

食塩水電解用 11,000 kW シリコフォーマ

11,000 kW Silicoformer for Chlorine Cell

近 藤 喜 久 雄* 小 田 切 亘**
Kikuo Kondô Wataru Otagiri
大 石 忠 央** 池 本 徳 郎**
Tadao Ôishi Norio Ikemoto

要 旨

食塩水電解用直流電源として 220 V 50,000 A シリコフォーマを完成し、台湾チャイナプラスチック社竹南工場へ納入した。本装置は 66 kV のじか落しで、直流電圧 55 V より 220 V まで調整することができる。負荷時タップ切換装置付変圧器、電圧調整用可飽和リアクトル、シリコン整流器を一体構造としたシリコン変圧整流装置で総合効率 97% 以上が得られた。

製作に際しては、最高の効率が得られるよう、機器の合理的な設計と、配置により損失の低減を図るとともに、シリコン整流器の電流平衡、定電流制御方式について慎重な検討を加えた。

本装置は昭和 40 年 8 月運転を開始し、現在好調に稼働中である。

1. 緒 言

シリコフォーマ (Silicoformer: 日立シリコン変圧整流装置) は、すでに紹介されたように⁽¹⁾、シリコン整流器と変圧器を一体とした新しい整流装置で、昭和 38 年開発以来急速な発展を遂げ、今回単器容量 11,000 kW 220 V 50,000 A のシリコフォーマを完成した。

本装置は台湾チャイナプラスチック社(華夏塑膠股份有限公司)の食塩水電解用直流電源として使用されるもので、わが国から輸出されるシリコン変圧整流装置としては記録的容量である。

シリコフォーマは、従来の機器単独別置形整流装置に比べ、効率力率がすぐれ、据付床面積が小さく、現地工事が簡単となるなどの利点が多いため、顧客の最初の計画では従来の単独別置形で引合仕様書が出されたが、日立製作所の推奨により、積極的な賛同を得てシリコフォーマの採用となったものである。

すでに日立製作所では、アルミニウム製錬用風冷式 200kW 10,000 A シリコフォーマの 2 年以上にわたる好調な運転実績のほか、亜鉛電解用送油風冷式 4,000 kW 16,000 A 4 台をはじめ各種のシリコフォーマを製作している。このようにシリコフォーマは、各種電解用直流電源に使用され、非常にすぐれた実績を残しており、今後ますます多く使われていくものと思われる。

今回完成した 11,000 kW シリコフォーマは、従来の大電流整流装置⁽²⁾の経験を基礎に慎重な検討の結果製作されたもので、試験結果は予期以上の好成績が得られた。特に、直流電圧が 55 V より 220 V まで広範囲の調整にもかかわらず、その総合効率は 66 kV 受電端子より電解槽直流開閉器までのいっさいの接続導体を含めて、97% 以上が得られ、現地据付工事も、わずか 4 週間で運転が開始されるなど注目すべき点が多い。図 1 はその外観を示す。

以下本設備の概要と技術上の要点について述べ、この種電源の合理的設備計画の参考に供したい。

2. 設 備 の 概 要

図 2 は本設備の単線結線図を示す。おもな仕様は次のとおりである。

交 流 入 力		
定格入力電圧	66 kV-33 kV	3 相
入力電圧変動	66 kV-33 kV	±5%

* 日立製作所日立工場

** 日立製作所国分工場

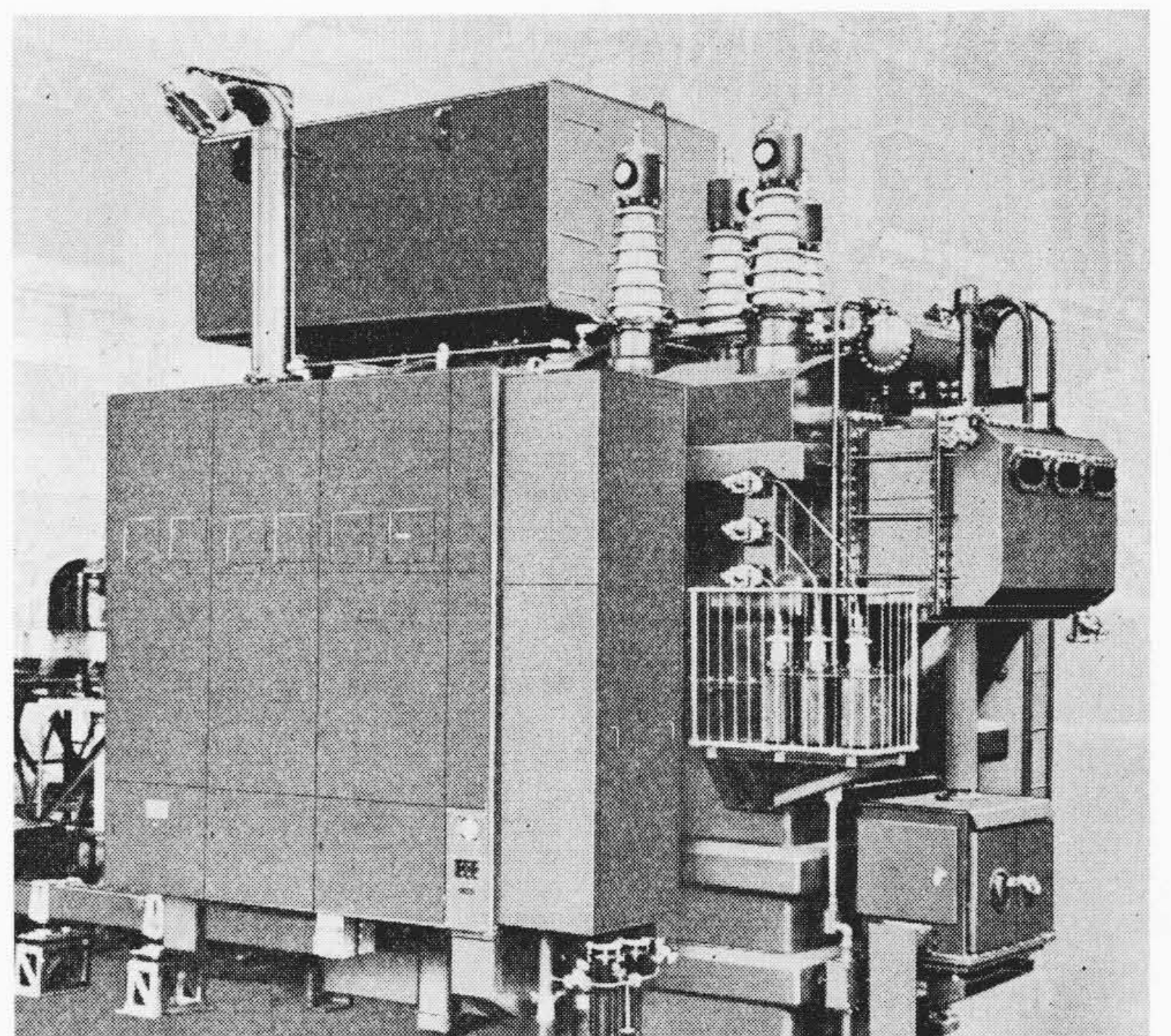


図 1 11,000 kW 220 V 50,000 A シリコフォーマ

定 格 周 波 数	60 c/s
直 流 出 力	
定 格 出 力	11,000 kW
定 格 電 圧	220 V
定 格 電 流	50,000 A
電 圧 調 整	220~110 V (変圧器 1 次△) 110~55 V (変圧器 1 次人)
制 御 方 式	定電流制御
制 御 精 度	±1.5%

