月余の実績は誠に良好であり、能率も 95~96% の範囲である。

製作から工場試験、さらに現地試験完了まで約 1 カ年間にわたったがその間住友化学の大阪工場、岡山工場の方々の絶大なるご協力とご支援とによってはじめて今日の成績をあげることができたものであり、この事実に対し関係者一同にかわり厚く御礼申し上げる次第である。また製作、試験に関して伊丹製作所の関係各位より多大のご協力をいただいたことに対して深く感謝する次第である。

#### 参 考 文 献

- (1) 加藤又彦：電力用シリコン整流器「三菱電機」32, No. 5. (1958)
- (2) 岡 久雄：電力用半導体整流器回路の諸問題 (その 2) 「三菱電機」33, No. 5 (1959)
- (3) 加藤又彦：大容量半導体整流器変電所の設定条件, OH M 46 巻 No.5 (34-4 月)
- (4) Otto Jensen & Carl Harshbarger, A 3,000 KW semiconductor rectifier C. P. 58-334
- (5) G. J. Bowor: Design consideration for large industrial semiconductor rectifier C. P. 58-222



(1) 図 A…シリコンダイオードおよびゲルマニウムダイオードの連続運転時のせん頭逆電流値と平均負荷電流値/セルの関係曲線ならびに1サイクル間の短絡電流とせん頭逆電流値との関係を示した。

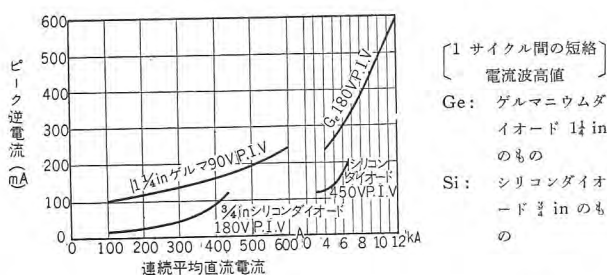


図 A 負荷状況下の Ge および Si-diode のせん頭逆電流——電流値の関係曲線

Fig. A Relation between peak reverse current and current value of Ge and Si diode under load.

(2) 図 B…正方向平均電流値とダイオード内発生熱量との関係曲線であって整流回路方式によって異なることを示す。

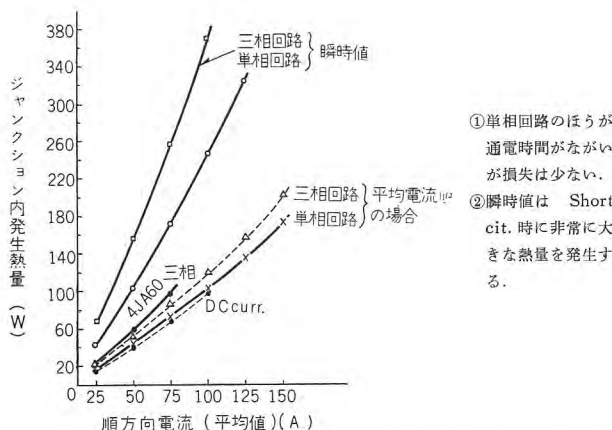


図 B N-322 E 形 Silicon diode 発熱量平均電流値および瞬時値の関係曲線

Fig. B Relations between generated heat and mean current value and instantaneous current value of silicon diode.

(3) 図 C…3,000 kW 300 V シリコン整流器と回転変流機、接触形整流機との並列運転を示したもので下記の特長がある。

- シリコン整流器は、5,000 A 2 組とし、三相全波整流回路となし組合せ 12 相方式である。
- 直流側母線の短絡保護用に高速短絡器が変圧器二次側母線に装置されている。
- 交流側母線にはシリコン用シャ断器はなく、電力ヒューズが使用されている。

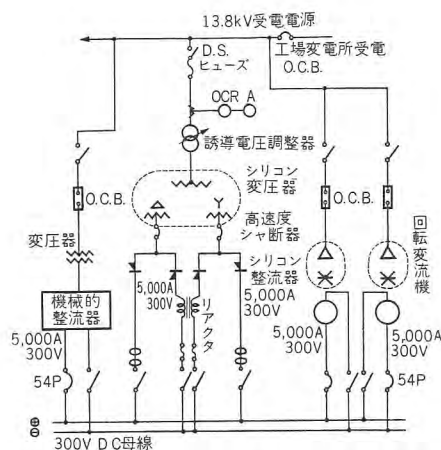


図 C 3,000 kW 300 V シリコン整流器と回転変流機および機械的整流器との並列運転回路の単線結線図

Fig. C Single line connection diagram of parallel operation circuit of silicon rectifier, rotary converter and mechanical rectifier.

(4) 図 D 1-2…单相の結線であるがシリコンセルを短絡器を使って保護する方式であって 図 D 2 はシリコンセルの故障によっても短絡器を働かす方式のものである。

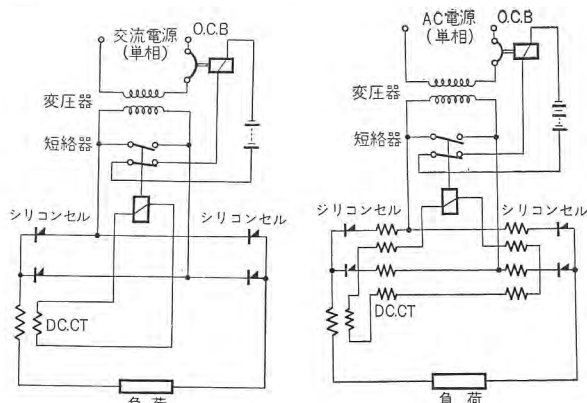


図 D 1

Fig. D. 1

図 D 2

Fig. D. 2

(5) 図 E…ゲルマニウム（水冷式 200 A 級）と 329-H 形シリコンセルとによる直流出力電圧を横軸としたときの能率の変化状況を示したものの。

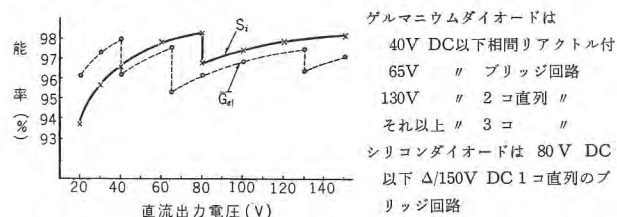


図 E シリコンおよびゲルマニウム整流器本体の能率比較  
Fig. E Comparison of efficiency of silicon and germanium rectifier diodes.

(6) 表 1, 表 2…調査票で見積り内容を確認するものである。



シリコン  
ゲルマニウム

整流器見積調査書

これは三菱 シリコン, ゲルマニウム 整流器の御引合を戴きます際の御便宜のため作られたものであります。御希望によく合致した見積仕様書を速かに作成して実状に即した正確な御見積が出来ますよう出来るだけ御記入下さることを願ひ申し上げます。更に見積上参考となる事項または御希望事項がありましたら、適宜別紙にお書きの上御添付願ひます。

備考: ① 必要部を○で囲み, 不要部は抹消し, 空欄には御記入下さい  
② 4 部同時に複写し, 1 部は控としてお手許に置き他の 3 部をお送り下さい

1. 一般事項

- a) 御引合の種類: 正式, 予算用, 計画用  
b) 見積資料提出期日: 年 月 日 (入札期日 年 月 日)  
c) 御希望納期: 年 月 日  
d) 御購入仕様書添付: 有 無 別紙添付: 有 無

2. 機器一般事項

- a) 用途:   
b) 設備計画: 新設, 既設 (MG, RC, MR, KU, , ) への増設, 置換, 並列運転.  
c) 御希望整流器の種類: シリコン, ゲルマニウム整流器, kW, V, A, 台  
d) 御使用場所の条件: 屋内用, 屋外用, 受電機器屋外, 変電機器屋内, 制限重量 kg 以内, 制限寸法 巾 奥行 高 mm 以内 環境, 空気条件 腐蝕ガス 有 無, 種類, 濃度 気温 最高 °C, 最低 °C

3. 受電側(交流側)の条件

- a) 受電電圧 V, (変動 V~ V) 周波数 c/s, (変動 c/s~ c/s) 相数 相  
b) 受電容量 kVA, 電源インピーダンス %  
c) 異常電圧を発生する恐れのある機器或は頻繁に開閉を行う機器が受電系統又は共通母線に接続されている場合はその状況: (出来れば単線結線図)

4. 出力側(直流側)の条件

- a) 容量: kW, 定格: 短時間, 連続, 過負荷 % 時間, % 分間 電鉄用 D, E, 種定格  
b) 出力電圧: 定格 V,

御会社名	工場名
納入場所	道府県 市 町村 番地 線 駅
御担当部課御氏名	整理番号



c) 出力電流: 定格 \_\_\_\_\_ A, 最大 \_\_\_\_\_ A,  
自動定電流装置: 要・不要, 精度 \_\_\_\_\_ %

d) 整流器相数: \_\_\_\_\_ 相. (特に誘導障害等の問題がある場合)

e) 直流電圧レギュレーション \_\_\_\_\_ %

電  
流  
(A)

- a) 負荷の種類 \_\_\_\_\_ 流

b) 負荷と大地間の絶縁又は電位 \_\_\_\_\_ (A)

c) 負荷の電圧、電流特性 \_\_\_\_\_

d) 過負荷電流 \_\_\_\_\_ A, 継続時間 \_\_\_\_\_ 分, 平均頻度 \_\_\_\_\_ 回/日

e) 連続無停電運転時間 \_\_\_\_\_ 時間 又は \_\_\_\_\_ 月 停電許容時間 \_\_\_\_\_ 分間 電圧 (V)  
 運転の連続性に対する御要求の程度 \_\_\_\_\_ 時間 (T)

f) 負荷短絡或は異常電圧発生の可能性, 短絡電流 \_\_\_\_\_ A, \_\_\_\_\_

g) 負荷の逆起電力の有無 \_\_\_\_\_ 有 \_\_\_\_\_ 無 \_\_\_\_\_ 大きさ \_\_\_\_\_

[illegible]

a) 御希望方式: 風冷・間接風冷・水冷・液冷・再冷器(水冷・風冷)

b) 有害ガス対策: 御希望 (詳細は御打合による)

c) 使用し得る冷却風温度 最高          °C, 最低          °C, 量          立時

d) // 冷却水温度 最高          °C, 最低          °C, 量          立時

水質 上・中・下, 電気抵抗値          Ω・cm

e) 冷却風又は冷却水を他の設備と共用する場合その概要

a) 並列運転する場合 並列器の種類 \_\_\_\_\_, 定格 \_\_\_\_\_, 動作状態 \_\_\_\_\_, 並列条件 \_\_\_\_\_

b) 既設機器中, 本引合機器用として流用を御希望されるものの種類, 定格, 結線台数

c) 流用可能の制御電源 AC  $\phi$  V, DC V AH (蓄電池, セレン)

2. 整流器の技術資料については伊丹製作所技術部または本社業務部へ御要求願います。



# 電気鉄道用シリコン整流器

伊丹製作所 加藤又彦\*・横畠洋志\*\*・奥村儀一\*\*\*

## Silicon Rectifiers for Electric Railway

Itami Works Matahiko KATO・Hiroyuki YOKOHATA・Giichi OKUMURA

To take the place of mercury arc rectifiers now in wide use for ground substations of electric railway and for DC power source of electric cars, silicon rectifiers have come to be employed with their marked features of stability and economy. However, they have been regarded as only applicable to low voltage field because of the present state of their development as well as their inherent characteristic. Amidst this general tendency, Mitsubishi has been successful in building 1,000 kW 1,500 V rectifiers for ground substations of class E rating and 450 kW 1,500 V class units for electric cars. It has brought a new epoch in this engineering though there are a few points that still need further improvements.

### 1. ま え が き

電気鉄道用地上変電所および車両用直流電源としては従来は主として水銀アーク変換装置が使用されてきたがこの水銀整流器には真空工学特有の保守上の難点と確率的に発生する逆弧という本質的な弱点が随伴しており、水銀整流器としての種々の利点は認知されながらもとかく不完全な機器視される傾向があった。こうした水銀整流器の欠点を補足し、安定性がたかく、かつ経済的にも将来水銀整流器よりも廉価となる要素と特性を備えている半導体整流器、とくに電力用シリコン整流器を電鉄部門に採用する試みが実施された。電力用シリコン整流器はその特性と現在の進歩の状況よりみて最適応用分野は低電圧領域とみなされている。こうしたシリコン整流器を1,500 V級の電鉄用直流変換装置としてかつまた過負荷特性を要求される定格を賦与することは困難視され、非経済的事項とされていた。かかる環境のもとにおいて1,000 kW, 1,500 V E 種定格の地上変電所用および450 kW, 1,500 V級の電車用シリコン整流器を具体化し、実負荷運転を実施しえたことは技術的にみて貴重なる研究であり、この種用途に対して新しい局面を展開させ、新風を吹きこんだことは事実である。

今回の電力用シリコン整流器は発達しつつあるシリコン整流器の一つの断面を示したにすぎず、ダイオード自

体は日進月歩の躍進と変化をつづけており、その特性や使用条件の限度、価額の低廉化など今回の製作品をもって将来のすべてを律することは危険なことである。しかし今度の研究試験によってこの種シリコン整流器の定格とその性能の外郭を知り、幾多の参考資料をうるとともに研究実施にあたられた関係各位の理解を深めえたことは誠に有意義であった。

本文は風冷式シリコン整流器用ダイオードの基本特性の研究の一端と今回実施した1,500 V級、高圧シリコン整流器の基礎試験、450 kW級シリコン電車用シリコン整流器および1,000 kW, 1,500 V, E 種定格の地上変電所用シリコン整流器の工場ならびに現地試験の一部を記述したものであり、この試験結果から推定して電力用シリコン整流器が電気鉄道用部門に適しているか否かを考察したものである。

### 2. 電鉄用シリコン整流器の構成とその特長

#### 2.1 交直両用電車用風冷式シリコン整流器

この電車用シリコン整流器はさきに仙山線に納入した交直両用イグナイトロン電車のイグナイトロン整流器のかわりに風冷式シリコン整流器を積載し、回路および保護装置を一部更新して仙山線において国鉄関係各位によって走行試験その他が実施された。図2.1はシリコン整流器の外観を示したものである。

\* 技術部整流器課長 \*\* 技術部 \*\*\* 工作部



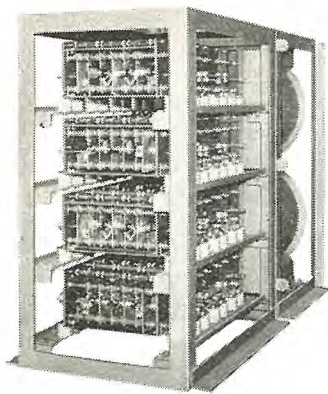
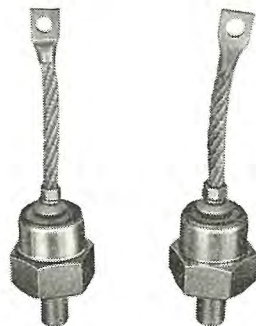


図 2.1 シリコン電車で用  
シリコン整流器の外観  
Fig. 2.1 Appearance of  
silicon rectifier for  
electric railway.

図 2.2 シリコンダイオード  
319-H 形  
Fig. 2.2 Silicon diode type  
319-H.



#### (1) 電車で用風冷式シリコン整流器の仕様

- a. 定格出力……1,500 V 420 A

シリコン整流体は W 社製 319-H 形 192 個を使用した。図 2.2 は 319-H 形を示す。

- b. 整流方式……単相ブリッジ結線  
整流体直列方式

- c. 冷却方式……強制風冷式

#### (2) シリコン整流器付属装置の概要

シリコン整流器用変圧器はイグナイトロン電車で用いたものをそのまま流用した。ただ主回路に高速度リレーを追加しただけで流用可能な機器と連動方式はそのまま使用したが下記のものが付属された。

- a. 異常電圧吸収装置

これは蓄電器と抵抗器より構成される電圧吸収器と非直線特性を有する抵抗体との組合わせによって外雷を吸収する役割を演じている。

- b. 電圧分割抵抗

運転状態で、シリコン整流体に印加される逆電圧を均圧化するために直列整流体のおのおのに並列に抵抗器を挿入して a 項の異常電圧吸収装置と協調をとっている。

- c. 冷却装置

今回製作したものは特殊事情があって床上取付けとなっており、図 2.3 に示すように一つのわくに 0.4 kW の冷却扇 2 台を取付けて強制冷却を行ない、通風方向

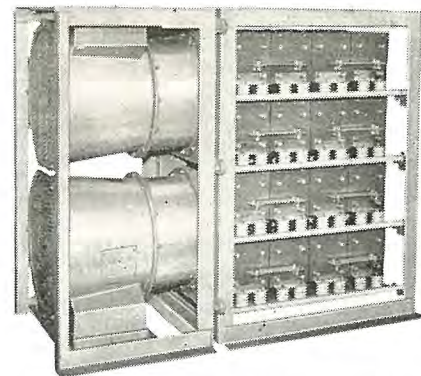


図 2.3 電車で用シリコン整流器冷却扇の取付を示す  
Fig. 2.3 Silicon rectifier for railway use showing  
the mounting of cooling fan.

は水平である。

冷却装置の仕様は下記のとおりである。

誘導電動機 単相 0.4 kW……4 台

反発起動形 50 c/s

軸流送風機 風量 40 m<sup>3</sup>/min……4 台

保護装置としてはシリコン整流体の高温保護用として温度リレーを使用し、過負荷シャ断用に高速度リレーを利用した。

#### (3) 特 長

車両用シリコン整流器としてはその構造は耐震的、砂じんならびに雨水の浸入に対する防止保護方法が第 1 に考えられなくてはならない。

これらの課題に対しては一応考慮したが今回の試験の目的がシリコン整流器の運転性能の確認にあったため、運転時の諸特性が測定しやすい実験用構造となっている。特長は次のとおりである。

- 図 2.4 に示すように整流体 6 個を直列とし、これを単位としてユニットを構成させ、全体を絶縁ガイシでうかしている。図 2.3 参照のこと。
- 1 ユニットの単位として直、並列個数を任意に選定することができる。
- 結線方式も単相、三相をとわず任意に変更可能である。

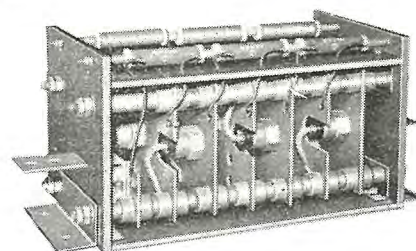


図 2.4 シリコンダイオードの冷却片への  
取付状況を示す

Fig. 2.4 Cooling pieces mounted silicon diode.



d. 並列整流体間に電流平衡用バランスをまたヒューズをも挿入しておらず保護装置を簡易化した。

## 2.2 1,000 kW 1,500 V 地上変電所用シリコン整流器

本器は電鉄用地上変電所用としては最初の製品であり、国鉄大井町変電所へ納入して電車負荷試験を行なうとともに E 種定格に近似した反復負荷試験を実施してシリコン整流器の定格とその構成に関する関連性を把握するのが目的で製作された試作品である。

### (1) 風冷式シリコン整流器装置の仕様

受電電圧は 22 kV、三相、50 c/s でガイシ形シャ断器の変圧器側にアレスタとサージ吸収用蓄電器を挿入し、1,160 kVA の整流器用変圧器を経て 8 群のシリコン整流体によって直流電力に変換される。また直流側には蓄電器と直流リアクトル、アレスタの組合わせよりなるサージ吸収装置が設けてある。さらに過電流保護用として 54P、54N が設けてある。図 2.5 は 1,000 kW 1,500 V 風冷式シリコン整流装置変電所の単線結線図である。

以下諸機器の仕様を述べれば次のとおりである。

a. 1,000 kW 1,500 V 風冷式シリコン整流器……1 台

定格出力……1,000 kW、直流電圧 1,500 V

100% 連続定格、120% 2 時間、

300% 1 分間

整流方式……三相全波、直流出力側で 8 組直列接続

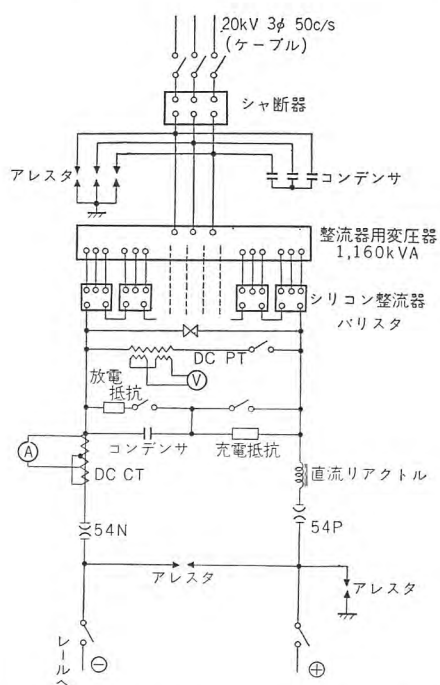


図 2.5 大井町変電所納め 1,000 kW 1,500 V 風冷式シリコン整流器主回路

Fig. 2.5 Main circuit of 1,000 kW 1,500 V air cooled silicon rectifier.

冷却方式……

強制風冷式

シリコン整流体はシリコン電車で同一定格のもの 384 個を使い 4 面の屋内形キュービクルにおさめ、整流体 16 個を 1 組として、1 トレー(抽斗形箱)を構成している。図 2.6 は外観写真である

b. 整流器用変圧

器………1 台

定格出力……

1,160 kVA/

1,160 kVA,

三相、22 kV

受電

結線方式……

一次星形；二

次三角形 8 群

巻線

形 式……油

入自冷式、外

鉄形；屋外用、

静電しゃへい

板入

図 2.7 は整流器

用変圧器の外観写真である。

c. 冷却装置………1 組

三相、2.2 kW 誘導電動機付多翼式送風機 ……4 台

d. 異常電圧吸収装置（交流；直流側とも）……1 式

e. 速応形限流ヒューズ………1 式

f. 故障表示装置………1 式

g. 電圧電流平衡装置………1 式

h. 高速度シャ断器（逆性、正性）………各 1 台

以上の主要機器の外形寸法、重量を表にしたものが表

2.1 である。

### (2) 風冷式シリコン整流体

使用したシリコン整流体は前述のシリコン電車のもの

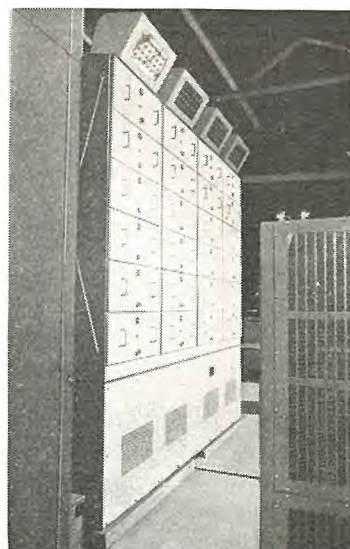


図 2.6 1,000 kW 1,500 V シリコン整流器外観

Fig. 2.6 Appearance of silicon rectifier 1,000 kW 1,500 V.

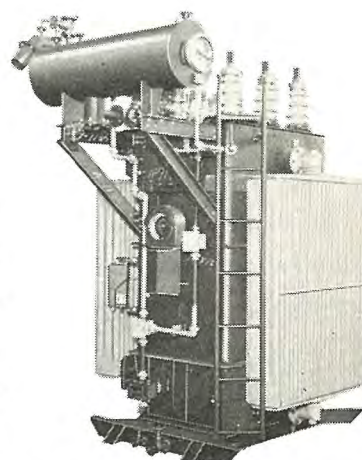


図 2.7 シリコン整流器用変圧器 (1,160 kVA 三相 22 kV 受電 50 c/s)

Fig. 2.7 Transformer for silicon rectifier 3 phase 1,160 kVA 22 kV 50 cycle.

表 2.1 主要機器外形寸法および重量

器 種	外形寸法 (mm)	重 量 (kg)
風冷式、シリコン整流器 1,000 kW 1,500 V	3,490×1,500×3,400 (高さ)	6,800
同 上 用 変 圧 器	1,880×2,650×3,120 (高さ)	5,600
油 量		2,100 l

のと同じである。その基本特性は後述するがこれの配列は図 2.4 に示すように銅板の冷却片に 1 ダイオードを締付けたもので 16 個を 1 組とした構造で電流バランサ、ヒューズとともに一つのトレーに挿入されている。図 2.8 はトレーの内部を示したものである。トレーは合計

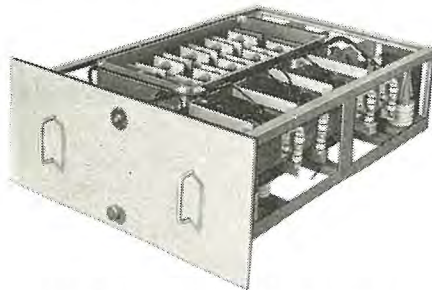


図 2.8 トレーの内部を示したもの  
Fig. 2.8 Interior of the tray.

24 あり、4 列、6 段に配置してあってその状況は図 2.6 にみるとおりである。

### (3) 回路方式

上記のシリコン整流体をもって 1,500 V 1,000 kW の整流器を構成するためには整流体の直列、並列接続を必要とするがそのうち直列個数の決定は常規使用電圧の制限条件による個数決定よりも外雷のサージ電圧による決定が上位にある。こうした設計条件よりして直、並列接続方式には図 2.9 に示す 2 通りの方法がある。図 (a) はシリコン電車において実施した方式であり図 (b) は変圧器の二次側を適宜分割して、整流体群を直列に接続した方式で今回の地上変電所用 1,000 kW 1,500 V にはこの方式を採用している。しかし整流体 2 個を直列接続したものを図 (b) のように接続している点では両方式を組合

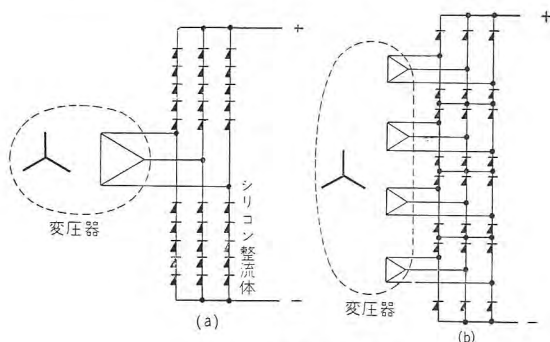


図 2.9 回路方式  
Fig. 2.9 Circuit system.



図 2.10 冷却扇の外形  
Fig. 2.10 Cooling fan.

わせた方式といえよう。

整流回路は三相全波（ブリッジ結線方式）で変圧器二次側巻線群の一つは整流体 2 個直列、4 個並列となっており、4 個の整流体の電流バランサはブリッジ結線の交流側に挿入されている。各整流体には並列に抵抗を挿入して整流体間の電圧分割を実施している。

### (4) 冷却装置

図 2.6 にみるように 4 台の多翼式送風機を 4 列のトレーにそれぞれ取付けて上方向に向かって送風し、各段のトレーの整流体を冷却するもので、連続運転とし、断風警報は整流体に取り付けた温度継電器によって行なう。図 2.10 は冷却扇の外観写真である。

### (5) 保護、連動方式

このシリコン整流器は無人運転方式を前提とした運転を実施するように計画されており、若干個の整流体の破壊によるトレーの入換作業は無電圧状態で作業を行なうようになっている。保護方式としては次の故障が想定され、それに対応する保護装置が設けられている。

#### a. 直流側の短絡故障

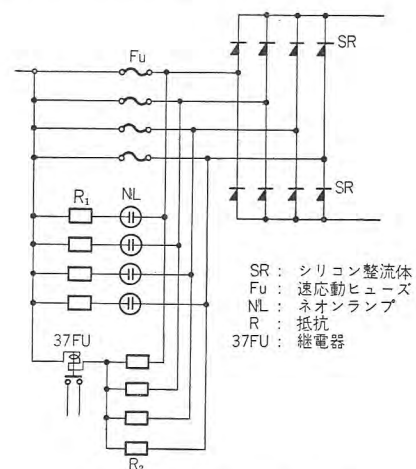


図 2.11 故障表示警報回路  
Fig. 2.11 Fault indication alarm circuit.



54P および 54N よりみて外線側の短絡事故にもとづく過電流発生に対しては 54N の高速度シャ断器で故障電流を 1 サイクル以内でシャ断する。しかし 54N とシリコン整流器間の直流母線の短絡故障に対しては高速度リレーによって 52G を開放する。

また上記のような短絡事故と整流体のそれぞれの交流側に挿入されている速応形ヒューズの作用を説明すれば次のとおりである。すなわちこの速応形限流ヒューズ(Fu)は図 2.11 に示すように挿入されており並列群内の 1 整流体が破損したときに短絡状態となった回路をヒューズの溶断によって開放する役割を演ずる。そしてこの溶断ヒューズの位置を明示するネオンランプと警報装置とをそなえている。

#### b. サージ電圧の侵入したとき

サージ電圧の侵入といっても交流側よりのものと直流き電線側よりのものと保護装置の出すサージ電圧とがある。図 2.12 は今回設置したシリコン整流器に対する保護装置とサージの侵入後の移行との関連性を図示したものである。

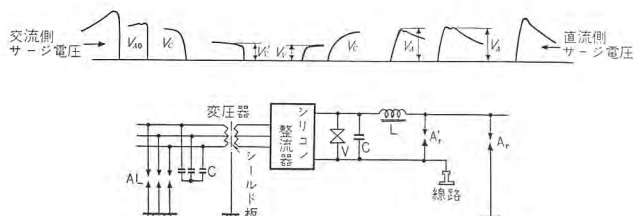


図 2.12 異常電圧保護方式

Fig. 2.12 Abnormal voltage protecting system.

すなわち交流側にはアレスタ、蓄電器を挿入し、整流器用変圧器にしゃへい板を設けて静電しゃへいを実施した。これに対して直流側には制限電圧 6 kV の特殊アレスタを挿入し、かつ L-C サージ吸収器、ならびに非直線抵抗体を並置して万全の策を施した。

#### c. 温度上昇防止策

シリコン整流体に温度リレーを挿入して規定限度で 52G を開放する保護方式がとられた。また冷却扇の断風時の保護も上記リレーが兼用された。

#### d. 接地事故のとき

シリコン整流体の破損にともなって速応ヒューズが溶断し、もっとも悪い条件を考えれば 1,500 V の直流が接地することが考えられる。これを検知し、保護を行なうためキュービル全体を大地に対して絶縁し、両者の間に接地継電器を挿入している。

#### (6) 1,000 kW 1,500 V 風冷式シリコン整流器の特長

電気鉄道用シリコン整流器・加藤・横畠・奥村

以上述べたことを要約してそれらの諸特長を列記すれば次のとおりである。

- 300% 1 分間の過負荷耐量をもっていること。
- 整流器用変圧器の二次側を 8 群に分割し、それに整流体を接続し、直列結線方式を採用していること。
- 1,500 V 級でありながら低電圧用の速応ヒューズを採用していること。
- 変圧器は三相電力用のものと類似しているが二次側が 8 巻線に分割されている。
- 交流側、直流側にそれぞれ特有のサージ吸収装置をつけたこと。
- 整流器のキュービル全体を絶縁し、高抵抗接地をしていること。

### 3. 試験とその結果

#### 3.1 交直両用電車用シリコン整流器工場試験

本器は 1,500 V、単相ブリッジ結線方式の最初の試作品であるため、安全性を十分とって試験を実施した。試験にあたってシリコン整流器は図 2.1 に示すもの 4 組と 2 組とにわけて 2 回にわたり実行した。変圧器としては試験専用品を、また短絡電流抑制用として直流側にリアクトルを挿入した状況下で実施している。

##### (1) 試験条件

つぎの諸条件のもとに高圧負荷試験を行なった。

- 3.3 kV/1.68 kV, 2,240 kVA/2 の三相変圧器の 1 相分だけを使ってシリコン整流器と接続して単相全波整流回路を構成した。
- 水抵抗負荷を使い、試験した。
- シリコンダイオードは室温の空気を強制的にふきつけて冷却を行なった。
- シリコンダイオードの温度上昇が一定になって後初めて負荷電流を増加した。

##### (2) 負荷試験

負荷試験中 4 組のわく組を使って試験したものが図 3.1 に示すものであり、この結果をまとめると次のようになる。

- シリコンダイオード自体の温度上昇の見地から判断すれば連続 720 A 程度まで負荷しうる。
- 直並列各ダイオードの負荷分担、電圧分担は抵抗分割式で実用上なんらさしつかえない。
- 400 A の基底負荷において 300%, (1,200 A) 1 分間の過負荷耐量を十分もちうる。

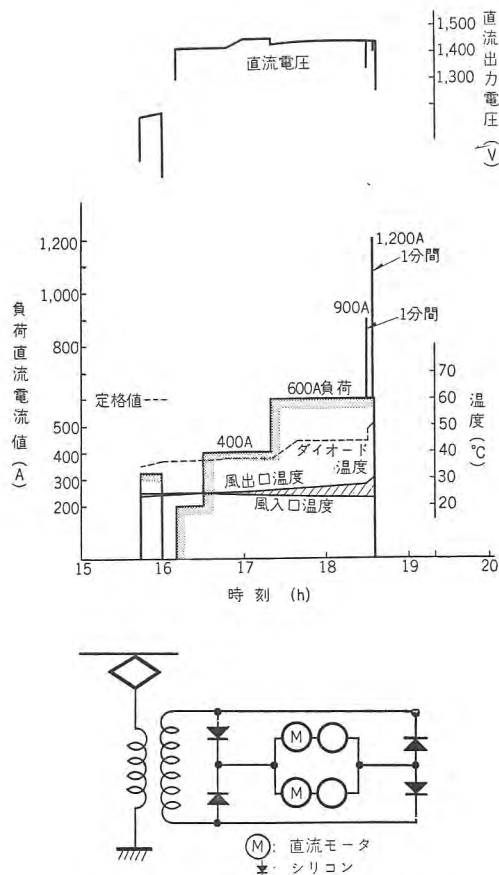


図 3.1 900kW 1,500 V 600 A 風冷式シリコン電車負荷試験

Fig. 3.1 Load test on 900kW 1,500 V 600 A air cooled silicon rectifier electric car.

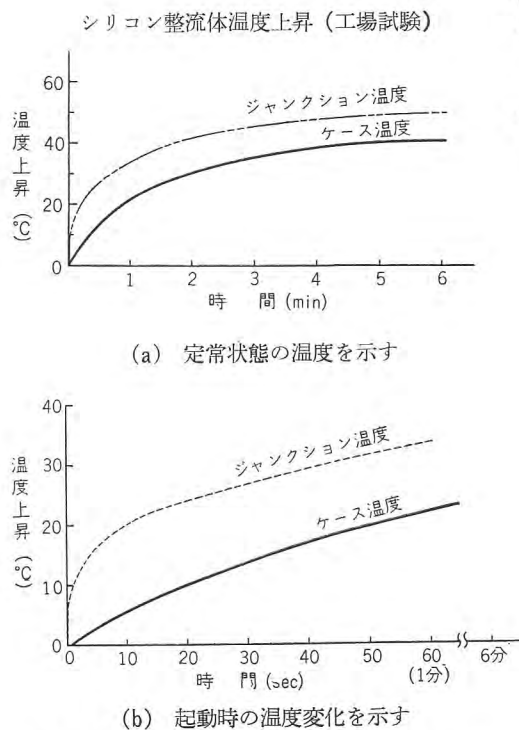


図 3.2 負荷印加時のダイオードの温度変化特性  
Fig. 3.2 Temperature change characteristic of diode under load.

d. 現在の保護方式で実用上さしつかえないと考えられる。

なおわく組二つを使って 1,500 V 420 A の負荷試験をも実施し、その時 P-N 接合体に接近した付近に熱電対を挿入し、てその箇所の温度変化を測定したものが図 3.2 である。これはあらかじめシリコンダイオードの逆電流特性—温度との関係を求めておいて、逆に運転時の逆電流を測定することによって P-N 接合体付近の運転時の温度を推定したものである。図 3.2 によってジャンクション付近の温度とケースの温度は約 10°C の差があり、また前者は定常化が早い。

### (3) 短絡試験

電気車においては直流電動機のせん絡はありうることであり、そのせん絡時にシリコンダイオードの破損が発生したのでは実用上問題となるためあらかじめ工場試験においてモータのせん絡現象と等価的な回路をつくって実測を行なった。その時の電磁オシログラムを図 3.3 に示す。この場合、短絡電流は 2,000 A、約 8.5 サイクルの間持続して交流側シャ断器によって開形された。この状態でもシリコン整流器はなんら異常はなかった。

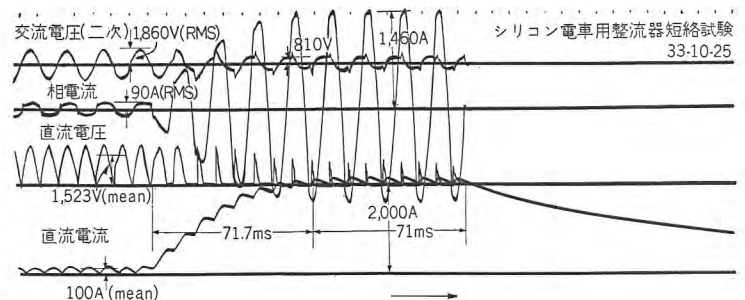


図 3.3 直流電動機せん絡時を模擬したときのオシログラム  
Fig. 3.3 Oscillogram of imitation DC motor flash over.

### 3.2 交直両用電車用シリコン整流器運転試験

この試験は上記シリコン整流器をイグナイトロン電車に積載して、イグナイトロン変圧器 (440/418 kVA, 単相, 外鉄形) と接続して出力直流電圧 1,500 V を出し、走行試験を行なったもので国鉄技術研究所が主体となって実測されたものである。この試験は図 3.4 に示した結線方式で行なわれ、その試験内容は下記の三つに要約される。そしてこの試験結果は近々鉄研より正式に発表されるため、本紙では省略することにする。

#### (1) 性能試験

この性能試験は次の三つにわかれており、なかでもっとも有意義の点はシリコン電車の運転の可否が一応確認されたことである。



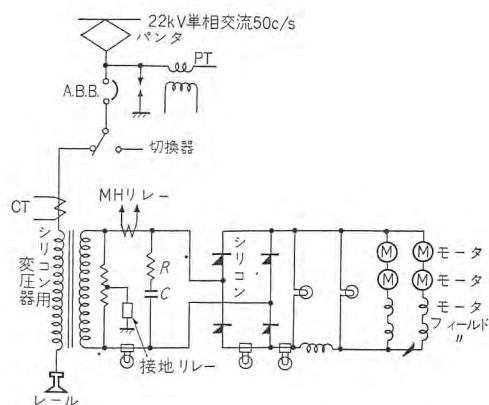


図 3.4 シリコン電車走行試験時の試験回路  
Fig. 3.4 Test circuit of silicon rectifier car during running test.

#### a. 走行試験

走行区間としては北仙台一陸前落合間が選定され、その区間には日本における代表的なこう配の箇所がある。力行時間は最大5分間程度であり、その時の電流は約310 A、整流体の温度上昇は46°Cであった。またけん引重量を35 tにしたときの試験も行なわれたが温度上昇は約20% までですべて満足すべき状態であった。

#### b. 温度上昇試験

この試験は工場試験と同様の方式で行なわれ、比電力消費量の測定と同様に力行距離および電動機電流限流値を一定に制限しそれを変化させて行ない、さらに冷却扇の冷却風量を減少させた状態でも行なった。力行時間は5分間程度であり、その間、シリコンダイオードの温度の上昇した分はその後に続く惰行時間(約5分間)内に複元してしまい、ダイオード自体への熱の蓄積は実測されなかった。図3.5は上記の一実施例である。

#### c. 比電力消費量の測定

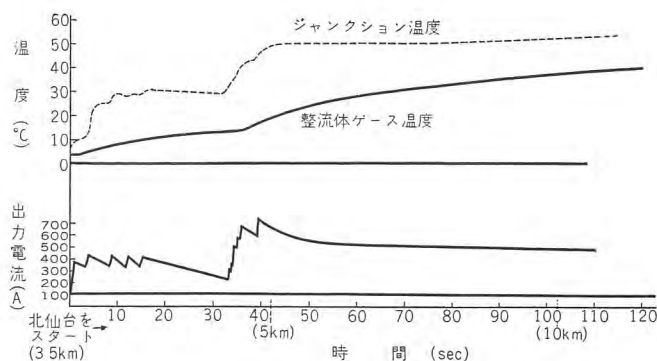


図 3.5 仙山線シリコン電車の力行電流によるシリコンジャンクション温度上昇曲線

Fig. 3.5 Silicon junction temperature rise curve on power run current of silicon rectifier car on Senzan line.

比電力消費量とは運転時の能率を表わすものであってこの消費量は列車の運行方法によって左右される性質のものである。今回は電動機電流限流値として210 A; 240 Aの2種類について陸前白決一愛子間の上りこう配線において力行距離を種々変化させて測定した。なお参考のためイグナイトロンおよびセレンの場合との比較をすると比電力量を一定にすればイグナイトロン、シリコン、セレンの順に走行所要時分が短くてすむ結果を示した。これは一応の参考である。詳細は鉄研よりの報告によりたい。

#### (2) 人工せん絡試験

今回の電動機の人工せん絡試験は次の2種類について実施した。

#### a. 静止試験

これは電車が静止の状況下においてすなわちブレーキをかけておいて第1ノッチを入れて電動機に通電し、数秒後に投入器によって4台の電動機を人工的に短絡させた。

#### b. 走行試験

電車の走行中に並列ノッチを最終段にあげて投入後すぐに投入器によって2台の電動機を短絡させる。この状態では人工的短絡をおこさなかった電動機が真のせん絡をおこす現象が誘起されたため試験は何回も実施しな

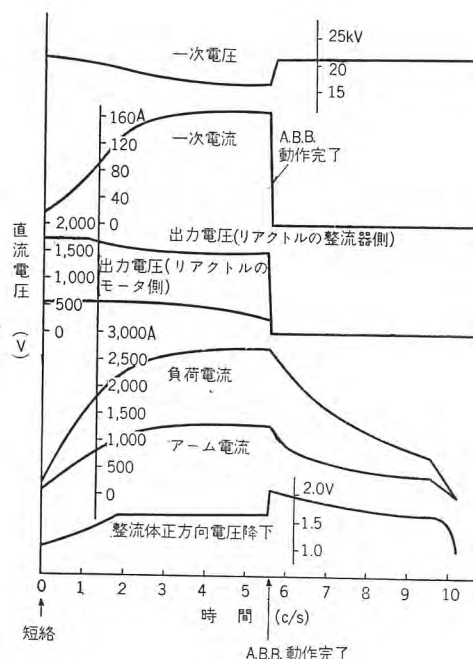


図 3.6 走行中の電動機電機子2台を人工的にせん絡させたときの各部電圧、電流値変化を示す

Fig. 3.6 Voltage and current changes of various parts when two armatures of motor while running are artificially flashed over.



かった。図 3.6 は人工せん絡を発生後 6 サイクル間の各部電圧、電流の変化状況を示す。その場合 A.B.B. は短絡発生後 5.5 サイクルで主回路開放動作を完了している。また直流側短絡電流は 2,700 A (最高値) であった。

### (3) サージ試験

この試験は二つの目的をもって実施されたものである。すなわち交流電車の主回路にどれほどのサージ電圧が浸入してくるか、また発生するか、そのサージに耐えうるシリコンダイオードの直列枚数は保護装置といかに協調させられるべきであるか、換言すれば今後の設計の基準と資料をうるための試験であった。

#### a. 地上変電所の交流シャ断器開閉時のサージ電圧

この課題は地上変電所の交流シャ断器が 3 サイクルブレーカであるため、とくに開閉時のサージ電圧の発生程度を把握しようとして実測したものである。開放時は負荷電流の有無にかかわらずサージはほとんど発生しないが閉路時にはその閉路位相によってサージが発生しその程度はかなり異なるが 90 度位相差でもっとも大きいサージ電圧が実測されている。その波高値は最大約 4,000 V であり、波長は 1 ms 程度である。クリドノグラフをも回路の各所に挿入して実測した。その結果は上記とほとんど同じ数値を示している。整流器用変圧器の交流側からの移行電圧を測定したがしゃへい板のない状態においては約巻線比によって支配されているとみてよい。

#### b. 車両用 A.B.B. 開閉時の異常電圧

接地事故を発生した状況下を仮設して A.B.B. を投入すると約 4 サイクル後 A.B.B. は開放される。この場合、回路に発生するサージ電圧は前項 a よりやや小さい数値が実測されている。この試験により A.B.B. 閉路時の投入位相角と充電電流の関係があわせ実測されている。

#### c. サージアナライザによるインパルス試験

1×40 μs の標準波形のサージ電圧によって主回路一次側より試験を行ない、各部の波形をアレスタの有無、交流側フィルタの有無の各種の場合に関して試験した。この結果から判断するとフィルタは非常に有効であることが確認された。

以上の試験結果によって電車用シリコン整流器は実用に供しうることが実証された。現用の設計に対して人工せん絡状況下の電圧、電流変化状態、ジャンクションの温度上昇、主回路に侵入するサージ電圧と発生するサージ電圧の移行状況ならびにその程度の概要が把握された。

以上の結果は設計限界の安全範囲内にあることは確かであるが上記の電動機短絡時のシリコン整流器の容量の算定がジャンクションの温度だけによって定めうるか否か、サージ電圧との関連性などはなお検討の余地がある。

### 3.3 1,000 kW 1,500 V 地上変電所用シリコン整流器工場試験

この工場試験はシリコンダイオード自体の静的特性試験にはじまり負荷試験、脈動負荷試験、加速負荷試験、直流側短絡試験、風量の測定とシリコンダイオード温度上昇試験などを実施し、現在の仕様の風冷式シリコン整流器の過負荷定格の確認をしようとしたものである。

#### (1) シリコンダイオード静的特性試験

この試験は静的特性の把握と経歴を明記するためにダイオード全数に対して一つ一つ実施し、記録をとったもので 2 現象ブラウン管を使い、正方向特性と逆方向特性とを実測した。この種特性の全数検査を行なうこと自体に対してはなお議論の余地があるが今回は経年変化の推移を把握するためにとくに測定したものである。

測定結果のパラツキの範囲は次のとおりである。

- a. 正方向電圧降下値……100% 負荷で……1.1~1.2 V
  - b. 最大逆方向電流値……定格 P.I.V. で……10 mA 以下
- また特定のものにつき温度試験を行なった。図 3.7 はその代表例を示す。

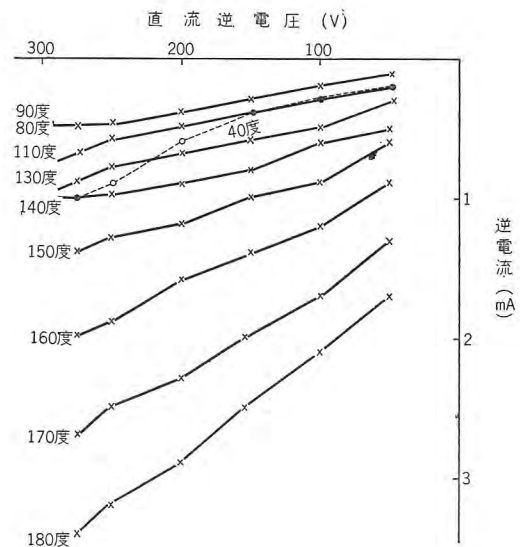


図 3.7 大井町変電所 1,000 kW 1,500 V 風冷式シリコン整流器に使用したシリコンの温度条件の変化による逆電圧—逆電流特性曲線

80 度、90 度、100 度のものはほとんど一致しており 40 度のものは逆に逆電流は大きい結果のものを示す。

Fig. 3.7 Reverse voltage—reverse current characteristic curves based on the change of temperature condition of silicon used for silicon rectifier.



## (2) 絶縁耐力試験

この絶縁耐力試験はシリコンダイオード自体の試験というよりは冷却片と大地間との絶縁耐力を問題としたもので、1,500 V の高圧部と大地間は 5,500 V の交流電圧

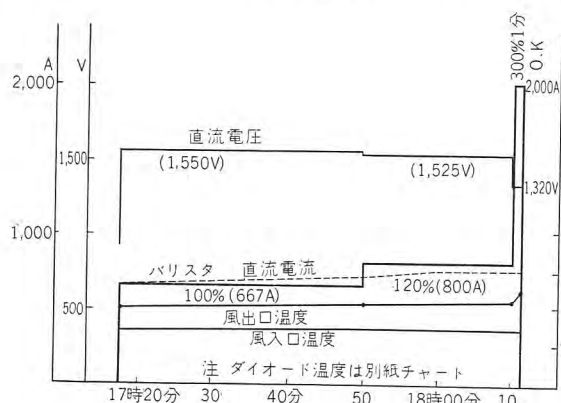
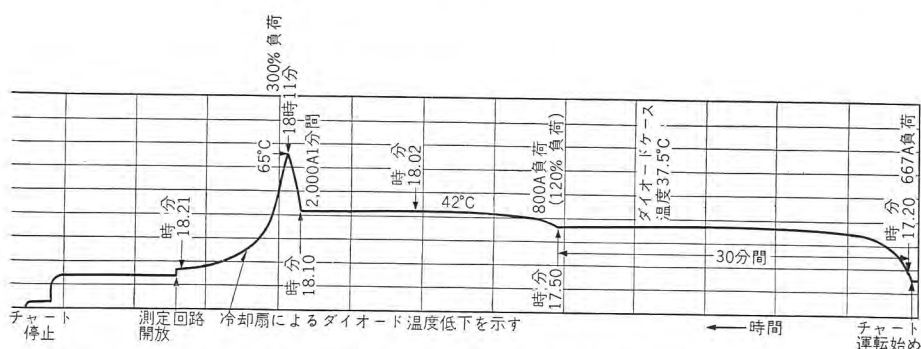


図 3.8 シリコン整流器 (1,000 kW 1,500 V) 負荷試験  
Fig. 3.8 Silicon rectifier load test.



- ① シリコンダイオードの熱時定数は約 2 分温度上昇、冷却の曲線よりして判定した。
- ② 300% (2,000 A) 1 分間の試験でダイオードは 65°C となった、120% (800 A) 負荷で 42°C その時の室温約 10.5°C。

図 3.9 1,000 kW 1,500 V シリコン整流器負荷試験時 (図 3.8 参照)  
シリコンダイオード温度上昇試験時の時間-温度上昇曲線

Fig. 3.9 Time-temperature rise curve at temperature rise test of silicon diode in silicon rectifier load test.

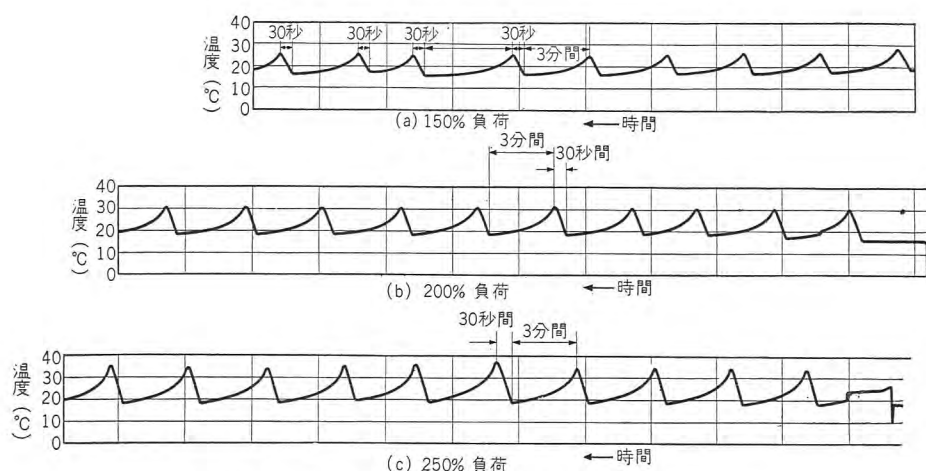


図 3.10 1,000 kW 1,500 V シリコン整流器脈動負荷試験時の  
シリコン整流体の温度上昇

Fig. 3.10 Temperature rise of silicon rectifier unit in pulsating load test of silicon rectifier.

(JEC-133 の水銀アーク変換装置の規格) によって試験した。a 項のダイオード静的特性試験が本項の試験を一部カバーしているものである。

## (3) 負荷試験

図 2.5 の主回路を使い、負荷としては水抵抗器を使って 1,000 kW 1,500 V の 100% 5 時間、120% 2 時間、300% 負荷 (2,000 A) 1 分間の試験を実施した。図 3.8 は立会試験時の負荷試験記録の一部である。この試験はダイオードの時定数が 2 分間程度であるため立会負荷試験の時間としては水銀整流器のときのように数時間も印加する必要はなく図 3.8 に示した程度すなわち 100% 30 分間、120% 過負荷 20 分間、でよいと考え、あえて発表し諸賢のご批判をうける次第である。

図 3.8 に示した負荷試験時に特定のシリコンダイオードの温度上昇の変化を時間を横軸として記録したものが

図 3.9 である。このチャートよりわかるように約 10 分間でダイオード自体の温度は飽和し、300% (2,000 A) 1 分間に 42°C より 65°C に達し、負荷断とともに約 8 分間以内で室温程度まで低下している。この資料よりして上記の負荷試験実施時間を決定した次第である。

## (4) 脈動負荷試験

無負荷電流 (0% 負荷) を基底として 1,500 V 印加状況でその上にせん頭過負荷を 30 秒間印加してそれを 3 分間間隔で 10 回以上試験したものが図 3.10 に示してある。この測定はダイオードのケースに温度計を取付けてダイオードの温度変化を実測したものであり、150%、200%、250% の各過負荷後に 3 分間、無負荷にもどせばダイオードの温度は 30 秒のせん頭過負荷印加以前の温度に複元してしまつて熱の蓄積はその間おこらない。この試験結果からみ

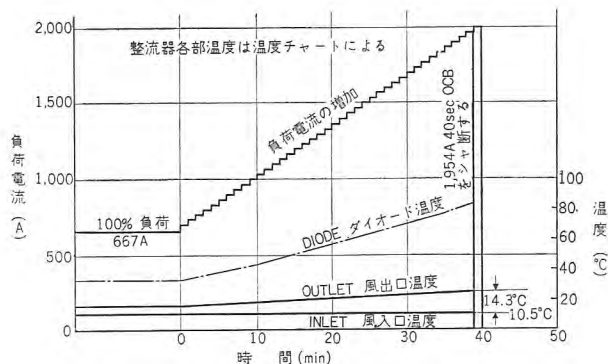


図 3.11 国鉄大井町 1,000 kW 1,500 V 加速負荷試験  
Fig. 3.11 Acceleration test 1,000 kW 1,500 V silicon rectifier.

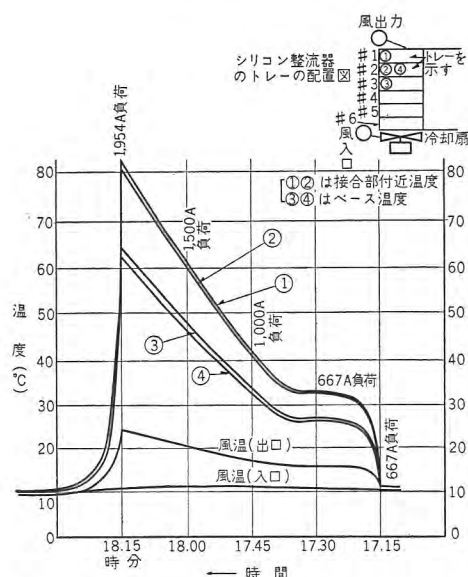


図 3.12 1,000 kW 1,500 V シリコン整流器加速負荷試験時のシリコンダイオード温度上昇測定  
Fig. 3.12 Measurement of temperatur rise of silicon diode in acceleration load test of silicon rectifier.

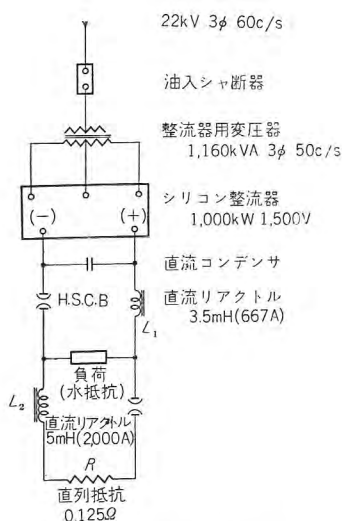


図 3.13 短絡試験回路図  
Fig. 3.13 Circuit diagram of short circuit test.

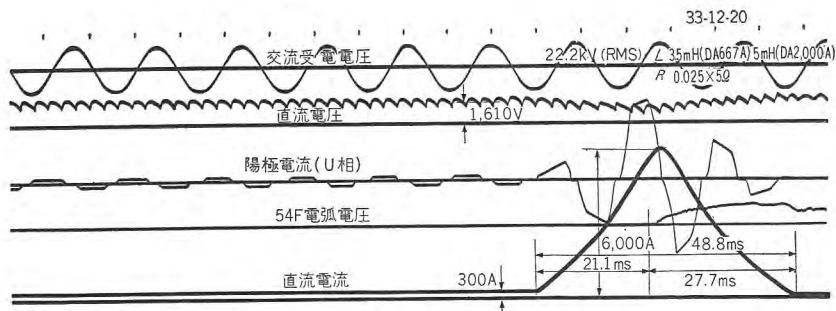


図 3.14 国鉄大井町 1,000 kW 1,500 V シリコン整流器  
直流シャ断試験 (立会試験)  
Fig. 3.14 D-C current interruption test of silicon rectifier.

てせん頭負荷の反覆耐量はかなり大きいことがいえる。  
ただ P-N 接合体の熱的物理特性が問題であるにすぎない。

#### (5) 加速負荷試験

定格負荷電流を基底負荷として 1 分間に 5% 程度ずつ負荷電流を図 3.11 に示したように増加してゆき 300% になるまで増加してその時のダイオードの P-N 接合体付近の温度変化をも測定した。図 3.12 は代表的トレー内のシリコンダイオードの温度変化—時間曲線を示したものであり、ダイオードの P-N 接合体付近では 300% 負荷で 80°C であることを表わしている。これは負荷のかけ方が前項とことになり徐々に電流をあげていっているから 300% 負荷で 80°C に達したものと考ええる。その時の冷却風入口、出口の温度差は 14°C にも達している。その時の冷却は約 10 分間くらいで複元している。

#### (6) 直流側短絡試験

図 3.13 に示すような主回路方式で 0.125 Ω の直列抵抗、8.5 mH の直流リアクトルを挿入した状態で短絡し、その時の故障電流、6,000 A (波高値) を 3 サイクル以内でシャ断している。これによって外線短絡事故に対しては 54N (正極性高速度シャ断器) が動作し外線との関係を開放する間の短絡、故障電流には耐えうることが立証された。図 3.14 は上記のオシログラムである。

#### (7) その他の試験

電圧変動率の測定はシリコン用変圧器二次側を分割したためとくに実測したが 60 c/s (工場電源) で約 7% であった。

その他トレー内の風速分布状態の測定を行ない、平均約 6 m/sec の風速であることが確認された。また速応ヒューズ 2 個直列時のシャ断試験の基礎研究を行なった。そのときの結果の一部を示したものが図 3.15 である。

直流側から侵入するサージ電圧の吸収用としてかなり



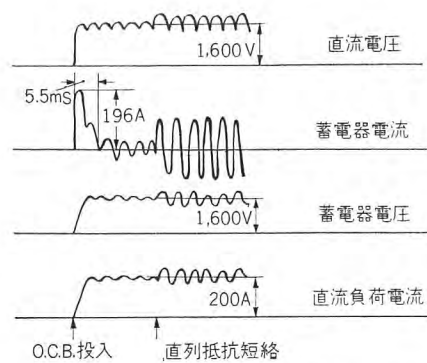
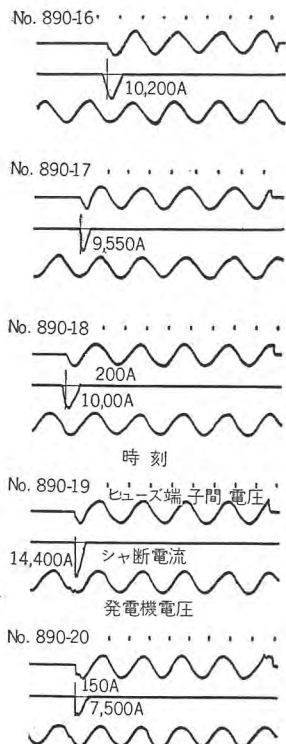


図 3.16 直流側コンデンサに電圧印加した時の各部の電圧電流波形

Fig. 3.16 Voltage current waveforms of various parts when voltage impressed on D-C side condenser.

図 3.15 速応ヒューズ2個直列時のシャ断試験の5回のオシログラム. 最大 14,400 A をシャ断している

Fig. 3.15 Oscillograms of interruption test when two quick response fuse connected in series.

のコンデンサを挿入したが図 2.5 の主回路にて O. C. B. を投入するとシリコン整流器の直流出力電圧によって上記コンデンサが充電される. その時の過渡電流を防止するため最初抵抗を挿入しておき, 後その抵抗を開放するものである. 図 3.16 はその時の直流電圧, コンデンサ電流, 電圧, ならびに直流負荷電流のオシログラムである. 設計上の目的を達していることが立証された.

### 3.4 国鉄大井町変電所における 1,000 kW 1,500 V 現地試験

上記の 1,000 kW 1,500 V 風冷式シリコン整流器を国鉄大井町変電所へ設置して鉄道技術研究所, 電力機械研究室の各位のご指導のもとに水抵抗負荷によって下記の第一次試験が完了した. その後引き続き電車負荷試験が行

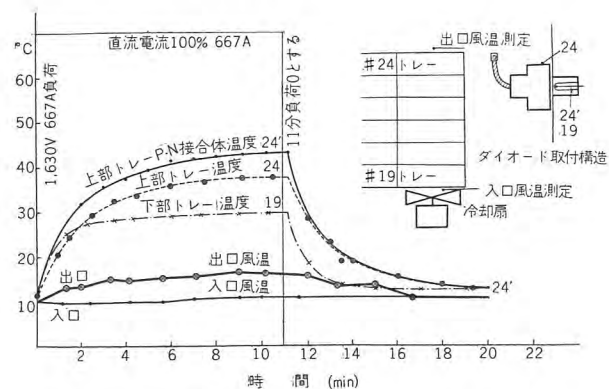


図 3.17 温度上昇測定 (FAN 入口風量制御板なし)

Fig. 3.17 Measurement of temperature rise.

なわれる予定である.

- (1) 温度上昇測定
- (2) 負荷特性試験
- (3) 加速負荷試験

#### (1) 温度上昇測定

定格負荷によるシリコンダイオード温度上昇は 11 分間で飽和すること, また最上段と最下段とのトレイ内の代表的シリコンダイオードの 11 分間の温度の差は 7°C ほどあることが確認された. そのときの風入口ー出口間の温度差は約 10°C であるため, 冷却風に対する温度上昇は最下段のトレイでは 19°C, 最上段では 21.5°C であり, 両者の間に 2.5°C の差異があった. 図 3.17 は上記の結果および負荷断後のダイオードの冷却に 9 分間程度必要なことを示している.

#### (2) 負荷特性試験

この試験資料は国鉄技研より借用したものであり, 図 3.18 にダイオード温度上昇と効率, 力率, 直流電圧ー電流特性曲線を示したものである. 図 3.19 は定格負荷電流通流時の各部の波形を示す.

#### (3) 加速負荷試験

図 3.20 は加速負荷試験の結果を曲線にしたものであり 275% 負荷まで実施した. なおダイオードの直, 並列個数を半部にして加速負荷試験を行なった結果を図 3.21 に示す.

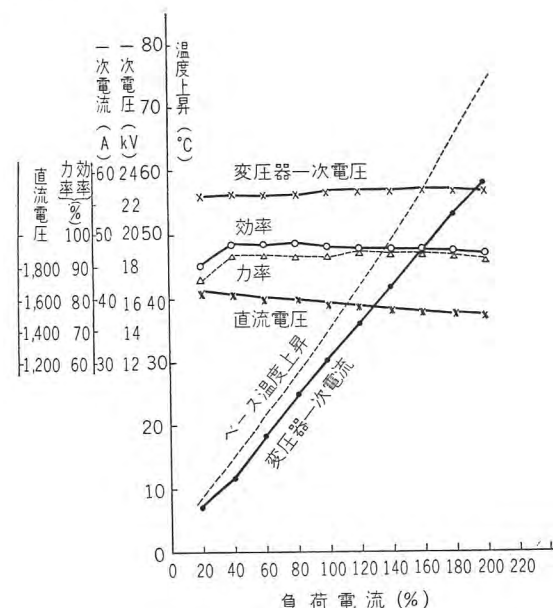
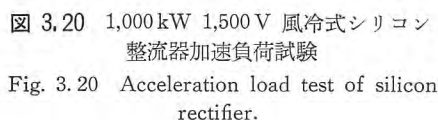
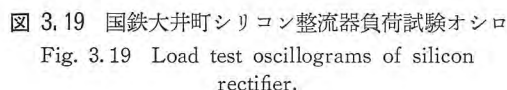
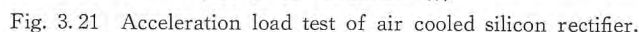


図 3.18 シリコン整流器負荷特性試験 (0~200% 負荷)

Fig. 3.18 Silicon rectifier load characteristic test. (0~200% load)

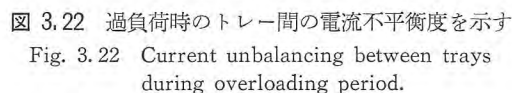


以上のべたところの試験は P. I. V. 400 V, 電流定格 110 A のシリコンダイオードを使用した結果であり, それも風冷式で上記のような構成での試験結果を示したにすぎない. この冷却ならびに定格出力の課題に対する研究として目下シリコンダイオードを油入浸漬した構造のものを開発しており, これに対するダイオード単独の油入冷却下の諸特性は実測されている. 油入冷却方式にすれば小形, 軽量にできうる特長がある. 風冷式のものは上記のとおり冷却風の不均一性, 騒音の問題などが付



またトレー内に数個のダイオードが直，並列に接続されて格納されているのであるがこのトレー群間の電流不平衡も負荷電流の増大とともに問題化されるが1,000kW 1,500 V 級の 300% 負荷では図 3.22 に示すようにさして問題にはならなかった。このトレー方式の構造にすると製作価額の面より制限を受けやすいため，在来の整流器と競争するためにはその構造に一段と工夫が必要である。

その方法としてはシリコンダイオードの P.I.V. 値が高いものを使用することと現在当社で採用しようとする 225 A/1 ダイオードの電流定格のダイオードを使って





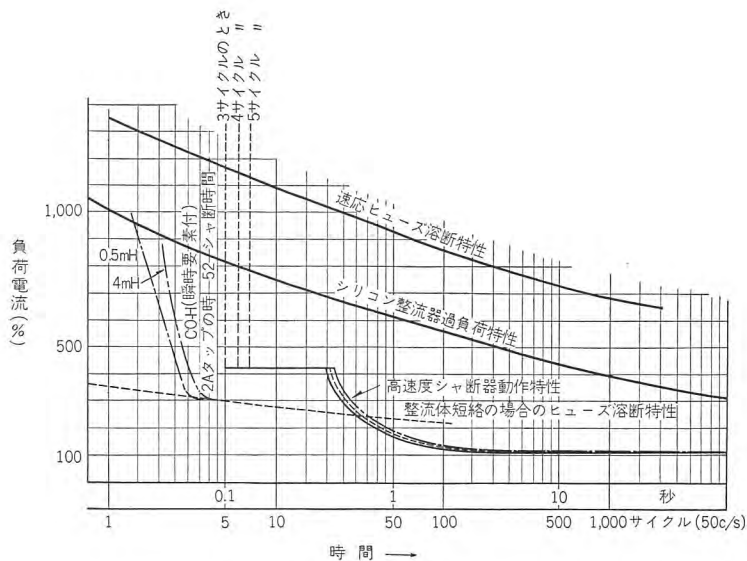


図 3.23 1,000kW 1,500V シリコン整流器過負荷保護特性  
Fig. 3.23 Overload protection characteristic of silicon rectifier.

取付個数を半減することが考えられる。かくすればわく組外形寸法は縮小され、価額も低廉化する結果となる。この方面の研究と実現はこの半導体整流器使用分野を開拓する最短距離と考えてよからう。

もっとも早く研究し、設計方針を確立しなくてはならない事項にサージ保護方式とシリコン整流器電流定格選定の課題とがある。シリコンダイオードの過負荷耐量は1サイクル6,000A(波高値)、逆電流200mAとみなされている。これ以上のときまたはP.I.V.の数倍のサージ電圧が逆方向に印加されればダイオードは永久破壊が惹起する結果となり、これらの要因がシリコン整流器定格の限界条件となっている。したがってその容量の決定には主回路に発生するサージ電圧、電流の上限を把握し、または上限値を超過しえないような回路構成にする必要が生ずる。よって総合的な協調が現在のところではシリコン整流器の定格に対する設計内容を表示したこと

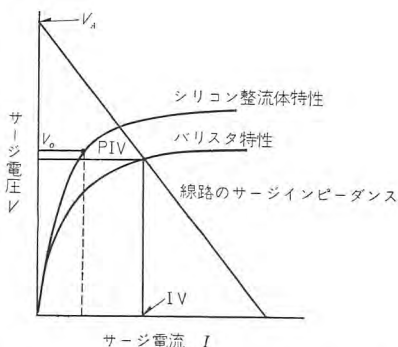


図 3.24 バリスタによる異常電圧保護  
Fig. 3.24 Abnormal voltage protection by means of varistor.

になる。

図 3.23 は 1,000kW 1,500V 風冷式シリコン整流器の過負荷保護を主眼とした速応ヒューズ、交流シャ断器の開放時間、シリコン整流器の過負荷特性の組合わせである。

かかる考想は在来の変流装置に比して不経済にみられることはやむないとしても保守面においてまた制御の分野において簡略化されていることは否定できない。

サージ電圧保護方式は図 2.12 に図示したとおりであるが交流側アレスタの制限電圧値( $E_A$ )が侵入するおそれのある最高上限電圧値である。この場合のサージ吸収用非直線抵抗体の特性は図 3.24 のようである。

ダイオードの破壊電圧( $E_B$ )は次の条件を満足する必要がある。

$$E_B > E_V \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

$$E_A - E_V = I_V \cdot Z \quad \dots\dots\dots (3.2)$$

$$E_V = K \cdot I_V^\alpha \quad \dots\dots\dots (3.3)$$

$E_V$ : バリスタ電圧  $I_V$ : バリスタ電流  $\alpha$ : 非直線係数  
上記の諸式を満足させる非直線抵抗体を使用する必要がある。そして上記の  $E_B$  はダイオード1個の破壊電圧  $e_B$  の直列枚数倍に等しくない。ダイオード  $n$  枚直列に接続した回路の等価回路は図 3.25 とみなしうる。この回路に対する侵入サージ電圧の分布は印加端に近いダイオードほど大きい。最初の1枚には次式の印加電圧( $\Delta E$ )がかかる。

$$\Delta E = E \cdot C_{in} / C_t \quad \dots\dots\dots (3.4)$$

$$\doteq E \sqrt{\frac{C_s}{C_t}} \coth n \sqrt{\frac{C_s}{C_t}} \quad \dots\dots\dots (3.5)$$

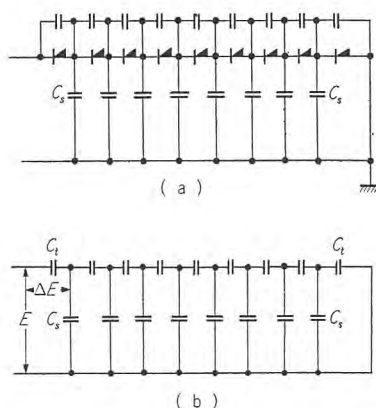


図 3.25 シリコン整流器サージ印加時の等価回路  
Fig. 3.25 Equivalent circuit when surge is impressed on silicon rectifier.

式 (3.4) より  $C_{in}$  を求めて近似解をとれば式 (3.5) となる。

この場合  $C_i$  は非常に小さいので  $\Delta E$  はかなり大きくなる。

よってダイオードに並列に別に蓄電器を挿入する必要性が生ずるのである。 $C_{in}$  は入力インピーダンスである。

つぎに直流側より侵入するサージ吸収用として地上変電所用シリコン整流器にかぎりかなりの容量の蓄電器を図 2.5, 2.12 のように整流器出力端子間に挿入した。このことは 6 相整流電圧の高調波電流 ( $I_n$ ) が上記蓄電器に流れることになる。

$$I_n = 2\pi f n C \cdot E_n \dots\dots\dots (3.6)$$

$C = 200\mu F$  とすれば  $I_n = 62 A$  となり、シリコン整流器が軽負荷の場合にシリコンダイオードをながれる電流の波形がいちじるしくひずむことになる。しかしこの波形のひずみは危険視するほどのことではない。

またシリコン整流器を外線に接続する電圧印加の際上記蓄電器へ充電電流がながれるゆえそれを防止する直列抵抗をもうけ、充電後は開放する方式を採用している。

車両用風冷式シリコン整流器に対してはその外形寸法重量、負荷率 ( $D$ ) が問題である。今回の試験はイグナイトロン用変圧器をそのまま流用したためシリコンダイオードの特性による設計考慮事項が一部かけている。たとえば変圧器の一次、二次巻線間にしゃへい板を設けることなどである。かかる方式が採用されていないため直列シリコンダイオードの耐圧電圧値を 10,000 V とした。この点はさらに検討する必要があることが試験結果より明らかになった。

またダイオードの並列枚数決定については保護方式と回路の構成要素が設計の対象となるが最大の制限事項は電動機のせん絡事故電流である。今回の事例では 2 台の電動機が直列になっている。かかる場合に 2 台とも同時にせん絡をおこす確率が実用上どれほどあるかが問題であり、その回数いかによっては並列枚数を増す必要がある。

今回の試験結果を総合的に検討すると車両用シリコン整流器においては直列枚数はもっと軽減できうが並列枚数は短絡電流値よりみてこれ以上減少は無理と思う。

以上の二つのシリコン整流器はともに平均電流 110 A/1 ダイオード、P.I.V. 400 V のシリコンダイオードを使用したものであるが現在 225 A/1 ダイオードの

ものが市販されている現状であり、これを使用すれば並列個数は現在の 1/2 となる。価額も 2 カ年間にかなり低減されているからその将来性は 1 ダイオードの電流量と P.I.V. との向上に依存することになる。価額の点から論ずればダイオードの多量生産方式の確立の必要性が痛感される状況である。

#### 4. 将来に対する課題

以上考察の項でシリコン整流器の構成、設計内容、その他について記述したが問題はその応用と使用分野がいかなる条件で律せられるかということにつきると思う。半導体整流器が理想的整流器の要素を在来の整流器よりはるかに多く内蔵していることは万人の認めるところであるがさらに改良された III—V 化合物半導体整流器(仮称)が台頭してきており、その将来性は種々議論の余地があると思う。現在の実状でアメリカとドイツで発表さ

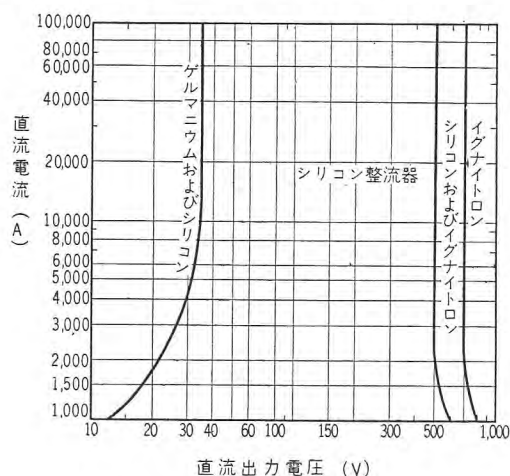


図 4.1 ゲルマニウム、シリコンおよびイグナイトロン整流器の使用される分野領域を示す (W 社資料より)

Fig. 4.1 Respective field area to be used for germanium, silicon and ignitron rectifier.

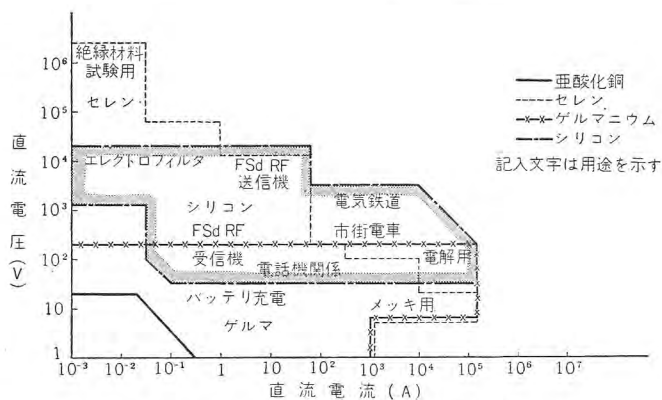


図 4.2 4 種の半導体整流器の使用分野

Fig. 4.2 Operation area of 4 kinds of semiconductor rectifier.



れた論文の一端を参考にすれば図 4.1, 4.2 がシリコン、ゲルマニウム整流器の使用分野を示している。これも国状によりまたその他の諸条件によって左右されるゆえにこれをもって日本における将来をうんぬんするのは早計であり、厳につつしむべきであるがその概要は推知できよう。

また地上変電所用シリコン整流器としては旧施設の更新、増強の観点よりして既設の他種整流装置との並列運転が勘案されなくてはならない。この点はアメリカで 1 カ年前に回転変流機 (300 V 5,000 A) 2 台、接触変流器 (300 V 5,000 A) 1 台と水冷式シリコン整流器 (300 V 10,000 A) 1 台とが並列運転し 1 カ年間の満足すべき運転実績をえている。以上は化学工業用であるためその負荷の特性は相違しているが保護方式、連動方式の点で参考となる諸点が少なくない。こうした実例からみて電鉄用として他種整流器との並列運転の将来性は有望といえよう。

当社における短期間ではあるが上記車両用と地上用シリコン整流器の運転実績から判断するに車両用直流電源としては風冷式シリコン整流器は外形寸法、冷却条件、振動上の問題よりしてたしかに有利であり、適しているといえる。その応用は確信をもって期待しうる。これに反して地上変電所用シリコン整流器は車両運行のひん度車両編成などの条件によって電鉄用特有のせん頭負荷が反覆するため、シリコン整流器の過負荷耐量が問題となり、その容量決定と経済的問題がからみ、一律にきめにくい性格をもっている。端的に言えば風冷式シリコン整流器の特性をいかなる程度まで勘案してもらえるか、またシリコン整流器の無人単位変電所の性格をいかに考えるかに依存して風冷式シリコン整流器の成否が決まるといえよう。

## 5. む す び

電鉄用に使用される風冷式シリコン整流器は上記のと

おり、車両用も地上変電所用もともに好成績裏に研究試験ならびに実負荷試験を終了しえたことはご同慶の限りである。しかし純技術的にみればなお両方式とも若干の未解決課題をのこしており、ことに地上変電所用の風冷式シリコン整流器は直流側からのサージ電圧防止の問題と他種整流器との満足なる並列運転という未解答事項を介在させている。しかしこれらの運転、保護方式の研究、改良とシリコンダイオード自体の特性の改善とがいまって以上の懸案を近き将来、すべて解明してくれるであろうことは明了である。またその日の 1 日も早くなるよう努力する決意である。

今回製作した車両用 450 kW 級 1,500 V および地上変電所用 1,000 kW 1,500 V 風冷式シリコン整流器はともに新しい形式の整流器であり、これが電鉄用としてその責務をはたしうるか否かを検査する点で特筆すべき意味をもっている。こうした有意義なる試みが一製作会社の仕事でなく、実負荷運転に持込まれ、国鉄として性能試験を実施されたことは国鉄関係各位の理解あるご支援のたまものであり、当社関係者一同にかわり本稿をかりて厚く御礼申し上げる次第である。

なお今回の風冷式シリコン整流器の基礎研究から製作、工場試験、現地試験と幾多の困難と労力とが研究所、神戸製作所、伊丹製作所の方々によって払われ、各方面より多大のご協力とご援助とによって今日の完成をみるにいたったことに対し、関係者一同とともに厚くお礼申し上げますの次第である。

## 参 考 文 献

- (1) 加藤：電力用シリコン整流器「三菱電機」32, (1958) 5, p. 64
- (2) 加藤・横島：交直両用電車用シリコン整流器 昭和 34 年度電気 4 学会連合大会
- (3) 鉄道技術研究所 半導体整流器付交流電車性能試験報告
- (4) 加藤：シリコンカーバイトバリスタの特性と応用 OHM 昭和 32 年 4 月号
- (5) 加藤：大容量半導体整流器変電所の設定条件 OHM (1959) 4, p. 523~529

# 電力用シリコン整流体

研 究 所 清 水 潤 治\*・中 田 仗 祐\*

## Silicon Rectifier Cells for Power Use

Research Laboratory Junji SHIMIZU・Jōsuke NAKATA

Silicon rectifier cells retain rectifying ability until reaching high temperature with high efficiency in spite of their small size. Types SR-100 and SR-200 silicon rectifiers developed by Mitsubishi have allowable currents of 150A and 250A respectively, being of the maximum capacity in this country with their maximum peak reverse voltage of 500 V. However, there are numerous factors which affect various characteristics such as: characteristic of single crystal, leakage current because of channel and generation and recombination of electron and positive hole, by trap. These points must be straightend out for the improvement of characteristics of silicon rectifiers.

### 1. ま え が き

シリコン整流体はゲルマニウム整流体に比べて順方向電圧降下は約 0.5 V 大であるが、高温に至るまで整流性を失わないこと、およびせん頭逆方向電圧の高いものが得られることが特長である。とくにシリコンはエネルギーギャップが大きいために、降伏電圧の理論的な限界値がきわめて高い。したがって、現状のせん頭逆方向電圧 500 V はゲルマニウムでも可能な値であるが、近い将来、材料の純度の向上と、P-N 接合製作に関する技術の改善に伴って、せん頭逆方向電圧は上昇して、2,000 V 程度のものの実現も不可能ではないと思われる。この意味でシリコン整流体の応用範囲は、今後ますます高い電圧の領域に広がってゆくであろう。

シリコン P-N 接合は約 200°C に至るまで整流性を保持する。したがって、周囲温度の高い場所で、風冷によっても定格を下げることなく十分に安全に使用できる。冷却が簡単ですむことは、シリコン整流体のおもな用途と考えられている大容量の直流電源用としてばかりでなく、小容量の各種目的の電源用としても適しており、とくに高い電圧範囲では急速にセレンに代ってゆくものと思われる。

当社ではゲルマニウム整流体とともに、鋭意シリコン整流体の開発に努めており、すでに 150 A の電流量の SR-100 形の生産にはいっており、つづいて、このほどわが国最初の 250 A の大容量の SR-200 形の試作を

完了した。そして国産シリコン整流体を用いた最初の交流電車の試験が行なわれようとしているばかりでなく、化学工業用の大容量の電源用としても、つぎつぎに使用されようとしている。

SR-100 形と SR-200 形整流体の最大せん頭逆方向電圧は 500 V までのものが生産されているが、現在なお進歩の途上にあり、今後シリコンの真価を発揮するような特性をうるために努力を払ってゆくつもりである。

### 2. 構 造

当社で生産中の電力用シリコン整流体は SR-100 形と SR-200 形で、その外観はそれぞれ図 2.1 と図 2.2 に示



図 2.1 SR-100形  
シリコン整流体

Fig. 2.1 Type SR-100  
silicon rectifier cell.



図 2.2 SR-200形  
シリコン整流体

Fig. 2.2 Type SR-200  
silicon rectifier cell.



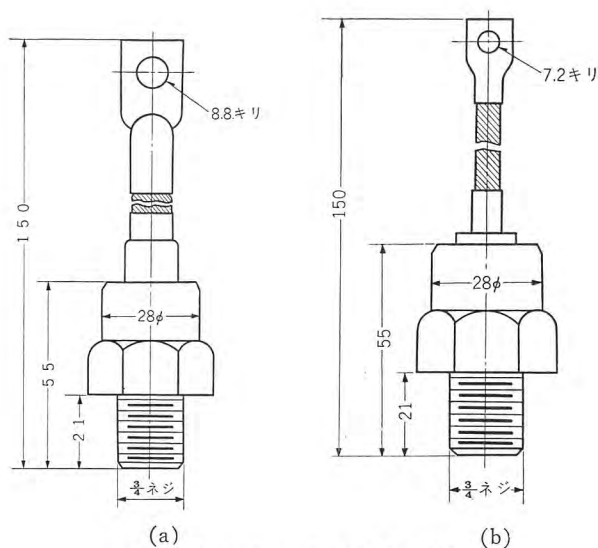


図 2.3 シリコン整流体外形寸法  
(a) SR-200 形 (b) SR-100 形

Fig. 2.3 High current silicon rectifier cell outline dimensions. (a) Type SR-200 (b) Type SR-100

すようなものである。許容電流は SR-100 形で最高 150A SR-200 形で 250 A であって、外形寸法は図 2.3 に示すものである。重さは SR-100 形で 220 g, SR-200 形で 250 g であって、電流容量に対してきわめて小形軽量にできている。シリコン整流体は約 200°C の高温にまで整流性を保つから、冷却は風冷でよく、冷却系統も比較的簡単でよい。したがって外装に冷却用フィンを設けておく必要がなく、使用条件に応じて適当な冷却板に取付けられるように、ケース自体にネジがつけられている。

整流体の心臓部にあたる P-N 接合は、N 形シリコンに P 形不純物であるアルミニウムを合金した、いわゆる合金接合である。P-N 接合は加熱時にアルミニウム中に溶けこんだシリコンが、冷却時に P 形になって、もとのシリコン結晶の上に再結晶して沈着することによって形成されるものである。その機構はゲルマニウムとインジウムの合金接合のときとまったくどうようであるが、実際の製作にあたってはゲルマニウムに見られない困難がある。すなわちアルミニウムの膨張係数は  $2.5 \times 10^{-5} \text{C}^{-1}$  で、シリコンの  $7 \times 10^{-6} \text{C}^{-1}$  より大きく、しかもインジウムのように柔らかくないために、冷却過程でシリコンがひずみを受けて破損する。これをふせぐために、アルミニウムをモリブデン板のような膨張係数がシリコンに近い金属板でおさえる。ベースハンダに対してもどのようにモリブデン基板を用いるから、P-N 接合の構造は図 2.4 のように、あたかもシリコンが上下 2 枚のモリブデン板によってサンドイッチにされたようなものになっている。P-N 接合の有効部分の大きさは SR

電力用シリコン整流体・清水・中田

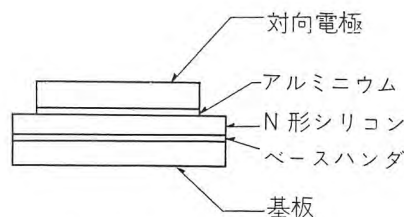


図 2.4 シリコン P-N 接合の構造  
Fig. 2.4 Silicon P-N junction component.

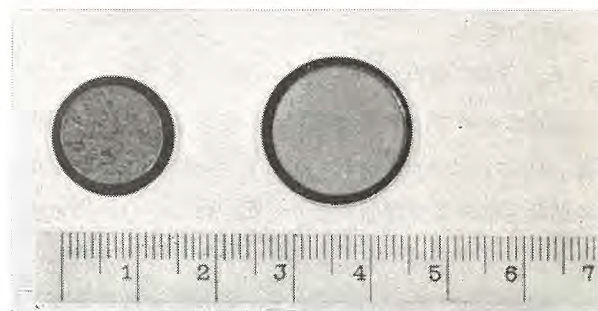


図 2.5 シリコン P-N 接合素子  
Fig. 2.5 Silicon P-N rectifier element.

-100 形で 13φ, SR-200 形で 17φ であって、図 2.5 に示すような外観をもっている。

P-N 接合は湿気によって急速に逆方向特性が低下し劣化が促進されるから、密閉容器に入れて用いる。すなわち図 2.6 に示すように接合は銅ケースの底にろう付けされており、ケース自体が一方の電極になっている。ケース上部から今一方の電極リード線が出されていて、ガラスと純鉄によるコンプレッション、シールによって絶縁性と気密性が保持されている。ケースに加わる機械的ひずみが直接 P-N 接合にかからないように、図示のように、内部で可とう性リード線によって接合と上ぶたとが連結されている。

SR-200 形は SR-100 形とケースの外形寸法はまったく同じであるが、電流の増加分に対応するためにリード線が太くなっている。

### 3. 電流電圧特性

P-N 接合に電圧  $V$  が印加されたときの電流  $I$  は、電流を P-N 接合を通過する電子と正孔の拡散によるものとして、Shockley によって理論的に次式のように導か

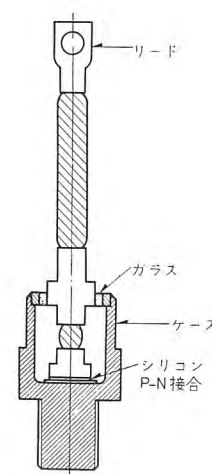


図 2.6 シリコン整流体の構造  
Fig. 2.6 Construction of silicon power rectifier cell.



れている。(1)

$$I = I_{ps} [\exp(qV/kT) - 1] \dots\dots\dots (3.1)$$

ここに  $q$  は電子の電荷,  $k$  はボルツマン定数,  $T$  は絶対温度であり,  $I_{ps}$  はいわゆる飽和電流に相当するもので, 合金接合では基体結晶の特性と温度によってきまる値である. N 形シリコンにアルミニウムのような P 形不純物を合金した P-N 接合に対しては,  $I_{ps}$  は次式で表わされる.

$$I_{ps} = 2.33 \times 10^{31} q \frac{T^3}{n} \cdot \frac{D_p}{\sqrt{D_p \tau_p}} \exp(-E_g/kT) \dots\dots (3.2)$$

上式において,  $n$  は基体の N 形シリコンの不純物濃度,  $D_p, \tau_p$  はそれぞれ N 形シリコンに注入された正孔の拡散定数および寿命であり,  $E_g$  はシリコンのエネルギーギャップである.  $D_p$  はアインシュタインの法則によって移動度  $\mu_p$  に比例するから, 飽和電流はシリコン結晶の不純物濃度  $n$ , 移動度  $\mu_p$  および寿命  $\tau_p$  の関数になる.  $E_g$  はシリコンでは 1.12 eV であって, ゲルマニウムの 0.75 eV より大であるから,  $I_{ps}$  はゲルマニウムより小さく, 1/1,000 程度になる.

実際の P-N 接合の電流と電圧の関係は, 式 (3.1), (3.2) で考えられた条件以外の影響によって上記の理論式どおりにはゆかないのが普通である. つぎに SR-100 形と SR-200 形とについて, 実際の逆方向特性と順方向特性とについて検討を加えてみよう.

### 3.1 逆方向特性

逆方向の電流電圧特性は, 拡散による電流だけを考えたときは式 (3.1) から,  $V \ll 0$  の条件で

$$I = -I_{ps} \dots\dots\dots (3.3)$$

となり, 電圧に無関係な一定電流, いわゆる飽和電流が流れる. この電流は, 熱エネルギーによって価電子が結合から離れて伝導帯に励起されたために生じた伝導電子と, 同数の正孔によるもので, このようにして生じた電子と正孔の濃度は温度によってきまり, 電圧に関係しないので, 飽和電流となる. したがって飽和電流の大きさは, 式 (3.2) からわかるようにエネルギーギャップ  $E_g$  の大きいほど小さくなる. シリコンの  $E_g$  は 1.12 eV であるから, 式 (3.2) から計算した  $I_{ps}$  の理論値は常温で  $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  程度であって, ゲルマニウムの  $1 \text{mA}/\text{cm}^2$  に対する 1/1,000 の大きさになる.

SR-100 形の単位面積あたりの逆方向電流電圧特性の一例は図 3.1 のようになる. 式 (3.1) によれば電圧によらない一定の逆方向電流が流れるはずであるが, 実際は

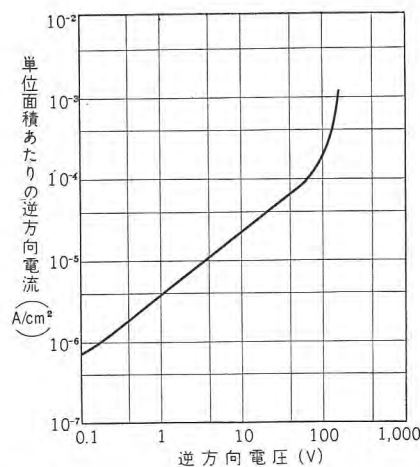


図 3.1 SR-100 形整流体の逆方向特性 (25°C)  
Fig. 3.1 Reverse characteristic of type SR-100 silicon rectifier cell per one square centimeter active area. (at 25°C)

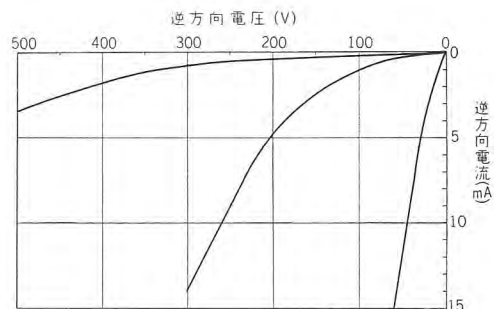


図 3.2 SR-100形 整流体の逆方向電流電圧特性  
Fig. 3.2 Reverse characteristics of type SR-100 silicon rectifier cells.

電圧の増加とともに電流は増加してゆく. 電圧がある値に達すると, 電流が急増して無限大になる. この電圧がいわゆる降伏電圧(Breakdown Voltage)であって, 外部抵抗によって電流が制限されない限り, 接合を破壊に至らしめる. 図 3.1 で電圧が小であるときの電流は  $10^{-6} \text{A}/\text{cm}^2$  で, ほぼ理論値に等しい. 電圧とともに増加する電流成分, いわゆる過剰電流(Excess Current)はシリコン P-N 接合ではとくに顕著であって, 同じ結晶からつくられたものでも, 製作過程によって種々異なった値をとる. 図 3.2 は SR-100 形整流体の逆方向電流電圧特性の 2, 3 の例であるが, これらの特性の相違は過剰電流成分によるものである.

過剰電流の原因として現在のところ, シリコン表面の漏洩電流と, シリコン結晶の禁制帯中に電子に対する捕獲中心があって, これを媒介にして発生した電子と正孔による電流とが考えられている.

