

最近の電気化学工業用シリコン整流装置

Recent Development in Silicon Rectifying Equipment for Use in Electrochemical Industry

近藤 喜久雄*
Kikuo Kondō

大石 忠央**
Tadao Ōishi

杉本 光昭**
Mitsuaki Sugimoto

池本 徳郎**
Tokurō Ikemoto

草鹿 泉太郎***
Kōtarō Kusaka

内 容 梗 概

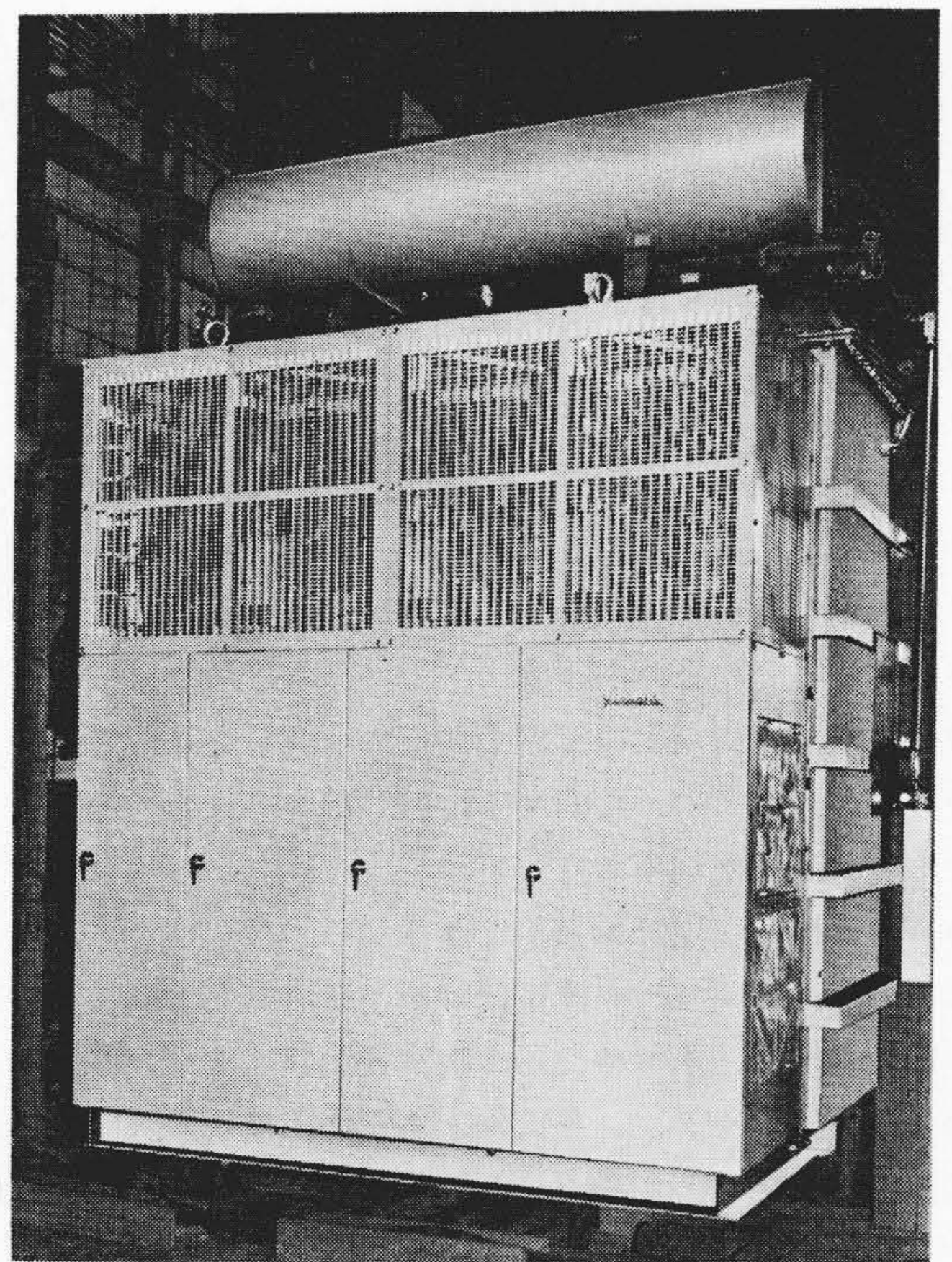
シリコン整流器はほぼ理想的な性能をもっているため、一部の制御用電源を除き、大部分の直流電源に使用されている。とくに低圧大電流を必要とする電解工業用直流電源にはすべてシリコン整流器が採用され、好調に運転されている。ここでは、従来、困難視されていた大電流直流の精密計測に0.1~0.5%級が簡単に得られる新しい方法を開発したので、その紹介を行ない、整流装置各機器を一体化して、性能の向上と据付工事の簡略化、設備費の低減が得られる新しい一体構造の整流装置「シリコフォーマ」について説明し、この種の設備計画に対する参考資料とする。