運転当初の電源は 33 kV で受電し、やがて系統が 66 kV となるため変圧器 1 次電圧は 2 重定格となっており、電解槽数 16 槽で運転を開始するため、変圧器の 1 次は 33 kV 星形結線、直流 55 V で起動し逐次昇圧する方式である。

2.1 受 電 設 備

制弧遮断器 BOS-150A-PAB×1 台 72 kV 800 A 遮断容量 1,500 MVA, 計器用変圧変流器×1 台, 断路器 69 kV 600 A×2 台

2.2 整 流 装 置

シリコフォーマ×1 台 下記により構成される。

整流器用変圧器×1 台 屋内用送油水冷式 負荷時タップ切換装

置付 WFLIC-3 YC 13,500/19,100 kVA 66-33 kV/DC 220~55 V 相当 Δ -入/入 Y 3 相 60 c/s 連続
 電圧調整用可飽和リアクトル×12 台 DI-FXQ 乾式自冷式 H 種絶縁, 調整電圧 7.2 V 電流 7,225 A 連続
 シリコン整流器×2 純水循環水冷式 6 相 2 重星形 WEBK-6 XR 5,500 kW 220 V 25,000 A 100% 連続 150% 1 分
 サージ吸収装置×1 式

相間リアクトル×1 台 乾式自冷式 H 種絶縁 DI-FXQ
 3,650 kVA 回路電圧 DC 220 V 線電流 25 kA 180 c/s 連続

2.3 制 御 装 置

制御盤 BD-SR×1 面

定電流制御盤 CD-SR×1 面

直流計器用変流器 DUT-R×2 台 DC 30 kA/AC 50 A 40 VA

直流開閉器 L-DA×4 台 DC 250 V 30 kA

図 3 は機器配置を示す。

3. 11,000 kW シリコフォーマ

本シリコフォーマの仕様上のおもな特長をあげると次のとおりである。

- (1) 直流電圧の調整範囲が広い (220~55 V)。
- (2) 66 kV からのじか落しである。
- (3) 単器で直流電流が 50,000 A である。
- (4) 直流出力電流は 400% 50 ms の過負荷容量をもつ (仕様上)。
- (5) 輸送限界がきびしい (幅 2.5 m, 重量 45 t 以下)。

これらの条件はいずれも, 従来の豊富な大電流整流装置の製作経験と研究の集積により, 十分に満足され, 後述のように好成績が得られている。

3.1 構 造

負荷時タップ切換装置付整流器用変圧器の両側に 25,000 A 整流器キュービクルを取り付けて 50,000 A シリコフォーマを構成する。25,000 A 整流器 2 台が並列運転を行なう回路構成となっているのは, 変圧器と整流器が一体化されていてもなお, 変圧器コイルの口出部より整流器スタックまでの接続導体による電圧降下が大電流では無視できず, 50,000 A を 2 分割してこの電圧降下を低減し, 変圧器の容量増加を防いで効率向上を図ったものである。技術的には 1 キュービクルで 50,000 A の整流器も可能であるが, 2 分割したのは上記の理由のほか, 1 キュービクルが万一運転停止しても他のキュービクルで 25,000 A 運転ができることおよび大電流の磁界で生ずる漂遊負荷損失を少なくするためである。

電圧調整用可飽和リアクトル, サージ吸収装置などは整流器キュービクル内に収納されているので, シリコフォーマの変圧器ブッシングに交流を接続すれば, 低圧側から直流が得られる構造である。図 4 はその構造図である。