まず表面の漏洩電流についてのべると, P-N 接合の周辺部には P-N 境界部分が露出しているから, 模型的に表わすと図 3.3 (a) のようになる. しかしシリコンの表



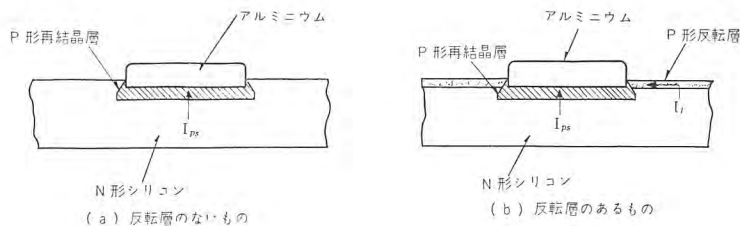


図 3.3 P-N 合金接合の模型図

Fig. 3.3 Diagram of the model for P-N boundary with and without inversion layer.

面層は周囲の気体の影響によって内部とちがった性質をもっているのが普通である。たとえば P 形結晶の表面が水蒸気によって N 形の反転層が形成される。<sup>(2)</sup> どのように N 形表面に P 形反転層が形成されることもある。そのようなときには図 3.3 (b) のように、いわゆるチャンネルが形成されて、この部分を通路とする電流  $I_l$  が流れる。<sup>(3)(4)</sup> 電流  $I_l$  はチャンネルの中と厚みおよび伝導度により異なるが、これらのチャンネルの寸法は P-N 接合にかかる電圧によって変化するために、 $I_l$  は電圧に依存する値になる。このチャンネルによる漏れ電流は、最初ゲルマニウムについて見出されたが、シリコンについてもまったくどのように逆方向特性に影響を及ぼすことが報告されている。<sup>(5)</sup> このような層はきわめて微量の水分やその他のガスによって形成され、その程度はこれらのガスの濃度ばかりでなく結晶がそれまでに受けた処理の履歴によっても変り、とくにシリコンは飽和電流値が小さいからその影響はいちじるしい。

捕獲中心による電流は逆方向ばかりでなく順方向電流にも影響を及ぼす。<sup>(6)</sup> この現象は、半導体のエネルギーギャップが大きく、寿命が短く、比抵抗が小さいものにとくに顕著であり、したがってシリコンにおいて影響が大きく現われる。これは捕獲中心を媒介にして電子と正孔の発生と再結合とが行なわれるためであって、その機構としてつぎの四つが考えられる。図 3.4 において、捕獲中心が正孔で占められたときには、伝導帯の電子がこれに落ちこんで再結合したり (a)、価電子帯に正孔を放出する (d)。また捕獲中心に電子がつかまっておれば、価

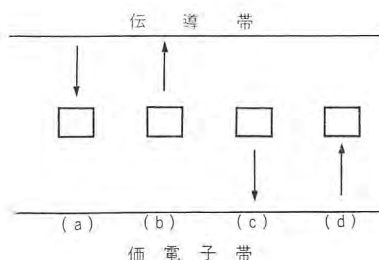


図 3.4 捕獲中心によるキャリアの発生と再結合

Fig. 3.4 The basic process of carrier generation and recombination.

電子帯の正孔と再結合したり (c)、伝導帯に電子を上げる (b)。そして発生した電子と正孔は逆方向の過剰電流となり、電子と正孔との再結合は順方向電流に寄与する。

逆方向に電圧がかかっているときは、捕獲中心による電子と正孔の発生は空間電荷領域で起っている。空間電荷領域の中は逆方向電圧とともに増加するから、発生する数も逆方向電圧とともに増大する。したがって捕獲中心による電流は電圧とともに増加する。

シリコン整流体では上記のチャンネルによる電流と、捕獲中心による電流とが、熱的な飽和電流に加わるために、実際の逆方向特性は図 3.2 のようなものになる。

電力用整流体でもっとも重要な定格はせん頭逆方向電圧である。逆方向電圧が大になって急激に電流が増加する電圧、いわゆる降伏電圧の高いことが整流体の製作の一つの目標になる。

さて P-N 接合の降伏としてツエナー降伏 (Zener Breakdown) と、電子なだれ降伏 (Avalanche Breakdown) の二つが考えられる。前者は電界によって、後者は電界によって加速された電子の衝突によるエネルギーによって価電子が伝導帯に上ることによって起る。P-N 接合ではツエナー降伏も観察されているが、<sup>(7)</sup> 整流体のように高い比抵抗の結晶からつくられた接合では、電子なだれによる降伏が支配的とされている。<sup>(8)</sup> したがって降伏は電界の強さが増すと起り、電界の強さは空間電荷領域内の電荷の数が多いほど強いから、結晶の不純物濃度の多いほど低い電圧で降伏を起す。N 形シリコンを用いた合金接合では、基体シリコンの比抵抗  $\rho(\Omega \text{ cm})$  と降伏電圧  $V_o(\text{V})$  の間には、つぎの関係が実験的に見出されている。

$$V_o = 86 \cdot \rho^{0.64} \dots \dots \dots (3.4)$$

式 (3.4) によって示されるような降伏電圧と比抵抗との関係は、接合の面積がきわめて小さい間は成立するが、電力用整流体のような広面積のものでは、あまりよく成立しない。たとえば式 (3.3) から比抵抗が  $50 \Omega \text{ cm}$  あれば  $1,000 \text{ V}$  をこえる降伏電圧がえられるはずである。 $50 \sim 100 \Omega \text{ cm}$  の結晶を用いた SR-100 形整流体ではたとえば図 3.2 に示すように最高  $600 \text{ V}$  以下各種の降伏電圧のものが得られており、理論値の半分以下である。このおもな原因として、結晶全面にわたって均一に P-N 接合が形成されないこと、空間電荷領域において捕獲中心による電子と正孔の発生があること、あるいは表面に吸



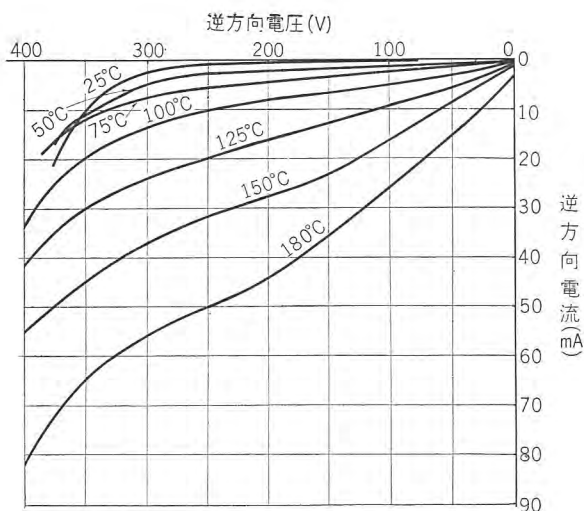


図 3.5 SR-100 形整流体の逆方向電流電圧の温度特性

Fig. 3.5 Reverse characteristics of type SR-100 silicon rectifier cell at various ambient temperatures.

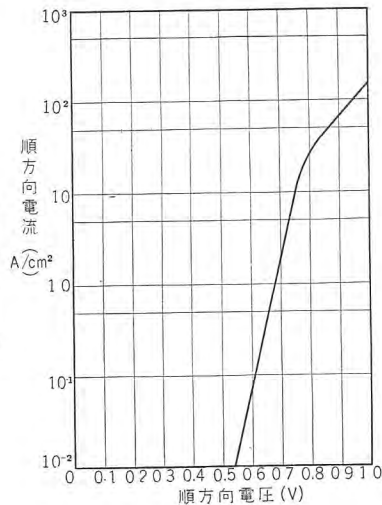


図 3.6 SR-100 形整流体の順方向特性 (24°C)

Fig. 3.6 Forward characteristic of type SR-100 silicon rectifier cell at 24°C ambient temperature.

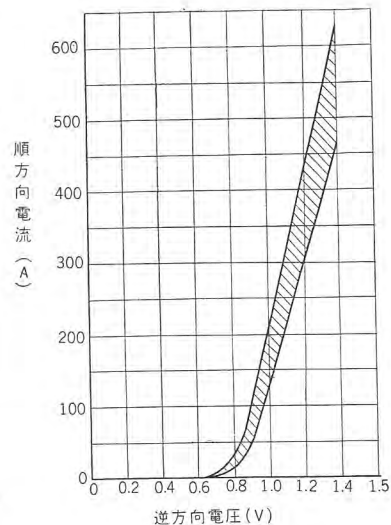


図 3.7 SR-100 形整流体の順方向電流電圧特性

Fig. 3.7 Forward characteristics of type SR-100 cells at room temperature.

着したガスによる電荷によって局部的に強い電界を生じて、いわゆる表面降伏 (Surface Breakdown) を起す<sup>(9)</sup> ことなどが考えられる。捕獲中心の形成は結晶の転位、不純物原子などが原因と考えられている。表面降伏は表面処理、周囲気体の種類によって影響を受ける。たとえば N 形半導体を基体にした P-N 接合では、水分は降伏電圧を下げ、酸素は高める作用をする。<sup>(10)</sup> したがって整流体のせん頭逆方向電圧は、結晶の比抵抗、転位密度、合金用素材の純度、合金処理などの P-N 接合の製作条件、あるいはケーシングの条件など、製作工程全般によって影響を受ける。

SR-100 形整流体の逆方向特性の温度による変化の一例は図 3.5 に示す。温度の上昇とともに、電流値は増加するが、降伏電圧は 25~100°C の範囲では明らかに温度とともに上昇している。これは小形シリコン P-N 接合で Pearson と Sawyer によって見出された実験事実<sup>(11)</sup> と一致するもので、電子なだれ降伏電圧が正の温度係数を有することによる。100°C 以上の温度では電圧依

存の過剰電流成分が急増するために、降伏電圧は明確でない。このように温度が上昇すれば降伏電圧がむしろ高くなる傾向は、シリコン整流体の利点である。

### 3.2 順方向特性

順方向電流は低電圧の領域ではおもに拡散によるから、Shockley の理論式 (3.1) が成立して、 $\exp qV/kT$  の電圧依存性を示す。しかし電圧が大になり、注入された少数キャリアが基体シリコンのキャリア濃度と同程度、あるいはそれ以上になると、電流は  $\exp(qV/2kT)$  に依存し、式(3.1)で計算される電流より少なくなる。図 3.6 は SR-100 形整流体の単位面積あたりの順方向電流電圧特性の一例であって、低電圧では曲線の傾斜は  $q/kT$  になっているが、電圧が高くなると傾斜がゆるくなっている。

図 3.7 は SR-100 形整流体の順方向特性を表わしたもので、斜線はバラツキの範囲を示すものである。このバラツキができるだけ少ない、均一な特性をうることが望ましい。

いま順方向特性におけるこれらのバラツキの原因について検討してみる。順方向電流は注入したキャリアが再結合することによって生じる。再結合を生じる場所によって P-N 接合の構成は PIN 形と PIR 形とに大別できる。PIN 形は Hall によって最初に提案された構成で、真性領域に近い半導体の両側から P 形と N 形の不純物を入れたもので、図 3.8 (a) に示すように、P と N の二つの領域か

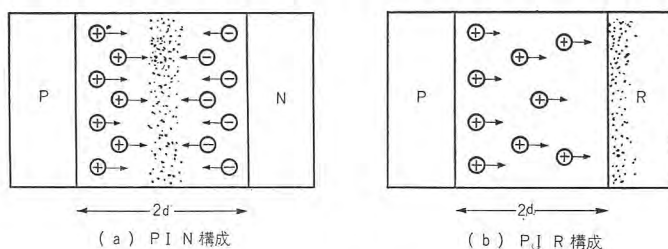


図 3.8 PIN と PIR 形接合の構成

Fig. 3.8 PIN and PIR configuration.



ら注入された正孔と電子が、中央の領域で再結合することによって電流になる。このときの電流  $I$  は、 $I$  領域の厚みを  $2d$  とすると  $d < L$  (拡散距離) の条件で

$$I \approx \frac{2qdn_i}{\tau} \exp(qV/2kT) \dots (3.5)$$

となる。<sup>(12)</sup> ここに  $n_i$  は真性半導体の電子濃度、 $\tau$  は電子と正孔の寿命である。

しかし、実際に P-N 接合を製作した結果によると、厚み  $d$  が小さいほど電流が多いのが普通で、式 (3.5) と一致しない。この矛盾に対して、図 3.8 (b) に示すよう

に再結合がベース接触部分で行なわれる、いわゆる PIR 構成によって理論式が出されている。<sup>(13)</sup>

$$I = \frac{qD_p n_i}{d} \exp(qV/2kT) \dots (3.6)$$

しかし式 (3.5) は PIN 構成において、電圧降下が PI 境界と NI 境界とに生じていると考えて導かれたものであるが、これ以外に P 層、I 層、N 層にも生じると考えて計算された電流はやはり  $d$  に逆比例する結果がえられている。<sup>(14)(15)</sup> 電流がきわめて大きくなると、I 層の電圧降下が大になって、電流はおもにこれによって制限されるようになる。すなわち高い電流密度では、I 層における再結合度が高くなって、注入したキャリアの消滅が早いために、伝導度変調が少なくなる結果、抵抗が高くなるからであると考えられている。<sup>(16)</sup> この理由によって、高い電流領域では図 3.6 に示すように曲線の傾斜は  $q/2kT$  よりさらに小さくなる。

以上の理論によって、結晶の厚みが薄いほど電流が大きくなる。とくにシリコンの移動度は正孔が  $250 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{S}$ 、電子が  $1,700 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{S}$  で、ゲルマニウムに対する値、 $1,200 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{S}$  と  $3,600 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{S}$  より小さい。したがって拡散距離  $L$  が短いために結晶の厚みの変動による影響がゲルマニウムにおけるよりも大きくなる。

結晶の厚み以外に順方向特性に影響を及ぼす因子として、3.1 項であげた捕獲中心と吸着ガスによるチャネルの生成がある。捕獲中心は再結合による電流成分に寄与するから、 $\exp(qV/2kT)$  の傾向を強め、<sup>(6)</sup> チャネルの生成は低電圧領域で  $\exp(qV/kT)$  の法則と離れた特性をひき起こす。<sup>(5)</sup>

順方向電流のバラツキは室温で、1 V において、SR-100 形では  $150 \sim 200 \text{ A}$ 、SR-200 形では  $300 \sim 350 \text{ A}$  の範囲にある。均一な順方向特性をうるためには、結晶の厚み、寿命をできるだけ均一にして、捕獲中心、チャネ

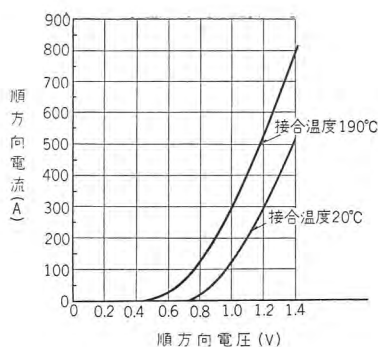


図 3.9 SR-100 形整流体の順方向特性  
Fig. 3.9 DC forward characteristics of type SR-100 rectifier cell.

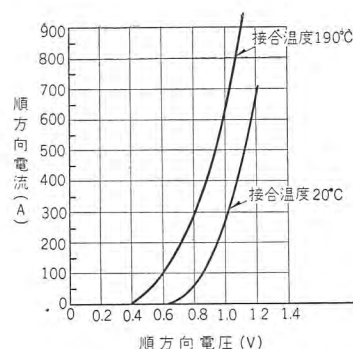


図 3.10 SR-200 形整流体の順方向特性  
Fig. 3.10 DC forward characteristics of type SR-200 rectifier cell.

ルの影響が少ないよう製作条件をえらぶことが必要である。

図 3.9, 3.10 はそれぞれ SR-100 形と SR-200 形の  $20^\circ\text{C}$  と  $190^\circ\text{C}$  における順方向特性の代表例である。接合の温度が高くなると電流が増加し、 $190^\circ\text{C}$  では  $20^\circ\text{C}$  の約 2 倍に達する。

## 4. 定 格

### 4.1 許容電流容量

整流体の電流密度は、電力損失から生じる発熱による P-N 接合部の温度上昇によって制限を受ける。シリコンは接合部の温度が約  $200^\circ\text{C}$  まで使用できるから、ケースと周囲温度との温度差が大になって、冷却が能率よく

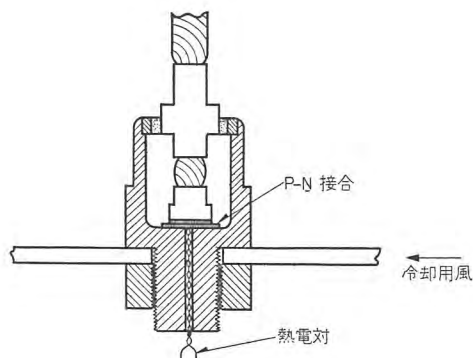


図 4.1 (a) P-N 接合の温度測定法  
Fig. 4.1 (a) View of measuring temperature and mounting of rectifier cell with thermo-couple hole in position on cooling plate.

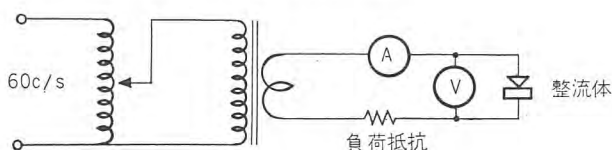
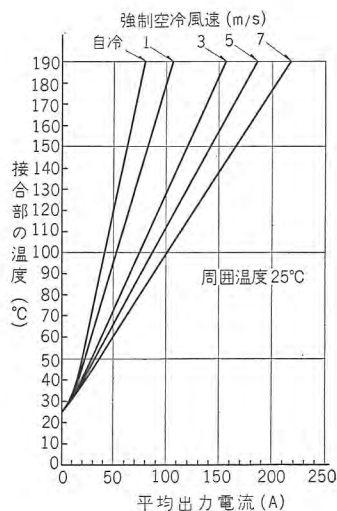
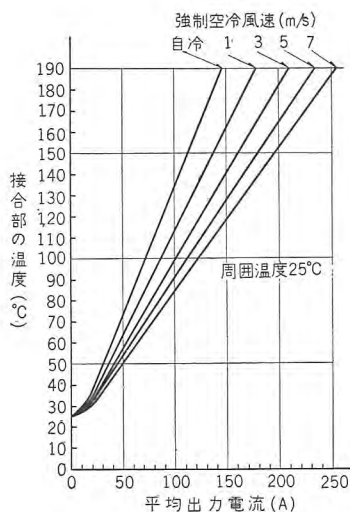


図 4.1 (b) 負荷試験回路  
Fig. 4.1 (b) Single-phase, half-wave circuit diagram for power tests.



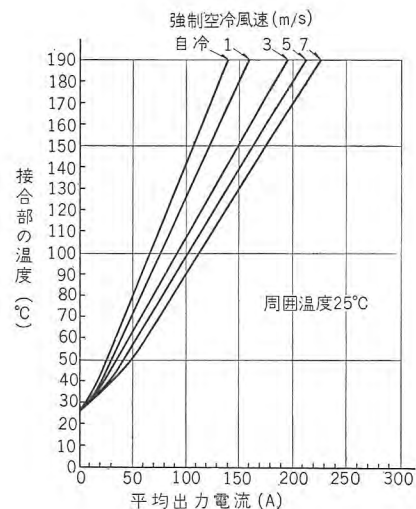
(a) SR-100 形整流体, 冷却銅板  
127×127×3.2 mm

Type SR-100 cell bottomed on  
127×127×3.2 mm copper plate.



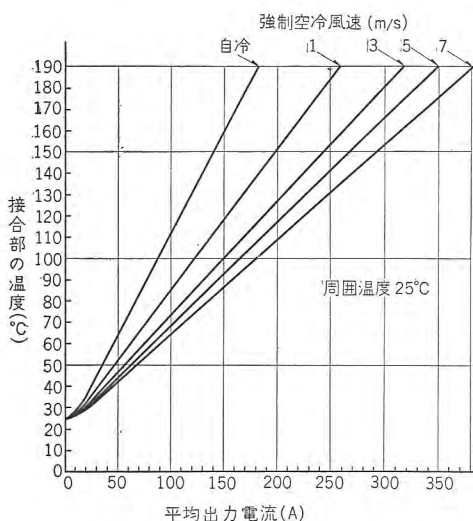
(b) SR-100 形整流体, 冷却銅板  
180×180×3.2 mm

Type SR-100 cell bottomed on  
180×180×3.2 mm copper plate.



(c) SR-200 形整流体, 冷却銅板  
127×127×3.2 mm

Type SR-200 cell bottomed on  
127×127×3.2 mm copper plate.



(d) SR-200 形整流体, 冷却銅板  
180×180×3.2 mm

Type SR-200 cell bottomed on  
180×180×3.2 mm copper plate.

図 4.2 整流体の出力電流に対する接合部の温度

Fig. 4.2 Junction temperature versus load current in 25°C ambient and various air flow.

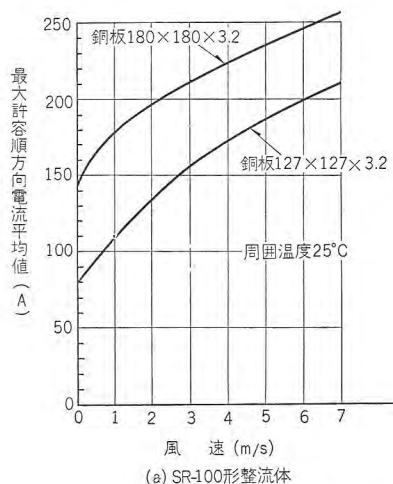
きの、自然冷却および強制風冷に対する出力電流と接合部の温度との関係である。図 4.2 (b) は銅板の大きさを 180 mm×180 mm×3.2 mm にしたときのどのような関係を示す。SR-200 形整流体についてもどのような関係を求めると、図 4.2 (c), (d) のようになる。これらの諸特性から接合部の温度の上限をきめると冷却風速に対する許容電流値をしることができる。

いま接合部の温度を 190°C にすると、SR-100 形と SR-200 形を上記の 2 種類の銅板に取付けたときの風速と最大許容電流との関係は、図 4.3 (a), (b) のようになる。この図から、許容電流は風速ばかりでなく、取付け

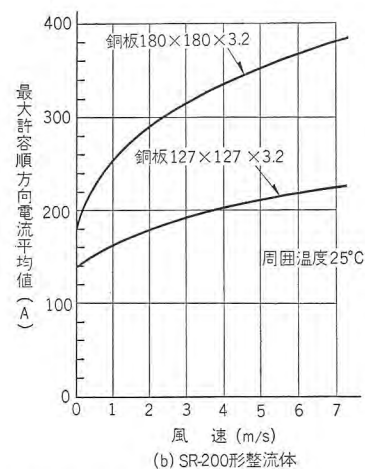
行なわれる。したがって冷却方法も簡単でよく、電流密度も大きくとれる。

まず整流体に電流が流れたときの接合部の温度を、図 4.1 (a) に示すように整流体を一定の大きさの冷却用銅板に取付けて、図 4.1 (b) のような単相半波整流回路で整流電流を通じて測定した。温度は、図示のように銅ケースの底部に約 2 mm 直径の穴を設け、接合のベースモリブデンに熱電対を接触させて測定した。なお周囲温度は 25°C で、冷却風は銅基板に平行に流した。

図 4.2 (a) は SR-100 形整流体を 127 mm×127 mm×3.2 mm の銅板に取付けたと



(a) SR-100形整流体

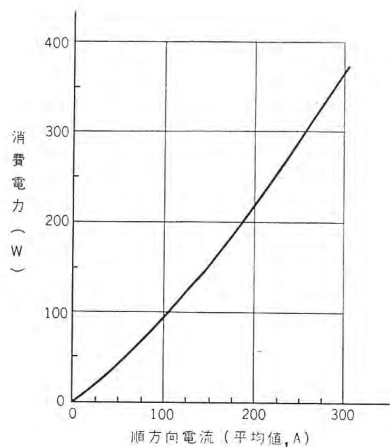


(b) SR-200形整流体

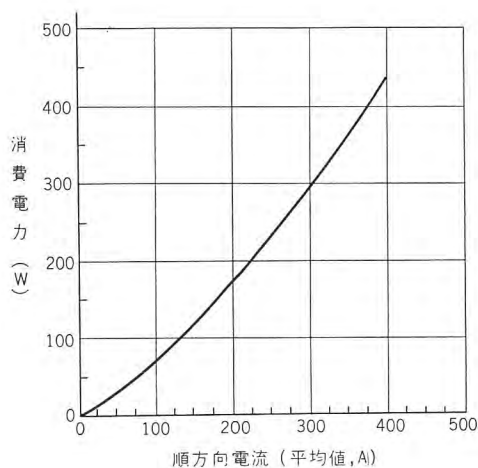
図 4.3 許容電流と風速の関係

Fig. 4.3 Maximum allowable average forward current versus air velocity.  
(a) Type SR-100 cell (b) Type SR-200 cell





(a) SR-100形



(b) SR-200形

図 4.4 順方向電流に対する消費電力 (接合温度 190°C)

Fig 4.4. Maximum power dissipated versus forward current at 190°C junction temperature.

(a) Type SR-100 (b) Type SR-200

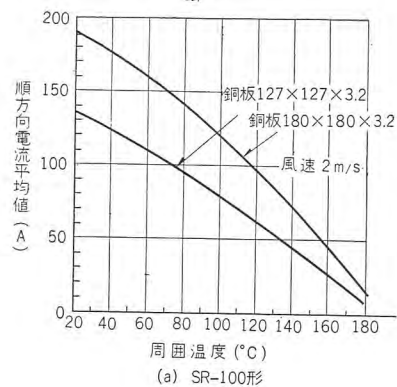
る銅板の寸法によっても影響を受け、とくに SR-200 形に対しては、少なくとも 180 mm×180 mm×3.2 mm 程度以上の大きさの冷却板に取付けなければ、冷却の効果をあげることができないことがわかる。接合部の温度を 190°C 以下の任意の温度にきめたときの許容電流も、まったくどのようにして図 4.2 から求めることができる。

接合部の温度 190°C のときの順方向電流に対する消費電力は図 4.4 に示されている。この値から冷却に必要な風量を計算することができる。

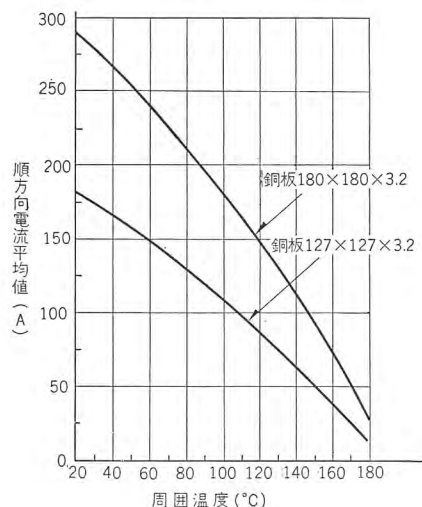
周囲温度が高くなると、P-N 接合との温度差が小になって伝達熱量が減少するために、許容電流が小になる。

図 4.5 は SR-100 形と SR-200 形の周囲温度と最大許容電流の関係を示すもので、恒温槽内で風速 2 m/s のときの、接合部の温度が 190°C に達する電流を測定して得られたものである。100°C 以上の周囲温度においても十分使用できることは、シリコン整流体の一大特長である。

電力用シリコン整流体・清水・中田



(a) SR-100形



(b) SR-200形

図 4.5 シリコン整流体の周囲温度に対する 1 素子の最大許容電流

Fig 4.5. Maximum allowable forward current versus ambient temperature.

(a) Type SR-100 rectifier cell.  
(b) Type SR-200 rectifier cell.

## 4.2 過負荷耐量

整流体を使用するうに過負荷耐量は重要な特性になる。シリコン整流体は高い温度にまで整流性を失わないから、短時間の過電流に対する安全性が高いことが期待できる。図 4.6 は、24°C の周囲温度において静止状態

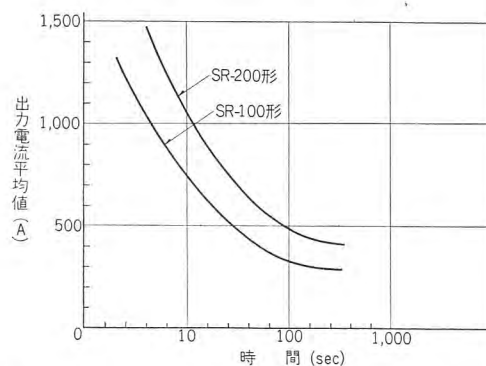


図 4.6 シリコン整流体、SR-100 形と SR-200 形の過負荷耐量

Fig. 4.6 Maximum allowable surge current of SR-100 and SR-200 rectifier cell.

から大電流を通じたときの過負荷耐量を示したものである。測定は整流体を  $127\text{ mm} \times 127\text{ mm} \times 3.2\text{ mm}$  の銅板に取付け、風速  $3\text{ m/s}$  の強制風冷のもとに、 $60\text{ c/s}$  の半波整流電流を通じて、接合部の温度が  $190^\circ\text{C}$  になるような電流と時間の関係を求めたものである。SR-100 形は 6 秒間で  $1,000\text{ A}$ 、6 サイクルで  $1,600\text{ A}$  の平均電流に耐え、SR-200 形は 6 秒間で  $1,350\text{ A}$ 、6 サイクルで  $1,900\text{ A}$  の平均電流にも十分安全である。SR-200 形の過負荷耐量が比較的低いのは、ケースが SR-100 形と同一寸法であるために、熱容量が小さいためである。

上記の過負荷耐量は取付ける銅板の寸法、冷却風速によって変るものであり、運転中に生じる過大電流に対しては、図 4.2 に相当する温度に上昇しているから、その分だけ図 4.6 の過負荷耐量より減じなければならない。

## 5. む す び

当社製電力用シリコン整流体 SR-100 形と SR-200 形について、その構造、逆方向特性、順方向特性、許容定格電流、ならびに過負荷耐量について報告した。同時にシリコン P-N 接合の電流電圧特性に及ぼす周囲気体の影響、および捕獲中心の影響についても検討を加えた。これら整流体の最大せん頭逆方向電圧は  $500\text{ V}$  に及ぶものが得られており、最大許容電流は SR-100 形で  $150\text{ A}$ 、SR-200 形で  $250\text{ A}$  に達し、過負荷耐量も十分大であることがわかった。

今後、これらの諸特性に及ぼす因子の解明を継続することにより、さらに逆方向耐圧の高い、順方向特性の均一なもの生産が期待できる。

この整流体の開発にあたって、終止ご指導とご援助を賜った大野研究所長、菅野物理第一研究室長、八十田物理第二研究室長、ならびに単結晶の製作、外装の設計製作などにあたっていただいた、物理第二研究室、化学第二研究室、工務課の関係各位に深く感謝の意を表する。

## 参 考 文 献

(1) W. Shockley: The Theory of p-n Junctions in Semi-

conductors and p-n Junction Transistors. B. S. T. J. 28, 435 (1949)

(2) W. L. Brown: N-type Surface Conductivity on P-type Germanium. Phys. Rev. 91, 518 (1953)

(3) たとえば R. H. Kingston: Water-vapor Induced N-type Surface Conductivity on P-type Germanium. Phys. Rev. 98, 1766 (1955)

(4) M. Cutler, H. M. Bath: Surface Leakage Current in Rectifiers. J. Appl. Phys. 25, 1440 (1954)

(5) M. Cutler, H. M. Bath: Surface Leakage Current in Silicon Fused Junction Diodes. Proc. I. R. E. 45, 39 (1957)

(6) C. T. Sah, R. N. Nayce, W. Shockley: Carrier Generation and Recombination in P-N Junction and P-N Junction Characteristics. Proc. I. R. E. 45, 1228 (1957)

(7) K. B. McAfee, E. J. Ryder, W. Shockley, M. Sparks: Observations of Zener Current in Germanium p-n Junctions. Phys. Rev. 83, 650 (1951)

(8) K. G. McKay, K. B. McAfee: Electron Multiplication in Silicon and Germanium. Phys. Rev. 91, 1079 (1953)

(9) C. G. B. Garrett, W. H. Brattain: Some Experiments on, and a Theory of, Surface Breakdown. J. Appl. Phys. 27, 299 (1956)

(10) A. J. Wahl, J. J. Kleimack: Factors Affecting Reliability of Alloy Junction Transistors. Proc. I. R. E. 44, 494 (1956)

(11) G. L. Pearson, B. Sawyer: Silicon P-N Junction Alloy Diodes. Proc. I. R. E. 40, 1348 (1952)

(12) R. N. Hall: Power Rectifiers and Transistors. Proc. I. R. E. 40, 1512 (1952)

(13) T. H. Kinman, C. A. Carrick, R. G. Hibberd, A. J. Blundell: Germanium and Silicon Power Rectifiers. Proc. I. E. E. 103, 89 (1956)

(14) A. Herlet: Die Abhängigkeit der Stromdichte eines p-i-n Gleichrichters von der Breite seiner Mittelzone. Zeit. f. Phys. 141, 335 (1955)

(15) N. H. Fletcher: The High Current Limit for Semiconductor Junction Devices. Proc. I. R. E. 45, 862 (1957)

(16) D. A. Kleinman: The Forward Characteristic of the PIN Diode. B. S. T. J. 35, 685 (1956)

(34-6-27 受付)



# ゲルマニウム整流器

研究所 清水潤治\*

伊丹製作所 細野 勇\*\*・横 畠 洋 志\*\*

## Germanium Power Rectifiers

Research Laboratory Junji SHIMIZU

Itami Works Isamu HOSONO・Hiroyuki YOKOHATA

Semiconductor rectifiers have been developed for diversified applications with their high efficiency, no articles of consumption, and easy maintenance and operation. Of semiconductor rectifiers now in current use, germanium and silicon rectifiers predominate over the rest. Furthermore, germanium is not so difficult as silicon in the refinement and formation of single crystal, which permits its practical application to power rectifiers—especially to be used for chemical industry where low voltages and high currents are requisite. Mitsubishi has developed types MS-200 and MS-400 units which are operating with success in various fields.

### 1. ま え が き

半導体整流器は、効率の高いこと、消耗部品がなく、保守運転が簡易なことなど、これまでの整流器に見られない多くの特長のために、最近化学用をはじめとして、各方面に急速に用いられつつある。現在半導体整流器として実用に供せられているものに、ゲルマニウムとシリコンがあるが、ゲルマニウムはシリコンほどに精製、単結晶の作製が困難でなかったために、電力用整流器としての実現が早く、とくに化学工業方面に相当の使用実績がある。

ゲルマニウム整流体は、シリコン整流体のように、 $100^{\circ}\text{C}$  をこすような高温にまでは使用できないが、大形の単結晶の引上げが可能で、これを用いて広面積の P-N 接合の製作によって、整流体 1 個あたりの電流容量を大きくすることができる。そのうえ、定格電流における整流体の電圧降下も、シリコンに比較して約  $0.5\text{V}$  程度小である。したがって、化学工業用、とくにメッキ電源のような低電圧、大電流でしかも水冷が可能であるようなところには最適であるといえる。

当社では、昭和 32 年度に、許容電流  $200\text{A}$  の MS-200 を開発し、つづいて風冷式 MSF-200 の製作を行ない、その後、許容電流  $400\text{A}$  という大容量の整流体 MS-400 の製作に成功している。これは他社の電力用整流体、いずれも 1 個あたり  $70\text{A}$  程度であるのに対して、

数倍の電流容量を有しているために、大電流用としては、並列数を少なくすることができ、したがって装置が簡単になるとともに電流平衡の問題が軽減される有利さがある。

以上のような整流体を用いた整流装置は、すでに東海電極株式会社を始め菱電機器などに納入されており、また、整流体単体としても多数納入されている。

以下ここに、ゲルマニウム整流体の構造、特性を述べるとともに、その応用例を記すことにする。

### 2. ゲルマニウム整流体の構造

図 2.1, 2.2, 2.3 はそれぞれ現在生産中のゲルマニウム整流体 MS-200 形、MS-400 形、および MSF-200 形の外観である。前の二つは水冷式で、後の MSF 形は風冷式になっている。

整流作用を行なう P-N 接合として、合金形、拡散形、および生長形の 3 種類がある。合金形接合はゲルマニウムの N 形単結晶板上にインジウムのような P 形不純物をあてがって、加熱によって合金化してつくられた接合である。すなわち、加熱のときにインジウム中に溶解したゲルマニウムが、冷却によって基体の N 形結晶上に再結晶し、しかも再結晶部分はインジウムを多量に含むために P 形になることによって P-N 接合が形成されるわけである。拡散形接合は単結晶板を不純物蒸気中に高温に保つことによって、表面部分から逆形の不純





図 2.1 MS-200 形ゲルマニウム整流体 (水冷式) 200A/1 セル

Fig. 2.1 Type MS-200 water-cooled germanium rectifier cell. 200A/1 cell

図 2.2 MS-400 形ゲルマニウム整流体 (水冷式) 400A/1 セル

Fig. 2.2 Type MS-400 water-cooled germanium rectifier cell. 400A/1 cell

物を拡散によって浸入させてつくられたものであり、生長形接合は単結晶引上げ中に不純物を熔融物中に投入してつくられたものである。

電力用整流体用としては合金法によるものがもっとも多い。これは生長形では P-N 障壁以外のゲルマニウム結晶層による直列抵抗が大になって、大電流用として有害な電圧降下を生じやすく、拡散形は電極の取付けにやや困難点があるからである。MS 形整流体に用いられている P-N 接合の構造は、図 2.4 に示すように、ゲルマニウムの両面にインジウムとすずを合金化したものである。整流作用は上にのべたとおり、インジウムとものとゲルマニウムとの間につくられた P 形再結晶層による P-N 接合によって行なわれ、下面のすずは電流を取出すための非整流接触をなすものである。P-N 接合の面積は取扱う電流量からきめられる。ゲルマニウム単結晶は厚さ 0.35mm 程度の薄片に切断されたのち、超音波加工によって所望の大きさの円形に切りとられる。こうして得られた薄片は、化学処理によって表面層部分をエッチして除去したのち、両面からインジウムとすずが合金化される。これを冷却しやすく、かつ空気中の湿気から保護するために密封構造に組込む。図 2.5 に示すよ

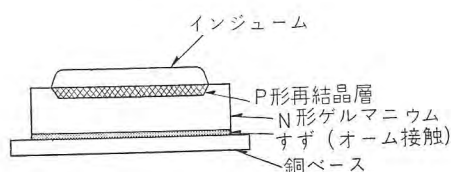


図 2.4 合金形ゲルマニウム P-N 接合

Fig. 2.4 The germanium fused P-N junction in diagrammatic form.



図 2.3 MSF-200 形ゲルマニウム整流体 (風冷式) 140A/1 セル

Fig. 2.3 Type MSF-200 forced-air-cooled germanium rectifier cell. 140A/1 cell

うに接合は銅ベースと上部電極とはさまれてろう付けされている。銅ベースは図示のように水冷構造にされたり、あるいは風冷用フィンが取付けられており、上部電極には外部への導線がろう付けされている。そして P-N 接合はガラスとコパール、およびベローズによって気密に封じこまれている。ベローズは密閉構造の一部を形成する

とともに、熱による膨張収縮によってゲルマニウム素子にわい力がかからないような作用をする。図 2.6, 2.7, 2.8 は各種整流体の外形寸法を示すものである。

### 3. 順方向特性

ゲルマニウム整流体の特長の一つは順方向電圧降下が小であることにある。P-N 接合を通る電流  $I$  と障壁にかかる電圧との間にはつぎの理論式がある<sup>(1)</sup>

$$I = I_{ps} [\exp (qV/kT) - 1] \dots \dots \dots (3.1)$$

ここに

- $I_{ps}$  = 飽和電流
- $q$  = 電子の電荷
- $k$  = ボルツマン定数
- $T$  = 温度 ( $^{\circ}\text{K}$ )

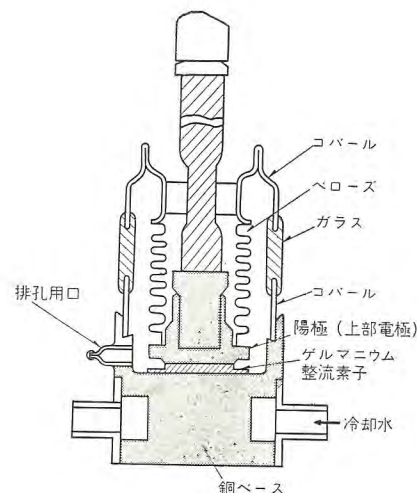


図 2.5 ゲルマニウム整流体の内部構造

Fig. 2.5 Interior construction of rectifier cell assembly.



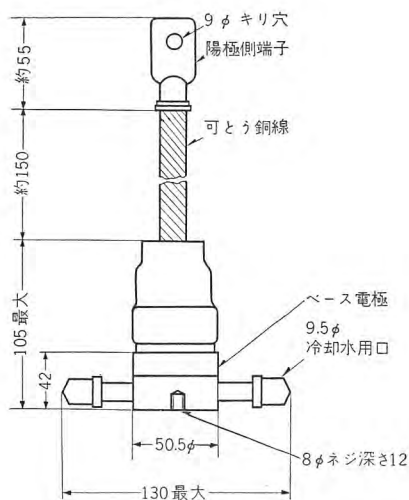


図 2.6 MS-200 形整流流体の外形寸法  
Fig. 2.6 Outline dimensions of type MS-200 rectifier cell.

$I_{ps}$  は、インジウムを合金化した P-N 接合では、基体の N 形ゲルマニウムへの正孔電流からなり、次式であらわされる。

$$I_{ps} = qp_n D_p / \sqrt{D_p \tau_p} \dots \dots (3.2)$$

$D_p$ ,  $\tau_p$ ,  $p_n$  はそれぞれ正孔の N 形ゲルマニウム中における拡散定数、寿命および濃度である。 $p_n$  は N 形ゲルマニウムにおける電子の濃度  $n_n$  とゲルマニウムのエネルギーギャップ  $E_g$  によってきまるもので、次式であらわされる<sup>(2)</sup>。

$$p_n = \frac{CT^3}{n_n} \exp(-E_g/kT) \dots \dots (3.3)$$

$$C = 2.33 \times 10^{31} \text{ cm}^{-6}$$

したがって電流  $I$  は式 (3.1), (3.2), (3.3) より結局つぎのように表わされる。

$$I = \frac{qcT^3}{n_n} \cdot \frac{D_p}{\sqrt{D_p \tau_p}} \exp(-E_g/kT) [\exp(qV/kT) - 1]$$

$$\approx \frac{qcT^3}{n_n} \cdot \frac{D_p}{\sqrt{D_p \tau_p}} \exp[(qV - E_g)/kT] \dots \dots (3.4)$$

式 (3.4) からエネルギーギャップ  $E_g$  が  $I$  の値に大きな影響をもっていることが明らかである。 $E_g$  はゲルマニウムでは 0.75 eV であって、シリコンの 1.12 eV より小さい。さて、式 (3.1) の理論式はゲルマニウムでは順方向電圧が小である間は実際に成立する<sup>(3)</sup>。したがってゲルマニウムはシリコンよりも順方向電圧  $V$  の低い値に対する電流値は大である。図 3.1 は MS-200 形の順方向特性の一例を示すものであって、低電圧の直線部分が式 (3.1) の成立する範囲になる。

しかし電圧が大になると、式 (3.1) が成立しなくなり、 $I \propto \exp(qV/2kT)$  の形をとり、同時に障壁に直列の抵

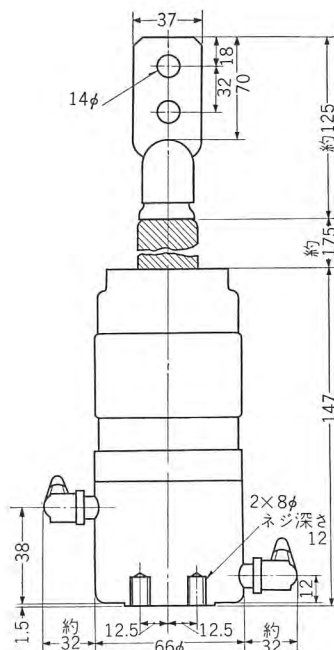


図 2.7 MS-400 形整流流体外形寸法  
Fig. 2.7 Outline dimensions of type MS-400 rectifier cell.

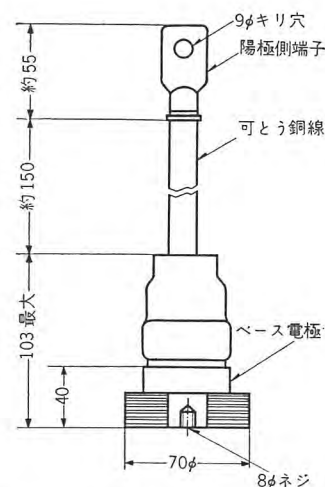


図 2.8 MSF-200 形整流流体外形寸法  
Fig. 2.8 Outline dimensions of type MSF-200 rectifier cell.

抗が問題になってくる。この直列抵抗は二つの部分からなる。すなわち障壁からベース接触に至る間のゲルマニウム結晶によ

る抵抗と、ベース部分における接触抵抗の和からなる<sup>(4)</sup>。前者は電力整流体のように接合の直径が障壁とベース接触間の距離に比較して大きなものでは、接合の面積を底として距離を高とする円筒状のゲルマニウム結晶による抵抗として算出できる。しかし順方向に電圧がかかっているときには、注入された正孔によってゲルマニウムの比抵抗はきわめて低いものになる。これらの正孔の N 形ゲルマニウム中での寿命  $\tau_p$  が十分長ければ、正孔は拡散によってゲルマニウム結晶中にベース接触の領域にまで充満していることになる。このための条件として正孔の拡散距離、 $L_p$  が長いことが必要である。 $L_p$  は次式で表わされる<sup>(5)</sup>。

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p} \dots \dots (3.5)$$

拡散定数  $D_p$  はアインシュタインの法則によって移動度  $\mu_p$  に比例する。

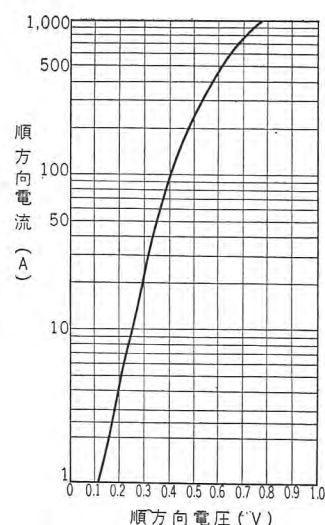


図 3.1 ゲルマニウム整流体の順方向特性  
Fig. 3.1 Forward characteristic of a germanium rectifier cell.



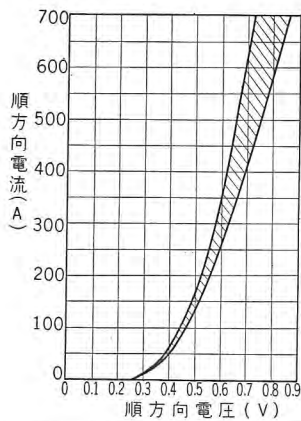


図 3.2 MS-200 形の順方向特性の範囲

Fig. 3.2 Forward characteristics of type MS-200 germanium rectifier cells.

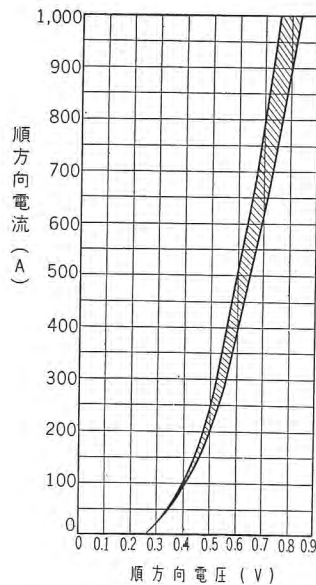


図 3.3 MS-400 形の順方向特性の範囲

Fig. 3.3 Forward characteristics of type MS-400 germanium rectifier cells.

$$D_p = \mu_p \frac{kT}{q} \dots (3.6)$$

これらの理由によって順方向抵抗を減ずるためには、

$L_p$  は結晶の厚みより小でないことが必要条件であって、結晶の固有の比抵抗はあまり問題でない。後述のように比抵抗は逆耐電圧をきめる重要な条件であって、高い逆耐電圧をうるために比抵抗の高いことがのぞましい。

つぎにベース部分の接触抵抗を小にするには、ベース部分で有害な障壁をつくらないこと、および半導体との接触部で正孔の再結合速度が十分大であることが必要である。このためにはベース金属中に N 形不純物を混じて  $PNN^+$  構成にするか<sup>(6)</sup>、あるいはベース金属に純ずすを用いた PNR 構成が有効である。後者のときは、純ずすが有効な再結合層を与えることになる<sup>(7)</sup>。

当社のゲルマニウム整流体はいずれも PNR 構成の素子を用いたものである。MS-200 形および MS-400 形の順方向の電流電圧特性はそれぞれ図 3.2, 3.3 に示す範囲にばらついている。これらのバラツキのおもな原因は直列抵抗のバラツキにあるものであって、上述のように、注入された正孔の移動度、寿命、および結晶の厚みの相違に起因するものと考えられる。

#### 4. 逆方向特性

逆方向における電流電圧特性は式 (3.1) から明らかなように、 $V \ll 0$  では電流  $I$  は電圧に依存しない一定電流  $I_{ps}$  になって、いわゆる飽和特性を示す。電圧がある値に達すると電流が急激に増加して無限大になる。この電圧がいわゆる降伏電圧 (Break down Voltage) であ

って、電子のなだれ現象に起因するものである。

飽和電流の大きさと、降伏電圧とは、合金接合では基体のゲルマニウムの比抵抗に依存する。比抵抗が高いほど飽和電流の値と降伏電圧は増加する。電力用整流体では、飽和電流による逆方向損失は順方向電流による損失のたかだか数 % にすぎないから、飽和電流が増加しても、高い比抵抗の結晶を用いて降伏電圧を高くすることが理論的に有利である。しかし実際の比抵抗と降伏電圧との関係は電力用整流体に用いられるような広面積の接合では、小形接合のように理論どおりにゆかない。これは結晶面上に不均一の点があったり、合金が均一に行なわれなかったりすることに起因するものと考えられる。とくに広面積の合金接合では、インジウムがゲルマニウムになじみにくく、その結果、均一に再結晶が形成されないために理論値よりもはるかに低い電圧で降伏現象を起す傾向がある。したがって高い逆方向耐電圧の P-N 接合の製作に当っては、単結晶の特性はいうまでもなく、合金前の処理、合金操作など製作工程全体に微妙な調節を必要とする。MS-200 形と MS-400 形の最大せん頭逆方向電圧は、本文末尾の規格表に示すように、それぞれ 400 V, 250 V までの値であって、この種のゲルマニウム整流体として理論的限界に近い最高水準にあるといえる。

整流体の逆方向特性は周囲温度によってきわめて大きく影響を受ける。図 4.1 は MS-200 形の整流体の逆方向特性の温度特性を示すものである。式 (3.4) から明らかなように温度の上昇とともに飽和電流は増加し、降伏電圧は減少する。

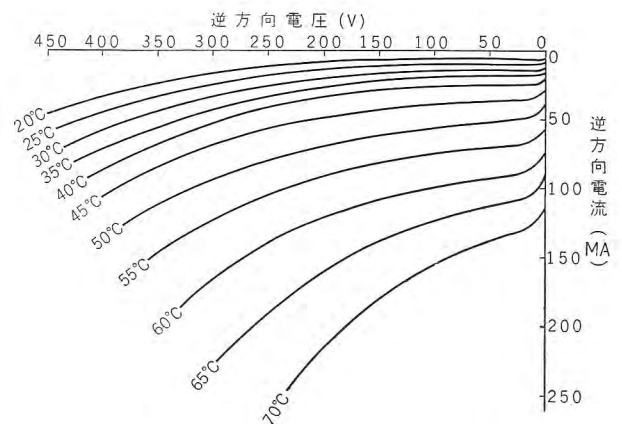


図 4.1 逆方向直流特性の温度特性

Fig. 4.1 Typical 60 c/s reverse characteristics of a germanium rectifier cell at various ambient temperatures.



## 5. 電 流 定 格

整流体の生命である P-N 接合は電力損失によって発熱を生じる。接合の温度が上昇すると前記のように逆方向の耐圧が低下するばかりでなく、逆方向の電流も増加するから、これによる損失が加わってますます温度上昇を生じる。そればかりでなく、接合にわずかのよごれが残されているときには、これが高い温度で活性化されて劣化が早められる。

さて電力損失は正規の使用状態では逆方向電流によるものは少なく、ほとんど順方向電流によるものである。すなわち、接合の温度上昇はもっぱら順方向電流によって生じる。MS-200 形および MS-400 形では図 2.4 に示す構造から明らかなように、P-N 接合に発生した熱量はおもに銅ベースから冷却水に伝達されて放散される。伝達される熱量はニュートンの法則によって銅ベースと冷却水の温度差と接触面積および熱伝達率に比例する。したがって冷却水の温度および流速は整流体の許容電流値に大きな影響を与える。許容電流値を大きくするための基本方針としては損失を少なくするとともに、損失による発熱量が有効に除去できることが望ましい。前者のためには、たとえば P-N 接合の有効面積を大にして順方向電圧降下を小にし、後者のためには P-N 接合より冷却部に至る間の熱伝導を良くするとともに、冷却面積を大にし、かつ熱伝達率ができるだけ大になるよう、外装の構造を考えなければならない。図 5.1 および図 5.2 はそれぞれ MS-200 形と MS-400 形の順方向電流と接合の温度との関係

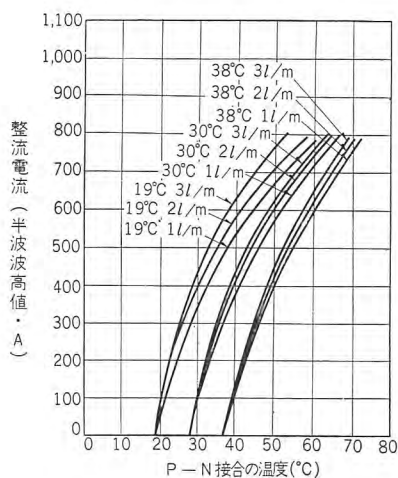


図 5.1 MS-200 形整流体の接合の温度  
Fig. 5.1 Junction temperature of type MS-200 rectifier cell.

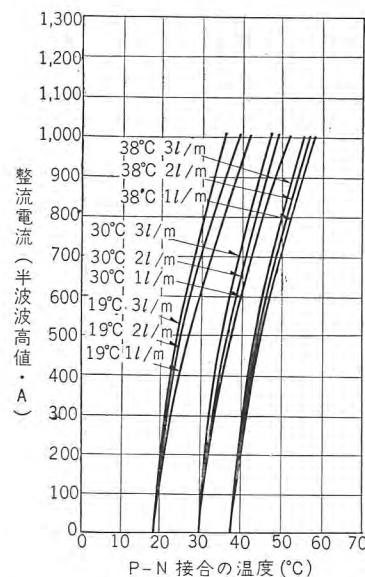


図 5.2 MS-400 形整流体の接合の温度  
Fig. 5.2 Junction temperature of type MS-400 rectifier cell.

を、種々の冷却水の温度と流量に対してとったものである。接合の温度は P-N 接合がろう付けされている銅電極のインジウムに近接した部分に穴を設けて、その中に熱電対を埋めて測定した。電流は整流体に流れる半波整流電流の波高値で表わしてある。(したがって電流の平均値は  $1/\pi$  になる)。

この図から接合の温度の上限をきめることにより整流体の許容電流を求めることができる。接合の温度の上限は一般に 65°C までとられているようであるが、接合と熱電対の位置までの温度差を余裕をみて 15°C にとり、50°C にすると、流量をパラメータにした許容電流と冷却水温との関係は図 5.3 のようになる。同様の方法で、風冷式 MSF-200 形について風速と許容電流との関係を周囲温度の異なったときについてとると、図 5.4 になる。

これらの図から、冷却条件が異なったときの整流体の許容電流を知ることが

できる。たとえば、図 5.2 から、流量 3 l/min で、水温 20°C のときには、MS-200 形では 200A、MS-400 形では 400A の許容電流を得ることができる。したがって MS-400 形は三相整流回

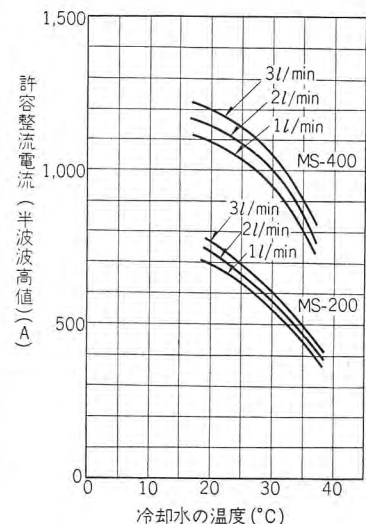


図 5.3 ゲルマニウム整流体の許容電流  
Fig. 5.3 Allowable current of a germanium rectifier cell. (water cooled type)

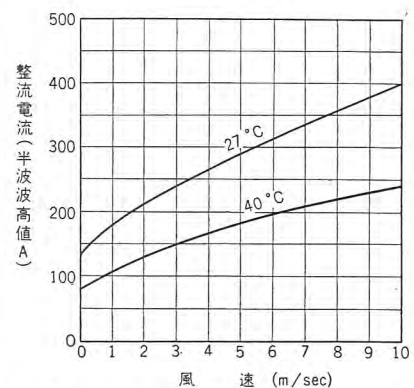


図 5.4 風冷式 MSF-200 形の許容電流  
Fig. 5.4 Allowable current of a germanium rectifier cell. (air cooled type)



路で用いると、並列個数を要しないで、1,200A の直流出力電流が得られる。

## 6. 過負荷耐量

半導体整流体は過負荷電流に弱いものと考えられている。これは熱に対する時定数が小であるため、短時間の過負荷電流に対しても接合の温度が上昇するからである。したがって回転機械、あるいは水銀整流器のように、短時間であれば定格以上の電流を通じることができるといふわけにいかない。しかし負荷側の短絡などの事故によって、整流体に過大電流が流れることを十分考慮しておかなければならない。すなわち継電器や速応ヒューズなどの保護装置が動作するまでの間にも十分安全であるために、整流体の過負荷耐量を知っておくことが必要である。MS-200 形、MS-400 形および MSF-200 形整流体の過負荷耐量は図 6.1 に示すとおりである。測定装置は図 6.2 に示すように、タイマ回路によって逆並列のサイラトロンを起動し、変圧器  $T_2$  の一次側に所望の時間、60 c/s の電流を通じ、二次側に接続した整流体に半波整流の大電流が通じるようにした。電流値は直列にある無

誘導抵抗  $R$  の電圧降下をブラウン管オシロで直視することによって知ることができる。そして整流体に通じる電流を次第に上昇してゆき、その都度、逆方向特性を観察して、逆方向耐圧が低下するまでの電流を求めた。その値は整流体によってバラツキがあるが、それらの最低値と通電時間との関係をとったものが図 6.1 である。MS-200 形では 6 サイクルで 3,500 A 以上、6 秒間で 2,300 A 以上の電流に耐えることができ、MS-400 形に至っては 6 サイクルで 6,700 A 以上、6 秒間で 4,500 A 以上の電流に対しても十分安全である。MS-200 形について実際に破壊試験を行なった結果では、定格値を十分上回る電流値にも安全であることが確認されており、たとえば 6 サイクルで 7,500 A の電流にも耐えた例があった<sup>(8)</sup>。これは P-N 接合の順方向電圧降下が小であることと、発生した熱量が有効に除去されるように整流体の冷却系が十分考慮された結果による。

以上のように当社のゲルマニウム整流体では、これまでのゲルマニウム整流器は過負荷に弱いという通念を払しょくするに足る特性を発揮することができ、実際の使用においても電流の上ではきわめて強いことが実証されつつある。

## 7. 金属電解用ゲルマニウム整流器

MS-200 形ゲルマニウム整流体の応用の実際例の一つとして、上記のゲルマニウム整流器がある。このゲルマニウム整流器は、東海電極株式会社茅ヶ崎工場で、銅粉電解用 12 kW、8 V、1,500 A のベルトーロ整流器の老朽化に対する設備更新のためのものであって、ほかにも運転中のベルトーロとは並列運転を行わず、単独に電解セルへ送電をしている。

本年 1 月中旬ごろに納入して以来、ずっと好調に運転をつづけており、この種の非常に低電圧で、しかも大電流の化学用としては、運転効率の面からいって、ゲルマニウム整流器の有利さを如実に示している。

以下ここに、その機器の概要および工場試験結果を簡単に紹介する。

### 7.1 6V 2,000A ゲルマニウム整流装置の仕様

整流装置としての主要機器は次のとおりであり、図 7.1 にその単線結線図を示す。

(1) 整流器用変圧器 1 台

16 kVA 210 V/6.3 V 三相 50 c/s

一次星形 二次二重星形 相間リアクトル付

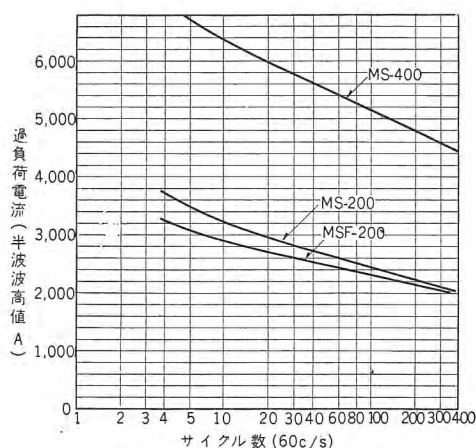


図 6.1 ゲルマニウム整流体の過負荷耐量  
Fig. 6.1 Maximum allowable over-load current of Mitsubishi germanium rectifier cell.

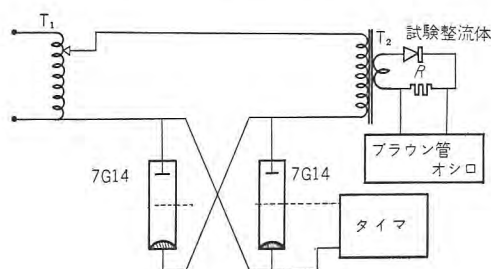


図 6.2 整流体過負荷試験回路  
Fig. 6.2 Basic measuring circuit for allowable overload current of rectifier cell.



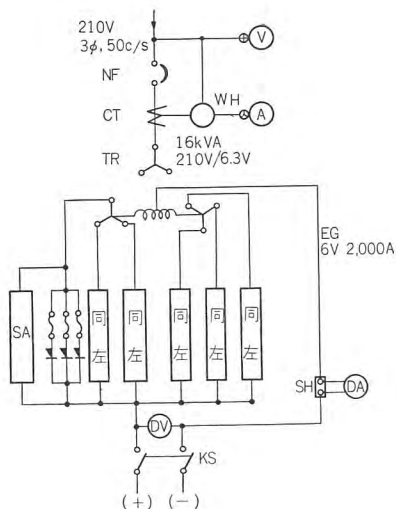


図 7.1 水冷式ゲルマニウム整流器結線図  
Fig. 7.1 Connection diagram of water-cooled germanium rectifier.

- |                         |     |
|-------------------------|-----|
| (2) 水冷式ゲルマニウム整流器        | 1 台 |
| 6 V 2,000 A 12 kW 連続定格  |     |
| (3) 異常電圧吸収装置            | 1 組 |
| (4) 速応動形ヒューズ            | 1 組 |
| (5) 水冷式冷却装置 (継電器を含む)    | 1 式 |
| (6) 制御盤 (ノーヒューズシャ断器を含む) | 1 面 |

## 7.2 ゲルマニウム整流器キュービクル

上記のゲルマニウム整流装置は、大別して次の3部分よりなっている。

- (1) 整流器用変圧器
- (2) 整流器キュービクル
- (3) 制御盤

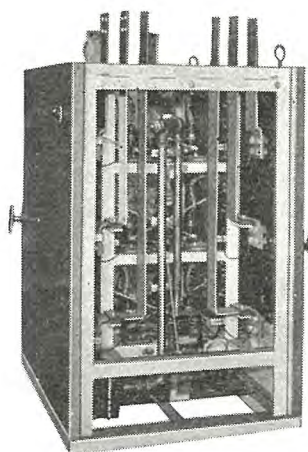


図 7.2 6 V 2,000 A ゲルマニウム整流器 側面扉を開いたところ  
Fig. 7.2 Germanium rectifier with side door opened.

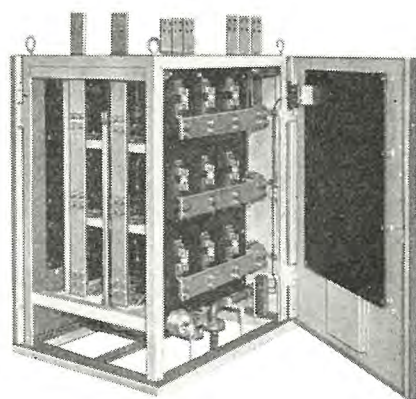


図 7.3 ゲルマニウム整流器 正面扉を開いたところ (東海電極納め 6 V 2,000 A)  
Fig. 7.3 Germanium rectifier with front door opened.

このうち、(1) および (3) については、別にとりたてて説明する必要はない。在来のものと同様のものである。

(2) の整流器キュービクルは、その中に、ゲルマニウム整流体、異常電圧吸収装置、速応動形ヒューズ、水冷式冷却装置などを内蔵している。

図 7.2 は側面の扉を開いて、内部を見たところ、図 7.3 は正面の扉を開いて速応動形ヒューズの取付位置を示す写真である。その重量および寸法は次のようである。

- |     |                                |
|-----|--------------------------------|
| 床面積 | 900 mm × 700 mm                |
| 高さ  | 1,100 mm (ただし交直流端子 $H=150$ mm) |
| 重量  | 335 kg (ただし冷却水は含まない)           |

## 7.3 ゲルマニウム整流体

使用したゲルマニウム整流体は、MS-202 形で、これを二重星形結線として、その1アーム3個並列とし、合計 18 個を使用している。

使用に際して、測定したゲルマニウム整流体の、正方向特性は、図 7.4 のようなバラツキである。

電流平衡リアクトルは使用していない。

## 7.4 保護装置

### (1) 過電流保護装置

ゲルマニウム整流体が、なんらかの事故のために、Break down した場合は、ほかの健全な整流体への波及を防ぐため、すみやかに故障整流体を回路から除去する必要がある。この目的に速応動形ヒューズを用いている。

### (2) ノーヒューズシャ断器

直流出力側での短絡のような事故に対しては、速応動

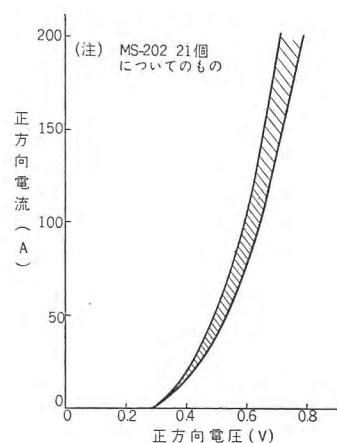


図 7.4 ゲルマニウム整流体正方向特性のバラツキ  
Fig. 7.4 Irregularity of forward characteristic of germanium rectifier cell.

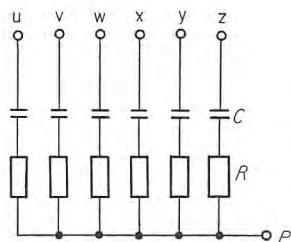


図 7.5 異常電圧吸収装置結線図

Fig. 7.5 Connection diagram of abnormal voltage absorber.

形ヒューズが溶断するより以前に、ノーヒューズ遮断器を用いて、すみやかに電源を解放する。

### (3) 異常電圧吸収装置

外部より侵入してくる電圧サージ、ゲルマニウム整流体が転流時に出す、ホール蓄積効果によるスパイク電圧は、図 7.5 に示すような  $C-R$  の組合せでできた異常電圧吸収装置を用いて除去する。

### 7.5 水冷式冷却装置

ゲルマニウム整流体は前章で述べているように、冷却方法より大別して、風冷式整流体および水冷式整流体に分けられる。

風冷式は非常に簡便な冷却方法であるが、水冷式に比べると冷却効果の点では、後者に一步遅れる。この点よりして使用温度限界の割合に低いゲルマニウム整流体にとっては、水冷式はもっとも適切な冷却方式といえる。

このゲルマニウム整流器も MS 形整流体を使用した EG 形（水冷式ゲルマニウム整流器の形名）であり、その水系は、図 7.6 のようである。水系には、送水ポンプは有せず、水道水によっている。冷却水は、入口フランジよりはいり、流水継電器を通して、6 本に分岐し、ゲルマニウム整流体を 3 個直列に冷却して、温度継電器を

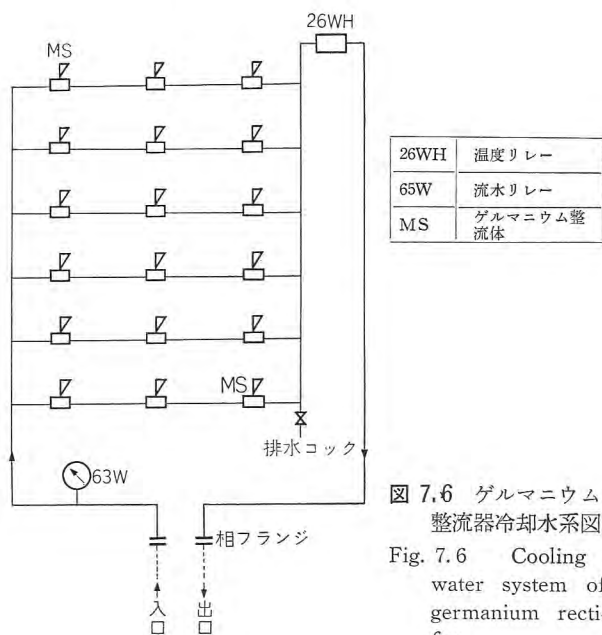


図 7.6 ゲルマニウム整流器冷却水系図

Fig. 7.6 Cooling water system of germanium rectifier.

経て出口フランジへと帰る。通水量は全体で約 18 l/min で、定格電流で運転している場合の水の温度上昇は、約 1°C である。

### 7.6 工場試験の成績および考察

水抵抗負荷を用いて行なった工場試験の概要を記す。

定格負荷における、電圧、電流と温度の関係は図 7.7 のとおりである。力率、能率、電圧変動率を図 7.8 に示す。

二重星形結線の、1 アーム 3 個並列のゲルマニウム整流体の、電流分担のバラツキの状態を図 7.9 に示す。

上の結果からして、この程度の並列枚数の場合は、いくぶん整流体の定格を下げることによって、平衡リアクトルは用いないでも、十分に使用できる。

化学工場は一般に水にめぐまれているので、この場合のように水冷式として用いると、冷却水として使用したあとの水も、すべて利用できるため、経済的にも有利で

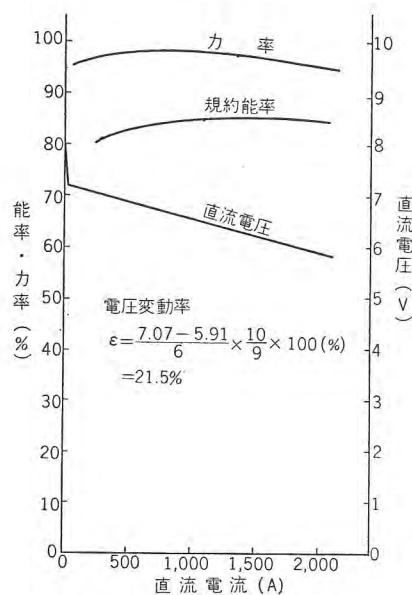


図 7.7 能率・力率・電圧変動率

Fig. 7.7 Efficiency; power-factor; voltage regulation.

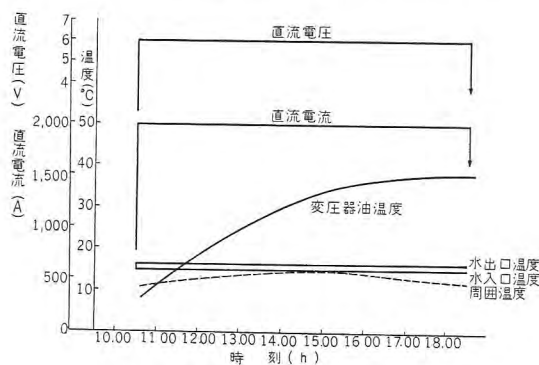


図 7.8 負荷試験成績

Fig. 7.8 Load test result.



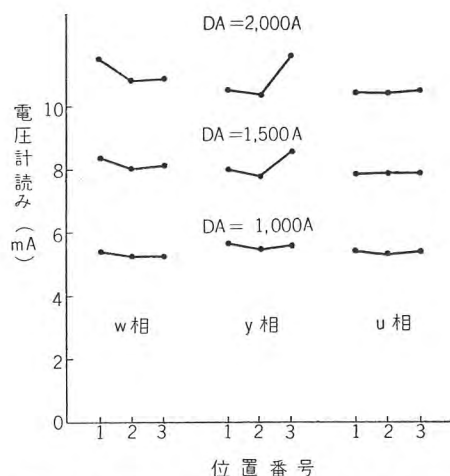


図 7.9 並列ゲルマニウム整流体の負荷分担

Fig. 7.9 Load sharing of parallel germanium rectifier cells.

ある。風冷式に比べて騒音という点からもすぐれており、完全な静止機器といえる。

半導体整流器の電氣的特性は、温度に大なる影響を受けることは、すでに知られるとおりであるが、出入口の水溫の差 $1^{\circ}\text{C}$ 内外であるので、これはほとんど無視しうる。

## 8. メッキおよびアルマイト用電源

ゲルマニウム整流器の特色が、その低電圧における効率の良さによる以上、低電圧、大電流が要求されるメッキ用やアルマイト用の直流電源としては、ゲルマニウム整流器がもっとも好ましいと考えられる。また実際に最近ではメッキやアルマイト用の直流電源はほとんどすべてゲルマニウム整流器に置き換えられるといって過言で

はないであろう。図 8.1 は当社製 6 V, 500 A, 3 kW のメッキ用ゲルマニウム整流器、図 8.2 および図 8.3 はそれぞれ 15 V 500 A および 20 V 1,500 A のいずれもメッキ用ゲルマニウム整流器であり、図 8.4 は 30 V 700 A 21 kW のアルマイト用ゲルマニウム整流器である。上記はいずれもメッキ場の腐食性ガスを考慮して水冷式を採用し、電源用コンタクタ、変圧器その他保護装置などを含めて一つのキュービクル内に納めてあり、小形であるとともに保守がきわめて簡便である。この装置の起動、停止は押しボタンスイッチによって交流側の電磁接触器により行ない、電圧は負荷時電圧調整器によって定格電圧までの任意の電圧にセットすることができる。保護装置としては瞬時的過負荷よりゲルマニウム整流器を保護する速応性ヒューズおよび定常的過負荷を防止する直流過電流継電器をそなえているとともに、電源側より侵入するサージに対してはバリアブルレジスタおよびコンデンサによってゲルマニウム整流器の端子電圧が一定値以上上昇しないよう、完全に保護されている。

## 9. む す び

当社のゲルマニウム整流器 MS-200 形、MS-400 形、および MSF-200 形について電流電圧特性、過負荷耐量について報告するとともに、その応用例として東海電極向けの装置と、菱電機器向けの装置についてのべた。当社のゲルマニウム整流器は逆耐電圧が高く、電流容量が大であり、そのうえ過負荷耐量が大であることが特長である。これらの整流器を使用した東海電極、菱電機器向



図 8.1 3 kW メッキ用ゲルマニウム整流器

Fig. 8.1 Germanium rectifier for electroplating 3 kW.

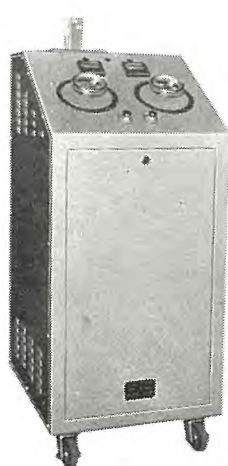


図 8.2 7.5 kW メッキ用ゲルマニウム整流器

Fig. 8.2 Germanium rectifier for electroplating 7.5 kW.

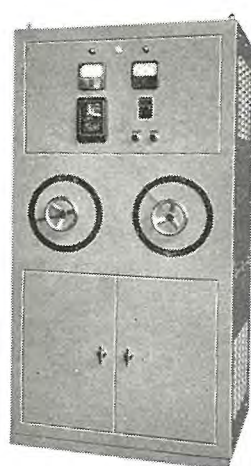


図 8.3 30 kW メッキ用ゲルマニウム整流器

Fig. 8.3 Germanium rectifier for electroplating 30 kW.

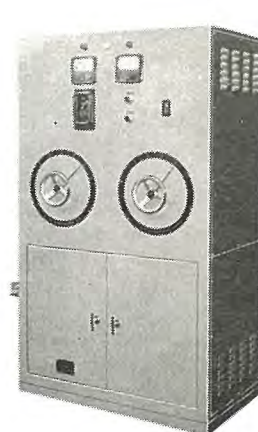


図 8.4 21 kW アルマイト用ゲルマニウム整流器

Fig. 8.4 Germanium rectifier for almite processing 21 kW.

けの装置はすでに稼働しており、現在に至るも何の異常もなく好調に運転しつつある。

終りにのぞみゲルマニウム整流体ならびに整流装置の製作および試験にあたり、終始有益なご指導とご援助を賜った関係各位に厚く謝意を表する。

# 参 考 文 献

- (1) W. Shockley: Theory of p-n Junction, B. S. T. J. 28, 435 (1949)
- (2) たとえば  
W. Shockley: Electrons and Holes in Semiconductors

- p. 245 (1950)
- (3) J. L. Moll: Voltage-Current Characteristic of P-N Junctions; P. I. R. E. 46, 1076, (1958)
- (4) M. B. Prince: Diffused P-n Junction Silicon Rectifiers, B. S. T. J. 35, 661, (1956)
- (5) たとえば  
W. Shockley: Electrons and Holes in Semiconductors p. 314 (1950)
- (6) たとえば  
M. C. Waltz: Electrical Contacts for Transistor and Diodes, Bell Lab Rec 33, 260 (1955)
- (7) H. W. Henkels: Germanium and Silicon Rectifiers P. I. R. E. 46, 1089 (1958)
- (8) 岡, 池田: 電力用半導体整流回路の諸問題 (その 1) 三菱電機 33, (1959) 2, p. 65

## 付 表 三菱ゲルマニウム整流体規格

### (1) MS-200 形

冷却方式 水冷式  
冷却用水量 3l/min  
最高周囲温度 65°C

形 名	せん頭逆方向電圧(注) (V)	最大許容平均出力電流 (A)	最大順方向電圧降下 (V/200A)	過 負 荷 耐 量 (半波波高値, A)
MS-201	50 (最小)	200	0.6	3,300—0.1秒間 2,300—6 秒間
MS-202	100 "	200	0.6	3,300—0.1秒間 2,300—6 秒間
MS-203	150 "	200	0.6	3,300—0.1秒間 2,300—6 秒間
MS-204	200 "	200	0.6	3,300—0.1秒間 2,300—6 秒間
MS-205	250 "	200	0.6	3,300—0.1秒間 2,300—6 秒間
MS-206	300 "	200	0.6	3,300—0.1秒間 2,300—6 秒間
MS-207	350 "	200	0.6	3,300—0.1秒間 2,300—6 秒間
MS-208	400 "	200	0.6	3,300—0.1秒間 2,300—6 秒間

### (3) MSF-200 形

冷却方式 風冷式  
冷却用風速 10m/sec  
最高周囲温度 65°C

形 名	せん頭逆方向電圧(注) (V)	最大許容平均出力電流 (A)	最大順方向電圧降下 (V/200A)	過 負 荷 耐 量 (半波波高値, A, 25°C, 3 m/sec において)
MSF-201	50 (最小)	140	0.6	3,100—0.1秒間 2,200—6 秒間
MSF-202	100 "	140	0.6	3,100—0.1秒間 2,200—6 秒間
MSF-203	150 "	140	0.6	3,100—0.1秒間 2,200—6 秒間
MSF-204	200 "	140	0.6	3,100—0.1秒間 2,200—6 秒間
MSF-205	250 "	140	0.6	3,100—0.1秒間 2,200—6 秒間
MSF-206	300 "	140	0.6	3,100—0.1秒間 2,200—6 秒間
MSF-207	350 "	140	0.6	3,100—0.1秒間 2,200—6 秒間
MSF-208	400 "	140	0.6	3,100—0.1秒間 2,200—6 秒間

### (2) MS-400 形

冷却方式 水冷式  
冷却用水量 3l/min  
最高周囲温度 65°C

形 名	せん頭逆方向電圧(注) (V)	最大許容平均出力電流 (A)	最大順方向電圧降下 (V/400A)	過 負 荷 耐 量 (半波波高値, A)
MS-401	50 (最小)	400	0.6	6,700—0.1秒間 4,500—6 秒間
MS-402	100 "	400	0.6	6,700—0.1秒間 4,500—6 秒間
MS-403	150 "	400	0.6	6,700—0.1秒間 4,500—6 秒間
MS-404	200 "	400	0.6	6,700—0.1秒間 4,500—6 秒間
MS-405	250 "	400	0.6	6,700—0.1秒間 4,500—6 秒間

(34-6-12 受付)



## バ リ ス タ

研 究 所 佐 藤 五 郎\*・石 井 勇 雄\*

## Varistor

Research Laboratory Gorō SATŌ・Isao ISHII

Semi-conductors have come to the front recently and is drawing attention in the electronic world. Silicon carbide—one of the kind—has been known of its rectifying action for a long time. In the Mitsubishi Engineering Laboratory, extensive study has been made on its non-linear characteristics of resistivity at a contacting point of two pieces. As a result, it has become feasible to produce silicon carbide varistors having a coefficient  $\beta$  of non-linear resistance characteristic represented by  $I=KV^\beta$  in the value more than 4 even at low voltage to the extent of 10V. They are applicable to a variety of low voltage equipment. In this rectifiers, in the spring of 1945 1,500V 1,000kW water cooled pumping-up type ignitron rectifiers were developed and tested with load on. Since then they have been supplied to electric railways.

## 1. ま え が き

最近における半導体製品の進歩は、実にすばらしく、電子工学界の花形的役割を演じている。すなわちトランジスタ、整流器および非直線抵抗として、無線、有線通信機および電力機器の全領域にわたって利用され、いちじるしい効果をあげている。現在実用化している半導体は、Se, Ge, Si,  $\text{Cu}_2\text{O}$  および SiC など、前の四者は主として、トランジスタおよび整流器に用いられているが、SiC は非直線抵抗に用いられている。

一般にバリスタとは、電流—電圧の関係がオームの法則に従わない抵抗特性を有するもの、すなわち非直線抵抗特性を有するもののことである。半導体製品は多かれ少なかれ非直線特性を利用しているもので、その特性が非対称性の場合には整流器となり、対称性の場合には非直線抵抗になると称しても過言ではない。

炭化ケイ素は、かつて無線電信のコヒラとして試みられたこともあり、かなり古くから整流作用があることも知られていたようであるが、非直線抵抗体としての実用化は、1929～1930年に J. Slepian<sup>(1)</sup> および K. B. Me-Eachron<sup>(2)</sup> が避雷器に応用したのが最初であろう。同じころ O. W. Lossew<sup>(3)</sup>, I. W. Kurtchatow, L. I. Rusinow<sup>(4)</sup> などによって研究され、その後も多くの人々が、この非直線抵抗特性の究明に努力しているが、まだ満足すべき結果に達せず、その特性を自由に制御し

るまでに至っていない。

現在避雷器に用いる特性抵抗体の動作電圧および電流は、それぞれ数百 V 以上および数百～数万 A で、低電圧用としてそのまま利用することができなかった。材料および成形技術を改良した結果、動作電圧および電流が、それぞれ 10 V 程度および数 mA のときでもよい非直線特性を示すものが得られるようになって、低電圧回路への利用の道が開かれた。

炭化ケイ素バリスタは、異常電圧に対する保護、継電器接点の火花消去、簡単な定電圧回路、電圧変動検出器および電話器<sup>(13)</sup>などに用いられるが、とくに最近 Ge および Si 整流器が、大電流、高電圧用整流装置に用いられるようになり、それに付随した内雷の処理装置として重要性を増してきた。

この報告では、炭化ケイ素同志の接触点の非直線抵抗特性の概要と半導体整流器などの内雷保護装置に使用している円板形バリスタの性能について述べる。

## 2. 炭化ケイ素の接触点の抵抗特性

炭化ケイ素は、カーボランダムという商品名で知られており、天然には全然存在しない人造物で、1886年に E. G. Acheson によって、初めて造られた。SiO<sub>2</sub> (ケイ石またはケイ砂) と C (コークス) とを 1,600～2,200°C に電気炉で加熱して製造する。このものは Si と C との電子対結合であって、比較的低温で生成したものは正方

\* 化学第一研究室



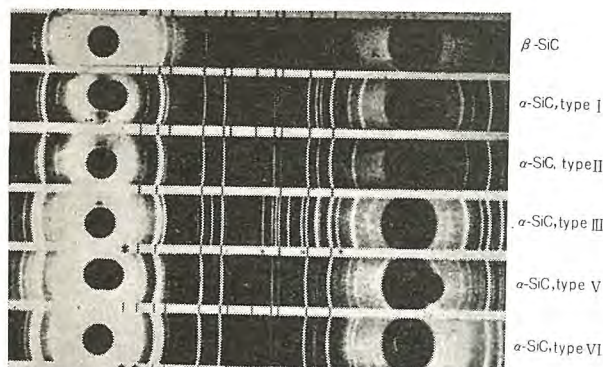


図 2.1 炭化ケイ素の粉末 X 線写真<sup>(5)</sup>  
Fig. 2.1 X-ray powder photographs of the SiC<sup>(5)</sup>.

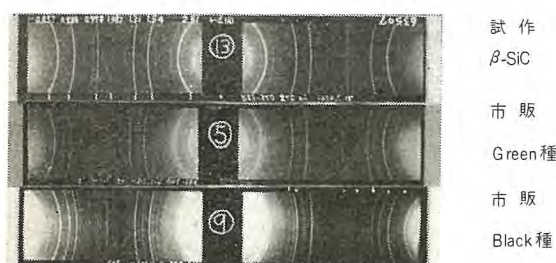


図 2.2 市販炭化ケイ素の粉末 X 線写真  
Fig. 2.2 X-ray powder photographs of the market SiC.

晶形、高温で生成したものは六方晶形に属する結晶形を有し、N. W. Thibault<sup>(5)</sup> によって前者は  $\beta$  形、後者は  $\alpha$  形と命名され、さらに  $\alpha$  形は軸比などの異なる数種の結晶形を含んでいることが明らかにされた。(図 2.1 参照)

炭化ケイ素ははなはだかく、その硬度は 9~9.5 といわれ、ダイヤモンドに次ぐ硬度を有している。常圧では溶融せずに分解昇華するが、R. N. Hall<sup>(6)</sup> の推定によれば、融点は約 2,900°K である。純粋なものは、無色透明であるが、市販のものは着色しており、普通緑色種と黒色種の 2 種に大別されているが、中間のものもある。バリスタ材料としては、一般に黒色種のものが用いられている。着色の原因について J. T. Kendall<sup>(7)</sup> が詳しくしらべた結果、黒色種のほうが Al, Fe の含有量が Si 比較的多いことが明らかになったが、決定的ではなく、または C の過不足とも関係があるようである。国内の市販のものについて、結晶形と色との関係を、X 線回析で調べた結果、図 2.2 に示すように、緑色種のは  $\alpha$  II 形が多く、黒色種のは  $\alpha$  III 形が多いことがわかった。

炭化ケイ素の純粋なものは、 $10^{13}\Omega\text{cm}$  以上の比抵抗を有し、絶縁物であるが、市販のものははるかに低い抵抗値を有しており、黒色種のは数  $\Omega\text{cm}$ <sup>(10)</sup> 以下である。緑色種のはそれよりはるかに高い場合が多い。比抵抗の温度特性に関しても黒色種と緑色種との間

に相違があって、E. Holm<sup>(8)</sup> によれば、図 2.3 に示すように、黒色種のもが変化率が大きいばかりでなく、曲線の形も異なっている。

炭化ケイ素結晶が整流特性をもっており、かつ大体において、黒色種のもが P 形、緑色種のもが N 形を示すことは、2<sup>(9)</sup>、3<sup>(11)</sup>

の人々の実験によって明らかにされている。また Kendall の報告によれば、活性化エネルギーは、N 形は 0.2 eV、P 形は 0.07 eV で N 形のほうがはるかに大きい。このことは緑色、黒色両種の電気的性質の相違に深い関係があるものと考えられる。

図 2.4 に示すような要領で SiC 同志の単一接触点を構成して 60c/s の商用周波を印加すると、図 2.5 の (A), (B), (C), (D), (E) および (F) のような結果を得た。(A), (B), (C) は黒色種の場合で、(C), (D), (E), (F) は緑色種の場合である。また衝撃電圧に対する結果は、図 2.6 に示してある。図中の No. 1~No. 3 は緑色種、No. 4~No. 10 は黒色種である。図 2.7 は、図 2.6 の一部のものを拡大したものである。両種の炭化ケイ素とも、商用周波に対しても衝撃波に対しても非直線性を示しているが、黒色種のほうが、よりよい特性を示しているばかりでなく、同一電流波高値に対する電圧上昇が低い。黒色種間にもそれぞれ多少の相違のあることは、図 2.7 から大体知ることができる。以上のことからバリスタ材

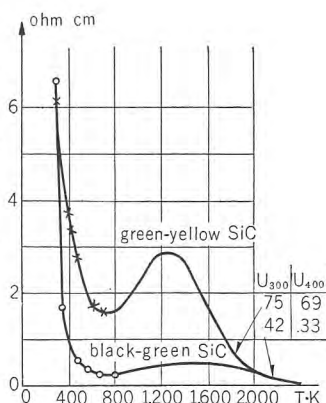


図 2.3 炭化ケイ素の抵抗温度特性  
Fig. 2.3 Resistivity of Silicon Carbide<sup>(8)</sup> as a function of temperature.

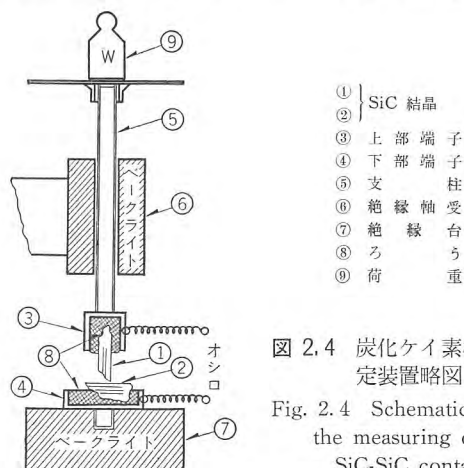


図 2.4 炭化ケイ素相互接触の測定装置略図  
Fig. 2.4 Schematic diagram of the measuring device of the SiC-SiC contact.



料として、黒色種が適しているように思われる。

さて上記の実験結果から、炭化ケイ素同志の接触点が非直線抵抗特性を示すことは明らかであるが、その機構に二つの説がある。一つは接触点に存在する障壁の整流特性によるとし、他は接触点の温度上昇によると主張している。前者に関しては、接触点の炭化ケイ素の結晶面を酸化すると同一電流に対する電圧上昇が高くなり、還元すると低くなることから、表面のシリカの薄層<sup>(3)</sup>であろうといわれていたが、新しい破面でも非直線性を示し、接触点の交流容量が周波数で変化することなどから、固定された薄層ではなく、表面準位による空間電荷形の障壁<sup>(4)</sup>の作用であろうと考えられるに至っている。後者<sup>(8)</sup>では、炭化ケイ素が比較的大きい抵抗温度係数を有しており、接触点の熱容量は微小なため、通電によってその部分が急速に温度上昇し非直線性を示すと考えるのである。

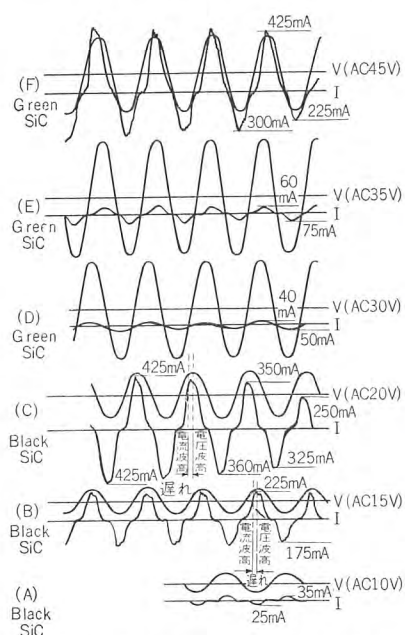


図 2.5 炭化ケイ素相互接触の AC V-I 特性

Fig. 2.5 V-I characteristic of the SiC-SiC contact for AC.

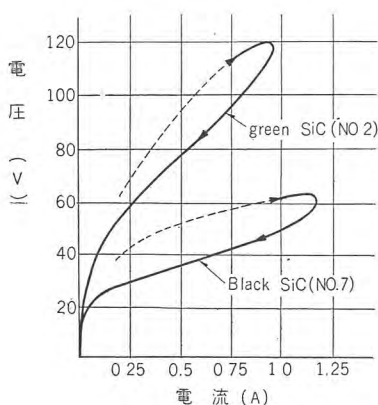


図 2.7 衝撃波 V-I 特性比較図

Fig. 2.7 Comparative diagram of V-I characteristic for impulse.

る。

後者の考え方からすれば、非直線性は対称的であるはずであるが、図 2.5 からわかるように、多くの場合多少非対称的であり、(F) の場合は明らかに非対称である。これは同じような試片でも、両者の材質、結晶方向、形状および障壁の生成状態などが相違するためと考えられる。そうすれば障壁による作用とするのが妥当なようである。このように非対称であることは、バリスタとしては好ましくないが、実際のものは、はなはだ多数の粒子が雑多に排列しているので、総和として方向性が現われず対称的特性を示すのである。

図 2.5 のオシロを見ると、電圧波高値付近における電流波形が少しひずんでおり、電流波高値が電圧波高値より遅れている。この現象は衝撃波の場合はさらにはっきりとしている。図 2.8 はバリスタの衝撃波に対する V-t, I-t curve であり、明らかに電流波高値が電圧波高値より遅れていることがわかる。これは、炭化ケイ素接触点における電流-電圧特性の一般的傾向であって、その結果図 2.7 に示すようなループを描くことになる。

通電電流が増加するにつれておくれがいくちじるしくなることから考えれば、おくれの原因は接触点の温度上昇、すなわち接触点の蓄積エネルギーと思われる。この現象は、障壁論では説明がむずかしく温度上昇説を支持するように見える。

つぎに図 2.5 の (C) を見ると電流波高値が次第に増している。放電電流が大きくなるとこのような傾向を示すもので、この程度のものは放電を中止して放置しておけば復元する。しかしさらに電流を増せば復元せず永久変化を起こし、非直

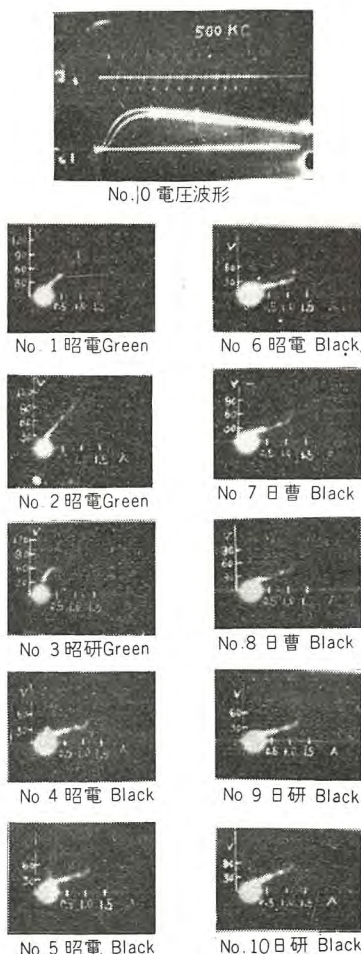


図 2.6 炭化ケイ素相互接触の衝撃波 V-I 特性

Fig. 2.6 V-I characteristic of the SiC-SiC contact for impulse.