1. 緒 言

大電流の直流電源は、半導体技術の飛躍的な進歩によるシリコン整流器の出現で、大きな変革がなされ、低圧大電流で効率のよい装置が得られている。最近、生産性向上の要請は電解槽の大形化へと進み、電解効率の向上、設備費、運転費の低減による合理化がますます強く要望されている。このような時機にあつて、特にシリコン整流器の信頼性の高いことと運転の簡単なことにより、電気専門の運転員の常駐が不要となつて無人化され、電流の調整をはじめ整流器の操作を電解槽の運転者が行なうまでにいたっており、生産性向上に大きな貢献をしている。

電解槽大形化に伴う直流変電所としての問題は、大電流の精密計測と、整流装置機器間の接続導体の処理である。すなわち、大電流の精密計測は斯界における長年の懸案問題であり、特に電解槽の効率向上を図るためにはその基準量となる直流電流の精密測定が重要であることはいうまでもない。従来のシャントによる計測はせいぜい10kAであつて、わが国電気試験所における最大標準値が10kAであるため、これ以上の精密同時計測はきわめて困難であつた。10kAを越す場合、従来直流変流器あるいはホール変流器によつては、その確度に0.5%級を期待することは無理であつた。単位容量の大形化に伴う生産の合理化は正確な計測管理が根幹となるため、需要家の強い要望にこたえ、今回日立製作所は新しい大電流の精密計測方式を開発した。40kAに対し0.3%以内の計測実績が得られたことは、今後の電気化学工業に大きな役割を果たすことと思われる。

一方、機器間接続導体は、電流の増大に従い費用の全体に占める割合も大きく、据付工事期間に及ぼす影響も大きい。この問題の解決策として、シリコン整流器と変圧器を一体化することにより、懸案であつた変圧器と整流器間の大電流接続導体を解決した。日立製作所ではすでに、このシリコン整流器と変圧器を一体化した200kW、10,000A、20Vのシリコフォーマ（Silicoformer 日立シリコン変圧整流装置）を昭和38年9月に完成し、アルミニウム製錬用として納入し、それらが好調に運転されている。シリコフォーマは、単器で11,000kW、220V、50,000Aの例もあり、さらに大電流器も可能である。この一体化は整流接合製造技術の著しい進歩により、300A、1,300V級の大容量素子が完成し、整流器に使用される素子数が著しく少なくてすみ、整流器が小形となった点に負うところが



第1図 4,000kW 250V 16kA シリコフォーマ

第1表 シリコフォーマ形整流装置製作実績

	直 流 出 力			台数	備 考
	出力 (kW)	電 圧 (V)	電 流 (A)		
昭 和 電 工	200	20	10,000	1	整流器開放風冷
昭 和 コ ニ ヤ	216	72	3,000	1	整流器開放風冷
東 邦 重 鋁	4,000	250	16,000	4	24V, 5kA 2重定格 変圧器自冷
中国プラスチック (タイワン)	11,000	220	50,000	1	整流器送油風冷
昭 和 コ ニ ヤ	216	72	3,000	1	60kV受電, 水冷 整流器開放風冷
					24V, 5kA 2重定格

多い。半導体整流器開発当初に比べどのように小形化されたかは第2表に示すとおりであり、整流器技術の躍進ぶりはきわめて急速である。

このシリコフォーマは、用途と容量に応じて、負荷時電圧調整器や電圧調整リアクトルも含んで完全な直流電源を形成し、屋外、屋内用いずれにも製作されている。また現地の状況に応じた冷却方式を採り得るため、用途はますます拡大されるものと思われる。

* 日立製作所日立工場

** 日立製作所国分工場

*** 日立製作所電気事業部

第2表 アルミニウム製錬用半導体整流器の推移

種別	装置容量 kW	直電圧 V	単容量 kW	運転開始 昭和年	整流素子 A PIV	冷却方式	整流器単 独効率%	容積/kW %
GR	14,000	140	1,750	33	500 73	循環風冷	94.8	100
SR	36,000	320	4,000	35	50 250	開放風冷	96.3	19
SR	81,000	650	9,000	37	200 800	循環風冷	98.6	12
SR	31,000	620	3,100	39	200 1,300	"	99.4	4

(注) 1. GRとはゲルマニウム整流器，SRとはシリコン整流器。
2. 整流器効率とは整流器単体の効率で変圧器などは含まない。
3. 容積/kWとは冷却装置を含めた整流器キュービクル外形容積をその容量で割ったもの。