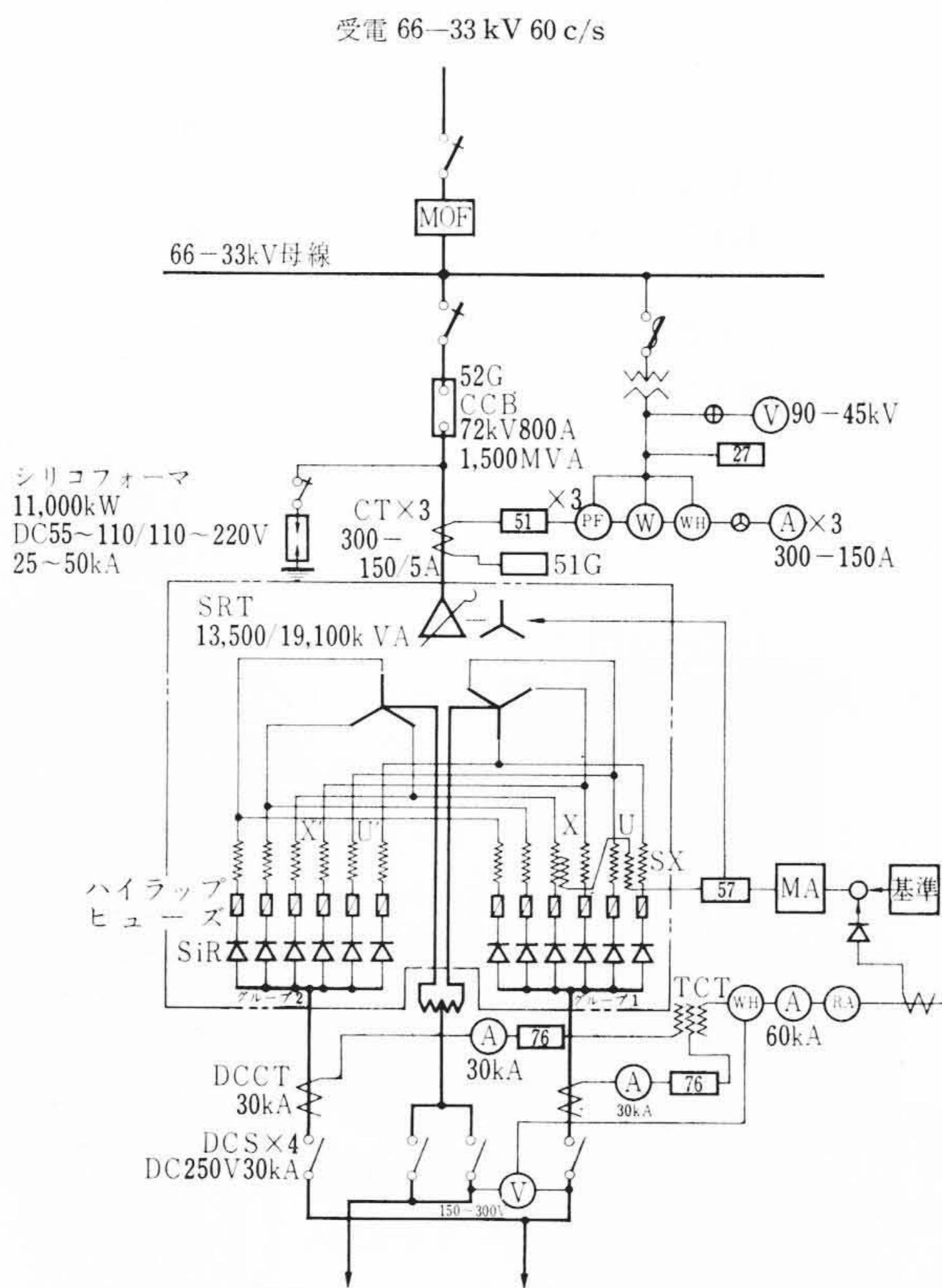


図 2 単線接続図

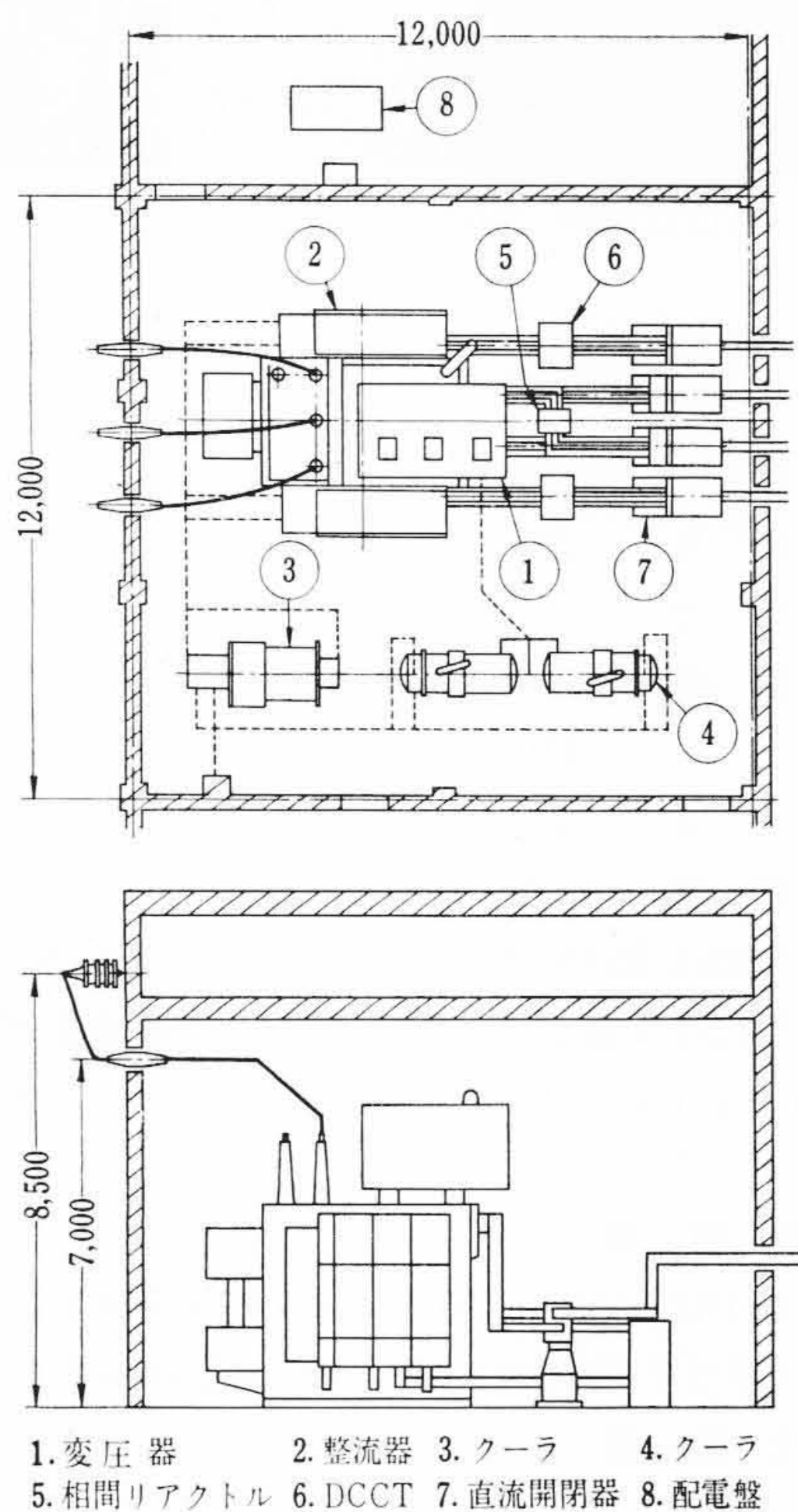


図 3 11,000 kW シリコフォーマ配置図

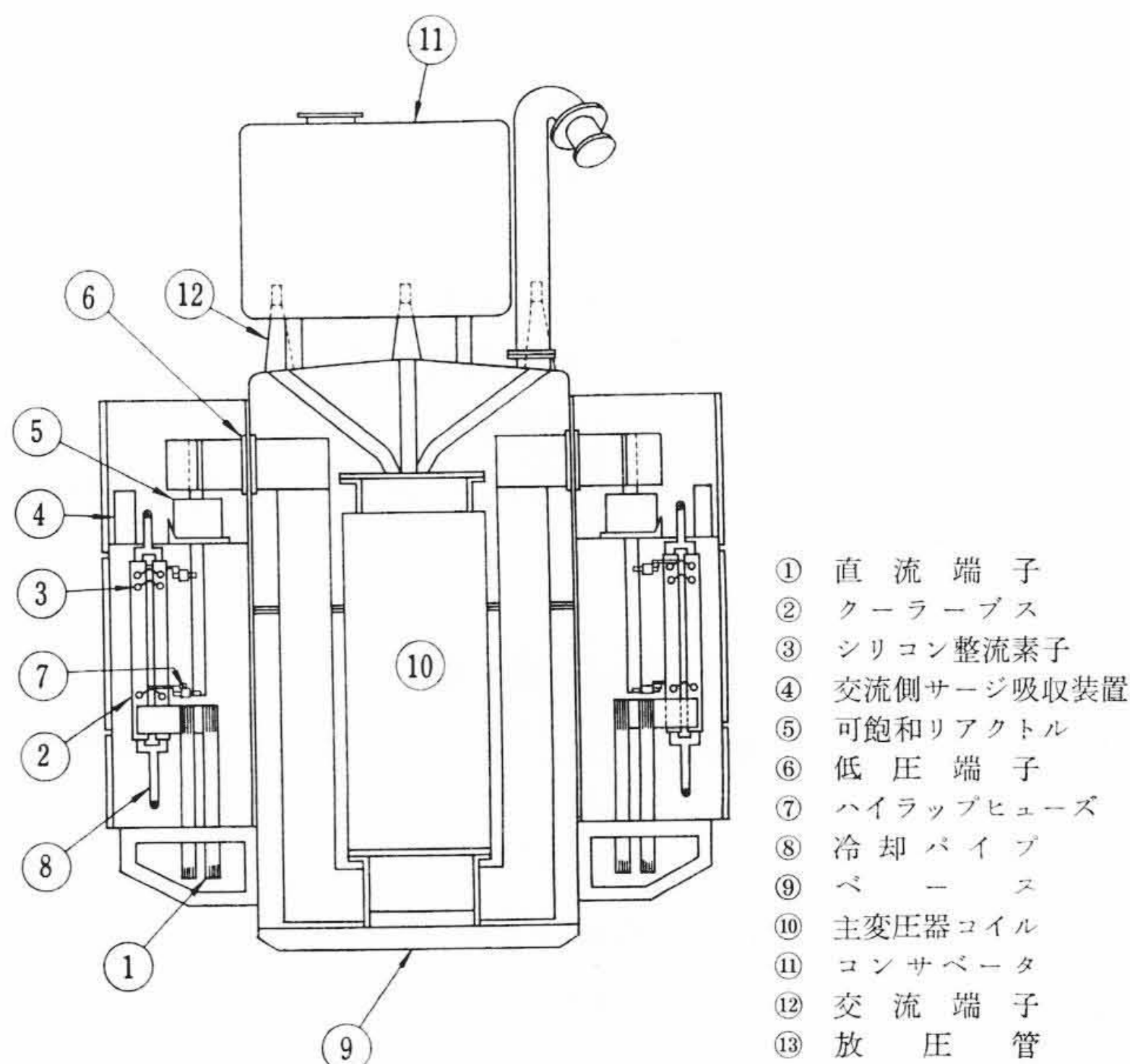


図 4 11,000 kW シリコフォーマの構造

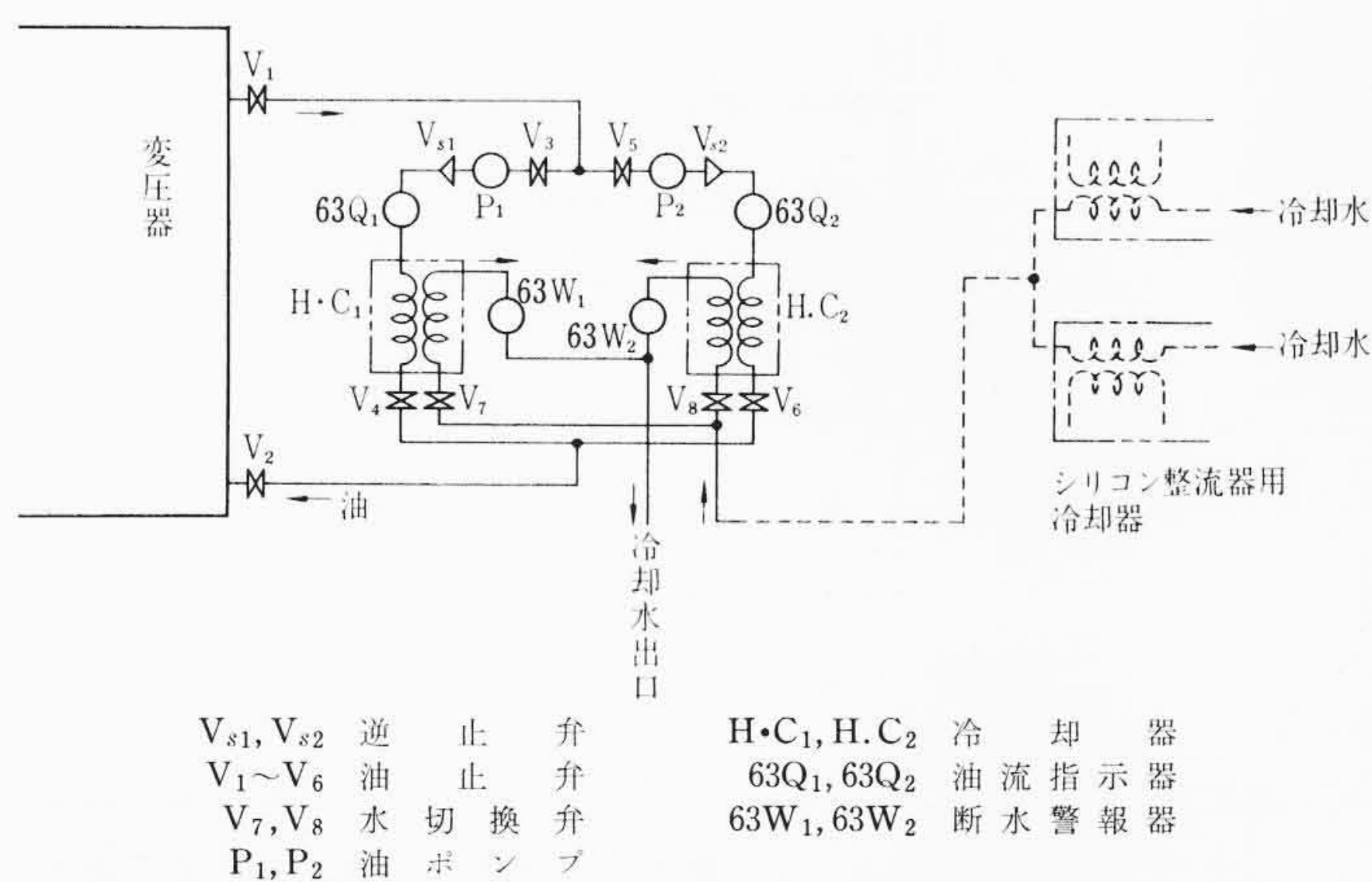


図5 冷却装置配管系統図

大容量器のため変圧器、整流器からそれぞれ最適の冷却設計となるよう、図5のような冷却系統を採用している。冷却用工業用水は整流器変圧器の順に直列に通水されるので経済的である。また冷却装置は、保守作業の便宜をはかるよう使用者からの要望により、シリコフォーマの近傍に別置とした。

3.2 シリコン整流器

(1) シリコン整流素子

本器に使用した素子は次の仕様である。

形 式	DJ 16 M
定格せん頭逆耐電圧	1,300 V
定格過渡せん頭逆耐電圧	1,600 V
定格平均順電流	300 A
最高動作温度	150℃