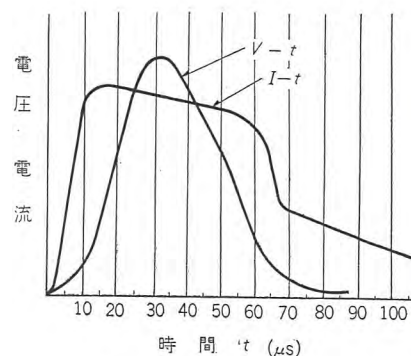


図 2.8 V-t, I-t 曲線

Fig. 2.8 V-t, I-t curve.



線性が悪くなるとともに見掛の抵抗が低くなる。これを接触点の劣化と称しているが、その機構はまだ明らかでない。

以上に炭化ケイ素接触点の非直線性に関する概要を述べたが、現在のところ信頼に値する定説はない。しかし接触点の障壁効果（整流理論）と放電電流による温度上昇の説とをあわせ考えれば、放電現象を大体説明しうるものと思う。

### 3. バリスタの製法および構造

バリスタは、前項に述べた炭化ケイ素接触点の非直線抵抗特性を応用したもので、炭化ケイ素の微粒子と必要な添加剤との混合物に結合剤を配合して圧縮成形後、焼結したものである。すなわち多数の炭化ケイ素粒が雑多に排列したものである。したがってバリスタの非直線特性は、多数の炭化ケイ素接触点の特性の総和であるから、単一接触点がいよ特性を有するばかりでなく、単位体積中の有効接触点の数、電流方向に対する単位高さあたりの直列重なりの数および横方向への並び排列の数、すなわち炭化ケイ素粒の粒度および充填状態も重要な要素となる。

単一接触点の非直線抵抗特性を制御するには、まず炭化ケイ素の材質を選択しなければならない。そのために原料、製造条件および採取する炉内位置などを選定したインゴットをさらに粉碎によって分別した後、洗浄、整粒して、粒状のまま電気試験をして良否を判別し、化学試験および X 線による結晶形の分析を行なって材質の管理にあたっている。

つぎに炭化ケイ素の粒度と電圧上昇の間には、密接な関係があり、F. A. Schwartz<sup>(11)</sup> などが種々実験を行っているが、つぎの式 (3.1) も比較的良好に実験値と一致することがわかった。

$$V = C \frac{1}{\gamma^{2\theta-1}} \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

ここに C……充填量、充填体の断面積、電圧波形および電流密度によって定まる数

$\gamma$ ……粒子の半径

$\theta$ …… $\left(1 - \frac{1}{\beta}\right)$ ,  $\beta$  は式 (4.2) に示した非直線係数

一定量の炭化ケイ素を、定まった断面積を有する絶縁物円壺に一定圧力で充填し、定まった波形の電圧波を印加して、一定電流密度になった時の電圧上昇を各粒度の

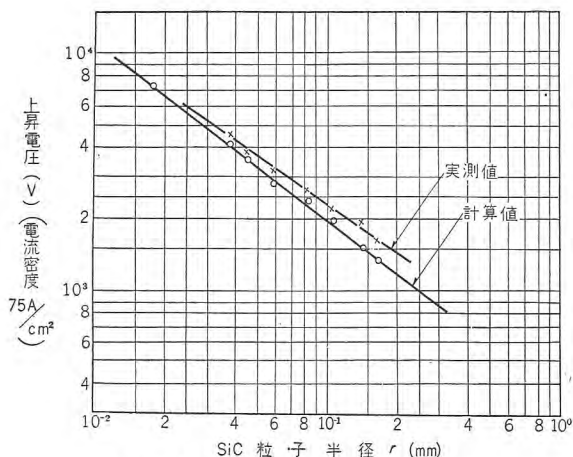


図 3.1 SiC 粒子半径と上昇電圧

Fig. 3.1 Voltage at constant current as a function of particle diameter.

ものについて測定すると図 3.1 に実測値として示したような結果となる。またこの炭化ケイ素の  $\beta$  を用いて、式 (3.1) によって計算した結果は、計算値として示してある。この二つの結果は、割合によく一致しており、式 (3.1) を用いて、各粒度の電圧上昇を算定しても大した誤りはない。またこの曲線の傾斜から、逆に  $\beta$  の値を算出することもできる。

よい特性のバリスタをうるには、現在のところ炭化ケイ素の材質および粒度の選定だけでは不十分であって、非直線性および導電性を制御するために、必要な添加剤を用いている。この添加剤は結合剤と混和して用い、焼成時に化学反応を起こして、添加の目的を達成するものである。

結合剤は、主として Al および Mg のケイ酸塩である。1,000~1,200°C 程度で焼結するとともに、成形混和物に適当な可塑性を与える性質が必要である。

成形にあたっては、混和物の可塑性と成形圧力とが問題になる。炭化ケイ素粒間の有効接触点の密度を大にするには、成形圧力を高くすればよいが、過大な場合は、粒子がぐだけることもあるから、必要な圧縮力は経験によって定めなければならない。成形体は各部とも均等な密度に圧縮されるべきである。不均等な密度分布のものは、有効接触点の密度分布も不均等になり、放電容量が小さくなる。均等な密度分布を有する成形体をうることは大変困難なことであるが、混和物の可塑性と圧縮方法と吟味してほぼ一様なものをうるができるようになった。

焼成条件は、最終的にバリスタの特性を決定づけるもので、焼成温度、時間および炉内のふんい気を一定に保つ必要がある。焼成温度が 10°C 変動しても、特性はか



なり変るから温度およびふんい気の調節に細心の注意を払わなければならない。

バリスタは、以上に述べたように細心の注意のもとに製造されるのであるが、なお内部に不安定な接触点が存在し、使用中に特性が変動することがあるので、かかる不安定な部分を安定化するため衝撃電圧を印加して化成処理を行なうのである。化成時の放電電流の大きさは形別によって異なり、その波高値は、表 3.1 に示したサージ電流値の 3 倍程度である。

焼成品はよく焼結しているから、吸湿はしないが、さ

表 3.1 円板形バリスタ素子の形別仕様

形 別	寸 法		DC 連続通電			サ ー ジ		
	外径 (mm)	厚さ (mm)	定 格 電 圧 $E$ (V)	初 期 電 流 $I_s$ (mA)	容 量 (電力) $W$ (W)	制 限 電 圧 $3E$ (V)	電 流 波高値 (A)	吸 収 エ ネ ルギ (J)
VA-3203	30	2	20	25	0.7	60	6	60
-3304	"	3	40	25	1.5	120	"	90
VA-5204	50	2	40	37	2.5	120	9	170
-5407	"	4	70	28	3.0	210	7	250
-5510	"	5	100	20	3.0	300	5	320
VA-8407	80	4	70	57	5.5	210	14	900
-8610	"	6	100	50	6.5	300	12	1,200
-8815	"	8	150	40	7.5	450	10	1,500

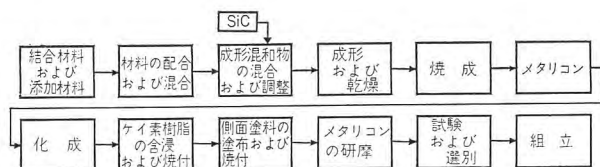
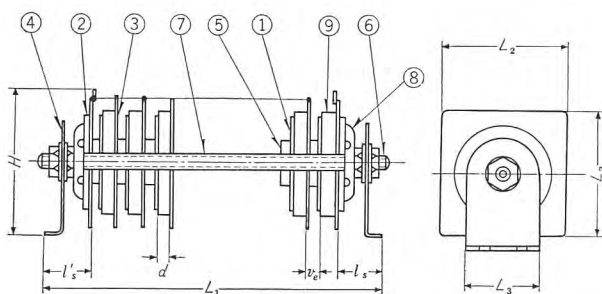


図 3.2 バリスタ製造工程図

Fig. 3.2 Flow chart of process for fabricating varistors.



図 3.3  
円板形バリスタ素子  
Fig. 3.3  
The disk type varistor elements.



品番	品 名	ve	ls	ls'	H	L2	L3
1	円形放熱フィン	7.0	38	39	137	110	60
2	絶 縁 板	5.8	20	21	87	70	40
3	角形放熱フィン	4.0	15.5	16.0	65	50	30
4	保 持 脚						
5	間 隔 子						
6	軸						
7	絶 縁 管						
8	スプリングワッシャ						
9	エ レ メ ン ト						

図 3.4 VA 形バリスタの組立図

Fig. 3.4 Structural drawing of the type VA varistors.

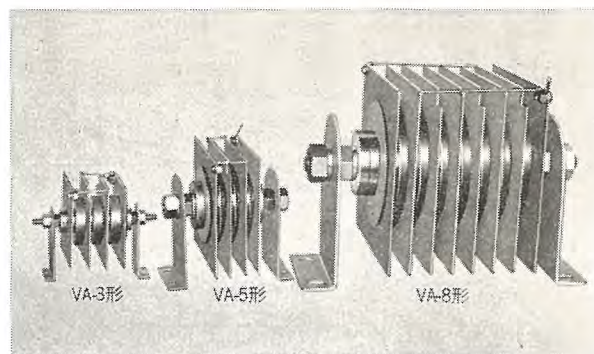


図 3.5 VA 形バリスタ

Fig. 3.5 The type VA varistor.

らに防湿効果を強化するため、ケイ素樹脂を真空含浸して焼付を行なっている。

現在当社で製作しているバリスタの製造工程は図 3.2 に示す通りで、円板形バリスタ素子の標準形は図 3.3 の写真に、形別および寸法は表 3.1 に示してある。

バリスタ素子は、冷却翼を付して図 3.4 および図 3.5 の写真のように組立てられるが、素子は必要に応じ直列または並列に結線される。その組立寸法は、図 3.4 の付表に示しあるが、 $L$  はバリスタ素子の厚さ  $d$  (表 3.1 参照) と配列枚数によってきまる。

## 4. バリスタの特性

### 4.1 電圧—電流特性

バリスタの電圧—電流特性 (以下  $V-I$  特性と称す) は、図 4.1 に示すようなものであって、近似的には下記式 (4.1) または式 (4.2) で示される。

$$V = CI^\alpha \dots \dots \dots (4.1)$$

$$\text{または } I = KV^\beta \dots \dots \dots (4.2)$$

ここに  $V$ …印加電圧

$I$ …電流

$C, K$ …定数で  $C$  は電流 1A のときの電圧で、 $K$  は電圧 1V のときの電流値で示される。

$\alpha, \beta$ …非直線性を示す係数で、 $\alpha = \frac{1}{\beta}$  なる関係を有している。

上記二つの式のうち、どれを用いてもよいが、実用的には、式 (4.2) を用いるほうが便利であるから、以下では主として  $\beta$  を用いて記述する。

図 4.1 からわかるように、 $\beta$  の値は印加電圧または電流密度によって変動するもので、微小電流および大電流領域では、ほぼ 1 に近づく傾向を示している。すなわち式 (4.2) における  $\beta$  の値は、実際は変数であって、印



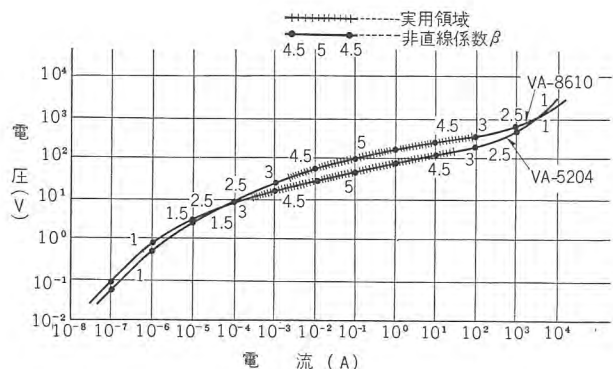


図 4.1 V-I 特性曲線

Fig. 4.1 The voltage-current characteristic of the type VA varistor.

加電圧の関数となるのであるが、バリスタの実用においては、印加電圧の変動がそれほど大きいものではなく、最大5倍で普通3倍程度と考えられるので、図に示すように応用領域をきめれば、その範囲ではほぼ一定とみなしうるから、 $\beta$ を定数と考え、V-I特性を式(4.2)で示して実用に供しても、たいした支障はないのである。

バリスタの内部回路を模型的に示せば、図4.2のようになると考える。すなわち、低電圧では  $R_1$  は非常に大きく、電流は主として  $R_2, R_3, R_{B1}$  および  $R_{B2}$  の合成抵抗を通じて流れるので、直線抵抗の性質を示すが、電圧が高くなるにつれて  $R_1$  が小さくなり、ある電圧以上では、 $R_1$  を流れる電流が支配的となる（この領域では  $R_{B1}$  および  $R_{B2}$  は他の3者にくらべてはるかに低い値であ

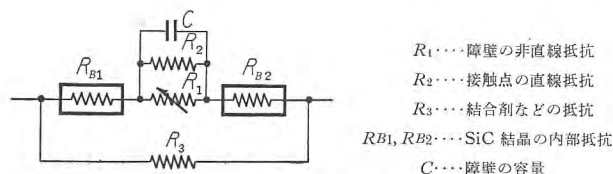


図 4.2 バリスタ内部回路の模型図

Fig. 4.2 Model diagram of the inner circuit SiC varistor.

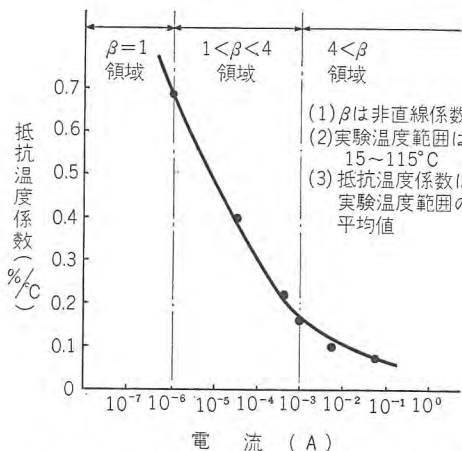


図 4.3 バリスタ電流と定電流抵抗温度係数

Fig. 4.3 Thermal coefficient of the constant current resistivity as a function of varistor current.

る)。この領域ではバリスタの V-I 特性は、 $R_1$  の特性によるので、非直線的になり、ある範囲では  $\beta$  の値がほぼ一定となる。さらに高い電圧では、 $R_1$  がさらに低い値となり、やがて  $R_{B1}, R_{B2}$  と同程度またはそれ以下となり、バリスタの抵抗は  $R_{B1} + R_{B2}$  によって支配されることになるので、 $\beta$  の値が1に近づくものと考えられる。 $R_1$  の非直線性に関しては2項に述べたとおりである。図中の  $R_1$  と  $R_2$  とは同一のもので、低電圧では  $R_2$  のような性質を示し、ある電圧以上では  $R_1$  のような性質を示すと考えてもよいが、模型としては分離したほうがわかりよいように思うし、図4.3に示すように、抵抗の温度特性も異なるから、導電機構も異なるものと考え二つにわけて示したのである。（温度特性の項参照）

現在当社で製作している標準円板形バリスタ素子の定格は、表3.1に示してある。表3.1に示した各バリスタ素子の非直線係数  $\beta$  の値は4~5である。 $\beta$  の値が5以上のものも得られるが、 $\beta$  が大きくなるにつれて電流耐量が小さくなるので、サージに対する保護装置としては  $\beta$  があまり大きいものは適当でない。

#### 4.2 温度特性

バリスタは、負の温度特性を示し、その変化率は比較的大きい。このことはバリスタの使用上重要なことであって、使用上の限界は吸収電力による温度上昇の限界と一致する。種々実験の結果、バリスタの温度が70°C以下なら、3.1に示したサージ・エネルギーを処理する能力があることがわかったので、連続通電時のバリスタの温度上昇の限度は、裕度を考え65°C程度にすべきである。サージの保護装置として使用するバリスタは、つねに定電圧が印加されているから、温度特性の変化率の大きいものは、加速的に温度が上昇し、保護能力が低下するか

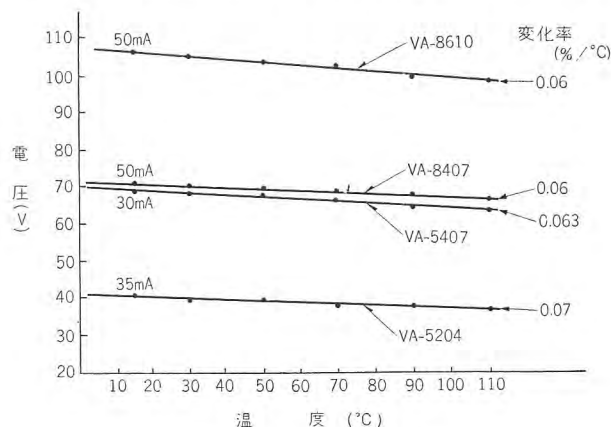


図 4.4 定電流温度特性

Fig. 4.4 Voltage at constant current as a function of temperature.



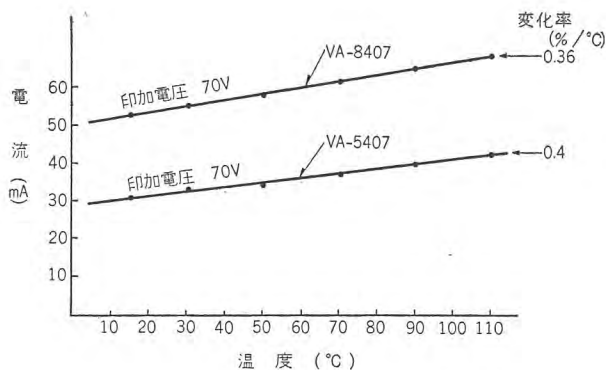


図 4.5 定電圧温度特性

Fig. 4.5 Current at constant voltage as a function of temperature.

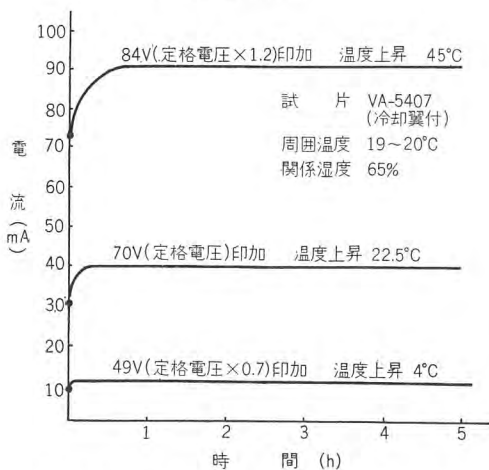


図 4.6 連続通電時の電流増加と温度上昇

Fig. 4.6 Current and temperature rise when continuously applied constant voltage on the type VA varistor.

ら、なるべく変化率の小さいものを選ばなければならない。円板形バリスタの温度特性の 2, 3 の例を示せば、図 4.4 および図 4.5 のようになる。図 4.4 は、定電流における電圧変化、図 4.5 は、定電圧の場合の電流変化の様子を示したものである。前者の変化率は約  $0.07\%/^{\circ}\text{C}$  で、後者のそれは約  $0.4\%/^{\circ}\text{C}$  である。この値は、これまでの報告<sup>(14)</sup>のものよりは小さい値である。この値は定格電圧付近におけるもので、電圧または電流が変るとこの値も変動することは、前記の図 4.3 より明らかである。

#### 4.3 連続通電特性

さてこのバリスタの定電圧連続通電時の電流増加と温度上昇の一例を示せば、図 4.6 に示すとおりである。定格電圧の場合の温度上昇は  $22.5^{\circ}\text{C}$  であるから、周囲温度  $20^{\circ}\text{C}$  の場合は十分余裕をもっており、1.2 倍の電圧に対しても耐えうるのであるが、周囲温度が  $40^{\circ}\text{C}$  程度の場合は、定格電圧以上での使用は困難になる。周囲温度が  $40^{\circ}\text{C}$  をこす場合は、定格電圧以下の端子電圧で使用するしなければならない。

バリスタ・佐藤・石井

#### 4.4 湿度特性

バリスタは、通常外部に露出して使用するので、耐湿性が良好でなければならない。前にも述べたように、バリスタ素子は、 $1,000^{\circ}\text{C}$  以上で焼結しているの、吸湿性はほとんどないが、炭化ケイ素接点とは微妙な構造であるから、十分保護する必要があるの、さらにケイ素樹脂で処理している。耐湿性に関する試験結果は、図 4.7 に示すとおりで、湿気によってほとんど影響されないことを示している。

当社で製作し、実用化している炭化ケイ素バリスタの静特性は、大体上述のようなものである。実際の回路における動作および成果については、本誌の「電力用半導体整流器回路の諸問題、岡久雄」に述べてあるから参照していただきたい。

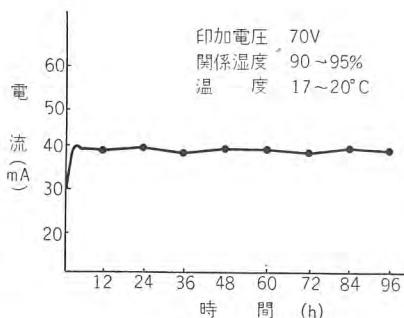


図 4.7 湿度特性

Fig. 4.7 Current at constant voltage as a function of humidity.

#### 5. む す び

炭化ケイ素非直線抵抗を改良し、低電圧用バリスタとして、実用に供し、一応その目的を達しているが、必ずしも満足すべきものではない。

バリスタは、今後各種電気装置にますます利用されるようになることが予期されているから、炭化ケイ素の研究とあわせて、その相互接点の導電機構を究明するとともに、製造方法も改良して、すぐれた非直線性を有しかつ安定でじょうぶなものを得て、各方面の要望に答えたいと考えている。

#### 参 考 文 献

- (1) T. Slepian: A. I. E. E. Lightning defence Book (1929) P. 179
- (2) K. B. McEachron: G. E. Review 33 No. 2 (1930) P. 92
- (3) O. W. Lossow: Phys. Zeits. 30 920 (1923), 32, 692 (1931)
- (4) I. W. Kurtschatow, T. Z. Kostina, L. I. Ruinow: Phys. Zeits. d. Sow 7 129 (1935)
- (5) N. W. Thibault: The American Mineralogist 29 (1944) No. 9 and 10
- (6) R. N. Hall: T. Appl. phys. 29 No. 6, (1958)
- (7) J. T. Kendall: T. Chem. Phys. 21 No. 5, (1953) P. 821
- (8) E. Holm: T. Appl. Phys. 23 No. 5, (1952) P. 509
- (9) 中戸川: 工化誌 54 巻, 7 冊 (昭 26) P. 441
- (10) W. Sasaki: T. Phys. Soc. Japan 16 No. 3, (1952) P. 107
- (11) F. A. Schwerty, T. T. Mazenko: T. Appl. phys 24 No. 2, (1953) P. 1051
- (12) 山川, 木村: 早稲田電気工学会雑誌 32 巻 2 号 (昭 32 年) P. 218
- (13) H. F. Dienel: Bell Lab. Record November (1956) P. 407
- (14) 山川, 木村: OHM 臨増「最近の半導体とその応用号」(昭和 33 年 3 月) (34-6-9 受付)

## 電力用半導体整流器回路の諸問題 (その 3)

研 究 所 岡 久 雄\*

### Considerations on Power Semiconductor Rectifier's Circuits (Part 3)

Research Laboratory Hisao OKA

It is one of important problems on semiconductor rectifiers to protect each element from the breakdown of insulation at excessive abnormal voltages. The writer has made extensive experiments on abnormal voltages apt to be induced on actual rectifier circuits and thorough-going study on methods to protect the rectifier elements. It has been verified that the abnormal voltages are effectively suppressed through a proper connection of lightning arresters, CR absorbers and non-linear resistors, so that all rectifier cell assemblies used on the circuit are relieved of danger.

#### 5. 異常過電圧に対する保護

半導体整流器では各整流体を過大な異常電圧による絶縁破壊より保護することが一つの重要な課題である。

現状のシリコンおよびゲルマニウム整流体のサージ耐量についてはすでに本稿 2.4 節<sup>(1)</sup> で述べたように、いずれも若干の固有差があるため、一概にその安全限界を定めることは困難である。すなわち多数の整流体は、100～500  $\mu$ s 程度の波長をもつサージ電圧に対してその公称 P.I.V. の 2～5 割増の電圧まで耐えるが、中には公称 P.I.V. をわずかにこえたサージ電圧により絶縁破壊する整流体もある。そのため現状ではいかなる場合も 1 個あたりの整流体にかかる異常電圧の波高値がつねにその公称 P.I.V. 以下になるような回路構成をとることが安全である。

そのためには回路に発生することを予想される最大異常電圧に対し、使用する整流体の P.I.V. および直列枚数を十分安全であるように選定するか、または回路に発生あるいは移行してくる異常電圧を、なんらかの方法によってすべての整流体にとって危険でないまでに抑制または吸収することが必要である。

##### 5.1 整流器回路における異常電圧

実際の半導体整流器について予想される異常電圧としてはつぎのものが考えられる。

a. 交流電源開閉異常電圧 (交流シャ断器の開閉、交

流側ヒューズの溶断)

b. 直流電流シャ断時の異常電圧 (直流シャ断器の開閉、直流側ヒューズの溶断)

c. 交流電源側よりの外来サージ (雷、開閉サージその他)

d. 直流負荷側よりの外来サージ (並列器の直流シャ断、負荷におけるノッチ切換え、雷、その他)

大体上記のような各種の異常電圧が考えられるが、その発生または移行の状況は回路の状態や使用するシャ断器変圧器などの使用機器によって異なってくる。したがってわれわれはつぎに述べる異常電圧録数器を用い実際の整流器回路ではどのような大きさの異常電圧がどのような確率またはひん度であらわれているものかを調べた。

##### (1) 異常電圧録数器

本器はとくに半導体整流器用として比較的低压回路における異常電圧を録数するように製作された異常電圧録数器である。

すなわちあらかじめ設定された比較電圧以上の異常電圧が入力側よりはいってきた場合は、かならずその進入回数だけ録数する。図 5.1 は本器の回路構成を簡単に示す略図である。入力端子よりはいってくるサージ電圧はまず CR 分圧器により適当に分圧され比較回路にはいるが、もし入力が交流回路側からの場合は比較回路にはいる前に全波整流回路を通し、相数いかににかかわらず、一方向の一つの入力にまとめる。直流回路側より入力を



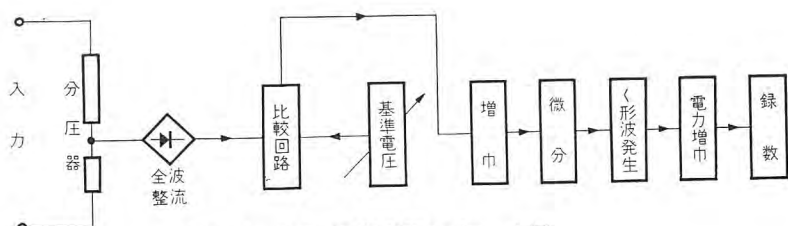


図 5.1 異常電圧録数器のブロック図

Fig. 5.1 Block diagram of abnormal voltage counter

とる場合は直接比較回路に入れてもよい。比較回路は双二極管 6H6—GT を用いたもので、分圧された入力がかじめ設定された基準電圧より大きい時だけ、その差分を次の増巾回路に送る。ここで十分増巾されたのち、微分回路できわめて細いパルス電圧を作り、そのパルスでつぎの one shot multivibrator を働かせ一定の巾のく形波電圧を発生し、それを電力増巾して電磁式録数器に入れる。この電磁式録数器は科研製のもので入力として 200 V 6 ms~400 V 3ms のく形電圧を要するものである。

この異常電圧録数器は 1 秒間に 60 回の録数速度をもち、また  $1\mu\text{s}$  から 20 ms までの範囲の波長のサージに対しほとんど同一感度で録数することができる。

## (2) 交流電源開閉時の異常電圧

変圧器を通し整流器電源を開閉するときは、回路や機器の  $L, C$  によって過渡異常電圧を発生する。

電源閉路時の過渡異常電圧はその回路に急激に電位が印加されるため生ずる電位振動にもとづき、その振動数は大体数 100 c/s から数 kc までである。また変圧器二次側にあらわれるその過渡異常電圧の大きさは、投入位相や一次二次間の移行の状態によって異なる。この場合の異常電圧発生機構の詳細については、その方面の専門書<sup>(2)</sup>にゆずるが、とくに一次二次間の巻線比の大きい変圧器を使用するときは、一次側から二次側に電位が静電的に移行し、そのため二次側には巻線比にしたがわないかなり大きい異常電圧があらわれることがある。この静電移行のない場合は、電源投入時の二次線間にあらわれる異常電圧はおおむね常時電圧波高値の 2 倍までである。

また三相回路の場合は電源投入時の各相の投入位相が厳密に一致することはないから、最初の 2 相が閉路した時と最後の 1 相が閉路された時の 2 回この過渡振動が起りうる。

電源開路時の異常電圧はおもに負荷電流あるいは変圧器の励磁電流を急速にシャ断することによって生ずるものであり、負荷の力率、変圧器の種類はもとよりシャ断

器のシャ断特性によってその出方が大きく異なってくる。誘導性の大きな負荷をシャ断する時や、無負荷状態で変圧器励磁電流を切る時に大きな異常電圧が発生しやすい。電源投入時の過渡的な励磁電流は定常時に比べきわめて大きくなることから、電源の投入と開放がごく短時間の差で

行なわれる時は、その開放位相によってきわめて大きな励磁電流を切ることがあり、したがって大きな異常電圧を発生することがある。

図 5.3 は比較的小容量の単相変圧器を用いた模擬回路について異常電圧録数器により電源開閉時の異常電圧発生状況を測定した記録である。電源開閉はすべて図 5.2 のように刃形開閉器で行なっているから実際の大容量回

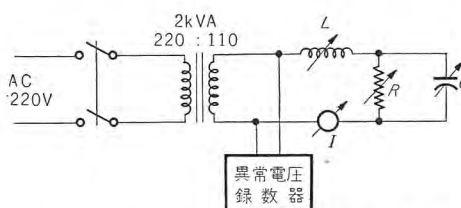


図 5.2 電源開閉異常電圧発生模擬回路

Fig. 5.2 Analogous circuit of abnormal voltage generation by switching power supply.

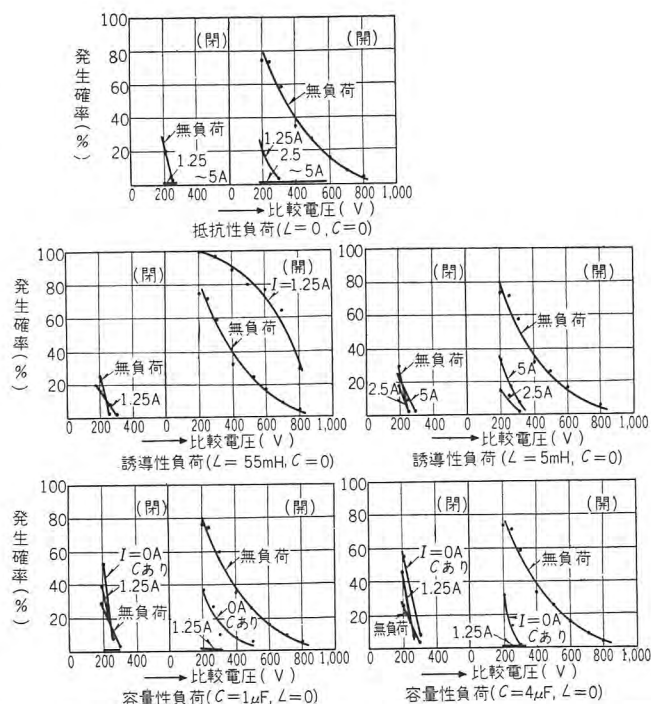


図 5.2 の模擬回路における二次側の常時電圧波高値は約 155 V である

図 5.3 単相模擬回路における異常電圧発生状況

Fig. 5.3 State of abnormal voltage occurrence on single phase analogous circuit.



路を O.C.B あるいはその他のシャ断器で開閉する場合とは若干異なるが、大体の傾向はわかる。まず電源閉路時についてこの実験結果を見ると、抵抗性または誘導性負荷では無負荷状態で投入する時よりも異常電圧の出方が大きく、とくに抵抗性負荷ではわずかも負荷がつながっている時はほとんど異常電圧はあらわれない。このことは負荷電流が流れることによって異常電圧が吸収されるためである。負荷側に C がある時はむしろ無負荷時より異常電圧が大きく出ることがあるが、それは C の容量によって異なる。しかしいずれの場合も電源投入時の異常電圧は大部分常時波高値の約 2 倍までである。このことは静電移行がほとんど行なわれていないことを示している。

つぎに電源開路時については、抵抗負荷の場合は無負荷時がもっとも大きく出、わずかも負荷が流れている状態で切った時はほとんど異常電圧は出なくなる。このことは抵抗負荷時の開路異常電圧はおもに変圧器励磁電流シャ断によるものであり、負荷がつながっていればそれがただちに吸収されることを示している。誘導性負荷の場合は  $L$  の大きさによって左右されるが、 $L$  が小さい時はむしろ無負荷時のほうが大きくなる。容量性負荷の電源開放時には  $C$  が大きいほど異常電圧は出にくくなる。

図 5.4 は三相変圧器を用いた模擬回路について上と同様な測定を行なった結果である。三相の場合は、前述のように投入あるいは開放の位相の不ぞろいから 1 回の開路または閉路について 2 度ずつ異常電圧が発生している。しかし負荷の種類による開閉異常電圧の出方の差は単相の時とほとんど同じ傾向を示している。

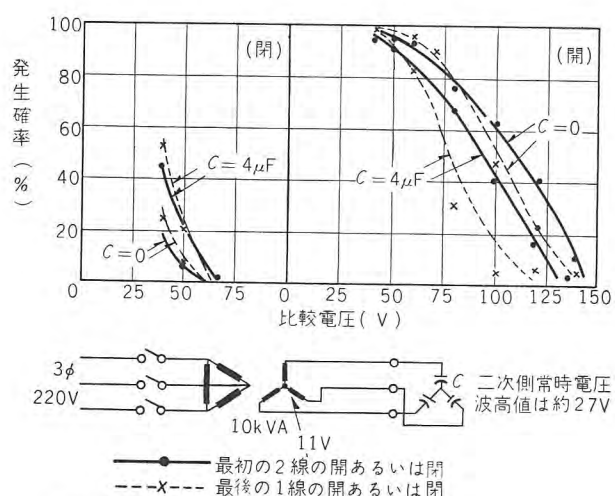


図 5.4 三相模擬回路における異常電圧発生状況  
Fig. 5.4 Occurrence of abnormal voltage on 3 phase mimic circuit.

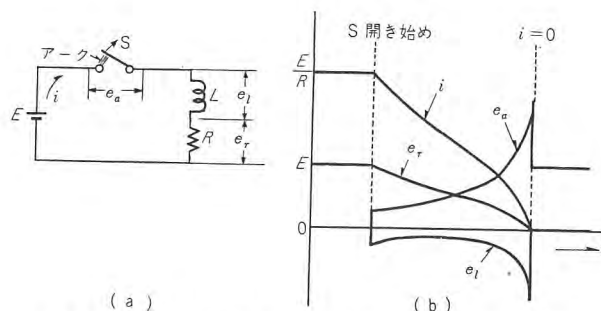


図 5.5 アークをともなう直流電流シャ断時の過渡現象  
Fig. 5.5 Transient phenomena of DC current interruption accompanying arcs.

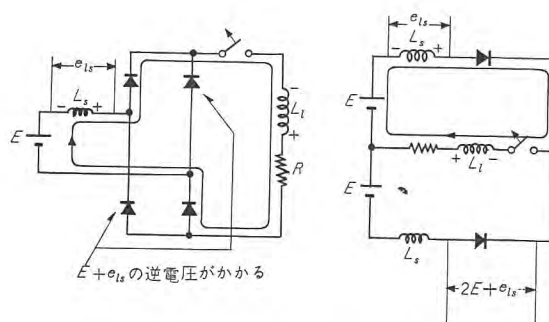


図 5.6 整流回路の直流シャ断  
Fig. 5.6 DC interruption of rectifying circuit.

### (3) 直流電流シャ断時の異常電圧

誘導性負荷に流れる直流電流をシャ断するときは、いわゆる  $L di/dt$  の電圧が発生するが、この時の異常電圧の出方は回路の  $L$  とシャ断器のアーク特性によって決まってくる。いま図 5.5 (a) の回路で直流をシャ断するときの波形の一例は同図 (b) のようになる。すなわち  $L$  の両端および開極しつつあるスイッチの両端に大きな電圧が表われる。

実際の整流器回路では図 5.6 のように図 5.5 (a) の  $L$  に相当するものは負荷側のインダクタンス  $L_l$  と交流電源側の、インダクタンス  $L_s$  とに分れる。したがって直流電流を急速にシャ断する時の異常電圧は整流器の直流出力側に表われ、非導通期間にある整流体に常規値以上の高い異常電圧が印加されることになる。過負荷保護用高速度シャ断器の開放、高速度ヒューズの溶断、直流負荷のノッチ切換えなどによる異常電圧はすべて上述のような機構によって発生する。

### (4) 外来の異常電圧

外から進入する異常電圧としては雷およびその整流器に接続している交流電源側または直流負荷側の機器によって発生する異常電圧の移行がある。

雷電圧には誘導雷と直撃雷との 2 種類があり、一般の



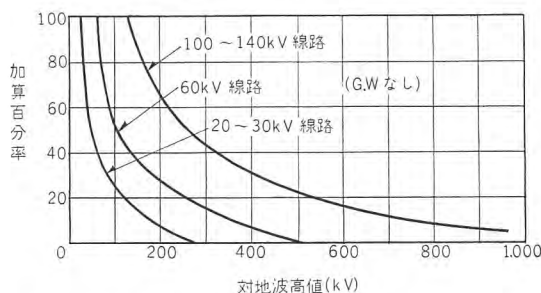


図 5.7 送電線における雷電圧記録 (電工ボケより)

Fig. 5.7 Record of lightning voltage on transmission line.

送電線における雷電圧については多くの実測例がある。たとえば図 5.7 はその一例であり、一般に送電電圧の高いほど雷電圧も大きく記録されている。しかし半導体整流器につながる電源または負荷に大きな雷電圧が進入する恐れがある所には必ずその電源電圧および負荷電圧に対し適当な避雷器がはいっているから、実際の半導体整流器ではこの避雷器の放電開始電圧について考えればよいことになる。このことは雷以外の他の外来サージに対しても同様である。ただし雷の場合はその波長が数 10~100 $\mu$ s までであるのに対し、接続機器よりの外来サージ、とくに直流側系統において大電流シャ断を行なった場合などにはきわめて波長の長い数 ms~10 ms 以上のものが進入することがある。雷のように波頭の急しゅんなサージは電源変圧器の一次から二次に静電的に移行することが大きく、また直流側の電位分布も平等にならないから、この点には注意を要する。

## 5.2 異常電圧の抑制または吸収

上に述べたような各種の異常電圧によって半導体整流体が絶縁破壊しないようにするのに、整流体の P.I.V. や直列枚数をつねに十分安全であるように選ぶのも一つの方法ではある。しかし設備の経済性からは、異常電圧をある程度抑制または吸収し、その後において整流体を安全に選ぶほうが賢明である。

### (1) CR アブゾーバ

これは急しゅんなせん頭波電圧を CR 時定数によって

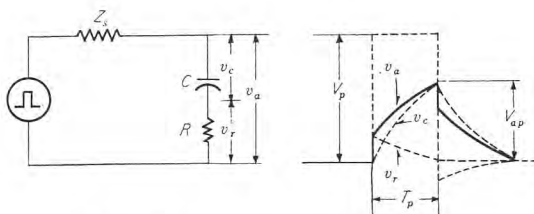


図 5.8 CR アブゾーバの原理的説明図

Fig. 5.8 Principle of CR absorber.

波高値を抑制するものである。いま図 5.8 によって原理的な説明をする。  $V_p$  はく形波とみなした異常電圧の最大値、  $T_p$  はその波長 (時間巾)、  $Z_s$  は異常電圧発生源から CR アブゾーバまでのサージインピーダンスである。アブゾーバの効果としては  $V_p$  に比しアブゾーバの電圧上昇の最終値  $V_{ap}$  を小さくすることであるから、  $C$  を大きくし  $R$  を小さくすることはアブゾーバの吸収効果をよくするが、極端に  $C$  を大きくし  $R$  を小さくすると CR アブゾーバに流れる電流が大となり、それだけ電源に負担をかけることとなる。したがって CR アブゾーバの定数の選定は、  $R$  と  $Z_s$  との比を小さい値にとどめながら、  $C$  と  $(Z_s + R)$  との時定数が  $T_p$  に対し十分大

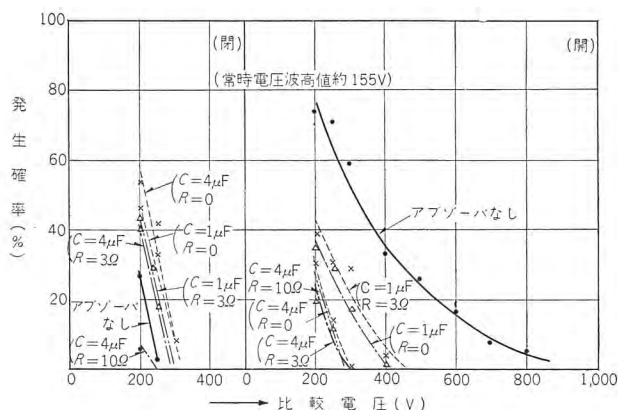


図 5.9 単相回路無負荷開閉時の CR アブゾーバの効果の一例

Fig. 5.9 One example of the effect of CR absorber at no load switching of single phase circuit.

きくなるようにすればよい。

いま前節で述べた電源開閉時の異常電圧を CR アブゾーバにより吸収した時の実験例を図 5.9 に示す。この結果を見ると電源開放時の異常電圧は CR アブゾーバによりよく抑制されており、しかもその効果は  $C$  が大きいほど、また  $R$  が小さいほど良くなっている。しかし電源投入時には CR アブゾーバによってむしろ異常電圧の出方が大きくなることもある。これは 5.1 (2) で述べた電源投入時の異常電圧で容量性負荷の場合と同じ傾向である。したがってこの実験例では CR アブゾーバは電源開放時には効果があるが、電源投入時にはむしろ逆効果をもたらすようにも見える。しかしこの場合は電源投入時の異常電圧が一次から二次へ静電移行しておらず、いずれの場合も二次側の常時電圧波高値の 2 倍以上の異常電圧は出ていない。もし静電移行があるような場合は、それを抑制する意味において電源投入時にも CR アブゾーバの効果があらわれてくる。



## (2) 非直線抵抗バリスタ

CR アブゾーバは CR 時定数によって異常電圧の波高値を押えるのに対し、非直線抵抗バリスタはその非直線抵抗をもって異常電圧の頭を切りとる作用をする。バリスタについては本誌で別に紹介されているから詳述は避けるが<sup>(3)</sup>、その非直線特性は次式のとおりである。

$$E=KI^\alpha \dots\dots\dots (5.1)$$

$$I=CE^\beta \dots\dots\dots (5.2)$$

$$C=1/K^\alpha, \beta=1/\alpha \dots\dots\dots (5.3)$$

ただし  $E$ : バリスタに印加される電圧 (V),  $I$ : バリスタに流れる電流 (A)  $\alpha, \beta, K$  および  $C$  はそれぞれの常数, このバリスタの非直線係数  $\alpha, \beta$  は

$$\alpha=0.2\sim0.25$$

$$\beta=4\sim5$$

である。

式 (5.1) あるいは式 (5.2) よりわかるように、バリスタの両端に常時印加されている電圧より大きな電圧がかかろうとすると、バリスタを流れる電流は大きな割合でふえるから、途中のインピーダンス降下を大きくし異常電圧を抑制することができる。前と同じようにバリスタによる異常電圧の吸収効果の原理的説明を図 5.10 によって行なう。いまく形波と考えた異常電圧波高値を  $V_p$ 、異常電圧発生源からバリスタまでのサージインピーダンスを  $Z_s$  とすると図 5.10 のように、バリスタに  $I_B$  の電流が流れることによりバリスタの端子間には  $V_{Bp}$  の電圧しかかからない。しかし同じ  $V_p$  に対し  $V_{Bp}$  および  $I_B$  の大きさは  $Z_s$  の大きさに左右される。

バリスタの定格としては連続通電時の許容端子電圧、電流とサージ印加時の制限電圧および電流の波高値およびその時の吸収エネルギーで示される。この時の吸収エネルギーというのは電圧電流の価が制限されているから結局サージの波長に関連してくる。

いま連続通電時の許容端子電圧 100V の定格のバリスタを例にとる。このバリスタのサージ印加時の制限電圧、電流はそれぞれ 300V, 6A, またその時の吸収エネルギー

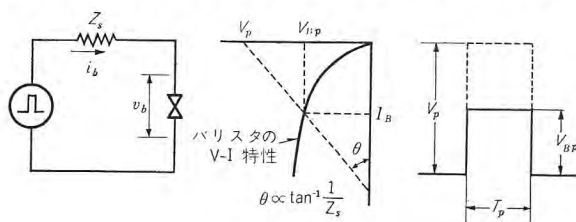


図 5.10 バリスタの原理的説明図  
Fig. 5.10 Principle of varistor.

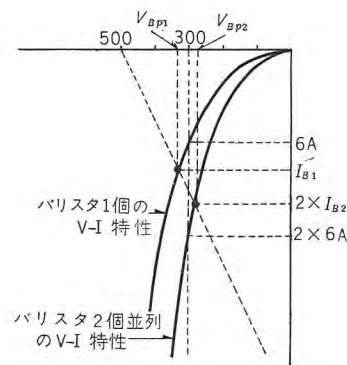


図 5.11 バリスタ並列接続の効果  
Fig. 5.11 Effect of parallel connection of varistors.

は 900J であるとする。このバリスタに図 5.11 のように  $Z_s=20\Omega$  で、 $V_p=500V$  のサージが印加されるとすると  $V_{Bp}$  は 300V をこえたがって  $I_B$  も 6A をこえる。ゆえにこの場合はこのバリスタの定格をこえバリスタを劣化させることになる。したがってこの時はバリスタを 2 個並列につなぐ必要があり、そうすることによってバリスタの  $V_{Bp}$  は 300V 以下、また 1 個あたりの  $I_B$  も 6A 以下となる。

実際の半導体整流器におけるバリスタの素子の種類および直列枚数の選定はつぎの要領で行なう。まず連続通電時のバリスタ素子 1 個あたりの電圧が、その許容電圧以下であることと、バリスタによる全体の制限電圧が、いかなるサージに対しても半導体整流体にとって安全であるように抑制する目標の電圧波高値以下であることという二つの条件から、バリスタ素子の種類および直列枚数が決められる。並列枚数は図 5.11 の説明からわかるように予想される異常電圧の最大波高値とその発生源からバリスタまでのサージインピーダンスと、素子のサージ吸収時の制限電圧および電流の波高値によって決められる。図 5.12 はバリスタによる異常電圧吸収効果を調べた一実験例である。

## (3) CR アブゾーバとバリスタとの比較

CR アブゾーバは  $C$  の充電時定数によりサージを抑

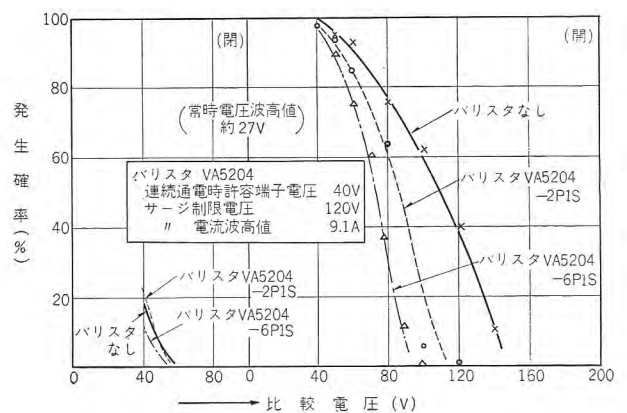


図 5.12 三相回路無負荷開閉時のバリスタの効果の一例  
Fig. 5.12 One example of the effect of varistor at no load switching of three phase circuit.



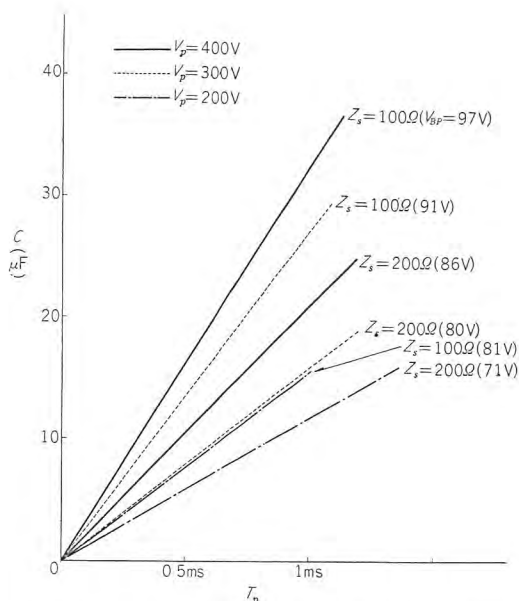


図 5.13 三菱バリスタ VA5204 1P1S と等しい効果を得るためのアブゾーバ C の容量  
Fig. 5.13 Capacity of absorber C to obtain effect equal to Mitsubishi varistor VA5204 1P1S.

制するものであるから波長の短いサージを吸収する時は有利であるが、波長の長いサージに対しては C を大きくしなければならず、経済的にバリスタより不利となる。いま一例として三菱バリスタ VA-5407 1S 1P と同じ効果をもたせるための CR アブゾーバの C の大きさを求めて見ると図 5.13 のようになる。すなわち波長  $T_p$  の大きいほど、また  $(Z_s + R)$  の小さいほど C の容量を増やさなければならない。したがって CR アブゾーバとバリスタとを併用し、波頭値の大きい比較的波長の短いサージに対しては CR アブゾーバで、また波頭値の比較的小さく波長の長いサージに対してはバリスタで、おのおの吸収効果をもたせるようにすることが、もっとも経済的な設計となりうる。

#### (4) 異常電圧保護の協調

a. 交流電源側または直流負荷側より外来サージの進入する恐れのある場合は、かならずそれぞれの電圧に対

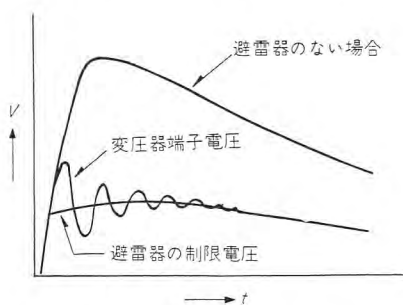


図 5.14 避雷器設置場所の影響  
Fig. 5.14 Effect of installation place of arrester.

し適当な避雷器を設ける。避雷器の制限電圧は交流線路では公称電圧の約 4.5 倍、電鉄用直流避雷器では公称電圧の約 5 倍である。直流側では一線対大地間の避雷器のほかに線間避雷器を入れることが望ましい。

避雷器が動作したときその端子間には制限電圧しかかからないが、避雷器から変圧器までの途中の線路状態によっては、変圧器端子に固有振動による電位のはね上がりにより、制限電圧より数割高い電位がかかることがある。図 5.14 はその一例である。

b. しばしば述べてきたように変圧比の大きい電源変圧器を使用するときは、波頭の急しゅんなサージは一次側から二次側に静電的に移行することがある。これを防止するためには変圧器の一次二次コイル間を静電的にしゃへいするか、二次の各線と大地間とを、一次二次間の静電容量よりかなり大きい C をもってつなぐ。この C の価は大体  $0.1 \sim 0.5 \mu F$  で十分である。

c. 避雷器により波頭値を制限された外来サージおよび整流装置自体で発生する前述の諸種の異常電圧を抑制するために半導体整流体と並列に CR アブゾーバおよびバリスタまたはそのいずれか一方を入れる。前述のように波高値は大きいが比較的波長の短いサージに対しては CR アブゾーバのほうが有効であり、波高値は比較的小さいが波形の長いサージにはバリスタのほうが効果的である。CR アブゾーバおよびバリスタを半導体整流体につなぐには図 5.15 のように二つの方法がある。すなわちブリッジ整流回路では整流器の直流出力側に 1 箇所それらをつなげば交流側、直流側いずれからきたサージに対しても有効に作用するが、その他の整流回路では、双方側からのサージをとにも吸収するためには各整流枝に直接並列につなげなければならない。後者でとくに直流側からのサージが発生する恐れがない場合には各整流枝に直接並列につなげずに交流側の各線間につないでもよい。しかしブリッジ整流回路の場合でも、半導体整流体

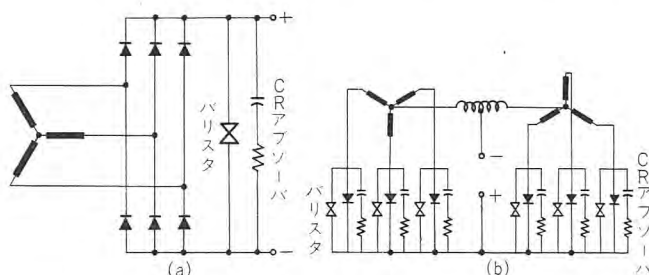


図 5.15 整流回路におけるバリスタおよびアブゾーバの接続  
Fig. 5.15 Connection of varistors and CR absorbers on rectifier circuit.

の直並列枚数がきわめて多く、ブスその他の配線が位置的に複雑な場合は、交流側から直流側までの回路のサージインピーダンスが無視できなくなるから、各整流枝に直接並列につないだほうが安全である。

d. さて以上の異常電圧吸収または抑制装置によってその波頭値をてい減させられたサージに対し半導体整流素子が十分安全である必要がある。すなわちこのてい減させられたサージによっては、その整流回路のいかなる整流体にも、つねにその定格 P. I. V. 以上の電圧がかからないようにしなければならない。たとえば整流体の P. I. V. を常時 1 個の整流体にかかる最大電圧の 300% にとるならば、異常電圧抑制装置の責務は、いかなるサージをもつねにこの 300% の電圧値以下に押えることである。

## 6. む す び

本稿（その 1）から（その 3）にわたり、半導体整流器回路の諸問題として、現状の半導体整流体の諸特性、直並列接続時の電圧電流の平衡問題、さらに異常電圧に対する保護につき筆者らが行なってきた実験結果を中心に述べてきた。このほかの半導体整流回路の大きな問題としては過電流あるいは短絡電流に対する保護の問題が

あるが、これについては実際の製作担当者側において多くの実験がなされているのでその発表をまつこととし、今回は省略する。

最近の半導体整流器とくに比較的高温に耐えまた逆耐圧も高いシリコン整流器の進出はめざましいものがある。始めにけ念されていた回路構成上の諸問題もつぎつぎと解決され、半導体整流器は今後直流電力界の広い分野にわたって重要な地位を占めることになった。

半導体整流体自身はなお進歩の途上にあり、その特性向上はもちろんのこと、近い将来には電流制御の可能な整流体が実用期にはいることになるであろう。しかし今回本誌上で論じた多くの問題は、将来とも半導体整流器の回路構成に対し適用できるものである。

最後に本稿をかく筆するにあたり、これらの一連の研究に終始ご指導とご援助を与えられた当研究所、安藤電気第一研究室長、阿部研究員、また伊丹製作所加藤整流器課長はじめ多くの方々に深く感謝いたします。

（34-6-9 受付）

### 参 考 文 献

- (1) 岡・池田：半導体整流器回路の諸問題（その 1）「三菱電機」33.（昭 34 年 2 月）2
- (2) 電気協同研究会：送配電系統における異常電圧，電気協同研究 10.2（昭 29 年 4 月）
- (3) 佐藤：バリスタ，「三菱電機」33.（昭 34 年 8 月）8

## 次 号 予 定

三菱電機 Vol. 33 No. 9

（田子倉発電所特集）

○巻頭言

○田子倉発電所の設計要旨

○田子倉発電所 108,000 kW 水車

○田子倉発電所 105,000 kVA 発電機

○水車および発電機のすえ付

○運転制御装置と配電盤

○磁気増巾器形自動電圧調整器

○調速機の試験

○105,000 kVA 発電機の電位振動試験

○105,000 kVA 特別三相式超高圧変圧器

○URD 形負荷時タップ切換乾式変圧器

○300 kV, 12,000 MVA ウォッチケース形油シャ断器

○技術解説：火力発電シリーズ 電力経済配分計算機

：MAVAR パラメータ増巾器



# 商用周波数の交流専用電管用主電動機

伊丹製作所 内海権三\*・河村寿三\*

## 60-cycle Single Phase AC Traction Motors

Itami Works Gonzō UTSUMI・Toshimi KAWAMURA

AC electrification by commercial frequency power has been realized on a full scale by the French National Railways. The plan is also under way by the Japanese National Railways. However, there are a number of problems to be settled in deciding what type of motor operation to be taken in. In the northern Kyushu section is adopted a single phase AC commutator motor system, and 150 kW AC traction motors to operate on 60 cycle single phase, the first attempt even in the world, have been built on trial. To the commutator motor is an unavoidable phenomenon of transformer e.m.f. and overcoming this drawback is one of the chief aims in the design.

### 1. ま え が き

わが国における交流電化も実施段階にはいり、国鉄北陸本線に引き続き東北本線、常磐線、その他鹿児島本線の北九州線区なども計画されている。国鉄におかれても交流電車の見通しを早急にたてるために、各種の方式の電車について研究を進められ、とくに将来の交流電化の分野を左右するもっとも重要な条件として、整流子電動機形の交流専用電車の技術的可能性がとり上げられている。

今回当社が国鉄北九州交流電化線区向けとして試作納

入した 60 サイクル 150 kW 単相交流整流子電動機について、その試作経過の概要を記述する。この電動機を使用する電車はモハ 94000 で目下北陸本線において第一次現車試験もおおむね良好な成績をもって終り、さらに長期現車試験が実施されている。

### 2. 試作設計条件

数回の設計会議の結果、つぎの条件が妥当なものとして認められた。

#### (1) 電気方式

単相交流 60 c/s, 20 kV

#### (2) 電動方式

いわゆる直接式で単相交流整流子電動機を使用、相当のフリーセントサービスの可能なもの、構造取扱いが簡単ではがって製作価格も将来もっとも安くなる可能性のあるものなどの条件を満足するものとする。

#### (3) 駆動方式

ある程度的高速運転を必要とすること（最高運転速度 95 km/h）と単相整流子電動機の整流とを考慮して、主電動機は台車装架とする。分離駆動方式にはモハ 90 で経験を有する中空軸式平行カルダンを採用し歯数比は

$$89/15=5.933 \quad (M=7 \text{ ねじれ角 } 20 \text{ 度})$$

を採用する。

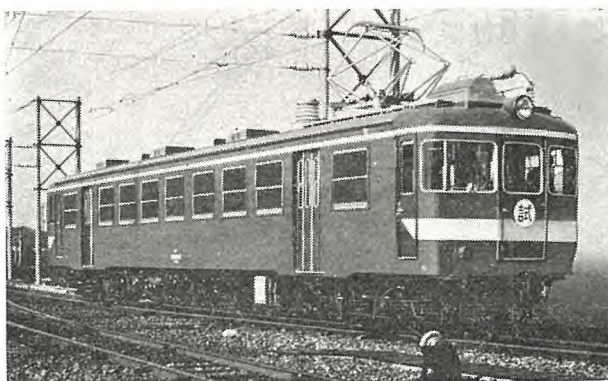


図 1.1 交流専用電車 モヤ 94000

Fig. 1.1 AC electric coach. (MOYA 94000)

#### (4) 台 車

新製とし、車輪径は電車は 860 mm が普通となっているが、電動機をシビヤにするおそれがあったので 910 mm がとられた。

#### (5) 電車性能

性能要目は次のようである。

定 格 速 度	63 km/h
加 速 度	1.5 km/h/s
減 速 度	3.0 km/h/s
最高運転速度	95 km/h

#### (6) 電車編成

主電動機出力	150 kW × 4	$M_D + T + T$
主電動機出力	110 kW × 4	$M_D + T$

当社の担当したものは 150 kW 主電動機である。

主電動機は 4 個永久直列接続とし、制御方式は主変圧器二次側制御、制動時は M 車には直流補助励磁式の発電制動をかけ、この制御は可飽和リアクトルを使用している。

### 3. 主電動機的设计

#### 3.1 主要要目の決定<sup>(1)(2)</sup>

電車電動機 (traction motor) は一般に定格状態で運転されることはなく、過負荷運転の行なわれるのが普通である。したがって設計要目は運転サービス条件と勘案して決定されるものであるが、とくに交流整流子電動機の場合には、よく知られているように変圧器起電力という現象があって、起動時および過速時に電動機の整流を害する。これがこの形の電動機の欠点でありまた弱点でもある。したがって一般には変圧器起電力はできるだけ低く設計するのが普通であるが、電気装荷と磁気装荷のバランスを考えると極数がきわめて多くなり、設計困難ないしは工作困難を招くから適当なところで妥協しなければならない。

今の場合、営業線は鹿児島本線とのことであり、比較的こう配も少ないところからあえて低変圧器起電力とせず、定格で 3.0 V にとり、起動時は若干赤熱させて 3.7~3.8 V 程度を目標と

した。また励磁特性の飽和があると整流の悪化を招くことが知られているが、上のような理由から試作的にあまり飽和に留意しないで比較的短かな鉄心長を採用して見た。電機子径、整流子径は与えられたスペース内でできるだけ大きな寸法をとり、とくに整流子は強大な構造をとるよう努力した。

種々検討した結果、試作電動機に与えた要目は下記のようなものである。

形 名	MB-5001-A 形
出 力	150 kW (1 時間定格)
回 転 数	2,280 rpm
試験回転数	4,100 rpm
電 圧	200 V (計算, 公称)
電 流	1,030 A
極 数	8
方 式	60 c/s 単相交流直巻, 補極抵抗分路式
通 風	他力 (強制) 通風 40 m <sup>3</sup> /min 程度見込む
絶 縁	電機子特 B 種 (BHB) 固定子 F 種 (HHB)

界磁設計図を図 3.1 に示す。構造上の説明は次節にゆずる。

温度上昇判定指数 (temperature rise criterion の

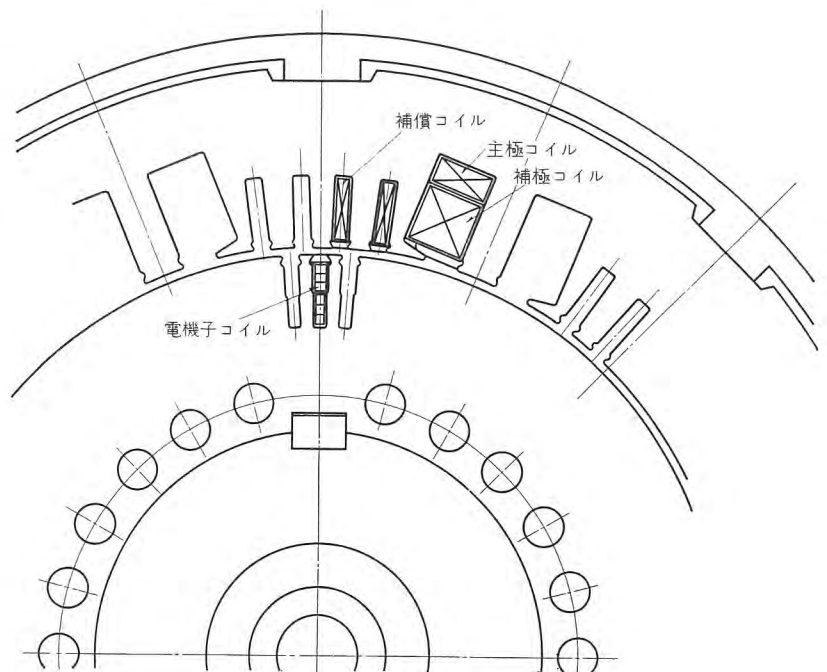


図 3.1 界磁設計図  
Fig. 3.1 Magnetic circuits.



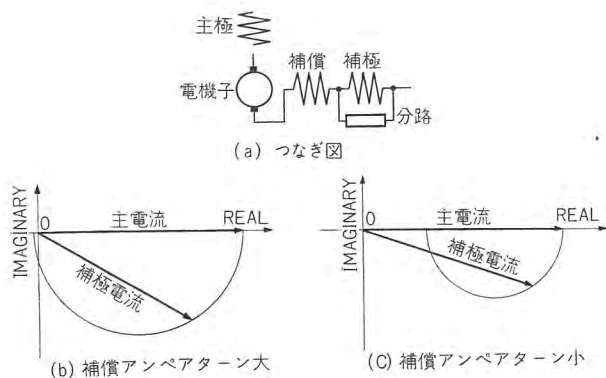


図 3.2 補極分路特性

Fig. 3.2 Shunted interpole characteristics.

訳) としては毎センチ電機子装荷と導体電流密度の積で推定し、特 B 種絶縁に対して適当な結果が得られた。主極アンペアターンは電船用電動機として十分と認めた数値に選んだ。

補極分路は整流中の電機子コイルに発生する整流リアクタンス電圧と変圧器起電力の両者をそれぞれ補極電流の位相を適当にして打消すために入れるものであるが、これには純抵抗を用いるものとし、低高速で切りかえるのは意味がないので行なわないで 1 段だけにした。したがって補償コイルの巻数は必要最小限にして工作の簡単化をはかった。補極分路特性は円になることが知られているが補償コイルの巻数をへらすと円軌跡が小さくなり、この場合コイルのスペース利用率はよくなる(図 3.2 参照)。最適値を 1 点に選ぶ場合は巻数を適当にして円軌跡の頂点あたりにするのが、リアクタンス電圧補償に対して抵抗値だけで調整可能となるから便利であるが、やはり補極空げきの決定には十分の検討を要する。補極最

適速度は今の場合一応定格速度を選んだ。

設計特性値から回転による電機子反起電力  $E_c$  はよく知られた数式によると

$$E_c = \frac{1}{\pi} \times \frac{e_t}{f} \times \frac{V_K}{\tau_K} = 152 \text{ V}$$

ただし  $e_t = 3 \text{ V}$  (変圧器起電力)

$f = 60 \text{ c/s}$  (電源周波数)

$V_K = 40 \text{ m/s}$  (整流子周速)

$\tau_K = 0.0042 \text{ m}$  (整流子片ピッチ)

にとりてあり、したがって定格電流値は回転による損失 5% を見込むとして

$$1.05 \times 150 \text{ kW} / 152 \text{ V} = 1,030 \text{ A}$$

となる。整流子電動機は電流が大きくなるのが欠点とされているのであるが今回の場合電流の低減にとくに意を用いた。

固定子結線はすべていわゆる 4S-2P の結線をと、2 回路の電流方向は互に逆向きになるようにして軸まわり

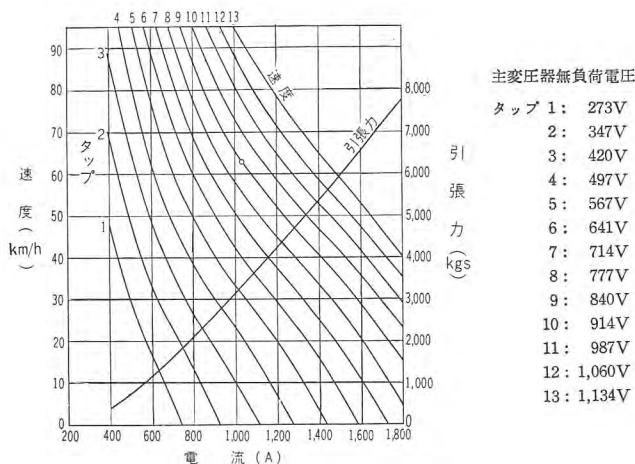


図 3.4 ノッチ曲線

Fig. 3.4 Notching curves.

に起磁力の出るのを防いだ。これは大電流機械ではとくに重要なことである。(図 3.3 参照)

極数はこの規模の電動機では 8 極が適当であって、軌間も狭軌であるからとくに電機子の二重重ね巻は施していない。

絶縁電圧は電動機 4 個直列接続に見合うものとして試験電圧 3,000 V としてある。(AIEE 規格では定格線電圧における全負荷最高タップ電圧の 2 倍に 1,000 V を加えたものとなっている)

つぎに特性の計算値を図 3.4 に示す。電動機制御は主変圧器の二次側制御であるので、これを用いて示してある。これを電車性能曲線として示すと図 3.5 のようになる。

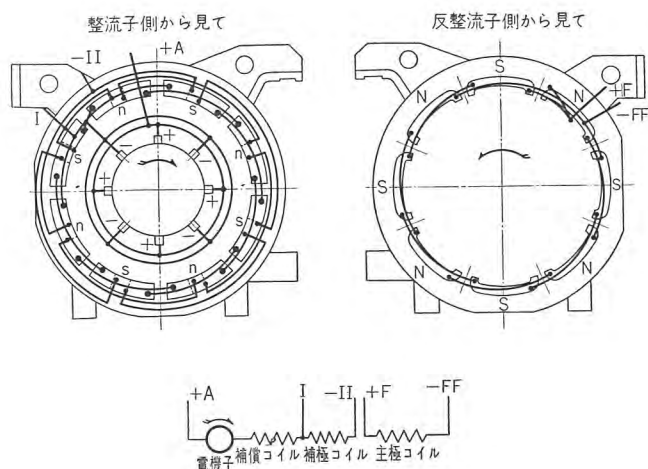


図 3.3 つなぎ図

Fig. 3.3 Connection diagram.

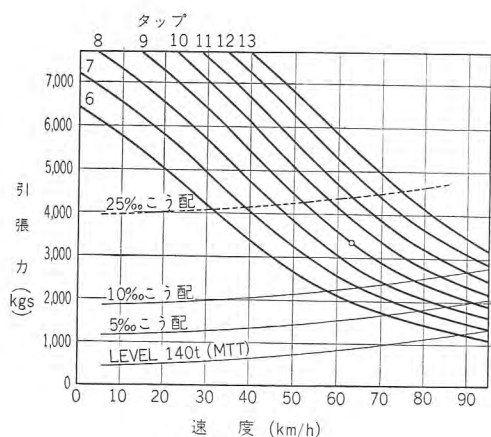


Fig. 3.5 Electric coach output performance curves.

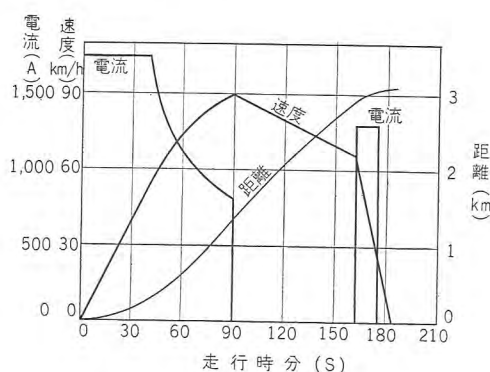


図 3.6 ティピカル走行曲線  
Fig. 3.6 Typical run curves.

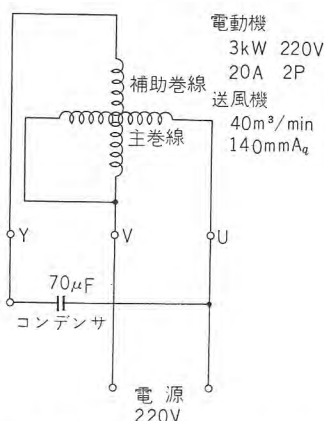


図 3.7 送風機用電動機つなぎ  
Fig. 3.7 Blower motor connection diagram.

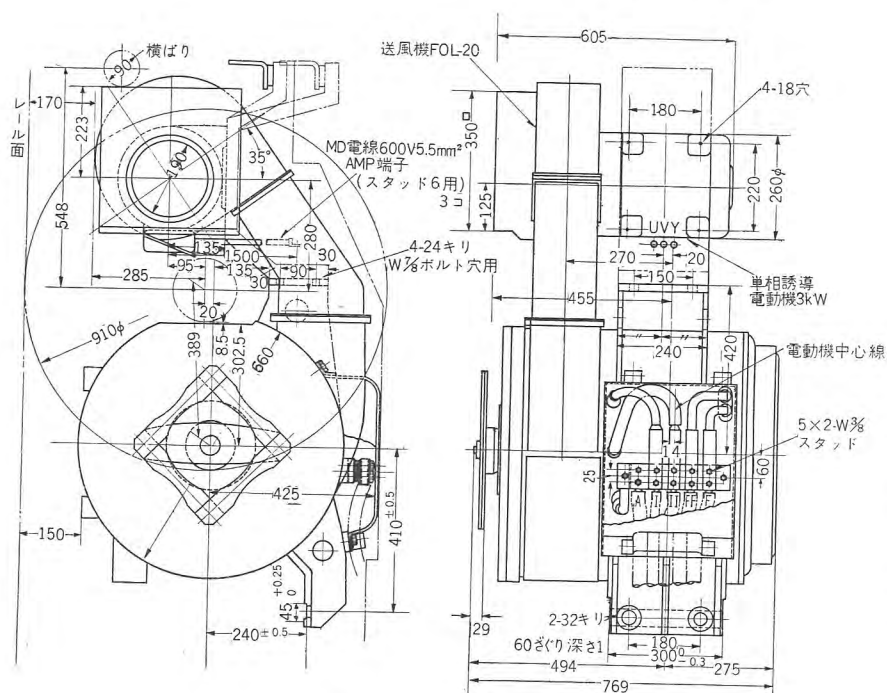


图 3.8 外形图  
Fig. 3.8 Outline drawing.

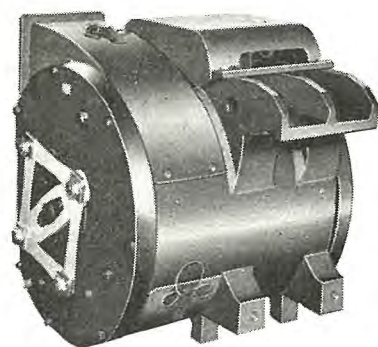


図 3.9 主電動機外觀  
Fig. 3.9 AC traction motor.

る。この曲線からわかるように、回路のリアクタンス(変圧器のインピーダンスも考慮してある)によって電車特性はいわゆる定出力特性にきわめて近くなっており、高速性能もよい。

この特性によってティピカルランカーブを示したのが図3.6で、このサービスに対して電動機容量は大体十分と思われる。

送風機は風量  $40 \text{ m}^3/\text{min}$ , 風圧  $140 \text{ mmAq}$ , 電動機  $3 \text{ kW}$  程度のものとしてつなぎ図を図 3.7 に示す.

### 3.2 主電動機の構造

主電動機は大体モハ 90 形電車用標準主電動機 MT46  
を規準とし、試作に参加した各社と取付関係を統一した

結果、図3.8に示したような外形のものとなった。送風機はいわゆる1モータ1ブロワの形式となっている。

(1) 固定子わく

外わくは鋼板溶接丸形とし整  
流子側に風取入口を設け両端の  
鏡ぶたはボルト付けとし、反車  
軸側には電動機を台車ばりに取  
付けるためのノーズがあり、車  
軸側には電動送風機補助ばり取  
付座が設けてある。

(2) 固定子鉄心およびコイル

鉄心はD級ケイ素鋼板（ハイライト H18）を用い図3.10に示すような構造で各極はいずれも一体，巻線はオープン，またはセミオープンのみぞに納めら



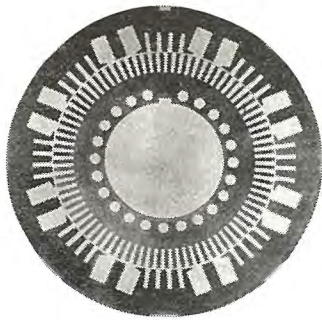


図 3.10 打抜鉄心  
Fig. 3.10 Punched cores.

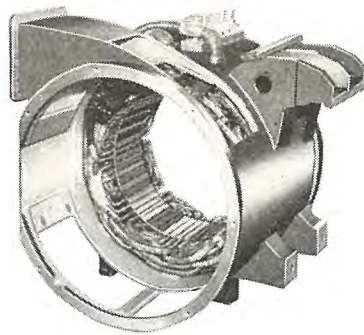


図 3.11 固定子 (未完成)  
Fig. 3.11 Stator. (uncompleted)

れる。コイルはいずれも工作に便利のように素線を比較的細くし、成形またはそれに近い形でみぞに入れるようにした。絶縁は NEMA インデックスで HHBV による F 種である。

### (3) ブラシささえ

ブラシささえは 4 個ずつ左右対称で整流子面を大きく露出して冷却をはかっている。またブラシささえは 2 個のマイカレックススピンドルで周辺にギヤを切ったロックリングプレートに強固にエンドマウントしてある。ロックリングは位置ぎめ用リーマボルトを鏡ぶたから抜き、固定子からの結線ははずし、ロックリング締付ボルトを鏡ぶたから抜くことによって外部から駆動軸を通じて（ラチェットハンドルその他を用いればよい）ロックリングを回転させることができ、ブラシの点検交換に便利である。

### (4) 電機子軸受

整流子側は玉軸受、継手側はコロ軸受を用い、整流子側はいわゆるカートリッジ構造にしてあって電機子の装脱に便利である。

### (5) 電機子鉄心およびコイル

鉄心は (2) 項と同様で図 3.10 に見るようなもので、

内部にも通風させている。コイルはいわゆる六層巻で、平角銅線を上口は横向き、下口は縦向きになるような特殊なノーブレス巻きで八極一重重ね巻をとり、絶縁は NEMA インデックスで BHBX による B 種 (特 B 種) である。また整流帯調整の意味でトレッペン巻としてある。均圧コイルは各みぞごとに設けた。

### (6) 整流子

整流子は整流子電動機においては生命というべきもので、整流子の構造が不安定であれば、他の電気的特性はすべて無意味なものと化する。これは整流子のウェイトが他の電動機に比して大きいからにほかならず、また定格で 40 m/s、過速時 70 m/s をこえる高い周速や高温の条件のシビヤさもかってないものである。したがって設計の重点を整流子におき、構造はこれまで開発されたものの中でもっとも信頼性のあるものとして MT 100 および MT 101 形主電動機 (ED 70 形および ED 71 形イグナイトロン電気機関車の標準形) と同様なスプリングワッシャタイプを採用し、強大な組立圧力をもって締付けてある。整流子片はもちろん含銀銅を用いアーチバンド構造であって、応力の大きいと思われるところはすべて合金鍛鋼を用い、リングバネを介して常時締付圧力が働くようになっており、起動時の短絡電流による整流子面の損傷はもちろん、高温高速時でも決して安定性を失わない構造となっている。

### (7) 電機子軸および駆動部分

電機子および駆動部ともにモハ 90 形電車用主電動機 MT 46 とほぼ同一である。電機子軸は中空軸を形成し、ねじり軸を貫通させて継手とは板バネで連結する。継手からねじり軸までは MT 46 とまったく同一のものを使用している。この電動機は他力通風であるからファンは有しない。

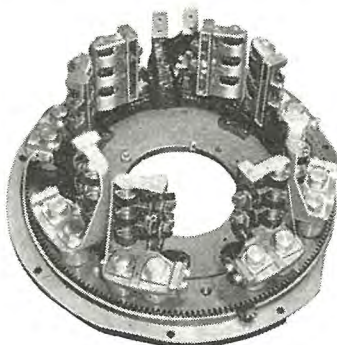


図 3.12 ブラシ保持器  
Fig. 3.12 Brush holder.



図 3.13 電機子  
Fig. 3.13 Armature.



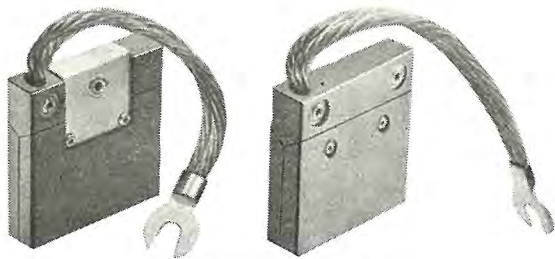


図 3.14 三分割ブラシ  
Fig. 3.14 3-parted carbon brushes.

#### (8) 三分割ブラシ

ブラシによって電機子コイルに生じた変圧器起電力が短絡される際に、回路の抵抗を増ししたがって短絡電流を減少させ、また起動時の回転力の低下を少なくするために一般に三分割ブラシが用いられる。これにはやはり固有抵抗の高いものが望ましく、かつ高い整流子周速に耐えるために機械的強度もかなり大きいものが必要である。この条件を満足するものが国産品では見当たらなかったため、試作の場合欧州で実績のあるルカーボン EG 70 を採用した。今後交流電化の進展に伴い国産品の開発が望まれる。図 3.14 はブラシの外観を示す。

#### (9) 電動送風機

電動送風機は各主電動機に付属しているが、比較的大容量であって主電動機上に装架は困難であったので、主電動機から補助ばりを台車に向かってわたし、電動機はこれに逆づりとなっている。また送風機は床下の空気を吸うために風取入口にはちりこしを設けてある。送風機から主電動機には短かな風道が導かれてある。電動機用のコンデンサは車体に装架してある。

#### (10) 特殊試験装置

運転中でも各コイルの温度が計測できるように鉄道技術研究所のご指導で図 3.16 に示すような箇所に熱電対

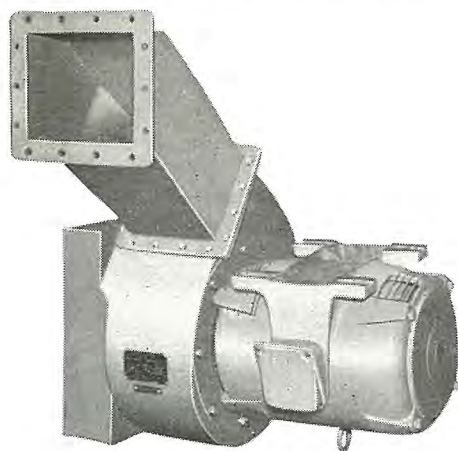


図 3.15 電動送風機  
Fig. 3.15 Motor driven blower.

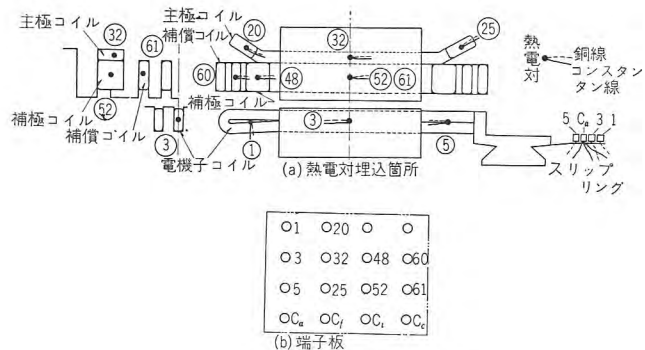


図 3.16 熱電対埋込図  
Fig. 3.16 Temperature measurement equipment.



図 3.17 電機子 (熱電対入り)  
Fig. 3.17 Armature with thermocouple and slip ring.

を装置し、電機子のコイルに埋入したものはスリップリングで外部にとり出すようになっている。(図 3.17) 熱電対の埋入箇所はいずれも各コイルの代表的な箇所であり、導体の温度にできるだけ近い温度を計測できるように考慮をはらってある。なお熱電対埋入電動機には白帯その他のマークを施してある。

### 4. 電動機の試験結果

主電動機の試験は基礎的な工場試験、温度試験、整流試験、および鉄道技術研究所の手によって行なわれる工場試験と実際に走行して行なう現車試験とから成る。このうち国鉄の手によって行なわれるものは、いずれ鉄道技研から発表される運びとなろう。

#### 4.1 負荷試験

適当な補極分路を用いて定格温度試験を行なった。負荷には MT 46 形電車電動機を発電機として用いた。運転状態における温度測定は一般には熱電対によらなければならないから抵抗法による温度測定値はない。図 4.1 は定格温度試験結果を示している。運転中はコイルのリアクタンス降下や逆起電力のために抵抗法による測定は行なわないで、停止後の冷却曲線だけをとってある。温度上昇はこれから推定するのであるが、今の場合同時に鉄道技研の手で熱電対による精密な計測が行なわれたから運転中および冷却中の測定値は鉄道技研の発表によら



なければならない。図にはその推測値を破線で示すにとどめた。試験結果によれば、電機子B種（特B種）、固定子F種の規格に対し、電機子は $105^{\circ}\text{C}$ の上昇を示し $25^{\circ}\text{C}$ の余裕があり（停止後2分後の数値では $35^{\circ}\text{C}$ の余裕があることになるが、この種の電機子はきわめて時定数の小さな冷却を示すから、2分後では約 $20^{\circ}\text{C}$ も温度の低下が見られるようである。規格ではこれは $10^{\circ}\text{C}$ しか見ていない）、主極コイル、補償コイルもそれぞれ $62^{\circ}\text{C}$ 、 $68^{\circ}\text{C}$ の余裕をもっているが、補極コイルは $13^{\circ}\text{C}$ しか余裕がなく若干シビヤになっている。（ここではF種として $155^{\circ}\text{C}$ 許容温度上昇として考えてある）これはコイル形状に大いに関係していることで、補極コイルは断面積は大であるにもかかわらず、放熱面積は小とせざるを得ないことによる。

つぎに定格状態における各部の電圧ベクトルの模様を図4.2に示す。力率、効率はおおの91.2%、83.7%とともに国鉄仕様を満足した。またこの時得られた出力は発電機側の出力と損失を合計して151.52 kW（計測時の回転数は2,240 rpm）が得られたから、与えられた150 kWの仕様を満足している。この時の端子電圧は

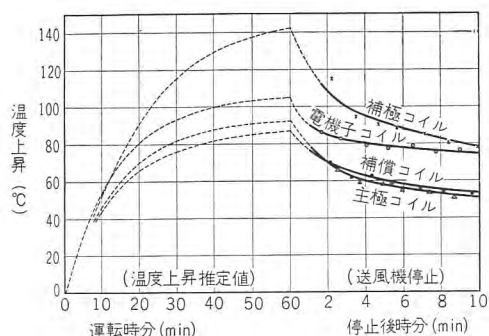


図 4.1 温度試験と冷却曲線

Fig. 4.1 Heat run test and cooling curves.

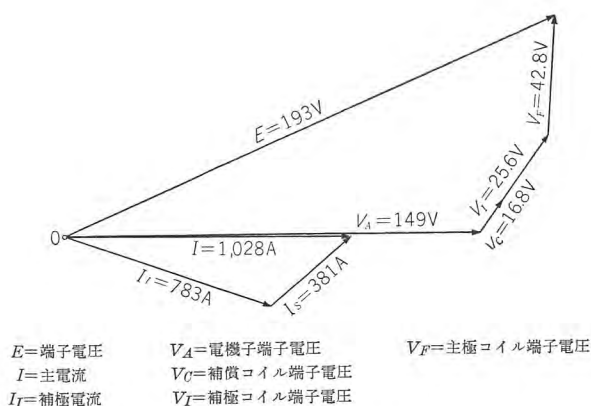


図 4.2 負荷時ベクトル図

Fig. 4.2 Vector diagram.

193 V で大体計算値（計算値には余裕が見込んである）に近いところを示した。60 c/s の整流子電動機では漏洩リアクタンスの占める割合はきわめて大きく、全リアクタンスの1/2程度に達するといえる。

## 4.2 整流試験

補極回路には必ず分路を入れて補極電流の大きさと位置を変圧器起電力と整流リアクタンス電圧とにマッチさせなければならない。今の場合補極分路は純抵抗だけでリアクタンスは含まないから、この分流抵抗を変化させた場合の補極電流ベクトルの軌跡を求めてみた。図4.3はこの実測値であって軌跡は理論的には円となる。図は百分率特性で示してあって主電流を基準とする。

整流子電動機の場合、ある特定の速度においてのみ、補極による火花電圧補償が完全となる。図4.4は速度特性とともに実測無火花帯を示す。定格負荷試験時の界磁コイル電圧のブラウン管オシロ所見を図4.5に示す。やはり若干の界磁の飽和が見られ、過負荷では火花が見られるが定格では大体無火花整流が実現できた。図4.6は励磁特性を変圧器起電力で示したもので若干の飽和現象

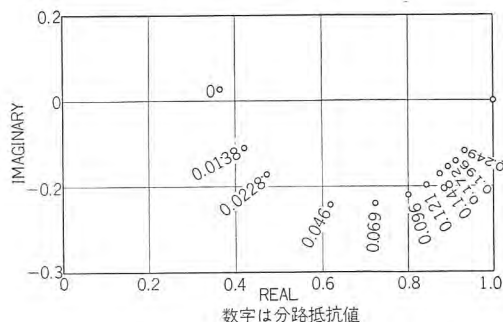


図 4.3 補極分路特性（ベクトル軌跡）

Fig. 4.3 Shunted interpole characteristics. (vector locus)

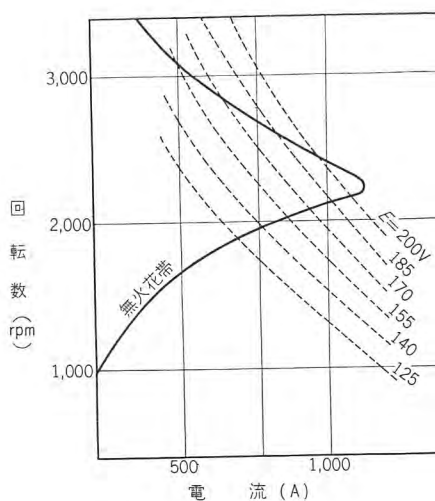


図 4.4 速度特性と無火花帯

Fig. 4.4 Speed characteristics and sparkless zone.

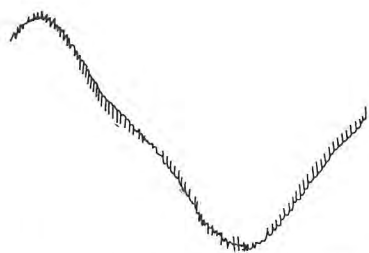


図 4.5 主極コイル電圧ブラウン管所見  
Fig. 4.5 Voltage wave-form at field coils.

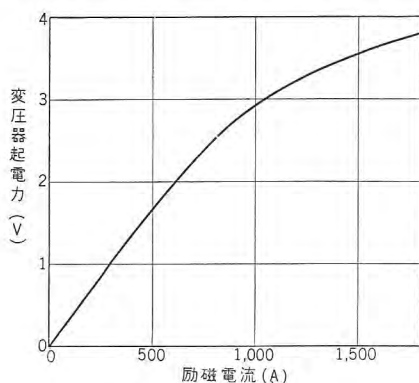


図 4.6 励磁特性  
Fig. 4.6 Excitation characteristics in transformer e.m.f.

が見られる。

### 4.3 電動送風機試験

電動送風機の実験結果は図 4.7 に見るようなもので大体所期の結果を得た。主電動機に装架して実測したところでは、比較的狭い空げきや、ワニス、コイルエンドなどの影響のためにいくぶん計画値より下回ったようである。

### 4.4 現車試験所見

現車試験は 34 年 4 月上旬および、長期試験として 34 年 6 月以降に行なわれる。4 月上旬の現車試験は特性試験を主としたもので、鉄道技研の手で行なわれ、まもなく発表の運びとなろうから、ここでは詳しいことは述べられないが、当社の電動機について概観したところでは、おおむね実用に供しうるものと考えられる。

温度上昇は試験時最高約 110°C、固定子で 120~130°C 程度と思われ、大体所期のとおりでまた時定数も相当に小さいようである。整流はやはり界磁の飽和が若干顕著

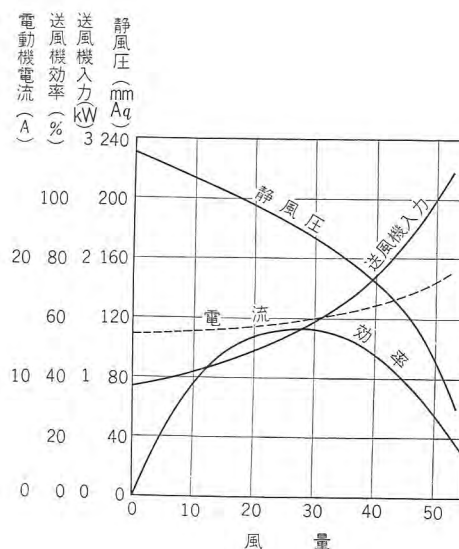


図 4.7 電動送風機特性曲線  
Fig. 4.7 Electric blower characteristics.

であったためと思われるが、過電流に対して火花電圧補償が必ずしも満足でなく、補極分路値に対してもデリケートであったようで、相当の火花もある時には見られた。この試験後の点検では整流子およびブラシにも異常は認められなかったが、やはり長期試験ないしは寿命試験が必要であろう。

## 5. む す び

当社としては最初の 60 サイクル単相交流整流子式電車電動機の試作ではあったが、国鉄当局のご指導とご支援によって一応の成果をあげることができたものと考えられる。今後さらに研究開発を重ねて、電車電動機としてのサービスに完全に適合した電動機を、技術的経済的合理的に追求して行く所存である。

終りにこの電動機の試作にいろいろご指導、ご尽力賜わった方々に深く感謝いたします。

### 参 考 文 献

- (1) Richter: Elektrische Maschinen V.
- (2) 小川・内海・河村: 電気車用整流子電動機についての一考察 電気四学会連合大会 昭和 33 年 5 月



# ジルコニウムおよびその合金の高温酸化 (1)

研 究 所 山 森 末 男\*・実 博 司\*\*\*・中 島 陽 三\*\*

## High Temperature Oxidation of Zr and Its Alloys

Research Laboratory Sueo YAMAMORI・Hiroshi JITSU・Yōzō NAKAJIMA

High temperature oxidation of Zr and its alloys has been studied in the temperature range from 550 and 500 deg. C. The results obtained are given in brief as follows: (1) The proceeding of initial oxidation is characterized at a rate close to the parabolic or cubic law. After the furtherance of oxidation a transition point—break away—occurs. (2) There appears not much difference between Zr-H and Zr. (3) Zr-O and Zr-N have a greater oxidation speed than pure Zr, particularly the break away taking place very soon with Zr-N. Nitrogen has much to do with the oxidation in the air. (4) Alloying of Nb, Mo, Sn especially Al and Ti with Zr accelerates the oxidation and shortens the break away time, while Cu, Ni and W do not give obvious effects in this concern. (5) Two types of oxide films are observed: the one is with Zr, Zr-O, Zr-H, Zr-Cu, Zr-Ni, Zr-W and Zr-Ti and the other with Zr-N, Zr-Sn and Zr-Al, each group manifesting its particular features.