以下最近の電解工業用直流電源について、シリコフォーマと大電流精密計測を中心にその概要を説明し、合理的な設備計画の参考に供したい。

2. 電解用直流電源計画上の要点

2.1 直流電源の具備すべき条件

電解工業としては、食塩電解、水電解などの水溶液電解、銅、亜鉛などの金属精製、アルミニウム、チタン、金属ナトリウムなどの熔融塩電解があり、それぞれの特異性により直流電源に対する仕様も若干異なるが、いずれも数百ボルト以下、数千ないし十数万アンペアの連続使用である。これらの低圧大電流電源の具備すべき条件を改めて要約すると次のとおりである。

- (1) 設備費が低廉
- (2) 効率が低い
- (3) 信頼性が高く停電しない
- (4) 運転が簡単で保守を要する点が少ない
- (5) 直流電力の計測が正確
- (6) 定電流制御などの制御が簡単で精度が高い
- (7) 腐食性ガスのふん囲気に耐え、寿命が長い
- (8) 据付工事が簡単である
- (9) 直流出力の追加増量ができる

これらの条件に対し、直流電源はその歴史的発展に伴い、電動発電機、回転変流機、水銀整流器、接触変流機、セレン整流器、ゲルマニウム整流器、シリコン整流器と新しい機種の出現により逐次、理想に近づいてきたが、最近日立製作所の新しい方式の開発によりいっそう目標に接近したといえよう。