このDJ形素子は、電力用素子として電気化学工業用、電鉄、車両用、動力用などあらゆる用途に最も広範囲に使用されて、豊富な実績を有している。その製作にあたっては、徹底した品質管理と厳重な検査を行なっているため、その信頼度と高性能についてはすでに定評がある。特に国鉄新幹線用電車で多数使用されて、過酷な電流断続が繰り返されているにもかかわらずきわめて良好な運転実績を示している。食塩水電解のように比較的電流変動の少ない負荷では、素子の事故は初期不良も含めて皆無といってもよいくらいである。

(2) 整流素子の電流バランスと整流器キュービクル間のバランス

25,000 A 整流器の各アーム内の素子分担電流をバランスさせることはかなりむずかしい問題で、並列素子間の間隔を極力せまくして、他相の磁界の影響を少なくするよう配置する必要がある。素子間電流バランスは一般に±20%程度であるが、本整流器では仕様上±10%以下とすることを目標とし、電流バランス用リアクトルを使用することなく、日立製作所のみが使用できる素子の順特性のマッチング⁽³⁾により後述のとおり良好な結果を得た。

また25,000 A 整流器キュービクル間の電流分担は各部接続導体のインピーダンスの相違、可飽和リアクトルの特性のバラツキなどにより不平衡を生ずることになるので、変圧器コイル口出部から整流器にいたる接続導体、整流スタックの配列、直流導体の配置は十分バランスするよう考慮され、運転結果も許容値内にバランスしている。