### 1. ま え が き

Zr およびその合金は原子炉材料として用いられていることはよく知られているが、この用途のために研究した Zr 合金の従来の報告は主として Zr の中性子吸収断面積を悪化しない範囲において添加元素を加え、高温の強度と耐食性を兼備した合金を選択しようとする趣旨にそって行なわれてきた。筆者らもまたこのような原子炉材料に適した Zr 合金を研究することを目的としているが、今までの文献を調査すると高温強度を有する合金としてはいくつかの例があげられるがその耐食性に多くの問題点が存在するようであったので、まず耐食性の検討を行なうことにした。

従来よりの Zr およびその合金の腐食についての研究は原子炉材料としての用途の発展とともに多くを数え、この場合の腐食の対象としてその実用的な面からは高压水中で行なわれていることが多いが、腐食生成物が酸化物であるという事実からであろうかその研究を酸素中あるいは空気中に行なったものもまた多い。しかしながらこれらの報告では酸化の進行を酸化速度あるいは break away などいわゆる weight gain curve (酸化重量増加—時間曲線) を主体として取扱ったものが多く、酸化物の状態を検討しこれと耐酸化などとの関連を考察した例は比較的少ない。筆者らは Zr 合金の酸化を weight gain curve からだけではなく、生成する酸化膜についても詳

細に検討し、この基礎に立って耐食性の良好な Zr 合金を開発することにした。

さて Zr の酸化は含有する種々の不純物の影響をうけやすいため加工工程や酸化ふんい気から浸入の予想される気体不純物の影響を検討することが Zr 合金研究の基礎としてまず重要と考えられるので、第一報としては最初に酸素、窒素、水素などが Zr 中に固溶したのを取りあげ、ついで数種の Zr 合金について weight gain curve と酸化膜の顕微鏡的観察結果との対応についてべる。

### 2. 試料および実験方法

#### (1) 試料の作成方法

各試料の製作に用いた Zr は東洋ジルコニウム社製の Reactor grade のインゴット (double melting) で、表 2.1 のように腐食に有害と考えられる不純物はきわめて少なく、クロール法によって得た Zr としては良好な純度を有するものと考えられる。

純 Zr および気体不純物固溶試料はこのインゴットを加工して作り、また合金はこの原料に合金元素を加えて

表 2.1 Zr インゴットの純度

Impurity	p. p. m.	Impurity	p. p. m.	Impurity	p. p. m.
Al	78	Fe	490	N	24
B	0.6	Pb	<10	Si	2
Cl	<30	Mg	<10	Ti	<30
Cr	206	Mn	36	V	<20
Co	<5	Ni	<30	C	95
Hf	95				

\* 材料研究室長 \*\* 材料研究室



ボタンアーク溶解によって溶製した。試料の製作方法は下記に示す。また試片は加工上りの薄板から切出した小片でその寸法は主として  $10 \times 10 \text{ mm}$  のものを用い、その表面状態などにはとくに大差がない。

#### a. 薄板の加工工程

インゴット→熱間鍛造 (約  $800^\circ\text{C} \cdot 20 \text{ mm}$  厚まで)→熱間圧延 (約  $800^\circ\text{C} \cdot 6 \text{ mm}$  まで)→面削 ( $4.2 \text{ mm}$  まで)→冷間圧延 ( $2 \text{ mm}$  まで)→酸洗→真空焼鈍 ( $750^\circ\text{C} \cdot 3$  時間)→冷間圧延 ( $0.35 \text{ mm}$  まで)

ボタンインゴットの加工は、

ボタン (厚さ約  $10 \text{ mm}$ )→熱間鍛造 (約  $800^\circ\text{C} \cdot 5 \text{ mm}$  まで)→熱間圧延 (約  $700^\circ\text{C} \cdot 2 \text{ mm}$  まで)→グラインダおよび酸洗併用の表面スケール取り→冷間圧延 ( $1.5 \text{ mm}$  まで)→酸洗→真空焼鈍 ( $750^\circ\text{C} \cdot 3$  時間)→冷間圧延 ( $0.7 \text{ mm}$  まで)→冷間圧延 ( $0.35 \text{ mm}$  まで)

#### b. 純 Zr 試料

切出した試片を  $5\% \text{ HF}$ ,  $45\% \text{ HNO}_3$  の水溶液で酸洗いし、 $800^\circ\text{C} \cdot 50$  時間  $10^{-5} \text{ mmHg}$  の真空中で焼鈍した。なお、50 時間もの間焼鈍したのは次のべる気体不純物固溶試料の製作時と同一条件とし、試料の仕上熱処理をそろえたためである。

#### c. 気体不純物を固溶した試料

Zr は少量の酸素や窒素の固溶によっていちじるしく硬化し、とくにこの実験のようにかなり多量の気体不純物を固溶させた試料を作るとは加工が不可能である。従来の文献<sup>(1)(2)</sup>によれば、Zr の表面に酸化物あるいは窒化物を生成させた後真空中で加熱すると、これらの表面生成物の分解圧はきわめて低いため ( $\text{ZrO}_2$  では  $900^\circ\text{C}$  で  $10^{-40} \text{ atm.}$ ) ほとんど分解することなく、酸素や窒素は Zr 中に拡散固溶することが知られており、たとえば Ti の耐酸化性に及ぼす固溶酸素の影響をしらべた Simnad など<sup>(3)</sup>はこのような方法で試料を作製している。

筆者らもまたこの方法を採用することとし、それぞれ次のようにして試料を作製した。

Zr-O 試料は純 Zr の薄板を  $700^\circ\text{C}$  の酸素中でいったん酸化して酸化膜を形成した後、これを  $10^{-5} \text{ mmHg}$  の真空中で  $800^\circ\text{C} \cdot 50$  時間の焼鈍を行ない酸素を固溶させた。試料の種類は最初の酸化を  $700^\circ\text{C}$  で 20, 80, 160, 320 分間行なった 4 種類であって、完全に均一固溶したものとすればそれぞれ 0.34, 0.93, 1.2, 1.9 w/o の Zr-O 試料ということになる\*。

Zr-N も Zr-O と同様に、まず 99.999% の窒素 (純

度があるいと酸化が併行して起る。またこの純度でもなお不充分的であらかじめゲッタを使用し微量の酸素除去した。)とともに石英管内に封じ、それぞれ  $850^\circ\text{C} \cdot 1$  時間および  $24$  時間加熱して窒化した 2 試料を作り、その後いずれも  $10^{-5} \text{ mmHg}$  の真空中で  $1,000^\circ\text{C} \cdot 28$  時間焼鈍を行ない窒素を金属中に拡散固溶させた。このようにして得た試料を分析 (ケルダール法) すると 1 時間窒化のものは平均 0.05 w/o, 24 時間のものは 0.35 w/o の窒素を含有し、均一度も分析によってしらべたがほぼ一様であった。

Zr 中への水素の固溶度は文献<sup>(2)(4)(5)</sup>によれば低温ではきわめて微量であるが  $700^\circ\text{C}$  では約 1.1% の大きな固溶度を持ち、Zr-H を作成する方法としては Zr の薄板を純粋な水素中で加熱する手段を選ぶことができるようである。筆者らの行なった方法は、Zr を石英管内に入れ  $10^{-5} \text{ mmHg}$  の真空中に引いたのち、白金アスベストで精製した水素を約  $600 \text{ mmHg}$  封じこみ  $700^\circ\text{C}$  に加熱した。この場合約 90 分のちには水素はほとんど反応しその圧力は  $1 \text{ mmHg}$  以下となったが、さらに多くの水素を含有させるためにはこれを反復した。その後、試料は水素の圧力  $10^{-1} \text{ mmHg}$  程度において 10 時間保持し均一化をはかり、0.35 w/o, 0.5 w/o の 2 種類の Zr-H を作った。(分析は溶融分析法)

#### d. 各種合金試料

Zr 合金の調製に用いた Zr はインゴットの熱間圧延面削上りのものを刻んで用い、これに Sn, Al, Ti, Nb, Mo, W, Ni, Cu をそれぞれ 1% 添加して 8 種類の二元合金を作った。なお添加元素はいずれも高純度のものを小片にして用いた。溶解はボタンアーク溶解炉により、それぞれ約  $40 \text{ g}$  をアルゴンふんい気中で約  $300 \text{ A}$ ,  $15 \text{ V}$  の条件で行ない、試料の均一化のために 3 回繰り返して溶解した。このようにして得たボタンは前述のような工程で薄板とし酸洗後  $750^\circ\text{C} \cdot 3$  時間の真空焼鈍を行なった。なお、ボタンアークメルトの純 Zr 試料\*\*も製作し、合金との比較にはこの結果を用いることにした。なおまた試料の分析は行なっていないが、溶解前後の重

注 \* 分析および均一性はとくにしらべなかった。しかし 1.9% の試料を  $1,000^\circ\text{C}$  より焼入れしたのものについて表面から内部にわたって顕微鏡観察したところ、状態図的判断で 1.5% 以下ならば生ずるであろう  $\alpha \rightarrow \beta$  変態に起因する組織変化がなかったもので、均一にまたほぼ所期のように含有したものと思う。

\*\* インゴットから直接加工した純 Zr をボタン溶解を経た合金試料と比較すると、ボタン溶解による多少の汚染の影響はいるかも知れないので、条件をそろえた。



表 2.2 試 料

No.	Alloy	Adding quantity (W %)	No.	Alloy	Adding quantity (W %)
1	Pure Zr		10	Zr-Al	1.0
2		0.34	11	Zr-Cu	1.0
3		0.93	12	Zr-Mo	1.0
4	Zr-O	1.2	13	Zr-Ni	1.0
5		1.9	14	Zr-Nb	1.0
6		0.05	15	Zr-Sn	2.5
7	Zr-N	0.35	16	Zr-Ti	1.0
8		0.35	17	Zr-W	1.0
9	Zr-H	0.5			

量にはほとんど変化がなく、とくに合金元素が消耗したとは考えられない。

以上の方法によって作った試料を一括して表 2.2 に示した。

## (2) 実験方法

### a. 酸化重量増加の測定

約  $10 \times 10 \text{ mm}$  に切出した試料は正確に表面積を測定し、秤量を行なった後約  $10 \text{ cm}$  の均熱部分を有する縦形の加熱炉に試料同志が触れ合わないよう注意してつるし、所定温度 ( $\pm 5^\circ \text{C}$ ) に一定時間加熱したのち取出し冷却後秤量し、単位面積あたりの重量変化を求めた。秤量に用いたてんびんの保証感度は  $0.1 \text{ mg}$  である。なお温度および酸化時間のそれぞれに対して試片は 3 枚ずつ用い、各点はこれを平均した。

酸化ふんい気は主として乾燥酸素であるが、これにはポンベの酸素を硫酸びん、シリカゲルで脱水したのち約  $250 \text{ cc/min.}$  の流量で炉に送った。また一部の実験では Wet の酸素および空気を用いたが、Wet- $\text{O}_2$  はポンベの酸素を約  $50^\circ \text{C}$  の恒温に保った水中をくぐらせ約 90% の湿度を有する酸素として供給し、空气中酸化の場合は炉の下端を開放し、炉の均熱のバランスのくずれない程度のゆるやかな自然対流によって空気を補給した。

### b. 酸化膜の顕微鏡観察

酸化後の表面の観察には酸化した試料をそのまま用い普通光および偏光で観察したが、酸化膜のあるものは偏光によらなければ判別しがたいものもある。試料断面の観察には試料を合成樹脂中に埋めこんで研磨して用いた。またあるものはエッチングして観察したが、これには 5%  $\text{NF} + 45\% \text{ HNO}_3$  の水溶液を中心とし適宜変化して腐食液とした。

## 3. 酸化に伴う重量増加

### (1) 純 Zr

#### a. dry- $\text{O}_2$ 中<sup>(6)(8)</sup>

ジルコニウムおよびその合金の高温酸化 (1)・山森・実・中島

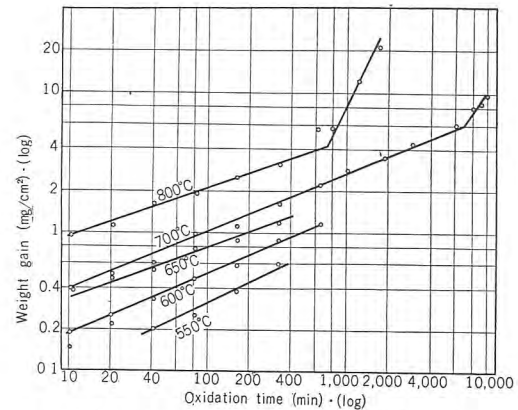
図 3.1 純 Zr の dry- $\text{O}_2$  中酸化増量曲線

Fig. 3.1 Weight gain VS. time curves for the oxidation of pure Zr in dry- $\text{O}_2$ .

図 3.1 には純 Zr を  $550\text{--}800^\circ \text{C}$  の dry- $\text{O}_2$  中で高温酸化した場合の酸化時間対重量増加の変化を log-log で示した。(以下で酸化増量曲線は主として log-log で示す。) 低温では酸化膜が薄く秤量感度不足のために結果がややばらつくが、いずれの温度においてもその傾向はおおむね parabolic law にしたがって進行する。しかしながら  $800^\circ \text{C}$  で  $600\text{--}800$  分ののちにはやや酸化が激しくなり、 $1,200$  分では  $320$  分までの速度こう配から大きくはずれて重量増加がいちじるしく、さらに  $1,700$  分ごろから一部の試料に崩壊さえ認められる。また  $700^\circ \text{C}$  ではいちじるしく時間が延長されるが、 $8,000$  分付近よりそれ以前の延長から離れはじめ  $10,000$  分では明らかである。これらの結果から、Zr は dry- $\text{O}_2$  中で長時間加熱すると酸化増量は初期の速度こう配からはずれ、いわゆる break away の現象が認められるようである。 $600^\circ \text{C}$  以下ではあまりに長時間を要するので break away までには行っていない。

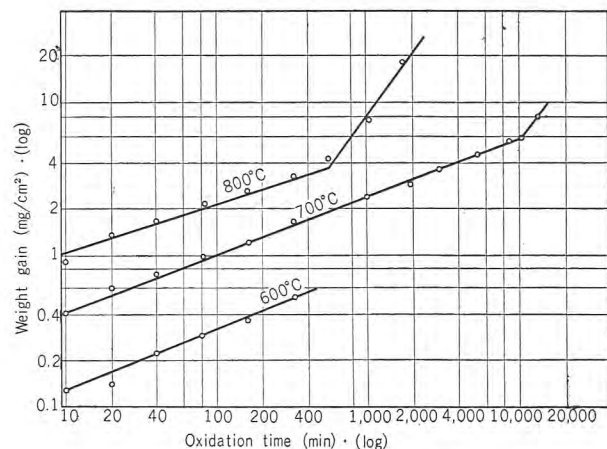
図 3.2 純 Zr の wet- $\text{O}_2$  中酸化増量曲線

Fig. 3.2 Weight gain VS. time curves for the oxidation of pure Zr in wet- $\text{O}_2$ .

b. wet-O<sub>2</sub> 中<sup>(7)</sup>

Zr の水蒸気中高温酸化は完全な水蒸気ふんい気になることが実験上困難であるため、これに近い条件として wet-O<sub>2</sub> 中の高温酸化を行なった。図 3.2 は 600~800°C における weight gain curve であるが、傾向としては dry-O<sub>2</sub> 中同様で、800°C では約 600 分、700°C では 10,000 分で break away が認められた。break away 前はいずれも parabolic ないしは cubic の傾向を示す単調増加であるが、weight gain は dry-O<sub>2</sub> 中よりやや多い。ただし 600°C では逆に wet のほうがやや少ない。

c. 空气中<sup>(7)(8)</sup>

図 3.3 は 600~800°C の空气中酸化の場合の weight gain curve である。初期の酸化の傾向は dry-O<sub>2</sub> 中とそう大きな差がないが、800°C で約 150 分、700°C でも約 2,000~2,500 分で break away が認められ、急激な酸化に移行しており、dry-O<sub>2</sub> 中に比べて異なっていた。

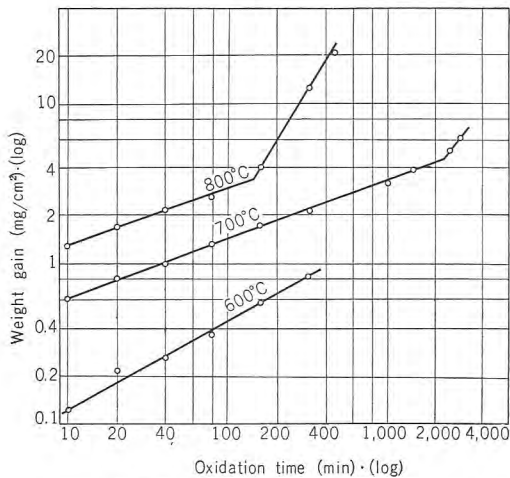


図 3.3 純 Zr の air 中酸化増量曲線

Fig. 3.3 Weight gain VS. time curves for the oxidation of pure Zr in air.

(2) 気体不純物を固溶した Zr

普通純 Zr 中に含有される不純物としての気体元素は約 100 ppm 以下のきわめて微量であるが、筆者らの実験では種々ふんい気で高温酸化中に拡散固溶する不純物の影響をしらべるのが目的のため（高温では O, N, H などの気体不純物は拡散固溶する可能性は十分で、とくに base metal との境界部における固溶量は大であろうから、このような層の酸化反応を考えうる）、かなり多量の不純物固溶の場合をしらべた。なお酸化ふんい気はすべて dry-O<sub>2</sub> とした。

a. Zr-O<sup>(6)</sup>

0.34~1.9% の酸素を固溶した Zr の 550~700°C にお

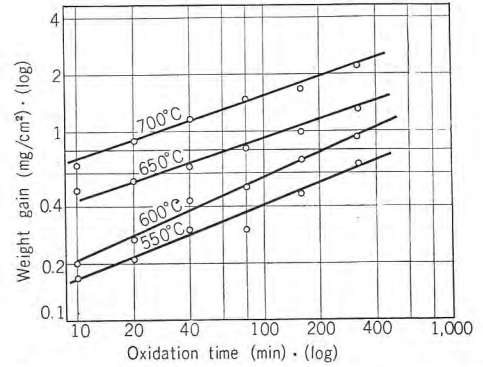


図 3.4 0.34% O-Zr の dry-O<sub>2</sub> 中酸化増量曲線

Fig. 3.4 Weight gain VS. time curves for the oxidation of 0.34% O-Zr in dry-O<sub>2</sub>.

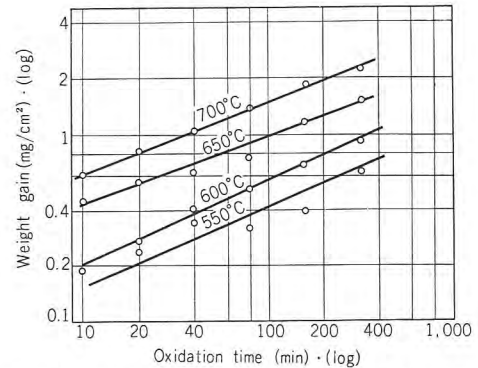


図 3.5 1.2% O-Zr の dry-O<sub>2</sub> 中酸化増量曲線

Fig. 3.5 Weight gain VS. time curves for the oxidation of 1.2% O-Zr in dry-O<sub>2</sub>.

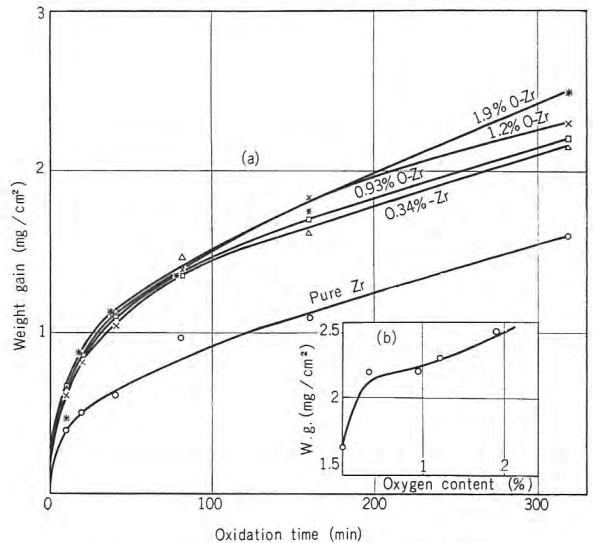


図 3.6 Zr の 700°C dry-O<sub>2</sub> 中酸化におよぼす固溶酸素量の影響

(a) 重量増加曲線 (b) 320 分の重量増加の比較

Fig. 3.6 Effect of oxygen contents on the oxidation of Zr in dry oxygen at 700°C.

(a) Weight gain curve.

(b) Weight gain of each specimen after 320 min are compared.

ける weight gain curve を測定したが、その代表例として図 3.4 および図 3.5 を示す。この曲線はいずれも cubic ないし parabolic の傾向を示し、320 分までの酸化では break away が認められなかった。なおこの場



合、実験試料の都合上 break away が認められるまで系統的に実験することができなかったが、700°C・4,200分ではすでに崩壊し秤量ができないほどになっているのでそれ以前に break away があるのではなかろうか。

図 3.6 は固溶酸素量の影響を示すためにその a には 700°C の weight gain curve を、b には 320 分酸化後の重量増加と酸素固溶量の関係を描いた。以上の結果、酸化速度は 0.34 % の酸素の固溶でやや早くなり、それ以上でとくにいちじるしい変化がなかった。

#### b. Zr-H<sup>(7)</sup>

図 3.7 および図 3.8 は Zr-H の 600~800°C における weight gain curve であってその傾向は純 Zr ととくに相違がない。break away は 800°C において純 Zr とほぼ同じ程度の時間で認められ、700°C は試料の都合上長時間まで行なわなかった。break away までの酸化増量は図 3.9 に比較したように 700°C および 800°C では純 Zr よりも大きく、600°C では小さく、この傾向は wet-

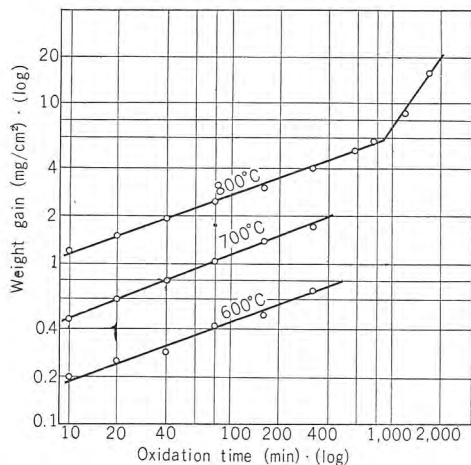


図 3.7 0.35 % H-Zr の dry-O<sub>2</sub> 中酸化増量曲線  
Fig. 3.7 Weight gain VS. time curves for the oxidation of 0.35% H-Zr in dry-O<sub>2</sub>.

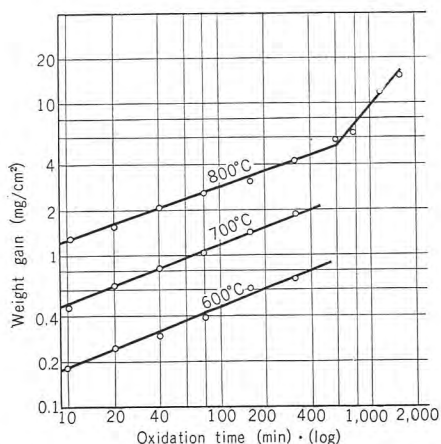


図 3.8 0.5 % H-Zr の dry-O<sub>2</sub> 中酸化増量曲線  
Fig. 3.8 Weight gain VS. time curves for the oxidation of 0.5 % H-Zr in dry-O<sub>2</sub>.

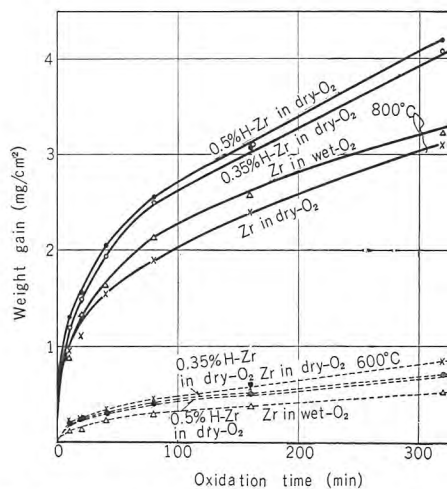


図 3.9 Zr の酸化によらず固溶水素量の影響  
Fig. 3.9 Effect of hydrogen contents on the oxidation of Zr.

O<sub>2</sub> 中の純 Zr の酸化の場合とよく似ている。

#### c. Zr-N<sup>(7)(8)</sup>

図 3.10 および図 3.11 は Zr-N の 600~800°C における weight gain curve であってその傾向は純 Zr とあまり変わらないが、酸化速度は大である。とくに break

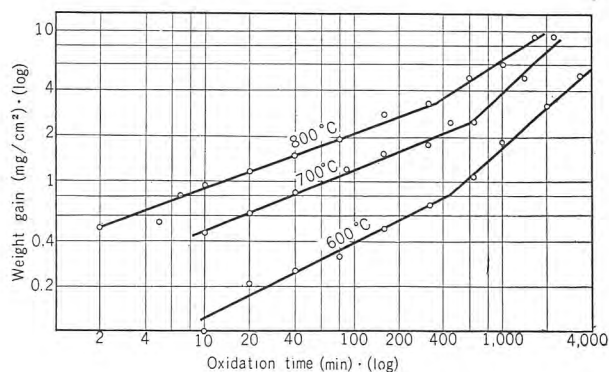


図 3.10 0.05 % N-Zr の dry-O<sub>2</sub> 中酸化増量曲線  
Fig. 3.10 Weight gain VS. time curves for the oxidation of 0.05 % N-Zr in dry-O<sub>2</sub>.

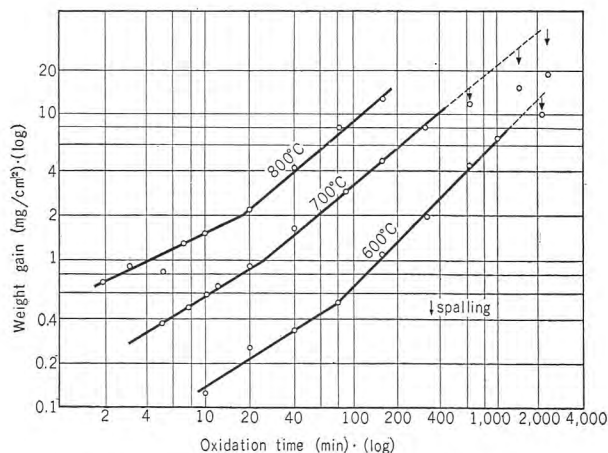


図 3.11 0.35 % N-Zr の dry-O<sub>2</sub> 中酸化増量曲線  
Fig. 3.11 Weight gain VS. time curves for the oxidation of 0.35 % N-Zr in dry-O<sub>2</sub>.

away が短時間で認められるのが特長である。また break away の起る酸化時間は 0.05% N の場合では温度による差がわからないが、0.35% では温度の高いものほど早い。break away 後の酸化はほぼ linear の傾向で進んでいるようであるが、時間が長くなるとやがて崩落が始まるのでよくわからない。

図 3.12 には純 Zr の dry-O<sub>2</sub> 中、同じく空气中、ならびに Zr-N の dry-O<sub>2</sub> 中の三者のそれぞれ 800°C における weight gain curve を比較した。この図によってわかるように、窒素の固溶は酸化速度を高め、break away をいちじるしく短くし、Zr の酸化に対してきわめて有害であった。また純 Zr の空气中酸化の曲線は 0.35% と 0.05% の二つの Zr-N の曲線の間中に位し、純 Zr のそ

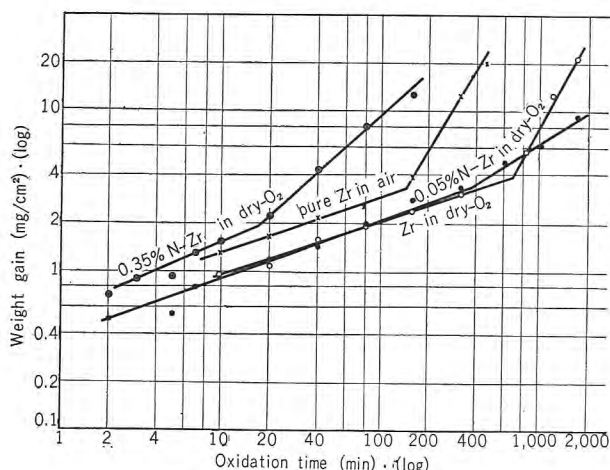


図 3.12 純 Zr, Zr-N の dry-O<sub>2</sub> 中酸化および純 Zr の空气中酸化の比較

Fig. 3.12 Comparison between oxidation curves of Zr and Zr-N in dry-O<sub>2</sub> and Zr in air.

表 3.1 酸化反応次数 ( $n$ )  $W^n = kt$

Oxidation temp.	500°C	550°C	600°C	650°C	700°C	800°C
Sample						
Zr		1.9	2.3	2.9	2.2	2.6
Zr*			2.5		2.6	2.8
Zr**			1.8		2.7	3.0
Zr-0.35% H			2.7		2.9	3.0
Zr-0.5 % H			2.7		2.9	3.0
Zr-0.05% N			2.0		2.4	2.8
Zr-0.35% N			1.7		1.9	2.0
Zr-0.34% O		2.2	2.2	3.3	2.9	
Zr-0.93% O	2.2	2.4	2.6	3.3	2.9	
Zr-1.2 % O		2.3	2.1	2.7	2.5	
Zr-1.9 % O	1.8	2.3	2.3	2.4	2.6	

\* wet-O<sub>2</sub> 中, \*\* air 中, 他は dry-O<sub>2</sub> 中

表 3.2 Break away に至る時間 (分)

Oxidation temp.	600°C	700°C	800°C
Sample			
Zr		7,000~9,000	700~800
Zr*		~10,000	~600
Zr**		2,000~2,500	~150
Zr-0.35% H			~900
Zr-0.5 % H			600~800
Zr-0.05% N	~500	~600	~400
Zr-0.35% N	~80	20~30	15~20

\* wet-O<sub>2</sub> 中, \*\* air 中, 他は dry-O<sub>2</sub> 中

れとより Zr-N の傾向に近く、空气中酸化の過程で窒素が固溶してその影響をあたえる、という考えを説明するのに都合のよい結果の一つであった。

以上の実験結果から酸化反応次数\*および break away に至る時間を一括して表 3.1 および表 3.2 に掲げた。

### (3) 各種 Zr 合金<sup>(9)</sup>

Zr に種々合金元素を添加した場合の酸化をしらべるため、第一報ではまず Al, Ti, Sn, Nb, Mo, W, Ni, Cu などを各 1% (ただし Sn は 2.5%) 添加の影響をのべる。この節では酸化温度は 700°C, ふんい気は dry-O<sub>2</sub> 一律とした。

図 3.13 は各合金の weight gain curve を一括し、同じ条件で作った純 Zr と比較した。この結果、各合金の break away までの酸化はいずれも parabolic ないしは cubic の傾向を示す単調増加であるが、その場合の酸化速度やその後にあらわれる break away までの時間には各合金によってそれぞれ相当の相違があった。すなわち、W, Ni, Cu との各合金は酸化速度遅く、break away

注 \* Weight gain curve から実験式  $W^n = kt$  ( $W$ : 重量増加,  $t$ : 時間,  $n, k$ : 定数) を求めた場合の  $n$ 。

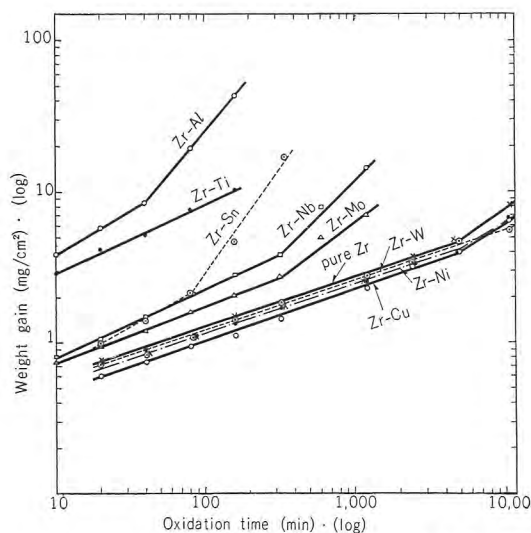


図 3.13 各種 Zr 合金の dry-O<sub>2</sub> 中の酸化増量曲線

Fig. 3.13 Weight gain VS. time curves for the oxidation of various Zr alloys in dry-O<sub>2</sub>.

表 3.3 Zr 合金の酸化反応次数 ( $n$ ), 速度恒数 ( $k$ ) および break away 時間 ( $W^n = kt$ )

Alloy	$n$	$k$ (mg/cm <sup>2</sup> ) <sup>n</sup> /min	break away time (min.)
Pure Zr*	3.0	$2.0 \times 10^{-2}$	5,000
Zr-Cu	2.9	$1.1 \times 10^{-2}$	5,000
Zr-Ni	2.9	$1.5 \times 10^{-2}$	5,000
Zr-W	2.9	$1.8 \times 10^{-2}$	—
Zr-Mo	2.6	$4.2 \times 10^{-2}$	300
Zr-Nb	2.2	$5.6 \times 10^{-2}$	300
Zr-Sn	1.8	$5.0 \times 10^{-2}$	80
Zr-Ti	2.2	1.1	—
Zr-Al	1.7	1.0	40

\* ボタン溶解の純 Zr



の起る時間も長く、そのため耐酸化性は純 Zr と同等かまたはややすぐれていると考えられる。これに対してその他の合金は酸化速度、break away がともに早く、とくに Al, Ti, Sn との各合金はいちじるしい。このうち Zr-Ti は酸化速度の大に比して break away はやや遅く、逆に Zr-Sn は初期の酸化速度が Zr-Nb と同等であるにかかわらず break away ははるかに早い。

表 3.3 に各合金の酸化反応次数，速度恒数，および

break away に至る時間を掲げた。

#### 4. 酸化膜の顕微鏡的観察

##### (1) 純 Zr<sup>(7)(8)</sup>

Zr を高温で酸化すると肉眼的には酸化の初期でただちに黒色の酸化被膜がおおい、酸化時間の経過とともに次第に厚くなるが、これとは別に白色または pink grey にみえる被膜が点在する。この第2の被膜は次第に発達

し、break away 時間では相当広範囲を占める。またきれつが肉眼的にも観察された。筆者らはこれらの変化を試料の表面および断面から顕微鏡によって観察した。

図 4.1 は酸化に伴う表面の変化をまとめたものであるが、まず 700°C 10 分後の dry-O<sub>2</sub> 中酸化表面には A (偏光) のように一様におおう酸化被膜とは別に白点状の酸化膜がみえる。これは普通光で観察した B では明瞭でないが、この二つの写真 (同一部分の撮影) を比較すると、点食は金属上に以前から存在する介在物らしき組織の近傍に発生しているようである。このような局部的に派生する被膜は酸化時間の経過とともに C, D (ともに偏光) のように次第に発達する。また E は 320 分後の表面で D と同一部分を普通光でとったものであるが、局部的に派生した被膜と関連してきれつが認められた。このようなきれつは新しい点食の誘因ともなり、酸化時間が長くなると F (2,900 分・偏光) のように次第に激しくなり均一な酸化膜にも伝播するが、weight gain curve の上では break away は起っていない。また G, H (ともに偏光) は break away の前後に相当する表面で、H のほうがきれつも太くなっているが、G と比べてとくにここで階段的な

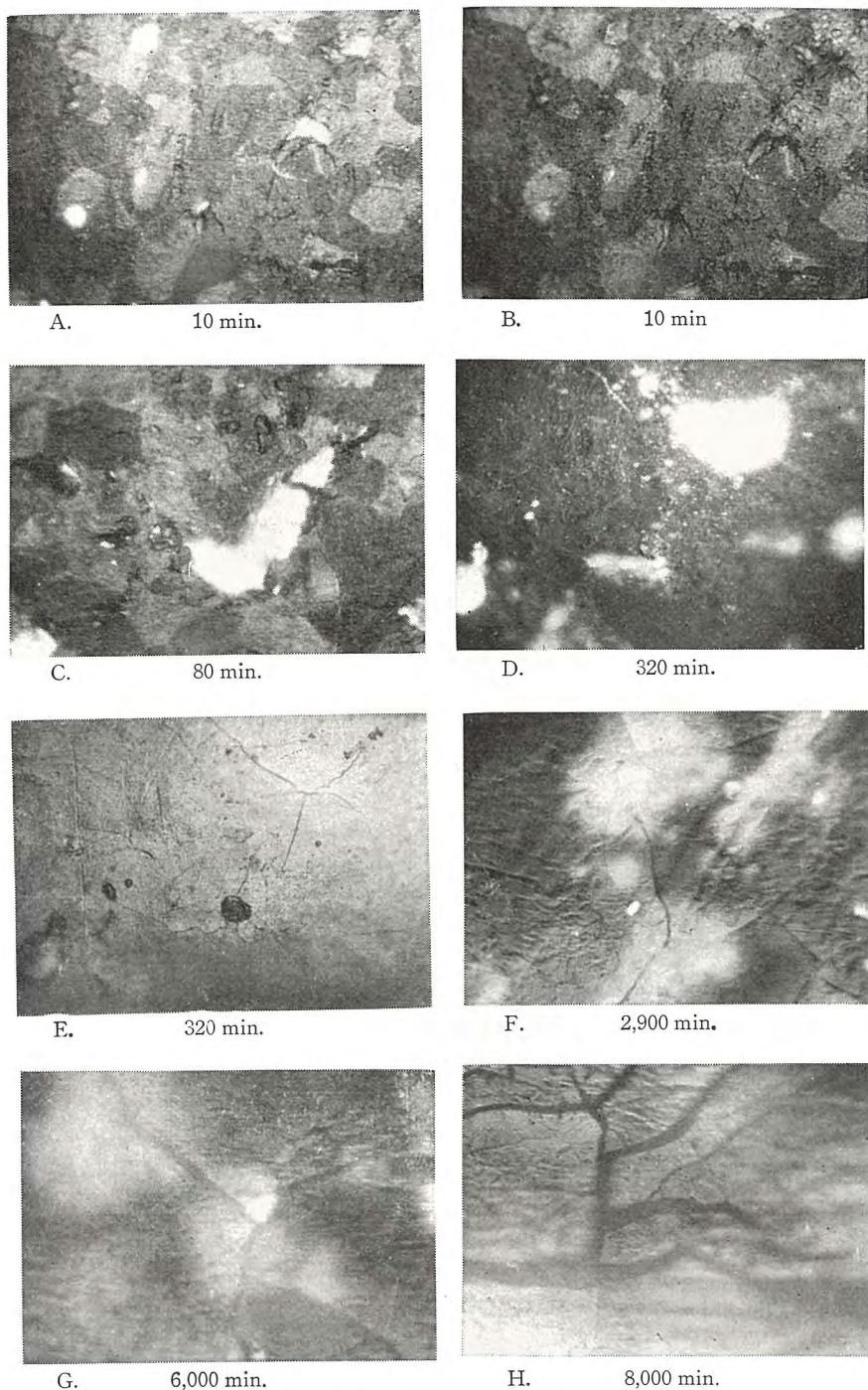


図 4.1 酸化した純 Zr の表面の顕微鏡写真 (×325)  
700°C dry-O<sub>2</sub> 中, (B, E 以外は偏光)

Fig. 4.1 Microphotography of the oxide surface of pure Zr (×325): obtained at 700°C in dry-O<sub>2</sub>. (all are photographed by the polarized light except for B and E)



変化が生じたとはいいがたい。酸化温度が高い場合あるいは低い場合にも単に時間が相違するだけで顕微鏡観察時の経過はまったく同じであった。

また wet-O<sub>2</sub> 中における酸化も dry-O<sub>2</sub> 中と異なるような組織、たとえば hydride のようなものは認められず、その変化は dry-O<sub>2</sub> 中と同様である。

空气中酸化の場合も表面からみた限り（断面ではちがう）では dry-O<sub>2</sub> 中とあまり相違がない。ただ break away 直前のきれつは dry-O<sub>2</sub> 中でみられたほどいじむしくなく（ただし break away は dry-O<sub>2</sub> より早い）、局部派生的な被膜の発達比較的小さいようであった。ただし break away のち酸化増量の大きになるとともにきれつも明瞭となる。

さて以上の表面からの観察では酸化膜の主要部分をなす均一な酸化膜（表面からではただ黒くみえるだけで詳細の様子はわからない）の状態を知ることができないので、つぎに断面から観察した。この結果を図 4.2 に一括する。まずその A は dry-O<sub>2</sub> 中 700°C で 320 分酸化したものであるが、表面に一樣に酸化膜が発達している。

B は 2,900 分後の断面で、膜厚は酸化とともに増加するが、この場合縦にはいったきれつと関連して酸化膜が金属内部に凸状に肥大浸入しているのが観察された。このような箇所は酸化の進行とともに次第に増加し、程度も激しくなり、break away のみられる 8,000 分では C に示したようないじむしい凸状の発達も認められる。しかし凸状の肥大部分を除けば C の左端にみられるように均一に発達し、break away 前後でとくに飛躍的な変化を示さなかった。なお酸化膜は break away 前後を通じ凸状肥大部のきれつなどを除いて顕微鏡的には緻密であった。なお先にのべた局部派生的な被膜は主としてこのような凸状部欠陥に対応するようである。

wet-O<sub>2</sub> 中で酸化したものの酸化膜およびその発達はとくに相違がない。空气中酸化の断面観察の一例を D, E に示したが、その初期では D のように dry-O<sub>2</sub> 中ととくに相違がないのに対して、break away 後さらに酸化の進んだ E では状態が異なっている。

## （2） 気体不純物を固溶した Zr<sup>(7)(8)</sup>

肉眼によってみた表面の変化は Zr-O, Zr-H では純

Zr の dry-O<sub>2</sub> 中酸化表面とそう大きな相違がないが、Zr-O では pink grey の被膜の発達がやや早い。これに対して Zr-N では酸化時間の経過とともに pink grey よりむしろ白色の被膜が黒色被膜の全面にわたってほぼ一樣におおいはじめ、break away 後しばらくすると全面がまったく一樣な白色酸化膜におおわれ、さらに進むと亀甲状のきれつが発生し崩落しやすくなった。

顕微鏡でみた表面でも Zr-O は純 Zr と大した相違がないが、局部派生的な被膜の中心となる点食が介在物だけでなく結晶粒界にも関連して発生する。図 4.3 の A は 0.34% の酸素を含む Zr の 700°C ・ 10 分後の表面を偏光で撮影したものでこの状態を示した。その後の変化は純 Zr 同様で 700°C ・ 320 分では B のようにきれつも観察されるが、酸素固溶量の多いもの

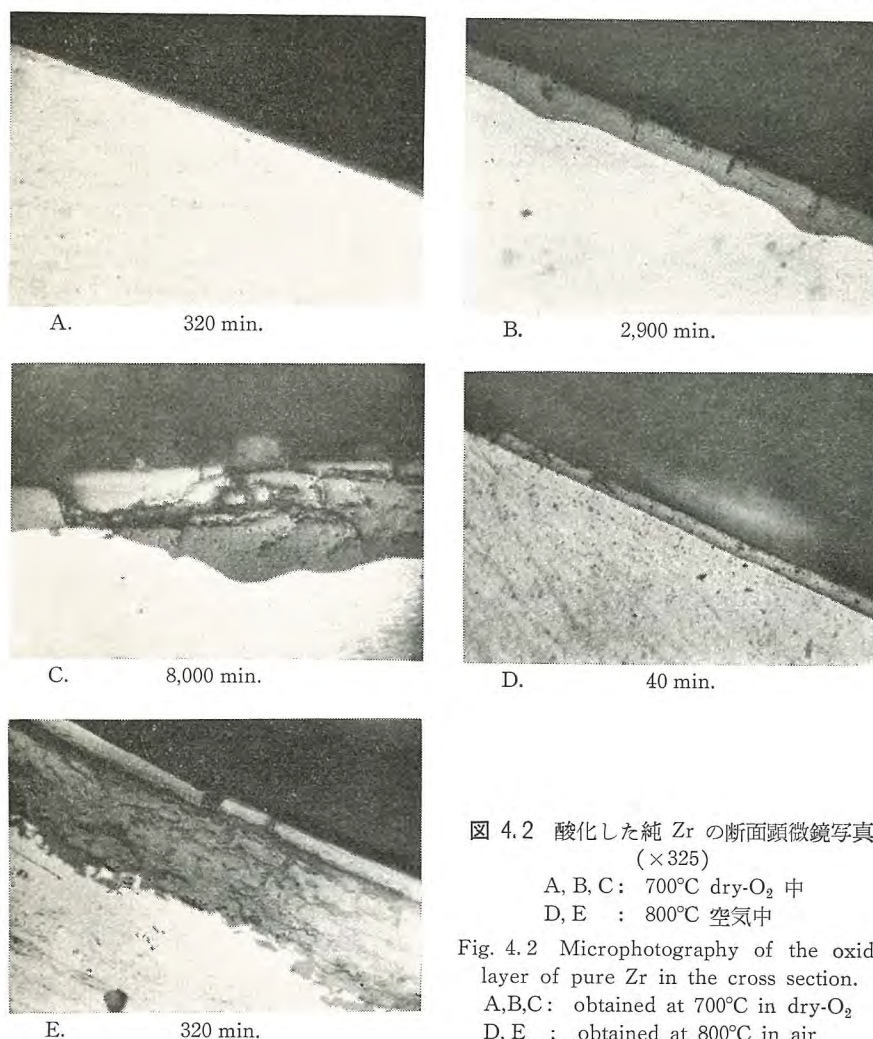
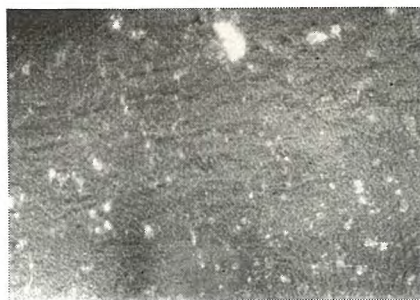


図 4.2 酸化した純 Zr の断面顕微鏡写真 (×325)

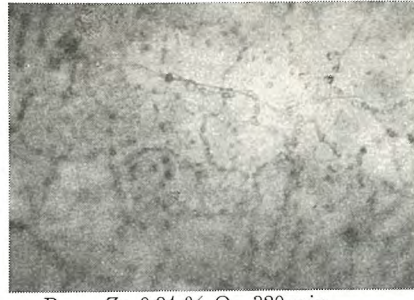
A, B, C: 700°C dry-O<sub>2</sub> 中  
D, E : 800°C 空气中

Fig. 4.2 Microphotography of the oxide layer of pure Zr in the cross section.  
A, B, C: obtained at 700°C in dry-O<sub>2</sub>  
D, E : obtained at 800°C in air

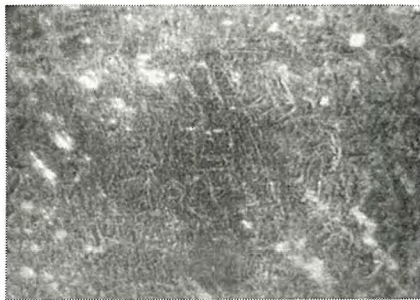




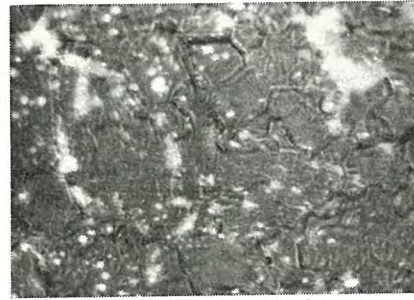
A. Zr-0.34 % O 10 min.



B. Zr-0.34 % O 320 min.



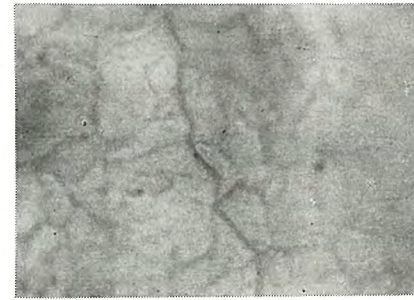
C. Zr-H



D. Zr-0.35 % N 20 min.



E. Zr-0.35 % N 40 min.



F. Zr-0.35 % N 80 min.

図 4.3 気体不純物を固溶した Zr の酸化後の表面顕微鏡写真 (×325)・700°C dry-O<sub>2</sub> 中 (B, C 以外は偏光)

Fig. 4.3 Microphotography of the oxide surface of impure Zr, including various gaseous element. (×325); obtained at 700°C in dry-O<sub>2</sub>; (all are photographed by the polarized light except for B and C)

ど局部派生被膜の発達が早い傾向にあった。

Zr-H もまた純 Zr と相違がない。図 4.3 の C はこの種の試料にだけみられた針状の組織であるが (これが hydride であるか否かはしらべていない), 酸化の進行には影響がなかった。

Zr-N も表面からではそれほど特長もない。ただし図 4.3 D のように break away の直前でも純 Zr のような激しいきれつがない。break away 直後では E のように局部派生膜の発達はいちじるしいがきれつはとくに目だたず、さらに時間の経過した F においてはじめて明了となった。なお 0.05% N

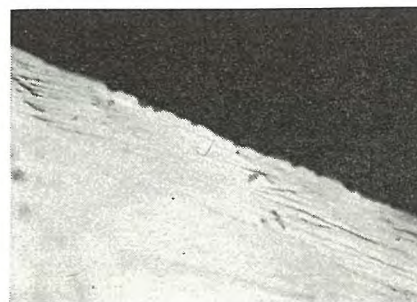
の試料ではやや純 Zr の場合に近い。

つぎに酸化膜を断面からみた。Zr-O, Zr-N は純 Zr と比べてとくに相違した特長はない。

これに対して Zr-N の酸化膜の断面からみた状態には純 Zr と異なった特長が認められる。図 4.4 A は 0.35% N-Zr の break away 直前すなわち 700°C・20 分の断面であるが、その酸化膜はきわめて薄い (もちろん酸化時間も短い)。B は 80 分後で break away 後であるが、ここでは酸化膜が急激に厚くなり、かつその状態はかなり porous であった。またきれつはわずかで、320 分後の C ではじめて明了となった。なお D は 600°C・160 分で break away 後に相当するが、700°C 同様に被膜は porous である。なおまた前述の空气中酸化の被膜と Zr-N のそれとは類似したところがあった。

### (3) 各種合金<sup>(9)</sup>

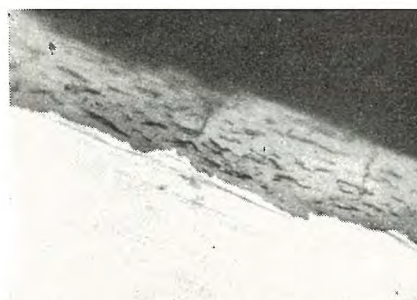
肉眼的にみた表面は W, Ni, Cu



A. 700°C・20 min.



B. 700°C・80 min.



C. 700°C・320 min.



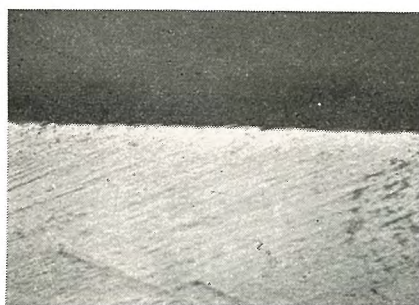
D. 600°C・160 min.

図 4.4 酸化した Zr-0.35% N の断面顕微鏡写真 (×325) dry-O<sub>2</sub> 中

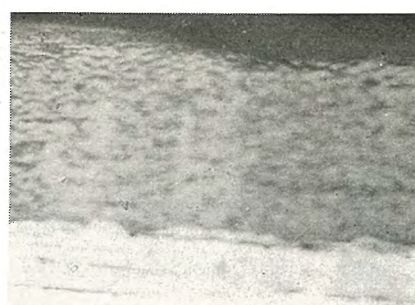
Fig. 4.4 Microphotography of the oxidized Zr-0.35% N in the cross section. (×325) (in dry-O<sub>2</sub>)



Zr-Al

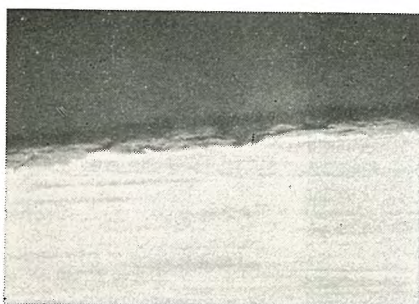


A. 20 min.

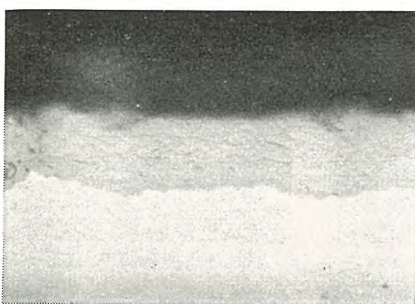


B. 80 min.

Zr-Sn

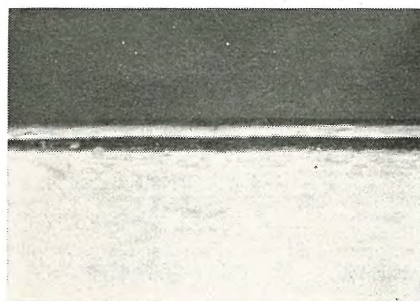


C. 40 min.



D. 160 min.

Zr-Nb



E. 160 min.



F. 600 min.

Zr-Mo



G. 160 min.

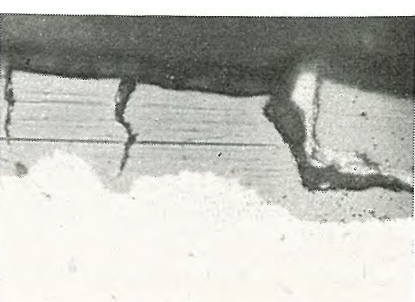


H. 600 min.

Zr-Ti



I. 10 min.



J. 160 min.

との各合金は pure Zr と同様で、他の合金は break away 付近より次第に白色被膜が黒色の均一膜をおおう。ただし Zr-Nb, Zr-Mo はやや茶色がかっている。また Zr-Ti は break away に至らなくとも時間の長いものではザラザラした面となる。

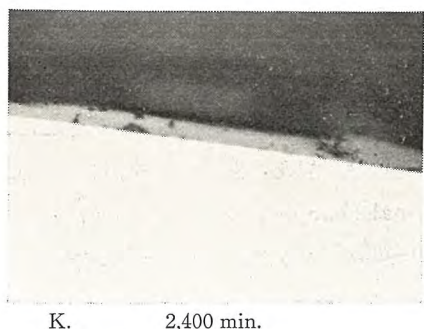
さて各合金の酸化膜を表面からも顕微鏡で観察したが、今までのべたようにその特長はむしろ断面のほうがわかりやすいので、ここでは断面観察についてのべる。図 4.5 にはその結果を一括した。これらの写真をみればわかるように Zr-W, Zr-Ni, Zr-Cu の酸化膜はいずれも純 Zr の酸化膜の発達とまったく同様の傾向を示し、純 Zr の特長であった縦きれつに関連して浸入する酸化膜の凸状の肥大が認められ、また膜自体もきわめて緻密であった。

これに対して Zr-Al, Zr-Sn の酸化膜は前述の Zr-N の特長に類似し、きわめて porous な印象をうけた。また weight gain curve を裏付けるように短時間の酸化で膜厚はすでに厚い。

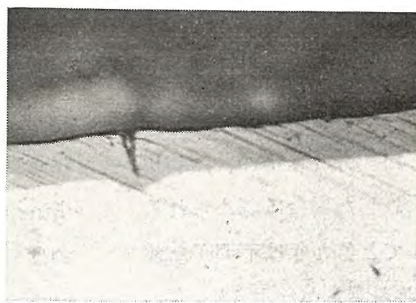
Zr-Nb, Zr-Mo は break away 前では比較的緻密な酸化膜を有するが、break away 後の被膜は部分的に緻密なところと porous なところとがあって純 Zr と Zr-N の両者の中間的な特長をもつものといえる。なお、Zr-Ti の被膜は純 Zr と同様に緻密な印象をうけるが、縦のきれつがき



Zr-W



K. 2,400 min.

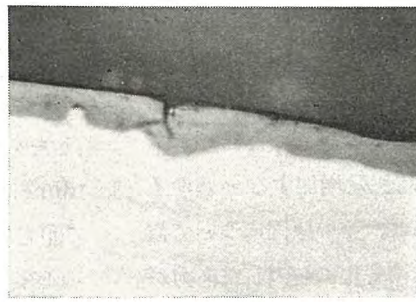


L. 10,000 min.

Zr-Ni



M. 2,400 min.

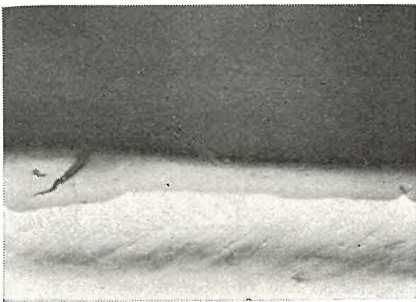


N. 10,000 min.

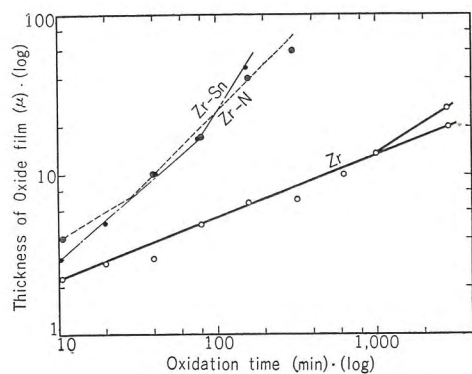
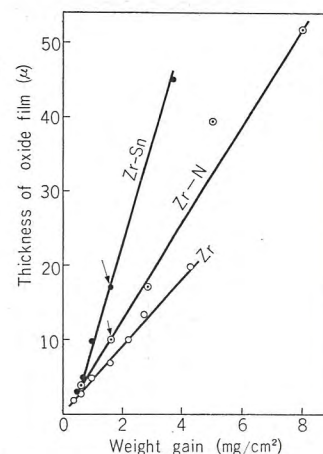
Zr-Cu



O. 2,400 min.



P. 10,000 min.

Q. Zr-Ti 10 min. ( $\times 975$ )図 4.5 各種 Zr 合金の酸化後の断面顕微鏡写真 ( $\times 325$ ) (700°C・dry-O<sub>2</sub> 中)Fig. 4.5 Microphotography of the oxide layer of various Zr alloys in the cross section. ( $\times 325$ ) (obtained at 700°C in dry-O<sub>2</sub>)図 5.1 酸化に伴う膜厚の変化  
700°C・dry-O<sub>2</sub> 中Fig. 5.1 Film thickness VS. time curve for the oxidation in dry-O<sub>2</sub> at 700°C.図 5.2 酸化増量の膜厚の関係  
(700°C・dry-O<sub>2</sub> 中)Fig. 5.2 Film thickness VS. weight gain relation for the oxidation in dry-O<sub>2</sub> at 700°C.

わめて激しく、また金属との境界を拡大してみると図 4.5 Q のようにくしの歯状に入りこんだ特長があった。

## 5. 酸化膜の厚さ<sup>(8)</sup>

前述のように酸化増量は時間に対して plot すると break away で顕著な変化が認められたが、この場合の酸化膜の厚さを顕微鏡によって測定して時間に対して plot してみた。なおこの場合、酸化膜には若干の凹凸もありとくに初期では被膜が薄いので測定困難な点もあるが、できるだけ多くの箇所を測定して平均した。この結果の一例を図 5.1 に示したが、Zr-N, Zr-Sn では weight gain curve と対応して膜厚が急激に変化するのが認められた。なお純 Zr でも、たとえば 700°C・2,900 分で均一部分の厚さはそれ以前の延長上にあるが、凸状に内部に浸入した部分も平均すると図の ○' のようにやや変化しはじめてるのがわかる。



では次に膜厚を酸化増量に対して plot してみるとどうかというところ、その結果は図 5.2 のように膜厚は増量にほぼ比例して変化し、break away に相当した点 (矢印) でとくに変化が認められなかった (break away は酸化増量や膜厚を時間に対して plot した場合に認められる現象で、膜厚を酸化増量に対してとるときは不明瞭な変化であるらしい)。またこの図から明らかなように Zr-Sn, Zr-N は純 Zr と比べて同じ酸化増量に対する膜厚が大であった。

## 6. Dimensional Change<sup>(8)</sup>

Wheeler<sup>(10)</sup>, Hérenguel<sup>(11)</sup> などの研究によれば、Zr には高温酸化に伴って試片の長さが増加するいわゆる dimensional change が認められ、その原因について彼等は酸化物が生成される際の体積変化に起因した応力が

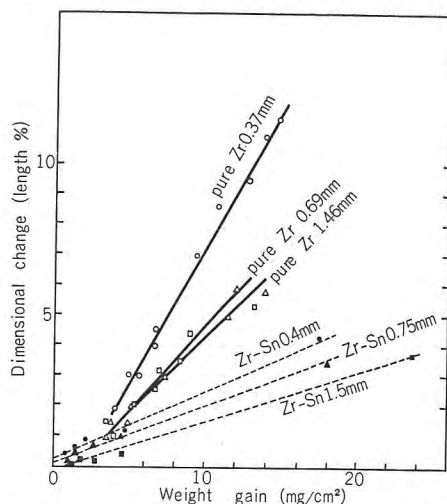


図 6.1 Zr および Zr-Sn の酸化における重量増加と dimensional change の関係, (700°C, dry-O<sub>2</sub> 中)

Fig. 6.1 Dimensional change VS. weight gain relation for the oxidation of Zr and Zr-Sn in dry-O<sub>2</sub> at 700°C.

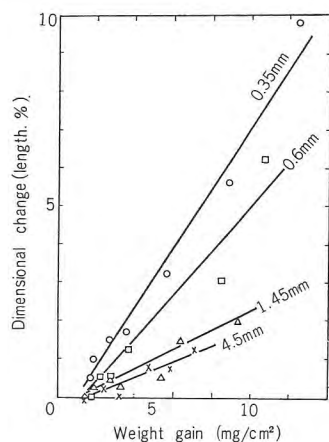


図 6.2 Zr の酸化における重量増加と dimensional change の関係, (800°C, dry-O<sub>2</sub> 中)

Fig. 6.2 Dimensional change VS. weight gain relation for the oxidation of Zr in dry-O<sub>2</sub> at 800°C.

酸化過程で Zr を変形させるのであろうと考察している。

筆者らは酸化膜の顕微鏡でみた状態に特長のあった純 Zr および Zr-Sn の 2 種類を選び、新たに約 25mm の長さで厚さの種々異なった試料を作製して、酸化に伴う dimensional change を測定した (試料厚を変化させたのは Wheeler らの考察どおりならば厚さが異なれば dimensional change もちがうであろうと考えたからである)。この結果、dimensional change と酸化時間の関係は weight gain curve に対応し、酸化増量の増加とともに増加する傾向にあった。また図 6.1, 図 6.2 は dimensional change をその時の酸化増量に対して plot したものであるが、同一条件で試料厚の大なるものほど dimensional change の小さい傾向が認められる。また 700°C の純 Zr と Zr-Sn の結果を比較すると、同じ酸化増量に対応する dimensional change は純 Zr のほうが大であった。

## 7. 拡散層<sup>(8)</sup>

酸化した試料の断面をしらべると、酸化物と金属との境界に酸素の拡散層が観察された。図 7.1 はその一例として純 Zr と Zr-Sn の場合を示す。この写真の金属の部分には文献<sup>(12)</sup>を参考とすると hydride と考えられる組織が見えるが、境界付近ではこれがない。これはおそ

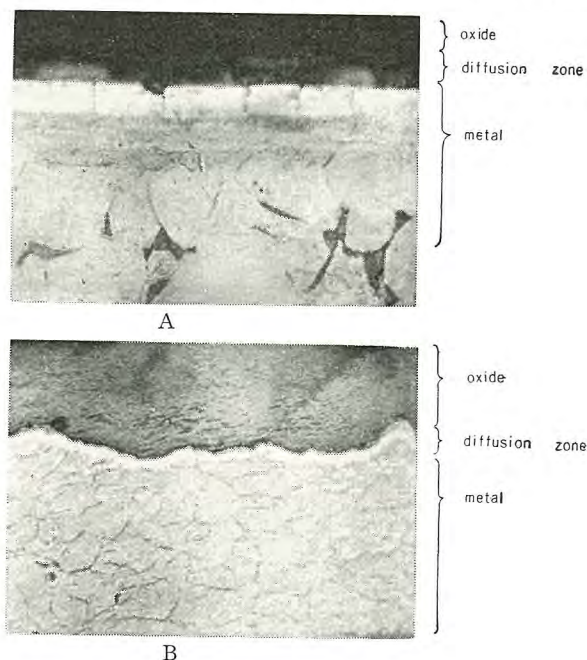


図 7.1 拡散層の顕微鏡写真 (×325)

A: Zr; 700°C・2,900 分 dry-O<sub>2</sub> 中

B: Zr-Sn; 700°C・320 分 dry-O<sub>2</sub> 中

Fig. 7.1 Microphotography of diffusion zone (×325)

A: Zr; obtained in dry-O<sub>2</sub> at 700°C 2,900 min.

B: Zr-Sn; obtained in dry-O<sub>2</sub> at 700°C 320 min.



らく拡散した酸素の影響をうけた結果と思われ、写真の白色の層は拡散層であろう。図 7.1 の A は純 Zr, B は Zr-Sn であって Zr-Sn のほうが酸化増量が大であるにかかわらず拡散層は Zr のほうが深い。なおこの層には縦にきれつが認められるが、酸化の進行中に起ったものか試料を取出す場合の冷却時に発生したものか判別しがたい。

## 8. 考 察

### (1) Weight gain curve

#### a. break away までの反応次数

筆者らの行なった実験は反応次数の決定という目的に対しては、実験条件が完全なものとは考えられないので結果が不十分である。しかし一応総括してみると各試料の break away までの weight gain curve は、表 3.1 のように試料またはふんい気により異なるが、いずれも parabolic と cubic の間のそれぞれの一定の次数をとる  $w^{2-3}=kt$  なる実験式であらわし得、温度の低いものほど parabolic の傾向に近かった。

純 Zr の酸素中酸化について今まで行なわれてきた研究では cubic として扱ったものもあるが<sup>(13)</sup>、その他はほとんどが parabolic law としているようである<sup>(14~17)</sup>。しかしその実験結果をみると parabolic あるいは cubic のいずれかに限定できうるほど明瞭なものとは思われがたく、表 8.1 のように酸化温度によって相当の相違が認められる。また従来の文献で水蒸気中または高温水中酸化を cubic とした報告が多いが、筆者らの実験の Zr wet-O<sub>2</sub> 中および Zr-H の酸化はむしろ cubic に近かった。

表 8.1 Zr の酸素中酸化の反応次数 (n) についての文献例

(°C) temp	Thomas & Chirigos	Mallet	Gulbransen & Andrew
800	2.8	3.6	
700	2.6	3.0	
600	2.3	2.3	
500	2.2		
400	2.0		3.3
350	1.6		3.0
300			2.5
250			2.0

#### b. 反応速度と活性化エネルギー

純 Zr および各気体不純物を固溶した Zr について break away までの反応を parabolic として、それぞれの反応速度恒数  $k$  を求め、これを酸化温度 (絶対温度) の逆数との関係として plot したのが図 8.1~8.4 である。また  $k=A \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right)$  に基づき、これらの図から各反応の activation energy ( $Q$ ), frequency factor ( $A$ ) を算出した結果を表 8.2 に示した。

表 8.2 Parabolic rate として算出した Activation energy および Frequency factor

	Activation Energy cal/mol	Frequency Factor (mg/cm <sup>2</sup> ) <sup>1/2</sup> /min
Zr in dry-O <sub>2</sub>	23,500	$1.4 \times 10^3$
Zr in wet-O <sub>2</sub>	33,700	$2.3 \times 10^5$
Zr in air	32,000	$1.2 \times 10^5$
Zr-0.35% H	33,200	$2.5 \times 10^5$
Zr-0.50% H	31,200	$8.7 \times 10^4$
Zr-0.05% N	34,500	$6.6 \times 10^4$
Zr-0.35% N	35,200	$3.9 \times 10^6$
Zr-0.34% O	24,800	$2.7 \times 10^3$
Zr-0.9 % O	24,900	$3.4 \times 10^3$
Zr-1.2 % O	25,000	$4.5 \times 10^3$
Zr-1.9 % O	26,200	$1.0 \times 10^4$

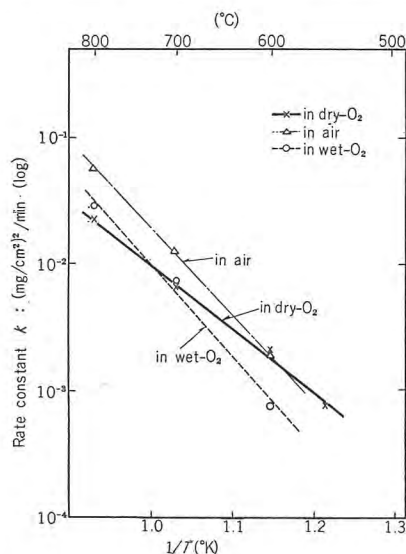


図 8.1 Zr の各種ふんい気中酸化におよぼす温度の影響

Fig. 8.1 Effect of temperature on the oxidation of Zr in various atmosphere.

図 8.1 には純 Zr の各ふんい気中の結果を比較して示したが、この結果では Zr は空気中では 600°C 以上の温度でいずれも酸素中より酸化がいちじるしく、また wet-O<sub>2</sub> 中酸化は高温では dry-O<sub>2</sub> 中より早い、低温では逆に遅い傾向を見ることができる。Zr の dry-O<sub>2</sub> 中酸化の活性化エネルギーは従来 Gulbransen ら<sup>(15)</sup>が 0.009% Hf の Zr 試料を使用し、7.6mmHg の酸素中 6 時間までの酸化の条件で、200~525°C では 18,200 cal/mol, 525~750°C で 28,600 cal/mol と報告し、また Cubicciotti<sup>(13)</sup>は 2.5~3.0% Hf の Zr 試料において、0.1~2.0 cmHg の酸素中 600~920°C 2 時間までの酸化で 32,000 cal/mol と算出した例などがあるが、Zr の純度によってもそれぞれ異なっており、筆者らの結果では 23,500 cal/mol と計算された。空気中酸化の場合は 32,000 cal/mol で dry-O<sub>2</sub> 中よりもやや大であるが、Kendall ら<sup>(10)</sup>が 500~700°C で行なった結果も 41,400 cal/mol であり、値としては異なるが、一般に dry-O<sub>2</sub> 中より大きく、この点傾向として類似していた。また wet-O<sub>2</sub> 中酸化も 33,700 cal/mol



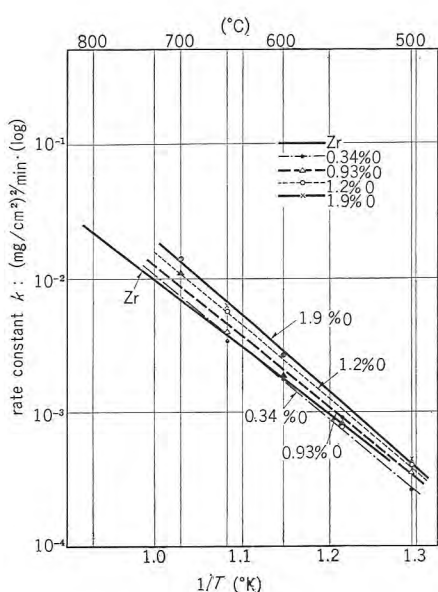


図 8.2 Zr-O の酸化におよぼす温度の影響

Fig. 8.2 Effect of temperature on the oxidation of Zr-O.

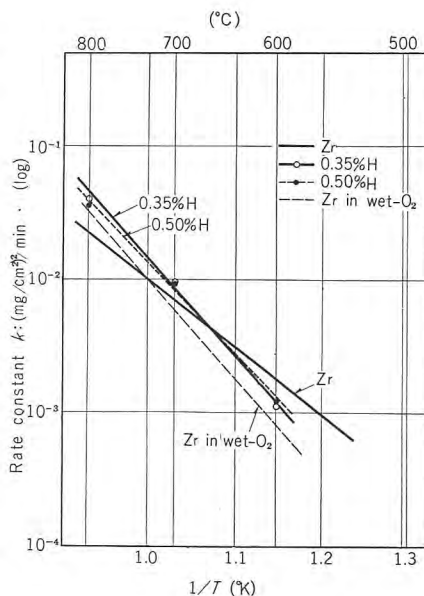


図 8.3 Zr-H の酸化におよぼす温度の影響

Fig. 8.3 Effect of temperature on the oxidation of Zr-H.

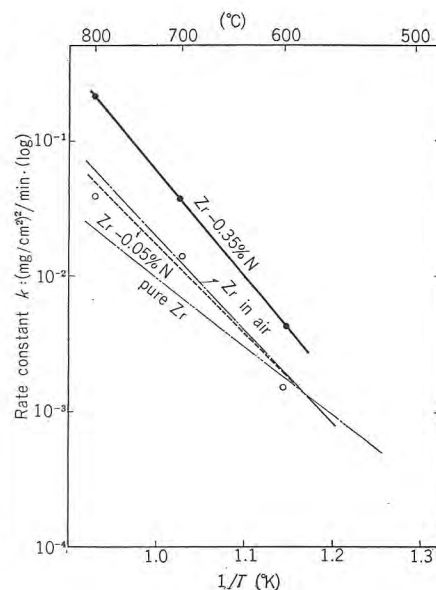


図 8.4 Zr-N の酸化におよぼす温度の影響

Fig. 8.4 Effect of temperature on the oxidation of Zr-N.

の数値が求まり、dry-O<sub>2</sub> 中に比べて大であった。

つぎに固溶する不純物が反応諸因子にあたえる影響を dry-O<sub>2</sub> による酸化の場合について考察してみると、まず固溶酸素に関しては図 8.2 のように  $k$  と  $1/T$  の関係は固溶量と無関係にほとんど同一こう配にあり、したがって活性化エネルギーもほぼ同一である、したがって酸素の固溶によって Zr の酸化機構はとくに変化をうけないと考察してさしつかえないようである。しかし酸素を固溶すると固溶量の異なるものにおいて酸化量はやや増加し、すなわち酸化速度恒数には若干の影響をあたえるようであった。なお Simnad ら<sup>(8)</sup> は Zr と類似の性質を有する Ti について固溶酸素の影響を検討し、1,000°C 以下の反応速度恒数は酸素の固溶によって高められることを示しており、この点においては Zr も一致した現象を示した。なおまた 7 でのべたように base metal との境界には酸素の拡散層が認められており、さらに break away 現象との関連もあると考えられるので、固溶酸素の影響をさらに検討することは重要なようである。現在では上述の程度にしか検討を進めていないので将来着手する予定である。

つぎに Zr-H については図 8.3 のように  $k$  は高温で純 Zr よりやや高く逆に低温ではやや低いという傾向において wet-O<sub>2</sub> 中の Zr の酸化の場合とよく一致した。すなわち水蒸気の影響は水素の影響とみなしてもよいような結果を得た。

Zr-N については図 8.4 に示したが、 $k$  は純 Zr より

高く活性化エネルギーもまた高い。この結果からして純 Zr の空気中酸化の場合に dry-O<sub>2</sub> 中よりも酸化がはなはだしかった例を窒素の影響としてみなしうる。

つぎに Zr 合金の大気中における酸化の文献は Burka など<sup>(18)</sup> の行なった研究がある。ここでのべられた合金のうち筆者らの報告にとりあげた合金についてしらべてみると 648°C の酸化で筆者らとほぼ同じ耐酸化性の順位に報告している。なお筆者らの実験でよい耐酸化性を示した Zr-Cu 合金は CO<sub>2</sub> 中において良い耐食性を示すことを報告した例<sup>(19)</sup>がある。

#### c. break away

酸化増量が急激に多くなるいわゆる break away はそれまでの時間に長短があるとはいえいづれの試料においても認められた。純 Zr の dry-O<sub>2</sub> 中酸化における break away は古い文献では、高純度と称しながらもこの実験試料より純度の劣る試料においてすらも、確認した例はなかったが、これらはいずれも酸化時間が短いためであって、長時間ではいわゆる break away が認められた。

Thomas ら<sup>(20)</sup> は Zr を 300~400°C の高温水蒸気または高圧水中が長時間酸化すると 100 日前後で激しく酸化し崩落することを報告し、これを水素の影響と考えているが、筆者らの場合では dry-O<sub>2</sub> 中でも break away 後にこのような現象が認められ、また wet-O<sub>2</sub> 中や Zr-H などの酸化が Zr の dry-O<sub>2</sub> 中と相違がない点から、break away に対して水素の影響を考える必要がないと思われる。



つぎに Zr の空気中酸化,あるいは dry-O<sub>2</sub> 中でも Zr-N はいちじるしく短時間で break away が認められた。窒素の固溶が break away にあたえる影響にとくに言及した例はないようであるが, Zr の空気中酸化については Kendall など<sup>(10)</sup>が 500~700°C で dry-O<sub>2</sub> 中よりかなり短時間(たとえば 700°C では約 1,100 分)で break away を認めている。さてここで空気中酸化が酸化速度早く break away が短時間で起こることを窒素の影響とすることはまず想像できることであるが,さらに次の事実を考慮すればほぼこれを確かめうるようであった。すなわち, (i) 筆者らの実験で, 窒素を固溶した Zr は純 Zr に比べて dry-O<sub>2</sub> 中でいちじるしく早く break away が認められる。(ii) 前川など<sup>(21)</sup>の研究によれば空気中酸化を行なった Zr の窒素分析をすると, 時間とともに増加していることが検出され, たとえば 700°C・100 分では約 0.01mg, 800°C・100 分では約 0.1mg の窒素を吸収している。(iii) 700°C では上述のように窒素の吸収量はそう大きくないから, 700°C では窒素の影響が少なく break away も長時間となることが予想されたが, 実験結果もそのとおりであった。そしてまた 800°C では空気中酸化のほうが 0.05% N-Zr より多くの窒素を吸収するために短時間で break away し, 700°C では逆に吸収量が少なく 0.05% N-Zr よりはるかに break away が遅れている事実, などである。

break away の起る時間での酸化増量と実験温度との関係をしらべてみたが, 純 Zr では確かめられなかった。しかし Zr-N では高温ほど break away 時の酸化増量が大であった。

つぎに種々合金の break away は Zr-Ti を例外として概して break away までの酸化速度の大なるものほど短時間に認められる傾向があった。

## (2) 酸化膜

Zr およびその合金の酸化膜の発達を顕微鏡によって系統的に観察した例は少ない。Schwartz<sup>(22)</sup>などは Zr の高温水中における腐食時の試料表面を顕微鏡観察し, 筆者らと同じように表面全体をおおう薄い酸化膜と介在物の周囲に別個に発達する酸化膜との 2 種のあることを報告しているが, その後に起るきれつやその影響および断面からの観察にはふれていない。また Hérenquiel<sup>(11)</sup>は 1, 2 の断面顕微鏡写真を報告しているが, 酸化時間に伴う変化については言及していない。Schwartz は彼等の認めた介在物を Zr の hydride または oxide と説明しており, 筆者らの場合でも同じような介在物を認めたがその組成については確かめなかった。

筆者らの実験によれば, 純 Zr 試料の表面の酸化膜に  
ジルコニウムおよびその合金の高温酸化 (1)・山森・実・中島

存在するきれつは断面からも明瞭に観察され, この部分は他に先がけて base metal 中に酸化がきれつを中心として浸入する。すなわちこのようなきれつは酸化の進行に大きな影響をあたえていることが注目された。また weight gain curve で break away の認められるような時間では, このような凸状の浸入はその程度も箇所数もいちじるしく増大しており, したがって酸化増量がそれ以前よりいちじるしく大になっていることをよく説明できると思う。しかしながら酸化膜の肉眼および顕微鏡的観察では, 純 Zr の break away 前後の変化は weight gain curve から印象づけられるような飛躍的な変化を説明できるほど明瞭なものではなく, むしろ漸進的な変化とみなすほうが観察結果に忠実のようであった。なお Zr の酸化被膜はきわめて密な印象をうけた。

このような酸化膜の特長は純 Zr の wet-O<sub>2</sub> 中および Zr-H, Zr-O, Zr-Cu, Zr-Ni, Zr-W, Zr-Ti の dry-O<sub>2</sub> 中酸化の場合の被膜にも観察され, 筆者らはこのようなタイプの酸化膜を生ずるものを I 形と名づけることにした。

これに反して Zr-N の場合は酸化膜の生長にいちじるしい相違が認められた。すなわち Zr-N では break away 直前でもその試料表面には純 Zr にみられたようないちじるしいきれつがなく, 被膜も酸化時間相応に薄いが, break away 後では急激にコントラストの明瞭な第 2 の被膜が表面に拡大し, 膜厚も急に増大したかのような印象をうける。なかんずくその純 Zr に比しての特長は, その断面観察において酸化膜と base metal の境界が比較的一様で凹凸が少ないことであり, また break away 後の酸化膜は全域にわたってきわめて porous な印象をあたえることであった。(break away 前の膜が porous か否かは被膜が薄くて明瞭でない)。

この報告で取扱った試料でこのような酸化膜の特長を示すものは Zr-Al, Zr-Sn であり, 前述の I 形に対応してこのタイプを II 形と称することにした。

なお Zr-Nb, Zr-Mo の酸化膜は顕微鏡的に上記の両形の中間的印象をうけた。

## (3) 酸化膜の状態およびこれと weight gain curve との関係

前述の顕微鏡的に区別した二つのタイプについて膜厚と weight gain の関係をしらべると, 図 5.2 のように II 形の Zr-Sn は I 形の純 Zr に比べて酸化増量に対する膜厚が大きく, このことからしても外観上の density と対応していた。

つぎに図 6.1 および図 6.2 にて同一の条件下の酸化でも試料厚の大なるものほど dimensional change が少



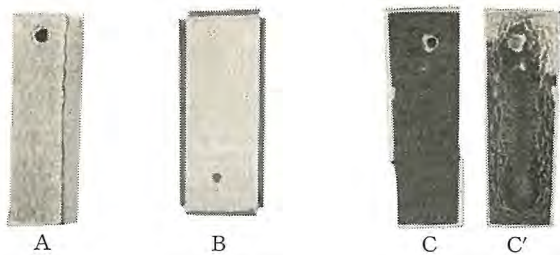


図 8.5 酸化した純 Zr (A) および Zr-Sn (B, C)

Fig. 8.5 The appearance of the pure Zr (A) and Zr-Sn (B and C) specimens after the prolonged period of oxidation.

ない傾向は、酸化物生成の際の体積変化による応力を受ける場合、試料厚の大なるものでは単位断面積あたりに受ける力が少なく、したがって metal の変形も小であったものと考えられ、既述の Wheeler らの考察に都合のよい結果であったともい得よう。なおこのような体積変化による応力説に対して最近高村ら<sup>(23)</sup>は筆者らのいういわゆる拡散層と金属との間の応力を考えた説をのべている。しかしここでは一応酸化物と金属間の応力を考えていくとすると、図 6.1 で同一の酸化増量に対する dimensional change が II 形に属する Zr-Sn よりも I 形の代表例の純 Zr のほうが大きいという結果は、純 Zr のほうが酸化膜と base metal との密着性がより大きいために酸化物生成に起因して dimensional change をひきおこす応力を base metal に十分に伝え得た結果であり、II 形の場合には密着力が弱いために dimensional change が少なかったものと推定できる。図 8.5 は酸化後の試料の実物写真であって、A の純 Zr は酸化膜も密着したまま変形しているのに対して、B の Zr-Sn では酸化膜のほうが金属より多く伸び密着性が劣っているために金属が酸化膜に追従できていないことがエッジのところに明瞭に認められる。なおある場合には C のように酸化膜(C') が容易にはがれることもあり Zr-Sn の酸化膜が密着性に欠けることをよく物語っている。

さてこの報告のように酸化膜の形式で分類してもっとも興味のあることは耐酸化性との対応である。すなわち

表 8.3 酸化膜による合金の分類

Alloy	Type	Alloy	Type	Alloy	Type
Zr-Al	II	Zr-Nb	I + II	Zr-Ni	I
Zr-Ti	I	Zr-Mo	I + II	Zr-Cu	I
Zr-Sn	II	Zr-W	I		

表 8.3 には各合金の酸化速度の大なるものの順に配列し、その酸化膜の状態による分類を掲げたが、この結果 Zr-Ti 合金を例外として II 形に分類される合金は酸化速度大きく、break away も短時間で起るのに対して、I 形に属するものはいずれも酸化速度が小であり break away 時間も長いという一般的な対応が認められた。このような対応がさらに確かめられるならば、今後耐酸化性のおおよその検討を酸化膜のタイプによって推定することができるようである。またこのような酸化膜の相違が

起る原因を明らかにするならば、耐酸化性良好な Zr 合金を計画的に開発することもできよう。現在このような考えのもとに二元および多元合金の検討を実施中である。

なお Zr の酸化物の結晶構造については、Schwartz<sup>(22)</sup>は高温水中で酸化の初期に生ずるものは tetragonal  $ZrO_2$  であり、酸化の経過とともに monoclinic  $ZrO_2$  が顕著となることを報告した。筆者らの高温酸化においても、初期では monoclinic  $ZrO_2$  とともに tetragonal  $ZrO_2$  と思われるものが X 線回折像に現われていた。また各種合金に生ずる酸化膜についても検討の結果、酸化の初期における tetragonal  $ZrO_2$  の monoclinic  $ZrO_2$  に対する混在比率が多いものは概して II 形で耐酸化性が不良であり、少ないものは I 形であるという一般的対応を見出し、すでに口頭では発表したが<sup>(9)</sup>、本来 tetragonal  $ZrO_2$  は状態図的にさらに高温において安定な相であるため、筆者らの観察した tetragonal  $ZrO_2$  の本質をさらに検討する要があり、あわせて結晶構造の変化と酸化の経過との関連をしらべているので、これらについては第二報において報告したい。

終りにこの研究の実験に関し終始協力していただいた当所材料研究室の足立昭治氏に深甚の謝意を表する。

(34-5-18 受付)

#### 参 考 文 献

- (1) R.D. Misch: Acta Metallurgica, 5, 179, (1957).
- (2) Lustman & Kerze: Metallurgy & Zirconium.
- (3) M. Simnad, A. Spilness, & L.O. Katz: J. Metals, 7, 645, (1955).
- (4) J. Belle, B.B. Cleland, & M.W. Mallett: J. Electrochem. Soc., 101, 560, (1954).
- (5) E.A. Gulbransen & K.F. Andrew: J. Electrochem. Soc., 101, 348, (1954).
- (6) 山森・実・中島: 第 2 回原子力シンポジウム (昭 33 年 2 月) および学振ジルコニウム研究班報告会 (昭和 32 年 12 月) において報告
- (7) 山森・実・中島: 学振原子炉金属材料研究委員会第 1 回研究発表講演会 (昭和 33 年 6 月) において報告
- (8) 山森・実・中島: 金属学会 33 年秋期大会で報告
- (9) 山森・実・中島: 金属学会 34 年春期大会で報告
- (10) L.F. Kendall, R.G. Wheeler & S.H. Bush: Nuclear Science & Engineering, 3, 171, (1958)
- (11) D. Whitwham, J. Bogen & J. Hérenghuel: Revue de L'Aluminium, No. 244 (1957)
- (12) M.W. Mallett, W.M. Abrecht: J. Electrochem. Soc., 102, 407, (1955)
- (13) D. Cubicciotti: J. Amer. Chem. Soc. 72, 4138, (1950)
- (14) E.A. Gulbransen & K.F. Andrew: Trans. AIME, 185, 515, (1949); J. Metals, 1, Aug. (1949)
- (15) E.A. Gulbransen & K.F. Andrew: Trans. AIME, 209, 394 (1957); J. Metals, 9, 394, (1957)
- (16) J. Bell & M.W. Mallett: J. Electrochem. Soc., 101, 339 (1954)
- (17) McAdam & Geil: J. Research Natl. Bur. Standards: 28, 593 (1942)
- (18) J.A. Burka, C.S. Crous, & R.E. Swift: AECU-3661
- (19) G.C.E. Olds: Second United Nations International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy, A/CONF. 15/P/1455
- (20) D.E. Thomas & S. Kass: J. Electrochem. Soc., 104, 261, (1957)
- (21) 前川・秦・立原: 日本金属学会誌, 22, No. 3, (1958)
- (22) C.M. Schwartz, D.A. Vangham & G.G. Cocks: AEC report, BMI-793 (1952)
- (23) 高村・佐々木: 金属物理, 5, No. 1, (1959)



# 耐圧防爆容器の強度計算と爆発試験

工業技術院資源技術研究所 兼 平 一 郎\*

三菱電機株式会社福岡工場 中 尾 伊 三 郎\*\*

## Strength Calculation and Explosion Test on Flame-proof Enclosures

Resources Research Institute, Agency of Industrial Science Ichirō KANEHIRA

Fukuoka Factory Isaburō NAKAO

It is a common practice, in the design of flame-proof enclosures, to reinforce thin side plates with ribs and reduce the weight. However, no reliable information is available on the member of reinforcing ribs or their intervals under the circumstances the writer has worked out formula theoretically on the design of these containers. Then based on the information actual explosion tests were conducted on the enclosure of mine power center by exploding methane gas, and also hydraulic tests were given to it so as to check the practicability of the information thus calculated and also to make study on the safety of the enclosure.

### 1. ま え が き

圧力容器の設計にあたっては、一般に薄板に補強リブをつけて重量を軽減するのが普通である。しかし実際の場合補強リブの数、間隔などについてはあまり文献も見当らないので、リッツのエネルギー法によって板とりのたわみエネルギーを計算して補強板のたわみの式を求めた。この式によって当工場製のメインパワーセンタのケースに所定の内圧が作用した場合のたわみを計算した。同ケースに、 $6 \text{ kg/cm}^2$  の水圧試験を行ない、また工業技術院資源技術試験所九州支所（直方）において筆者のひとりによって実際に 10% メタンを入れて爆発試験を行ない、これらのデータと初めに求めた式による計算値との比較を行なったが、大体において良い一致を見た。しかし実物試験であるために最初に零位置の設定が困難であるため一部には不十分と思える測定値もあるがまず実用には十分であろう。

### 2. 試験装置と方法

爆発試験に使用したメインパワーセンタの容器の外形寸法は、図 2.1 のようで、また実験装置および容器の外観は図 2.2~2.4 のようである。

写真にあるように容器内部にメタンガスをファンによって注入かくはんしてメタン濃度を 9~10% とした。内部濃度の均一を期するため濃度測定は各所で行なった。爆発時の内圧測定は電氣的と機械的の両方によった。また点火方法は自動車の点火せんの先端にライカンをつけて点火し、点火位置もいろいろと変えた。防爆容器であるから実際はスリットが許されるのであるが、スリットがあるとガスの濃度その他爆発試験に不具合であるので鏡板の取付面はゴムパッキンを入れて密閉容器とした。

内容積は実物トランスと同容積になるように箱に砂を

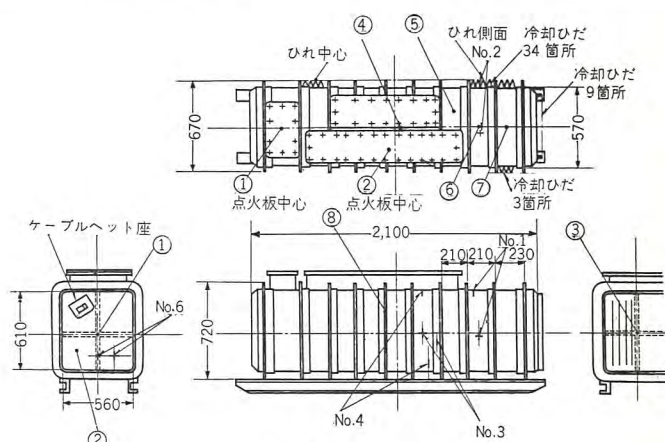


図 2.1 外形図

Fig. 2.1 Sketch of external form.



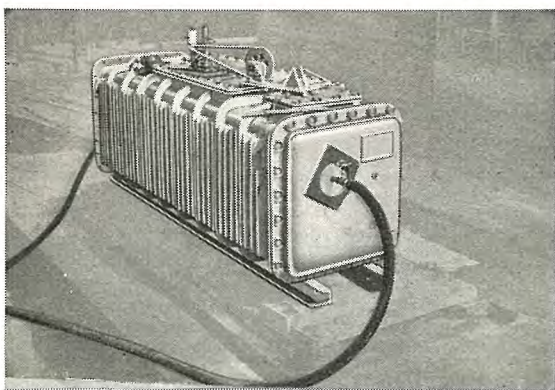


図 2.2 上面の白い円筒形のは圧力インジケータ(機械的)  
Fig. 2.2 White cylinder on the top is a pressure indicator.

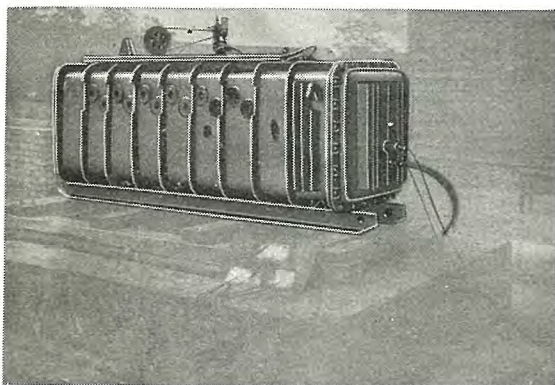


図 2.3 図 2.1 の No. 1, No. 2…… とあるのはストレング  
ジのテンプ位置. 手前の鋼板は温度補正のため  
Fig. 2.3 Those marked No. 1 and No. 2…… indicate the  
positions of strain gage lamps. Steel plate in the  
front is for temperature compensation.