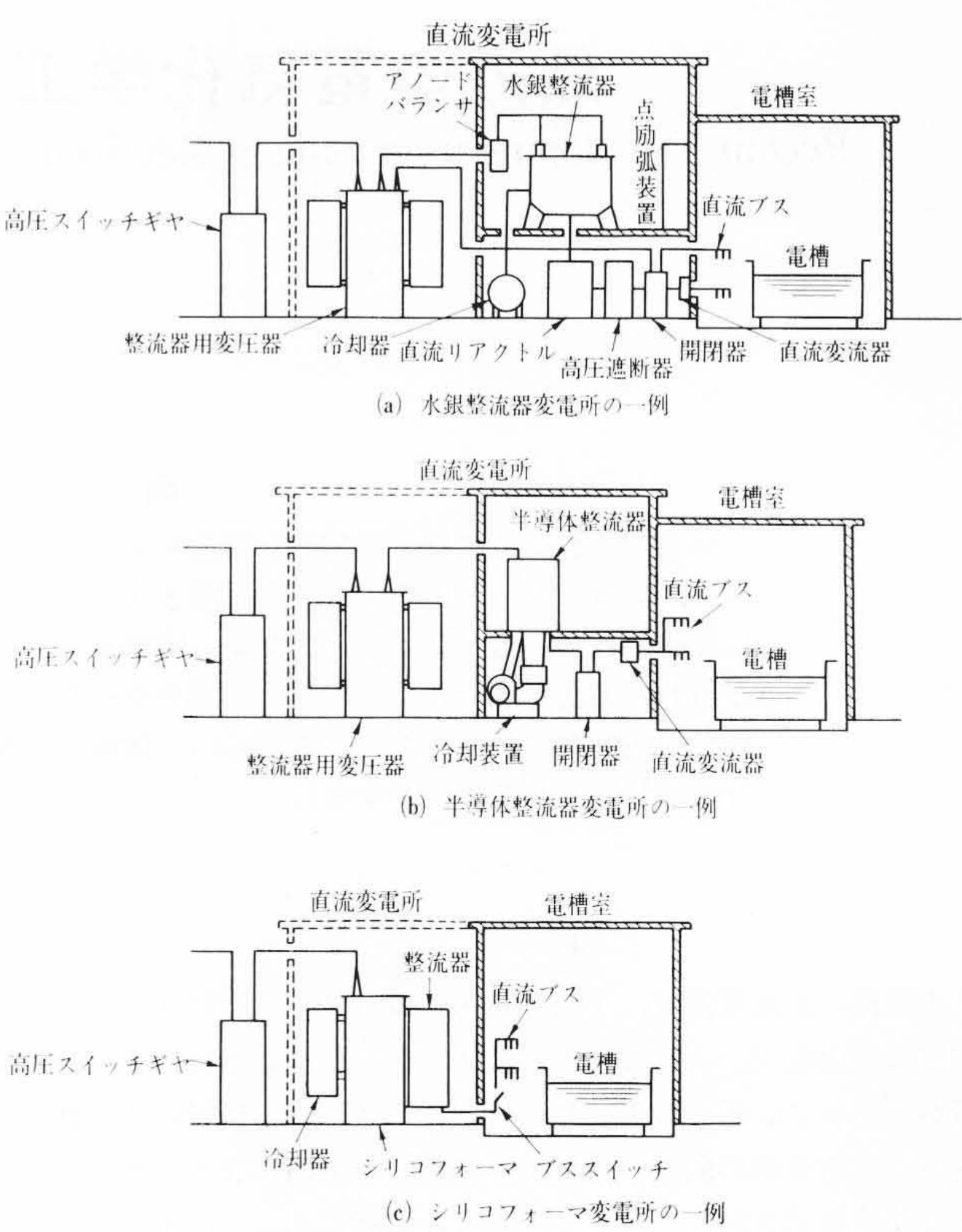
2.2 直流変電所の形式

過去における電動発電機よりシリコン整流器にいたるまで、変電所の構成としては、建屋内に個々の機能を有する機器を設置して、この間を導体で接続する方法が長年用いられてきた。これは旧式の変換機器の方法がそのままシリコン整流器にも適用された結果である。水銀整流器、シリコン整流器では完全な屋外変電所が以前にもあり、回転形変換機の時代にも変圧器やスイッチギヤが屋外設置された例もあるように、屋内、屋外設置の問題は、建屋の構築費、用地などと変換機器の屋外構造との経済上、保守上の理由による選択で決められているものである。

一方、交流を片側に接続すれば反対側から直流をとり出される一体化された変換装置は、シリコン整流素子容量の増大に伴う使用素子数の減少と、シリコン整流器の特長の一つである構造上の多様性により実現された。これは直流変電所の構成上、大きな変革であって、第2図に示すとおり電解槽にきわめて近接して設置されるので直流母線も著しく節減される。

2.3 一体構造による利点

最近新設される電解用整流装置は、一部既設水銀整流器の置換などの例を除いて、ほとんどが一体構造であるシリコフォーマが用い



第2図 整流器変電所の推移

られている。今改めてこの理由を要約すると次のとおりである。

- (1) 占有面積が小さくてすむため、屋外、屋内配置いずれでも用地の狭い場合は有利である。
- (2) 従来必要であった変圧器と整流器の現地における接続導体工事が不要となるため導体費が節減され、工事期間が著しく短縮される。
- (3) 運転効率、力率は従来に比べ向上し、電圧変動率は減少する。

第1図は4,000kW屋内形シリコフォーマを示したものである。

3. シリコフォーマ

3.1 一体構造の検討

変圧器とシリコン整流器を一体化する場合、種々の方法が考えられ、すでに幾つか試みられている。両者の機械的な結合の仕方と、冷却の方法により、多くの種類が考えられ、それぞれ特長をもつが、第3表は代表的な方式についての比較を試みたものである。

まず方式の分類の一つとして、変圧器と整流器の機械的な構造上次があげられる。

- (1) 変圧器タンクの側壁の一部に窓をあけ、この部分に整流スタック部分をはめ込んだもの(第3表b図-タンク壁取付形)。
- (2) 変圧器の2次すなわち低圧大電流端子はブッシングで出し、整流スタックを接続したもの(第3表c図-2次ブッシング形)。
- (3) 変圧器のコイル配置は2次巻線(直流巻線)を外側とし、この2次コイル上に整流スタックを取り付けて、完全にタンク内に収納したもの(第3表a図-タンク内収納形)。

いま、そのおもな特長を説明すれば、

- (1) タンク壁取付形は、構造上床面積は小さくなるが、油密パッキング面積が従来の変圧器に比べ大きくなるので、それだけ油漏れの危険性が大きく、整流スタックの取付パッキ

第3表 一体構造の各方式

構 造	(a) タンク内収納形	(b) タンク壁取付形	(c) 2次ブッシング形
床面積比%	100	108~115	110~120
油密パッキング面積	小	大	小
変圧器、整流器各 単独試験	難	難	易
高電圧(素子直列接続)	稍難	稍難	易
後から変圧器—整流 器間に昇圧器を挿入	極めて困難	極めて困難	可能
冷却方式の選択自由度	少	少	多
共油循環式	易	易	易
別系統油循環式	稍難	稍難	易
整流器を油以外の媒体 で冷却する方式	難	難	易
整流素子交換	難	易	易

ングから漏れた場合などの処置が困難である。また直流電圧を、2期工事として、あとから昇圧させる場合、昇圧変圧器を追加することが非常に困難である。

- (2) 2次ブッシング形は、変圧器の油密パッキング面積は従来の変圧器と同一のため、特に油漏れの危険性は増大しない。床面積はタンク壁取付形に比べ若干大きい、直流電圧を2期工事で昇圧させる場合、変圧器と整流器を容易に分離できるので、昇圧変圧器の追加が入が比較的簡単である。
- (3) タンク内収納形は、一体化構造の完全な姿ともいえるべきもので、油密パッキングも従来の変圧器より2次ブッシングの本数が減るので油漏れの危険性は増大しない。床面積は最小であるが、2期工事で昇圧させることができず、万一整流素子が事故を生じた場合の交換作業は、油入式ではきわめて困難であるため、現段階では、乾式変圧器の場合に限定される。ただし、整流素子の高耐圧、高信頼性は非常に進歩し、最新の技術で製作された整流素子の事故率はその初期不良も含め現在皆無であり今後も電機機器と同程度となると考えられるため、油入形が実現することも考えられる。