(3) 冷却

整流素子を取り付ける小形で冷却効果の大きい図7のクーラバス（冷却体兼用導体）⁽⁴⁾を使用し純水循環により冷却しているの

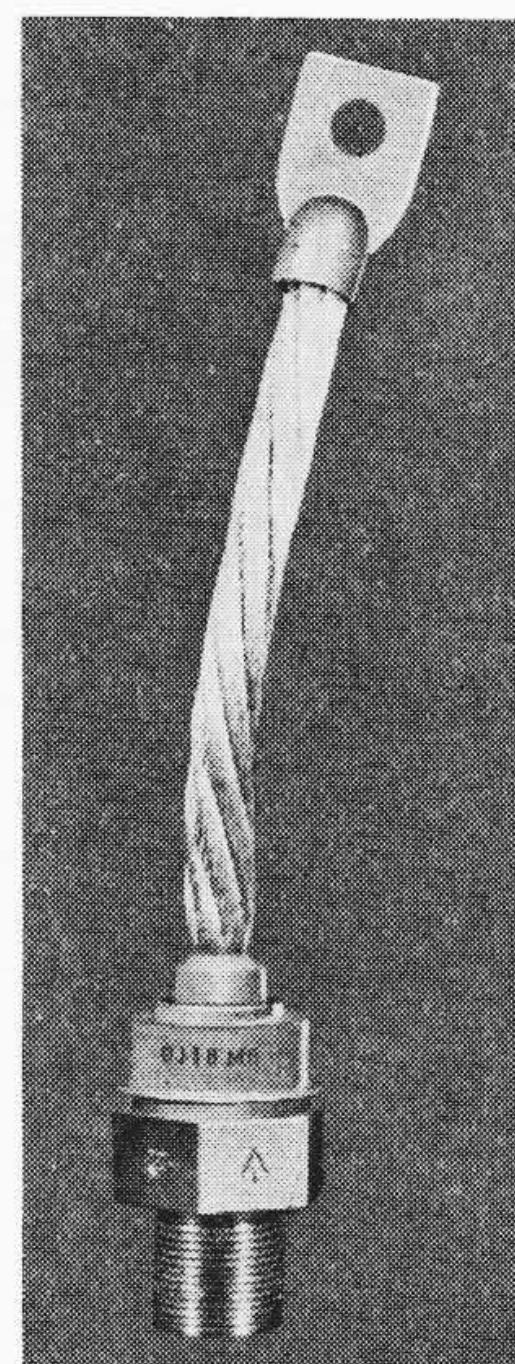


図6 DJ形シリコン整流素子

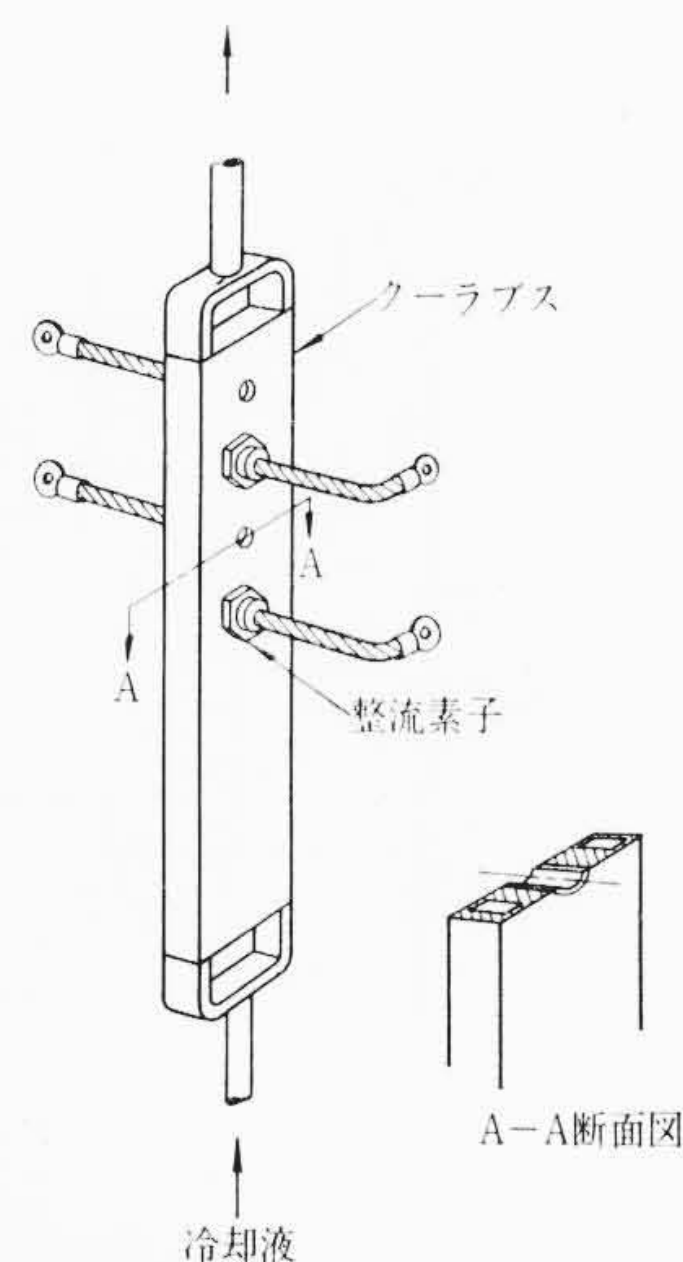


図7 クーラバスの構造

で、前述の並列整流素子間隔も狭く、良好な電流バランスを得る効果大きい。素子を取り付けたクーラバスは整流器キュービクルの前面に配置され、素子にはハイラップヒューズ（日立高速限流ヒューズ）が接続され、並列に接続されるヒューズは他のクーラバスに取り付けられて、電圧調整用可飽和リアクトルを貫通して、変圧器2次ブッシングに接続される。

素子、ヒューズの点検、交換はドアを開いて簡単に行なうことができ、万一ヒューズが溶断した場合は警報とともにその位置が容易にわかるようになっている。循環する純水はシリコフォーマの近傍に設置された純水対工業用水の再冷却器により冷却される。整流器キュービクル内部には上記整流素子、ヒューズ、可飽和リアクトル、サージ吸収装置および接続導体などの発熱体があり、大部分の熱は循環する純水により運び去られているが、一部はキュービクル内部の空气中へ放散される。一方キュービクルは完全密閉式で、外界の腐食性ガスの侵入を防ぐ構造となっているので、小形の補助冷却器と送風機によりキュービクル内部の空気を冷却し一定温度に押えることができる。

3.3 変圧器の特長および仕様

本変圧器は、入力電圧 66/33 kV、直流出力電圧 220/110 V の4段切換と言う複雑な仕様のほか、出力電圧調整用負荷時タップ切換装置および可飽和リアクトル、さらにシリコン整流器までを含めて本体に取り付けた完全一体構造の変圧整流器である。なおシリコン整流器は5,500 kW 2ユニットで、変圧器両側面に分割して取り付けられる。

低圧側が大電流で、しかも整流器2分割方式であるため、低圧リードバーについては、局部過熱および整流器ユニット相互あるいは、相間の電流平衡に関し特に慎重に検討製作した結果、別項試験結果に述べるように優秀な成績が得られた。

66 kV よりのじか落しに関連し、インパルス移行電圧対策として、低圧端子間および中性点間にセレンアレスタ、コンデンサ、抵抗を組み合わせてそう入した。これらはすべて整流器キュービクルに内蔵されている。

本装置は、輸送限界が幅 2,500 mm、重量 45 t ときびしく制限されているが、輸出品であるため、現地据付作業を極力容易にすることが特に望ましい。このため、各種輸送制限条件を満足しながら、リード線を含み中身はほとんど完全に組立てたまま輸送し得るよう、検討を行なった結果、外部の大形部品を取りはずすのみで輸送することに成功し、現地作業としては、輸送カバーとの交換、ブッ

に動作する結果、相間リアクトルをはさむ二つの星形巻線の電流の平衡をはかることができる。さらに二つの整流グループについても制御巻線のグループを直列に接続し電流平衡についてよい結果が得られた。