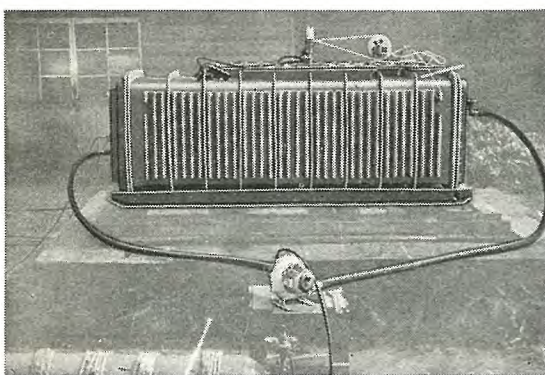


図 2.4 鏡板両面にあるバルブおよびゴムパイプはメタンガス  
の注入およびかくはんを行なうためのもの。  
両パイプがファンの所でつながっている。  
Fig. 2.4 Valves and rubber tubes on the end plates are  
used for filling methane gas. Both pipes are  
connected at the fan.

つめて容器の中に入れて点火したが内圧がせいぜい 1.2 ~ 1.6 kg/cm<sup>2</sup> 程度で、爆発試験としては内圧が不足であるために内容物を取除いて中をからにして爆発試験を行った。その結果ようやく内圧 4.5 ~ 5 kg/cm<sup>2</sup> となったから以後の実験はこの方式で行なった。したがって実際に坑内において生ずる爆発圧力よりもいっそう高い状況

で試験を行なった結果になる。

### 3. 板のたわみ応力の計算法

く形板をはりで補強した場合の計算法について述べる。

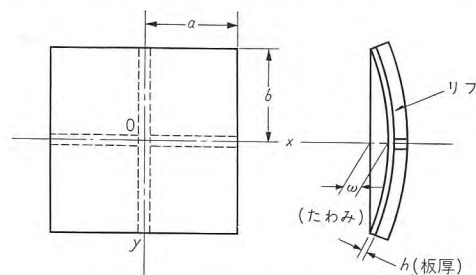


図 3.1 補強した板のたわみ  
Fig. 3.1 Deflection of reinforced plate.

#### (1) 十字はりで補強した場合

図 3.1 において補強板に圧力が作用した場合のたわみを  $\omega$ ,  $x, y$  軸に関する曲げモーメントを  $M_x, M_y$  とする外支持のく形板の境界条件は

$$\begin{aligned} \text{a. } x = \pm a, \quad \omega = 0 \quad M_x = 0 \\ \text{b. } y = \pm b, \quad \omega = 0 \quad M_y = 0 \end{aligned}$$

したがって、境界条件を満足するようなたわみの式は

$$\omega = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} C_{mn} \times \cos \frac{m\pi}{2a} x \times \cos \frac{n\pi}{2b} y \dots\dots\dots (3.1)$$

とすることができる。一方板のたわみエネルギーは

$$\int_0^a \int_0^b \left\{ \frac{D}{2} \left[ \left( \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right)^2 - 2(1-L) \left[ \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} - \left( \frac{\partial^2 \omega}{\partial x \partial y} \right)^2 \right] \right] - \omega q \right\} dx dy \dots\dots\dots (3.2)$$

また十字はりのたわみエネルギーは

$$\int_0^a \frac{EI_1}{2} \left( \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} \right)^2 dx + \int_0^b \frac{EI_2}{2} \left( \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right)^2 dy \dots\dots (3.3)$$

ゆえに全体のたわみエネルギー  $V$  は

$$V = (3.2) + (3.3) \dots\dots\dots (3.4)$$

補強はりの慣性モーメントは同一はりを使用するとし、 $I_1 = I_2 = I$  として式 (3.1) を微分し式 (3.2), (3.3) に代入すると結局式 (3.4) は

$$\begin{aligned} V = \frac{1}{2} D \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} C_{mn}^2 \left\{ \frac{\pi^4 ab}{4} \left[ \left( \frac{m}{2a} \right)^2 + \left( \frac{n}{2b} \right)^2 \right]^2 \right\} \\ - \sum_m \sum_n C_{mn} q \frac{4ab}{mn\pi^2} \\ + \sum_m \sum_n \frac{EI}{4} C_{mn}^2 \left\{ \left( \frac{n\pi}{2b} \right)^4 b + \left( \frac{m\pi}{2a} \right)^4 a \right\} \quad (3.5) \end{aligned}$$

ただし  $D = \frac{Eh^3}{p(1-L^2)}$  (板の曲げこわさ)  $E$ : 弾性係数,  $q$ : 等分布荷重,  $L$ : ポアソン比,  $\omega$ : たわみ,  $h$ : 板厚,  $m=n=1, 3, 5, \dots\dots$

エネルギー最小の原理に従って



$\frac{\partial V}{\partial C_{11}}=0, \frac{\partial V}{\partial C_{33}}=0, \frac{\partial V}{\partial C_{55}}=0$  として常数  $C_{11}, C_{33}, C_{55}$  を求めると、板および補強はりとして計算すると

$$C_{11} = \frac{q \times 16^3 \times a^4 b^4}{\pi^6 [D(a^2 + b^2)^2 + 2EI(a^3 + b^3)]} \quad C_{33} = \frac{C_{11}}{729}$$

以上のように  $C_{11}$  以外は急速に小さい値となるので工学的計算においては  $C_{11}$  だけで十分であると考えられる。またたわみの最大点は中心すなわち  $x=y=0$  の位置であって、原点においては  $\cos$  値は零であるから、

式 (3.1) は

$$\omega = C_{11} \dots \dots \dots (3.6)$$

多数のはりで補強した場合についても十字ばりの場合と同様に計算することができる。これらの計算を  $b/a=1 \sim 3$  の間に補強はりの数をいろいろ変えた場合について計算したものが表 3.1 である。たとえばある場合の最大たわみ量を求める例を示す

例  $b/a=1$  とすれば、最大たわみは

$$\omega = 0.350qa^5 \times 10^{-6} / (h^3a + \Delta \times I)$$

$\Delta$  は表 3.1 より、 $I$  の値はそれぞれの補強はりの慣性モーメントである。

## (2) 応力の計算

板の最大たわみは板の中央部すなわち  $x=y=0$  の原点に生ずる。また最大曲げモーメントも同様に原点に生ずる。したがって中央部付近は周辺部の影響が少ないものと考えられる

$$\sigma = \frac{M}{Z} = \frac{\omega \times h \times \alpha}{a^2} \dots \dots \dots (3.7)$$

ただし  $\omega, h, \alpha$  は表 3.1 よりの値、 $a$ : 短辺の 1/2 の値

## (3) 補強なしの場合

前式 (3.1) により補強した板の全体としての任意点のたわみ、その他は計算できるが、実際には補強はりの間にく形部分の板は外周固定の板として単独に変形しているはずであるからその部分はさらに計算したほうが良い。すなわち、く形部分は内圧によるモーメントによって生ずる応力と鏡板の面積による軸方向の引張力との合力が作用していると考えられる外周固定として内圧  $P=4.4 \text{ kg/cm}^2$  とすれば (外形図参照)

表 3.1 たわみおよび応力

$\omega$ : 最大たわみ cm $I$ : はりの慣性モーメント $h$ : 板の厚み cm $a$ : 短辺 cm $q$ : 分布荷重 $\text{kg/cm}^2$ 単位は cm とする												
$b/a$	たわみ $\omega$	$\Delta$ の値	$\Delta$ の値	$\Delta$ の値	$\Delta$ の値	$\Delta$ の値	$\Delta$ の値	$\Delta$ の値	$\Delta$ の値	$\Delta$ の値	応力 $\gamma$	$\alpha$ の値
1	$0.350qa^5 \times 10^{-6} / (h^3a + \Delta I)$	10.9204	13.650	16.380	19.110	21.840	16.380	19.110	21.840	24.570	$\omega \times h \times \alpha / a^2$	$36.9 \times 10^5$
1.1	$0.4205qa^5 \times 10^{-6} / (h^3a + \Delta I)$	10.423	13.408	16.384	19.809	22.340	15.644	18.621	22.046	24.577	"	$35.5 \times 10^5$
1.2	$0.4886qa^5 \times 10^{-6} / (h^3a + \Delta I)$	10.007	13.181	16.352	19.522	22.693	15.016	18.187	21.357	24.528	"	$34.4 \times 10^5$
1.3	$0.5533qa^5 \times 10^{-6} / (h^3a + \Delta I)$	9.664	12.957	16.271	19.585	22.898	14.466	17.779	21.093	24.407	"	$33.4 \times 10^5$
1.4	$0.6152qa^5 \times 10^{-6} / (h^3a + \Delta I)$	9.333	12.758	16.179	19.600	23.022	14.004	17.426	20.847	24.269	"	$32.7 \times 10^5$
1.5	$0.6724qa^5 \times 10^{-6} / (h^3a + \Delta I)$	9.063	12.538	16.028	19.519	23.009	13.572	17.063	20.553	24.043	"	$32.2 \times 10^5$
1.6	$0.7257qa^5 \times 10^{-6} / (h^3a + \Delta I)$	8.799	12.317	15.848	19.379	22.910	13.179	16.710	20.241	23.772	"	$31.8 \times 10^5$
1.7	$0.7740qa^5 \times 10^{-6} / (h^3a + \Delta I)$	8.512	12.077	15.621	19.166	22.712	12.798	16.343	19.888	23.432	"	$31.5 \times 10^5$
1.8	$0.8192qa^5 \times 10^{-6} / (h^3a + \Delta I)$	8.304	11.844	15.387	18.930	22.473	12.452	15.995	19.538	23.081	"	$31.0 \times 10^5$
1.9	$0.8602qa^5 \times 10^{-6} / (h^3a + \Delta I)$	8.089	11.601	15.126	18.651	22.175	12.115	15.640	19.164	22.690	"	$30.8 \times 10^5$
2.0	$0.8975qa^5 \times 10^{-6} / (h^3a + \Delta I)$	7.800	11.353	14.847	18.340	22.834	11.790	15.283	18.777	22.270	"	$30.6 \times 10^5$
2.2	$0.9635qa^5 \times 10^{-6} / (h^3a + \Delta I)$	7.479	10.869	14.278	17.688	21.097	11.189	14.598	18.008	21.417	"	$30.2 \times 10^5$
2.4	$1.0184qa^5 \times 10^{-6} / (h^3a + \Delta I)$	7.045	10.387	13.690	16.994	20.297	10.626	13.929	17.233	20.536	"	$29.9 \times 10^5$
2.6	$1.0646qa^5 \times 10^{-6} / (h^3a + \Delta I)$	6.618	9.925	13.112	16.300	19.487	10.106	13.294	16.481	19.669	"	$29.6 \times 10^5$
2.8	$1.1034qa^5 \times 10^{-6} / (h^3a + \Delta I)$	6.386	9.482	12.550	15.617	18.685	9.622	12.689	15.757	18.825	"	$29.5 \times 10^5$
3.0	$1.1363qa^5 \times 10^{-6} / (h^3a + \Delta I)$	6.134	9.064	12.012	14.961	17.909	9.173	12.121	15.070	18.019	"	$29.4 \times 10^5$



$$\sigma_1 = \alpha_1 \frac{P}{h^2} \left( \frac{b}{2} \right)^2 = 2,788 \text{ kg/cm}^2,$$

ただし  $b=16\text{cm}$ ,  $h=0.45\text{cm}$

軸方向の引張力による応力は

$$\sigma_2 = \text{鏡板の面積} \times P / \text{板厚断面積} = 143 \text{ kg/cm}^2$$

したがって側板の全応力は  $2,788 + 143 = 2,931 \text{ kg/cm}^2$  となる。

#### 4. 水圧および爆発試験

##### (1) 水圧試験結果

メインパワーセンタの容器 (図 2.1 参照) の水圧試験において計算値と実測値とを比較するにあたって側板の部分は母線箱がついているために計算が困難であるから鏡板の部分 (この部分は十字補強) について表 3.1 の係数を使って計算した値と実測値との比較は表 4.1 のようであり、各部の実測値を図示したものが図 4.1 である。同時に示す数字は図 2.1 に記入した数字を示す。

##### (2) メタンガスによる爆発試験

メタンガス濃度が均一に 9~10% になるように図 2.4 に示すファンによって十分かくはんした。内容積は実際の場合と同一になるように砂をつめた箱を内部に入れた。このように内容積を実際のメインパワーセンタの内容積と同一にするようにすると、最初に述べたように爆発点火した場合、内圧がせいぜい  $1.2 \sim 1.6 \text{ kg/cm}^2$  程

表 4.1 水圧試験と計算値の例

圧 力 (kg/cm <sup>2</sup> )	たわみ計算値 (cm)	たわみ実測値 (cm)
$q=1$	0.06	0.045
$=2$	0.12	0.098
$=3$	0.18	0.155
$=4$	0.24	0.212
$=5$	0.30	0.38

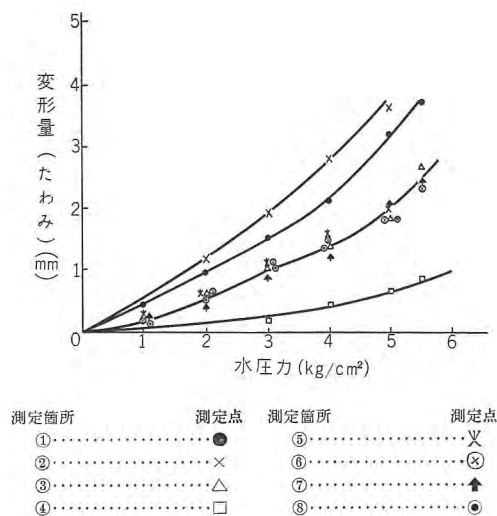


図 4.1 水圧試験結果

Fig. 4.1 Result of hydraulic tests.

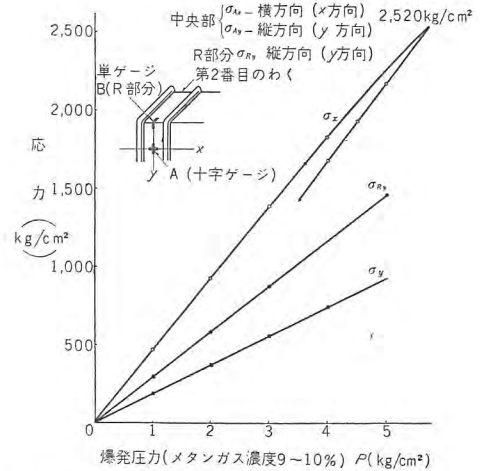


図 4.2 側板および R 部の応力 (ゲージ No. 1)

Fig. 4.2 Stress of side plate and bent part.

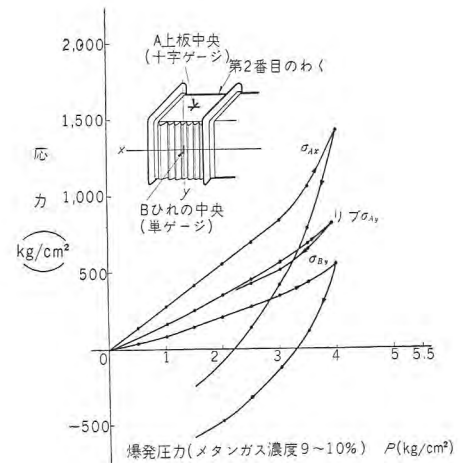


図 4.3 上板および側板の応力 (ゲージ No. 2)

Fig. 4.3 Stress of side plate and fin.

度で爆発試験としておもしろくないので容器の中をからにして実験を行なった、内容物がある場合は 6~7 回繰り返して点火しても内圧は上昇しないということは今後同様な容器を設計するにあたって一考を要すると思われる。また鏡板の取付面にパッキンを入れて密閉容器として爆発試験を行なったところ、内圧  $4 \sim 5 \text{ kg/cm}^2$  となった。ひずみ測定点は図 4.1 に示すとおりである。このひずみを次式により計算する。

$$\sigma_x = \frac{(\epsilon_x + \mu \epsilon_y) E}{1 - \mu^2}, \quad \sigma_y = \frac{(\epsilon_y - \mu \epsilon_x) E}{1 - \mu^2}$$

ただし  $E$ : 弾性係数  $\mu$ : ポアソン比

計算結果が図 4.2~4.6 に示すものである。図 4.7 は、爆発時のひずみおよび圧力の上昇速度を示すものである。

#### 5. 結果に対する考察

(1) 爆発圧に対しては図 4.7 によると圧力の上昇とひずみの上昇とは一致している。したがってひずみ速度



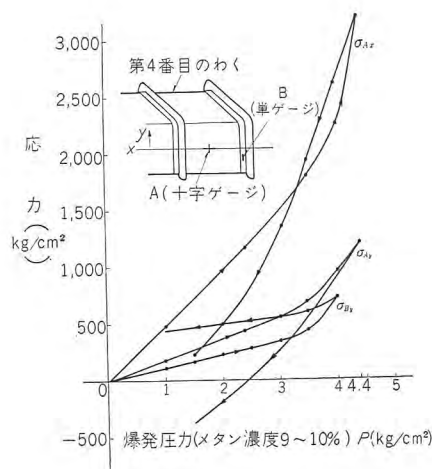
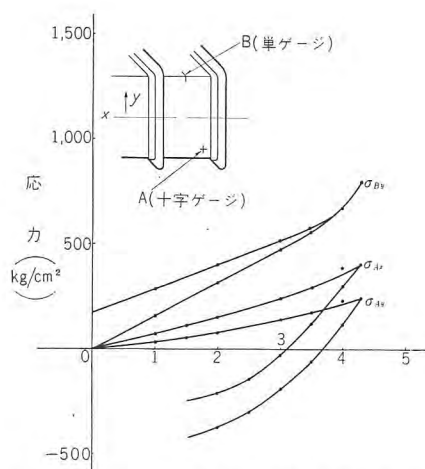


図 4.4 側板およびアングルの応力  
(ゲージ No. 3)

Fig. 4.4 Stress of side plate and shape steel.



爆発圧力(メタン濃度 9~10%)  $P(\text{kg/cm}^2)$

図 4.5 側板およびR部分応力(ゲージNo. 4)

Fig. 4.5 Stress of side plate and bent part.

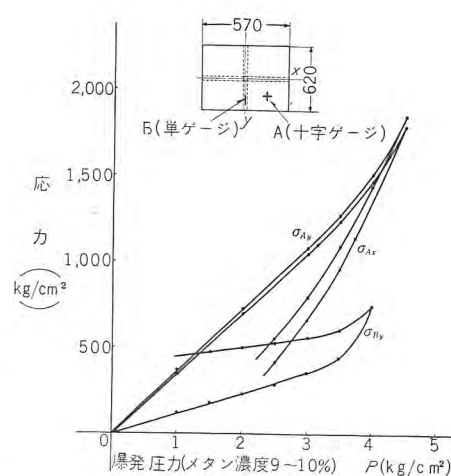


図 4.6 鏡板の応力 (ゲージ No. 6)

Fig. 4.6 Stress of end plate.

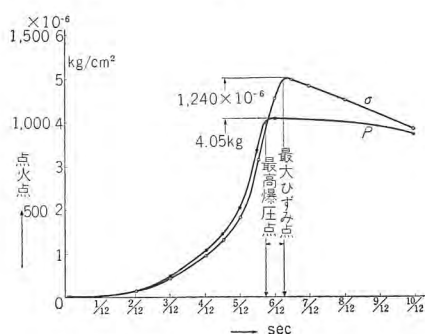


図 4.7 爆発圧力

Fig. 4.7 Explosion pressure.

をもっとも早い部分で計算して見ても  $7.9 \times 10^{-3}/\text{sec}$  遅いところは  $1.68 \times 10^{-3}/\text{sec}$  程度である。文献によるとこの程度のひずみ速度では降伏点抗張力に変化を生じないので衝撃荷重と考える必要はない。また耐圧防爆容器は压力容器と同一であると考えする必要もない。压力容器においてはたとえばひずみが増加して内容積が増加しても内圧はそれほど低下しない。したがってひずみはますます増加し破壊する。したがって設計にあたっては降伏点を基準に行なうが耐圧防爆容器においては抗張力を基準に設計して良い。

(2) また防爆容器は  $8 \text{ kg/cm}^2$  の圧力に耐える必要があるといわれているが、メタンガスの場合球形容器においてさえ最高圧力  $6.3 \sim 7.23 \text{ kg/cm}^2$  である。さらに一般電気機器においては分割、接触などによりさらに  $1 \sim 2 \text{ kg/cm}^2$  低下する。また  $12 \text{ mm}^2/\text{l}$  の比開口断面積の場合最高圧力  $4 \text{ kg/cm}^2$  であるといわれている。この実験においても容器の内容物を含まずに全容積の場合でさえ数十回の爆発試験で  $5 \text{ kg/cm}^2$  をこえることはなかった。またさらに実際のマイパワーセンタと同一の容積物を入れての試験においては内圧はせいぜい  $1 \sim 2 \text{ kg/cm}^2$  程度上昇するだけで爆発試験にならなかった。すなわち

耐圧防爆容器の強度計算と爆発試験・兼平・中尾

実容積(容器内容積から内容物の体積を差引いたもの)に対して表面積が大きい場合は爆発圧はあまり上昇しないものである。

(3) 図4.2~4.6によると、直線のものもあるが大部分は応力が小さいところでも曲線になっている。これは図4.1の水圧試験結果においても同じことである。この理由は試験の開始位置が板のほんとうの中立位置から開始したかどうか不明であるし、また板の外周条件のために直線性が失われたと思われる。

(4) 側板の応力測定値が  $3,000 \text{ kg/cm}^2$  となっているが、実際圧力が  $5 \text{ kg/cm}^2$  も上昇することがないのと思うと問題にするほどではない。また1回の爆発によって構造物はそれだけ強くなっている。メタンによる爆発試験において密閉容器としてもっとも過酷な試験を数十回繰り返したのに、図に示す程度の応力であるから十分安全なものである。

## 6. む す び

(1) く形板の補強の方法は本法によって補強したものが水圧試験、爆発試験において大体一致した値を得たので表3.1は十分使用しうる。

(2) 密閉容器としてもっとも過酷な試験を行なったが、十分安全である。

(3) 防爆容器に内容物がはいっているときは、内圧はあまり上昇しない。この実験においては  $1.2 \sim 1.6 \text{ kg/cm}^2$  以上にはならなかった。

## 参 考 文 献

- (1) 技術メモ 7788
- (2) Theory of plate and shell S. Timoshenko
- (3) 蒲生朝郷訳: 防爆電気機器原論 (Müller Hillebrand 著)



# IBM-650 形電子計算機による電力線事故時の通信線 誘導電圧発生確率の計算 (III)

## (小又川系電力線の場合)

本 社 迎 久 雄\*

## Calculation with Type IBM-650 Electronic Computer on Probability of Inductive Voltage Generation on Communication Lines during Power Line Faults

Head Office Hisao MUKAE

Calculations made on the probability of induced voltages appearing on communication lines have made it clear that directly grounded system are much more favorable in this connection. Data made available in the calculation of induced voltage on Komatagawa system of the Mitsubishi Kinzoku Company are so perfect that they will, together with those of Yuze system of the Tohoku Power Co., lead to very clearcut conclusion that induced voltage appearing on communication lines by faults of directly grounded systems is much less than those caused by ungrounded systems even though the transmission voltage is higher in the former.

### 1. ま え が き

さきに、IBM-650 形電子計算機による電力線事故時の通信線誘導電圧発生確率の計算例として、三菱金属小又川系と連けいしている東北電力湯瀬系電力線地絡事故時に付近通信線——電電公社通信線と国鉄通信線——に発生する誘導電圧を、現状および非接地系、直接接地系について解析した結果を報告し、東北電力湯瀬系に対しては、誘導電圧に関してほとんど完璧に近いデータが得られているが、引続き東北電力系と別個に、湯瀬系と連けいしている三菱金属小又川系で地絡事故を起した場合、付近通信線——この場合は営林電話線と、電電公社通信線が対象となる——に発生する誘導電圧について、東北電力湯瀬系で行なったと同じく系統を 10 区分してその発生確率を計算したので、続報として報告する。

この場合、地絡事故時の零相電流分布の計算を IBM-650 によって行なうことは、すでに実施済であるので、小又川系でも、そのプログラムを用いて、零相電流分布計算から誘導電圧計算まで、すべて IBM-650 によって行なった。

### 2. 確率を求めるための 10 分割と地絡確率の計算

計算する小又川系の系統状態は、30 kV 非接地系〔系統状態(Ⅰ)〕および 52 kV 直接接地系〔系統状態(Ⅱ)〕の二つとした。

小又川系のインピーダンス図は、先に報告した湯瀬系電力線の場合の論文の図 2.1 に示してある。現在の 52 kV 直接接地系は小又川第 1P/S～小又川第 3P/S 間が 1 回線、小又川第 1P/S、小又川第 4P/S 間が、小又川第 2P/S を間にはさんで、1 回線のループ送電系となっているが、昇圧前の非接地系の時には小又川第 1P/S、小又川第 4P/S 間が平行 2 回線となっていたので、今回の計算目的として、非接地系と直接接地系の誘導電圧の比較を行なうため、昇圧後も、小又川第 1P/S、小又川第 4P/S 間は、小又川第 2P/S を間に入れた平行 2 回線であるとして計算することにした。その結果、誘導電圧は直接接地の場合は実際よりも苛酷な値として計算されることになる。小又川第 3P/S、小又川第 1P/S 間のこう長は約 2km、小又川第 1P/S、小又川第 4P/S 間のこう長は約 9 km であるが、小又川第 1P/S、小又川第 4P/S 間は 2 回線であり、各回線の地絡事故の発生確率が等しいとすれば、この間の事故件数は 9 km の 2 倍の距離に発生する事故件数に等しいと考えてよい。



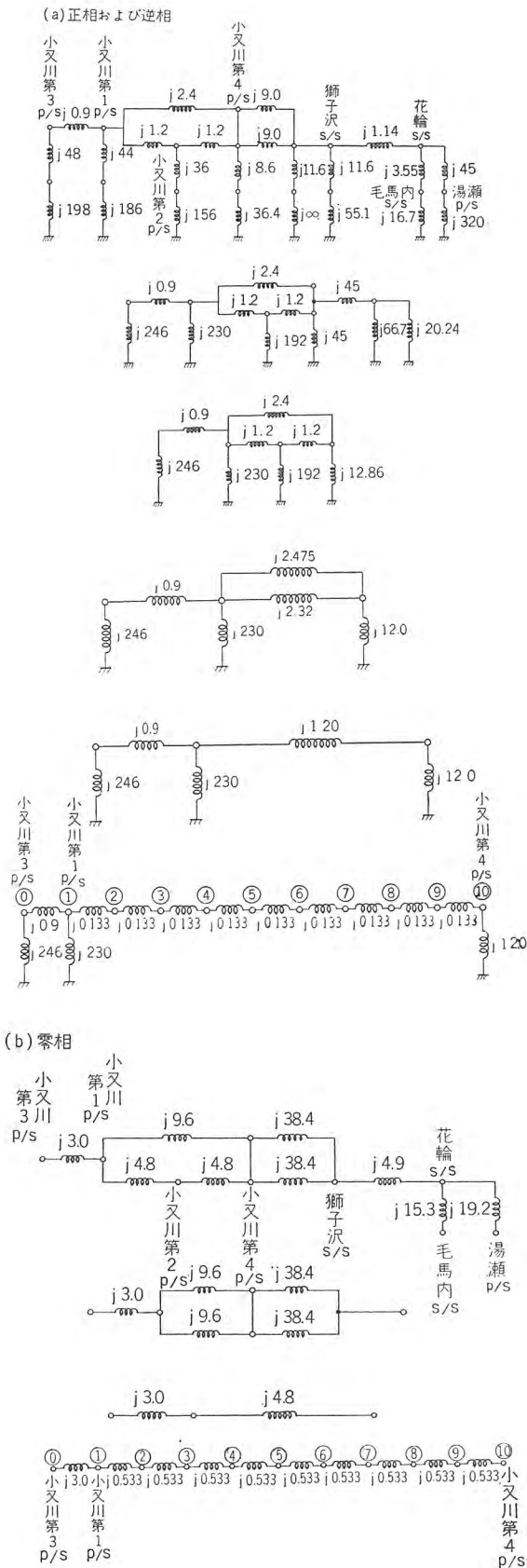


図 2.1 10,000 kVA を基準として換算された小又川系 30 kV 非接地 (東北電力湯瀬系 30 kV 非接地) のインピーダンス図 [系統状態 (I)]

Fig. 2.1 Impedance diagram of 30 kV ungrounded system converted basid on 10,000 kVA.

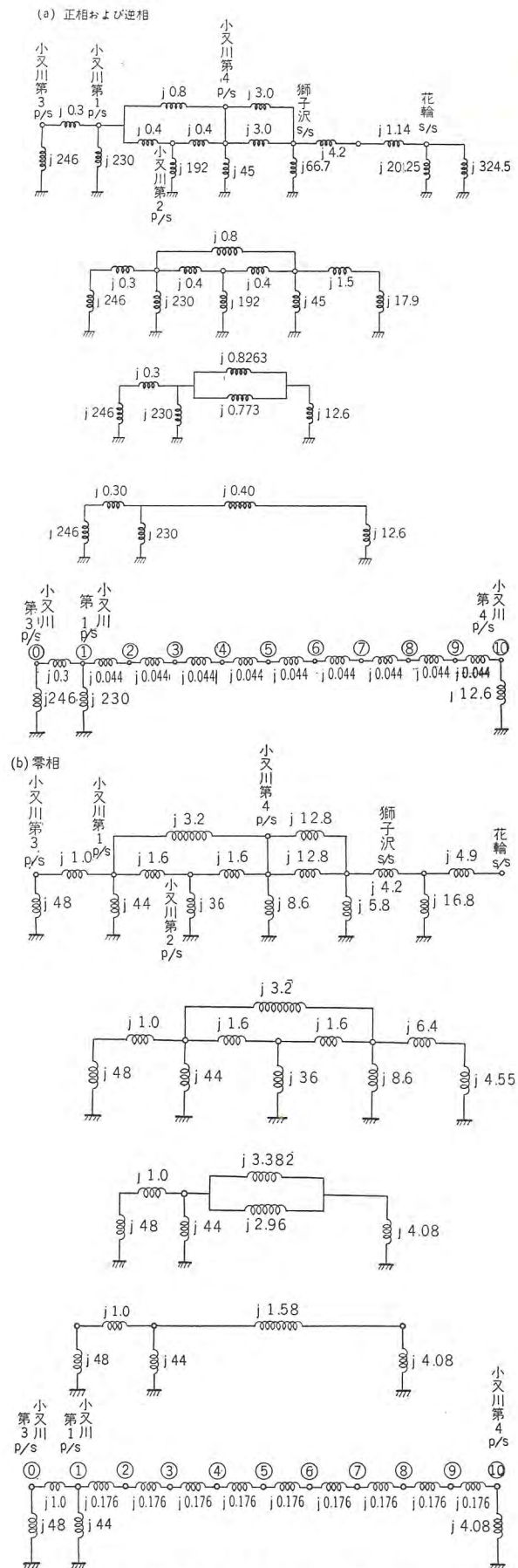


図 2.2 10,000 kVA を基準として換算された小又川系 52 kV 直接接地 (東北電力湯瀬系 30 kV 非接地) のインピーダンス図 [系統状態 (II)]

Fig. 2.2 Impedance diagram of 52 kV directly grounded system converted based on 10,000 kVA.



このように考えれば、小又川第 3P/S、小又川第 1P/S 間 2km、小又川第 1P/S、小又川第 4P/S 間 18km と考え、小又川第 3P/S、小又川第 1P/S 間を 1 区分、小又川第 1P/S、小又川第 4P/S 間を 9 区分すれば、小又川系の事故発生確率を全系に一樣であるように分布させて、全系を 10 区分することができる。

以上のような考え方に基づいて、小又川系のインピーダンス図を作成すると、図 2.1 および図 2.2 のようになる。

一方、1 線地絡と 2 線地絡の発生確率は、湯瀬系電力線の場合の論文、第 3 章に述べた考え方によって、系統状態(I)では、1 線地絡 154、2 線地絡 006 とし、系統状態(II)では、1 線地絡 209、2 線地絡 001 として、誘導電圧発生確率を計算する。

### 3. 誘導電圧の計算

通信線に生ずる誘導電圧のもとになる電力線地絡事故時の零相電流分布は、1 線地絡および 2 線地絡は対称座標法で、異相地絡は  $\alpha$ - $\beta$ -0 法で、IBM-650 によって計算した。

この場合、IBM-650 の Input Data となる正相、逆相および零相インピーダンスは、図 2.1 (a)(b) および図 2.2 (a)(b) の値である。零相電流分布計算結果を表 3.1 および表 3.2 に示す。

地絡回路電流 1 A あたりの誘導電圧 (V/A) は

$$V_0 = K \cdot f \cdot \Sigma l / b \text{ (V/A)} \dots\dots\dots (3.1)$$

ここで、 $f=50$  であり、

$$K=3.0 \times 10^{-4} \text{ とした。}$$

$\Sigma l / b$  は、図 3.1 および図 3.2 に示す小又川系電力線

表 3.1 小又川系電力線地絡事故時の零相電流分布計算結果 (30 kV、非接地系)

地絡 番号	地絡 確率	区間 0-1		区間 1-2		区間 2-3		区間 3-4		区間 4-5		区間 5-6		区間 6-7		区間 7-8		区間 8-9		区間 9-10		系 統 状 態
		$I_{00}$	$\theta_0$	$I_{01}$	$\theta_1$	$I_{02}$	$\theta_2$	$I_{03}$	$\theta_3$	$I_{04}$	$\theta_4$	$I_{05}$	$\theta_5$	$I_{06}$	$\theta_6$	$I_{07}$	$\theta_7$	$I_{08}$	$\theta_8$	$I_{09}$	$\theta_9$	
1	154	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	1
2	154	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	1
3	154	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	1
4	154	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	1
5	154	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	1
6	154	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	1
7	154	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	1
8	154	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	1
9	154	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	1
10	154	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	1
11	154	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	1
12	006	000	115	000	115	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	1
13	006	000	315	000	115	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	1
14	006	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	1
15	006	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	1
16	006	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	1
17	006	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	1
18	006	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	1
19	006	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	1
20	006	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	1
21	006	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	1
22	006	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	000	315	1
23	006	438	180	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	1
24	006	438	179	438	179	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	1
25	006	437	180	437	180	437	180	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	1
26	006	437	179	437	179	437	179	437	179	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	1
27	006	436	179	436	179	436	179	436	179	436	179	436	179	000	000	000	000	000	000	000	000	1
28	006	436	180	436	180	436	180	436	180	436	180	436	180	436	180	000	000	000	000	000	000	1
29	006	435	179	435	179	435	179	435	179	435	179	435	179	435	179	435	179	000	000	000	000	1
30	006	435	180	435	180	435	180	435	180	435	180	435	180	435	180	435	180	000	000	000	000	1
31	006	434	179	434	179	434	179	434	179	434	179	434	179	434	179	434	179	434	179	000	000	1
32	006	434	180	434	180	434	180	434	180	434	180	434	180	434	180	434	180	434	180	434	180	1
33	006	438	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	1
34	006	000	000	466	180	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	1
35	006	000	000	465	179	465	179	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	1
36	006	000	000	464	180	464	180	464	180	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	1
37	006	000	000	464	180	464	180	464	180	464	180	464	180	000	000	000	000	000	000	000	000	1
38	006	000	000	463	180	463	180	463	180	463	180	463	180	463	180	000	000	000	000	000	000	1
39	006	000	000	463	180	463	180	463	180	463	180	463	180	463	180	463	180	000	000	000	000	1
40	006	000	000	462	180	462	180	462	180	462	180	462	180	462	180	462	180	000	000	000	000	1
41	006	000	000	462	180	462	180	462	180	462	180	462	180	462	180	462	180	462	180	000	000	1
42	006	000	000	461	179	461	179	461	179	461	179	461	179	461	179	461	179	461	179	461	179	1
43	006	438	000	438	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	1
44	006	000	000	466	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	1
45	006	000	000	000	000	470	180	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	1
46	006	000	000	000	000	469	179	469	179	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	1
47	006	000	000	000	000	469	180	469	180	469	180	469	180	000	000	000	000	000	000	000	000	1
48	006	000	000	000	000	468	180	468	180	468	180	468	180	468	180	000	000	000	000	000	000	1
49	006	000	000	000	000	468	180	468	180	468	180	468	180	468	180	468	180	000	000	000	000	1
50	006	000	000	000	000	467	180	467	180	467	180	467	180	467	180	467	180	000	000	000	000	1
51	006	000	000	000	000	467	180	467	180	467	180	467	180	467	180	467	180	467	180	000	000	1
52	000	000	000	000	000	466	180	466	180	466	180	466	180	466	180	466	180	466	180	466	180	1
53	006	437	000	437	000	437	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	1
54	006	000	000	465	000	465	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	1
55	006	000	000	000	000	470	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	1



表 3.2 小又川系電力線地絡事故時の零相電流分布計算結果 (52kV, 直接接地系)



地 格 番 号	地 格 率	区間 0—1		区間 1—2		区間 2—3		区間 3—4		区間 4—5		区間 5—6		区間 6—7		区間 7—8		区間 8—9		区間 9—10		系 状 態
		$I_{00}$	$\theta_0$	$I_{01}$	$\theta_1$	$I_{02}$	$\theta_2$	$I_{03}$	$\theta_3$	$I_{04}$	$\theta_4$	$I_{05}$	$\theta_5$	$I_{06}$	$\theta_6$	$I_{07}$	$\theta_7$	$I_{08}$	$\theta_8$	$I_{09}$	$\theta_9$	
6	209	33	090	70	090	70	090	70	090	70	090	337	270	337	270	337	270	337	270	337	270	2
7	209	32	090	68	090	68	090	68	090	68	090	342	270	342	270	342	270	342	270	342	270	2
8	209	31	090	65	090	65	090	65	090	65	090	347	270	347	270	347	270	347	270	347	270	2
9	209	30	090	63	090	63	090	63	090	63	090	352	270	352	270	352	270	352	270	352	270	2
10	209	39	090	61	090	61	090	61	090	61	090	357	270	357	270	357	270	357	270	357	270	2
11	209	38	090	59	090	59	090	59	090	59	090	359	270	359	270	359	270	359	270	359	270	2
12	001	434	070	385	270	385	270	385	270	385	270	385	270	385	270	385	270	385	270	385	270	2
13	001	49	090	428	270	428	270	428	270	428	270	428	270	428	270	428	270	428	270	428	270	2
14	001	48	090	102	090	436	270	436	270	436	270	436	270	436	270	436	270	436	270	436	270	2
15	001	47	090	100	090	100	090	445	270	445	270	445	270	445	270	445	270	445	270	445	270	2
16	001	46	090	98	090	98	090	98	090	454	270	454	270	454	270	454	270	454	270	454	270	2
17	001	45	090	96	090	96	090	96	090	464	270	464	270	464	270	464	270	464	270	464	270	2
18	001	44	090	94	090	94	090	94	090	474	270	474	270	474	270	474	270	474	270	474	270	2
19	001	43	090	92	090	92	090	92	090	484	270	484	270	484	270	484	270	484	270	484	270	2
20	001	42	090	89	090	89	090	89	090	495	270	495	270	495	270	495	270	495	270	495	270	2
21	001	41	090	87	090	87	090	87	090	506	270	506	270	506	270	506	270	506	270	506	270	2
22	001	40	090	85	090	85	090	85	090	517	270	517	270	517	270	517	270	517	270	517	270	2
23	001	326	141	413	087	413	087	413	087	413	087	413	087	413	087	413	087	413	087	413	087	2
24	001	325	141	297	149	418	087	418	087	418	087	418	087	418	087	418	087	418	087	418	087	2
25	001	325	140	296	148	296	148	424	086	424	086	424	086	424	086	424	086	424	086	424	086	2
26	001	325	140	295	148	295	148	295	148	430	086	430	086	430	086	430	086	430	086	430	086	2
27	001	325	139	294	147	294	147	294	147	436	085	436	085	436	085	436	085	436	085	436	085	2
28	001	325	139	294	146	294	146	294	146	442	085	442	085	442	085	442	085	442	085	442	085	2
29	001	325	138	293	146	293	146	293	146	448	084	448	084	448	084	448	084	448	084	448	084	2
30	001	325	138	292	145	292	145	292	145	455	084	455	084	455	084	455	084	455	084	455	084	2
31	001	325	137	292	144	292	144	292	144	462	083	462	083	462	083	462	083	462	083	462	083	2
32	001	325	137	291	143	291	143	291	143	468	082	468	082	468	082	468	082	468	082	468	082	2
33	001	325	038	613	092	413	092	413	092	413	092	413	092	413	092	413	092	413	092	413	092	2
34	001	49	270	316	148	434	098	434	089	434	089	434	089	434	089	434	089	434	089	434	089	2
35	001	48	271	316	148	439	089	439	089	439	089	439	089	439	089	439	089	439	089	439	089	2
36	001	48	272	315	147	315	147	315	147	445	088	445	088	445	088	445	088	445	088	445	088	2
37	001	48	272	314	146	314	146	314	146	452	088	452	088	452	088	452	088	452	088	452	088	2
38	001	47	273	314	146	314	146	314	146	458	087	458	087	458	087	458	087	458	087	458	087	2
39	001	47	274	313	145	313	145	313	145	465	087	465	087	465	087	465	087	465	087	465	087	2
40	001	47	274	312	144	312	144	312	144	471	086	471	086	471	086	471	086	471	086	471	086	2
41	001	47	275	312	144	312	144	312	144	478	086	478	086	478	086	478	086	478	086	478	086	2
42	001	46	276	312	143	312	143	312	143	485	085	485	085	485	085	485	085	485	085	485	085	2
43	001	325	038	297	030	418	092	418	092	418	092	418	092	418	092	418	092	418	092	418	092	2
44	001	49	269	316	031	434	090	434	090	434	090	434	090	434	090	434	090	434	090	434	090	2
45	001	48	270	101	270	320	148	442	089	442	089	442	089	442	089	442	089	442	089	442	089	2
46	001	47	271	101	271	319	147	448	089	448	089	448	089	448	089	448	089	448	089	448	089	2
47	001	47	272	100	272	318	146	455	088	455	088	455	088	455	088	455	088	455	088	455	088	2
48	001	47	272	99	272	318	146	461	088	461	088	461	088	461	088	461	088	461	088	461	088	2
49	001	46	273	99	273	317	145	468	087	468	087	468	087	468	087	468	087	468	087	468	087	2
50	001	46	274	98	274	317	144	474	087	474	087	474	087	474	087	474	087	474	087	474	087	2
51	001	46	275	97	275	316	143	481	086	481	086	481	086	481	086	481	086	481	086	481	086	2
52	001	45	275	97	275	316	143	488	085	488	085	488	085	488	085	488	085	488	085	488	085	2
53	001	325	039	296	031	296	031	424	093	424	093	424	093	424	093	424	093	424	093	424	093	2
54	001	48	268	316	031	316	031	439	090	439	090	439	090	439	090	439	090	439	090	439	090	2
55	001	48	269	101	269	320	031	442	090	442	090	442	090	442	090	442	090	442	090	442	090	2
56	001	47	270	99	270	324	147	451	089	451	089	451	089	451	089	451	089	451	089	451	089	2
57	001	46	271	99	271	323	146	458	089	458	089	458	089	458	089	458	089	458	089	458	089	2
58	001	46	272	98	272	322	145	464	088	464	088	464	088	464	088	464	088	464	088	464	088	2
59	001	46	272	97	272	322	145	471	088	471	088	471	088	471	088	471	088	471	088	471	088	2
60	001	45	273	97	273	321	144	478	087	478	087	478	087	478	087	478	087	478	087	478	087	2
61	001	45	274	96	274	321	143	485	087	485	087	485	087	485	087	485	087	485	087	485	087	2
62	001	45	275	95	275	320	143	492	086	492	086	492	086	492	086	492	086	492	086	492	086	2
63	001	325	039	295	031	295	031	430	093	430	093	430	093	430	093	430	093	430	093	430	093	2
64	001	48	267	315	032	315	032	445	091	445	091	445	091	445	091	445	091	445	091	445	091	2
65	001	47	268	101	268	319	032	448	090	448	090	448	090	448	090	448	090	448	090	448	090	2
66	001	47	269	99	269	324	032	451	090	451	090	451	090	451	090	451	090	451	090	451	090	2
67	001	46	270	97	270	327	146	461	089	461	089	461	089	461	089	461	089	461	089	461	089	2
68	001	45	271	97	271	327	145	467	089	467	089	467	089	467	089	467	089	467	089	467	089	2
69	001	45	272	96	272	326	145	474	088	474	088	474	088									



地絡 番号	地絡 確率	区間 0-1		区間 1-2		区間 2-3		区間 3-4		区間 4-5		区間 5-6		区間 6-7		区間 7-8		区間 8-9		区間 9-10		系 統 状 態
		$I_{00}$	$\theta_0$	$I_{01}$	$\theta_1$	$I_{02}$	$\theta_2$	$I_{03}$	$\theta_3$	$I_{05}$	$\theta_5$	$I_{05}$	$\theta_5$	$I_{06}$	$\theta_6$	$I_{07}$	$\theta_7$	$I_{08}$	$\theta_8$	$I_{09}$	$\theta_9$	
106	001	45	266	97	266	97	266	321	035	321	035	321	035	321	035	321	035	478	092	478	092	2
107	001	45	267	95	267	95	267	95	267	326	035	326	035	326	035	326	035	481	091	481	091	2
108	001	45	267	94	267	94	267	94	267	330	035	330	035	330	035	330	035	484	091	484	091	2
109	001	43	268	92	268	92	268	92	268	335	035	335	035	335	035	335	035	488	090	488	090	2
110	001	43	269	91	269	91	269	91	269	340	035	340	035	340	035	340	035	491	090	491	090	2
111	001	42	270	89	270	89	270	89	270	344	035	344	035	344	035	344	035	491	090	491	090	2
112	001	41	271	88	271	88	271	88	271	344	035	344	035	344	035	344	035	491	090	491	090	2
113	001	325	042	292	035	292	035	292	035	292	035	292	035	292	035	292	035	292	035	292	035	2
114	001	47	264	312	035	312	035	312	035	312	035	312	035	312	035	312	035	312	035	312	035	2
115	001	46	264	97	264	316	036	316	036	316	036	316	036	316	036	316	036	316	036	316	036	2
116	001	45	265	96	265	96	265	321	036	321	036	321	036	321	036	321	036	321	036	321	036	2
117	001	44	266	94	266	94	266	325	036	325	036	325	036	325	036	325	036	325	036	325	036	2
118	001	44	266	93	266	93	266	330	036	330	036	330	036	330	036	330	036	330	036	330	036	2
119	001	43	267	92	267	92	267	335	036	335	036	335	036	335	036	335	036	335	036	335	036	2
120	001	42	268	90	268	90	268	339	036	339	036	339	036	339	036	339	036	339	036	339	036	2
121	001	42	269	89	269	89	269	344	036	344	036	344	036	344	036	344	036	344	036	344	036	2
122	001	41	270	88	270	88	270	344	036	344	036	344	036	344	036	344	036	344	036	344	036	2
123	001	325	042	291	036	291	036	291	036	291	036	291	036	291	036	291	036	291	036	291	036	2
124	001	46	263	312	036	312	036	312	036	312	036	312	036	312	036	312	036	312	036	312	036	2
125	001	45	264	97	264	316	036	316	036	316	036	316	036	316	036	316	036	316	036	316	036	2
126	001	45	264	95	264	95	264	320	036	320	036	320	036	320	036	320	036	320	036	320	036	2
127	001	44	265	94	265	94	265	325	036	325	036	325	036	325	036	325	036	325	036	325	036	2
128	001	43	266	92	266	92	266	330	037	330	037	330	037	330	037	330	037	330	037	330	037	2
129	001	43	266	91	266	91	266	334	037	334	037	334	037	334	037	334	037	334	037	334	037	2
130	001	42	267	89	267	89	267	339	037	339	037	339	037	339	037	339	037	339	037	339	037	2
131	001	41	268	88	268	88	268	344	037	344	037	344	037	344	037	344	037	344	037	344	037	2
132	001	41	269	86	269	86	269	349	037	349	037	349	037	349	037	349	037	349	037	349	037	2

・営林電話線離隔図および小又川系電力線・電電公社電  
話線離隔図よりそれぞれ算出した。

各通信線の 10 区分した区分別誘導電圧計算結果は、  
表 3.3 および表 3.4 のとおりである。

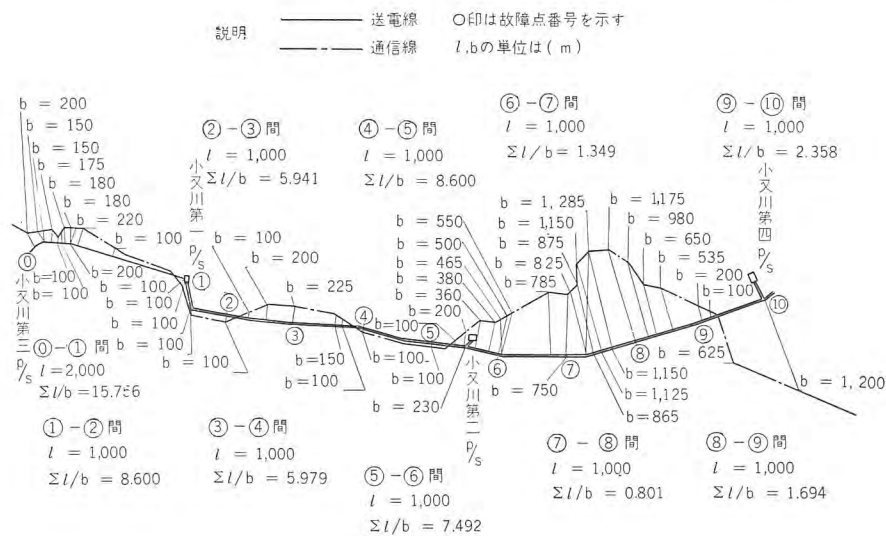


図 3.1 小又川電力線・営  
林電話線離隔図  
Fig. 3.1 Telephone line  
separated from power  
line.

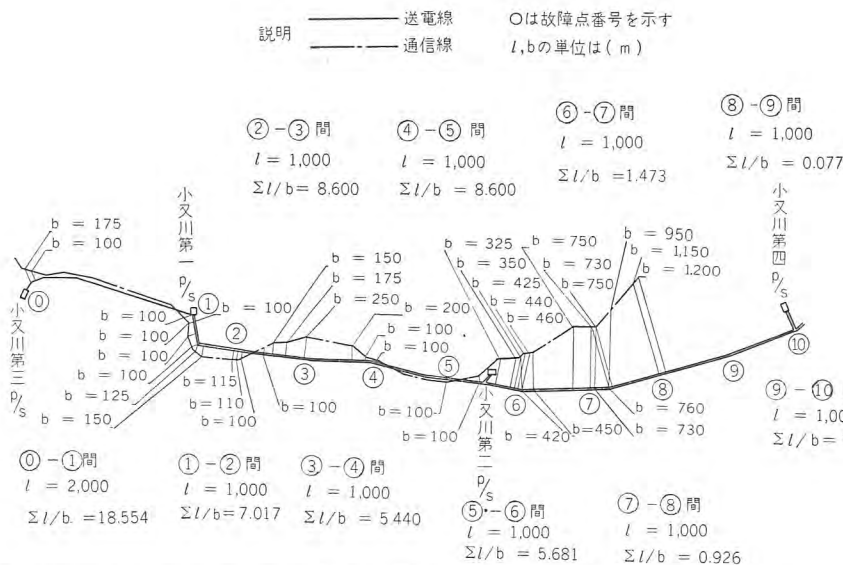


図 3.2 小又川系電力線・  
電電公社電話線離隔図  
Fig. 3.2 Telephone line  
separated from power  
line.



表 3.3 営林電話線に対する区分別誘導電圧 (V/A) の値

$$K=3.0 \times 10^{-4}$$

$$f=50$$

電 力 線	小 又 川 第 3 P/S	小 又 川 第 1 P/S	小 又 川 第 4 P/S								
区 間	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	
$l$ (m)	2,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	
$\Sigma l/b$	15.756	8.600	5.941	5.979	8.600	7.492	1.349	0.801	1.694	2.358	
$V_0$ (V/A)	$23.65 \times 10^{-2}$	$12.90 \times 10^{-2}$	$8.90 \times 10^{-2}$	$8.96 \times 10^{-2}$	$12.90 \times 10^{-2}$	$11.22 \times 10^{-2}$	$2.02 \times 10^{-2}$	$1.20 \times 10^{-2}$	$2.54 \times 10^{-2}$	$3.54 \times 10^{-2}$	

表 3.4 小又川系電電公社電話線に対する区分別誘導電圧 (V/A) の値

$$K=3.0 \times 10^{-4}$$

$$f=50$$

電 力 線	小 又 川 第 3 P/S	小 又 川 第 1 P/S	小 又 川 第 4 P/S								
区 間	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	
$l$ (m)	2,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	
$\Sigma l/b$	18.554	7.017	8.600	5.440	8.600	5.681	1.473	0.926	0.077	0.000	
$V_0$ (V/A)	$27.80 \times 10^{-2}$	$10.52 \times 10^{-2}$	$9.68 \times 10^{-2}$	$8.16 \times 10^{-2}$	$12.90 \times 10^{-2}$	$8.52 \times 10^{-2}$	$2.21 \times 10^{-2}$	$1.39 \times 10^{-2}$	$0.115 \times 10^{-2}$	0.00	

表 3.1 および表 3.2 に示す零相電流分布と、表 3.3 および表 3.4 の区分別誘導電圧より IBM-650 によって誘導電圧計算を行なう。

#### 4. 誘導電圧計算結果

IBM-650 によって計算した誘導電圧計算結果を表 4.1 ~ 4.4 に示す。

表 4.1 および表 4.2 は、営林電話線の誘導電圧計算結

表 4.1 営林電話線に発生する誘導電圧計算結果  
(小又川系 30 kV 非接地) 1186-MELCO

電 圧 順 計	地絡番号	系統状態	地絡確率	誘導電圧 (V)
6	032	1	006	1145
12	123	1	006	1145
18	031	1	006	1099
24	113	1	006	1099
30	030	1	006	1067
36	103	1	006	1067
42	029	1	006	1053
48	093	1	006	1053
54	028	1	006	1027
60	083	1	006	1027
66	042	1	006	0889
72	124	1	006	0889
78	027	1	006	0881
84	073	1	006	0881
90	041	1	006	0841
96	114	1	006	0841
102	040	1	006	0806
108	104	1	006	0806
114	039	1	006	0791
120	094	1	006	0791
126	038	1	006	0763
132	084	1	006	0763
138	052	1	006	0717
144	125	1	006	0717
150	026	1	006	0713
156	063	1	006	0713
162	051	1	006	0669
168	115	1	006	0669
174	050	1	006	0634
180	105	1	006	0634
186	049	1	006	0617
192	095	1	006	0617
198	037	1	006	0608
204	074	1	006	0608

電 圧 順 計	地絡番号	系統状態	地絡確率	誘導電圧 (V)
210	062	1	006	0599
216	126	1	006	0599
222	025	1	006	0596
228	053	1	006	0596
234	048	1	006	0590
240	085	1	006	0590
246	061	1	006	0549
252	116	1	006	0549
258	060	1	006	0514
264	106	1	006	0514
270	059	1	006	0498
276	096	1	006	0498
282	024	1	006	0480
288	043	1	006	0480
294	072	1	006	0477
300	127	1	006	0477
306	058	1	006	0469
312	086	1	006	0469
318	047	1	006	0432
324	075	1	006	0432
330	036	1	006	0429
336	064	1	006	0429
342	071	1	006	0427
348	117	1	006	0427
354	070	1	006	0391
360	107	1	006	0391
366	069	1	006	0374
372	097	1	006	0374
378	068	1	006	0346
384	087	1	006	0346
390	023	1	006	0311
396	033	1	006	0311
402	057	1	006	0310
408	076	1	006	0310
414	035	1	006	0304
420	054	1	006	0304



電圧順 計	地絡番号	系統状態	地絡確率	誘導電圧 (V)
426	082	1	006	0296
432	128	1	006	0296
438	046	1	006	0251
444	065	1	006	0251
450	081	1	006	0245
456	118	1	006	0245
462	080	1	006	0208
468	108	1	006	0208
474	079	1	006	0191
480	098	1	006	0191
486	067	1	006	0185
492	077	1	006	0185
498	034	1	006	0180
504	044	1	006	0180
510	078	1	006	0162
516	088	1	006	0162
522	092	1	006	0135
528	129	1	006	0135
534	056	1	006	0127
540	066	1	006	0127
546	045	1	006	0125
552	055	1	006	0125
558	102	1	006	0107
564	130	1	006	0107
570	112	1	006	0090
576	131	1	006	0090
582	091	1	006	0084
588	119	1	006	0084
594	101	1	006	0055
600	120	1	006	0055

電圧順 計	地絡番号	系統状態	地絡確率	誘導電圧 (V)
606	122	1	006	0053
612	132	1	006	0053
618	090	1	006	0047
624	109	1	006	0047
630	111	1	006	0037
636	121	1	006	0037
642	089	1	006	0029
648	099	1	006	0029
654	100	1	006	0017
660	110	1	006	0017
814	001	1	154	0000
968	002	1	154	0000
1122	003	1	154	0000
1276	004	1	154	0000
1430	005	1	154	0000
1584	006	1	154	0000
1738	007	1	154	0000
1892	008	1	154	0000
2046	009	1	154	0000
2200	010	1	154	0000
2354	011	1	154	0000
2360	012	1	006	0000
2366	013	1	006	0000
2372	014	1	006	0000
2378	015	1	005	0000
2384	016	1	006	0000
2390	017	1	006	0000
2396	018	1	006	0000
2402	019	1	006	0000
2408	020	1	006	0000
2414	021	1	006	0000
2420	022	1	006	0000

表 4.2 営林電話線に発生する誘導電圧計算結果  
(小又川系 52 kV 直接接地) 1188-MELCO

電圧順 計	地絡番号	系統状態	地絡確率	誘導電圧 (V)
1	012	2	001	1050
2	023	2	001	0949
3	033	2	001	0949
4	024	2	001	0881
5	043	2	001	0881
6	025	2	001	0844
7	053	2	001	0844
8	026	2	001	0815
9	063	2	001	0815
218	001	2	209	0812
219	032	2	001	0791
220	123	2	001	0791
221	013	2	001	0789
222	027	2	001	0788
223	073	2	001	0788
224	031	2	001	0788
225	113	2	001	0788
226	030	2	001	0786
227	103	2	001	0786
228	029	2	001	0785
229	093	2	001	0785
230	028	2	001	0784
231	083	2	001	0784
232	034	2	001	0703
233	044	2	001	0703
234	035	2	001	0654
235	054	2	001	0654
236	036	2	001	0614
237	064	2	001	0614
238	014	2	001	0598
447	002	2	209	0587
448	042	2	001	0578
449	124	2	001	0578
450	037	2	001	0576
451	074	2	001	0576

電圧順 計	地絡番号	系統状態	地絡確率	誘導電圧 (V)
452	041	2	001	0573
453	114	2	001	0573
454	040	2	001	0571
455	104	2	001	0571
456	039	2	001	0570
457	094	2	001	0570
458	038	2	001	0569
459	084	2	001	0569
460	045	2	001	0538
461	055	2	001	0538
462	046	2	001	0488
463	065	2	001	0488
464	015	2	001	0467
673	003	2	209	0442
674	052	2	001	0442
675	125	2	001	0442
676	047	2	001	0438
677	075	2	001	0438
678	051	2	001	0435
679	115	2	001	0435
680	050	2	001	0431
681	105	2	001	0431
682	049	2	001	0430
683	095	2	001	0430
684	048	2	001	0429
685	085	2	001	0429
686	056	2	001	0407
687	066	2	001	0407
688	052	2	001	0351
689	126	2	001	0351
690	057	2	001	0345
691	076	2	001	0345
900	004	2	209	0343
901	061	2	001	0341
902	116	2	001	0341
903	060	2	001	0337
904	106	2	001	0337
905	059	2	001	0336



電 圧 順 累 計	地絡番号	系統状態	地絡確率	誘導電圧 (V)
906	096	2	001	0336
907	058	2	001	0334
908	086	2	001	0334
909	016	2	001	0332
910	072	2	001	0263
911	127	2	001	0263
912	067	2	001	0252
913	077	2	001	0252
914	071	2	001	0248
915	117	2	001	0248
1124	005	2	209	0242
1125	070	2	001	0242
1126	107	2	001	0242
1127	069	2	001	0240
1128	097	2	001	0240
1129	068	2	001	0237
1130	087	2	001	0237
1131	022	2	001	0192
1132	122	2	001	0116
1133	132	2	001	0166
1134	082	2	001	0154
1135	128	2	001	0154
1136	112	2	001	0151
1137	131	2	001	0151
1138	102	2	001	0147
1139	130	2	001	0147
1140	092	2	001	0139
1141	129	2	001	0139
1142	021	2	001	0135

電 圧 順 累 計	地絡番号	系統状態	地絡確率	誘導電圧 (V)
1351	011	2	209	0134
1352	017	2	001	0127
1353	081	2	001	0125
1354	118	2	001	0125
1355	111	2	001	0117
1356	121	2	001	0117
1357	101	2	001	0111
1358	120	2	001	0111
1359	080	2	001	0109
1360	108	2	001	0109
1361	079	2	001	0104
1362	098	2	001	0104
1363	091	2	001	0102
1364	119	2	001	0102
1365	020	2	001	0096
1366	078	2	001	0096
1367	088	2	001	0096
1576	010	2	209	0095
1785	006	2	209	0092
1786	100	2	001	0089
1787	110	2	001	0089
1788	019	2	001	0082
1789	090	2	001	0078
1790	109	2	001	0078
1791	089	2	001	0069
1792	099	2	001	0069
2001	009	2	209	0068
2210	008	2	209	0058
2211	018	2	001	0054
2420	007	2	209	0039

表 4.3 電電公社通信線に発生する誘導電圧計算結果  
(小又川系 30 kV 非接地) 1190-MELCO

電 圧 順 累 計	地絡番号	系統状態	地絡確率	誘導電圧 (V)
6	031	1	006	1060
12	113	1	006	1060
18	030	1	006	1060
24	103	1	006	1060
30	032	1	006	1059
36	123	1	006	1059
42	029	1	006	1043
48	093	1	006	1043
54	028	1	006	1015
60	083	1	006	1015
66	027	1	006	0904
72	073	1	006	0904
78	041	1	006	0742
84	114	1	006	0742
90	042	1	006	0741
96	124	1	006	0741
102	040	1	006	0741
108	104	1	006	0741
114	026	1	006	0736
120	063	1	006	0736
126	039	1	006	0722
132	094	1	006	0722
138	038	1	006	0692
144	084	1	006	0692
150	025	1	006	0630
156	053	1	006	0630
162	051	1	006	0602
168	115	1	006	0602
174	052	1	006	0601
180	125	1	006	0601
186	050	1	006	0601
192	105	1	006	0601
198	049	1	006	0582
204	095	1	006	0582
210	037	1	006	0574
216	074	1	006	0574
222	048	1	006	0551
228	085	1	006	0551
234	024	1	006	0503
240	043	1	006	0503
246	061	1	006	0471
252	116	1	006	0471
258	062	1	006	0470
264	126	1	006	0470
270	060	1	006	0470
276	106	1	006	0470
282	059	1	006	0451
288	096	1	006	0451
294	047	1	006	0432
300	075	1	006	0432
306	058	1	006	0420
312	086	1	006	0420

電 圧 順 累 計	地絡番号	系統状態	地絡確率	誘導電圧 (V)
318	036	1	006	0395
324	064	1	006	0395
330	023	1	006	0365
336	033	1	006	0365
342	071	1	006	0359
348	117	1	006	0359
354	072	1	006	0359
360	127	1	006	0359
366	070	1	006	0358
372	107	1	006	0358
378	069	1	006	0338
384	097	1	006	0338
390	068	1	006	0307
396	087	1	006	0307
402	057	1	006	0299
408	076	1	006	0299
414	035	1	006	0282
420	054	1	006	0282
426	046	1	006	0251
432	065	1	006	0251
438	067	1	006	0185
444	077	1	006	0185
450	081	1	006	0176
456	118	1	006	0176
462	082	1	006	0176
468	128	1	006	0176
474	080	1	006	0175
480	108	1	006	0175
486	079	1	006	0155
492	098	1	006	0155
498	034	1	006	0147
504	044	1	006	0147
510	045	1	006	0136
516	055	1	006	0136
522	078	1	006	0123
528	088	1	006	0123
534	056	1	006	0116
540	066	1	006	0116
546	091	1	006	0054
552	119	1	006	0054
558	092	1	006	0054
564	129	1	006	0054
570	090	1	006	0052
576	109	1	006	0052
582	089	1	006	0032
588	099	1	006	0032
594	101	1	006	0022
600	120	1	006	0022
606	102	1	006	0022
612	130	1	006	0022
618	100	1	006	0020
624	110	1	006	0020
630	111	1	006	0001



電 圧 順 累 計	地絡番号	系統状態	地絡確率	誘導電圧 (V)
636	121	1	001	0001
642	112	1	001	0001
648	131	1	001	0001
802	001	1	154	0000
956	002	1	154	0000
1110	003	1	154	0000
1264	004	1	154	0000
1418	005	1	154	0000
1572	006	1	154	0000
1726	007	1	154	0000
1880	008	1	154	0000
2034	009	1	154	0000
2188	010	1	154	0000

電 圧 順 累 計	地絡番号	系統状態	地絡確率	誘導電圧 (V)
2342	011	1	154	0000
2348	012	1	006	0000
2354	013	1	006	0000
2360	014	1	006	0000
2366	015	1	006	0000
2372	016	1	006	0000
2378	017	1	006	0000
2384	018	1	006	0000
2390	019	1	006	0000
2396	020	1	006	0000
2402	021	1	006	0000
2408	022	1	006	0000
2414	122	1	006	0000
2420	132	1	006	0000

表 4.4 電電公社通信線に発生する誘導電圧計算結果  
(小又川系 52 kV 直接接地) 1192-MELCO

電 圧 順 累 計	地絡番号	系統状態	地絡確率	誘導電圧 (V)
1	012	2	001	0980
2	023	2	001	0850
3	033	2	001	0850
4	024	2	001	0801
5	043	2	001	0801
6	025	2	001	0766
7	053	2	001	0766
216	001	2	209	0758
217	026	2	001	0746
218	063	2	001	0746
219	030	2	001	0739
220	103	2	001	0739
221	031	2	001	0739
222	113	2	001	0739
223	032	2	001	0738
224	123	2	001	0738
225	029	2	001	0738
226	093	2	001	0738
227	028	2	001	0736
228	083	2	001	0736
229	027	2	001	0731
230	073	2	001	0731
231	031	2	001	0646
232	034	2	001	0576
233	044	2	001	0576
234	035	2	001	0523
235	054	2	001	0523
236	014	2	001	0490
237	036	2	001	0490
238	064	2	001	0490
447	002	2	209	0480
448	040	2	001	0477
449	104	2	001	0477
450	041	2	001	0476
451	114	2	001	0476
452	039	2	001	0475
453	094	2	001	0475
454	042	2	001	0475
455	124	2	001	0475
456	038	2	001	0471
457	084	2	001	0471
458	037	2	001	0465
459	074	2	001	0465
460	045	2	001	0425
461	045	2	001	0425
462	046	2	001	0383
463	065	2	001	0383
464	050	2	001	0367
465	105	2	001	0367
466	051	2	001	0366
467	115	2	001	0366
468	049	2	001	0364
469	095	2	001	0364
470	052	2	001	0364
471	125	2	001	0364
680	003	2	209	0362
681	048	2	001	0360
682	085	2	001	0360
683	047	2	001	0351
684	075	2	001	0351
685	015	2	001	0344
686	056	2	001	0290
687	066	2	001	0290
688	060	2	001	0270

電 圧 順 累 計	地絡番号	系統状態	地絡確率	誘導電圧 (V)
689	106	2	001	0270
690	061	2	001	0268
691	116	2	001	0268
692	062	2	001	0266
693	126	2	001	0266
694	059	2	001	0265
695	096	2	001	0265
696	058	2	001	0258
697	086	2	001	0258
906	004	2	209	0253
907	057	2	001	0245
908	076	2	001	0245
909	016	2	001	0220
910	070	2	001	0194
911	107	2	001	0194
912	071	2	001	0192
913	117	2	001	0192
914	072	2	001	0189
915	127	2	001	0189
916	069	2	001	0187
917	097	2	001	0187
918	020	2	001	0177
919	111	2	001	0177
920	121	2	001	0177
921	068	2	001	0177
922	087	2	001	0177
923	112	2	001	0175
924	131	2	001	0175
925	021	2	001	0175
926	122	2	001	0173
927	132	2	001	0173
928	022	2	001	0170
929	100	2	001	0168
930	110	2	001	0168
931	101	2	001	0167
932	120	2	001	0167
933	102	2	001	0166
934	130	2	001	0166
1143	005	2	209	0161
1144	019	2	001	0158
1145	067	2	001	0156
1146	077	2	001	0155
1147	090	2	001	0154
1148	109	2	001	0154
1149	091	2	001	0153
1150	119	2	001	0153
1151	092	2	001	0150
1152	129	2	001	0150
1153	089	2	001	0142
1154	099	2	001	0142
1363	009	2	209	0126
1364	018	2	001	0125
1573	010	2	209	0123
1574	080	2	001	0122
1575	108	2	001	0122
1576	081	2	001	0120
1577	118	2	001	0120
1786	011	2	209	0119
1787	082	2	001	0116
1788	128	2	001	0116
1997	008	2	209	0113
1998	079	2	001	0110
1999	098	2	001	0110
2208	007	2	209	0090
2209	078	2	001	0087
2210	088	2	001	0087
2211	017	2	001	0013
2420	006	2	209	0009



果、表 4.3 および表 4.4 は電電公社通信線の誘導電圧計算結果である。このうち表 4.1 および表 4.3 は小又川系が 30 kV 非接地の場合、表 4.2 および表 4.4 は小又川系が 52 kV 直接接地の場合である。

## 5. 誘導電圧発生確率の解析

表 4.1～4.4 の誘導電圧計算結果から、誘導電圧の発生確率を解析する。

### (1) 系統状態(I)小又川系 30 kV 非接地の場合

架空線のない小又川系のような送電線に生ずる地絡事故は、過去の統計から大体 1 年に 1 km あたり 1 回(1 回/km/年)程度と考えられている。小又川系の地絡確率的に考えたこう長は 20 km あるから、この系統の地絡事故は年間 20 回発生すると考える。

表 4.1～4.4 の事故総件数 2,420 回は、この系統の何年間の事故に相当するか考えると、

$$2,420 \text{ 回}/20 \text{ 回/年} \approx 121 \text{ 年}$$

約 121 年間の事故総計に相当する。

よって、営林電話線に生ずる誘導電圧の最高値は、1,145 V であって、これが 2 回発生する可能性があるから、結局約 60 年に 1 度 1,145 V の誘導電圧を生ずる可能性があると考えてよい。

電電公社通信線では最高誘導電圧は 1,060 V であり、これが 4 回発生する可能性があるから、結局約 30 年に 1 度 1,060 V の誘導電圧を生ずる可能性があると考えてよい。

300 V 以上の誘導電圧は、総計 2,420 回のうち、営林電話線では 420 回、電電公社通信線では 396 回、それぞれ発生している。

すなわち、営林電話線では約 6 年に 1 回 300 V 以上であり、これは 1 年に 3 回ないし 4 回 300 V 以上の誘導電圧が発生することになる。

電電公社通信線でも約 6 年に 1 回 300 V 以上であり、これは 1 年に 3 回ないし 4 回 300 V 以上の誘導電圧が発生することになる。

### (2) 系統状態(II)小又川 52 kV 直接接地の場合

直接接地でも小又川系の地絡事故は年間 20 回発生すると考えてよいから、事故総件数 2,420 回は、この系統の約 121 年間の事故総計に相当する。

また、現在の小又川系は、52 kV 直接接地のループ送電系統であるから、地絡事故時の電流分布は、通信線に対して誘導電圧を打消す方向に、往復に流れる区間が多

くなり、この計算で考えた平行 2 回線の場合よりも、誘導電圧は必ず低いはずであるから、実際よりも計算結果は苛酷な値が出ている。このような条件のもとで計算された結果を解析すると、

営林電話線に生ずる誘導電圧の最高値は 1,050 V であり、これが 1 回であるから、この場合は約 121 年に 1 度 1,050 V の誘導電圧が発生する可能性があると考えてよい。

電電公社通信線では、最高誘導電圧は 980 V であり、これが 1 回であるから、この場合も約 121 年に 1 度 980 V の誘導電圧を生ずる可能性があると考えてよい。

これらの最高値を非接地の場合の最高値と比較すると、

営林電話線では 1,145 V が 1,050 V となったから直接接地により約 9 割に、また電電公社通信線でも 1,060 V が 980 V となったから、直接接地により約 9 割にそれぞれ減少している。実際には直接接地の場合は先にも述べたように、この値よりも小さいはずであるから直接接地すればさらに大きく減少するはずである。

300 V 以上の誘導電圧は総計 2,420 回のうち、

営林電話線では 909 回、電電公社通信線では 685 回それぞれ発生している。

すなわち、営林電話線では約 2 回ないし 3 年に 1 回は 300 V 以上であり、これは 1 年に約 8 回 300 V 以上の誘導電圧が発生することになる。電電公社通信線では約 3 回ないし 4 年に 1 回は 300 V 以上であり、これは 1 年に約 6 回 300 V 以上の誘導電圧が発生することになる。非接地の場合に比べると直接接地すると、300 V 以上の発生回数は約 2 倍になっている。

表 4.1 および表 4.2 の営林電話線の誘導電圧計算結果を図示すると図 5.1(A) のようになり、表 4.3 および表 4.4 の電電公社通信線の誘導電圧計算結果を図示すると、図 5.2(A) のようになる。

(A) 曲線の近似式として、余弦曲線の式

$$y = A \cos [26.6(\log_{10} x)]^\circ \cdots \cdots (5.1)$$

を採用するとそれぞれ図 5.1(B) および図 5.2(B) のように図示される。

一方、小又川系電力線地絡事故の場合、営林電話線および電電公社通信線に発生しやすい誘導電圧の分布をしらべるために、誘導電圧 50 V 刻みに誘導電圧の大きさに対する発生ひん度の分布をとってみると、図 5.3(営林電話線) および図 5.4(電電公社通信線) のようになる。

これらから小又川系統接地事故の場合には、営林電話



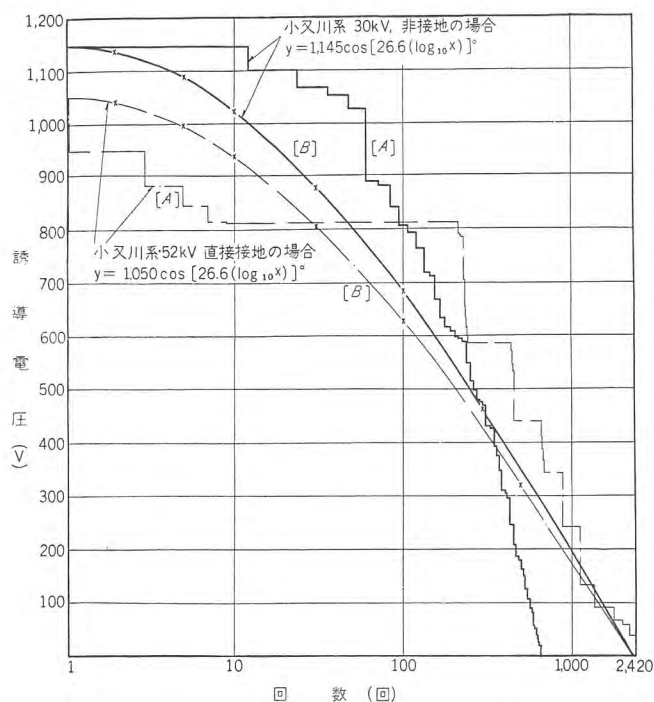


図 5.1 (A) 小又川系電力線接地事故により営林電話線に生ずる 121 年間に起り得る誘導電圧

(B) 近似式  $y = A \cos [26.6 (\log_{10} x)]^2$  を用いて表わした誘導電圧分布曲線

Fig. 5.1 (A) Inductive voltages to be occurred in 121 years on telephone lines by power line ground fault.

(B) Inductive voltage distribution curves represented by an approximate equation.

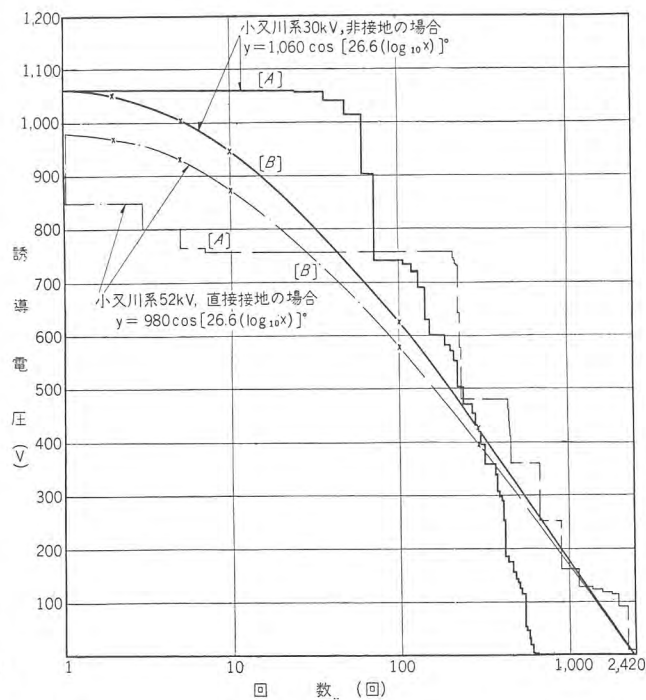


図 5.2 (A) 小又川系電力線接地事故により電電公社通信線に生ずる 121 年間に起り得る誘導電圧

(B) 近似式  $y = A \cos [26.6 (\log_{10} x)]^2$  を用いて表わした誘導電圧分布曲線

Fig. 5.2 (A) Inductive voltage to be occurred in 121 years on communication line by ground fault.

(B) Inductive voltage distribution curves represented by an approximate equation.

線でも、電電公社通信線でも誘導電圧は大体 900 V 以下で、その発生ひん度はすべての電圧に対してかなり一様に分布していることがわかる。

表 4.1~4.4 の誘導電圧計算結果を解析した結果、表 5.1 のようなデータが得られた。

これによれば、湯瀬系電力線の場合について解析した結果とほとんど同じ結果が得られたように思われる。すなわち

(1) 誘導電圧の最高値は  $\sqrt{3}$  倍して直接接地すれば、従来の非接地の場合よりも小さくなる。小又川系の場合は、約 9 割に減少している。

(2) 誘導電圧の最高値は、対象となる通信線の両端付近で異相地絡を起した場合に発生している。

(3) 300 V 以上の誘導電圧は、小又川系の場合には直接接地すると非接地の場合の約 2 倍に増加している。したがって、直接接地すれば誘導電圧の最高値

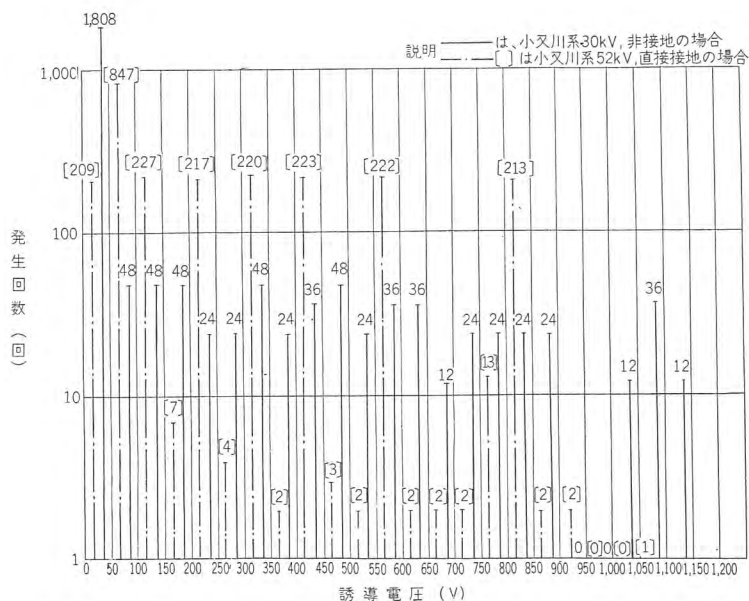


図 5.3 営林通話線に発生する誘導電圧の大きさと発生ひん度の関係

Fig. 5.3 Relation between the magnitude of inductive voltages occurring on communication line and frequency.

は必ず非接地の時よりも小さくなるが、300 V 以上の誘導電圧が発生する機会は系統によって多くなる場合も、少なくなる場合もあり、この点からは一概



(4) 誘導電圧を問題とする以上、異相地絡を無視することは根拠がなく、かつ危険である。ことに系統が非接地の場合には、大いに問題となるであろう。

以上、三菱金属小又川送電系に地絡事故が起った場合に、営林電話線および電電公社通信線に発生する誘導電圧を、現在の系統である 52 kV 直接接地の場合と昇圧前の系統状態であった 30 kV 非接地の場合について、IBM-650 によって計算を行なった結果を述べた。

方式のほうが有利となるのではないかということが、この小又川系の場合にもいえる。ことに今回の計算では直接接地の場合には 52 kV に昇圧しており、さらに実際よりも誘導電圧の計算には苛酷となる条件で計算を行なったにもかかわらず、なお、非接地の場合よりも最高電圧は小さくなっている。

算結果とまとめて考えれば、この系統の誘導問題に対しては、直接接地して 52 kV に昇圧しても誘導電圧は 30 kV 非接地の時より大きくないという明確な事実を知りうる事ができたであろうと思われる。

られるので、先に報告した東北電力湯瀬系の誘導電圧計

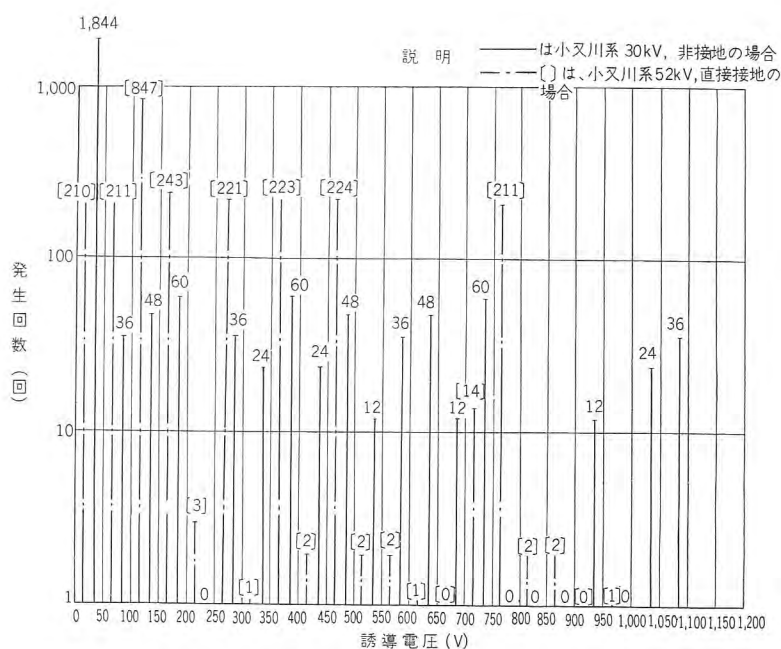


図 5.4 電電公社通信線に発生する誘導電圧の大きさと発生ひん度の関係  
Fig. 5.4 Relation between the magnitude of inductive voltages occurring on communication line and frequency.

通 信 線	系 統 状 態	誘導電圧最高値		650 V 以 上		430 V 以 上		300 V 以 上		一 線 地 絡 値 最 高		二 線 地 絡 値 最 高		異相地絡の最高値	
		最高値 (V)	非接地に 対する％ (%)	件 数	全件数に 対する％ (%)	件 数	全件数に 対する％ (%)	件 数	全件数に 対する％ (%)	最高値 (V)	地 位 格 置	最高値 (V)	地 位 格 置	最高値 (V)	地絡位置
営 林 電 話 線	系統状態 (1) (非接地)	1,145	100	168	6.94	324	13.4	420	17.4	0	—	0	—	1,145	$\begin{pmatrix} 0, & 10 \\ 10, & 0 \end{pmatrix}$
	系統状態 (2) (直接接地)	1,050	91.6	235	9.72	683	28.2	909	37.6	812	(0)	1,050	(0, 0)	949	$\begin{pmatrix} 0, & 1 \\ 1, & 0 \end{pmatrix}$
電 電 公 社 通 信 線	系統状態 (1) (非接地)	1,060	100	144	5.95	300	12.4	396	16.4	0	—	0	—	1,060	$\begin{pmatrix} 0.9 \div 0.8 \\ 9.0 \div 8.0 \end{pmatrix}$
	系統状態 (2) (直接接地)	980	92.5	230	9.50	459	19.0	685	28.3	758	(0)	980	(0, 0)	850	$\begin{pmatrix} 0, & 1 \\ 1, & 0 \end{pmatrix}$



# 発電機絶縁の直流試験 (2)

研 究 所 原 仁 吾\*・平 林 庄 司\*

## DC Tests on Generator Insulation (Part 2)

Research Laboratory Jingo HARA・Shōji HIRABAYASHI

DC tests of insulation on generators have been carried out since 1950 with many reports on the judgement of absorbed water contents of insulation and prediction of DC breakdown voltage. It has a variety of features compared with the AC tests such as a small sized apparatus and less chances of damaging insulation during the tests. Today some plants have replaced the AC method with DC one in the acceptance of machines which must undergo withstand voltage tests. The study of phenomena occurring in the insulator when DC test voltages are impressed involves many problems. With much discussion the writers finally suggest a standard of judgement on insulation by a "leakage ratio" and also a new method of predicting break-down voltages.

### 3. 成極指数と漏洩比

#### 3.1 成極指数についての考察

発電機絶縁の吸湿程度を成極指数の値から判定する方法は、W. Schneider<sup>(5)</sup> が 1950 年に提案以来、わが国でも広く用いられている。成極指数はその定義および式 (2.2) から

$$\text{成極指数 } P.I. = \frac{I_1}{I_{10}} = \frac{i_1 + I_c}{i_{10} + I_c} \dots\dots\dots (3.1)$$

である。ただし時間の単位は“分”である。

式 (3.1) からわかるとおり、成極指数は漏洩電流と吸収電流の大きさの相互関係でことなり、また普通良好な発電機絶縁では  $I_c$  の値は、 $i_1$  あるいは  $i_{10}$  にくらべ相当に小さいので、成極指数の値は、 $i_1/i_{10}$  すなわち  $n$  の値に支配される。

発電機絶縁の吸収特性は、絶縁構成に用いられている材料固有の吸収特性よりも、複合絶縁体としての界面成極現象によって支配され、したがって  $n$  の値は発電機絶縁の主構成材料であるマイカと、含侵用絶縁物の、それぞれの誘電率と導電率の大きさの相互関係によって支配されることが多い。<sup>(6)</sup> 表 2.2 に示した A, B, C 各コイルはそれぞれ絶縁方式がことなるものを例示した。

成極指数はもともと吸湿程度あるいは漏洩分の大小の判定基準で絶縁構成によってことなる  $n$  の値に左右されることは都合の悪いことで、 $n$  の値に左右されない漏洩比を用いるほうが合理的である。漏洩比は前述のとおりである。

$$\text{漏洩比 } L.R. = \frac{\text{漏洩電流}}{\text{10分目の充電電流}} = \frac{I_c}{i_{10} + I_c} \dots\dots\dots (3.2)$$

りである。

成極指数のほかに、漏洩指数を吸湿程度の判定に用いることも提案されている。<sup>(7)</sup> 漏洩指数は充電開始後10分目の充電電流を測定した後、供試機の端子を短絡して放電させ、10 分目の放電電流を測定し、両者の比であらわすことに定義されている。<sup>(9)</sup> すなわち

$$\text{漏洩指数 } L.I. = \frac{\text{充電電流の10分値}}{\text{放電電流の10分値}} = \frac{i_{10} + I_c}{i'_{10}} \dots\dots\dots (3.3)$$

となり

$$\frac{i'_{10}}{i_{10}} = 1 \dots\dots\dots (3.4)$$

が成立するならば、漏洩比と同様、漏洩指数は  $n$  の値には無関係に、しかも漏洩電流と吸収電流の比に関係する値となって都合であるが、上述の定義に従えば、式 (2.3) と式 (2.7) から

$$\frac{i'_{10}}{i_{10}} = 1 - 2^{-n} \dots\dots\dots (3.5)$$

となり、 $n$  がそれぞれ 1 および 0.8 では式 (3.5) の値は 0.5 および 0.425 となり、式 (3.4) の条件とはだいぶ違ってくるので、式 (3.5) で表わされる漏洩指数を判定基準に用いるのは好ましくない。式 (3.4) がほぼ満足されるためには、充電時間を少なくとも 30 分以上長くすれば良いが、試験に要する時間が長くなり、とくに現場試験では実用的でない。

このように考えると、成極指数、漏洩比、および漏洩指数の三つのうちで、判定基準としては漏洩比を用いるのがもっとも理想的であり、また前述の形紙方式を適用すれば、きわめて簡単に漏洩比を直読できる便利さがある。漏洩比は式 (3.2) に示すとおり、充電電流の 10 分

\* 電気第一研究室



値中に含まれている漏洩電流の大きさの割合であるので、物理的意義の解釈も簡単である。

### 3.2 漏洩比による判定基準

成極指数による判定は、W. Schneider<sup>(5)</sup> が提案した 2.5 以上を乾燥、1.5 以下を吸湿とする基準が広く用いられている。成極指数  $P.I.$  と、漏洩比  $L.R.$  との関係は式 (3.1) および式 (3.2) から

$$L.R. = \frac{10^n - P.I.}{10^n - 1} \dots\dots\dots (3.6)$$

となり、これを図示すると図 3.1 のとおりで、 $n$  の値によって両者の関係はことなる。W. Schneider が提案した成極指数の基準値は、多くのデータの統計的経験から得られたもので、この場合の  $n$  の値は明らかでないが、当時の供試機では  $n$  の値が 0.7~0.9 のものが大部分であったと考えられるので、上述の成極指数の基準値を漏洩比であらわすと、図 3.1 から、漏洩比が約 62~78% 以下が乾燥、約 88~92% 以上が吸湿ということになり、漏洩比が 70% 以下を乾燥、90% 以上を吸湿とする基準がもっとも妥当的なものになると考える。

以上のことから、発電機絶縁の  $n$  の値に左右されず、しかも絶縁状態の判定に対し、より合理的な解釈を与えることのできる漏洩比による判定法を推奨し、その基準として表 3.1 の値を提案する。

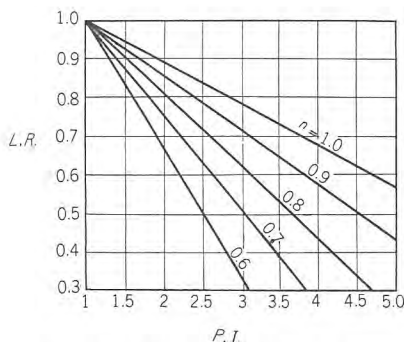


図 3.1 漏洩比と成極指数の関係

Fig. 3.1 Leakage ratio vs polarization index curves.

表 3.1 漏洩比による判定基準 (20°C)

乾 燥	普 通	吸 湿
70% 以下	70~90%	90% 以上

### 3.3 温度補正

成極指数や漏洩比は、漏洩電流と吸収電流の大きさの割合によって変化する値で、漏洩電流は温度  $\theta$  によって

$$I_c(\theta_2) = I_c(\theta_1) \cdot e^{\alpha_c(\theta_2 - \theta_1)} \dots\dots\dots (3.7)$$

ただし

$I_c(\theta_2)$  = 温度  $\theta_2^\circ\text{C}$  における漏洩電流

$I_c(\theta_1)$  = 温度  $\theta_1^\circ\text{C}$  における漏洩電流

$\alpha_c$  = 漏洩電流の温度係数

に従って変化することはよく知られている。また吸収電流も経験によれば、温度  $\theta$  によって

$$i_{t0}(\theta_2) = i_{t0}(\theta_1) \cdot e^{\alpha_a(\theta_2 - \theta_1)} \dots\dots\dots (3.8)$$

ただし

$i_{t0}(\theta_2), i_{t0}(\theta_1)$  = 温度が  $\theta_2^\circ\text{C}$  および  $\theta_1^\circ\text{C}$  における時間  $t_0$  の吸収電流

$\alpha_a$  = 吸収電流の温度係数

に従って変化する。すなわち成極指数も漏洩比も温度によって変化する。温度が上昇すると成極指数は減少し、漏洩比は増加する。W. Schneider が与えた成極指数の基準値は、常温において適用すべき値で、したがって表 3.1 に提案した漏洩比の基準も常温 (20°C) における値である。これらの値の温度補正は、実用上たびたび必要になるので、以下その温度補正について考えて見る。

#### (1) 成極指数の温度補正

式 (3.7) および式 (3.8) から

$$\frac{I_c(\theta_2)}{i_{t0}(\theta_2)} = \frac{I_c(\theta_1)}{i_{t0}(\theta_1)} \cdot e^{(\alpha_c - \alpha_a)(\theta_2 - \theta_1)} \dots\dots\dots (3.9)$$

また式 (3.1) から、温度が  $\theta_2^\circ\text{C}$  における成極指数は、

$$P.I.(\theta_2) = \frac{10^n + \frac{I_c(\theta_2)}{i_{t0}(\theta_2)}}{1 + \frac{I_c(\theta_2)}{i_{t0}(\theta_2)}} \dots\dots\dots (3.10)$$

式 (3.9) および式 (3.10) から

$$P.I.(\theta_2) = \frac{10^n \{PI(\theta_1) - 1\} + \{10^n - PI(\theta_1)\} \cdot e^{(\alpha_c - \alpha_a)(\theta_2 - \theta_1)}}{\{PI(\theta_1) - 1\} + \{10^n - PI(\theta_1)\} \cdot e^{(\alpha_c - \alpha_a)(\theta_2 - \theta_1)}} \dots\dots\dots (3.11)$$

ただし

$P.I.(\theta_2)$  =  $\theta_2^\circ\text{C}$  における成極指数

$P.I.(\theta_1)$  =  $\theta_1^\circ\text{C}$  における成極指数

式 (3.11) で、漏洩電流および吸収電流の温度係数  $\alpha_a$  および  $\alpha_c$ 、ならびに供試機の吸収指数  $n$  が与えられると、 $\theta_2^\circ\text{C}$  における成極指数を  $\theta_1^\circ\text{C}$  の成極指数から求めることができる。

表 2.3 に示したデータでは、漏洩電流の温度係数は平均 0.072 となり、また吸収電流の温度係数は平均 0.041 となるので、いま  $\alpha_c = 0.07$ 、 $\alpha_a = 0.04$ 、また  $n = 0.8$  として式 (3.11) を曲線に描けば、図 3.2 が得られる。図には、基準温度  $\theta_1^\circ\text{C}$  における成極指数が 2.5 および 1.5 の場合を示したが、この曲線から  $\theta_1^\circ\text{C}$  における成極指数がわかれば、 $\theta_2^\circ\text{C}$  における成極指数の値を知ることができる。



文献(8)に掲げてある多くの発電機巻線およびコイルの、成極指数—温度特性の実測例に、図 3.2 の補正曲線をプロットしたものを図 3.3 に示す。図 3.3 から、ここに示した成極指数の温度補正曲線は実測結果と比較的良好一致しており、実用上満足であることがわかる。

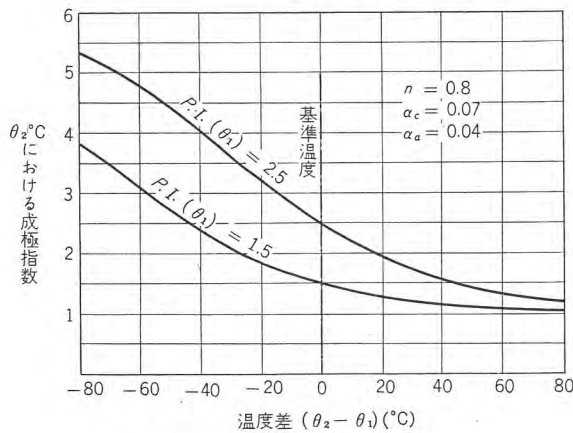


図 3.2 成極指数の温度補正曲線

Fig. 3.2 Temperature correction curve of P.I.