次に冷却方式より分類すればまず、

- (1) 変圧器と整流器を共通の絶縁油で冷却する。
(2) 変圧器と整流器はおのこの独立した冷却系統をもつ。

に大別される。すなわち、

- (1) 共通油冷却方式では、クーラと送油ポンプを共通にできる点、付属装置の面では簡単であるが、変圧器と整流器の双方に対する油の温度協調が問題である。シリコン整流素子の接合部許容温度は150℃で、変圧器A種絶縁における最高105℃より高い。しかし、次式で示される接合部温度の構成上、素子接合部と素子ベース間の温度降下がかなり大きいいため次の考慮が必要である。

$$T_j = \Delta T_1 + \Delta T_2 + T_0$$

ここに、 T_j : シリコン整流素子接合部温度

ΔT_1 : 素子接合部と素子ベース間温度降下

ΔT_2 : 素子ベースと油間温度降下(冷却体)

T_0 : 油 温 度

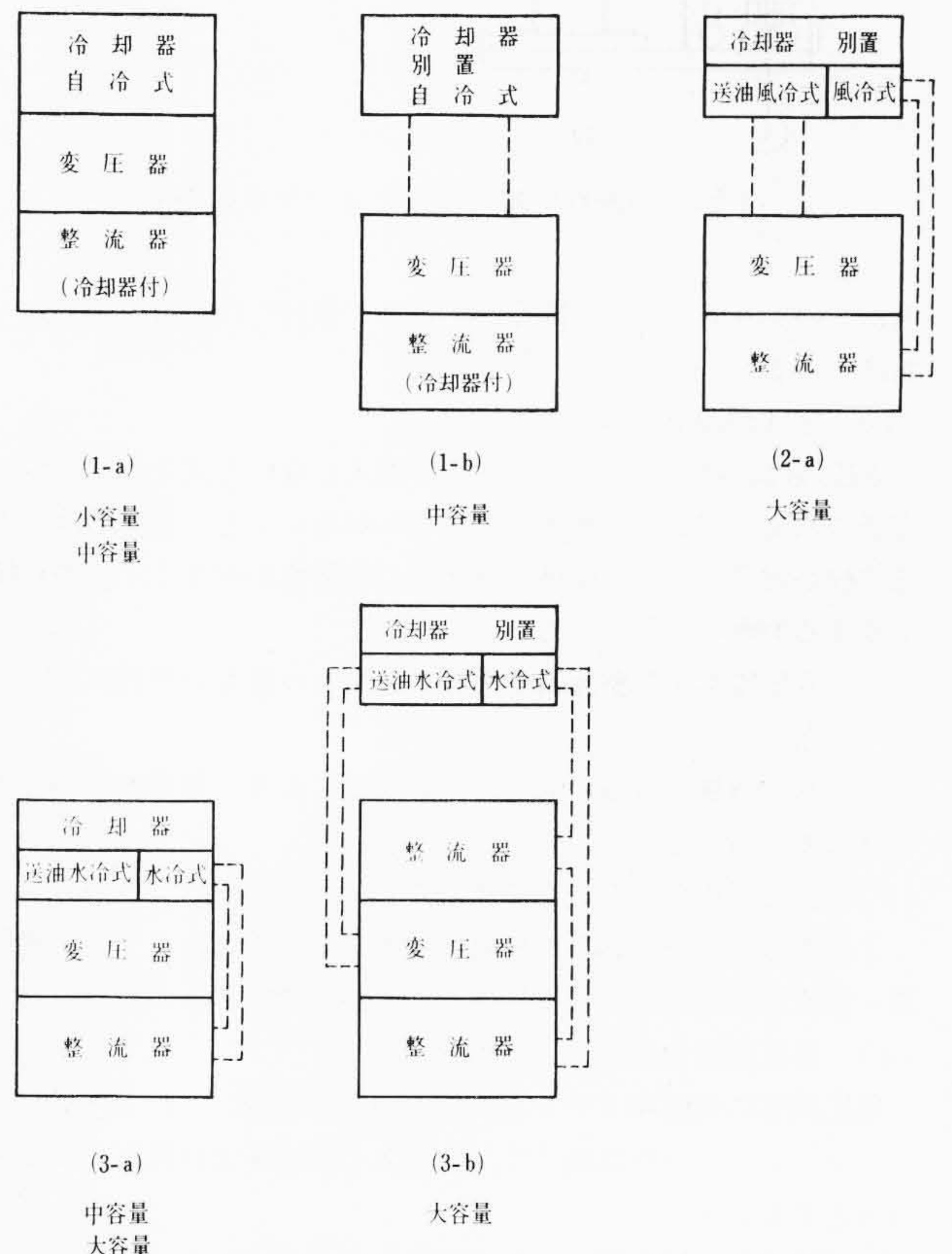
素子自体の温度降下、 ΔT_1 は、素子に流れる電流が決まれば定まるため、接合部温度を許容値にするためには、油温 T_0 か、冷却体による温度降下 ΔT_2 を押えねばならない。油で冷却する全損失の大半は変圧器によるため、油温を70~80℃の経済値より低下せしめるには冷却器の容量を増加する必要がある。一方、 ΔT_2 を小さくする場合には、素子を取り付けられている冷却体の冷却容量を増大する必要がある、両者の協調、経済的配分の問題となる。工業用冷却水がない場合、大容量器では、この共通冷却式は不経済となり、変圧器と整流器を独立した冷却系統とすることになる。