直流電流の計測は整流器グループごとに設けた 30 kA の DCCT により過電流保護および電流測定を行なうとともに、これを総合 CT で加算する方式とした。この総合電流回路には電流計、記録電流計および精度 1% の直流積算電力計を接続している。

制御装置は監視盤、定電流制御装置および現場操作盤よりなっている。監視盤はリレー盤を一体化した構造で、手動による負荷時タップ切換、定電流制御のときの電流設定を含め、各機器の制御および状態の監視はすべてこの盤から行なわれる。また、遮断器、変圧器のタップ位置、交流、直流側の電圧および電流はすべて監視盤にて監視できるようになっている。

図 11, 12 はその外観を示したものである。

4.2 保護装置

シリコン整流器の保護には過電圧、過電流および素子故障検出がある。

過電圧に対しては本設備のように電解用のものは直流側からのサージ電圧はないが交流側からのサージ電圧と整流器の転流時の異状振動による電圧について注意を要する。交流側からのサージとしては雷サージ電圧と遮断器開閉によるサージ電圧について、整流器用変圧器の 2 次に移行する比率より整流素子の逆耐電圧との協調を検討した。このサージ電圧の移行比率軽減のためには変圧器の 2 次をコンデンサで短絡することが有効であり、この設備においても 2 次端子間にサージ吸収装置を接続し、サージ電圧をシリコン整流素子の端子間において平常時逆電圧の 1.5 倍以下になるようにした。

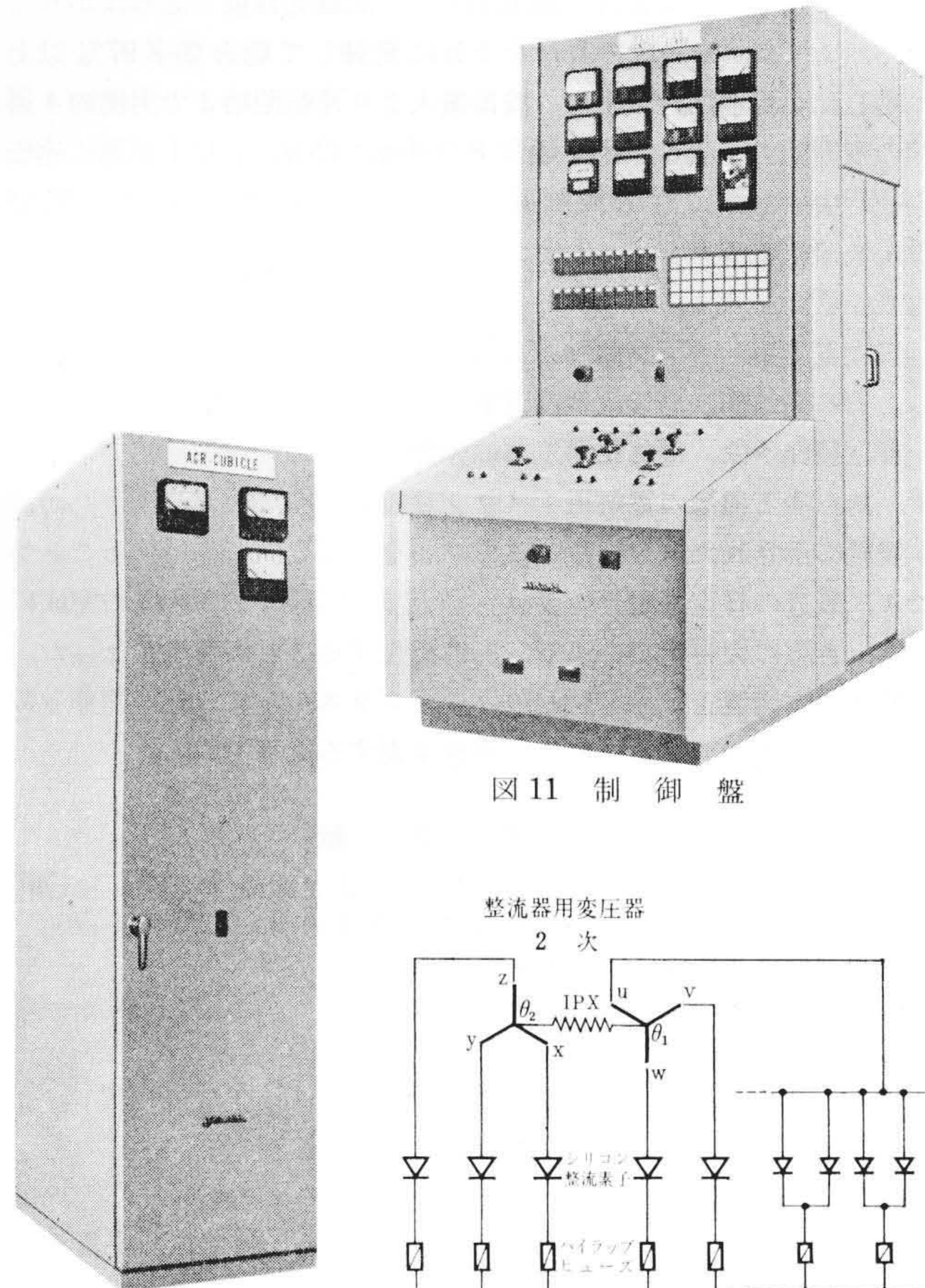


図 11 制御盤

図 12 定電流制御装置

過電流保護としては、瞬時要素を内蔵した日立 IO-C₂ 形限時過電流継電器を使用し、これを交流側および直流側の各整流器グループごとに設けた。最近の整流素子は信頼性が非常に高いので整流素子の短絡を考えなくてよいほどであるが、短時間過電流の保護も兼ねて素子の 2 並列ごとにハイラップヒューズを使用した。大電流電解設備においてはほとんど停電を許さない連続運転が要求されるため、万一ヒューズが 1 本溶断してもそのまま残りで全負荷運転を継続できるよう整流素子の並列数が考慮されている。溶断したヒューズはこれと並列に接続した警報ヒューズの動作によりどのヒューズが溶断したかを表示するとともにその接点により警報を行なっている。図 13 はヒューズ溶断検出装置の原理図で、いずれの相でもヒューズ溶断 1 本までは第 1 段警報用リレーのみ動作して運転を継続できる。万一同じ相で 2 本以上のヒューズが溶断したときはじめて第 2 段トリップ用リレーが動作し交流遮断器を開放する。

その他冷却系統についてはポンプ、ファンなどの運転停止、水、油の流れ継電器、キュービクル、水、油などの温度継電器により保護を行なっている。

5. 機器配置

図 3 に示すとおり、シリコフォーマに接近して、相間リアクトル、直流変流器、直流開閉器、冷却装置が設置される。直流電流 50,000 A のため、直流導体は仕様上の電流密度 1.2 A/mm² により 1 m 当たり、重量 370 kg, 1.3 kW の損失になる。このため直流導体はできるだけ短くして経済的な配置とせねばならない。相間リアクトルと直流開閉器は保守点検上許される範囲に近接して据え付けられるが、直流変流器の設置には次の注意が必要である。すなわち、直流変流器は外部の磁界の影響により誤差を生ずるので、近傍の条件を十分検討する必要がある。直流変流器を貫通する直流導体が十分長い直線の場合と、変流器を貫通して直ちに直角に曲った状態では、変流器の鉄心の磁化状態が異なるため計測電流の指示値に差を生ずる。同様に接近して直流導体が設置されたり、相間リアクトルなどの磁性材料が近傍にあるのは望ましくない。このためある所定の距離を保って設置することが肝要である。