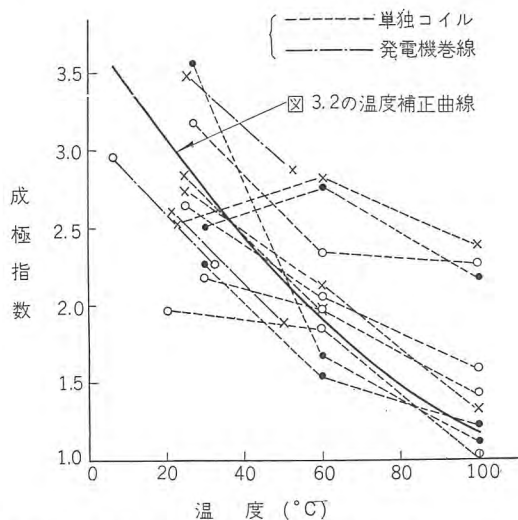


図 3.3 成極指数の温度特性曲線上に描いた温度補正曲線

Fig. 3.3 Comparison of actual characteristic curves of P.I. with proposed temperature correction curve.

## (2) 漏洩比の温度補正

式 (3.2) および式 (3.9) から

$$L.R.(\theta_2) = \frac{L.R.(\theta_1) \cdot e^{(\alpha_c - \alpha_a)(\theta_2 - \theta_1)}}{\{1 - L.R.(\theta_1) + L.R.(\theta_1) \cdot e^{(\alpha_c - \alpha_a)(\theta_2 - \theta_1)}\}} \quad \dots\dots\dots (3.12)$$

ただし

$L.R.(\theta_2) = \theta_2^\circ\text{C}$  における漏洩比

$L.R.(\theta_1) = \theta_1^\circ\text{C}$  における漏洩比

となる。

成極指数の場合と同様、 $\alpha_c = 0.07$ ,  $\alpha_a = 0.04$  として

発電機絶縁の直流試験(2)・原・平林

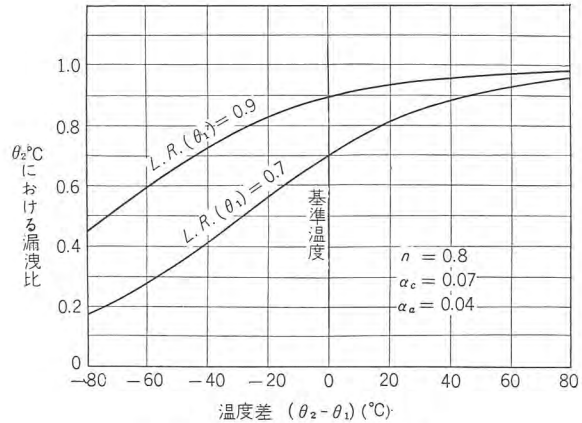


図 3.4 漏洩比の温度補正曲線

Fig. 3.4 Temperature correction curves of L.R.

式 (3.12) を曲線に描けば、図 3.4 が得られる。図 3.4 には基準温度  $\theta_1^\circ\text{C}$  における漏洩比が、0.9 および 0.7 の場合を示したが、この曲線から  $\theta_1^\circ\text{C}$  における漏洩比がわかれば、 $\theta_2^\circ\text{C}$  における漏洩比を知ることができる。

## 4. 吸収電流を補正した電圧上昇法の適用

2.1 に述べた新しい電圧上昇法は、吸収電流の影響を補正できると同時に、試験に要する時間が非常に短縮される特長があることはすでに述べたが、実際に適用する場合には、最初の印加電圧と印加時間、ならびに第2段目以降の電圧上昇の値をまず決め（この値は一定に決める）、最初の階段における試験中もしくは、第2段目の始めのうちに、第1階段における充電電流の値から、その供試機の吸収指数  $n$  の値を求める。もちろん測定した充電電流の値は、試験中に両対数紙上にプロットしておく。 $n$  の決定には、形紙方式によるか、または図 2.2 から求めるのが良い。ただし図 2.2 による法は、充電電流曲線上の二つ以上ことなった場所から求めた、二つ以上の  $n$  の値の平均をとらないと誤差が多い。 $n$  の値が求まると、最初の印加電圧に対する第2番目以降の電圧上昇の大きさの割合を一定として、式 (2.6) をあらかじめ計算した図 4.1 の曲線から、第2段目以降の電圧印加時間を知ることができる。

図 4.1 は、各段における電圧を最初の印加電圧の 20% ずつ上昇する場合、第2段目以降の電圧印加時間を最初の印加時間に対するパーセントで示したものであるが、実用上はいろいろの電圧上昇の場合について曲線を用意しておく都合が良い。以下この方法を適用する際の実用上の問題点について考察する。



#### 4.1 電圧印加時間の配分

各階段の電圧上昇の値を最初の印加電圧に対する割合で決め、さらに供試機の吸収指数  $n$  の値がわかると、第2段階以降の印加時間は、式(2.6)から求めることができるが、いろいろの電圧上昇の割合と  $n$  の値について式(2.6)を解くことは相当の労力を要するので、電子計算機(Bendix G-15 D)を用いて計算した結果を表4.1~4.5に示し、実際にこの方法を適用される人々の参考に供する。

表4.1は、各階段で最初の印加電圧の50%ずつ上昇する場合、各電圧階段における印加時間を、最初の階段における印加時間に対するパーセントで示したもので、 $n$ を0.6から1.0まで変化して計算した結果である。同様に電圧上昇の割合を、最初の印加電圧の100%ないし500%に選んだときの、電圧印加時間の配分を表4.2~4.5に示す。これらの表から、図4.1のような曲線を描いておけば、実用上たいいていの場合に、吸収電流を補正した新しい電圧上昇法による試験を実施することができる。

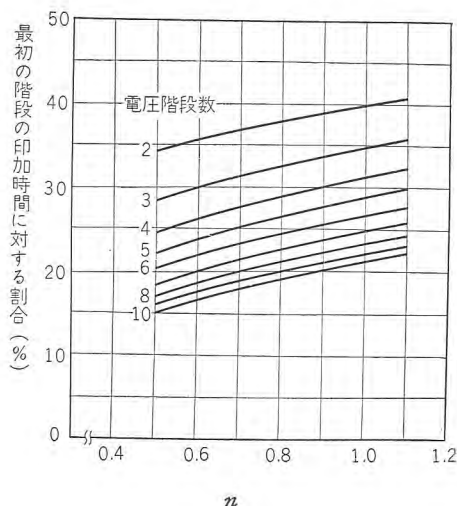


図 4.1 最初の印加電圧の 20% ずつ電圧を上げる場合の時間

Fig. 4.1 Time values for subsequent voltage steps based on 20% voltage increments.

表 4.1 50% 電圧ステップの時間配分 (%)

電圧 階段数	$n$	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
1		100	100	100	100	100
2		53.6	54.7	55.7	56.7	57.7
3		43.4	44.6	45.7	46.9	48.0
4		36.9	38.1	39.3	40.5	41.7
5		32.3	33.5	34.7	35.9	37.1
6		28.7	29.9	31.1	32.3	33.5
7		25.9	27.1	28.3	29.5	30.7
8		23.7	24.8	26.0	27.2	28.4
9		21.8	22.9	24.1	25.2	26.4
10		20.3	21.3	22.4	23.6	24.7

表 4.2 100% 電圧ステップの時間配分 (%)

電圧 階段数	$n$	0.7	0.8	0.9	1.0
1		100	100	100	100
2		68.3	69.2	69.9	70.7
3		53.2	54.3	55.4	56.4
4		44.1	45.3	46.4	47.6
5		37.9	39.1	40.3	41.5
6		33.3	34.5	35.8	37.0
7		29.8	31.0	32.2	33.5
8		27.1	28.2	29.4	30.6
9		24.8	26.0	27.1	28.3
10		22.9	24.0	25.2	26.4

表 4.3 200% 電圧ステップの時間配分 (%)

電圧 階段数	$n$	0.6	0.8	1.0
1		100	100	100
2		79.5	80.6	81.7
3		58.6	60.6	62.5
4		47.0	49.3	51.5
5		39.5	41.9	44.3
6		34.2	36.6	39.1
7		30.3	32.7	35.1
8		27.2	29.6	32.0
9		24.7	27.0	29.4
10		22.7	25.0	27.3

表 4.4 300% 電圧ステップの時間配分 (%)

電圧 階段数	$n$	0.6	0.8	1.0
1		100	100	100
2		84.9	85.8	86.6
3		61.2	63.1	64.9
4		48.5	50.8	53.0
5		40.6	42.9	45.3
6		35.0	37.4	39.8
7		30.9	33.3	35.7
8		27.7	30.0	32.5
9		25.1	27.4	29.8
10		23.0	25.3	27.6

表 4.5 500% 電圧ステップの時間配分 (%)

電圧 階段数	$n$	0.6	0.8	1.0
1		100	100	100
2		90.2	90.8	91.3
3		63.5	65.3	67.1
4		49.9	52.1	54.3
5		41.5	43.8	46.2
6		35.6	38.1	40.5
7		31.3	33.8	36.2
8		28.0	30.4	32.8
9		25.4	27.7	30.1
10		23.3	25.5	27.8

#### 4.2 誤 差

式(2.6)は各電圧階段で step function 的に電圧を上昇したときに成立するものであるが、実際的には各階段で、電圧を所定の値にまであげるのに若干の時間がかかる。したがって式(2.6)といくぶんことなつたものになり誤差が生ずる。そのほか実用上 2, 3 の問題点があるので、つぎにこれらの問題について考察を加えて見る。

##### (1) 電圧上昇速度による誤差

簡単のために、各階段で図 4.2 のような電圧上昇をした場合について考えて見る。図 4.2 で、 $\tau$  は電圧を所定の値  $V$  まで上げるに要する時間とし、 $t$  なる時間に



おける吸収電流を求めて見ると

$$i(t) \doteq KVt^{-n} \left\{ 1 + \frac{n}{2} \left( \frac{\tau}{t} \right) + \frac{n(n+1)}{6} \left( \frac{\tau}{t} \right)^2 \right\} \dots (4.1)$$

となる。Step function 的に電圧をあげたときの吸収電流は式 (2.3) であるから、式 (2.3) と式 (4.1) を比較すると、この場合の両者の差は

$$\beta = \frac{n}{2} \left( \frac{\tau}{t} \right) + \frac{n(n+1)}{6} \left( \frac{\tau}{t} \right)^2 \dots (4.2)$$

となる。したがって  $\tau$  にくらべ  $t$  が十分大きくないと誤差が大きくなる。式 (4.2) は第 1 番目の階段における誤差の量であるが、各階段で次々に同じような電圧上昇の仕方をした場合、 $i$  番目の階段の電流  $i_{ii}$  に対する誤差

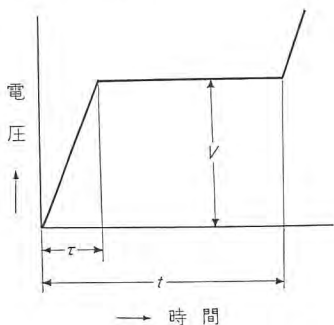


図 4.2 電圧上昇のしかた

Fig. 4.2 Description of voltage rise.

$\beta_i$  は

$$\beta_i = \frac{|Y|}{1 + (i-1)\Delta b} \dots (4.3)$$

$$|Y| = \frac{n}{2} \left( \frac{\tau_1}{t_1} \right) \left[ \left( \sum_{j=1}^i x_j \right)^{-(n+1)} + \Delta b^2 \sum_{j=2}^i \left\{ \left( \sum_{k=j}^i x_k \right)^{-(n+1)} \right\} \right] + \frac{n(n+1)}{6} \left( \frac{\tau_1}{t_1} \right)^2 \left[ \left( \sum_{j=1}^i x_j \right)^{-(n+2)} + \Delta b^3 \sum_{j=2}^i \left\{ \left( \sum_{k=j}^i x_k \right)^{-(n+2)} \right\} \right] \dots (4.4)$$

ただし

$\Delta b$  = 最初の印加電圧  $V_1$  に対する、第 2 番目以降の階段における電圧上昇の大きさの割合、すなわち  $\frac{V_2 - V_1}{V_1}, \frac{V_3 - V_2}{V_1} \dots$  など、この値は一定。

$x$  = 最初の階段の印加時間  $t_1$  に対する、第 2 番目以降の階段での印加時間の割合、すなわち

$$x_1 = 1, \quad x_2 = \frac{t_2}{t_1}, \quad x_3 = \frac{t_3}{t_1} \dots x_i = \frac{t_i}{t_1}$$

$\tau_1$  = 最初の階段における電圧上昇の所要時間

$n$  = 吸収指数

である。

また上式は第 2 番目以降の階段における電圧上昇の所要時間  $\tau_i$  は、電圧上昇速度を各階段で一定と仮定し、 $\tau_i = \Delta b \cdot \tau_1$  として求めたものである。

式 (4.3) と式 (4.4) から、電圧階段数を 10 に選び、 $n=0.6$  の場合の誤差を曲線にしたものが図 4.3 である。すなわち第 10 番目の階段における誤差と、 $\tau_1/t_1$  との関

係が図 4.3 からわかる。

いまかりに、最初の階段における電圧上昇の所要時間を 10 秒とし、第 10 番目の階段における電流の誤差を 5% 以内にするためには、各階段で最初の印加電圧の 50%, 100%, 200%, 300% および 500% ずつ、電圧をあげたとき、最初の電圧の印加時間は、それぞれ 1.5 分、2.2 分、4.4 分、6.5 分 および 11 分以上を要することになる。階段数が 10 より少ないときは、誤差は図 4.3 より少なくなる。また  $n$  が 0.6 より大きいと誤差は図 4.3 より大きくなるが、いずれの場合もその差はたいし

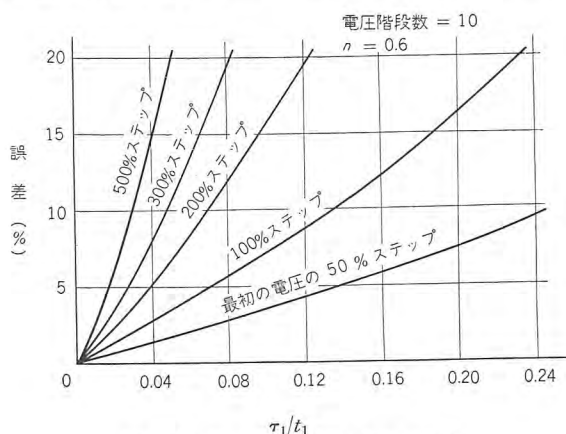


図 4.3 10 段階目の吸収電流の誤差

Fig. 4.3 Errors of absorption current at 10th voltage step concerning  $\tau_1/t_1$ .

て大きくはならない。電圧上昇に要する時間は通常 10 秒以内にはできるので、実用上は最初の電圧の印加時間を 10~15 分以上にとれば、各階段での電圧上昇の所要時間にもとづく誤差は無視できる。また実際的には最初の印加時間を短くすると、図 4.1 から一見して明らかとなり、第 2 番目以降の印加時間が非常に短くなるので、最初の印加時間をあまり短くすることは、実用上測定が困難になる。

(2) 吸収指数  $n$  の値による誤差

各電圧階段における印加時間の配分の決定のために用いた  $n$  の値が、供試機の真の  $n$  の値とことになっている場合は誤差を生ずる。いま  $n$  の値がかりに 0.1 だけ違っていると、第 2 番目以降の電圧階段における印加時間は、表 4.1~4.5 から約 1~1.2% 違ってくることがわかる。いま  $n=0.8$  の供試機で、印加時間が 1.2% 変るとその階段の最終電流は約 0.63% 変る。すなわち  $n=0.8$  の供試機に、0.7 または 0.9 の  $n$  の値を用いると、各電圧階段で 0.63% の誤差を伴い、電圧階段が 10 段階の場合の最終電流の誤差は約 6% となる。供試機の  $n$  の値を、最初の階段における充電電流—時間曲線から、形紙方式



を適用して求めるか、または図 2.2 から求めた 2, 3 の  $n$  の値の平均値をとると、真の  $n$  の値と  $\pm 0.1$  以内の誤差の範囲で求めることは、比較的容易であるので、求めた  $n$  の値の誤差にもとづく電流の誤差は、実用上ほとんど問題にしくなくても良い。

印加電圧の値が高くなると、 $n$  の値が変化するかどうにかについては、十分多くのデータはないが、表 2.2 の A コイルでは、2 kV から 14 kV までの間の  $n$  の変化が 0.05 に過ぎず、この程度の  $n$  の値の変化は、たいして大きな誤差にならないので、最初の電圧階段で求めた  $n$  の値をもとに、第 2 番目以降の電圧階段の印加時間を決めても問題にはならないと考える。

#### 4.3 試験装置

試験電圧が任意に変えられ、電圧および電流が精度良く測定できるものであれば、どのようなものでも良く、特別の装置は必要でないが、試験中の電圧変動が少ないことは他の場合と同様に必要なことである。ただし、出力電圧の変動を少なくするため、整流回路の平滑コンデンサを必要以上に大きくすると、各階段で、電圧上昇に要する時間が長くなるので、直流電源回路の時定数を必要以上に大きくすることは好ましくない。直流回路の時定数が小さくしかも電圧変動率の少ない試験装置が望まれるわけであるが、実用上現場実測には、一次側に定電圧装置を設けた、たとえば“IT 15 形直流高圧絶縁試験器”のようなもので十分満足である。

#### 4.4 実験結果

従来から行なわれている非階段的電圧上昇法、および階段的電圧上昇法と、吸収電流を補正した印加時間の配

分による電圧上昇法とを比較検討するため、定格 900 kW 3 kV の同期電動機用 B 種絶縁新品コイル（表 2.2 および表 2.3 の“A”コイル）について行なった実験結果について述べる。

試験温度は 50°C で、印加電圧は 2 kV から 14 kV まで 2 kV ごとに電圧を上昇した。

非階段的上昇法では、各電圧階段で 2 時間の充電電流を測定した後、30 分間の放電電流を測定した。なお放電は残留電荷を完全になくするため 24 時間行なった。試験結果の一部は図 2.5 に示した。

階段的上昇法は、各電圧で 5 分間、および 10 分間ずつ保持して、次々に電圧を上昇させた。

新しい印加時間の配分による電圧上昇法は、2 kV から 2 kV ごとに電圧をあげ、第 2 段階以降の印加時間は、表 4.2 で  $n=0.8$  の時間配分に従い、最初の階段の印加時間を、それぞれ 3 分、5 分、10 分および 20 分とした場合について試験した。

以上三つの電圧上昇法による絶縁抵抗—電圧特性を図 4.4 に示す。図中に示した漏洩抵抗は、非階段的上昇法による試験結果から、形紙方式によって漏洩電流分を分離して求めたものである。

図 4.5 からわかるとおり、非階段的上昇法による絶縁抵抗—電圧特性の傾斜は、3 分値から 120 分値まで漏洩抵抗の傾斜と、ほとんど同じであるが、階段的上昇法による特性は、漏洩抵抗の電圧特性といちじるしくその形状がことなっている。これはすでに述べたように、吸収電流の影響にもとづくもので、この吸収電流の影響を補正した電圧上昇法による特性は、非階段的上昇法による特性とほとんど変りがなく、新しい印加時間の配分によ

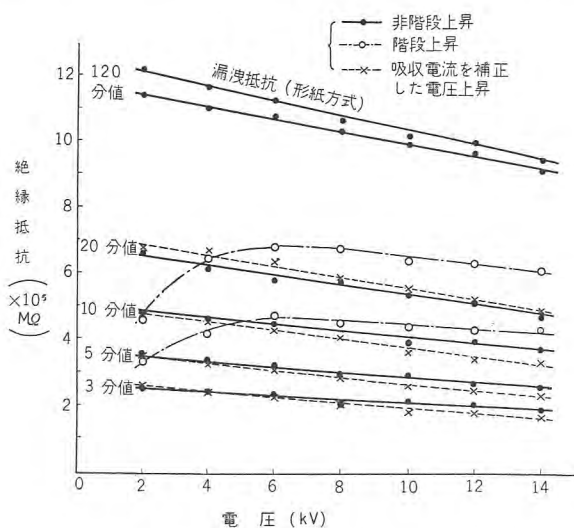


図 4.4 絶縁抵抗—電圧特性

Fig. 4.4 Insulation resistance-voltage characteristic curves.

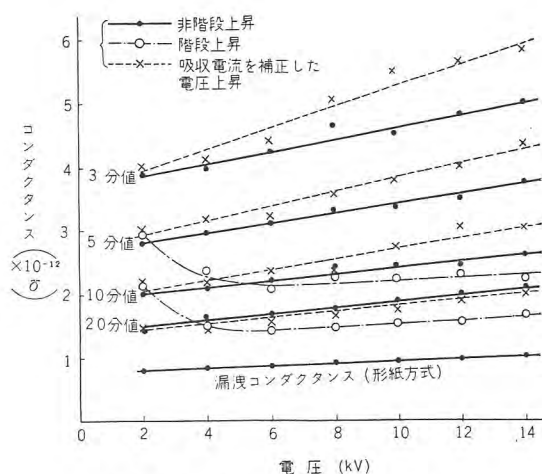


図 4.5 コンダクタンス—電圧特性

Fig. 4.5 Conductance-voltage characteristic curves.



る電圧上昇法が、実用上満足であることを示している。

新しい電圧上昇法では吸収抵抗を各電圧で一定になるようにしており、一般に絶縁抵抗は、漏洩抵抗と吸収抵抗の並列抵抗となるので、正確には絶縁抵抗—電圧特性曲線は、漏洩抵抗—電圧特性曲線とは平行にならない。これに反しコンダクタンスは漏洩コンダクタンスと吸収コンダクタンスの和となり、新しい電圧上昇法では各電圧で吸収コンダクタンスを一定にしているので、この場合の漏洩コンダクタンスの電圧特性は、コンダクタンスの電圧特性と平行になる。したがって新しい電圧上昇法による特性を、非階段的上昇法による特性と比較するには、正確にはコンダクタンスで比較すべきである。図 4.5 は、図 4.4 をコンダクタンスの電圧特性として示したものである。図 4.5 からわかるとおり、吸収電流を補正した電圧上昇法で、最初の階段の印加時間を 10 分および 20 分を選んだ場合は、非階段的上昇法の結果と、ほとんど一致しているが、最初の印加時間が 3 分および 5 分の場合には、非階段的上昇法の特性と、かなりことになっている。これは、4.2 (1) に述べた誤差であると考えられ、吸収電流を補正した電圧上昇法による試験では、最初の階段の電圧印加時間を、短くすると誤差が生ずることを裏書きしている。

さらにこの試験に要した時間を比較すると、吸収電流を補正した電圧上昇では、最初の印加時間を 20 分および 10 分を選んだとき、所要時間はそれぞれ 75 分および 37 分であるのにくらべ、階段的上昇法では 10 分 hold で電圧をあげた場合 70 分を要し、しかも得られる特性は誤差がきわめて多い。非階段的上昇法では、放電に要する時間が各電圧階段ごとに 2 時間以上を要するので、実際の所要時間は、比較にならないほど大きくなる。

以上述べたように、新しい印加時間の配分による電圧上昇法では、従来の方法よりも試験に要する時間がきわめて短縮され、しかも吸収電流の影響を補正した実用上満足な絶縁抵抗の電圧特性が得られる。

## 5. 直流試験による絶縁破壊電圧の予知

絶縁抵抗—電圧特性の曲線を外挿し、直流破壊電圧を予知する方法を、A.W.W. Cameron<sup>(9)</sup> が 1952 年に提案以来、この方法はきわめて多くの人々に関心をもたれ、これに関する実験結果の報告は枚挙にいとまがない。Cameron は絶縁抵抗電圧特性の曲線が、絶縁抵抗零の点まで一つの連続した曲線となり、しかも破壊電圧直前

で絶縁抵抗は急激に低下することから、破壊電圧を予知できると発表し、これに関する賛成意見も発表されているが、<sup>(10)(11)(12)</sup> 一方否定的な意見も多く、ある点で突然に破壊が起って曲線が不連続になったり、<sup>(13)(14)</sup> また特性曲線の形状が吸湿量や表面漏洩によって、いろいろことなるので、<sup>(15)(16)</sup> 破壊予知は不可能であるという報告も多い。これらの報告を総合して V. Wouk<sup>(17)</sup> は「直流試験でつねに破壊予知ができるとはかぎらないが、多くの場合に交流試験ではできないような破壊予知が、直流試験では可能である」と述べている。

筆者もこの方法に関しては大きな関心を有しているが破壊前に電流が急増することは理論的にも認められており、曲線が不連続になったり、曲線の形状が一定の形をとらなかったりする原因は、たとえばコロナ電流の影響や、いろいろの二次的因子によるためと考えている。したがって今後実用の機械について起りうる二次的諸因子を追及することが大事であるが、これは非常に困難な問題で、簡単に結論が得られるとは思われない。しかし少なくともデータのまとめかたは、合理的でなければならないと考える。上述の破壊予知に関する多くの報告は、絶縁抵抗—電圧特性、または漏洩電流—電圧特性を等目盛グラフ用紙に描いて、いろいろの考察や意見を述べているが、犬石氏<sup>(18)</sup> などは、固体中に流れる漏洩電流は、低電界では印加電圧に比例しオームの法則に従うが、高電界ではオームの法則から期待されるよりも急激に増え、電圧とともに exponential に増加し、さらに電圧をあげ破壊直前になると電子性電流が加わって電流はさらに上部にわん曲する。すなわち図 5.1 のようになることを理論的ならびに実験的に述べている。また電子電流は高電界では  $\exp(\sqrt{V})$  に比例するといわれている。<sup>(19)</sup>

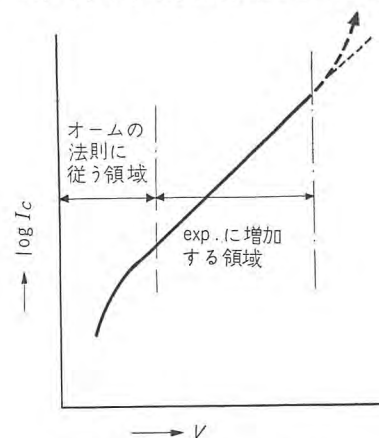


図 5.1 漏洩電流—電圧特性

Fig. 5.1 Representation of leakage-voltage characteristic curve.



これらの理論的根拠をもとに、実用の回転機絶縁について測定した漏洩電流—電圧特性、および絶縁抵抗—電

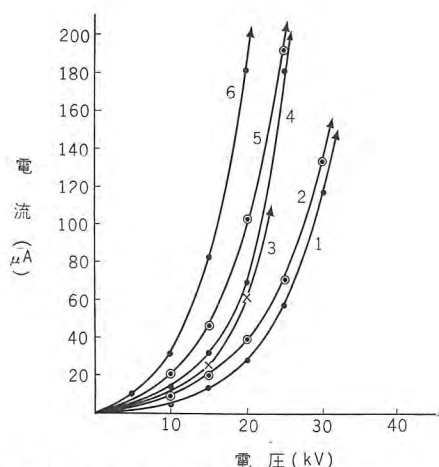


図 5.2 等目盛方眼紙に描いた電流—電圧特性  
Fig. 5.2 Leakage-voltage characteristic curves plotted on section paper.

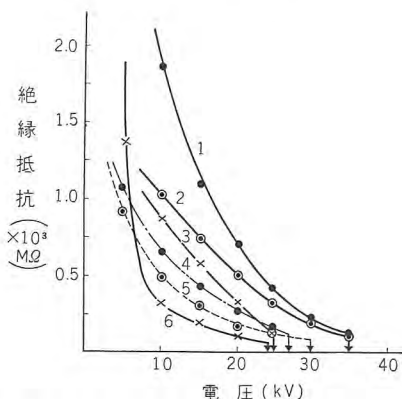


図 5.3 等目盛方眼紙に描いた絶縁抵抗—電圧特性  
Fig. 5.3 Insulation resistance-voltage characteristic curves plotted on section paper.

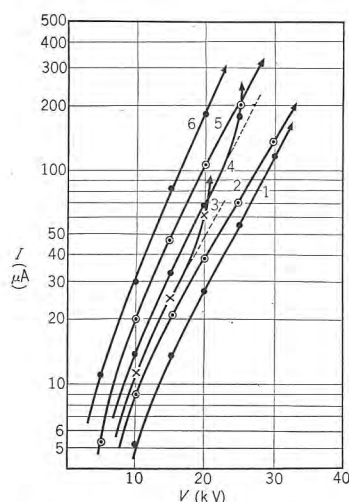


図 5.4 半対数紙に描いた電流—電圧特性  
Fig. 5.4 Leakage-voltage characteristic curves plotted on Semi-log paper.

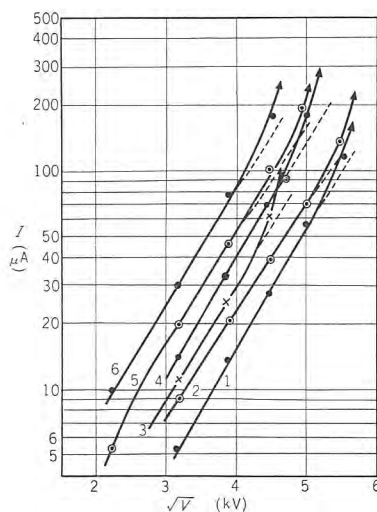


図 5.5 半対数紙に描いた電流—電圧特性  
Fig. 5.5 Leakage-voltage characteristic curves plotted on Semi-log paper.

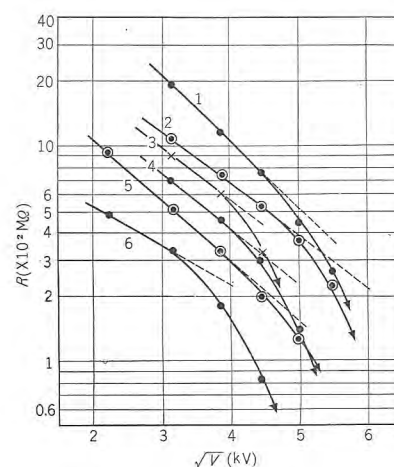


図 5.6 半対数紙に描いた絶縁抵抗—電圧特性  
Fig. 5.6 Insulation resistance-voltage characteristic curves plotted on Semi-log paper.

圧特性を、種々のグラフ用紙にプロットして曲線を描き、これらの曲線の形状から破壊電圧を予知することができかどうかを検討してみた。

供試機は 1,900 kW, 3 kV の同期電動機で約 15 年使用されたものである。<sup>(20)</sup> 巻線をわたり線の所で切り離し、4~5 コイルのグループごとに電流—電圧特性を測定したが、この試験は、新しい印加時間の配分による吸収電流を補正した電圧上昇法を適用したものである。

図 5.2 および図 5.3 は得られた結果を従来のように等目盛グラフ用紙にプロットした電流—電圧特性および絶縁抵抗—電圧特性で、これらの図から破壊電圧を予知することは、実際の非破壊試験では、どの点で電圧印加をやめて曲線を外挿すべきかわからないので、破壊電圧を予知することは困難である。図 5.4 は曲線を半対数紙上にプロットし、 $\log I$  対  $V$  の関係で曲線を描いたもの、また図 5.5 および図 5.6 は、 $\log I$  対  $\sqrt{V}$  および  $\log R$  対  $\sqrt{V}$  の関係で曲線を描いたものである。 $I$ ,  $V$ ,  $R$  は電流、電圧および抵抗である。図 5.4 は図 5.1 とほぼ似たような形状を示しているが、電流が  $\exp(V)$  に比例して増加した後、図 5.1 のように破壊前でさらに上部にわん曲を示さないものが多い。図 5.5 では電流が  $\exp(\sqrt{V})$  に比例して増加した後、破壊前にこの直線からはずれて、さらに上部にわん曲した後破壊している。また絶縁抵抗も  $\exp(\sqrt{V})$  とともに直線的に減少した後、さらに下部にわん曲した後破壊している。図 5.5 および図 5.6 で、電流または絶縁抵抗が直線からはずれ



る点の印加電圧と、破壊電圧との相関はきわめて強く、破壊電圧は電流のわん曲点の 1.4~2.0 倍、絶縁抵抗のわん曲点の 1.5~2.2 倍であり。一般には、これらの関係曲線で、電流または絶縁抵抗が直線からわん曲する点の印加電圧から、破壊電圧を予知できそうである。図 5.5 および図 5.6 からわかるとおり、これらの関係曲線では、曲線の形状が単純で、しかもほぼ似たような形をとるので、電流または絶縁抵抗のわん曲点を見つけることは容易である。 $\log I$  対  $\sqrt{V}$ 、または  $\log R$  対  $\sqrt{V}$  の関係で曲線を描いた場合も、試験した 12 グループのうち、図 5.5 および図 5.6 のようにわん曲を示さないで破壊したものが 3 グループあり、また  $\log I$  対  $V$  の関係曲線でも、わん曲を示した後破壊したものが 12 グループのうち 3 グループあるので、破壊電圧の予知に関しどのような関係曲線をひくのがいちばん妥当であるかは、今後の試験結果にまたなければならない。しかしながら、少なくとも等目盛グラフ用紙に描いた電流または抵抗の電圧特性からは、まったく破壊予知ができないものが、 $\log I$  対  $\sqrt{V}$ 、または  $\log R$  対  $\sqrt{V}$  の関係曲線を用いると、破壊予知の可能性がきわめて大きくなることは注目すべきで、今後絶縁破壊電圧の予知を目的とした電流または絶縁抵抗の電圧特性は、等目盛グラフ用紙にプロットせず、 $\log I$  対  $V$ 、か  $\log I$  対  $\sqrt{V}$  (または  $\log R$  対  $\sqrt{V}$ ) の関係で曲線を描き、データを解析されることを推奨する。

## 6. む す び

発電機絶縁の直流試験に関する技術の進歩、ならびに新しい試験法を適用した実験結果などについて述べたが、結論として

(1) 吸収電流を補正するように選んだ印加時間の配分による新しい電圧上昇法は、従来の方法にくらべ、試験時間がいちじるしく短縮されるとともに、得られる絶縁抵抗の電圧特性は、漏洩抵抗の電圧特性と実用上同じ形状のものが得られ、弱点比の算出や、絶縁抵抗—電圧特性曲線を求める場合にきわめて便利である。

(2) 上述の新しい電圧上昇法を適用する際、実用上起りうる誤差について検討し、注意事項を述べた。さらに、いろいろの割合で電圧を上昇する場合の、電圧印加時間の配分について、電子計算機による計算結果を示し、この方法を適用される人々の参考に供した。

(3) 充電電流を、漏洩電流と吸収電流に分離する方  
発電機絶縁の直流試験(2)・原・平林

法を示し、絶縁の吸湿程度の判定には、従来から用いられている成極指数によるよりも、漏洩比によるほうが合理的で、かつ絶縁状態の解釈に都合が良いことを述べ、漏洩比による絶縁状態の判定基準を提案した。

(4) 成極指数および漏洩比の温度補正曲線を提示し、この曲線は、従来得られている成極指数—温度特性の実測結果とよく合致することを示した。

(5) 電流または絶縁抵抗の電圧特性を、半対数紙上に描き、 $\log I$  対  $\sqrt{V}$ 、または  $\log R$  対  $\sqrt{V}$  の関係で曲線をひくと、直流試験による絶縁破壊電圧の予知の可能性が、従来の方法よりもいちじるしく大きくなることを示した。

以上発電機絶縁の直流試験について述べたが、本文が直流試験技術の発達、直流試験による絶縁状態の判定および絶縁破壊電圧の予知法の確立などについて参考になれば筆者の幸いとするところである。

(34-5-6 受付)

## 参 考 文 献

- (1) F.R. Schleif: Corrections for Dielectric Absorption in High-Voltage DC Insulation Tests. AIEE. Transactions 75 Pt III p. 513-520 (1956)
- (2) J.S. Johnson, A.W. Zwirner: DC Testing Experience on Rotating Machine Insulation. Power Apparatus & System No. 31. p. 416-420 (August. 1957)
- (3) F.R. Schleif: Separation of Absorption and Leakage Components in High Voltage DC Insulation Testing AIEE Paper No. CP 58-204.
- (4) Discussion of Reference (2) by A.W.W. Cameron. Power Apparatus & System No. 31 p. 425 (August. 1957)
- (5) W. Schneider: Dielectric Absorption Studies at High Voltages on Large Rotating Machines. AIEE Miscellaneous Paper 51-129.
- (6) 原: ダイアレジン含浸発電機コイルの成極指数. 電気 4 学会連大予稿 No. 304. (昭 33)
- (7) 佐藤・井関・中田: 直流高圧法による発電機コイルの吸湿度判定法. 電学誌, 76 巻, 昭和 31 年 4 月.
- (8) 発電機線輪絶縁試験法: 回転機絶縁試験法委員会編
- (9) A.W.W. Cameron: Diagnosis of AC Generator Insulation Condition by Nondestructive Tests, AIEE. Transactions 71 Pt III. p. 263 (1952)
- (10) G.L. Hill: Testing Electrical Insulation of Rotating Machinery with High Voltage Direct Current. AIEE Transactions. 72 Pt III p. 159-174 (1953)
- (11) R.J. Alke: DC Overpotential Testing Experience on High Voltage Generator, AIEE Transactions 71 Pt III. p. 567-570 (1952)
- (12) A.W.W. Cameron, A.M. Sinclair: Experience and

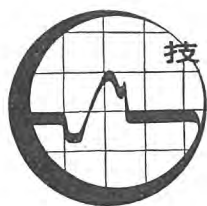


- Development in Nondestructive DC Testing for Maintenance of High Voltage Stators. Power Apparatus & System No. 23. p. 201-210 April. (1956)
- (13) H.C. Marcroft: Field Studies of Generator Windings. AIEE Transaction 71 Pt III. p. 822-829 (1952)
- (14) R.T. Rushall, J.S. Simons: An Examination of High Voltage DC Testing Applied to Large Stator Windings. PIEE. 102 Pt A. Oct. (1955)
- (15) J.S. Johnson, J.W. Clokey: Leakage-Voltage Characteristics of Insulation Related to DC Dielectric Strength, AIEE Transaction 72 Pt III. p. 681-686 (1953)
- (16) C.T. Sidney, B.R. Loxley: Techniques and Examples of High Voltage DC Testing on Rotating Machine Windings, AIEE Transaction 72 Pt III. p. 1121-1129 (1953)
- (17) V. Wouk: Report on the Use of DC Overpotential Testing in Industrial Power System. AIEE Paper No. CP. 57-641.
- (18) 犬石・D.A. Powers: マイラの電気伝導と絶縁破壊, 電学誌, 77 巻, p. 1072-1078, 昭和 32 年 8 月.
- (19) 放電ハンドブック, 電気学会放電専門委員会編 (1958)
- (20) 阿部・原: 3 kV 級同期電動機の絶縁破壊試験, 電気学会連大予稿 No. 371 (昭 34)

### 最近登録された当社の特許および実用新案

区 別	名 称	特許または 登 録 日	特許または 登 録 番 号	発 明 考 案 者	所属場所
新 案	軸流可逆送風機	34-3-31	491776	宮内 貞夫	長 崎
"	内燃機関用点火装置	"	491777	岡本 弘之	姫 路
"	電磁接触器	"	491778	吉田 太郎・水野 久雄	名 古 屋
"	"	"	491779	" "	"
"	電磁石装置	"	491780	服部 卓也	"
"	扇風機羽根車	"	491781	柘植 正治	中 津 川
"	電動機制御装置	"	491782	宮内 圭次	伊 丹
"	冷蔵庫扉の把手装置	"	491783	木下 忠男	静 岡
"	電気車電気制動装置	"	491784	北川 和人	伊 丹
"	内燃機関点火自動進角装置	"	491785	高見 昭	姫 路
"	内燃機関点火自動進角装置	"	491786	大村 半弥	"
"	内燃機関点火自動進角装置	"	491787	黒岩 利明	"
特 許	点弧子電気弁制御装置	34-4-1	250990	竹内 宏一	研 究 所
"	移 相 器	"	250991	浜岡 文夫・今出 昭彦	"
"	砒酸塩系ケイ光物質	"	250992	井手平三郎・山崎 清司	大 船
"	円綫波検出装置	34-4-7	251202	喜連川 隆・三戸 教授	研 究 所 大阪市大
"	半導体整流器の冷却方式	"	251203	加藤 又彦	伊 丹
新 案	防湿形電気計器	34-4-6	492088	加藤 義明	福 山
"	積算量遠隔計測装置	"	492089	"	"
"	印字形記録計	"	492090	加藤 義明・林 正之	"
"	軸 受	"	492091	岩永 弘	長 崎
"	たわみ継手	"	492092	西山 賢明	姫 路
"	クロスベルト形選鉱機	"	492093	河合 澄・高島 秀二・ 柳下 儀兵衛	大 船
"	コイル巻枠	"	492094	兼松 豊	名 古 屋
"	扉の鎖錠装置	"	492095	境 正昭	長 崎
"	温度補償型熱動過電流継電器	"	492096	篠崎 善助	名 古 屋
"	エレベータ用電動機の軸端部	"	492097	八木 勝・和田 義勝	"
"	高周波加熱接着装置	"	492098	馬場 文夫・寺本 吉一	無 線 機
"	内鉄形変圧器鉄心	"	492099	平山 広勝	伊 丹
特 許	半導体整流装置	34-4-14	251387	加藤 又彦	"
"	内燃機関点火装置	34-4-15	251456	三木 隆雄	姫 路
"	導波管系統	"	251457	喜連川 隆	無 線 機
"	接触変流機	"	251458	塚本 昭三	伊 丹
"	自動ジグザグミシンにおける千鳥振巾自動 調節切換装置	"	251491	三津沢 武夫・穂積 策太郎	和 歌 山





## 技術解説

## 運 炭 設 備 (1)

—火力発電所における灰処理装置—

## 1. ま え が き

従来パワープラントで主要機器に対し二義的に考えられていた問題に灰処理装置、石炭運搬設備ならびに給水処理装置などがあげられる。これらの装置は、パワープラントでは発電機、タービン、汽缶などの主要機器のはなやかさに比べて等閑に付されがちであるが、プラントとしてはいずれの装置が不具合であっても満足な高効率の運転は期しがたい。とくに最近のようにプラント全体が全自動化されごく少数人員での運転方式が採用されつつある現状では、これらの装置も当然新しい運転方式すなわち中央制御方式に合致した機構で遠隔操作可能な自動方式が望ましい。

最近の新鋭火力では中央制御室に発電機盤、タービン盤、ボイラ盤その他の主要計器盤と並んで運炭装置盤、灰処理装置盤、給水処理装置盤などが設置される傾向にある。これらの装置の中でもとくに灰処理装置は、従来もっとも安易な方法でプラントから灰を取り出しさえすれば事足りるという程度にしか考えられていなかったが、一定範囲内の粒度のアッシュがフライアッシュとして回収利用の道がひらかれてから、これらの採取方法の検討、運転方法ならびに機構の改良改善が行われてきた。

さらにパワープラントの大容量化、自動化に従って、灰処理装置も中央制御方式が採用され、現地で全然大人手を要することなく、中央制御室で主要機器の運転と同様に運転制御されるようになった。

従来使用された簡易な形式のものから最近の自動化された大

容量ボイラの装置に至るまでの実施例をあげその優劣を比較検討してご参考に供したい。

## 2. 在 来 の 形 式

灰処理装置はそのプラントの立地条件、ボイラの形式、種類、燃料の種類、燃焼方法などの条件によって雑多な形式、機構のものが計画採用されているが、これはこの装置の性格上やむを得ないことである。

しかしこれらの装置の中にはきわめて性能が悪く、漏れの多い不経済な装置もあって、汽缶の性能を悪くしかつ汽缶室を不潔にしているものが多い。

最近のプラントでは、たとえいかなる形式の灰処理装置を採用してもさほど目だつほどの漏洩は見受けなくなったが、古いプラントでは相当漏洩灰が山積している所もある。これらは機構計画の粗悪によるものもあるが、アッシュによる材料の摩耗と腐食が早く、補修が追いつかないといった面もある。たとえば水洗式の装置を設備したもので水を循環して使用する循環ポンプの impeller が 1 週間にして使用に耐えずそのためポンプの補修が摩耗に追いつかずボイラの連結運転に支障をきたした例もある。最近耐摩耗性、耐食性材料の研究が進み、これらの事故も逐次解消されつつある。一般に広く使用されてきた在来の装置をその形の上より大別すれば次の数種になる。

## 2.1 高速水洗式

図 2.1 はこれらの灰流しみぞを使った場合の装置の一例を示したものである。灰流しみぞを設けて圧力水で洗い流し灰だめ

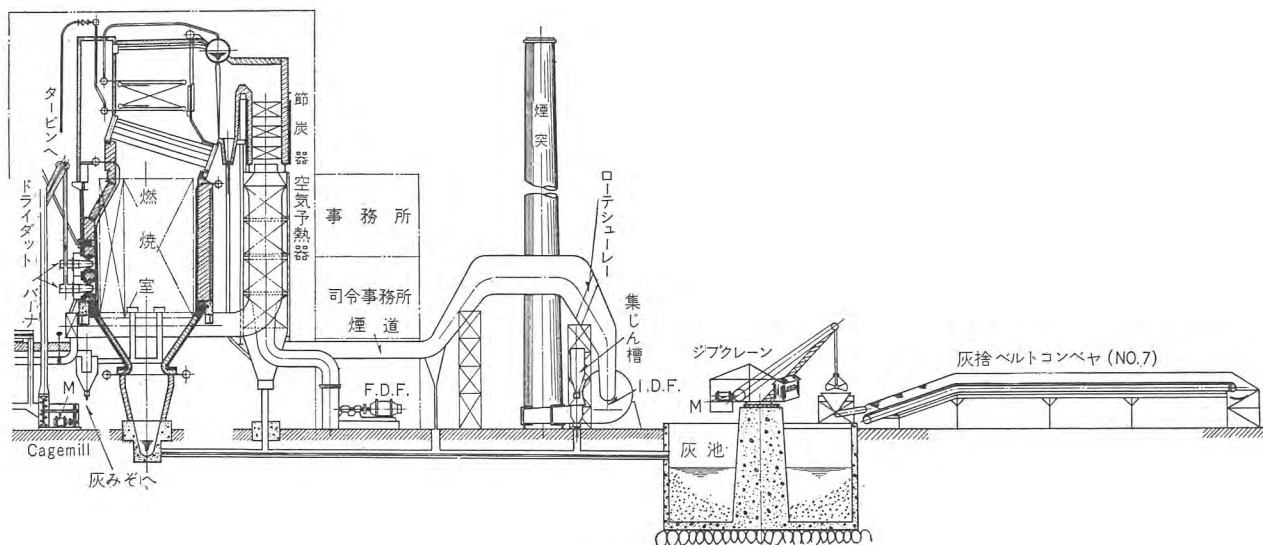


図 2.1 高速水洗式灰処理装置



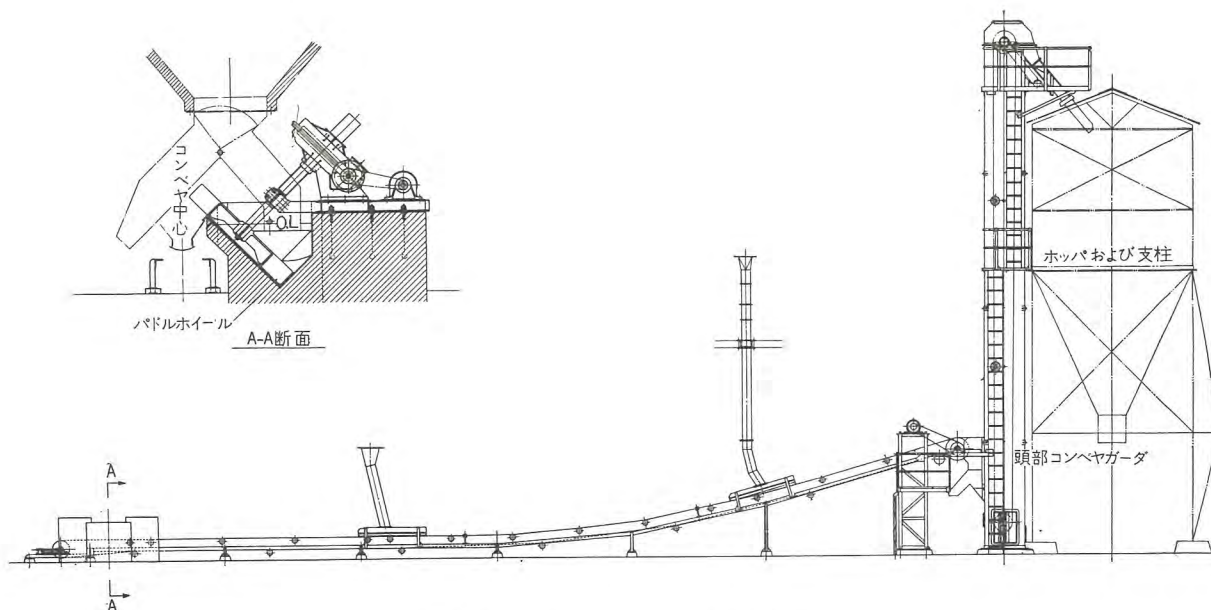


図 2.2 バドルホイール式灰処理装置

槽にたくわえて灰は沈降させ上澄みの水は他に導いて循環使用するかまたは他に捨て、沈降した灰はバケットコンベヤですくいあげあるいはジブクレーンまたは門形クレーンのグラブでつかみ上げる。同じように灰流しみぞを使った装置でも灰を沈降させずそのまま水と混合して ash pump で灰捨て場まで圧送する場合があるが、この場合には灰だめ槽に流す時、粒の大きいもの、あるいはクリンカはすくい上げてグラインダで砕いてから灰だめ槽に入れ多量の水と混合して ash pump でくみ上げて圧送管へ吐出する。この場合 ash と水との混合比は大略 ash の 90~100 倍の水量が必要とされている。

灰だめ槽で灰を沈降させ上澄みの水を他に導き灰はグラブでつかみ出す場合は、灰だめ槽を切換えて使用するようになっている。この場合 1 個の灰だめ槽の容量は大体缶より排出される量の 15~30 日分くらいの容量にして置けばまず安全である。

灰流し用水の圧力は大体噴射弁入口で 15~30 m 程度で十分である。灰流しに要する水量は概略灰の量の 5~6 倍で十分であり、灰流しみぞのこう配は  $\frac{1}{50}$  以上を必要とされている。

灰流しみぞは摩耗が激しいためみぞの内面は耐摩耗性の鋳鉄、タイル、陶器などを敷き詰めている。

この装置は大形小形を問わず一般に水洗式と呼ばれ広く使用されているが rear pass hopper ならびに air heater の下部 hopper からの吐出灰をみぞに入れる機構などには十分注意を要する。

この装置の最大の欠点は各 hopper からの

灰が流水と完全に混合されず流水の上に灰が落ちるようにしたものも多く、かくしたのでは灰出し中そのある部分が空中に飛散することである。

## 2.2 バドルホイール式

この装置はきわめて簡単で小形ボイラに多く使用されている。装置の概略は図 2.2 に示す。

furnace の bottom ash hopper に水槽とバドルホイールを設置して hopper にたまった灰をバドルですくい上げてベルトコンベヤに移し、ベルトコンベヤで ash bin に輸送する機構のものであって rear pass hopper ならびに air heater hopper

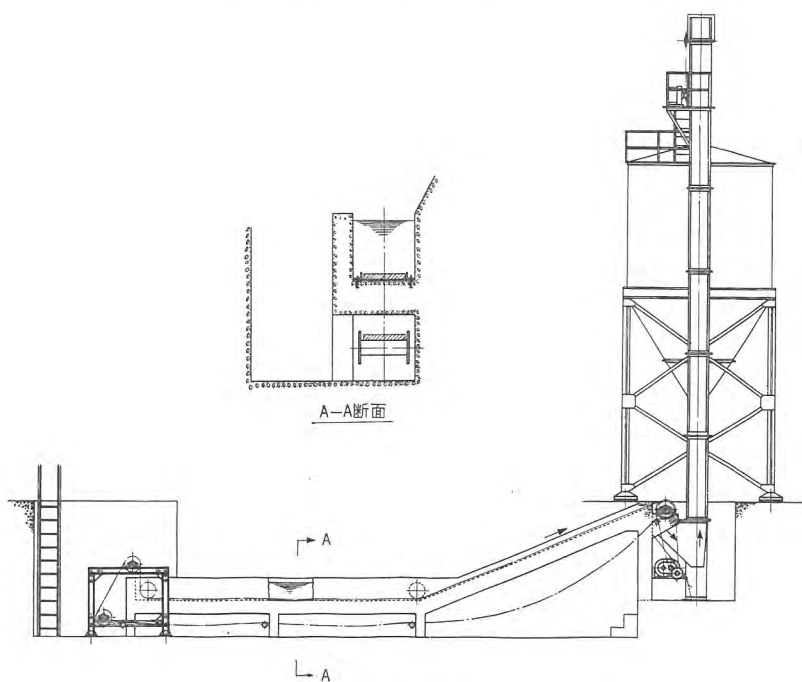


図 2.3 ドラグチェーン式灰処理装置



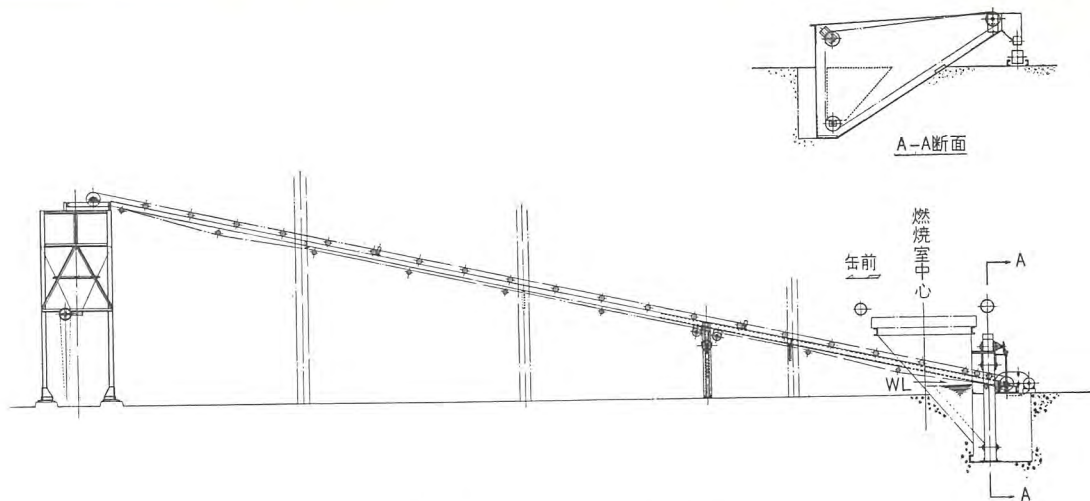


図 2.4 スクレッパ式灰処理装置

などの灰は輸送途中ベルトコンベヤの上に乗せるようにしているが、これらの灰は shoot で導いて移動中のベルトの上に乗せる場合に灰が室内に飛散しないように shoot の灰出口側に水を噴霧している。

この種の機構のものは、噴霧水の調整が困難で、少しでも水の量が多過ぎるとベルトコンベヤから水滴となって外部へ落下し、時には灰まで水滴とともに流出する場合さえ起る。また逆に水の量が少な過ぎると灰が空中へ飛散する。つねに灰出し装置を監視する必要があるのでわずらわしさはさげにくい。

### 2.3 ドラグチェーン式

図 2.3 はドラグチェーンによる灰処理装置の概略を示す。

この装置では各部の灰を水で洗い流して ash hopper に集め、この hopper からドラグチェーンで灰だけつかみ出し、バケットコンベヤで storage hopper に貯蔵する機構である。この装置はとくにチェーンがしゅう動するので材料の耐摩耗性が強く

要求される。とくに小形ボイラでないとは使用はむずかしい。

### 2.4 スクレッパ式

図 2.4 はスクレppaによる灰処理装置の概略を示しているが、図に見るようにこの装置は各部の灰を水で洗い流して ash hopper に集め、この hopper からスクレppaを使って灰だけかき出し、コンベヤで適当な位置まで輸送する機構である。この装置ももちろんスクレppaがしゅう動するのでスクレppaならびに台板の材料の耐摩耗性が強く要求される。その機構は前記ドラグチェーン式と大同小異である。

以上一般に広く使用されている形式について述べたが前述のとおり灰処理装置はそのプラントの立地条件に左右されることが多いが、前記以外にもスクリーコンベヤ、バケットコンベヤなどをその条件に応じていろいろの形式のものを適宜組合せて使用している向きが多い。

フライアッシュとして灰の一部を回収しているプラントでは煙

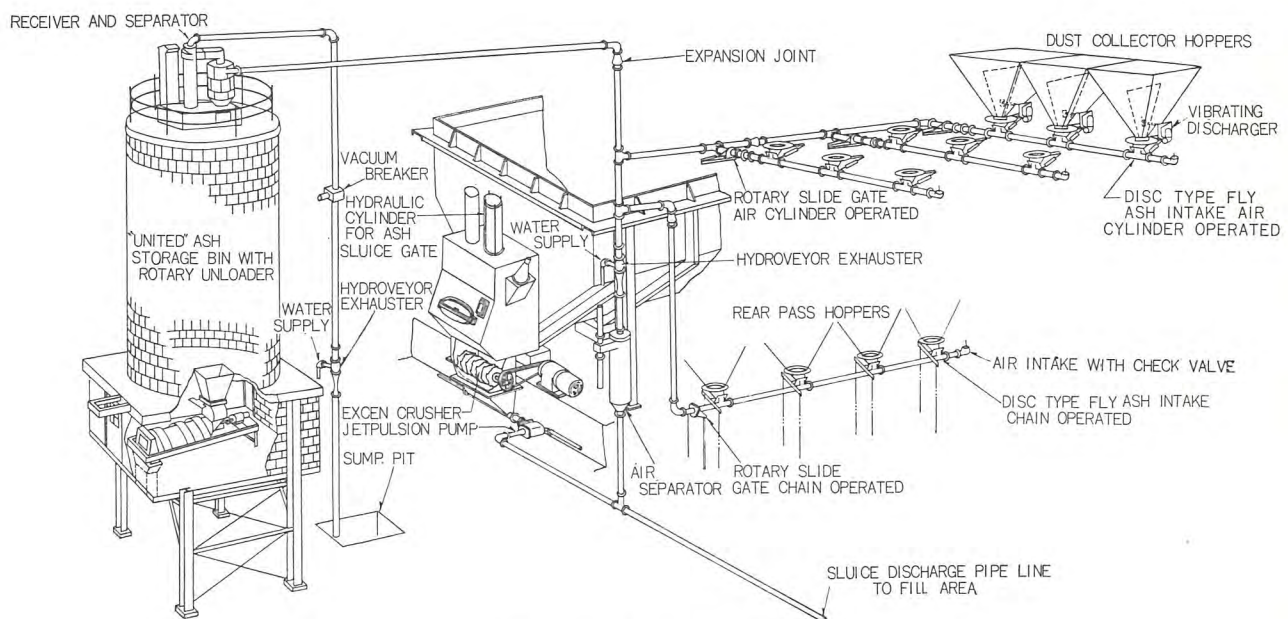


図 3.1 U. D. C. 形式の系統図



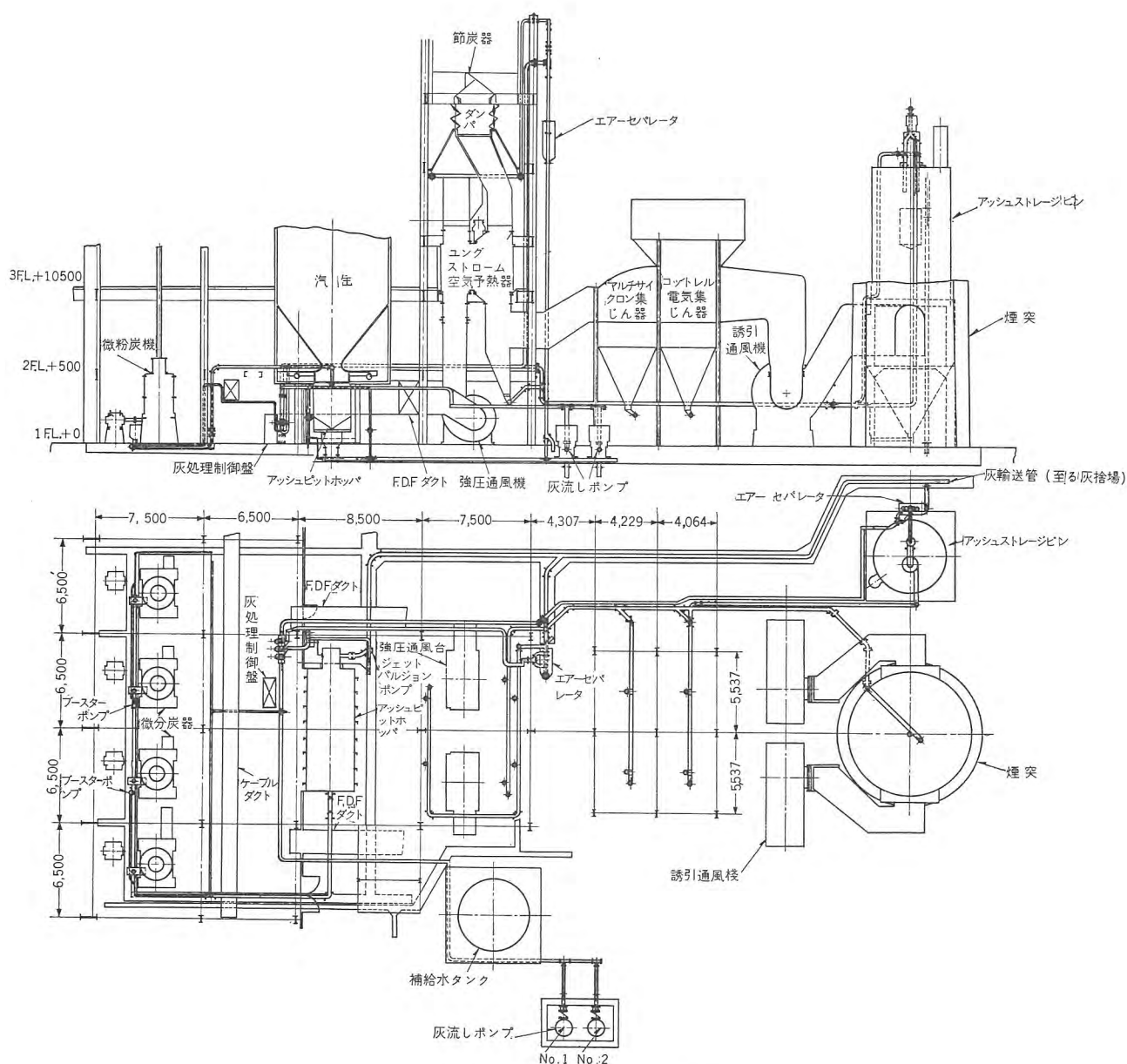


図 3.2 U. D. C. 形式の機構図

突下の hopper ならびにコットレル下の hopper からの灰は pneumatic system で輸送採取している。もちろんその他の部分の灰は前記各形式のような機構で排出される。

### 3. 最新鋭の形式

新鋭の高圧、高温、大容量のボイラに採用されている灰処理装置の代表的なものとしては、米国の United Conveyor Corporation の製品と Allen Sherman Hoff, Co. の製品をあげることができる。これらの製品はいずれも極度に自動化され、在来形式のものとは格段の相違があり、その思想性能ともまったく新鋭の装置である。

これらの装置はすでに国内の新鋭火力で採用されているが、

両装置の機構の概略と運転の概要を述べ在来の装置との比較検討を試みて見ることとする。

#### 3.1 U. D. C. 形式

図 3.1 および図 3.2 にこの形式の系統ならびに機構を示している。図に見るようにこの形式では、rear pass hopper 以後の dust 類と mill pyrite ならびに bottom ash との 2 系統に分けて処理するような機構になっている。すなわち mill の pyrite ならびに furnace 下の bottom ash pit からの灰は jet pulsion pump を使って圧送する方式を取っている。mill の pyrite は各 hopper から輸送管に落ちたところを booster section で昇圧して jet pulsion pump で bottom ash pit に圧送している。bottom ash pit では常時一定水位まで水がみなぎっていて



furnace からの ash ならびに clinker を逐次たくわえて行き  
所定時間に達した時に、手動操作で pit 出口の gate を開き、  
内にたまっている ash ならびに clinker を吐出する。

この場合 pit 内に圧力水を噴射させて pit 内に ash ならび  
に clinker が少しも滞留しないように洗い流す。gate を出た  
所に moter driver の grinder を設置し所定以上の粒度のものは  
crush して吐出させる。吐出された ash ならびに clinker  
は jet pulsion pump より所定の埋立地まで圧送される。埋立  
地が遠隔で途中を貨車またはトラックなどで輸送する必要のある  
ものは jet pulsion pump の吐出側の圧力水によって輸送され  
る ash を dewatering bin に貯蔵する。この bin では ash  
だけ沈降させ、水は over flow させて sump pit に落す。し  
かして沈降した ash はトラックまたは貨車積されて目的の灰

捨て場または埋立地に吐捨される。

つぎに rear pass hopper 以後の dust 類の処理については  
一般に、乾式輸送装置または pneumatic conveyor system と  
いわれる方式が採られ、図 3.1 ならびに図 3.3 の系統図に見る  
ように rear pass hopper のものを 1 列、つぎに mechanical  
dust collector のものを 1 列、さらに electro static precipitator  
hopper stack のものを 1 列として、各列ごとに rotary slide  
gate と air intake valve とを備えてその列ごとに順を追って処  
理されるようになっている。すなわち 3 列のものを 1 本の母管  
に集めて fly ash storage bin に接続している。

storage bin には primary receiver, secondary external  
separator によって ash だけ遠心力を利用して separate して  
bin に落し、air は圧力水を噴射する hydroveyor exhauster

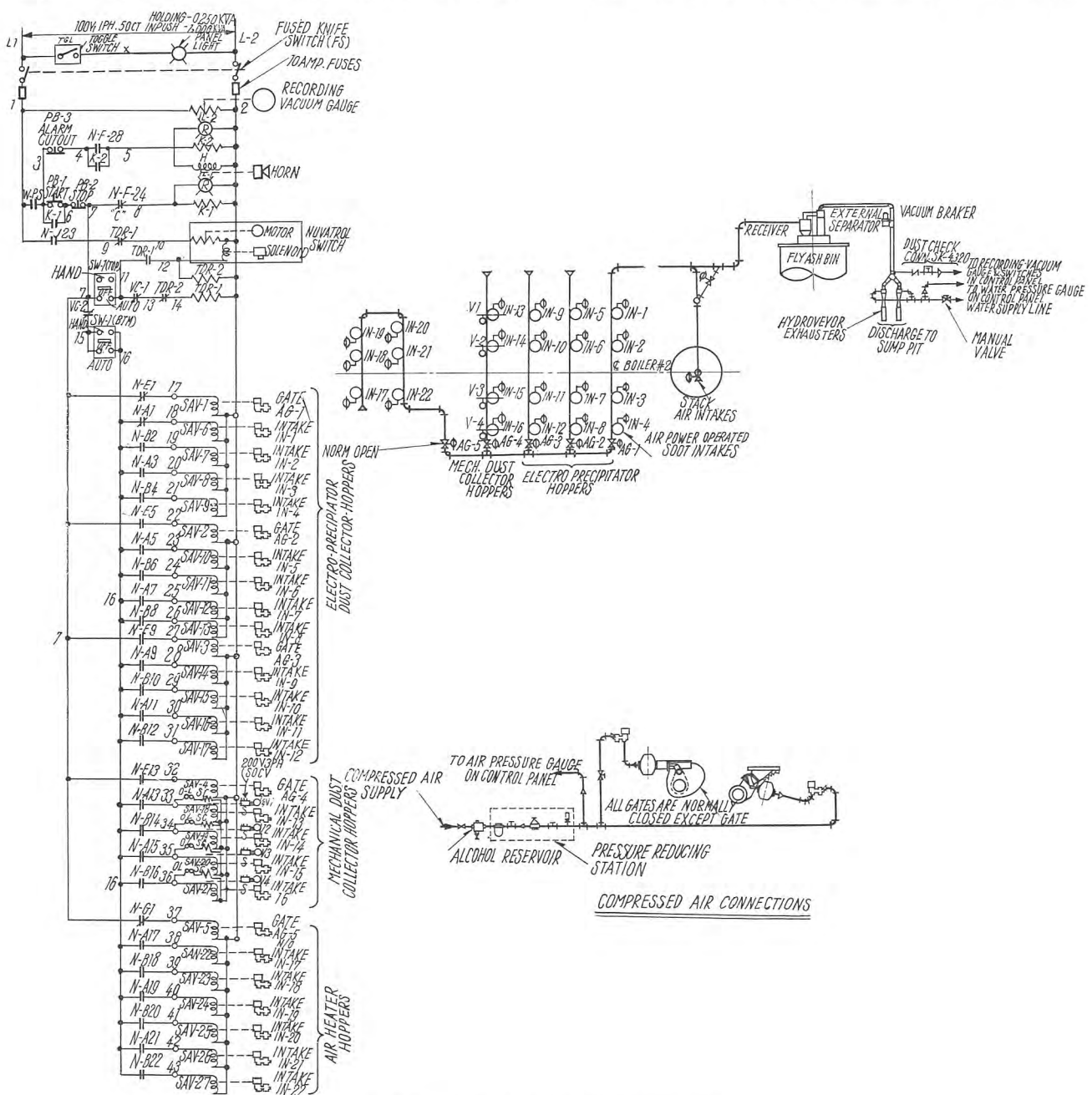


図 3.3 U.D.C. 形式の灰処理制御系統図



で吸引されて air separator に至り、ここで air だけ分離し大気へ放出され、水は前記の jet-pulsion による圧送水と合流する。

hydroveyor exhauster は ash pump によって圧力水を送るがこの exhauster で vacuum が造られ 1 列ごとの終端に air intake valve が設備されていて air を吸入するのでこの列内にある dust は air に乗せられて bin に運び込まれる。

bin に運び込まれた dust は discharge delay hopper fluidizing equipment unloader などを経て回収される。

ただしこれらの各 hopper から dust がそのまま回収されない場合にはもちろん bin にはいらずに直接輸送管の途中で分岐切換えられてそのまま hydroveyor exhauster へ搬入されて圧力水、空気と混合されて air separator に至り air だけは分離空放され、ash は水とともに吐出されて前記の jet pulsion pump 吐出管系を経て灰捨場へ流出する。jet pulsion pump booster section ならびに bottom ash pit への噴射水は dust exhaust pump より供給されるが、hydroveyor exhauster へも同 pump より分岐供給されるようになっている。

図 3.4 は操作計器盤であるが、この計器盤に装備されている計器類、switch によって遠隔操作ができる。とくに盤上に装備されている nuvatrol switch によって dust 関係の処理は電気式自動操作機構で逐次各 hopper が空になるまで繰り返し灰出しを行なって全 hopper にわたって 1 サイクルを自動で完了するようになっている。

図 3.3 に nuvatrol switch に付属した sequential relay とこの switch により制御される灰処理の系統を示している。nuvatrol switch は hydroveyor exhauster 前に装備されている vacuum switch によって制御され、この制御の実際の運転の経過の様子を図 3.5 の chart に示している。

この chart はある発電所で使用された写真で、1 個の hopper の所で 10~14" 程度の vacuum で小刻みに振れている部分はその hopper で ash の intake valve が開閉して真空の変化をきたし同時に灰出しを継続している状態を示している。つぎに急こう配で 5" 程度に vacuum が落ちているのは 1 箇所の hopper を空にして次の hopper に移る過程と移って次の

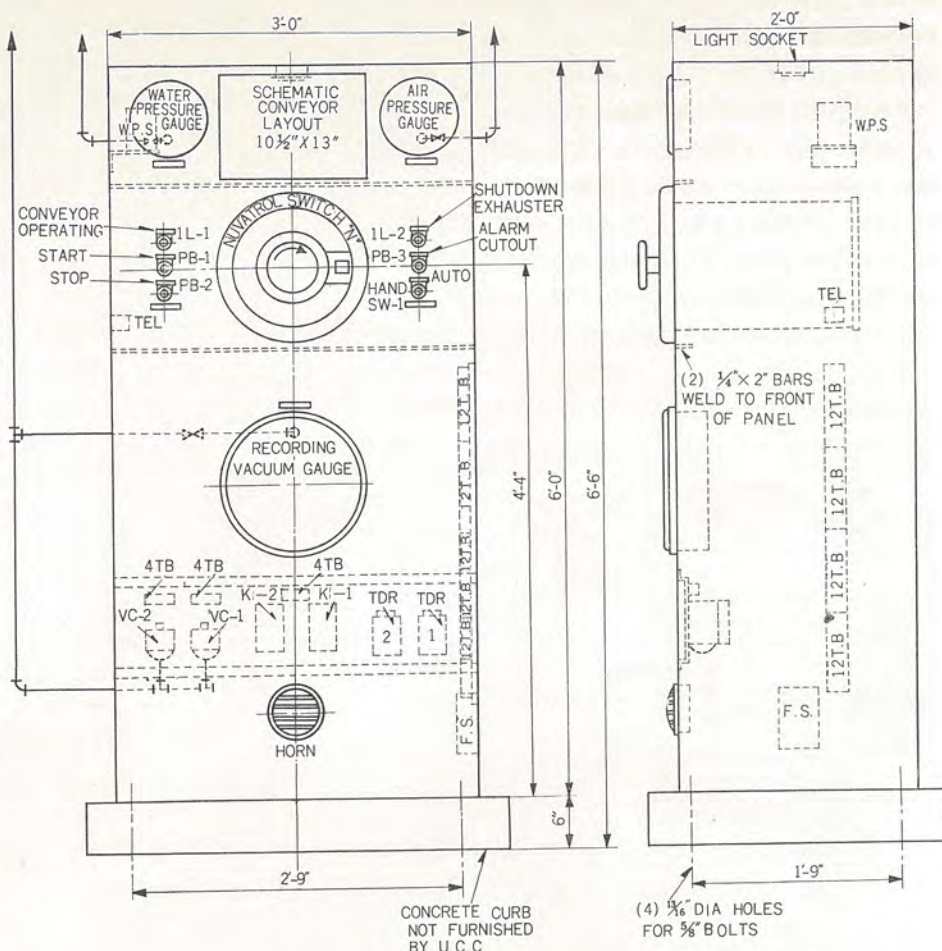


図 3.4 操作計器盤概略図

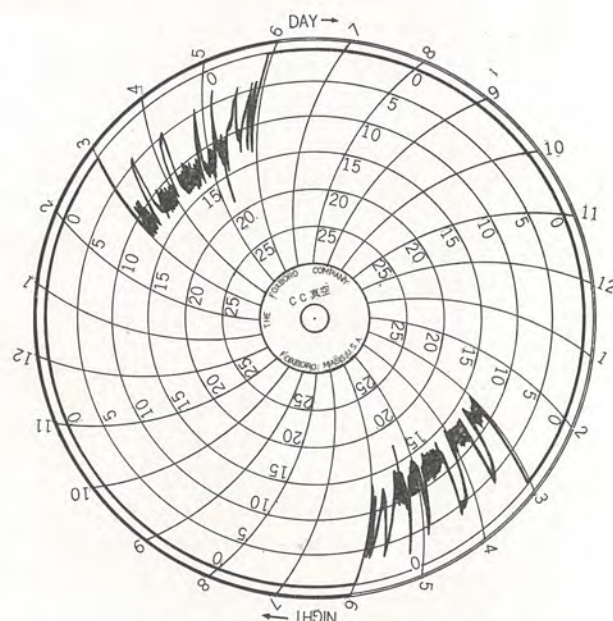


図 3.5 運転の実際経過を示す chart

hopper の intake valve が開く直前の状態を示している。このようにして各 hopper を空にし、最後に 1 サイクルを終って



次のサイクルまでの過程すなわち vacuum gauge が停止して一定時間後に次のサイクルが始まることを示している。このようにして1日3回または4回一定時間に1サイクルずつ自動で dust 関係の処理が施行されるようになっている。ただし前記のように mill pyrite ならびに bottom ash は手動操作で処理されるようになっている。

この装置の運転方法については概略前記に説明したとおりであるが、およそ power plant では運転関係者の執務は3直制1直8時間を普通としているから、これらの灰処理装置なども各直に1回処理すれば十分であるような容量に計画設計するのが妥当である。

運転の順序としてはまず dust exhaust pump を起動し各必要部分に通水して運転始動の準備をする。すなわち jetbooster section ならびに jet pulsion pump での圧力、ash pit hopper 内の水位および nozzle header の圧力などを確かめる。準備が完了したところで運転操作にはいる。ash pit hopper より灰を排出して後 mill の pyrite を ash hopper に導入する。

ここでの灰出し操作は clinker grinder を起動し、つぎに手動操作によって水圧開閉の hopper の下部 gate を開くと同時に nozzle header よりの噴射水 nozzle を開いて hopper 内の洗い流しを行なう。もちろんこの場合には jet pulsion pump は作動状態にあるので ash pit hopper より流出した clinker ash ならびに pyrite は clinker grinder を通過流出したところを jet pulsion pump で圧送され目的地の埋立地あるいはまた dewatering bin に輸送される。

つぎに rear pass hopper 以後の dust の処理を行なうがこの系統は前にも述べたように操作用計器盤で遠隔操作される。すなわち nuvatrol switch で sequenical relay を使って電気自動操作で行なわれる。

rear pass hopper, mechanical dust collector hopper, electrostatic precipitator hopper および stack よりの dust 処理が1系統として1サイクルで次の手順で完全に処理される。

まずこの系統の運転始めから順を追って記すと、まず hydro-v conveyor exhaustee への水の供給弁を開く。すなわちこの水の供給弁を開くことが圧力 switch をしめ系統を作動状態にする。nuvatrol selector switch を自動の位置すなわち SW の所に合わせて置く。cam drum を最初の灰の取出し hopper 1N-1 の点に合わせる。起動 button を押す。この状態で hopper 1N-1 の属する系統にある堰戸弁 AG-1 が開き他の系統の堰戸弁はしまっている。すなわち hopper 1N-1 の属する系統から exhauster が空気を吸い込んでいることになる。この時 air intake は  $\frac{3}{8}$  程度開いていて exhauster 前の真空は 100 mmHg になっているはずである。cam drum の micro switch は 1N-1 の ash intake を開けていて真空も 100 mm 程度であるから ash は hopper から conveyor の中へ流れ込む。ash が hopper から intake ならびに conveyor 内に流れ込んで conveyor の通路をふさぐと air intake からの air が exhauster に通らないで exhauster 前の真空は上がりがちとなる。真空が上昇して 330 mm に達すると vacuum switch VC-2 が full load regu-

lator として作用して 1N-1 の intake をしめる。intake がしまつて灰が conveyor に流入しないと conveyor 内の灰は air に乗せられて exhauster のほうへ引かれる。したがって air intake から air がはいり vacuum が下がる。vacuum が 300 mm まで下がってくるとまた VC-2 が作用して ash intake を開いて ash を conveyor 内に流入させる。結局 vacuum switch VC-2 は 1N-1 の intake が空になって conveyor 内が no-load condition の vacuum 100 mm になるまで switch in した状態である。vacuum switch VC-2 は 330 mmHg の真空以下では閉じ ash intake を開いている。

vacuum switch VC-2 は閉のまま conveyor 内の真空が 100 mmHg に低下すると vacuum switch VC-1 の contact が閉路して time-delay relay を励磁する 15 sec の time-delay の後 relay TDR-2 と solenoid が励磁され solenoid が作動して cam drum を 1 ノッチ回す。

cam drum が回って roller が 1 ノッチ回った所に 3~5 sec 固定された time delay の後 relay TDR-2 が開、relay TDR-1 も開、cam drum が 1 ノッチ回って micro switch が 1N-1 から 1N-2 に切換わる。したがって 1N-1 の switch は切れるから 1N-1 の intake はしまつてその代りに 1N-2 の intake が vacuum switch VC-1, contact の閉路によって開く。この 1N-1~1N-2 の繰り返し動作を通じて AG-1 の gate は開いたままである。結局この gate は 1N-1 の conveyor 系統が終るまで開いたままであり他の系統の gate はしまつたままである。

一系統すなわち electro static precipitator の系統の各 hopper が全部空にされると cam drum は回って次の系列である mechanical dust collector の系統へと進む。この系列でも同じような手順で ash の輸送を行なうがこの系列で他と異なることは hopper に vibrating discharger が設備されていることである。

この vibrating discharger は vacuum switch VC-2 が full load regulator として作動する時 contact が閉になって motor で駆動される。

つぎに rear pass hopper の系列に進んでこの系列の最後の hopper が完全に空にされると cam drum は回されるが、回り終った次の点は reset position であって reset switch が閉になる。

TDR-2 が time delay した後開となり solenoid の回路は閉となるが relay TDR-1 が閉となって motor の回路が閉となり motor が cam drum を起動の原点まで回し続ける。

rear pass hopper の系列の gate AG-5 は他の系列を運転中は閉っていてこの系列が運転にはいると同時に開となりそれがずっと続いて開いたままでいることになっている。結局 hydro-v conveyor system が運転を停止するまでこの系列が exhauster への保護の役目をするようになる。

cam drum が起動の原点にもどったら押しボタン PB-3 を押して標示灯 IL-2 を消す。押しボタン PB-3 は exhauster への水の供給弁を閉じる。

cam drum は motor で回転され原点にもどる途中で全工程



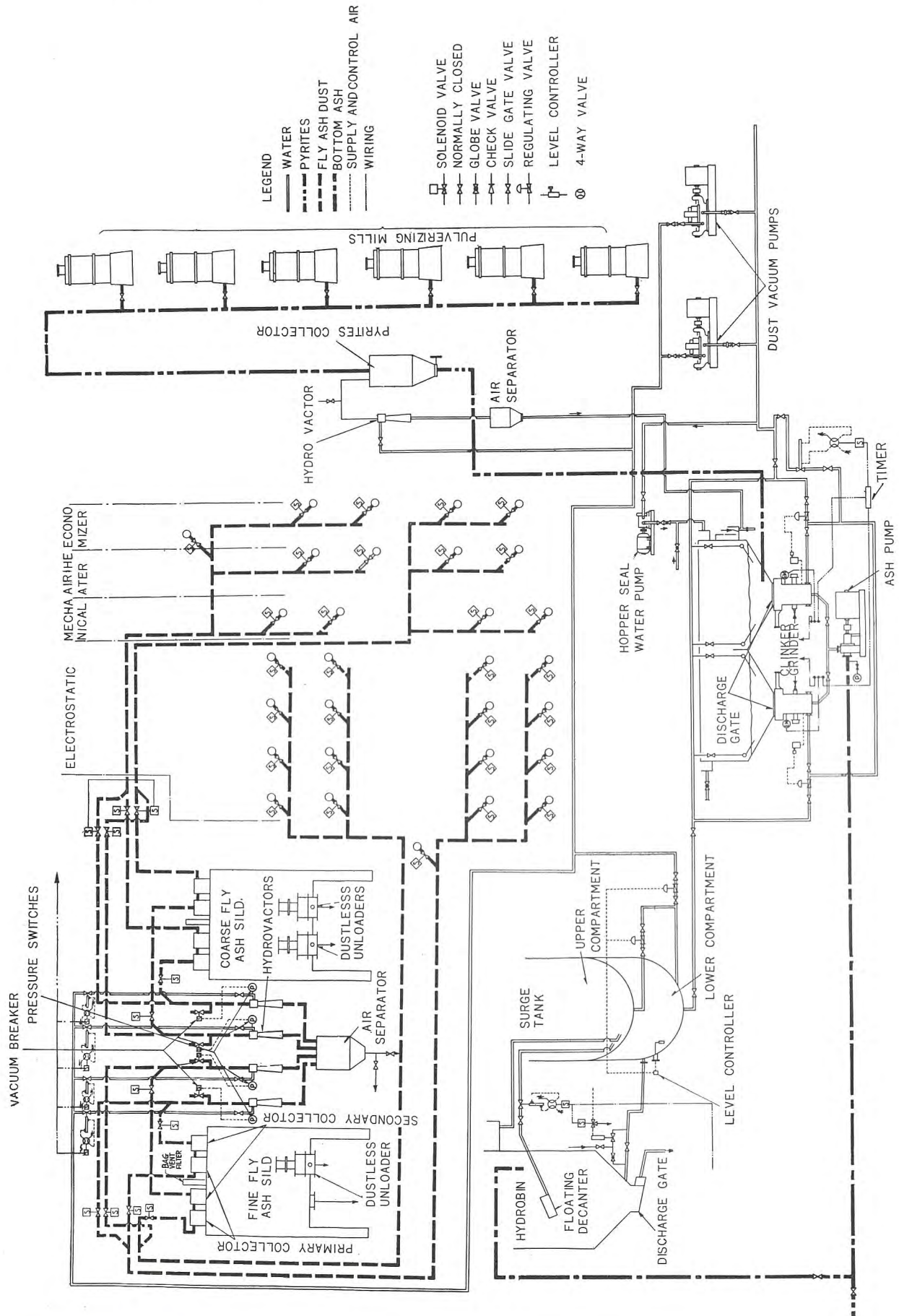


図 3.6 ASH 系統図



を完了したことを標示する lamp がつき alarm を鳴らす。上記の操作が終って初めて 1 サイクルの灰出しが完了したことになる。起動ボタン PB-1 で circle timer も start しあらかじめ set された 45 sec あるいは 90 sec で自動的に vacuum breaker を働かせる。vacuum breaker は hydroveyor exhauster と secondary separator との中の管の途中に設置されているので vacuum breaker が作動すると primary ならびに secondary separator の中に大気が流れ込んで separator 内の vacuum が破壊されるので ash bin の上部入口に設けられている swings gate が開き ash は bin の中に落される。

discharge delay hopper は hot ash が急に bin の中にはいると bin の中の圧力が上昇するのでこの現象を防止するために徐々に ash を bin に落下させるような機動にしたものである。

fluidizer は bin の底部に数箇所に設置し、圧縮空気を噴出して各部の灰を浮遊させて bin の出口側に蒐集するような機動にしたものである。fluidizer を使用することによって bin 底部に広範囲に堆積した灰を逐次 bin 出口から unloader へ吐出される。

unloader は bin から出てくる ash を飛散させないように適当に湿気を与えて取出す機動にしたもので、したがって unloader から吐出される ash はそのままでもトラック輸送で運搬可能な状態になされる。外気へ飛散させずに灰を円滑に搬出できるのはこの装置の特長である。

### 3.2 AS.H 形式

図 3.6 はこの装置の系統図を示すもので mill の pyrite を pneumatic conveyor system で bottom ash pit まで輸送して furnace からの clinker および ash といっしょにして ash pump で排出して hydro bin へ運んでここで水を切って ash ならびに pyrite だけ取出す系統と他面 rear pass hopper 以後の ash を pneumatic conveyor system で storage bin まで輸送して ash だけ取出す系統との 2 系統から成っている。

pneumatic conveyor system はいずれも dust vacuum pump より導いた圧力水を噴射する各 hydrovactor により真空が作られている。すなわち dust vacuum pump より圧力水により hydrovactor で真空を作って mill の pyrites を furnace 下の ash pit に輸送すると同時に他方 dust のほうは economizer air heater および mechanical collector hopper などからの dust は coarse fly ash silo へ、electrostatic precipitator hopper および stack 下の dust は fine fly ash silo へそれぞれ pneumatic conveyor によって輸送している。ash pit の ash は mill の pyrite といっしょに合流して ash pump によって hydro bin へ送られ、ここで dewatering され、上澄の水は decanter によって surge tank の upper com-

partment へ、over flow 水は別途の通路を通して lower compartment へ送られる。すなわち hydro bin で dewatering された ash は hydro bin 下部より gate を通して取出される。

ash と分離した水は上記の方法で surge tank に集められて ash pit へ帰される。すなわち ash pit hopper で使用される水は循環して使用されることになる。

なお mill pyrite は pneumatic で輸送されて pyrite collector に輸送されるが pyrite collector は割に高い所に設けられていて pyrite は自然流下で ash pit へ流出するように配置されている。また hydrovactor では圧力水が pyrite の輸送管を通じて air を吸入するので hydrovactor の吐出側に air separator を設けて air だけ分離空放できる機動にしている。

hydrovactor については coarse の fly ash ならびに fine fly ash line にあるものも pyrite の管系にあるものと同じ形式のものが使用されている。

この装置の運転方法は mill pyrite ならびに ash pit hopper の関係と dust の関係との 2 種類に分けられる。したがって運転時間および運転回数についても、この 2 種類のものは全然別個なものとして取扱ってさしつかえない。

まず mill の pyrite の部分について述べる。この関係は図 3.6 で見られるように手動運転の真空様式であって、この様式に付属しているものは、圧力水噴射形の exhauster, dust vacuum pump, 真空破壊器, cyclone 形の separator と hopper, 自己供給入口弁をもった pyrite hopper から成立っている。

pyrite hopper の出口にある slide gate valve は輸送管に真空ができてから手動で開けられる。cyclone separator は boiler の operating floor に設置されているので pyrite は separator の中で遠心運動によって輸送された空気と分離される。一応全 hopper の pyrite が空になると真空破壊弁を開いて真空を破壊し cyclone separator 下部の chain 駆動の slide gate valve を開くと separator 内の pyrite は重力で bottom ash hopper へ流出する。

もちろんこの装置に必要な真空は water ejector 形の exhauster で作られる。exhauster への水は dust vacuum pump より供給される。真空破壊器は cyclone separator と exhauster

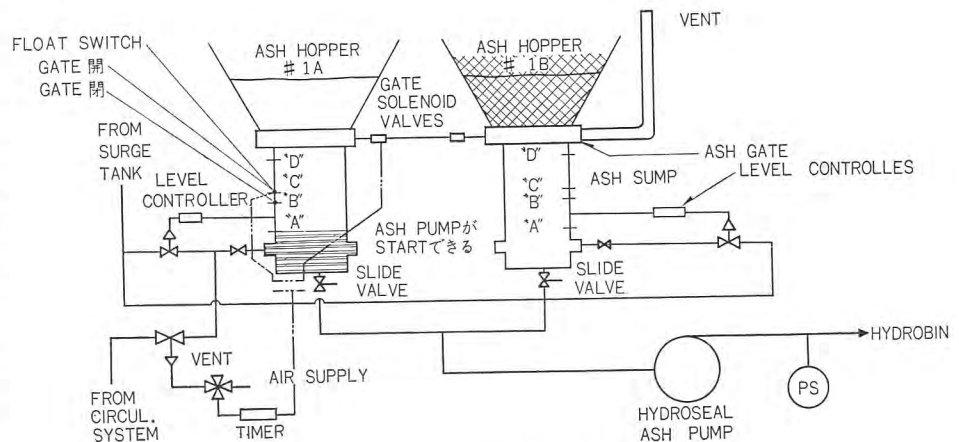


図 3.7 ash pump 動作説明図



との間の air line に設置される。

つぎに bottom ash hopper よりの灰処理であるが、まず ash hopper gate の操作について述べると、dust vacuum pump の吐出側水を通して surge tank, bottom ash pit ならびに ash pump に水をみなぎって準備を終った後 real water pump を start して bottom ash pit を seal し、また pump gland などの seal を完了していよいよ運転にはいる。平常に運転される場合にはまず clinker の grinder を起動し、引続いて ash pump の seal water line を開いて通水し後 ash pump の吸入側の slide valve を手動で開きしかる後に ash pump を起動する。

ash pump は seal water の圧力が規定圧でありまた灰だめ槽の水位が一定水位以上すなわち図 3.7 記載の A 点以上であれば起動する。 surge tank から水位調整器を通り灰だめ槽へ給水されて水位が C まで達すると gate の solenoid valve が作動して hydraulic cylinder によって gate が開いて灰処理が行なわれる。

もしなんらかの理由により水位が B まで下がるような非常の場合には solenoid valve が de-energise されて gate を閉じる。しかし復水器の冷却用循環水 line からの emergency 供給系統にある 4-way air solenoid valve が動作して開となり灰だめ槽へ給水する。以上の動作は水位調整器によって行なわれる。4-way valve は timer によって操作されるが timer の設定時間の間は開き続ける。もし水位が D に達しないうちに時間切れとなれば弁は閉じてしまう。

timer は水位が D に達しなければ reset しない。水位がふたたび上昇して C 点に達すると solenoid が動作してふたたび gate が開く。水位が A になれば ash pump は trip して alarm する。ash pump はまた seal water pressure が規定圧以下に低下した場合も trip する。

ash pump が trip したら自動的に gate はしめる。

ash pump の吐出圧力が規定圧より上昇すれば clinker の grinder は停止する。またこの line の圧力が下って正常状態に復帰すれば grinder は自動的に再起動する。

ash pump からの吐出水は hydro-bin に送られる。これの over flow 水は surge tank に流出し surge tank から灰だめ槽に流入する。