(2) 個別冷却方式は、変圧器と整流器おのこのに最も適した冷却方式が採り得るので、容量、設置場所、用途に応じて決めることができる。共通油冷却方式に比べ、冷却装置が2系統となる複雑さはあるが、冷却器自体が小形ですむ利点がある。また変圧器にあっては、油入自冷、送油自冷、送油風冷、送油水冷などがあり、整流器では、油循環風冷、送油水冷、純水循環風冷、純水循環水冷、空気循環水冷、開放風冷などあり、おのこの方式選択の自由度があるため、仕様に応じ種々の見地から検討して最も合理的な冷却ができる。第3図は各種の構成例を示したものである。

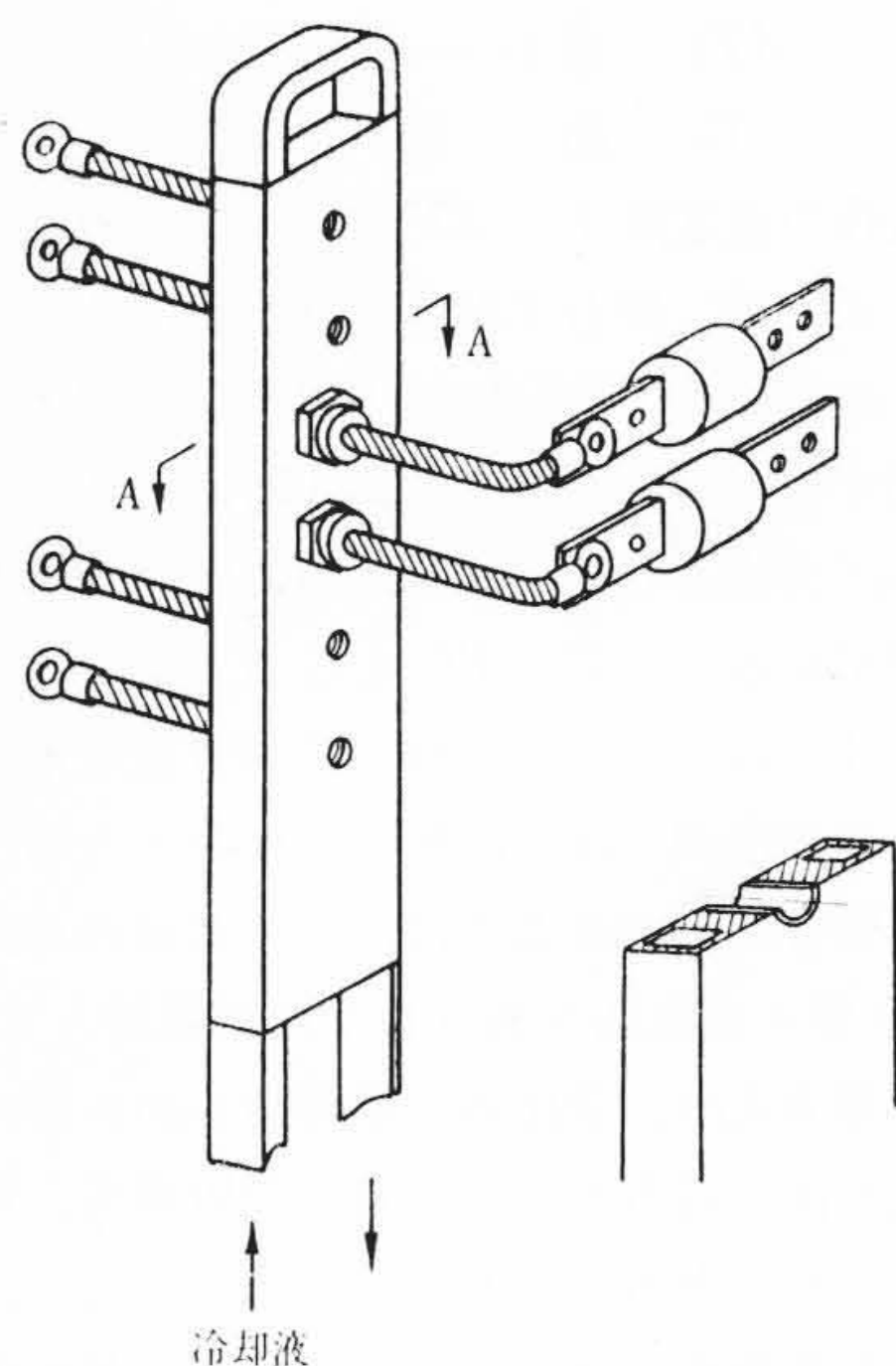
3.2 日立シリコフォーマ

3.2.1 日立シリコフォーマの特長

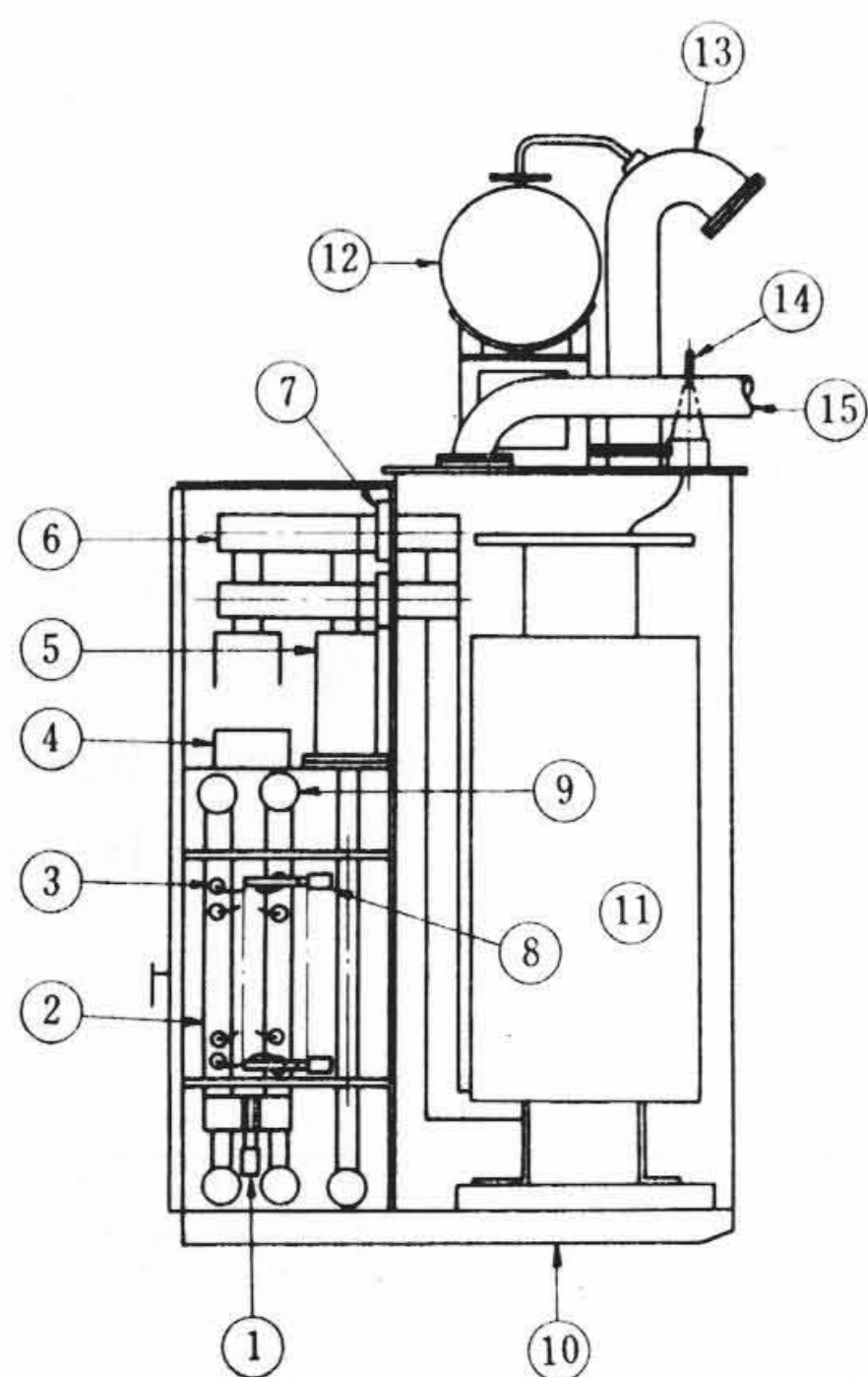
上述のように、各種の方式の慎重な検討結果と、従来の大電流整流器の製作経験⁽¹⁾⁽²⁾を基礎とし、整流素子を取り付ける小形で冷却効果の大きい第4図のクーラバス(Cooler Bus-冷却体兼用導体)を開発して⁽³⁾、シリコフォーマを完成している。日立製作