本配置では、直流導体を短くする経済性と変流器誤差の双方より慎重に検討して決定した。工場における総合組合せ試験で、直流変流器単独の指示と実際配置の指示とは精度内で一致し、本配置で直流指示は正確なことを確認している。

本シリコフォーマの所要床面積は、従来の機器単独別置形の場合に比べ表 1 に示すとおり 42% 節減されており、建屋を 2 階構造とする必要のない点もシリコフォーマの有利性を示すものである。

6. 試験結果

工場で完成した変圧器、シリコン整流器、可飽和リアクトルに対

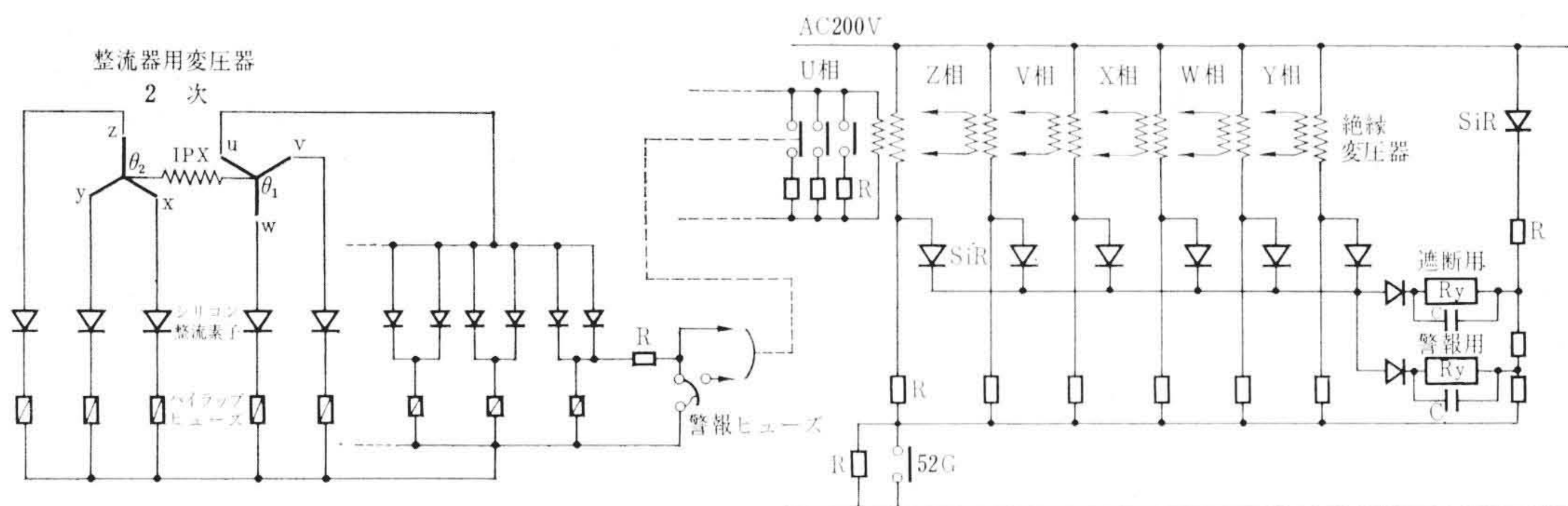
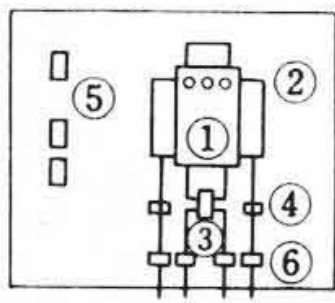
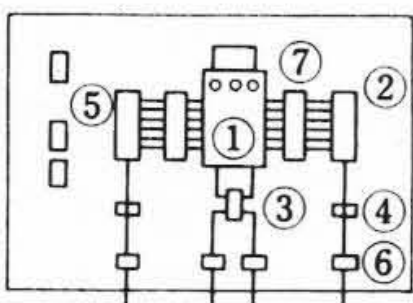


図 13 ヒューズ溶断検出原理図

表 1 11,000 kW 220V 50 kA 設備におけるシリコフォーマと従来形との床面積比較

	シリコフォーマ	従 来 形
配 置		
建屋面積 同上比	12×12m ² 100%	12×17m ² 142%

(注) 1:変圧器 2:整流器 3:相間リアクトル
4:DCCT 5:冷却器 6:直流開閉器
7:可飽和リアクトル

して単独での試験を行なうとともに、シリコフォーマとして一体に組み立て現地と同様に相間リアクトル、直流変流器を配置して全装置に対する厳重な試験を行なった。

絶縁試験、雷サージ移行、開閉サージ、温度上昇、水冷却系統水圧試験、直流電流計測試験など、工場で完成した姿で総合の組合せ試験が行なわれたため、現地での諸特性がたいはん工場で得られた。この点、使用者の便宜が増したと言えよう。

(1) 効 率、力 率

効率は、交流側遮断器から直流開閉器出力端子まで、全接続導体を含めた総合規約効率で 97.04% が得られ、同様に力率は 92.4% が得られた。現地での実際運転における値も、これらの値とほとんど変わらないものと思われる。

(2) 整流器電流バランス

シリコン整流素子間の電流バランスは前記 3.2 項で述べた考慮を払うことにより、図 14 に示すように工場組合せ試験で ±10% 以下のバランスが得られた。

(3) 変 圧 器

絶縁耐力、温度上昇試験など通常の試験項目について満足すべき結果が得られたが、本変圧器は特に 66 kV から直流 220 V まで一段で降圧する、いわゆるじか落しのため、雷サージ移行電圧の整流器に対する許容値について慎重に検討した。仕様上移行値は相当過酷なものであったが、効果的なサージ吸収装置を使用したため、移行率をわずか 0.28% に抑制することができ、電圧協調に十分な安全性を立証することができた。

(4) 直 流 電 流 計 測

直流変流器の配置については前述 5 項のとおり、他磁界の影響について十分考慮を払った結果、現地と同じ据付状態で測定して、その誤差は +0.2~+0.6% の良好な値を得た。また直流変流器の総合加算回路に組み合わせた直流積算電力計については、定格電圧における誤差 +0.2~+0.3%、また電圧 70~50% においても所期の誤差内に収まる結果が得られた。