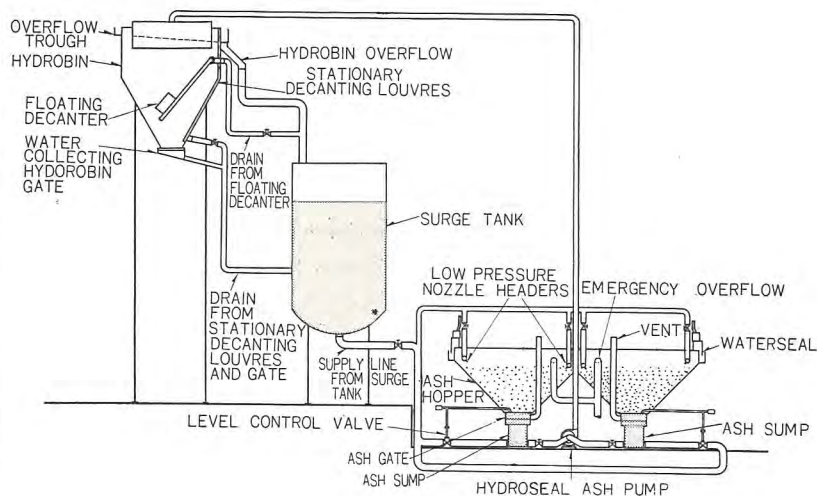


図 3.8

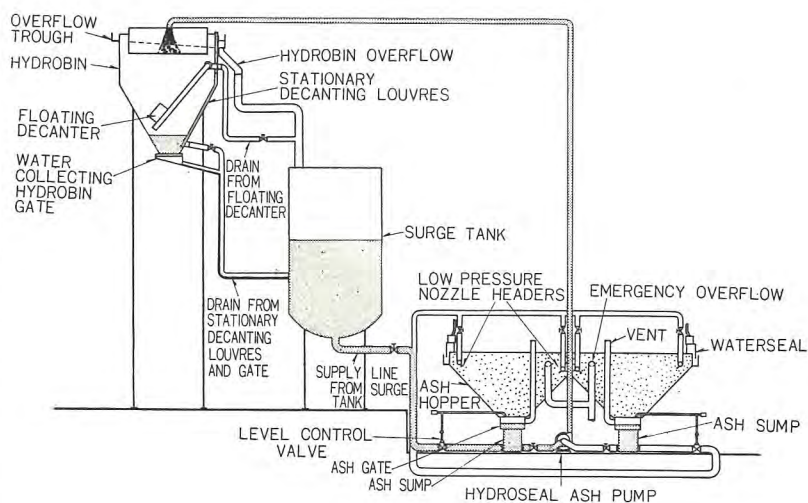


図 3.9

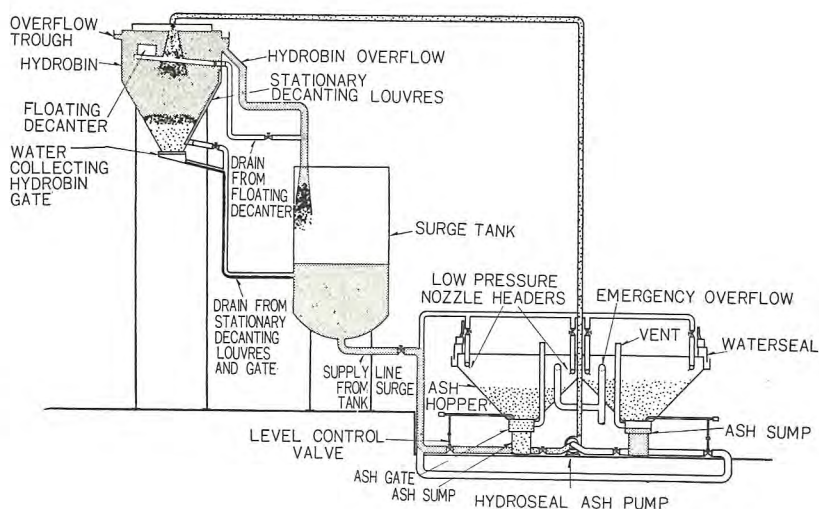


図 3.10



図 3.8 は灰処理が始められる直前を示すもので hydrobin は空であり surge tank ならびに灰だめ槽はこれより使用するための準備に dust vacuum pump の吐出水を注入されている。

図 3.9 は ash pump が起動して左手の灰だめ槽から hydrobin へ水を汲上げている。水は水位調整弁を通して灰だめ槽へ surge tank から流出している。この場合 ash gate はまだしまっていて ash は処理されていない。

図 3.10 は hydrobin が満水して溢水している状態を示し、溢水は surge tank に帰えられている。左手灰だめ槽の上にある ash gate は徐々に開けられて ash と水が hopper から灰だめ槽に供給される。灰はここでは hydrobin に吸上げられている。

図 3.11 は ash hopper が gate を十分開けることによってできるだけ早く空にされ、残余の灰がこう配の上端にある nozzle header によって灰だめ槽の中に洗い落されている状態を示す。

図 3.12 は両側の hopper が空になった状態であって ash pump は停止し、floating decanter を通して hydrobin の decanting の第 1 段を示している。すべての上澄水は surge tank に帰えされる。

図 3.13 は hydrobin の中の屋根窓をなおして上澄をとる最終段を示している。上澄の水は surge tank に帰えされている。hydrobin はこれから灰を落す準備中である。hydro bin の下部の ash の取出し gate は油圧操作されるようになっている。

つぎに dust 関係の運転方法ならびに順序について述べるとこの系統は dust vacuum pump の圧力水をそれぞれの系列の hydro vactor に送って vacuum を作り、いわゆる pneumatic conveyor system で処理するのであるが各系列の各 hopper の dust valve control switch, hydro vactor への圧力水の供給弁, stack valve の control switch, ash storage bin の upper dump gate, lower dump gate, vacuum relay valve, vacuum equalizing valve などの switch は遠隔作用計器盤に装置されている automatic control switch ならびに vacuum switch cycle timer, vacuum low sequential delay time などによって自動的に各 hopper から灰出しを行ない storage bin に貯蔵する。bin は coarse

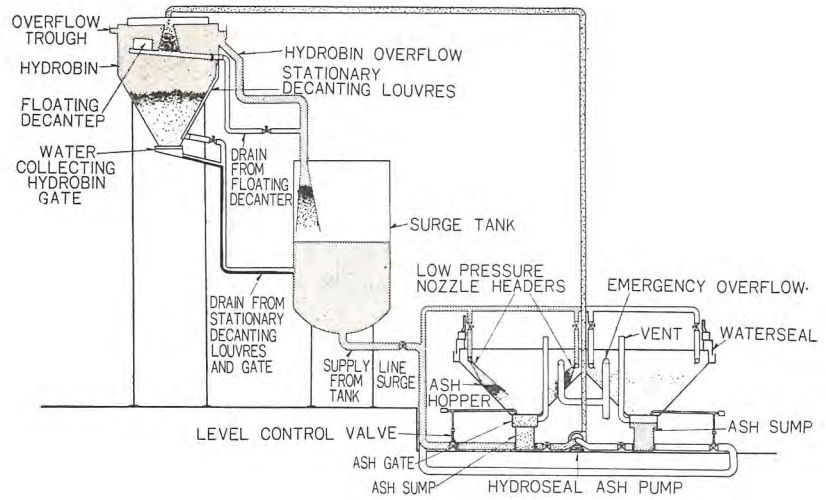


図 3.11

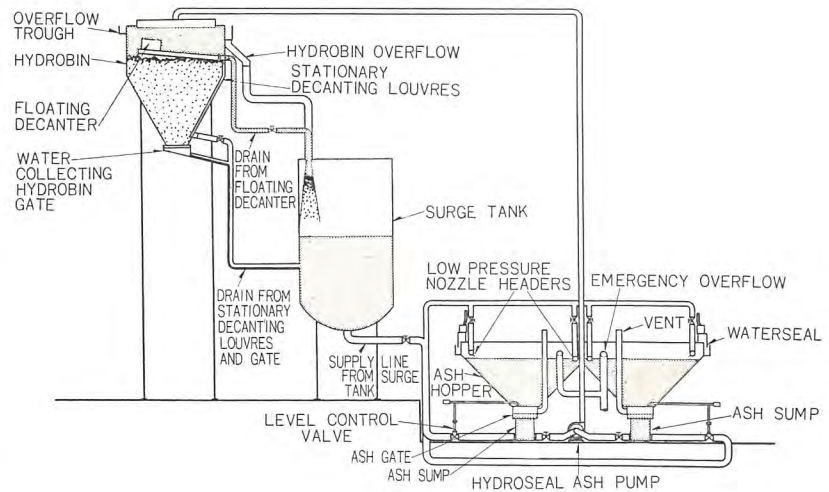


図 3.12

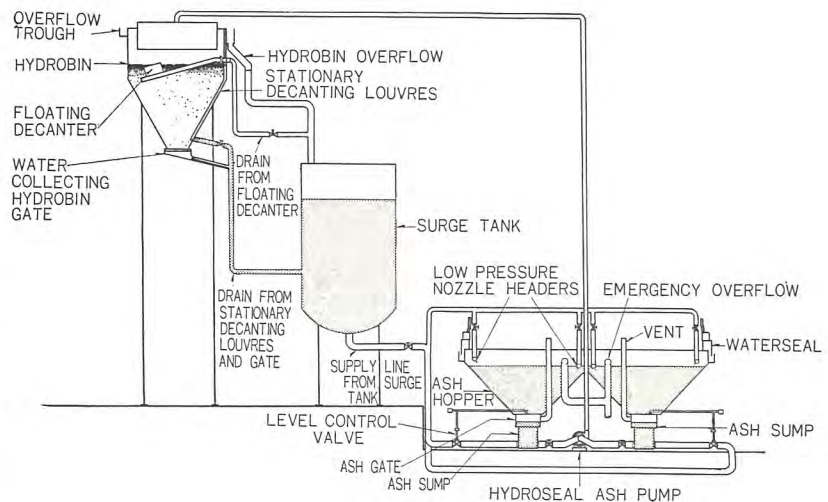


図 3.13



fly ash 用のものと fine fly ash 用と別々に設けられている。

coarse fly ash の系列には economizer, air heater, mechanical collector などの hopper より, fine fly ash の系列には electrostatic precipitator stack 下の hopper より導いているこの装置では各機器の hopper を左右の 2 系列に 2 分しているので各 bin に同じ種類のものが 2 系列配置されている。したがって各 bin に 2 組の hydro vactor が設置をされている。ただ stack の hopper は 1 個であるから fine fly ash 管系の右側の系列にだけ接続されている。

なお図 3.2 の系統図に示されているように coarse fly ash 管系の左側の系列で economizer と air heater 間の管に 1 個 intake valve が接続されているのは boiler room の cleaning 用の intake valve であってこの管系は灰処理を行っていない時適宜室内の掃除用にこの装置を流用するためのものである。

automatic control switch の回転方向と dust valve の処理順序はまず cam switch で左側の coarse fly ash 系列の hydro vactor への圧力水の供給弁が開となり、同時に economizer hopper の dust valve から順に air heater, mechanical collector hopper のいわゆる 6 個の dust valve が順に開かれて灰出しが行なわれる。

この 6 個の intake valve からの灰出しが完了するまで hydro vactor への圧力水の供給弁は継続して開いている。

この group の灰出しが完了すると cam switch は次の group に移る。しかし次の group はすなわち左側の fine fly ash 系列の hydro vactor への圧力水の供給弁と electro precipitator hopper の dust valve 7 個とを逐次開閉して灰出しを行なう。

この系列でも前の group と同じように dust valve 7 個の灰出しが完了するまで hydro vactor への圧力水の供給弁は開いたままである。しかしまたこの group が完了した後は stack hopper へと cam switch が移行する。

かくして全部の dust valve よりの灰出しが完了すると最後にはもとの位置に reset する。

automatic control switch の cam disc の回転を control するのは vacuum switch であって high vacuum switch と low vacuum switch とがあってこれをつかさどっている。

以上のような操作によって pneumatic conveyor system で bin に輸送された ash は coarse ならびに fine のいずれも dustless unloader によって採取され貨車積み、トラック輸送される。

## 4. む す び

灰処理装置に課せられた主要な問題の中の第 1 はボイラよりの灰出し部の air tight の成否であって、これが完全に実施されていないと完全な灰出しはできない。またこのためにボイラ効率の低下をもきたすことになる。

第 2 の問題は dust の漏洩である。これはボイラからの灰の取出しは完全であっても、取出し後 dust の処理が不具合のために起ることが多く、power plant ならびに周囲を不潔にしひいては機器各部の運転保守を不円滑にすることも起る。

問題の第 3 はこの装置の宿命ともいふべき材料の摩耗腐食のために装置の寿命が短いことである。このためにせっかく立派な power plant でも連続運転が不可能になることも起りうるわけである。

灰処理装置はその性質上以上のような課題をもっているが汽缶の燃焼後の排出物の処理をなすものであるがために、とかく boiler plant では第二義的に考えられがちである。Boiler 自体の計画設計についてはもっとも真剣に取組む人達が灰処理装置は案外等閑に付している向きが多い。

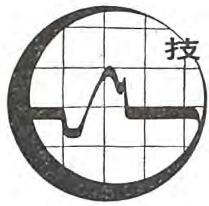
これら汽缶製作者や consulting engineer などの協力を得て関係者が多年努力した結果、これら汽缶製作者の不備の面を補佐し灰処理装置に課せられた諸問題を解決処理して完成されたのが前項に説明した高圧高温の新鋭プラントに採用されている pneumatic system を取入れた新しい灰処理装置である。

これら新鋭の灰処理装置によると今まで問題となっていた幾多の事項がほとんど解決されて dust の漏洩はほとんど見られない。また air tight がよくできているので従来の power plant に見られたような灰処理装置のためのボイラの効率低下はほとんど防止できている。

dust の漏洩がほとんど皆無なために power plant が非常に清潔で他の機器類に及ぼす dust による被害もない。

灰処理装置自体が耐食性、耐摩耗性の材料を使用しているののでその寿命も長く運転保守も容易である。fly ash として回収する場合も dustless unloader があって清潔に採用できる。また遠隔操作ならびに自動運転が可能のように製作されていて中央制御室で操作できるようになったのは在来の plant と異なり power plant 全体を中央でごく少人数での集中制御監視運転を容易にさせている。これらはまったく在来のものと比較して格段の進歩というべきであろう。(長崎造船所 東 洋行)





## 半導体整流器の工業界への応用

伊丹製作所 加藤 又彦\*・細野 勇\*\*・小林 凱\*\*

## 1. まえがき

一般に半導体ダイオードとよばれるものは普通ゲルマニウムとシリコンとを使用して製作された各種のダイオードを総称して呼ばれている。本文もこのよび方にならって説明することにする。現用の各種ダイオードは電圧定格、電流定格、その他特筆すべき電気的特性によってそれぞれ律せられており、その保守上の信頼性は普通ほとんど理想に近いものとみなされている。したがって電力用整流器としてまた制御要素として各種各様に使用されるようになることは明瞭である。ことに半導体ダイオードを構成する材料の精製方法、整流体自身の製法、特性および寿命などの技術的かつ経済的な種々な課題が解明されつつあるため、この分野の発展は実に洋々たるものがあるといえよう。

以下半導体ダイオードの応用例を中心に各種の技術的問題を分析し、これの設計条件の一端をもご紹介することにする。

## 2. 半導体ダイオードの現状

ここに述べる半導体ダイオードは小容量のものから大容量のものにわたって電力用直流電源として使用されるか、または制御系の一要素として使用されているものである。これらは万一故障を発生すればともに安定な運転をおびやかす、はなはだしいときには工場の生産に重大な影響を与えることがあるからその信頼性は重視されなくてはならない。それゆえ信頼性を極力大きくするように、つとめて設計するのであるが実際にはこのような考慮にもかかわらず半導体ダイオード自体ならびにその回路に絶対に故障がおこらないと保証することはむずかしい。この見地からすれば半導体ダイオードならびにその回路の設計の安全率とこれが故障時の保護方式の必要性が現在のところでは問題であり、解説の重点でもあろう。しかしこの保護方式が故障または誤動作すれば、保守上の問題が倍加したことになる。よって半導体ダイオード自体ならびにその使用回路の選択、設計、適用にはかなりの経験と技術とが必要である。ことに使用される負荷の性格、責務などに対して必要な注意をはらわなければならない。なぜならば用途の内容は千差万別であり、標準とよばれるようなものはなく、たえず進歩してやまないからである。したがってわれわれとしてはこれら対象となる用途に対してたえず

留意し、万全の処置と開発研究をすすめる以外に対策はないと考える。

現在われわれが承知しているシリコンならびにゲルマニウムダイオードの一例を示せば表 2.1, 2.2 のとおりである。

表 2.3 は W 社が製造販売している代表的シリコンダイオードの一覧表である。

そのうちの代表的なものの外形寸法、特性曲線を示せば次のとおりである。

## (1) “304” シリコンダイオード

図 2.1 はダイオードの外形寸法を、図 2.2 に瞬時正方向降下電流値特性を示す。図 2.3 に単相、三相ブリッジ結線方式による出力電流を示す。

## (2) “302” シリコンダイオード

図 2.4 はダイオードの外形寸法を、図 2.5 に瞬時正方向降下電流値特性を示す。図 2.6 は単相、三相ブリッジ結線方式による出力電流を示す。

## (3) “319” と “322” シリコンダイオード

図 2.7 はダイオードの外形寸法を、図 2.8 は瞬時正方向降下電流値特性を示す。図 2.9 は直流、単相、三相、六相の出力電流値を示す。

表 2.1 軍用のもので 200 mA から 140 A (150°C のとき) の電流定格で P.I.V. は 50 V から 600 V のものまでの代表例

Part No.	Specification No.	Approved as Standard by :	Current P.I.V. at 150°C (V)
JAN 1N 538	MIL-E-1/1084A	ASESA	250 mA 200
JAN 1N 540	MIL-E-1/1085A	ASESA	250 " 400
JAN 1N 547	MIL-E-1/1083A	ASESA	250 " 600
JAN 1N 253	MIL-E-1/1024A	ASESA	1 A 100
JAN 1N 254	MIL-E-1/ 989B	ASESA	400 mA 200
JAN 1N 255	MIL-E-1/ 990B	ASESA	400 " 400
JAN 1N 256	MIL-E-1/ 991B	ASESA	200 " 600
USAF 1N 1200	MIL-E-1/1108 (USAF)	USAF, USN (6A) USA (5A)	12 A 100
USAF 1N 1202	MIL-E-1/1103 (USAF)	USAF, USN (6A) USA (5A)	12 " 200
USAF 1N 1204	MIL-E-1/1108 (USAF)	USAF, USN (6A) USA (5A)	12 " 400
USAF 1N 1206	MIL-E-1/1108 (USAF)	USAF, USN (6A)	12 " 600
USAF 1N 1184	MIL-E-1/1135 (USAF)	USAF, USN (USA 20A)	35 " 100
*USAF 1N 1186	MIL-E-1/1135 (USAF)	USAF, USN (USA 20A)	35 " 200
*USAF 1N 1188	MIL-E-1/1135 (USAF)	USAF, USN (USA 20A)	35 " 400
USAF 1N 1190	MIL-E-1/1135 (USAF)	USAF, USN	35 " 600
USAF 1N 1282	MIL-E-1/1136 (USAF)	USAF, USN (USA 50A)	70 " 100
USAF 1N 1284	MIL-E-1/1136 (USAF)	USAF, USN (USA 50A)	70 " 200
USAF 1N 1286	MIL-E-1/1136 (USAF)	USAF, USN	70 " 400
USAF 1N 1288	MIL-E-1/1136 (USAF)	USAF, USN	70 " 600
1N 2054-	66-2435	USN	140 " 50
1N 2056-	66-2435	USN	140 " 150
1N 2059-	66-2435	USN	140 " 300
1N 2064-	66-2435	USN	140 " 600



# 技術解説

表 2.2 ゲルマニウムダイオードの代表例

DIODE TYPE	INVERSE			FORWARD		TEMP.	
	$E_{PEAK}$ (V)	$I_{PEAK}$ ( $\mu A/V$ )	$E_{CONT}$ (V)	$I_{SURGE}$ (mA)	$I_{MIN}$ (mA/+1V)	OPER ( $^{\circ}C$ )	MAX ( $^{\circ}C$ )
1N 38A	120	6/-3	100	500	4	25	75
1N 34A	75	30/-10	60	500	5	25	90
1N 117	75	100/-50	60	250	10		90
1N 118	75	100/-50	60	250	20		90
1N 118A	75	100/-50	60		40	25	
1N 140	85	300/-50	70	750	40	25	90
1N 143	120	100/-100	100	750	40	25	90
1N 279	35	200/-20	30	450	100	25	90
1N 281	75	500/-50	60	400	100	90	90
1N 283	25	20/-10	20	500	200	25	90

MAKER	MODEL	COOLING	AVERAGE (DCA/CELL)	P. I. V. (V)
W.	WA-4052-C	Water	250	66 (RMS)
G.E.	6RA×8	"	83.3	65 "
	6RA19	Forced air	100	200 (max)
I.R.C.	150A85	"	150	128
	500A66	"	500	100
	670L66	"	670	100
BTH	GP3C	"	50	100
AEG	E105/45-60G	Water	60	175
東芝	M-8203W	Water	150	60 (RMS)
三菱	MS-208	Water	200	400 (AC)
	MS-405	"	400	250

表 2.3 W 社で製作されているシリコンダイオード

Type	P.I.V. (max) (V)	Peak Reverse Current (mA max.)	Max. Current at 150 $^{\circ}C$ (A)	Thermal Drop Turn to Case ( $^{\circ}C/W$ )
339	50~500	50	240	0.2
329	50~500	50	150	0.2
328	50~500	50	140	0.2
327	50~500	40	110	0.3
326	50~500	40	110	0.3
322	50~500	40	110	0.3
319	50~500	40	110	0.3
304	50~600	10	12	2
303	50~600	10	18	1.5
302	50~600	20	35	1
320	50~1,000	1.5	1.6	5
305	50~1,000	1.5	1.6	5

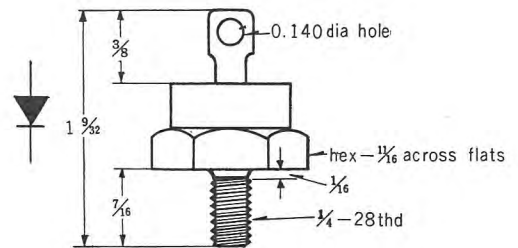


図 2.4 302 形シリコンダイオード

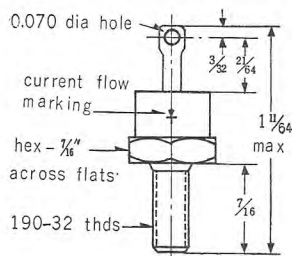


図 2.1 304 形シリコンダイオード

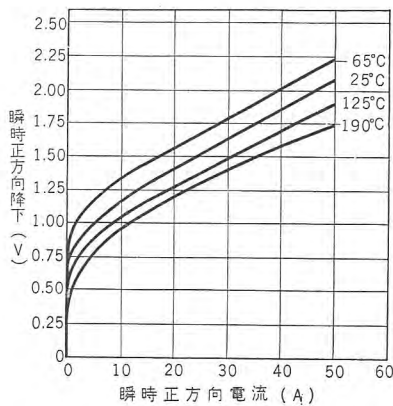


図 2.2 304 形シリコンダイオードの V-I 特性曲線

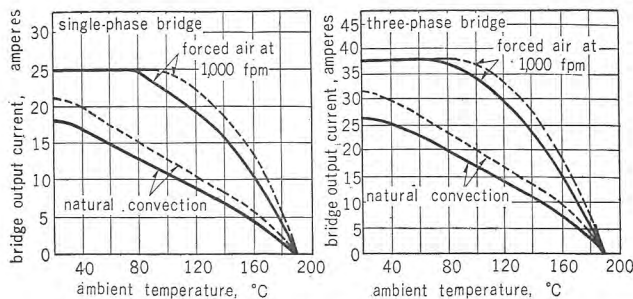


図 2.3 “304” シリコンダイオードによる単相、三相運転時の定格出力

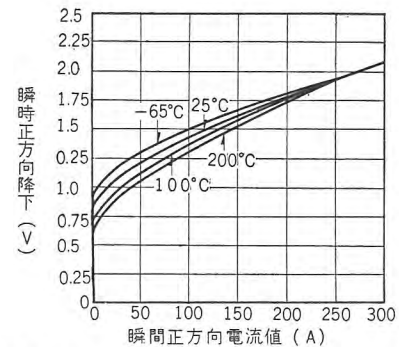


図 2.5 302 形シリコンダイオード V-I 特性曲線

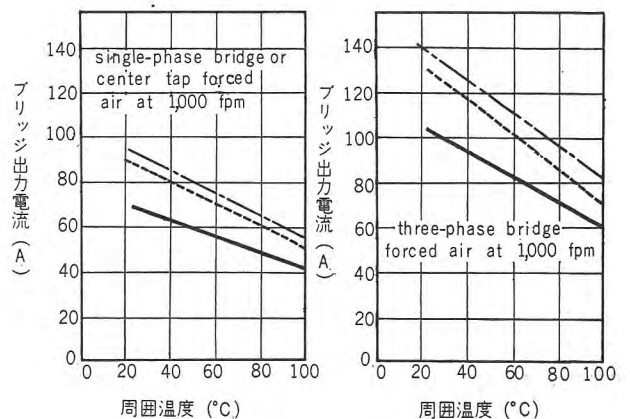


図 2.6 302 形シリコンダイオードによる単相、三相運転時の定移出力

## (4) “339” シリコンダイオード

図 2.10 はダイオードの外寸法を、図 2.11 は瞬時正方向降下を、図 2.12 は単相、三相回路の出力電流を示したものである。

現在の半導体ダイオードの広義の品質について一言すればシ



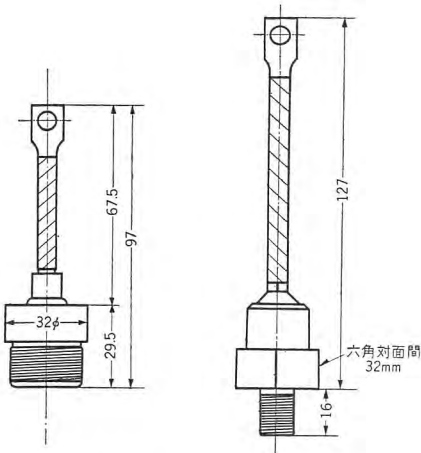


図 2.7 シリコンダイオード外形寸法図

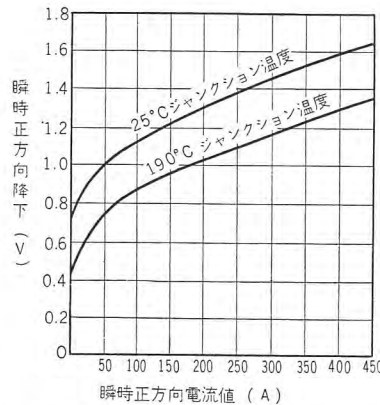


図 2.8 1 ダイオードのジャンクション温度 25°C, 190°C のときの最大瞬時正方向降下瞬時電流値の特性曲線

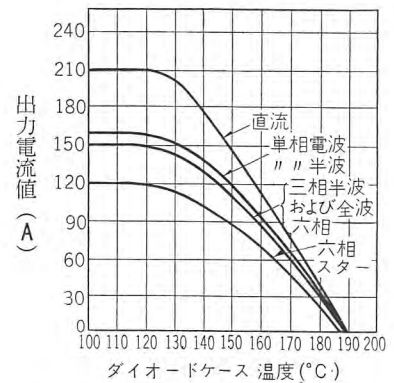


図 2.9 ダイオードのケース温度と許容出力平均電流値 / 1 セルの数値を示したものである

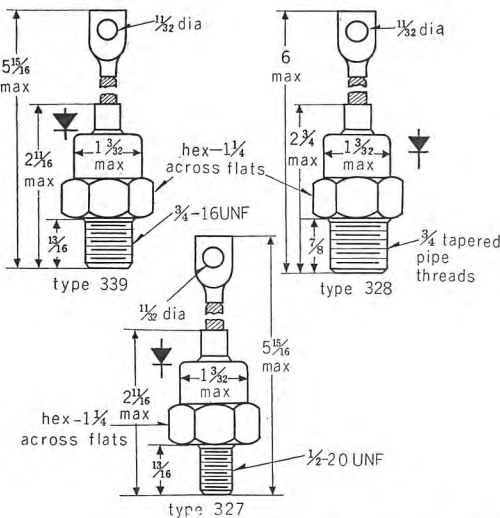


図 2.10 “339, 328, 327, シリコンダイオード外形寸法図

リコン、ゲルマニウムの半導体自体の電気的、物理的特性の相違からくるダイオード、固有の特性差がある。しかし応用を主眼としての仕様に対しては下記の 4 項目が品質を左右し、将来性を規定する条件であらう。

- 電気的特性
- 信頼性
- 保守の難易
- 経済性

これらの項目についてゲルマニウムとシリコンとの両者を応用的観点から比較検討することはむずかしい問題であり、国情、特殊用途、すなわち運用によっても左右される要素を介在させている。しかしあえて私見をのべれば大容量の電力用整流器は近き将来シリコン整流器に、小容量のものは経済的条件によってそれぞれ決定されることになると考えられる。そのおもな理由は通電電流にもとづく発熱とこれの冷却、保守の条件ならびに価額の問題からである。

つぎに電力用ダイオードの特性にもう一つ特筆すべきことがある。それはダイオード自体の外形寸法とそれにもなう逆耐

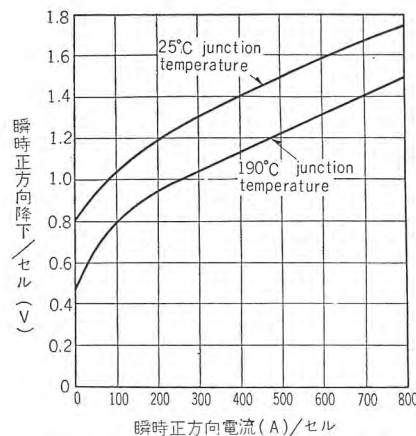


図 2.11 1 ダイオードのジャンクション温度 25°C, 190°C のときの V-I 特性曲線

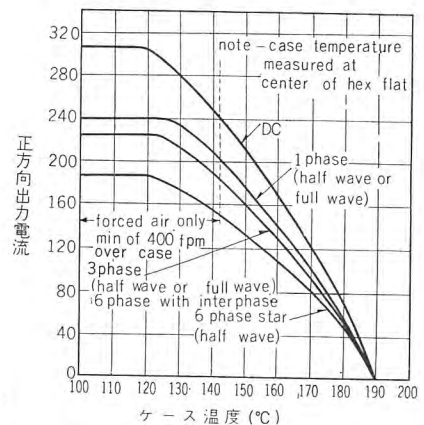


図 2.12 ダイオードのケース温度と正方向出力電流との関係曲線

電圧値 (Peak inverse voltage) と許容平均電流値とがあり、これを直列、並列に接続して所定の定格出力をうるのである。したがってダイオードの組合わせ、すなわち整流器全体を考えて、総合的性能を比較した場合、図 2.13 に示すような効率曲線で代表される特性差と価額差とが段階状の形状で示される。

広義のダイオード製造方法は現在進歩しつつけており、その製法は決定的になっていないが、一般に電力用大形ダイオードは合金法により、小形ダイオードは合金法と拡散法との 2 種類の方法が採用され、多量生産化されている。こうした製造方法を基準とした価額であり、電気的性能であるがさらに改良され、簡易化された製造方法が出現すればなおいっそう需要が増加することになり、応用分野は拡張されることになる。その暁にはさらに一段と大形か標準形かができて規格統一されるであろう。現状からみると表 2.3 のシリコンダイオードの例のように小電流容量のものは P.I.V. の値がたかく、大形のダイオードほど P.I.V. の値は低い、否たかいものが多数製作しにくい傾向にある。このことは製造過程の問題、半導体整流素子の直径の問題とも関連し一概に論ずることはむずかしい。しかし近き将来はさらにかわった形のものになるとも考えられる。



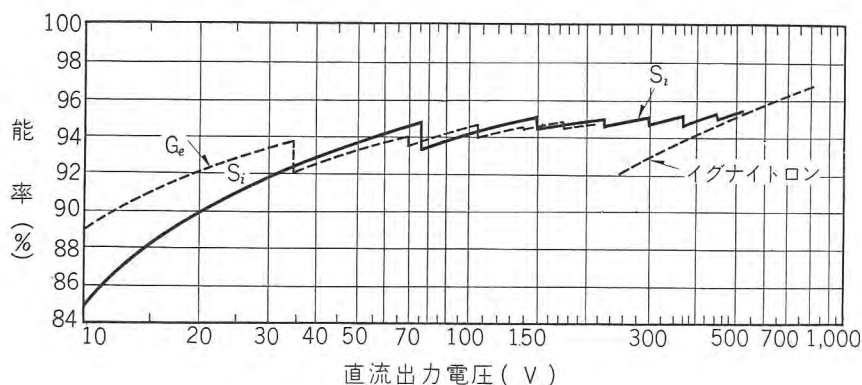


図 2.13 電圧制御ができるという条件付のゲルマ、シリコン、イグナイトロン整流器の総合効率—直流電圧特性曲線  
線に段のあるのは直列個数と主回路方式の差にもとづくものである

### 3. ダイオードの技術上の課題

ゲルマニウムダイオード、シリコンダイオードはともに原則的には別に異なっていることはないがそれぞれの物理的特性に応じて最適の応用と方式が選定されなくては完璧な設計とはいえないことは明らかである。

基本条件は冷却の温度上限と過負荷耐量と電圧耐量とである。この3要素中冷却条件はシリコンダイオード / ゲルマニウムダイオード =  $\frac{150^\circ\text{C}}{40^\circ\text{C}} = 3.7$  倍の比率にあってシリコンダイオードが保守上、または制御上優位にあることは明らかである。他の二つに対しては比較の規準となる内容が不確定であるため一概に決められないがシリコンダイオードのほうがすぐれているとみるべきであろう。また電流と電圧の定格は設計で容易におさえられる要素であり、ことにシリコンダイオードの逆耐電圧値は実用的数値として1セルあたり 400 V のものがあってゲルマニウムダイオードに比して約2倍の優位にある。これに反して冷却条件の上限が低いことはすなわち冷却に使用する空気温度との差があまりないことは冷却装置設備が大きくなることを意味しており、かつまた温度制御の困難性を表わしている。ひいては無人変電所の出現を困難なものにしているともいえる。かく観察すればシリコン整流器は風冷式が標準であり、ゲルマニウム整流器は液冷式が標準であると一般的にいえる。

もう一つの問題点は在来の水銀整流器の概念とちがうことになっていることである。すなわち故障電流ならびにサージ電圧による水銀整流器の短絡事故がたとえ発生しても、水銀整流器はその原因探究のための再現性試験を同一タンクについて実験することができたがこの種半導体ダイオードに対しては不可能であり、多数の破壊試験によって統計的資料の形で設計基準データが得られるにすぎない。換言すれば一つ、二つのダイオードの破壊の原因探究は使用時間が長ければ長いほど困難であるともいえる。このためダイオード個々の電気的特性の測定ならびに運転後定期的な特性変化の実測を機会あるごとに測定するように務めることが大切である。

さらにダイオードの構造自体の問題であるが P-N 接合体は外気中の湿気の付着することを防止するためにハーメティックシール構造とし、かつ陽極—陰極側の絶縁耐力をもたすように

している。このシール部の破損、漏洩が温度または外力によって惹起するときにはダイオードの電気的特性が劣化して行き、最後には使用不可能となる。この点は基本的には設計、工作の問題であるが後天的変化を早く発見する点では保守条件の一つである。この劣化の進行過程の発見は保護方式の課題であって実用上可能であるが装置の簡易化の線に添っていないうらみがある。

### 4. 半導体整流器の設計条件

半導体ダイオードはそれ自体で直流出力電圧を制御しえない。(目下 16 A 級のシリコンダイオードは制御可能である) また上記のように P. I. V. / 1 ダイオード、平均電流値 / 1 ダイオード、冷却温度上限、などが決まっておりそれを超過すれば永久破壊をおこす。よって下記の条件によって半導体整流器の外形寸法、価額、冷却装置がことになってくる。すなわち、

- (1) 直流出力電圧を制御する必要があるものまたは直流電圧を制御して出力電流を一定値に制御する必要があるもの。  
この場合制御する度合によって装置、設備にかなりの差が

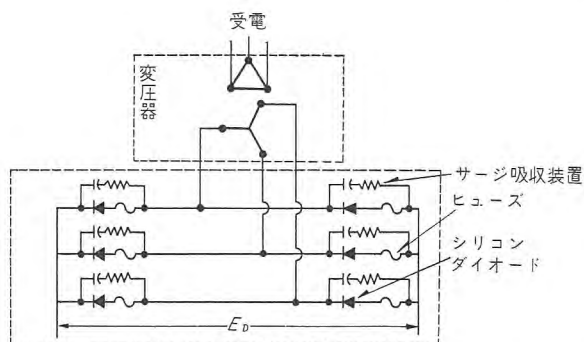


図 4.1 三相ブリッジ結線のシリコン整流器運転時の peak inverse voltage (P. I. V.)  

$$= 1.05 K E_d (1 + \epsilon)$$
 しかし  $K$  = 安全係数  
 $E_d$  = 直流電圧 (V)  
 $\epsilon$  = 電圧変動率 (%)  
 P. I. V. = 400 V では 170 V が実用上の一応の限度である。

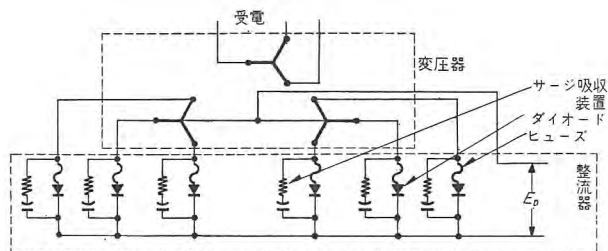


図 4.2 六相二重星結線方式のシリコン整流器運転時の peak inverse voltage (P. I. V.)  

$$= 2.09 K E_d (1 + \epsilon)$$
 しかし  $K$  = 安全係数  
 $E_d$  = 直流電圧 (V)  
 $\epsilon$  = 電圧変動率 (%)  
 P. I. V. = 400 V では 90 V が一応の限度である。



生ずる。

- (2) パルス電流負荷が反覆され、そのパルス負荷せん頭値と経続時間がある程度大きくかつ長いとき。
- (3) 1ダイオード P.I.V. が  $P.K. E_d (1+\epsilon)$  の値をこえるとき。しかし  $P$  = 整流回路常数 1.05 or 2.09

$K$  = 安全係数

$E_d$  = 直流出力電圧

$\epsilon$  = 電圧変動率

図 4.1 および 図 4.2 参照のこと。

- (4) 既設の他種変換装置と並列運転するとき、他種変換装置の電氣的性格と定格出力によって半導体整流器の過負荷耐量、保護方式、直流側および交流側の高速度シャ断器の設備内容がことなってくる。
- (5) 標準の1ダイオードの電圧、電流定格により所定の整流回路に応じた最高直流電圧と電流とが決定される。この数値をこえたときはダイオードの直、並列個数をふやす必要がある。故障電流値と回路に発生するであろうサージ電圧によって整流器の大きさが制限される。
- (6) 納入先の立地条件によって標準式の冷却方式が採用できず、特殊なものとした場合。
- (7) 整流回路をかえたとき。

現在主として使用されている主回路を図 4.3 に示す。

- (8) 半導体整流器、変圧器などのすえ付位置が制限を受けるとき。

以上の諸条件によって半導体整流器の設計内容が若干異なってくることは明らかである。しかしゲルマニウム、またはシリコンダイオードなどそれぞれ電氣的特性に特長があり標準の設計内容がある。たとえば 図 2.10 に示したように同一電圧、電流定格のものでも取付寸法がことなり、P.I.V. の数値も表 4.1 に示すとおり A より K までに区分される。(W 社発表の表による) また冷却片の大きさ、寸法によって過負荷耐量も異なってくる。このことを示した一例が図 4.4 および 図 4.5 である。

すなわち図 4.4 は  $5" \times 5" \times \frac{1}{8}"$  と  $7" \times 7" \times \frac{1}{4}"$  の銅板の

冷却片をとりつけて強制風冷式と自然冷却式との両者の定格出力の差異を示したものである。図 4.5 は 図 4.4 と同一構造条件下での過負荷耐量を示したものである。

表 4.1 定 格

Type 339		Type 328		Type 327		rated peak inverse volts, piv
JETEC number	Westing- house number	JETEC number	Westing- house number	JETEC number	Westing- house number	
1N 1670	339-A	1N 1376	328-A	1N 1330	327-A	50
1N 1671	339-B	1N 1377	328-B	1N 1331	327-B	100
1N 1672	339-C	1N 1378	328-C	1N 1332	327-C	150
1N 1673	339-D	1N 1379	328-D	1N 1333	327-D	200
.....	339-E	.....	328-E	.....	327-E	250
1N 1674	339-F	1N 1380	328-F	1N 1334	327-F	300
.....	339-G	.....	328-G	.....	327-G	350
1N 1675	339-H	1N 1381	328-H	1N 1335	327-H	400
1N 1676	339-K	1N 1382	328-K	1N 1336	327-K	500

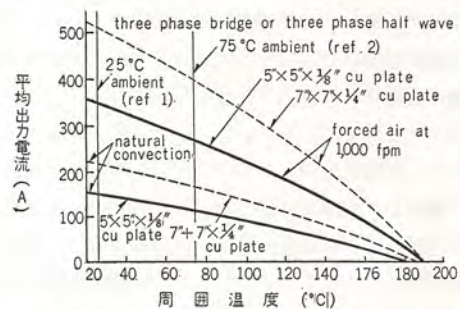


図 4.4 強制風冷式と自然冷却式との定格出力の差異

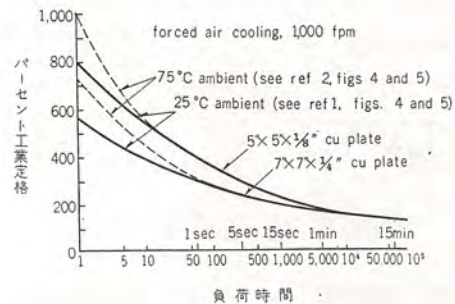


図 4.5 過負荷耐量

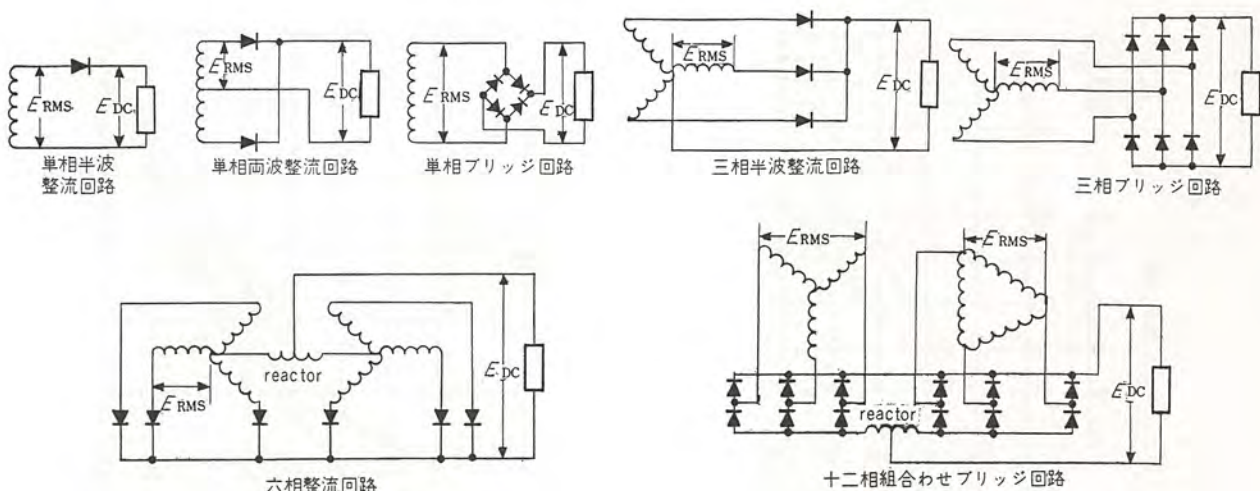


図 4.3 代表的主回路方式



これをよするにダイオードの電気的特性がきまればそれを組合わせて作った半導体整流器の定格出力はおのづからきまってしまう、外形寸法も冷却方式もまたきまることになる。

以上のように標準化された半導体整流器は自然の理法として経済的になりつつ方向にだけ進展して行くし、また保守は簡便にならざるを得ないともいえる。

## 5. 電動機制御への応用

大電力用の半導体整流器が出現するにつれて、これを電動機の制御に利用する方法が種々考案された。整流器としての特性上直流電動機の制御に広く用いられることはもちろんであるが、その他に誘導電動機の制御用としてもいくつかの回路が実用化され、独特の性能を発揮して良好な制御特性を示している。

### 5.1 Rectiflow 駆動方式

とくに W 社において誘導電動機の制御にクレーマ方式の変形として誘導電動機の回転子巻線出力を整流して誘導電動機と共通の軸に連結された直流電動機に電力を供給する Rectiflow drive という方式が実用化された。その結線は図 5.1 に示すとおりであり、誘導電動機の回転子巻線出力電圧を半導体整流器によって整流し、直流電動機の逆起電力に打勝って誘導電動機の回転子巻線および直流電動機回路に電流を流し、両者が負荷トルクを分担して回転するものであり、直流電動機の励磁を変えてその逆起電力を調整することによって簡単に速度を制御す

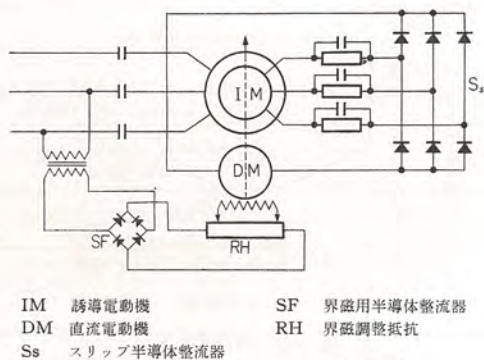


図 5.1 Rectiflow Drive 結線図

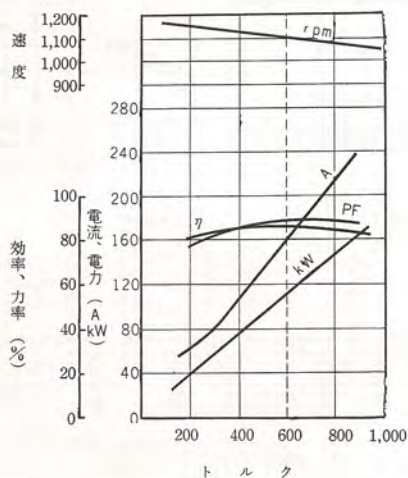


図 5.2 Rectiflow 駆動方式の諸特性

ることができるものである。その特性は図 5.2 に示すとおりであり、大巾な速度範囲で効率のよい連続制御ができる長所を有している。半導体整流器としては小形のものにはセレン整流器、大形のものにはシリコン整流器が用いられ、その定格電圧は速度制御範囲における最小速度の時の回転子巻線電圧によって決定され、定格電流は起動時の 10 秒間ほどの突入電流を考慮してきめられる。この方式は抄紙機、輪転機、高周波発電機駆動機、グラインダ、その他多くの用途に用いられている。またこの方式の変形として誘導電動機の一次回路に誘導電圧調整器を挿入してこれによって速度を制御する交流レオナード方式といわれる回路も発表されている。

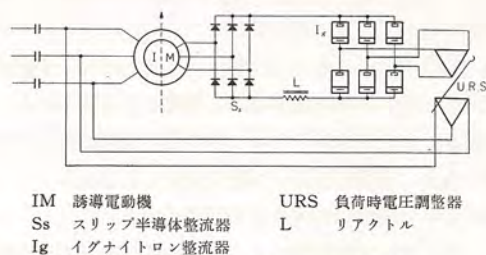


図 5.3 静止セルビウス整流器結線図

### 5.2 静止セルビウス方式

この方式は誘導電動機のセルビウス制御方式における交流整流子機—誘導機、M-G セット—誘導機などによる回転形の周波数変換器を半導体整流器または水銀整流器と水銀逆変換装置による周波数変換装置に置き換えたものである。これはその結線を図 5.3 に示すとおりに巻線形三相誘導電動機の回転子巻線出力電圧を半導体整流器または水銀整流器によって整流し、これを水銀逆変換装置によって誘導電動機の一次周波数と同一の周波数とし、電源に帰還して効率よく誘導電動機を制御しようとするものであり、速度は水銀整流器の位相角または負荷時電圧調整器のタップを変えることによって任意の速度をうることができる。この水銀逆変換装置の位相角に対する速度の特性は図 5.4 に示すおりのようになる。用途としてはこれも輪転機の駆動などに用いられている。

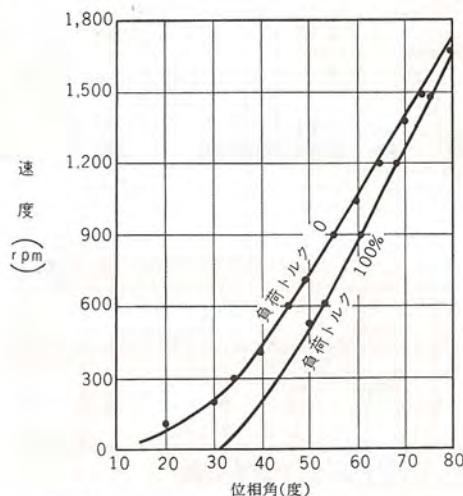


図 5.4 静止セルビウス方式の速度制御特性



### 5.3 同期電動機用励磁電源

同期電動機の励磁用電源としても半導体整流器が用いられるようになってきている。その結線は図 5.5 に示すとおり同期電動機の電源より半導体整流器によって整流して励磁用直流電源とするわけであるが、この場合半導体整流器回路に直列に挿入された可飽和リアクトルまたは誘導電圧調整器によって励磁電流を変え同期電動機の力率を制御することができる。

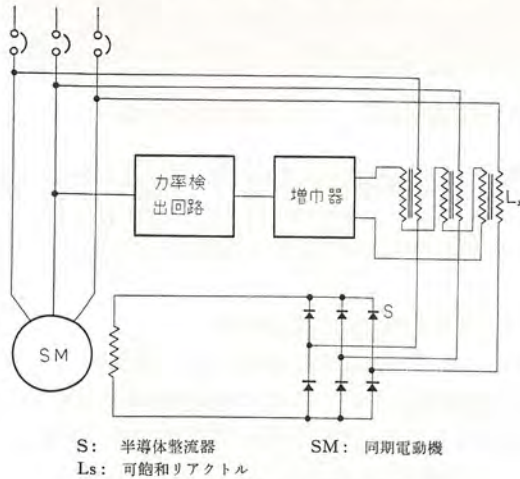


図 5.5 同期電動機用励磁電源

### 5.4 その他の交流電動機制御

その他交流電動機の制御に半導体を用いる方法としては、誘導電動機の一次回路に半導体整流器を可飽和リアクトルとともに挿入して、一次側の電圧を制御することにより誘導電動機は速度を制御する方式や、電磁クラッチの直流励磁回路に半導体整流器と可飽和リアクトルを組合わせて用い、直流励磁を変えることによってクラッチ面におけるすべりを制御して同期電動機に連結された負荷の速度を制御する方法などがある。

また図 5.6(a)(b)(c)(d) の四つの図に示したように制御電極付シリコンダイオードによって直接入力電圧を制御する方式、または wound rotor の二次側に制御電極付シリコンダイオードを挿入して制御する方式が考案されており、制御電極付ダイオードの大電流容量のものの出現がのぞまれている。現在のところ P.I.V. 200 V; 1 ダイオードの電流定格が 16 A, 50 A 級のものが市販されている状況であり、価額はかなり高い状況にあるが近き将来は低廉化すると考えられている。

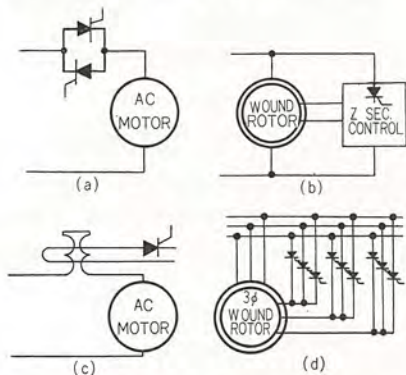


図 5.6 制御電極付半導体整流器による交流電動機制御回路

### 5.5 直流電動機駆動用電源

この方式の基本回路としては図 5.7(a)(b) に示す 2 方式があげられる。図 5.7(b) は制御用 MAG, AMP を使って電機子電圧を可変とする方式でその詳細図を示せば図 5.8 である。これは 30kW のものに適用された回路方式である。現在の段階では M-G セットに比して 22kW から 90kW のものはシリコン整流器による駆動方式が経済的であるといわれている。図 5.9 は制御電極付シリコンダイオードを使用してブレーキをかける方式を、また図 5.10 は直流モータの正転、逆転を実施させる方式の単線結線図である。

さらに直流電動機の駆動用電源としては 300V 級の半導体整流器を使用したレオナード電源が実用化されている。図 5.11 は GE 社の 50kW 330V の直流電動機駆動用シリコン整流器電源の結線図であり、図 5.12 はその正面および裏面の内部の写真である。この装置は電動機用電源として一般に要求されている 125% 負荷 2 時間、200% 負荷 1 時間の過負荷耐量を有し、

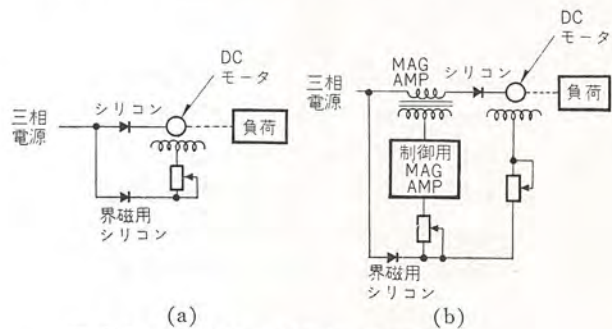


図 5.7 図 (a) は電機子電圧一定方式  
図 (b) は電機子電圧をかえる方式

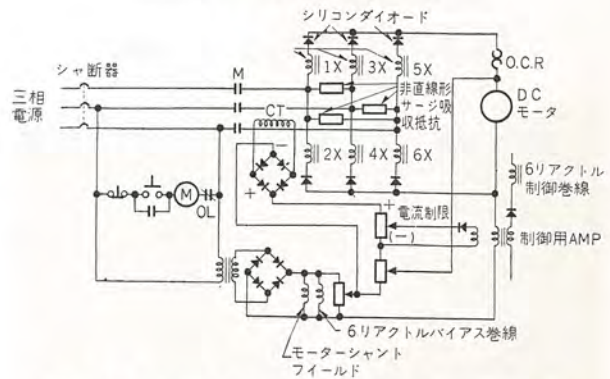


図 5.8 制御用プレアンプと電力用アンプ付電機子電圧制御方式の結線図

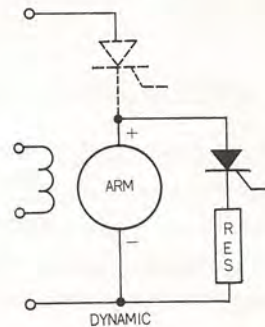


図 5.9 ブレーキかけるコントロールシリコン整流器のついか方



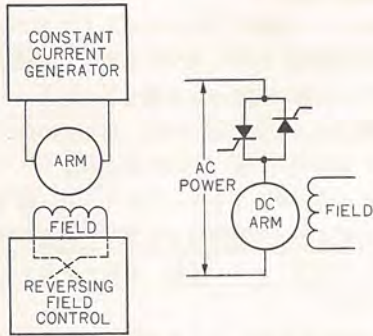


図 5.10 可逆式 DC モータ駆動方式

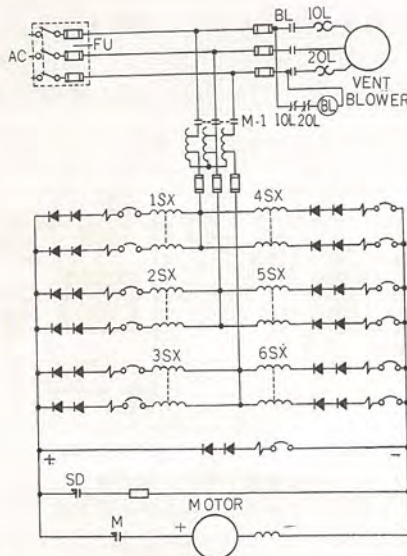


図 5.11 直流電動機駆動用シリコン整流器

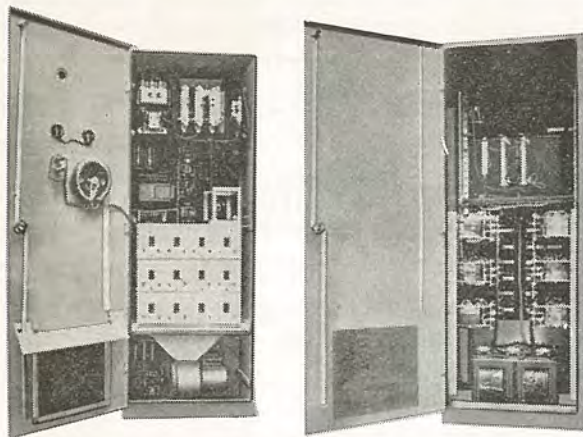


図 5.12 直流電動機駆動用シリコン整流器

シリコン整流器と直列に接続された電流リセット形可飽和リアクトルによって起動、停止および速度制御を行なういわゆるレオナード電源を形作っている。すなわち電動機をその端子電圧またはパイロット発電機で検出して、基準との差を磁気増巾器で増巾して可飽和リアクトルの直流励磁を変化させることにより電機子端子電圧を変えて直流電動機を制御する。しかるに半導体整流器は正方向電流を阻止する機能がないため無負

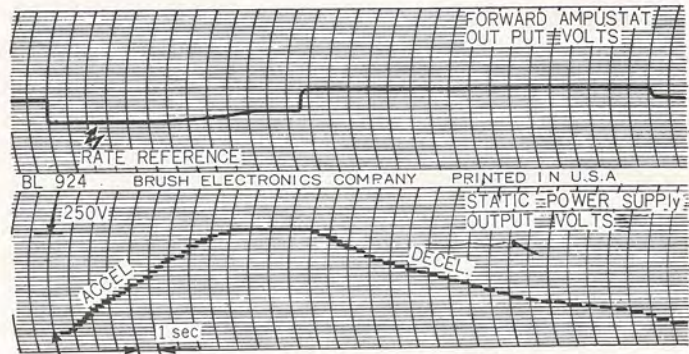


図 5.13 直流機駆動用シリコン整流器電源速度特性

荷で停止する時または減速するときには電機子に並列に抵抗を挿入して、ダイナミックブレーキをかけなければならない。図 5.13 はこの方式による電動機の起動および停止時のオシロである。

### 5.6 速応性直流電動機駆動用電源

静止レオナード制御が他の制御に比べて非常にすぐれている点はその速応性にある。しかるに半導体整流器と電流リセット形可飽和リアクトルを組合わせた前記の回路では可飽和リアクトルによる時間遅れのために十分満足すべき速応性をうることはできない。この欠点をのぞくために電圧リセット形磁気増巾器と半導体整流器を組合わせた速応性可変電圧直流電源がある。図 5.14 はこの回路の結線であり、電圧リセット形磁気増巾器が本質的に半サイクルの応答時間を有するところからこの電源の制御管部としての特性も半サイクル応答となり、水銀整流器を用いた場合と同等またはそれ以上の速応性に富んだ制御を行なうことができる。

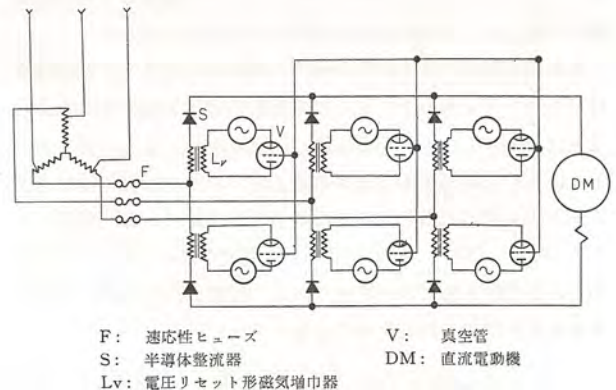


図 5.14 速応性直流電動機駆動用電源

### 5.7 その他の直流電動機駆動への応用

直流電動機はまた界磁を制御して速度を制御することもできるが、この場合にも界磁用電源として半導体整流器が用いられる。その他工作機用直流電動機の電源として、半導体整流器による直流電源を工場の各所に分散配置する方式が最近用いられるようになった。

### 6. 交流発電機励磁回路への応用

半導体整流器の発達にはさらに同期発電機用励磁機のブラシを



省略し、また進んでは励磁機自体を静止励磁機に置き換えられるまでにたつた。

### 6.1 ブラシなし交流発電機

航空機工業が発達するに従って、航空機用の交流発電機の励磁回路のブラシに対する使用条件が非常に苛酷となってきたため、発電機の軸に取付けたシリコン整流器を用いて、ブラシなしの交流発電機が製作されるようになってきた。図 6.1 はこの方式の結線図であり、主発電機のロータに直結された交流励磁機の出力を、やはりロータ軸に取付けられたシリコン整流器によって整流して主発電機の励磁回路に直流電流を供給する方式であり、7kW 程度のものまで作られている。

### 6.2 静止励磁器

可飽和リアクトル形変流器および半導体整流器を用い、自身の出力電圧を整流して励磁に用いる同期発電機の方式は自動式交流発電機としてその特性の良好なことは相当古くから知られていたが、大電力用半導体整流器が現われるに及んでにわかに脚光をあびるようになってきた。

この方式は概略の結線図を図 6.2 に示すように同期発電機の出力端子より電圧および電流によるリアクタンス降下のベクトル和に比例した電流を可飽和リアクトル形変流器でとり出して、これを半導体整流器によって整流し同期発電機の直流励磁として使用するものであり、横流補償、力率補償も簡単に行なうことができる。この方式は変流器によって強制的に電流を流すためにきわめて速応性に富み制御性能が優秀である上、静止器であるため保守が容易であること、重量、すえ付面積が小さくて

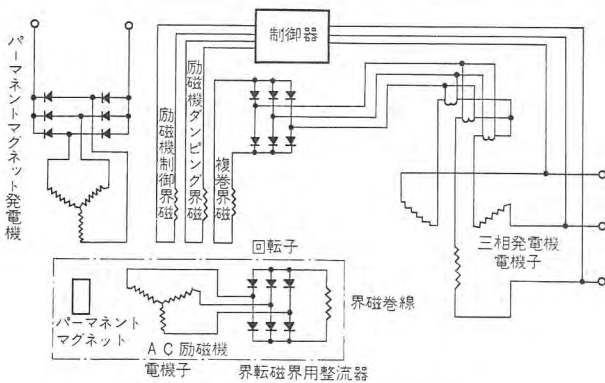


図 6.1 ブラシなし発電機結線図

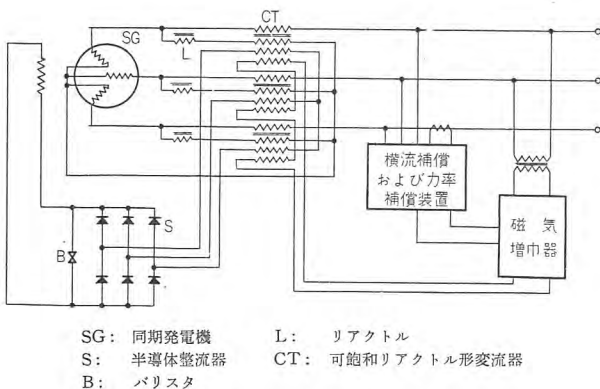


図 6.2 静止励磁器結線図

すむこと、密閉形に作られるためガスの腐食のおそれのないことなどの多くの長所を有しているため、船舶用発電機や、化学工場において腐食性の有害ガスの発生するおそれのある所に設置された発電機に用いられるほか、最近は大く水車発電機やタービン発電機にも用いられるような気運にあり、将来ますます発展することが期待される。この用途に用いられる半導体整流器は大抵小容量のものはセレン整流器、大容量のものにはシリコン整流器が用いられており、その定格は最大定格電圧、最大定格電流のほかにはサージ電圧および故障時の過渡電流に対しても十分に余裕があるよう考慮して選定しなければならない。

### 7. 工業用設備への応用

半導体整流器は上述のとおり保守の簡易化と高効率の点、建設費が大電流のわりに低廉であることの利点によって食塩電解、金属電解などの直流電源をはじめ特殊用途に使用されている。

現在実用に供されている代表的な用途とこれが電流電圧をあげれば表 7.1 のとおりである。

ゲルマニウム整流器の代表的変電所単線結線図は図 7.1 である。140 V, 100,000 A のアルミ電解用の運転実績がある。

風冷式シリコン整流器としては 120 V, 14,000 A が稼働しており 82 V, 120,000 A の食塩電解用、風冷式シリコン整流器が製作されつつある。

水冷式 300 V 3,000 kW のシリコン整流器が 319-H のダイ

表 7.1 現用半導体整流器の代表実例

整流器の種類	出力電流 (A)	出力電圧 直流 (V)	冷却方式	用途その他
ゲルマニウム整流器	140,000	250	風冷式	食塩電解 36 相 (アメリカ)
"	100,000	140	"	アルミ電解 (日本)
シリコン整流器	14,000	120	"	食塩電解 (日本)
"	120,000	82	"	" (日本)
"	5,000	525	"	アルミ電解 (アメリカ)
"	60,000	150	"	銅電解 (アメリカ)
"	10,000	300	水冷式	食塩電解 (アメリカ) 「Ku」 R.C. と並列運転
"	82,000	750		アルミ電解 (ドイツ) 1960 年用定成予定
"	12,500	600		水電解用 (ドイツ)

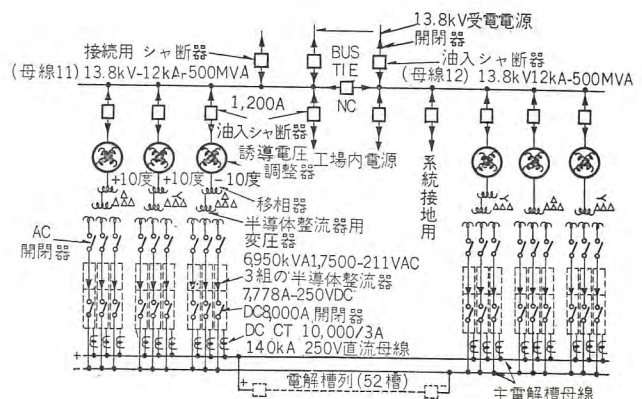


図 7.1 250 V, 140,000 A 風冷式ゲルマニウム整流器変電所 (組合せ 36 相結線方式)



## 技術解説

オード 6A×2S×20P, 2組より構成されて、300 V, 5,000A の回転変流機, 同容量の接触変流機と並列運転している。

この分野はほとんどすべて半導体整流器で計画され、また利用されるようになることはあきらかである。

食塩電解用直流電源としては本誌に住友化学向け 120 V, 14, 000A の風冷式シリコン整流器を記述したからご参照されたい。

その他特殊なものうち代表的なものいくつかの例を示せば下記のとおりになる。

### 7.1 電気メッキおよびアルマイト用電源

電気メッキやアルマイト用の電源としては従来ベルトローや電流発電機が用いられていたが、このような低電圧、大電流用電源としては内部電圧降下の小さなゲルマニウム整流器やシリコン整流器を用いるのが最適であり、現在ではほとんどがこの種の整流器によって置き換えられつつある。図 7.2 は連続電気

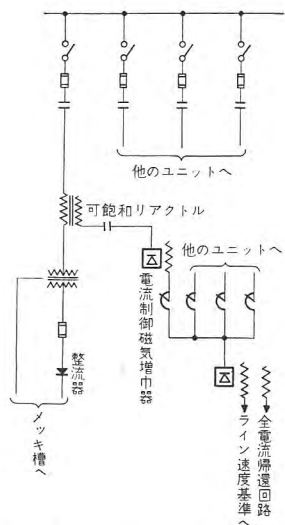


図 7.2 連続メッキ設備電源結線図

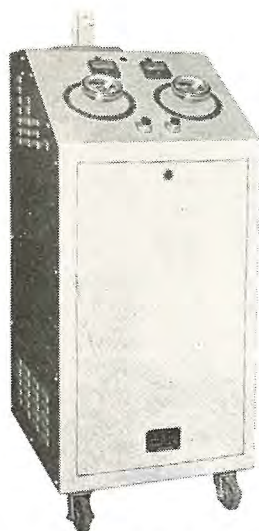


図 7.3 メッキ用ゲルマニウム整流器

メッキ設備の結線図であり、半導体整流器に直列に設置された可飽和リアクトルの直流励磁を調整させることによって定電流制御を行っている。図 7.3 は 15 V 500 A のメッキ用ゲルマニウム整流器電源、図 7.4 は 30 V 700 A のアルマイト用ゲルマニウム整流器電源の外形である。

### 7.2 真空炉用直流電源

これは金属の精錬法の改良とあいまって発達した方式である。かかるアーク電源への応用に対しては電源は垂下特性を必要とするため、可飽和リアクトルを整流器と直列に挿入して直流励磁を変えて電源に垂下特

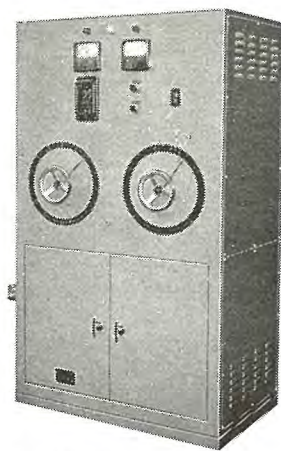


図 7.4 アルマイト用ゲルマニウム整流器

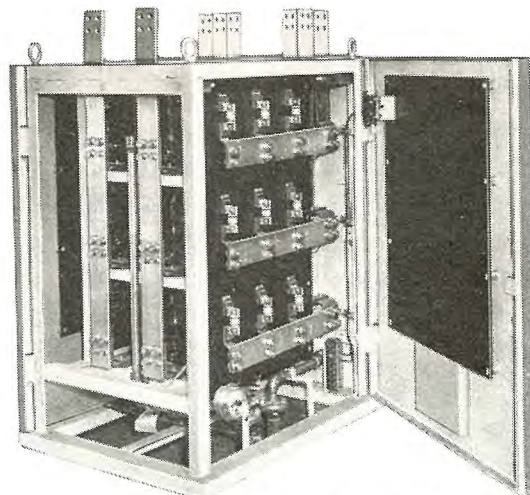


図 7.5 真空炉用ゲルマニウム整流器

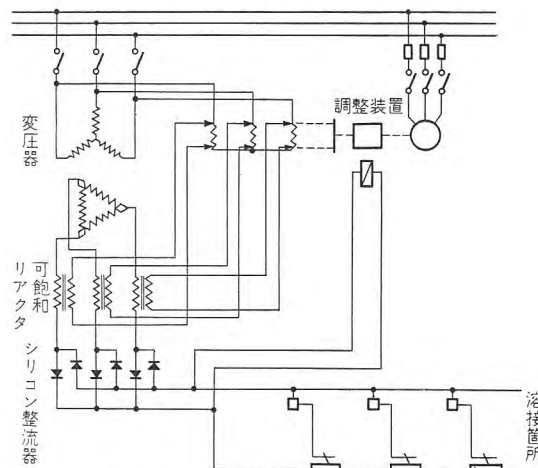


図 7.6 溶接機用シリコン整流器

性をもたせたり、高漏洩磁束形の変圧器を用いたりする。真空炉用直流電源の一例として 40 V 数千アンペアの定格のものが使用されている。これは真空炉内で金属を溶融されるもので、起動時には 80 V の出力電圧が必要とされている。図 7.5 は真空炉用直流電源の一例である。

### 7.3 アーク溶接機用電源

アーク溶接機用の電源もまた垂下特性が必要とされるので可飽和リアクトルや高漏洩磁束形の変圧器が用いられる。これは従来はセレン整流器が用いられていたのであるが、現在はシリコン整流器やゲルマニウム整流器がこれにかわって用いられつつある。図 7.6 はこの場合の結線である。

### 7.4 リフティングマグネット電源

リフティングマグネットの直流励磁用電源としても半導体整流器は盛んに用いられるようになった。リフティングマグネットは交流発電機の回転子つり上りや製鉄所で鉄材の移動などに広く用いられている。小形のものは無制御で用いられるが、大形のものの中には誘導電圧調整器で自動定電流制御されたものもある。

### 7.5 蓄電池充電用電源

蓄電池の充電用としては自動車の蓄電池の充電用の小形から変電所や放送局の大型充電装置まで、従来の水銀整流器やセレ



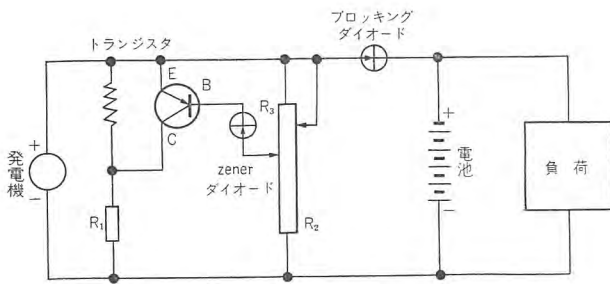


図 7.7 バッテリー充電用定電圧調整回路

ン整流器にかわってシリコン整流器やゲルマニウム整流器が盛んに用いられるようになってきた。浮動充電を必要とするものには可飽和リアクトルによる定電圧制御回路がつけられる。また半導体整流器は充電の電源用としてだけでなく、定電圧制御用としても用いられる。図 7.7 はブロッキングダイオード、zener のダイオードおよびトランジスタを用いた定電圧制御回路を示す。これはニューヨーク地下鉄の電車で充電装置であり、1.5 kW 37 V 程度の小容量のものであるが、電圧変動率は 1 V から 1.5 V 程度のものである。

#### 7.6 IBM 用電源

IBM の電源としては定電圧直流電源が必要であり、これにも従来はガラス水銀整流器などが用いられていたが、最近ではゲルマニウム整流器またはシリコン整流器におきかえられつつある。電圧は 115 V $\pm$ 2 V 程度の精度が要求され、自励式または風冷式のシリコン整流器が一般に用いられる。

### 8. 計測への応用

半導体の技術が進歩するにつれて特殊半導体が計測の分野にも利用されるようになってきた。半導体のホール効果を利用した各種測定装置、zener のダイオードを利用したスケール拡大電気計器などに利用され測定技術にまた一段の進歩を加えた。

#### 8.1 スケール拡大電気計器

工業用電気品の発達に伴って、ある定まった期間の電圧や周波数を正確に測定する必要が生じてきた。このような測定においても半導体整流器を用いると簡単にある期間内の電圧または周波数を計器の全スケールに拡大して読むことができる。図 8.1 (a) はこの用途に zener ダイオードを用いた場合の電圧計の回路を示す。図において N が電圧計で抵抗  $R_3$  とコンデンサ C を付属しており、電圧  $V_i$  の平均値の読みを示す。Recz は zener ダイオードであり、電圧計の読みとしては電圧  $V_i$  の正および負の半波の差が表われることになる。この特性は図

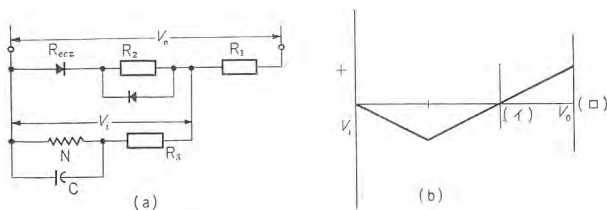


図 8.1 スケール拡大電圧計

8.1(b)に示すように zener ダイオードの zener の領域を境として折れまがり、ふたたび零を通過して上昇するが、図の(イ)(ロ)の間が計器の読みとして表われることになるのである。

#### 8.2 大電流計

電流の流れている金属や半導体に直角方向に磁界をかけるとその両者のベクトルの外積に比例した電圧が表われることは E. H. Hall によって発見され、ホール効果と呼ばれているが、そのホール電圧は下式で表わされる。

$$V = \frac{R}{t} IB$$

$V$ : ホール電圧  $t$ : 導体の厚さ

$I$ : 電流  $B$ : 磁束密度

$R$ : ホール係数

このようなホール効果を利用して大電流を測定することができる。すなわち図 8.2 のように直流ブスにインターリンクして鉄心をもうけ、その鉄心に切断をもうけてそこにホール発電子をおき、適当な制御電流を流せば、ブスの大電流によって生じ

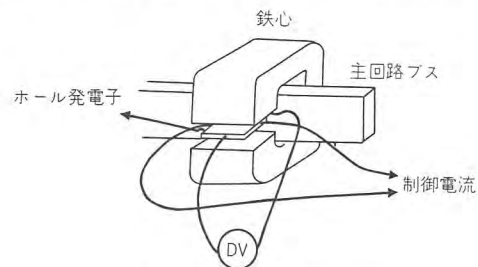


図 8.2 大電流計

た磁界のためにホール電圧が表われる。制御電流を一定に保てばホール電圧はブス電流に比例するからこの電圧を測定することによって大電流を簡単に測定することができる。

#### 8.3 電力計

電力計はそもそも電圧と電流との積を求めてやればよいのであるから、たとえばホール発電子に電流に比例した磁界および電圧に比例した制御電流を流してやると両者の積のホール電圧が発生するため簡単に電力計として使用することができる。その概略の結線図は図 8.3 のとおりである。交流の場合にはホール電圧の平均値

$$V = Re \left[ \left( \frac{R}{t} \right) I B^* \right]$$

(ただし  $Re$  は  $I$  と  $B^*$  との内積の実数部、 $B^*$  は  $B$  の共役ベクトルを示す) が有効電力に比例するようにホール発電子に流れる電流と磁界との間の位相角を調整するためのインピーダンスを挿入しなければならない。

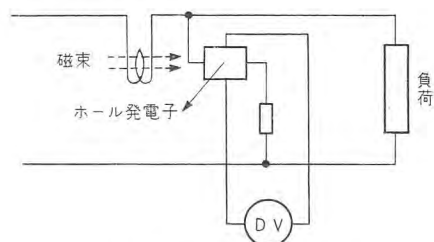


図 8.3 電力計結線図



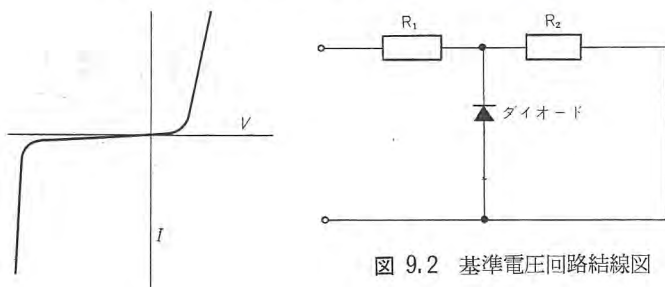


図 9.1 シリコン整流器の特性

図 9.2 基準電圧回路結線図

#### 8.4 磁束計

上記のようにホール電圧は電流と磁束密度との積に比例するから、ホール発電子に一定の制御電流を流しておけば、磁束密度に比例したホール電圧を発生するので、これによって簡単に磁束密度を測定することができる。

### 9. 制御への応用

かかる半導体整流器はもちろん電力用機器の制御回路にも用いることができる。この中には一般の整流器を用いるものとして、可飽和リアクトルと組合わせて信頼性に富みかつ利得の大きな磁気増巾器を作るのを始め、特殊半導体整流器を使用したものなど、その応用はきわめて広範囲に及んでいる。

#### 9.1 定電圧基準電源

zener のダイオードを用いて自動制御回路の基準電圧を作ることができる。図 9.1 はシリコン整流器の電圧、電流特性であり、かかる特性を有するダイオードを図 9.2 のように接続すれば、定電圧放電管と同様に作用して出力を定電圧に保つ。一例として 200 V 0.64 mA 出力の基準回路で電源変動  $\pm 20\%$  に対して出力変動を  $\pm 1\%$  におさえることができる。

#### 9.2 過電圧継電器

zener のダイオードをトランジスタとともに用いた過電圧継電器が Westinghouse 社において実用化されている。これは図 9.3 に示すように電圧要素回路、時延回路、増巾回路電源および隸属継電器からなっており、動作原理は鋭い breakdown 特性をもった zener ダイオード  $Z_1$   $Z_2$  を使用して過電圧を検出しこれをトランジスタで増巾して継電器を動作させるものであり、反限時特性を有すること、振動や衝撃に無関係であること、

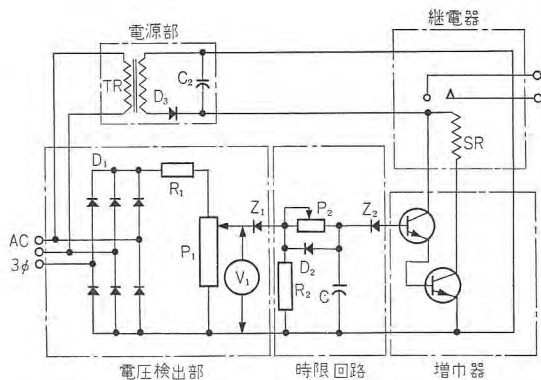


図 9.3 過電圧継電器

漂遊磁界に無関係であること、小形軽量であることなどのすぐれた特性を有している。

### 9.3 掛算器

電力機器においてもその制御が複雑化するにつれて二つの制御信号の積に比例した制御を行なわなければならない場合が生じてくる。すなわち定馬力制御、電力制御などがこれである。この場合には前述したホール効果を利用して、半導体によるホール発電子に電流および磁束をそれらの制御信号に比例して与えてやることによって両者の積に比例した制御信号をうるることができる。これはまた計算器の掛算器や Modulator, Demodulator としても使用することができる。

### 10. 開閉用および制御格子付半導体整流器の応用

電子管形の整流器が二極管から三極管に、水銀整流器から格子付水銀整流器またはイグナイトロン整流器と進んだように、半導体整流器もその通電を制御できる開閉用半導体整流器または制御極付半導体整流器へと進むのは当然予想されるところであったが、W 社において Dynister および Trinister、GE 社において Four layer diode および Silicon controlled rectifier が発表されるに及んで半導体整流器の応用分野は制御を主体とする方面、たとえば直流電動機の制御や回路の開閉、周波数変換装置など、従来電子管や磁気増巾器の独壇場であった部門に大巾に進出しようとしており、そのすぐれた特性によって近い将来電子管や磁気増巾器をこの分野から駆逐するであろうとまで予想されるに至っている。このような制御を主体とする用途に用いる場合に、開閉用半導体整流器や制御極付半導体整流器は次のような長所を有している。

- 通電時における内部電圧降下が非常に小さい。(定格負荷において 1 V 前後である。)
- 完全な静止器であり、可動部分がないため、本質的に信頼性が高く長寿命であるとともに、動作時に騒音を発生しない。
- 速応性に富む。(点弧遅れ時間および消弧時間は数  $\mu s$  から 10 数  $\mu s$  以内である。)
- フィラメントがないため、回路構成が簡単であるとともに予熱の必要がない。
- 高い温度でも動作させることができる。(動作温度 125°C まで用いることができる。)
- 小形で軽量である。
- 堅ろうである。
- 100 V 以上では約 99% というきわめて良好な効率を有している。
- 保守、取扱いが容易である。
- 比較的大電流の制御ができる。
- 制御極付半導体整流器はその電力利得が非常に大きい。(150,000 倍くらいある。)

制御格子付半導体整流器の構成は図 10.1 に示すように N 形と P 形が交互に 4 層積み重なった形であり、両端の N および





図 10.1 制御極付シリコンダイオード構成図

P 層に陰極および陽極端子が、中央部の P 層に制御極端子が接続されている。図 10.2 は制御極に信号が加えられていない場合の制御極付半導体整流器陽極—陰極間の正方向および逆方向特性である。第 3 象限にある逆方向特性は一般のシリコン整流器と同様で定格の逆方向せん頭電圧 (P. I. V.) をこえるまでは逆方向電流は非常に小さい値におさまっている。第 1 象限の正方向特性は破壊点  $V_{bo}$  までは逆方向の場合と同様に通流を阻止する能力があるが、 $V_{bo}$  において半導体整流器の端子電圧は瞬時にして  $V_H$  まで下り、電流は外部インピーダンスによって制限される値まで増し、電流が最少保持電流  $I_H$  以下になるまで通流し続ける。この場合、制御極に微少な信号電流を流すと、陽極電圧が  $V_{bo}$  以下であっても整流器を通電させることができる。W 社の Trinister GE 社の Silicon controlled rectifier などはこの形の制御極付半導体整流器である。

Dynister, Four layer diode などの開閉用半導体整流器は上述の制御極付半導体整流器の制御極がない構成のもので動作も前述の制御極付半導体整流器において、制御極に信号が加えられていない場合の動作とまったく同一である。ただし W 社の Dynister は PNP 接合のかわりに PNPM 接合 (M は金属) を用いたものであり、その特性は図 10.3 に示すとおりで、第 1 象限は一般の半導体整流器と同様であるが、第 3 象限において逆方向電圧が破壊点  $V_{bo}$  をこえると逆方向インピーダンスが急激に減少するような特性を有するものである。

これらは従来サイクロンなどが用いられていた用途にはすべて用いることができるほか、効率がよい、小形であるなどの利点によって、より広範な用途に利用することができる。

### 10.1 インバータ



図 10.3 Dynister 特性曲線

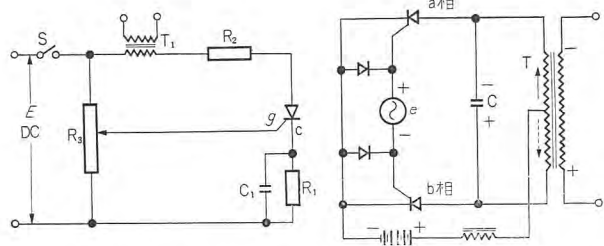


図 10.4 直列形インバータ回路図

図 10.5 並列形インバータ回路図

インバータに用いるためには、回路に非直線性負性抵抗を有することが必要であるが、制御極付半導体整流器はこのような特性を有しており、効率のよいインバータを作ることができる。

図 10.4 および図 10.5 は制御極付半導体整流器を用いたインバータの一例であり、図 10.4 は直列形インバータ、図 10.5 は並列形インバータである。図 10.4 においてスイッチ S が閉じられると制御極付半導体整流器の制御極 g は陰極 C より電位が高いため、制御信号電流が流れて陽極回路の通電を可能ならしめ、電流が変圧器 T、抵抗  $R_2$ 、制御極付半導体整流器を通してコンデンサ  $C_1$  を充電する。 $C_1$  の端子電圧が電源電圧  $E$  に等しくなると後少し後まで変圧器 T のリアクタンス分によって電流が流れているが、陽極回路の通電が止まると、コンデンサ  $C_1$  の電荷は  $R_1$  によって放電を始め、制御極付半導体整流器の陰極 C の電位が制御極 g の電位より低くなるとふたたび通電を始め、変圧器 T の二次側に交流電圧を誘起する。

図 10.5 は並列形と称せられる 1 回路で、たとえば制御信号電圧  $e$  が図示のような極性になると a 相の制御極付半導体整流器が通電し、変圧器 T に矢印のような極性の電流を流し、変圧器の二次側に図示のような極性の電圧を発生するとともにコンデンサ C を充電する。つぎの半サイクルにおいて、制御信号電圧  $e$  の極性が逆転すると、今度は b 相の制御極付半導体整流器が通電を始め、変圧器 T に点線の矢印のような電流を流し、変圧器の二次側に図示とは逆極性の電圧を誘起する。これと同時にコンデンサ C の電荷は b 相および a 相の制御極付半導体整流器を通して放電し、a 相の電流を最少保持電流以下に減少させて a 相の通電を止める。この場合の出力の交流周波数は、制御信号の周波数と同一になる。

### 10.2 開閉器

制御極付半導体整流器は内部電圧降下が非常に小さいため、交流回路または直流回路の開閉器として用いることができる。図 10.6 および図 10.7 は直流および交流回路の開閉器として制御極付半導体整流器を使用した場合を示す。図 10.6 は直流

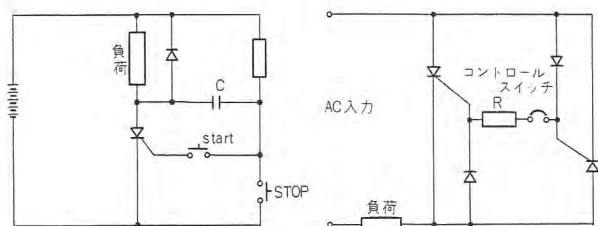


図 10.6 直流回路開閉器

図 10.7 交流回路開閉器



回路の開閉用に用いた場合であり、起動は start の押しボタンを押すことによって制御極に電流が流れて主回路を pick up する。停止のときは stop の押しボタンを押してコンデンサ C の電荷により制御極付半導体整流器の陽極を負にして通電を停止する。

図 10.7 は交流回路の開閉をつかさどり、コントロールスイッチ S を閉じている間だけ制御極に電流が流れ主回路を通電させるものである。

## 10.3 電動機の制御

制御極付半導体整流器はサイラトロンとまったく同じように動作するため、従来サイラトロンが用いられていた回路はすべてこれに置き換えることができる。すなわち一般に考えられる用途としては、静止レオナードによる直流電動機制御の制御管制部、直流電動機の可逆転運転、直流電動機のダイナミックブレーキ回路の開閉などがあるほか、前文において説明した静止セルビウム回路のインバータとして、また一次電圧によって誘導電動機を制御する場合の可飽和リアクトルのかわりなど、電動機制御のあらゆる部門にわたって広範囲な領域に用いられるようになるであろうと思われる。

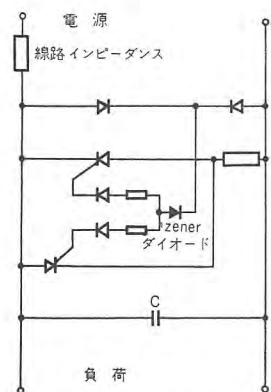


図 10.8 サージ電圧保護回路

図 10.8 は交流または直流回路のサージ電圧に対する保護装置である。図において、もし線電圧が規定値をこえたと zener-diode が通電して、どちらか片方の制御極付半導体整流器が通電し、過電圧を線路インピーダンスに吸収させるように働くものである。

## 10.5 開閉用半導体整流器の応用

開閉用半導体整流器もこれを普通の半導体整流器と組合わせ、開閉用半導体整流器の両端に信号電圧を加えることによって前述の制御極付半導体整流器と同様に動作させることができる。

図 10.9 は Dynister を用いた交流電圧制御回路であり、 $T_2$ 、 $Z_8$  および  $Z_9$  よりなる信号回路から Dynister の破壊電圧より大きなせん頭電圧を Dynister に加えてこれを通電させる。この場合にも、せん頭電圧を加える位相を変化させることによ

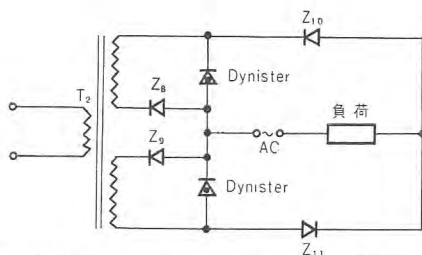


図 10.9 Dynister を用いた交流電圧制御回路

て出力電圧を制御することができるものである。

## 11. 特殊半導体の応用

三元合金を利用した半導体を使用してペルチエ効果を利用した一般に電子冷凍とよばれる工学部門がある。この方面も各種の半導体材料が考究されておりさらに進歩すると考えられるが現在のところ冷蔵庫、暖冷房、温度計、牛乳保温器などが試作されて発表されているがまだ完全には実用化されていないと思う。

太陽電池は N 形のシリコンの表面に固体拡散法でボロンを拡散させて P 形の薄層を形成させて P-N 接合体を作り、表面にそれにニッケルメッキをして端子としたものが一般のものである。太陽のエネルギーを電気エネルギーに変換する道具であって実施例としては東北電力で直径 28 mm の素子 4,320 個を使って 6.5 V、60 V、130 V の電圧をえており最大出力約 70 W で福島県信夫山頂の超短波無人中継局の電源となっている。

## 12. 電鉄部門への応用

電気鉄道への半導体整流器の応用としては大別して 2 種類があると思う。その一つは車両用であって交流電化用電気機関車または電車で積載して走行するための整流器であり、他の一つは在来の地上変電所用のものでその容量は 1,000~3,000 kW 級で 1,500 V または 600 V のものである。

電気鉄道への応用の特長としては在来の水銀整流器などの変換装置に比べて小形軽量にすることができる。またすえ付場所の自由度がたかいこと。機械的振動や衝撃に対して十分強度をもっていること。保守条件中冷却条件の上限制限がシリコンダイオードでは 150°C (ケース温度) であり、下限は -65°C、無人変電所としての好条件を具備していることである。

交流電化方式の拡張に伴い、交流車両にシリコン整流器が設備された場合には上記の特長が一段とクローズアップされて威力を発揮することができると信ずる。

### 12.1 交流電化方式用電気車への実施例

これは仙山線へ昭和 33 年 11 月に走行試験を実施し、基礎資料をとることができ、交流電車用にはシリコン整流器がもっとも適していることが立証された。図 12.1 はそのとき使用した

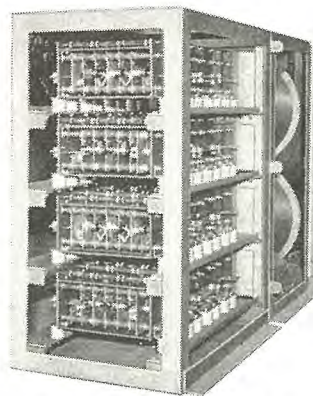


図 12.1 450 kW 1,500 V シリコン電車用シリコン整流器



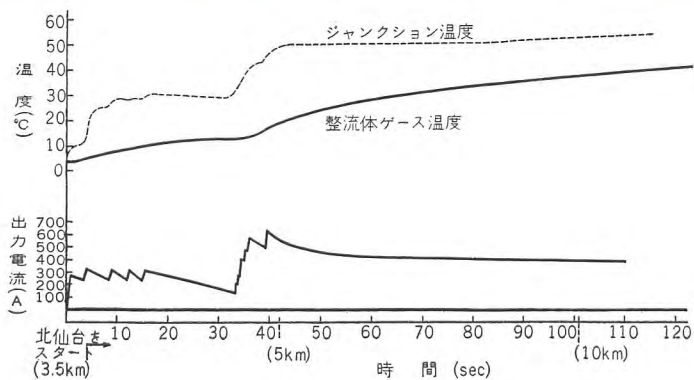


図 12.2 仙山線シリコン電車の力行電流によるシリコン  
ジャンクション温度上昇曲線

450 kW 級 1,500 V シリコン整流器である。また北仙台を出発して後、7 km ほど走行したときのシリコンベース温度、ジャンクション温度、電流値との関係を測定したものが図 12.2 である。この図で示されるように短時間過負荷の負荷状況があらかじめわかっているものに対してはシリコン整流器の定格出力を経済的に設計することができる。ただモータせん絡時の課題に対してだけシリコン整流器の最高定格がおさえられるが主回路方式と回路リアクタンスの選定によって 6,000 A 級の短絡電流値におさえられるようにすれば経済性は確保できる。