7. 結 言

以上食塩水電解用 11,000 kW シリコフォーマの概要とその特長

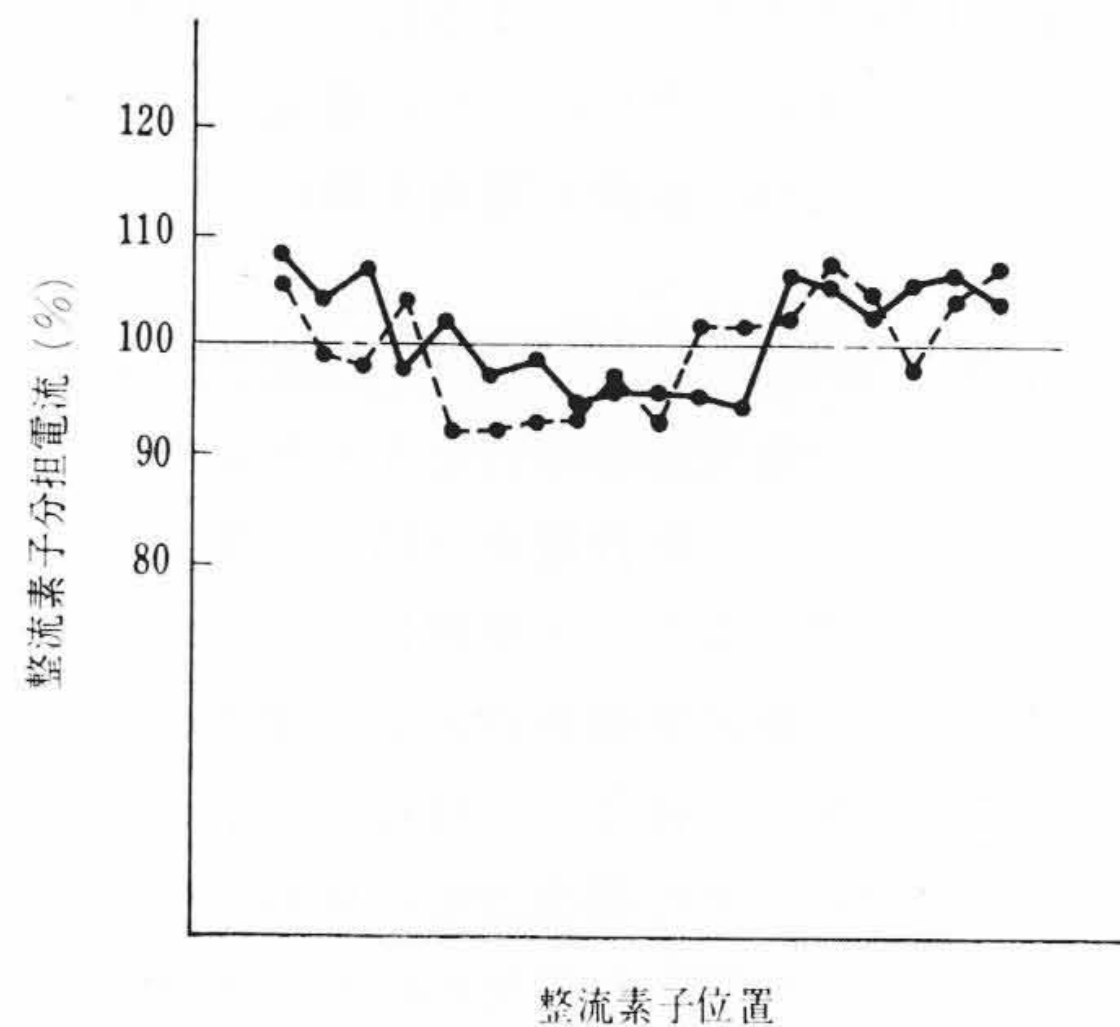


図 14 整流素子電流分担の一例

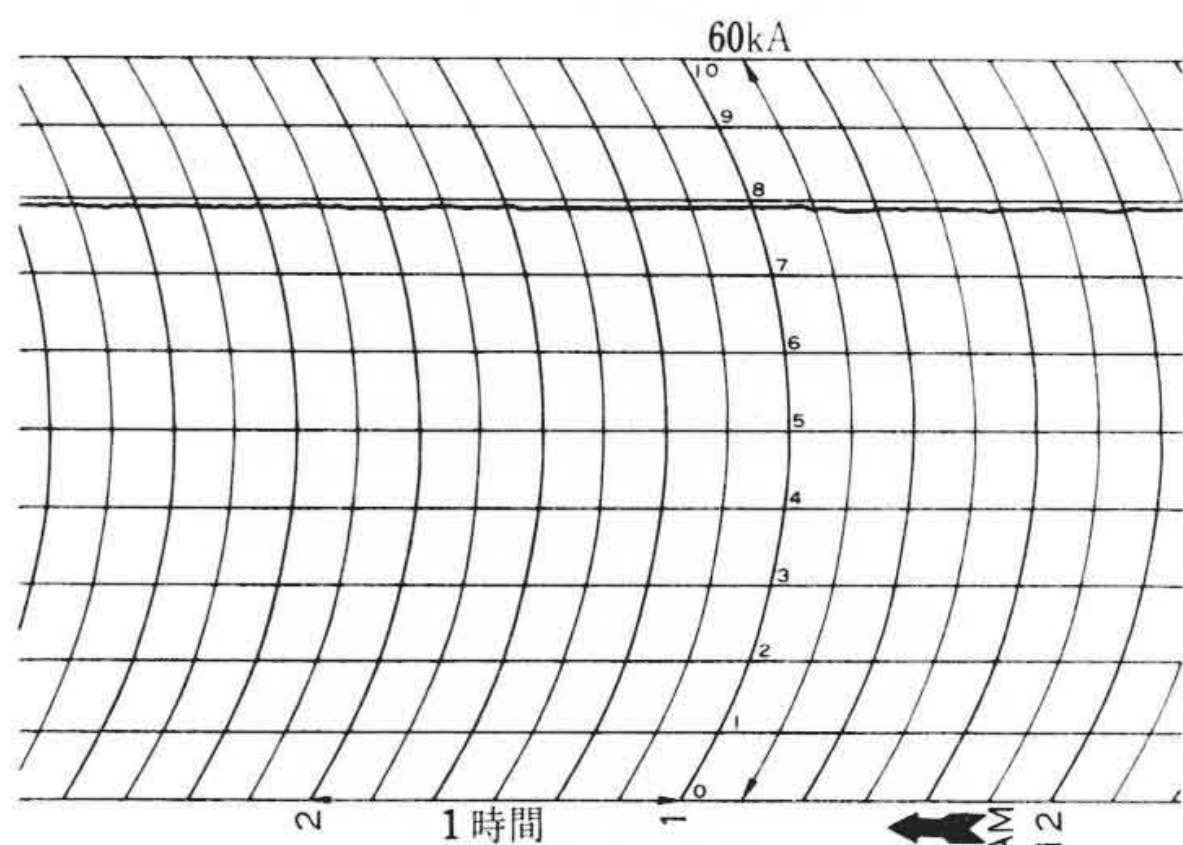


図 15 直流出力電流一時間チャート

について述べた。本装置は輸出品として記録的容量であるばかりでなく、シリコフォーマの長所を十分に発揮して総合効率 97% 以上に達した。現地据付工事も、機器搬入より運転開始まで実働約 4 週間の短期間で完成し、昭和 40 年 8 月運転を開始し、目下好調に運転を続行中である。定電流制御も予期以上の好結果が得られ、図 15 の現地運転電流チャートに示すように ±0.6% 以下の精度で運転されている。

日立電力用シリコン整流素子についてはすでに豊富な実績を有し、その高性能、高信頼度は遺憾なく発揮されている。

日立製作所は、電気化学工業の分野において食塩電解用のみならず、あらゆる種類の電解用シリコン整流器を多数製作してきたが、本装置に示された総合技術の成果は、そのまま広く応用することができ、最近の日立高耐圧シリコン整流素子 3,000 V 300 A の完成により、さらに大容量器を小形、高性能化することが可能となった。

最後に本装置を採用されたチャイナプラスチック社の関係各位のご指導ご協力に対し衷心より謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- (1) 近藤, 大石, 杉本, 池本, 草鹿: 日立評論 47, 851 (昭 40)
- (2) 曾根田, 高橋, 森山, 杉本: 日立評論 45, 920 (昭 38)
- (3) 登録実用新案 第 733943 号
- (4) 登録実用新案 第 700340 号