電気機関車用としては矢張りシリコン整流器がもっとも有望

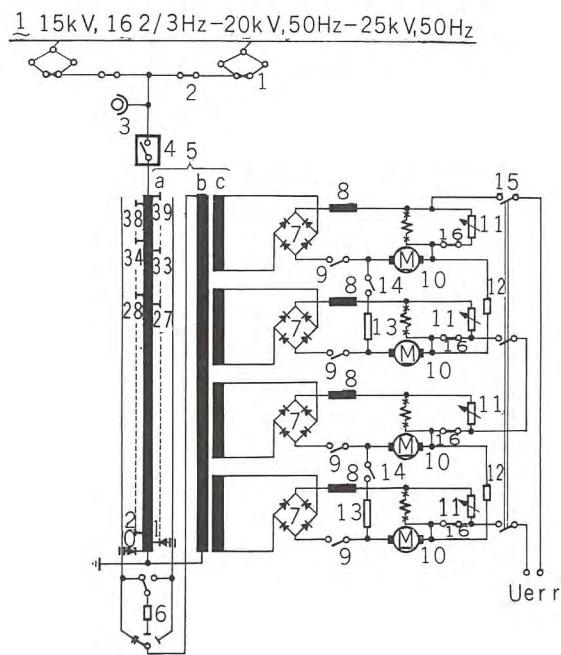


Bild 1. Vereinfachtes Hauptstromschaltbild

1. Stromabnehmer
2. Trenner für Dachleitung
3. Überspannungswandler
4. Hauptschalter
5. Transformator mit Stufenwähler
  - a Stufenwicklung
  - b Überspannungswicklung
  - c Unterspannungswicklung
6. Lastschalter mit Überschaltwiderstand
7. Gleichrichter
8. Glättungsrossel
9. Treenschutz
10. Fahrmotor
11. Feldschwacheinrichtung
12. Verbundwiderstand
13. Bremswiderstand
14. Bremschütz
15. Erregerschütz
16. Kontakt am Feldschwachscharwerk

図 12.3 ドイツにおけるシリコン電気機関車の主回路方式

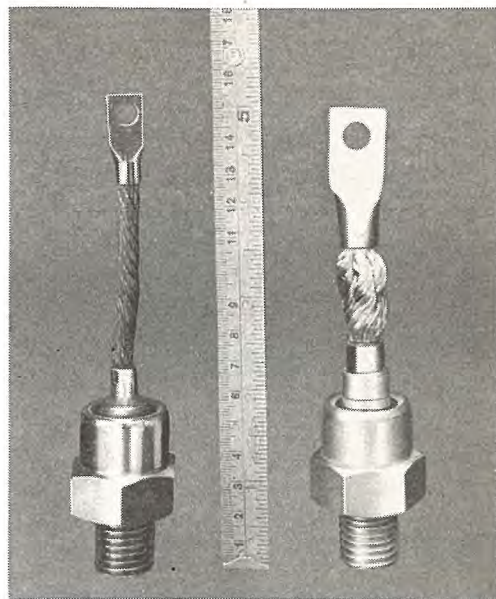


図 12.4 三菱製シリコンダイオード

(左) 100A/セル P. I. V. 350 V  
(右) 200A/セル P. I. V. 350 V

視されており，図 12.3 はドイツにおける一例であって主回路方式を示す。

日本においてもロコ用シリコン整流器が国産シリコンダイオードで組立てるべく計画されており、近き将来実現するよう努力中である。ゲルマニウム整流器を積載したロコまたは電車が英国その他で試運転されたが満足すべき性能と運転実績をえた報告をきいていない。

図 12.4 は三菱製シリコンダイオードの写真である。

## 12.2 地上用変電所向け半導体整流器

この変電所は日本国有鉄道が世界にさがけて実施計画されたもので、1,000 kW 1,500 V D 種定格の風冷式シリコン整流器がそれである。昭和 33 年末、大井町変電所へ設置して水抵抗負荷による定常負荷、温度上昇試験、加速負荷試験、脈動負荷試験などを実施し、各トレーの温度上昇、波形、力率、効率などを実測した。さらにサージ試験、電車運行試験なども引続いて実行すべく計画されている。現在までのところ地上用変電所としての性能は十分そなえていることが判明している。

また近畿日本鉄道、玉川変電所へ 500 kW, 600 V 風冷式シリコン整流器を納入し、既設の 600 V, 750 kW の回転変流機 3 台と並列運転が行なわれている。図 12.5 は主回路方式を、図 12.6 は並列運転時の  $V-I$  特性曲線を示したものである。この主回路方式は標準の柱上変圧器を組合わせ、直列にして使用していること、直流側にはサージ保護装置をできるかぎり少なくし、そのかわりダイオードの直列枚数はやや多い方式をとっているのが特長である。

上記の二つの実例からして今後地上変電所として電鉄用シリコン整流器はいかにすむべきであるか、いましばし運転実績とシリコンダイオードの進歩をみた上できめるべきであろう。



## 技術解説

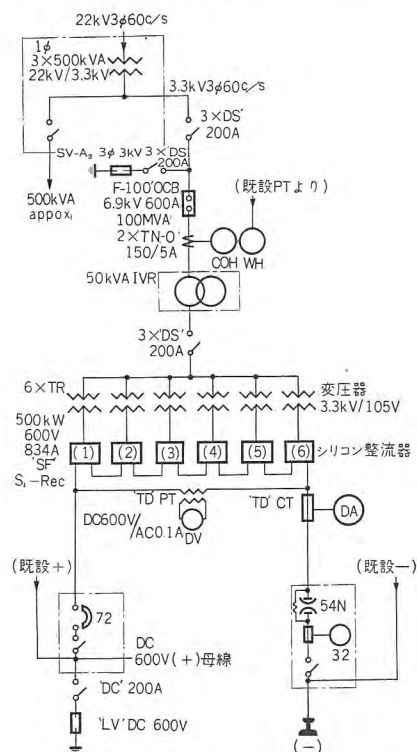


図 12.5 500 kW 600 V 834 A シリコン整流器単線結線図  
(近畿日本鉄道玉川変電所)

13. む す び

以上述べたように半導体ダイオードを使用して有意と考えられている分野が多数あり、今後さらにこのほかの応用が広まることと思われる。しかしこれが応用にさいしては十分な基礎研究と資料の上にたって設計することが大切である。その用法を誤ると半導体ダイオードの性能を十分発揮することができないうらみがある。この点では使用される方々の理解あるご協力を切望してやまない。

最後にこの技術解説中に初めて発表，紹介された事実と半導体ダイオードの性格に対しその諸特長が将来の広大な利用分野の道を開くことに寄与すれば幸であり，筆者一同は新分野開拓の重責を1日も早く達成すべく，ここにご奉公をちかうものである。

### 参考文献

- (1) 甲斐 高: 三菱自励式交流發電機,「三菱電機」32, No. 8

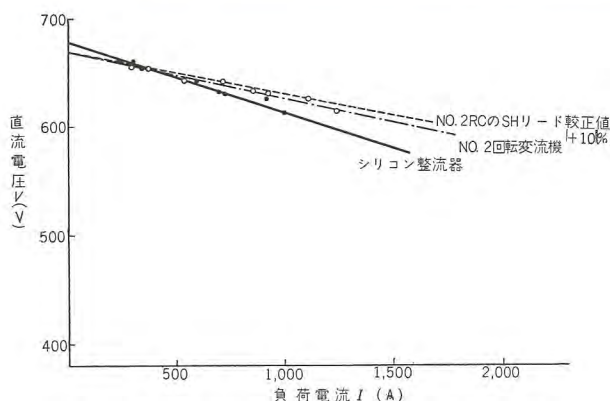


図 12.6 500 kW シリコン整流器 750 kW RC (NO.2)  
並列負荷分担

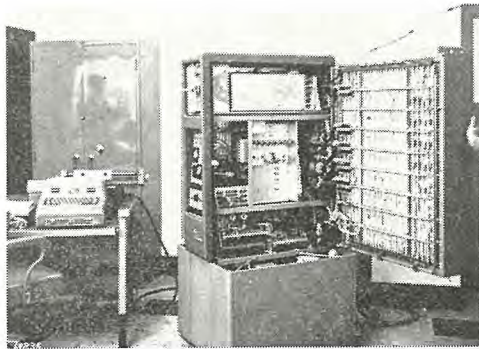
- (2) W. H. Henkels, H. R. Camp ほか: Silicon Rectifier in Brushless Machine, A.I.E.E. Conference paper 57-793
- (3) C. P. Broohs: Recent Advance in Control System for Continuous processing line, Iron & Steel Engineer (October 1958)
- (4) 加藤又彦: 電力用シリコン整流器とその応用, 電気技術者 No. 25
- (5) R. J. Moran: The Application of Silicon & Germanium Power Rectifiers in the Steel Industry, Iron & Steel Engineer (August 1958)
- (6) 片岡照栄: 半導体の新しい応用, ホール装置について OHM4 (1958)
- (7) A. J. Corson: On the Application of Zener Diode to Expanded Scale Instruments. A. I. E. E. (July 9, 1958)
- (8) E. A. Petrocelli: High gain static AC Switch, A. I. E. E. Conference paper 58-1223
- (9) W. D. Cockrell ほか: The Controlled Rectifier in Power Control Application, A.I.E.E. Conference paper 58-1347
- (10) C. Hilsum ほか: Multiplication by Semiconductors. Electronic Engineering (November 1958)
- (11) R. K. Jurgen: Hall-Effect Devices, Electronics (January 16-1956)
- (12) R. P. Frenzel ほか: Solid-State Thyatron Switches Kilowatts, Electronics (March 28, 1958)
- (13) F. W. Gutzwiller: The Silicon Controlled Rectifier, Electrical Manufacturing (December 1958)





## 計数形自動電子計算機(2)

研究所 豊田 準 三\*



Bendix G-15D 内部

## 6. 自動電子計算機内ではどのような動作が行なわれるか

自動電子計算機に通用する言葉が機械によって異なると同様に、内部動作は機械によっていちじるしく異なっている。ここでは磁気円筒を遅延回路的に使用して記憶の動作を行なわせる2アドレス2進数式計算機(G15D)について動作の概要を示す。

機械内部に流れる信号の様子は図6.1に示したようなものである。

機械の動作はすべて機械内部で発生される時間信号で支配される。この時間目盛信号を発生させるためのパルスが磁気円筒上に恒久的な磁化されたスポットとして刻み込まれている。機械運転中にはこのドラムが、1,800 rpmで連続回転してこの磁化スポットから108 kcのパルスが取り出されこれが機械動作のクロックパルスとなる。

このクロックパルスはタイミング回路を通ずることにより、全体の動作を制御する制御回路、外部から計算機にはいてくる信号を機械内部に通用する信号とするための同期回路、磁気円筒装置の読み出し、書き込み回路、その他あらゆる部分へのタイミング信号を発生する。そのタイミング信号の種類は基本的なものだけでも約10種類ある。

タイプライタあるいはテーブリーダからの信号の導入があると、その信号はタイミングの信号およびそれに基づいた制御信号の作用で同期回路(数種のフリップフロップより成立する)を通じて、計算機内で通用する電気パルス列となり、書き込みヘッドを通じて指定の

場所へ磁化スポットとなって書き込まれる。書き込まれた信号はドラムの回転により読み出しヘッドで読み出されるのであるが、単に記憶して置くだけでよい場合には、読み出された信号がふたたび書き込まれ、書き込み→読み出し→書き込みの循環動作で絶えず動的に記憶されることになる。この動的な循環記憶の動作は水銀遅延回路と同様であり書き込みから読み出しまでが遅延時間に相当する。書き込みヘッドと読み出しヘッドの幾何学的位置によりいろいろな遅延時間に相当したメモリラインができる訳であり、本機では29 msのものが20ライン、1.08 msのものが4ライン、0.54 msのものが3ライン、0.27 msのものが1ラインある。これだけのものがメモリラインとして使用されるのであるが、この他にプログラマが使用するメモリライン

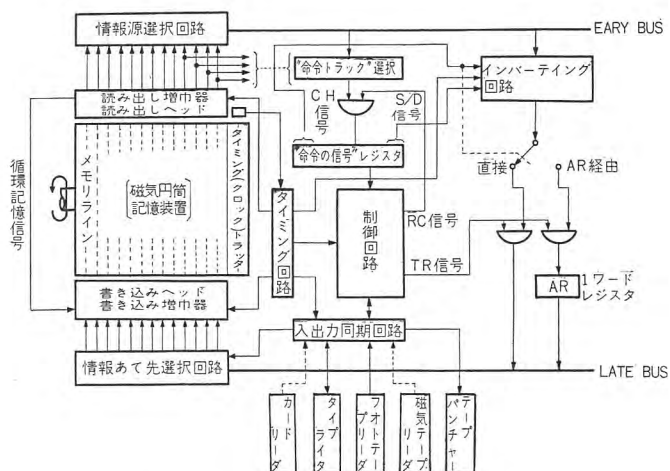


図 6.1 G-15D 計算機内の信号の流れ

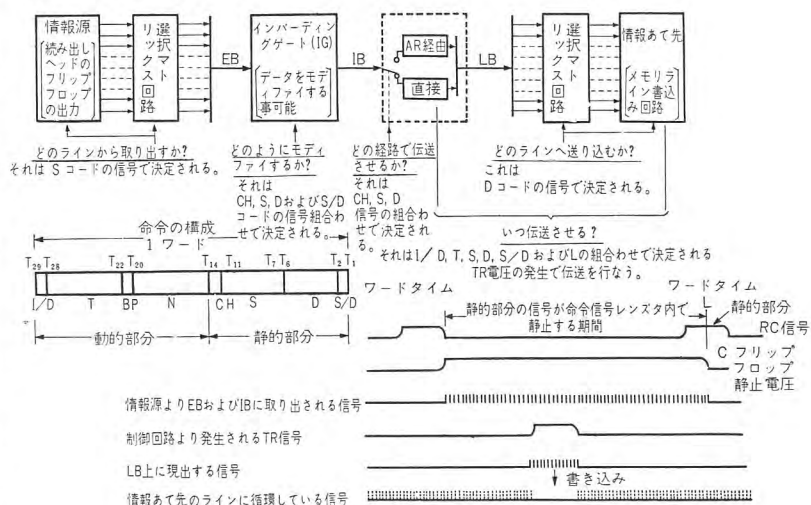


図 6.2 情報源 (Source) 情報あて先 (Destination) の情報の伝送



としてではなく機械の制御動作だけに使用されるラインが数本ある。

数値信号でも命令信号でも記憶するだけの場合はいかなるメモリラインでも記憶できるが、命令信号が取り出されて機械の動作がその信号の支配を受けるためには特定のライン(29msのラインの7本がこれに指定されてコマンドラインと呼ばれる。)に移されておらなければならない。直接機械用語で示されるパルス符号では“数値”と“命令”の区別がつかないにもかかわらず機械に生ずる作用の違いはこのようにメモリラインからの取り出され方の差異による。命令信号をコマンドラインに移す操作はタイプライタの操作でデータをタイプインする時にも行なえるがプログラムそのものによっても可能である。

制御回路はタイミング回路からのタイミングを受けてそれに基づき RC 信号 (Read Command), TR 信号 (Transfer) の2種類の信号を発生する。いずれの信号をも発生しない時期が待時間で WRC (Wait RC) WTR (Wait TR) の2種がある。RC 信号の継続時間は 0.27 ms (1 ワードタイム) で一定であるが TR 信号の継続時間は1ワードタイム, 2 ワードタイム, 数ワードタイム, 数十ワードタイムといろいろあり、いつ発生するかということをも含めてこれらはすべて読み取りヘッドから読みとられた信号で規定を受ける。WRC, WTR の時期が短いほど計算機の時間的利用率が良好な訳で2 アドレス方式ではこの種の待時間を皆無とするようなプログラムを作ることができる。(これをミニマムアクセスコーディングという。)

入力データを全部記憶させた後に計算機になんらかの操作を加えない限りは計算機は WRC の状態にある。この状態では循環記憶が継続されているだけである。計算を行なうべき前提条件(データの記憶完了と操作スイッチの適正なセッティング)が満たされた後、最初に“どの命令を読み出して計算を始めよ”という入力操作が行なわれると、計算機は指定されたコマンドライン選択回路から RC 信号により、命令信号レジスタへと信号の取り入れを行なう。この時期から初めて人間による指図から離れて、読みとれた信号に支配された自動計算が行なわれるのである。

命令を示す信号の最初の 13 個のパルスが読みとられた瞬間から命令信号レジスタ(コマンドレジスタ)の C フリップフロップは一定の電圧を維持し続けて第 7~第 11 パルスの5個のパルス(情報源信号——ソースシグナル S)で指定されたメモリラインからの信号を EB (Early Bus) へ供給し続けることになる。これとは別に第 2~第 6 パルスの5個のパルス(情報あて先信号——デスティネーションシグナル D)で指定されたメモリラインへ送り込むべき回路が設立される。信号伝送経路は EB→IB (Intermediate Bus)→LB (Late Bus) の順である。(図 6.2 参照)

この種の計算機では演算はすべて“情報の伝送”という形で行なわれる。電気パルスの加算操作が行なえるようになっている全加算回路を有したメモリラインへの情報の伝送ということで行なわれる。全加算回路を有したメモリラインは AR

といわれる1ワードラインと PN と称する2ワードラインだけである。(他にも全加算回路を有した1ワードラインがあるがそれは内部動作制御だけの目的のものである。)これらのラインでは全加算回路は読み出しフリップフロップと書き込みヘッドとの間の信号循環経路に設けられている。

数値的情報は絶対値(28個の2進的信号)と正負信号(1個の2進的信号)で表わされてメモリラインに循環記憶されているのであるが、これらの信号を取扱って所定の演算を行なうには上記のように信号伝送の経路を規定するほかに信号のモディフィケーション(補数形にしたり、正負符号を変更したりすること)を行なう必要があり、このためにインバーティングゲートと称する回路が設けられている。どのようなモディフィケーションを行なうかは第1パルス(S/Dビットといわれる。)第12, 第13パルス(CHビットといわれる)のほかにSとDの作用が加わり、これらのパルスの組合わせて補数形にしたり符号変更を生じたりするようになっている。

命令により取り扱われるデータの指定は上記のSによるラインの指定とともにそのライン(ロングラインでは108ワード、ショートラインでは4ワード)中のどの語かの指定が必要である。それはRC状態で読みとられる。 $T_{22} \sim T_{28}$ のパルスTの信号により決定される。どのラインかの指定は選択マトリックス回路により場所的に決定されるのに比してどのワードかの指定は上記T部のパルスにより惹起するTR信号の発生(この発生時期は命令が読み出されるワードタイムLを示す信号とTパルス信号の相対値で数数回路的に規定される)により時間的に行なわれる。

このTR信号の発生により先にEBに供給されインバーティングゲートでモディファイされてIB上に供給された信号が時間的に区切られてLBへ転送され、先にDパルスによりセットアップされた選択回路により情報あて先へと書き込まれる。かくして(S, T)で規定された情報のD, Tへの伝送を終了することになる。

TRの信号の消滅とともに計算機はWRCの状態になるのであるが、この時にも静止し続けているコマンドレジスタのCフリップフロップは命令信号中 $T_{14} \sim T_{20}$ により生ずる信号で規定された時期に至って次のRC状態に移ることとなりNで指定されたワードで次の命令を読みとることになる。

上記のS, T→D, Tの情報伝送は“直接”の経路での伝送であるがS, T→D, T'のようにワードタイムを異にした情報あて先への伝送の場合はいったん1ワードレジスタARを経由したる後D, T'へと送り込まれるのである。1ワードレジスタはどのワードタイムにおける情報あて先とも成りうる一方、どのワードタイムにおいても情報源となりうるものである。

加減算の場合には情報源→EB→IG→IB→全加算回路を有する情報あて先、で示される1回の伝送で演算が終了し結果数は補数形となっている。これを次の命令で新しい情報あて先に送り込めば結果数はふたたびIGを通り絶対値と符号の形で指定されたワードに記憶されることになる。



乗除算は加減算の数十回の繰り返し動作として遂行され、それには ID, MQ, PN と称される 2 ワードラインが演算に参加する。積の絶対値は PN 内にでき上り、商の絶対値は MQ 内にでき上ることになっている。乗除算の場合の符号調整は IP と称するフリップフロップで行なわれ乗除算命令に続く命令で IP よりの信号と MQ (または PN) よりの信号とはいっしょになって指定された D, T へ結果数書き込み記憶されることになる。PN は全加算回路が設けられている 2 ワードラインである。

読み出された命令がタイプアウトなどの出力操作を示す命令の場合は制御回路の動作により出力同期回路が生じる。これによってリレーやカムなどの動作が惹起して指定された情報 (これは特定のラインからに限る。) のタイプアウトまたはパンチアウトが行なわれることになる。

## 7. G15D 自動電子計算機の主要仕様と性能

- 形式 : プログラム記憶式 直列 2 進数方式
- 数表示 : 絶対値 28 ビット符号 1 ビット (シングルプレジジョン) または絶対値 57 ビット符号 1 ビット (ダブルプレジジョン)
- 命令 : モディファイド 2 アドレス方式で 1 語 29 ビットを用いる。
- 内部記憶装置 : 遅延回路形式の磁気円筒方式  
記憶容量は 2,176 語 (うち 2,160 語の平均待時間 14.5 ms 他の 16 語の平均待時間 0.54 ms)
- レジスタ : 1 ワードのもの 1 個, 2 ワードのもの 3 個 (いずれも磁気円筒装置のラインの一部を用いている。)
- クロック : 108 kc (磁気円筒回転数 1,800 rpm)
- 使用部品 : 真空管 455 本, ゲルマニウムダイオード 3,100 本 フォトトランジスタ 6 本
- 出入力装置 : 電動タイプライタ…… 8 ch/sec  
光電テープリーダ…… 200 ch/sec  
テープパンチャ…… 18 ch/sec  
カード読取器, カードパンチャを付属装置として取付可能

なお外部記憶装置として磁気テープ記憶装置が併用可能であり, こうすることにより大容量の計算が可能になる。

別に DA—1 と称する計数式微分解析機が用意されこれを使用することにより微分方程式を数値的に解くことが簡単となりカーブプロットと併用することによりアナログ解 (曲線による解) をプロットすることができる。

## 8. G15D 自動電子計算機のために用意されている主要プログラムライブラリ

### 8.1 インタープレティブルーチン

Intercom 101 : 浮動小数点, 単アドレス方式のプログラ

ムより直接機械用語の信号への翻訳と編集を行なう機能を有し, かつ浮動小数点加減乗除算ルーチン, 開平方ルーチン, 指数関数, 対数関数演算ルーチンなどを含む。

Intercom 103 : 上記の機能のほかに三角関数ルーチンをも追加したもの

Intercom 1000 : 浮動小数点, 単アドレス方式のプログラムの翻訳編集を行なうことは 101 と同様であるが PPR 用語で書かれた他のサブルーチンをも使用可能としたもの (シングルプレジジョン数値だけ取扱える。)

PPR—D1 : PPR 用語で作られたプログラムを直接機械用語の信号になおして Program Preparation を可能にするルーチン

Tracer : 逐一命令実行の結果をタイプアウトするルーチン

PDR : 内容不明のテープを逐一 PPR 用語でタイプアウトするためのルーチン

PPR—Standard : PPR—D1, Tracer, PDR をいっしょに集めて, このほかの機能として数個のサブルーチンを分配記憶させるためのローディングルーチンの自動的作成 フレクソライターテープを読み込ませて PPR 用語によるプログラムの翻訳記憶と同様の作用を生ぜしめる機能などが付与されている。きわめて使用範囲の大きい高級なルーチンである。

### 8.2 サブルーチン

#1101 (出入力サブルーチン): 2 進数  $\leftrightarrow$  10 進数変換, (タイプアウトルーチンを含む)

#1202: 三角関数計算ルーチン (開平方ルーチンを含む)

#1203: 直角座標  $\rightarrow$  極座標変換ルーチン

#1204: 直線的内挿法計算ルーチン

#1205: 複素数演算ルーチン

#1206:  $X^m$  計算ルーチン

#1207: 対数関数 ( $\log_{10}$ ,  $\log_e$ ) 計算ルーチン

#1208: 指数関数ルーチン

MAISIE: Matrix Inversion and Simultaneous Eq 15

元までできて専用の出入力ルーチンをも含む

Polynomial: 17 次までの高次方程式の複素根の計算ができる。専用の出入力ルーチンを含む

常微分方程式の解法ルーチン: Runge Kutta 法によるもの

### 8.3 その他のルーチン

ダブルプレジジョンフローティングポイントオペレーションルーチン:



4100X	}	入力ルーチン 10 進→2 進数変換
4200X		
4500X		
4300X	開平算 Arcsine, Arccos 計算ルーチン	
4400X	加減算, 乗除算ルーチン	
4600X	Sin, Cos, Tan 計算ルーチン	
4700X	Arctangent 計算ルーチン	
5100X	}	出力ルーチン 2 進→10 進数変換および タイプアウトルーチン
5200X		
5300X		

DIMPLES (ダブルインターメデュート マルチプレックス システム)

フローティングポイントのサブルーチンを多数集めてお  
のおのを取り出して使ったり諸関数の作表に便利にしたも  
の。

## 9. 実際の計算例解説

$$1 < F < 2; 90 < K < 300; 90 < m < 300; 50 < n < 150 \dots (9.1)$$

なる範囲の F, K, m および n の任意の値について

$$\frac{(n+460) \cdot (F^{0.286} - 1)}{\frac{m+K}{2} - n} \dots (9.2)$$

の値を計算し, これを%でタイプアウトすること. もし 100%  
をこえる場合にはいずれも 100 とタイプアウトすること.

解説

この問題の計算内容は

$$T = 100 \times \frac{(n+460) \cdot (F^{0.286} - 1)}{\frac{m+K}{2} - n} \dots (9.3)$$

なる T を求めることであり, もし右辺の第 2 項が 1 をこえる  
場合には, それを判別して別の書式 (すなわち 100 なる一定の  
書式) でタイプアウトすることも要求されている.

[注] タイプアウト書式 (横に何ワードタイプしてキャリ  
ジレターンを行なうかなどの) の制御のことをフォーマット  
コントロールという. これもプログラム内で行なうことがで  
きる.

この計算を遂行するための全体のルーチンに必要となるサブ  
ルーチンを列挙すると次のようになる.

- (1) 式(9.1) に示されたデータを適当な形で機械に記憶さ  
せるためのデータインプットルーチン.
- (2)  $F^{0.286}$  を計算するための対数関数サブルーチン.
- (3)  $F^{0.286}$  を計算するための指数関数サブルーチン.
- (4) 機械内部演算のための 10 進数→2 進数変換サブルー  
チン.
- (5) タイプアウトの前段階としての 2 進数→10 進数変換  
サブルーチン.
- (6) 10 進数に変換された結果のタイプアウトのための出  
力サブルーチン.
- (7) (2)~(6) の計算の流れを制御するためのメインルー  
チン.
- (8) (1)~(7) の各サブルーチンを適当な記憶場所に配置  
するためのローディングルーチン.

表 9.1  $T = 100 \times \frac{(n+460) \cdot (F^{0.286} - 1)}{\frac{m+K}{2} - n}$  の計算とタイプアウト Line 00 データ入力ルーチン

Loc	P	T or LK	N	C	S	D	Bp	Note	Loc	P	T or LK	N	C	S	D	Bp	Note		
00		03	03	0	23	31		Clear	74		74	74	0	28	31		Ready Test $\xrightarrow{CVA}$ No		
03		04	06	4	26	23		0=(PN <sub>01</sub> )→23.00.01	75		72	69	6	23	24		Yes J (23.00) $\xrightarrow{CVA}$ MQ <sub>1</sub>		
06		08	08	0	12	31		Gate Type in (K) K=172	69		68	85	0	24	23		0=(MQ <sub>0</sub> )→23.00		
08		08	08	0	28	31		Ready Test $\xrightarrow{CVA}$ No	85		24	02	0	26	31		Shift P=12 for (F) F...SF1		
09		08	07	6	23	24		Yes J (23.00) $\xrightarrow{CVA}$ MQ <sub>1</sub>	02		03	04	0	24	25		(MQ <sub>1</sub> )→ID <sub>1</sub>		
07		04	10	4	26	23		0=(PN <sub>01</sub> )→23.00.01	04		52	58	0	00	28		Ret. Comd=(00.52)→ARc		
10		12	13	0	12	31		Gate Type in (m) m=183	58	W	86	46	2	21	31		Mark & N.C. 02.46		
13		32	48	0	26	31		Shift P=16 for (K) K...SF=3	86		88	91	0	24	20		(MQ <sub>0</sub> )=Bi. Fr. with Dec. SF3→20.00		
48		49	50	0	24	25		(MQ <sub>1</sub> )→ID <sub>1</sub>	91		93	90	0	29	31		Overflow→Test [F store		
50		52	55	0	00	28		Ret. Comd=(00.52)→ARc	90		92	93	1	22	28		(22.00)=K $\xrightarrow{+}$ ARc		
55	W	60	46	2	21	31		Mark & N.C. 02.46 [K store	93		94	99	1	22	29		(22.02)=m $\xrightarrow{+}$ AR+		
60		64	66	0	24	22		(MQ <sub>0</sub> )=Bi. Fr. with Dec. SF3→(22.00)									(AR) $\xrightarrow{+}$ (AR) <sub>c11</sub>		
66		68	66	0	28	31		Ready Test $\xrightarrow{CVA}$ No	99		U0	U1	1	28	28		(AR) <sub>c11</sub> →ID <sub>1</sub>		
67		64	65	6	23	24		Yes J (23.00) $\xrightarrow{CVA}$ MQ <sub>1</sub>	U1		U3	U5	0	28	25		Shift P=1→Left		
65		64	68	0	24	23		0=(MQ <sub>0</sub> )→23.00	U5		02	01	0	26	31		(K+m)/2→22.03		
68		70	71	0	12	31		Gate Type in (n) n=96	01		03	05	0	25	22		(20.02)=n $\xrightarrow{-}$ ARc		
71		32	U4	0	26	31		Shift P=16 For (m) m...SF=3	05		06	11	3	20	28		(K+m)/2→(22.03) $\xrightarrow{-}$ AR+		
U4		U5	U6	0	24	25		(MQ <sub>1</sub> )→ID <sub>1</sub>	11		15	16	1	22	29		D= $\frac{K+m}{2}$ -n=(AR) $\xrightarrow{+}$ 22.01		
U6	W	52	53	0	00	28		Ret. Comd=(00.52)→ARc	16		17	18	1	28	22		(00.19)=460 $\xrightarrow{+}$ ARc		
53		62	46	2	21	31		Mark & N.C. 02.46 [m store	18		19	20	1	00	28		n=(20.02) $\xrightarrow{+}$ AR+		
62		66	72	0	24	22		(MQ <sub>0</sub> )=Bi. Fr. with Dec. SF3→22.02	20		22	23	1	20	29		460+n=(AR)→00.24		
72		72	72	0	28	31		Ready Test $\xrightarrow{CVA}$ No	23		24	26	1	28	00		Overflow?		
73		72	70	6	23	24		Yes J (23.00) $\xrightarrow{CVA}$ MQ <sub>1</sub>	26		28	29	0	29	31		No J Mark & N.C. 04.89		
70		68	80	0	24	23		0=(MQ <sub>0</sub> )→23.00	29	W	40	89	4	21	31		Yes J Halt		
80		82	83	0	12	31		Gate Type in (F) F=1265	30		31	00	0	16	31				
83		32	12	0	26	31		Shift P=16 For (n) n...SF3											
12		13	14	0	24	25		(MQ <sub>1</sub> )→ID <sub>1</sub>											
14		52	56	0	00	28		Ret. Comd=(00.52)→ARc	52		49	48	0	20	31		Return from (Dec. Bi. S.R.) at wot=47		
56	W	64	46	2	21	31		Mark & N.C. 02.46 [n store	V19								Type 46000000...Decimal		
64		66	74	0	24	20		(MQ <sub>0</sub> )= Bi. Fr. with Dec. SF3→20.02											
Check Loc. J																		21	22
49		50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67
76		76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93
U2		U3	U4	U5	U6	U7	U8	U9	U10	U11	U12	U13	U14	U15	U16	U17	U18	U19	U0
[ Check Sum—UWUX18V																			



表 9.2 データインプットルーチンのフローダイアグラム

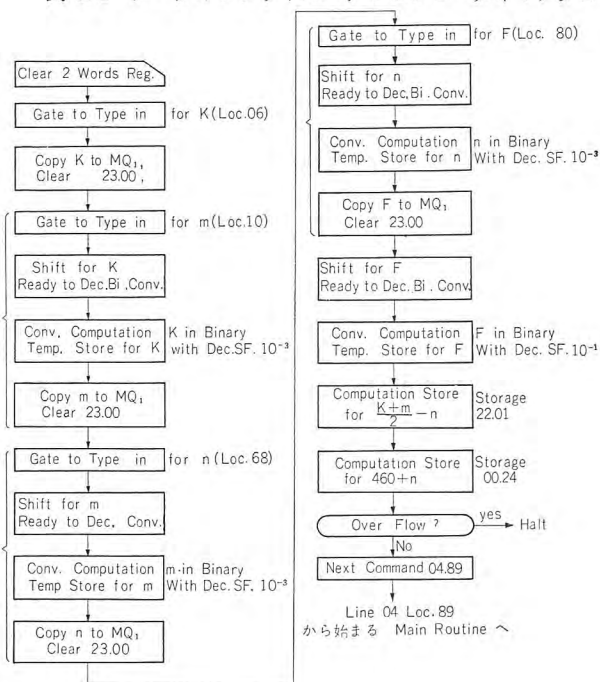


表 9.4 メインルーチンのフローダイアグラム

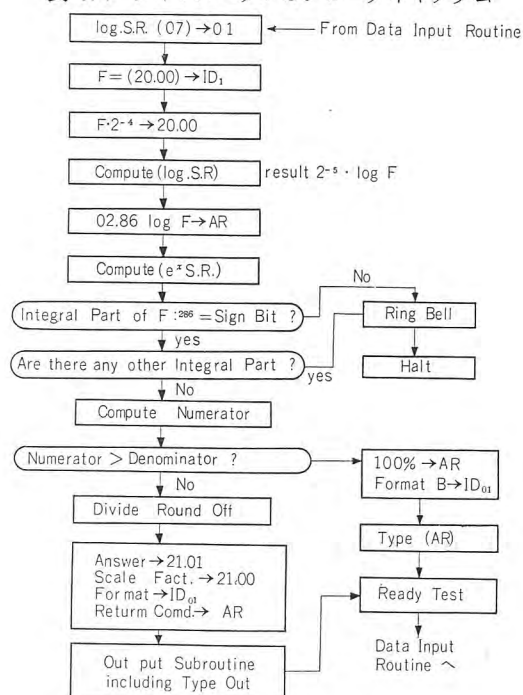


表 9.3  $T=100 \times \frac{(n+460) \cdot (F^{0.286}-1)}{\frac{m+K}{2}-n}$  の計算とタイプアウト

Line 04 メインルーチン

Loc	P	T or LK	N	C	S	D	Bp	Note	Loc	P	T or LK	N	C	S	D	Bp	Note																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
89	U	90	92	0	07	01		log. S.R.=(07) → 01	U4		03	04	1	20	29		(20.03) → AR.																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
92		96	99	6	20	25		F=(20.00) → ID <sub>1</sub>	04		06	10	0	22	31		(AR) has sign?																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
99		U1	01	0	04	24		.U000000=(.04.U1) → MQ <sub>1</sub>	10		26	31	0	04	28		No J = Pos. 100%=(04.26) → AR																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
01		06	09	0	24	31		Mult (6 <sub>out</sub> )	31		44	48	4	04	25		Format Ⓢ → ID <sub>01</sub>																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
09		11	12	0	26	28		2 <sup>-4</sup> . F=(PN <sub>1</sub> ) → ARc	48		02	05	4	25	03		Format=(ID <sub>01</sub> ) → 03.02.03																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
12		16	27	0	28	20		2 <sup>-4</sup> . F=(AR) → 20.00	05		07	50	0	08	31		Type (AR)																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
27		29	85	0	04	20		-.0000004=(04.29) → 20.01	11		14	17	0	23	31		Yes J =Neg. Clear																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
85		96	U5	0	04	28		Ret. Comd=(04.96) → ARc	17		21	28	0	22	25		Denominator=(22.01) → ID <sub>1</sub>																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
U5	W	03	00	1	21	31		Mark & N.C. → 01.00 (log. S.R.)	28		31	33	0	20	26		Numerator=(20.03) → PN <sub>1</sub>																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
03		06	08	6	04	25		.286=(04.06) → ID <sub>1</sub>	33		57	91	1	25	31		Divide																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
08		09	13	0	20	24		2 <sup>-5</sup> . log F=(20.01) → MQ <sub>1</sub>	91		92	93	0	24	28		(MQ <sub>0</sub> ) → ARc <sup>11</sup>																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
13		56	73	0	24	31		Mult	93		95	97	1	04	29		Round O..																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
73		75	49	0	26	28		.286 log F=(PN <sub>1</sub> ) → ARc	97		05	07	0	28	21		Round Quotient → 21.01																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
49		52	57	0	28	20		" " =(AR) → 20.00	07		32	34	0	04	21		S.F.=(04.32) → 21.00																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
57	U	58	64	0	08	01		e <sup>2</sup> S.R.=(08) → 01	34		36	38	4	04	25		Format Ⓢ → ID <sub>01</sub>																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
64		96	U6	0	04	28		Ret. Comd=(04.96) → ARc	38		40	42	0	04	28		Return Comd.=(04.40) → ARc																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
U6	W	15	00	1	21	31		Mark & N.C. → 01.00 (e <sup>2</sup> S.R.)	42	W	50	U6	2	21	31		Mark & N.C. 02.U6 (Out. S.R.)																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
15		16	18	4	24	28		(MQ <sub>1</sub> ) <sup>CH=4</sup> → ARc (to pick up Sign Bit)	50		50	50	0	28	31		Ready Test																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
18		20	20	0	22	31		(AR) has sign?	51	W	60	00	0	21	31		N.C. 00.00																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
20		21	24	0	17	31		No J pos. Ring Bell	V06								28600000																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
24		26	21	0	16	31		Halt	Y95								00000495																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
21		22	16	2	28	28		Yes J Neg   (AR)   → ARc	Y96	03	02	4	20	31																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
16		18	19	0	28	27		(AR) non Zero?	Y40	39	38	4	20	31																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
19		20	22	0	24	20		No J = 0 (MQ <sub>0</sub> ) = F <sup>0.286</sup> - 1 → 20.00	Z29								-0000004																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
22		24	30	6	00	25		460+n=(00.24) → ID <sub>1</sub>	ZU1								u000000																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
30		32	35	6	20	24		F <sup>0.286</sup> - 1 = (20.00) → MQ <sub>1</sub>	Z36								1000000																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
35		56	94	0	24	31		Mult	Z37								-803007y																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
94		95	98	0	26	20		(PN <sub>1</sub> ) = Numerator → 20.03	Z44								8000000																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
98		U1	U2	2	22	28		Denominator  =  (22.01)  → ARc	Z45								0030074																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
U2		U3	U4	3	28	28		(AR) → ARc	Z26								1000000																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
									Z32								-zzzzzzzz																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
Check Loc.		25	0	X	2	X	X	X	X	X	X	X	X	X	14	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

以上合計 8 個のサブルーチンが必要となるが (2), (3), (4), (5), (6), (8) の 6 個のサブルーチンは絶えず使用されるものとして G15D の付属ルーチンとして作成されており、必要な場合には適当な操作で複製可能 (セン孔テープの複製ができるようになっている。) であるので、この問題特有のものとしてプログラムしなければならないルーチンは (1) と (7) の 2 個だけである。

まず (1) と (7) のプログラムは、表 9.1, 9.3 に示したように作成し、表 9.5, 9.6 に示したようにタイプライタ操作によるプログラムブレバレーション (PPR を記憶させてその作用によりブレバレーションが可能である。)を行ないそれぞれのテープの作成を行なう。

つぎに (4), (5), (6) のルーチンは入出力サブルーチンとしてまとめた 1 本のテープとしてまた (2), (3), (8) はそれぞれ



## 技術解説

れ単独のテープとして複製可能となっているので合計6本のテープが作成されることになる。

表 9.5 データインプットルーチンのプログラム  
プレパレーション (PPR—Standard による)

P	PPR テープ読み込み
p	
x 00 s	L18 クリア (ここに以下の命令をはいる)
y 00 s	(1800) 呼出 PPR ランゲージの命令を入れる準備
• 00	030302331 s • 00 は自動タイプアウト 030302331 を打込む
• 03	040642623 s • 03 は自動タイプアウト 040642623 を打込む
• 06	080801231 s
• 07	080802831 s
• 09	080762324 s
• 10	041042623 s
• 13	121301231 s
• 13	324802631 s
• 48	495002425 s
• 50	525500028 s
• 55	w604622131 s
• 46	y 60 s
• 60	646602422 s
• 66	686602831 s
• 67	..... °
	..... °
	..... °
• 01	030502522 s
• 04	061132028 s
• 11	151612229 s
• 16	171812822 s
• 18	192010028 s
• 20	222312029 s
• 23	242612800 s
• 26	282902931 s
• 24	w408942131 s
• 89	y 30 s
• 30	310001631 s
• 00	• 03032zz
y 52 s	前命令の N が 00 でここにすでに内容があるからそれをマシンランゲージでタイプアウト
• 52	494802031 s
• 48	• 3232319
0v19 s	前命令の N の位置にある内容がマシンランゲージでタイプアウト
• 19	(1819) に端数 10 進数を入れる準備
	• 75w29z5 • 19 は自動的にタイプアウト、46000000 は打込む それを 2 進数に変換したものがマシンランゲージで出ている。
x 06 s	L18 の内容の Check sum をタイプアウトし、L18 の全内容をテープにパンチさせる。
uuwx18v	打出した Check sum

作成されたテープは次のような順序ではり合わせてまとめて1本のテープとする。

表 9.6 メインルーチンのプログラムプレパレーション  
(PPR—Standard による)

P	PPR のテープ読み込み
p	
x 00	L18 をクリア (ここに以下の命令をはいる)
y 89 s	最初の命令の番地を呼出す
• 89	u909200701 s • 89 は自動的タイプアウト u909200701 は打込む
• 92	969962025 s • 92 は自動的タイプアウト 969962025 は打込む
• 99	u10100424 s
• 01	060902431 s
• 09	111202628 s
• 12	162702820 s
• 27	298500420 s
• 85	96u500428 s
• u5	w030012131 s
• 00	y 03 s
• 03	060860425 s
• 08	091302024 s
• 13	567302431 s
• 73	..... °
	..... °
	..... °
• 50	505002831 s
• 51	w600002131 s
• 00	0v06 s
• 06	286000000 s
0v96 s	10 進端数を 06 番地へ入れる準備
• 96	00000495 s • 49574vx 286000000 を打込む。変換された数がマシンランゲージでタイプアウト
y96 s	• 0000531
• 96	030242031 s
• 02	y 40 s
• 40	392842031 s
• 38	z29 -0000004 s
• 29	zu1 u000000 s
• u1	z39 1000000 s
• 36	z37 -803007y s
• 37	z44 8000000 s
• 44	z45 0030074 s
• 46	z26 1000000 s
• 26	z32 -zzzzzzz s
x 06 s	L18 の内容の Check sum をタイプアウトし、L18 の全内容をテープにパンチするための指令
• 616z2w0	タイプされた Check sum

表 9.7 計算結果

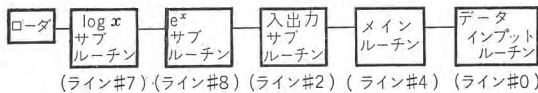
K	m	n	F	T (Answer)	K	m	n	F	T (Answer)
172	s183	s96	s1.005	s 974	172	s183	s96	s1.375	s 65.051
172	s183	s96	s1.015	s 2.911	172	s183	s96	s1.385	s 66.602
172	s183	s96	s1.025	s 4.835	172	s183	s96	s1.395	s 68.144
172	s183	s96	s1.035	s 6.745	172	s183	s96	s1.405	s 69.678
172	s183	s96	s1.045	s 8.642	172	s183	s96	s1.415	s 71.205
172	s183	s96	s1.055	s 10.527	172	s183	s96	s1.425	s 72.724
172	s183	s96	s1.065	s 12.398	171	s183	s96	s1.435	s 74.235
172	s183	s96	s1.075	s 14.257	172	s183	s96	s1.445	s 75.739
172	s183	s96	s1.085	s 16.104	172	s183	s96	s1.455	s 77.236
172	s183	s96	s1.095	s 17.939	172	s183	s96	s1.465	s 78.725
172	s183	s96	s1.205	s 37.372	172	s183	s96	s1.475	s 80.207
172	s183	s96	s1.215	s 39.075	172	s183	s96	s1.485	s 81.682
172	s183	s96	s1.225	s 40.768	172	s183	s96	s1.495	s 83.149
172	s183	s96	s1.235	s 42.451	172	s183	s96	s1.505	s 84.610
172	s183	s96	s1.245	s 44.124	172	s183	s96	s1.515	s 86.064
172	s183	s96	s1.255	s 45.788	172	s183	s96	s1.525	s 87.511
172	s183	s96	s1.265	s 47.442	172	s183	s96	s1.535	s 88.951
172	s183	s96	s1.275	s 49.087	172	s183	s96	s1.545	s 90.384
172	s183	s96	s1.285	s 50.723	172	s183	s96	s1.555	s 91.811
172	s183	s96	s1.295	s 52.350	172	s183	s96	s1.565	s 93.231
172	s183	s96	s1.305	s 53.968	172	s183	s96	s1.575	s 94.645
172	s183	s96	s1.315	s 55.576	172	s183	s96	s1.585	s 96.053
172	s183	s96	s1.325	s 57.177	172	s183	s96	s1.595	s 97.454
172	s183	s96	s1.335	s 58.768	172	s183	s96	s1.605	s 98.849
172	s183	s96	s1.345	s 60.351	172	s183	s96	s1.615	s 100.000
172	s183	s96	s1.355	s 61.926	172	s183	s96	s1.625	s 100.000
172	s183	s96	s1.365	s 63.493	172	s183	s96	s1.635	s 100.000



付 録 1 研究試作的に発表されている自動電子計算機

概要 計算機名	年/国	数 表 示 (ケタ)	記憶装置容量 (語)	乗算速度	主 要 部 品 と 数	付 記
ENIAC	1949 米	Deci 10 ケタ	Vac tube 130	2.8 ms	Tube Relay 18800 1500	Eckert Mauchly at Aberdeen. Md. 世界最初の電子計算機 (Program Store でない)
EDSAC	1949 英	Bin 34 ビット	Acoust Dely 512	6.0 ms	Tube Xtal 4500 3600	Wilkes at Cambridge Univ. 世界最初のプログラム記憶式電子計算機
Wirl wind	1950 米	Bin 16 ビット	Elect. Static 2048	0.06 ms	Tube Relay Xtal 6800 1800 22000	Forrester その他, at MIT. クロックパルス 4 MC で最高速を目標としたもの
SEAC	1950 米	Bin 44 ビット	Acoust. E. S 各 512	2.6 ms	Tube Xtal 1290 15800	National Bureau of Standard
UNIVAC—I	1951 米	Deci 11 ケタ	Acoustic Dely 1000	2.2 ms	Tube Relay Xtal 5600 300 18000	Eckert Mauchly (R. R. 社) 商品化された世界最初のもの
Manchester Comp	1951 英	Bin 40 ビット	Elect. Static 128	40 ms 3.4 ms	Pent Tube Diode Tube 1800 2000	Manchester Univ.
Harvard Mark—III	1951 米	Deci 16 ケタ	Magn. Drum 200	13.2 ms	Tube Relay Xtal 5000 1500 1300	Harvard Univ.
EDVAC	1952 米	Bin 44 ビット	Acoust. Dely 1024	2.8 ms	Tube Xtal 3563 10000	Mauchly, Eckert, Von Neuman (Univ Pennsylv)
IAS Comp	1952 米	Bin 40 ビット	Elect. Static 1024	10 ms 0.4 ms	Tube 2300	Inst. Advanced Study Princeton von Neuman Goldstnie
ILLIAC	1952 米	Bin 40 ビット	Elect. Static 1024	0.73 ms	Vac Tube 不明	Univ of Illinois
Pilot ACE	1952 米	Bin 32 ビット	Acoust Dely 360	2 ms	Vac Tube 不明	Physical Labo.

IBM—CPC, UNIVAC—60, UNIVAC 120, IBM—604, IBM—607 などは真の意味での自動計算機ではないので、本表から除外した。



〔注 1〕 ロードとはローディングルーチンのテープのことでありこのテープの複製に際しては他の 5 本の内容を、この問題についてはそれぞれ ( ) で示したラインへと分配記憶させるようなものとして複製できるようになっている。

このうち #7, #8 のラインはコマンドラインではない。したがって Log  $x$  または  $e^x$  の計算段階ではこれらの内容を適当なコマンドラインへ移すことによって計算を遂行するようにメインルーチンのプログラムができています。

(メインルーチン Loc 89, Loc 57 の命令参照)

〔注 2〕 表 9.1, 表 9.3 下欄の check sum とはこのようにしてできたプログラムを特性づけるためのコードである。これは命令の 2 進数表示を数値とみなして加算し (オーバフ

ロを無視して) できた結果の 2 進数をヘキサデシマル記号で示したものである。できたテープを計算するべく読み込ませるにあたって check sum の値をタイプアウトさせることが可能であり、そのタイプアウト値が check sum コードと一致しているかによって正確な入出力操作ができていのかどうかの検証を行なうことが可能である。

(1 ビットでも読み違いがあると誤まった数がタイプアウトされることになる)

1 本のテープにまとめられた総合計算テープを改めて機械に読み込ませると、ここでいよいよ正式に高速度計算ができることになる。

K,  $m$ ,  $n$ , F のいろいろな値についての計算結果を表 9.7 に示す。これら 4 個の数値の 54 組の組合わせについて式 (9.3) のような計算と作表が、タイピストがタイプライタ 1 ページを打つのとほとんど同一速度でできることは従来の電動計算機とは隔絶したものといえよう。

は隔絶したものといえよう。

たいていの場合電子回路的計算はきわめてわずかな時間ですみ、大部分の時間は入出力操作に支配される場合が多い。ただしこのような高速計算が可能となる陰にはプログラムの貴重な頭脳労働があることを忘れてはならない。

## 10. む す び

自動電子計算機について主として技術計算に使用の立場で解説した。

付 録 3 日本で実用運転にはいった自動電子計算機

概要 計算機名	年/国	数 表 示 (ケタ)	記憶装置容量 (語)	乗算速度	主要部品と数	付 記
FUJIC	1956 富士写真	Bin 32 ビット	Acoust. Dely 255	2.6 ms	真 空 管	固定小数点式
ETL—4	1957 電 試	Deci 5 ケタ	Magn. Drum 1000	4.8 ms	トランジスタ	固定小数点式
MUSASHINO—I	1958 通 研	Bin 39 ビット	Magn. Core 256	16.5 ms	パラメトロン	固定小数点式
PC—I	1958 東 大	Bin 35 ビット	Magn. Core 256	4.2 ms	パラメトロン	固定小数点式
HIPAC—I	1958 日立中研	Bin 37 ビット	Magn. Drum 1024	19 ms	パラメトロン	固定小数点式
NEAC—1101	1958 日 電	Bin 31 ビット	Magn. Core 256	8 ms	パラメトロン	浮動小数点式

FACOM (富士通信機) は真の自動計算機とはいえないので本表から除いた。  
ETL—4 を商品化した NEAC—2201 (日電) がごく最近発表された。



## 技術解説

電子計算機は人工頭脳といわれるが、結局は人間の頭脳から生れたものであり、人間の頭脳によって“頭脳”らしき動作ができる機械ということができる。図 5.1 (b) に示した(人間)は機械のオペレータであり、その背後にはプログラマとアナリストのあることを忘れてはならない。人工頭脳はやはり人間の

の頭脳に支配される奴隷的頭脳といえよう。しかしながらこの奴隷的頭脳によって、人間の頭脳だけではどうにもならなかった数値処理が簡単に行なわれるようになってきたことは文明進歩の形的一端を物語るものであろう。

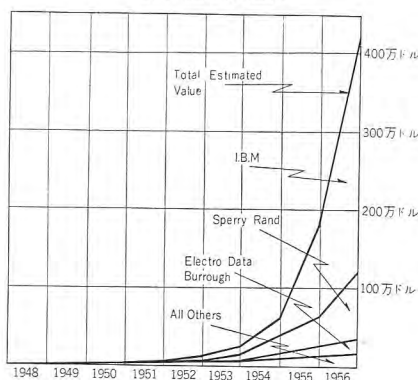
付録 2 現在米国で商品化されているおもなる自動電子計算機

性能 製品	Price	Equipped with	Arithmetic & Logic			Internal Storage				Magnetic Tape				Punched Card		Paper Tape		Line Print	
	Alpha-betic Base	MMMP P ... CDTCT ORAAA RUPRP EMEDE	Mode	Register	Mult Speed	High Speed	Speed	Normal Speed		Speed	Access	Block	Reel	Input	Output	Input	Output	Speed	Buf-fering
	Speed/Gill		Code	Add Speed	Div Speed	Word	Min Acc	Device	Min Acc	word	time	length	Capacity	Speed	Speed	Speed	Speed	/word	
			Radix P.			Device W,CAP	Rand Acc	Word CAP	Rand Acc	Start Stop time				Speed/word	Speed/word	Speed/word	Speed/word		
LGP-30 (Royal Precision Corp)	(Low) 1 word 36 ms	○ ○	直列 PB 端数	30 bit 2.0 ms	19.0 ms	30 bit M.D 4096	0.26 ms 8.5 ms									800 ms	800 ms		
G15-D (Bendix Corp)	(Low) 1/2 word 30 ms	○ ○ ○ ○	直列 PB 端数	57 bit 2.5 ms	20.0 ms	29 bit M.D 16	0.27 ms 0.54 ms	M.D 2160	0.27 ms 14.5 ms	18.5 ms 6.0 ms	46.5 ms	4~104	300000	850 ms	1000 ms	50 ms	170 ms		
Elecom-120 (Underwood Corp)	(Low) 2 for 1 50.5 ms	○ ○ ○	直列 E3 端数	10 digit 6.7 ms	23.4 ms	10 digit M.D 50	0.6 ms 1.7 ms	M.D 1000	0.6 ms 8.3 ms	37.5 ms 100.0 ms	144.4 ms	50	100000			1000 ms	1000 ms		
Elecom-125 with File Process (Underwood Corp)	(Moderate) 2 for 1 50.5 ms	○ ○ ○ ○	直列 E3 端数	20 digit 6.7 ms	23.4 ms	10 digit A.D 100	0.9 ms 0.9 ms	M.D 4000	0.6 ms 8.3 ms	1.7 ms 5.0 ms	18.4 ms	Up to 10	100000	45 ms	100 ms	28 ms	170 ms	6 ms	Fair
Datatron 205 (Burroughs Corp)	(Moderate) 2 for 1 26.3 ms	○ ○ ○ ○	直並列 CD 端数	20 digit 1.8 ms	10.5 ms 13.5 ms	10 digit M.D 80	0.085 ms 0.085 ms	M.D 4000	0.08 ms 8.5 ms	2.3 ms 6.0 ms	8.3 ms 9.6 ms	20	400000 2000000	50 ms	100 ms	22 ms	170 ms	35 ms	Good
IBM-650 (IBM)	(Moderate) 2 for 1 27.6 ms	○ ○ ○	直並列 2 of 5 整数	20 digit 1.6 ms	13.0 ms 16.9 ms	10 digit M.D 2000	0.096 ms 2.5 ms	M.Disc 600000	20.8 ms 565.0 ms	0.7 ms 10.3 ms	13.7 ms	Up to 60	230000	50 ms	100 ms			35 ms	Good
UNIVAC-File (Remington Rand Corp)	(High) 1 for 1 63.1 ms	○ ○ ○ ○	直列 E3 整数	22 digit 10.9 ms	41.3 ms 54.0 ms	11 digit M.D 990	0.5 ms 3.0 ms	M.D 15000	1.5 ms 18.6 ms	2.0 ms 5.0 ms	13.0 ms	10	72000	75 ms	75 ms	50 ms	170 ms	16 ms	Good
IBM-704 (IBM)	(High) 3 for 2 0.556 ms	○ ○ ○ ○	並列 PB 整数	72 bit 0.024 ms	0.24 ms	35 bit M.C 4096	0.012 ms 0.012 ms	M.D 8190	0.1 ms 12.1 ms	0.4 ms 10.0 ms	10.4 ms	Variable	380000	10 ms	25 ms			55 ms	Fair
UNIVAC-SCIENTIFIC (R. R. Corp)	(High) 3 for 2 0.435 ms	○ ○ ○ ○ ○	並列 PB 整数	71 bit 0.024 ms	0.27 ms 0.486 ms	35 bit M.C 4096	0.008 ms 0.008 ms	M.D 16384	0.04 ms 17.0 ms	0.5 ms 5.0 ms	5.5 ms	120	326000	21 ms	21 ms	30 ms	100 ms	20 ms	Fair
UNIVAC-II (R. R. Corp)	(High) 1 for 1 3.9 ms	○ ○ ○	直並列 E3 端数	22 digit 0.2 ms	1.9 ms 3.7 ms	11 digit M.C 2000	0.04 ms 0.04 ms			0.6 ms 15.0 ms	15.8 ms	60	240000	45 ms	85 ms			8 ms	Good
IBM-705 (IBM)	(High) 1 for 1 4.4 ms	○ ○ ○ ○	直並列 CD 整数	Variable to 255 digit 0.2 ms	2.4 ms 15.8 ms	Variable M.C 2000	0.17 ms 0.17 ms	M.D 6000	0.4 ms 8.4 ms	0.67 ms 10.0 ms	10.7 ms	Variable	230000	40 ms	100 ms			10 ms	Good

注 1 Gill: つぎの計算全体を遂行するに要する時間 (ms)  
 $A+B=C$  Store C  
 $C+D+E=F$  Store F  
 $G \times H=K$  Store K  
PB: Pure Binally Coding  
E3: Excess 3 Coding  
2 of 5: 2 out of 5 Coding  
CD: Coded Decimal Coding  
MD: Magnetic Drum  
MC: Magnetic Core  
AD: Acoustic Delay Line

注 2 付録 2~5 は NED CHAPIN 著“An Introduction to Automatic Computers”の資料を流用させていただいた。

付録 4 米国で使用されていると推定される自動電子計算機の評価格



付録 5 米国で使用されている自動電子計算機の台数

	1950 前後	1951 前後	1952 前後	1953 前後	1954 前後	1955 前後	1956 前後	1957 前後
試作 自 成 機	4 6	9 11	17 20	33 39	45 47	49 49	50 51	
UNIVAC-I	...	1 1	3 4	6 8	10 14	19 26	32 39	
IBM-701	...	...	...	1 4	8 12	16 19	19 19	
UNIVAC SCIENTIFIC	...	...	...	1 2	3 5	10 14	14 19	
ELECOM-120	...	...	...	...	2 3	4 5	6 8	
DATATRON	...	...	...	...	7	13 20	34 56	
IBM 650	...	...	...	...	1	72 184	351 566	
IBM 702	...	...	...	...	...	3 10	14 14	
G-15	...	...	...	...	...	1 4	10 25	
ELECOM 125	...	...	...	...	...	1	2 3	
IBM 704	...	...	...	...	...	1	17 32	
IBM 705	...	...	...	...	...	...	13 38	
LGP-30	...	...	...	...	...	...	7	

(34-3-2 受付)



## 最近の大きな直流負荷の需要に応じる半導体整流器

J. L. Boyer: Semiconductor rectifiers are ready for a bigger chunk of today's d. c. load. (Power, Nov. 1958, p. 82~86)

半導体整流器とよばれるゲルマニウムおよびシリコン整流器は直流電圧 10~450 V の電圧領域の大電流用整流器として昨今急速な発展をとげた。なかでも中電位の大電流を必要とする電気化学工業の電解用直流電源としてこの種整流器は高効率であること、運転保守費が在来の変流装置に比して少ないという優位点がある。この半導体整流器はその整流主回路結線方式としてはブリッジ結線方式が使用され、半導体整流単体の電圧、電流定格を負荷の特性に応じて合理的な数値として設計し、直列および並列に若干個を接続して所望の出力定格の直流電源を構成するものである。その場合 W 社で現在市販している標準

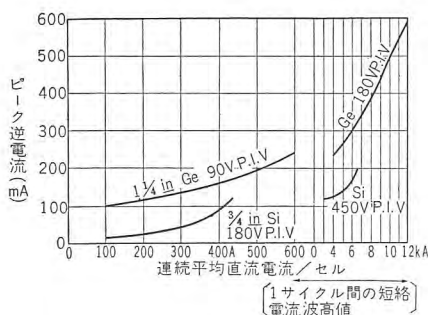


図 1 負荷状況下の Ge および Si-diode のせん頭逆電流——電流値の関係曲線  
Ge: ゲルマニウムダイオード  $\frac{1}{4}$  in のもの  
Si: シリコンダイオード  $\frac{3}{4}$  in のもの

の半導体整流体としてはゲルマニウムでは 400A/セル (平均電流値) を最大とし、シリコンでは 200A/セルを最大としている。P. I. V. 定格としては 50~400 V, 最近では 600 V まで製作されており、かつ短時間 200~1,200 V に耐えうるものが一般に使用されている。図 1 は上記の代表的な整流体 2 種のせん頭逆電流値——平均電流値/セル および短絡電流せん頭値/1 サイクルの関係曲線を示したものである。また図 2 は W 社の風冷式シリコンおよび水冷式ゲルマニウムならびにイグナイトロン整流器の総合効率を直流出力電圧を横軸として示した比較曲線

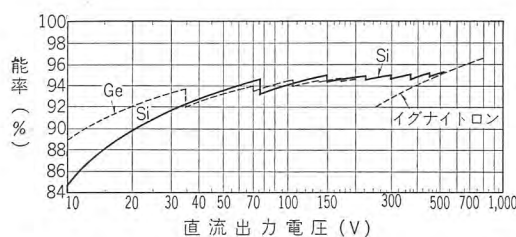


図 2 電圧制御ができるという条件付のゲルマ、シリコンイグナイトロン整流器の総合効率——直流電圧特性曲線 (1958 年 11 月現在)

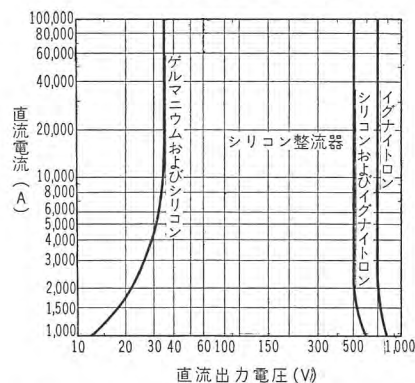


図 3 ゲルマニウム、シリコンおよびイグナイトロン整流器の使用される分野領域を示す。(1958 年 11 月現在の data)

表 1

Type of service	Voltage range	Most important characteristics	Other characteristics	Ratings
Electroplating	10~36V	initial investment	size and maintenance	5,000~20,000A
Anodizing	18~48V	"	maintenance	5,000~80,000A
Electrochemical (a) Low voltage	65~120V	Efficiency	maintenance	5,000~100,000A
(b) Medium voltage	120~500V	Efficiency	"	5,000~100,000A
(c) High voltage	500~1,000V	Efficiency	"	5,000~100,000A
Industrial	125~250V	maintenance	size	100, 150, 200, 300, 500, 750 kW
Mining	275~300V	initial investment	current and voltage capacity	300, 500 kW
Transportation	500~750V	Reliability	maintenance	750, 1,000, 1,500, 2,000, 3,000 kW
Furnace power supply	45~80V	Reliability		5,000~15,000A
Extremely high voltage	15,000~50,000V	Reliability	size	40,000V, 20A

## 交流発電機に組合わされたシリコン整流器

What's New in Engineering: Silicon Rectifiers Used in A-C Generator (Westinghouse Engineer, Vol. 19, No. 3, May. 1959, p. 85)



シリコン整流器はついに自動車の技師達が永年もっていた夢——エンジン近辺の高温で動作する整流器でコンパクトな交流発電機の出力を直流にすること——が実現された。

近い将来にはこの組合わせが自動車の標準部品になることは疑いないだろう。

近年自動車の電気設備はイグニッション、スタータやランプのほかにラジオ、ライタ、エアコンデショナなどを加えて発電機とバッテリーの負荷はますます増大している。またひんぱんにストップするバスや配達トラックでは現在の直流発電機ではなかなかバッテリーを充電する機会に恵まれない。この結果発電機の出力を増加させるために、エンジンがアイドルランニングしている時の発電機の回転数をますことは走行中にいちじるしくブラシを摩耗することになるし発電機を大きくすることは寸法と重量をますことになる。

交流発電機と整流器の組合わせはこれらの欠点を補ってくれる。整流子をシリコンダイオードとスリップリングに置きかえた構造では、スリップリングにはみぞがないし、わずかな励磁電流が流れるだけであるからブラシの摩耗はいちじるしく少なくなる。また早い速度で回転できることと、三相回路が使用できるから同じ重さでは直流発電機より大きい出力がえられ、エンジンがアイドルランニングしている時でも十分な充電を行なうことができる。

自動車のメーカは以前から交流発電機の利点を知っていたが問題は整流器にあった。それは静止機器で高温に耐えなければならぬから最初に考えられた亜酸化銅やセレン整流器では発電機と同じくらいのサイズが必要であった。

数年前から技術者達はシリコンダイオードで実験を重ねてきた。シリコンダイオードは小形で高温に耐えるから現在では三相全波回路に必要な6個のダイオードが発電機のケースに納められるまでに進歩した。間もなくシリコン整流器と交流発電機は市場にあるほとんどの自動車に十分な電流を供給できるようになるであろう。

(伊丹製作所 小林 凱訳)

## 鉱山用シリコン整流器変電車

What's New in Engineering: Portable Silicon-Rectifier Min Car (Westinghouse Engineer, Vol. 19, No. 3, May, 1959, p. 85)

シリコン整流器をつんだ移動電源車が今年、炭鉱の軌道で運転にはいった。これは坑内で用いられるもっとも新しい整流設備といえる。これは1mそこそこの高さで2両連結の変電車が500kWの直流を坑道のトロリ線へ供給している。

変電車のうち1両は変圧器をつみ、他の1両はシャ断器と風冷式のシリコン整流器をのせている。

シリコン整流器の特長はその前任者であるイグナイトロンとくらべたとき、非常に補助機器は少なくまた低い内部電圧降下

をもっていることである。高い効率を有していることは、電力を節約するだけでなく整流器を冷却するのに必要な空気の量が少なくてすむという利点をもたらしている。

(伊丹製作所 小林 凱訳)

## 炭酸ガス溶接用の新しい電源装置

Applications of Power: Welding (Westinghouse Engineer, Vol. 19, No. 1, Jan. 1959, p. 19)

新しい溶接法として工業面に広く応用され大きな利益をもたらしている炭酸ガス溶接に新しい電源供給装置が完成された。

この装置はこれらのガスシールド溶接において、溶けた金属が溶接棒から母機へ移り変わる状況を「電氣的機構」という角度から研究されたものである。

“ダイナミックリアクタ”と称するこの新しい電源供給装置はどんな定電圧溶接器にも、また棒の送り速度の一定のものにも用いることができるし、その構造はたいへんこじんまりとしていて可動部分がなく、2個のターミナルボックスでリード線を直列に接続できるようになっている。このリアクタを用いれば溶接電流の上昇がおさえられるために、低い溶接電流で使用できる。また熔融金属が溶接棒から母機へ移り変わる際の小滴(溶けた金属の玉)をより小さくすることができる。

このことはより安価な太い棒が使えることにもなるし、また溶け込みの有効深さの調節もできるのでCO<sub>2</sub>溶接では困難とされていた立向きや上向きの溶接も可能となった。この新しい方法を発展させたのは、CO<sub>2</sub>溶接では定説となっていたところの「アークの短絡を生じやすい熔融金属粒の生成を阻止するためには高い電流が必要である」という考え方に対して行なわれたものである。このような短絡が生じると定電圧の電源では非常に大きな電流が流れて、そこに大きい電磁力を生じ短絡した熔融金属をはじき飛ばしていわゆるスパッタとしてアークの外へ飛散させてしまう。

ダイナミックリアクタはこのような短絡大電流を抑制し、熔融金属を母機上の熔融池に円滑に移しかえるのに効力がある。自動、あるいは半自動の溶接装置へこの新リアクタを用いると溶接電流は1/2以下に減らすことができるし、あるいは現行のままの電流電圧送り速度ならば1サイズ大きな棒をそのまま使用することにもなるので、溶接棒の価格の節減は非常に大となる。また溶接電流を減小させられるので、今までこの溶接で実施できた範囲よりさらに薄い板の接合も可能である。

ダイナミックリアクタには大形と小形の2種類あって小形は150と300アンペアの二重定格で、使用率は100%公称寸法の材料に対しては半自動で、また薄板ならば自動半自動のいずれにも用いることができる。

大形は300と600アンペアの二重定格、使用率100%で高速自動溶接とか高電流の半自動溶接などに適用される。

(名古屋製作所 竹内友彦・今村善彦訳)





## ■ 工場直流電源用風冷式シリコン整流器完成

従来中容量の工場内直流電源としては主として電動発電機(M-G)に依存していた。大容量になるにしたがって水銀整流器が使用される傾向にあったが今回風冷式シリコン整流器を作って電動発電機(M-G)の代りにおくことになり、三菱造船に300 kW, 240 V, 1,250 A, 125% 2 時間, 200% 1 分間の出力定格のものを納入した。

以下これの仕様と特長を列記すれば次のとおりである。

### 仕様

#### 風冷式シリコン整流器

定格出力	300 kW 240 V 1,250 A
125%	(1,565 A) 2 時間
200%	(2,500 A) 1 分間
整流回路	三相全波整流回路
冷却方式	強制風冷式
外形寸法	900 mm × 885 mm × 1,700 mm (高さ)
全重量	720 kg
1 トレーの重量	16 kg

### 特長

1. 小形、軽量の完全静止器である。(図 1 参照)
2. シリコンダイオードの故障時といえども引出形のトレーを負荷時にひきさして取換え可能構造としたもので無停電運転を保証している。(図 2 参照)
3. 210 V 工場内所内電源に電圧調整装置とともに接続して 250 V の直流電源を出すことができる。
4. ブリッジ結線方式であり、220 V 工場内配線から変圧器なしで 240~280 V の直流電源をうることができる。
5. 能率は 95% 程度である。(300 kW 240 V 定格で)

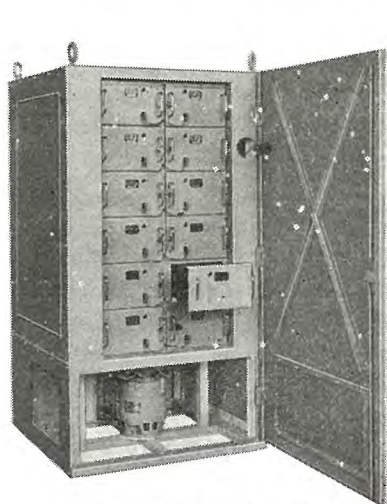


図 1 300 kW 240 V 1,250 A  
風冷式シリコン整流器外観

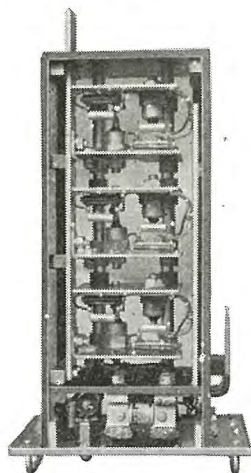


図 2 トレー内のシリコン  
ダイオード取付状況  
重量……………16 kg/1 t

## ■ 交直電車用シリコン整流器完成

シリコン整流体の製作技術の進歩により、P. I. V. の高いものが量産されるようになったので今までは主として、化学工業を始めとする低電圧分野に普及していたシリコン整流器は、その特性上電鉄変電所や交直電車の直流電源などの、高電圧用途にも注目を浴びるにいたった。

1,500 V 級のものとしては、すでに国鉄大井町変電所納入 1,000 kW 変電所用などがあるほか、600 V 級も近鉄玉川変電所納入 500 kW 変電所用が、回転変流機と並列運転にはいつている。

今回、交直電車用シリコン整流器を完成、工場試験も完了した。これは、仙山線で運転試験をしていた、イグナイトロン形交直電車の、イグナイトロン整流器装置を取りはずし、その代りとして床下に取りつける構造のもので、間もなく仙山線で長期運転試験にはいる予定である。

さきに、W 社製シリコン整流体を用いて、床上搭載のもので基礎試験を完了しており、国鉄としては、“交直電車はシリコン整流器”との方針を明らかにしている折から、これの長期試験は関係各方面の関心をひいている。

前回の基礎試験のものとの大きい相違は、(1) シリコン整流体として三菱電機製を使用していること。(2) 取付位置が床下であるような構造であること。の 2 点である。

機器の仕様は下記のとおりである。

- (1) シリコン整流器箱 ……………2 セット

シリコン整流体・分圧器・送風機・その他付属品を収めたもので、箱 2 セットをもって 1 組とする。

出力; 570 kW 直流電圧; 1,350 V 直流電流; 420 A  
定格; 連続定格 (過負荷に対しては特殊定格)  
形式; SF 形強制風冷式、床下設置形  
シリコン整流体; 三菱電機製 SR-107, 160 個  
寸法; 1,250 mm × 540 mm × 660 mm (高さ)  
重量; 450 kg (1 セット)

- (2) 高速度過電流継電器箱 ……………1 セット

MH 形高速度過電流継電器および計器用変流器各 1 個を収納している。

寸法; 790 mm × 350 mm × 660 mm (高さ)  
重量; 95 kg



シリコン整流器箱





高速度過電流継電器箱

## ■ 三菱金属鉱業（秋田，大阪）向け大容量シリコン整流器を受注

当社では、さきに化学工業用整流器として三菱化成黒崎工場および住友化学岡山工場へ、シリコン整流器を納入し好成績で運転中であるが、さらに三菱金属鉱業から秋田製煉所、大阪製煉所向けとして下記のシリコン整流器を受注した。

- 三菱金属鉱業、大阪製煉所向け  
1,200 kW 120 V 10,000 A シリコン整流器 2 台  
本器は銅電解用に使用されるもので現在まで当社で受注製作中のものに比しとくに変わった点はないが 2 台並行運転のため誘導障害防止のためトランスの結線を 1 号機を三角、2 号機を星形とした。

### 設備の内容

- 22 kV 三相 60 c/s 受電
- 1,200 kW 120 V 10,000 A 風冷式シリコン整流器
- 1,380 kVA 負荷時電圧調整器付三相油入自冷式変圧器
- 配電盤および器具

### 設備の特長

- シリコン整流器および配電盤は屋内に収納し、トランスその他は屋外とする
  - 直流側電圧 120 V—50 V であるが微調整を必要とするため可飽和リアクトルにて調整するようにしている。
- 同社、秋田製煉所向け  
4,500 kW 500 V 9,000 A シリコン整流器 1 台  
本器は化学用（亜鉛電解用）として使用電圧 500 V は本邦最初のものであり、従来イグナトロンで行なわれてきたものであるがシリコンダイオードの性能の向上と保護方式の改善によりかかる高電圧の使用にもシリコンの使用が不安なくできるようになり、今後シリコンの応用分野がますます広がったことを実証する意味でも非常に有意義であり納入後の成果が注目されている。

### 設備の内容

- 66 kV 三相 50 c/s 受電
- 4,500 kW 500 V 9,000 A 風冷式シリコン整流器
- 5,340 kVA 負荷時電圧調整器付油入自冷式変圧器  
66 kV / 464—  
268—
- 可飽和リアクトル
- 配電盤および器具

### 設備の特長

- 直流出力電圧 500 V のためダイオード 4 個を直列に接続してある。
- 同社大阪製煉所同様シリコン本体配電盤を建屋内に入れそれ以外はすべて屋外用としている。
- 直流出力電圧は 500—190 V のため、トランス一次側を  $\Delta$ -Y に切換えかつ二次側電圧も可飽和リアクトルで段階調整を行ない連続的に調整するようになっている。

## ■ 東京電力南東京変電所向け 260 MVA 主要変圧器ほか受注

東電では横須賀火力の発電にそなえ南東京変電所の建設を始められたがこのほどその主要変圧器、負荷時電圧調整器各 1 台、配電盤 1 式、超高圧避雷器 2 組を当社で受注し製作中である。

### 主要変圧器 1 台

形式 外鉄形フォームフィット普通三相車両形送油風冷式  
電圧

出力	
一次 275-268.75-262.50 kV	一次 200 MVA
二次 147 kV	二次 220 MVA
三次 15.75 kV	三次 100 MVA

周波数 50 サイクル

負荷時電圧調整器 1 台

形式 外鉄フォームフィット普通三相自冷式

周波数 50 サイクル

電圧調整範囲 275 kV  $\pm 7.5\%$

電圧タップ段数  $\pm 6$  段 13 点

電圧タップ巾 1.25%

タップ切換方式 抵抗式 (YT 形)

励磁電圧 15.75 kV 定格容量 15,000 kVA

配電盤 1 式

11 面—主配電盤 7 面—所内盤

8 面—継電器盤 8 面—その他の盤

避雷器

2 組—275 kV SV-W<sub>2</sub>A 形避雷器

### 特長

主要変圧器、負荷時電圧調整器

- 主要変圧器は昭和 33 年に納入、その後好調に運転を続けている東京電力中東京変電所向け主要変圧器とまったく同一仕様であるが中東京変電所向けが特別三相形なのに反し、今回の分は普通三相形で組立てたまま輸送（輸送重量 235 トン）するもので、組立輸送の容量では記録的である。これは (1) 240 トン積みのシキ 400 形貨車を新製したこと、(2) 米国 Armco 社の冷間圧延方向性ケイ素鋼帯を使用し重量の軽減を図ったこと（オリエンテッドコア）によるものである。

- 変圧器と別に YT 形負荷時電圧調整器をおき負荷をかけたまま電圧調整をする仕組みにて容量において記録的である。極性転換スイッチを取付け、変圧器は 1 鉄心とし線路側タップを直接切換える。負荷スイッチは 2 点切で負荷電流に関係なくつねに同相分の電流をシャ断するのでアーク時間が短く、絶縁油の劣化はわずかである。

### 配電盤

1ACT 継電器、計器を採用し、母線保護用として、CA-6 形比率差動継電器による電流差動方式を採用している。

### 避雷器

防爆形を採用している。



## ■ 高周波焼入溶解用発電機ぞくぞく完成

当社は、さきに 10,000 c/s 高周波発電機の応用分野の増大に着目し、150 kVA, 10,000 c/s, 3,600 rpm および 150 kVA, 2,500 c/s の電動発電機セットを開発して、内部冷却タービン発電機の回転子、誘導電動機カゴ形回転子の製作などにこれを使用、効果をあげてきたが、これにひきつづいて 50 c/s 地区用としてわが国ではじめての 150 kVA, 10,000 c/s, 3,000 rpm の高周波発電機を完成、近く札幌の豊平製鋼所に納入する。従来この種の発電機は国内では製作困難といわれ輸入されていたが当社の国産化成功によってこれらの輸入防止にも大きな効果が期待できると思う。

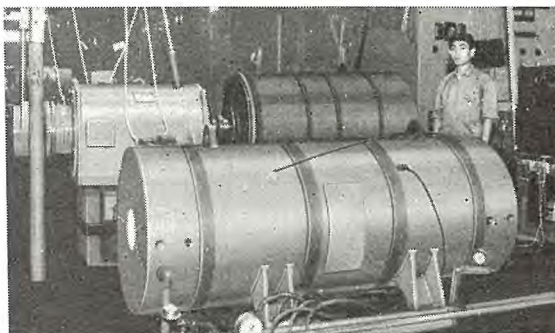
当社ではこのほかにも目下兼房刃物工業会社向けの 150 kVA 10,000 c/s, 3,600 rpm, 三菱金属鋳業会社向け 100 kVA, 2,000 c/s, 3,000 rpm および某社向け 100 kVA, 10,000 c/s, 3,600 rpm のものを受注製作中である。豊平製鋼所向けのものは駆動用巻線形誘導電動機と歯車式可とう継手を用いて直結し隣接機からの衝撃を防ぐため防振ベット上に組立ててあるのに対して兼房刃物、三菱金属鋳業向けおよび某社向けのものはカゴ形誘導電動機と高周波発電機とを同一軸に組立てられた、いわゆるモノコック構造で、その両端ところが軸受を有し、外部に回転部が現われない構造になっており、騒音についてはまったく問題はない。高周波誘導加熱は次の特長がある。

1. 炉が不要でガスが発生せず、建設費、保守費が安く作業環境が清潔である。
2. 加熱制御が簡単でかつ正確である。
3. 加熱速度が早く表面酸化が少ない。また表面加熱、部分加熱ができる。
4. 自動化に適しており流れ作業などのラインに組入れることができる。
5. 製品が均質化され、不良率が激減する。

などの理由で今後自動車工業・金属工業・一般機械工業・自転車工業などに広く用いられようとしている。

目下当社で製作中の高周波発電機の仕様は次のとおりである。

1. 豊平製鋼所向け 1 台  
150 kVA, 10,000 c/s, 400 V 375 A, 単相,  
408 極 3,000 rpm 全閉空気冷却器付 防振ベ



手前の発電機

兼房刃物向け 150 kVA 400 V 1φ 10,000 c/s 336 極 pf 10. 3,571 rpm 誘導電動機 (入力 215 W) 3,300 V 60 c/s 2P 3,571 rpm 駆動全閉内冷 (空気冷却器付) SJM 形

後方の発電機

豊平製鋼向け 150 kVA 400 V 1φ 10,000 c/s 408 極 pf 1.0. 294 rpm 200 kW (出力) 3,300 V 50 c/s 29 2,941 rpm 誘導電動機駆動全閉内冷形 (電気冷却器付)

- 注 1. 兼房刃物向け JM と H.F.G とは共通ワク軸構造となっておりこの構造が標準である。
2. 豊平向けは JM と HFCT とは継手につながら、防振台床の上のにせられている。なるべく継手をつなぐ構造はきたい

- ッド付 駆動電動機 200 kW, 3,300 V, 三相巻線形回転子, 全閉空気冷却器付
2. 兼房刃物向け 1 台  
150 kVA, 10,000 c/s, 400 V, 375 A, 単相 336 極 3,600 rpm, 駆動電動機 入力 215 kW 3,300 V, 三相, カゴ形回転子 全閉空気冷却器付
  3. 三菱金属鋳業向け (桶川工場 1 台, 大井工場 2 台)  
100 kVA, 2,000 c/s, 500 V, 200 A 単相 80 極 3,000 rpm 駆動電動機 入力 125 kW 3,300 V, 三相 カゴ形回転子 全閉空気冷却器付 防振ベット付
  4. 某社向け 3 台  
100 kVA, 10,000 c/s, 440 V, 227 A, 単相 336 極 3,600 rpm 駆動電動機 入力 160 kW 3,300 V, 三相 カゴ形回転子 全閉空気冷却器付

## ■ 国鉄技研へ新形キ電用直流高速度シャ断器納入

国鉄技研へ新形キ電用直流高速度シャ断器を納入し、同所での、シャ断試験を含む諸試験を好成績で完了した。

このシャ断器は、中央線など電車区間でのキ電電流増大に対する対策にシャ断器性能向上の意図を加味して作成された技研高速度シャ断器試作仕様書に基づいて製作されたもので、今後国鉄向けの標準形として使用される。

なお本器は、納入前に当社 50,000 kVA 短絡発電機を使用し DC 1,500 V 突進率  $2.9 \times 10^6$  A/S 推定短絡電流最大値 136,000 A 等価の回路で低周波交流短絡試験を実施している。

その定格および特長は次のとおりである。

定格 定格電圧 DC 1,500 V

定格電流 3,000 A 連続

3,000 A 1 時間通電後 9,000 A 1 分間

定格動作電流目盛 6,000 A, 8,000 A, 10,000 A

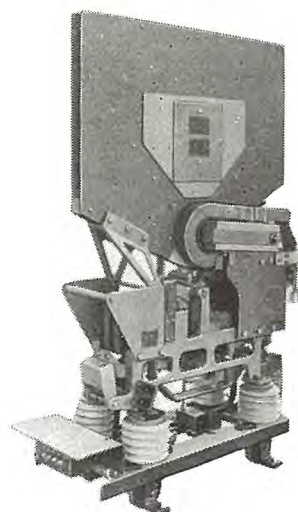
定格シャ断容量 突進率  $3 \times 10^6$  A/S の回路において推定短絡電流最大値 50,000 A (技研試験での限流値は 20,600 A であった)

空気操作電気保持方式

特長 1. 可動部分は極力軽量に構成され、適切な構造の大容量消弧室をもっているため、シャ断容量が大きく限流特性がすぐれている。

2. 動作電流目盛および短時間電流容量が大きく、選択特性がすぐれているので、大きい電車負荷をもつキ電線の保護に適している。

3. 主回路電圧印加部分と低圧制御回路間の絶縁強度が高く、大電流をシャ断したときのアークによる混触に対しても十分考慮された絶縁構造をもっている。



キ電用直流高速度シャ断器  
DC 1,500 V 3,000 A





## 特許と新案

### 内燃機関着火断続器レバー

考案者 大村 半 弥

近時高速回転 (8,000~10,000 rpm) の内燃機関が要求されるようになったので着火断続器レバーも高速回転による高周波振動に耐えうることが必要になったが、従来使用している鉄板を単に折り曲げたものでは長時間の高速運転に耐え得ず折損する欠点がある。

この考案は1枚の鉄板から折り曲げ加工によりレバーの中央部に縦方向の力骨を設けることにより高周波振動に対する強度を増大したものである。

すなわち図1はこの考案のレバーの断面図、図2は図1に

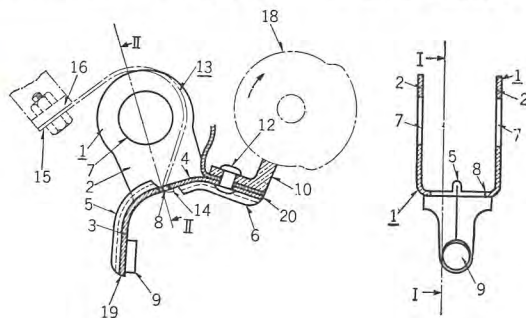


図 1

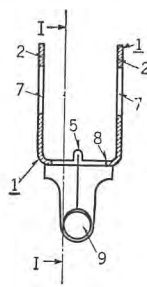
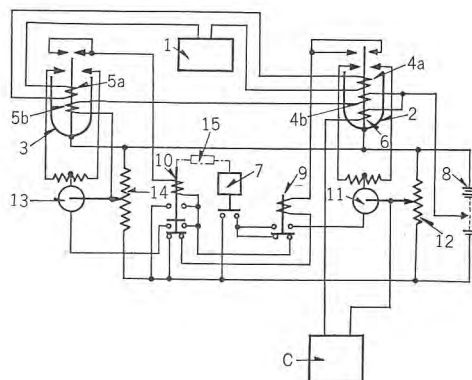


図 2

### 自動制御装置

温度圧力湿度水位などの量値変化に応じて調整装置、保護装置などの制御装置を作動させる場合に、量値変化が緩慢であると制御装置を作動させることが困難である。

この案は緩慢な量値変化を行なう被制御量を変換器 (1) により電気量に変換し、平衡継電器 (2) (3) を経てその変化微分値を制御装置 (c) に導出してこれを正確に作動させようとするものである。継電器 (2) は変化量の微分値検知用に、また継電器 (3) はリセット用に設けたもので、それぞれ変換器の現在量値を検知するコイル (4a) (5a) と過去量値を検知するコイル (4b) (5b) とを有し、継電器 (2) はこのほかに微分値検知用のコイル (6) を備えている。なお継電器 (3) の作動時点は時間 ( $t_1$ ) ごとに時間 ( $t_2$ ) ずつ閉成する時限継電器 (7) により制御される。



おいてII-II線による断面を矢印方向に見た側面図を示している。

図において (1) はレバー主体で薄鉄板より打抜かれ両側に折り曲げられた相対する舌片 (2), (2) を設けこの舌片に軸穴 (7) を形成している。 (8) は舌片 (2), (2) 間に設けられた細長い透穴でこの透穴 (8) を境として主体の両脚 (3), (4) の中央部にそれぞれ反対側に押出された力骨 (5), (6) が設けられ両脚 (3), (4) を補強している。またさらに両脚 (3), (4) の両側縁は折り曲げられて樋状をなし脚 (3) の端部 (19) には力骨を有しない側に接点 (9) が溶着され、他脚 (4) の端部 (20) には力骨を有しない側に絶縁体よりなる追従子 (10) がびょうで定着されている。 (13) は一端 (15) を固定部 (16) に定着し、他端 (14) を透穴 (8) に係合した板バネで上記追従子 (10) をカム (18) に押圧するように付勢している。

この考案のレバーは上記のように力骨を有しているので薄鉄板の割に強靱で高周波振動に耐えうるはもちろん、1枚の薄鉄板よりプレスワークにより簡単に作ることができ、しかも多量生産に適すから安価となる実用効果がある。

(実用新案登録第 479632 号) (小林記)

考案者 尾 畑 喜 行

いま変換器 (1) よりの出力に変化が生じたとすると継電器 (2) (3) は接点を閉成する。これにより電源 (8)—継電器 (2) の接点—補助継電器 (9) のコイル—補助継電器 (10) の下方接点—電源 (8) に至る回路が形成され補助継電器 (9) は付勢されてその上方接点を閉成する。このときに時限継電器 (7) が閉成作動をすると操作電動機 (11) の付勢回路が形成され、この電動機はポテンシオメータ (12) を操作して継電器 (2) の接点がもとどおりに平衡するようコイル (6) の付勢電流を調整する。これにより制御装置 (c) には変換器 (1) の変化量値が導かれる。継電器 (2) の接点がもとどおりに平衡し補助継電器 (9) が消勢されその下方接点を閉成すると (時限継電器 (7) はまだ閉成状態にあるものとする) 補助継電器 (10) のコイルは電源 (8) より継電器 (3) を経て付勢され、その上方接点で自己付勢保持回路を形成し、中央接点で操作電動機 (13) の付勢回路を形成させ、この電動機はポテンシオメータ (14) を操作して継電器 (3) の接点がもとどおりに平衡するようコイル (5b) の付勢電流を調整する。 (時限継電器 (7) は補助継電器 (10) の付勢時に適当な操作機構 (15) で開放される) 継電器 (3) の接点がもとどおりに平衡すれば継電器 (2) (3) はともにリセットとなる。

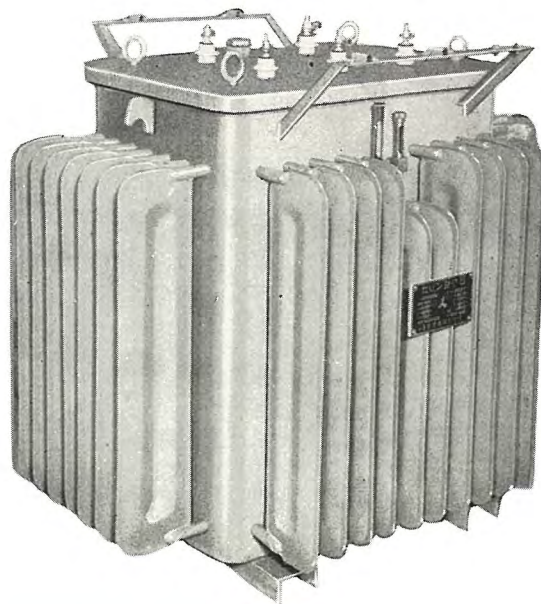
このように作動して変換器 (1) よりの緩慢な変化量の微分値が制御装置 (c) に導入されるので制御装置を確実に作動させることができる。(実用新案登録第 477171 号) (山田記)



# 同期電動機用 静止励磁器

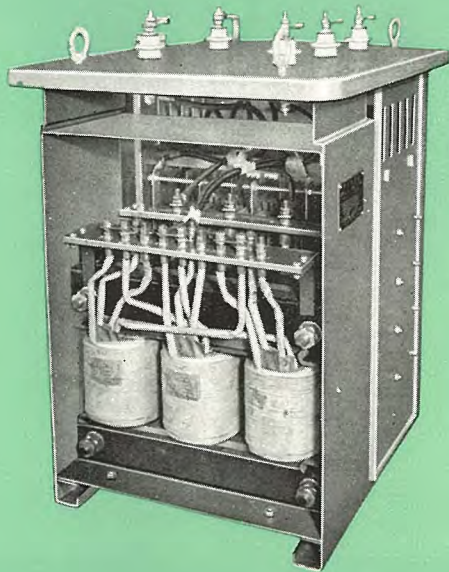
化学工場で使用される回転励磁機では、整流子の保守点検がやっかいな問題がありますが、当社ではこれをセレン整流器に置き代えて、好成績をあげております。

写真は三菱化成黒崎工場に納入した 485 kW 同期電動機用のセレン励磁器でこのほか 850 kW 650 kW 用など多数製作納入しました。



8.5 kW セレン整流器外観

8.5 kW セレン整流器中身



## 定 格

出力	8.5 kW	形式	油入自冷屋外形
電圧	110 V		
電流	77 A		

## 特 長

1. 腐食ガスに侵されることがない。
2. 保守点検が容易で、寿命は半永久的である。
3. シリコン・ゲルマニウム整流器などに比して高いサージ電圧に耐える。
4. 誘導電圧調整器によって広範囲の力率調整を行なっている。

昭和 34 年 8 月 23 日 印刷

昭和 34 年 8 月 25 日 発行

「禁無断転載」 定価 1 部 金 100 円 (送料別)

### 雑誌「三菱電機」編集委員会

委員長	吉村 誠一郎	常任委員	松田 新市
常任委員	浅井 徳次郎	"	宗村 新平
"	荒井 潔	"	山田 栄一
"	安藤 安二	委 員	新井 正元
"	市村 宗明	"	岡屋 精二
"	木村 武雄	"	進藤 貞一
"	小堀 富次郎	"	竹内 真隆
"	高井 得一	"	津田 準三
"	中野 光雄	"	豊田 又一
"	馬場 文夫	"	松尾 八郎
"	船橋 正信	幹 事	井上 八郎

(以上 50 音順)

編集兼 発行責任者	東京都千代田区丸の内2丁目3番地	吉村 誠一郎
印刷所	東京都新宿区市谷加賀町1丁目	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	高橋 武夫
発行所	三菱電機株式会社内	「三菱電機」編集部
		電話 和田倉 (20) 1631
	日本出版協会会員番号 213013	
発売元	東京都千代田区神田錦町3の1	株式会社オーム社書店
		電話 (29) 0915・0916 振替東京 20018