第3図 シリコフォーマの各種構成



第4図 クーラブスの構造



第5図 4,000 kW シリコフォーマの構造

所がこのシリコフォーマ開発に当たって検討した設計の主要点をあげてみると、

(1) 保守が簡単であること

変圧器は、油密パッキング面積を増大しない方式とし、大電流端子の油密が完全、絶縁事故のおそれがないこと。整流器は、内部点検が容易で、冷却媒体の漏えいの危険性が少なく、定期点検を要する個所の少ないこと。

(2) 変圧器および整流器の冷却がおのおの最も合理的に選定できること

冷却水の有無、容量の大小、用途などにより、最適の冷却方式が選択できること。

(3) 直流昇圧があとからできること

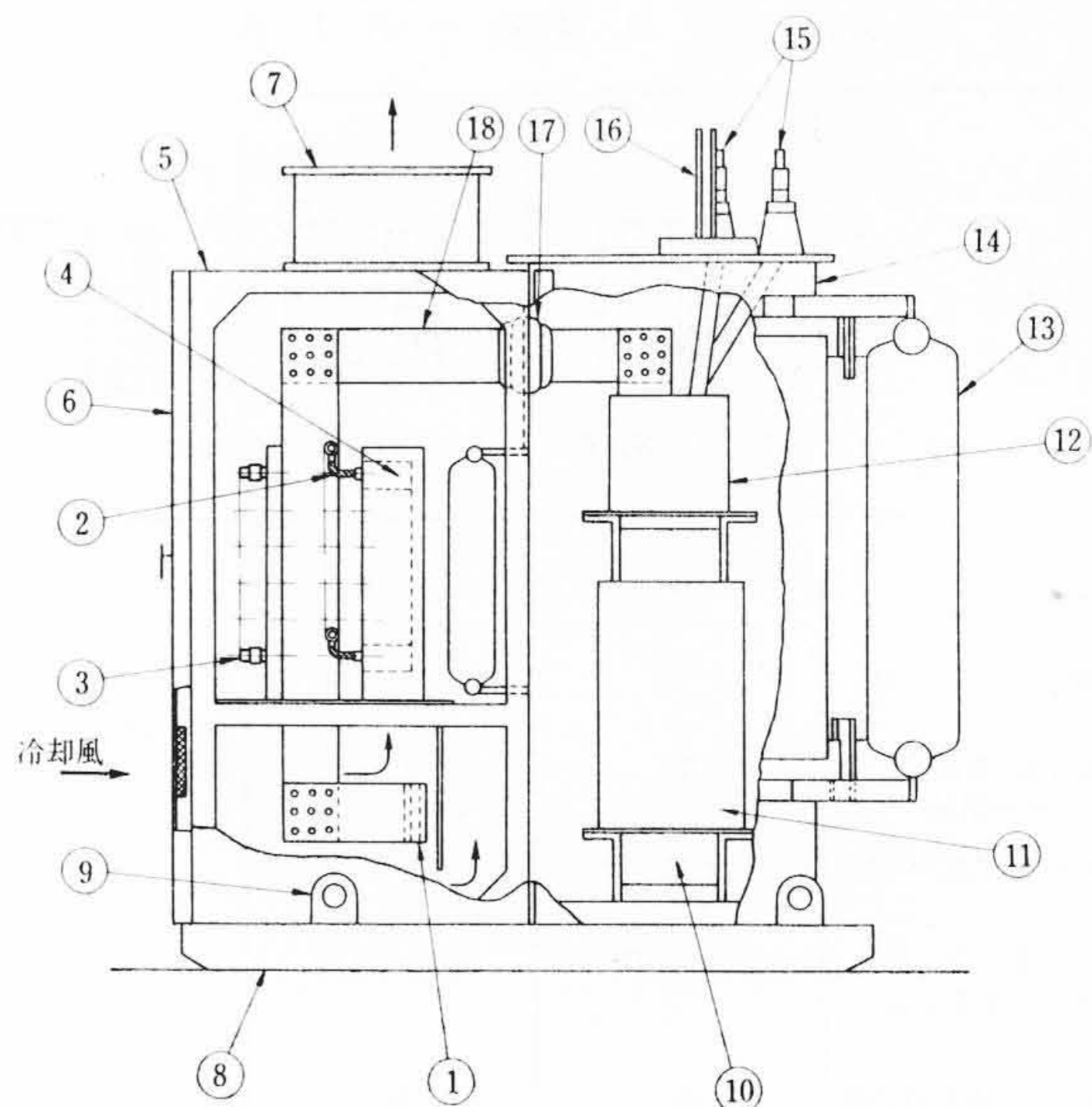
2期工事として、あとから直流電圧を上昇できるように、変圧器と整流器の間に昇圧変圧器のそう入が可能であること。

(4) 整流装置全機器が一体化されること

電圧調整に可飽和リアクトルを使用する場合、これも内蔵し、シリコフォーマの外部端子は、交流入力用端子と直流出力用端子のみとすること。

(5) 屋外形、屋内形いずれも可能なこと

以上の目標に対して、種々の問題点を総合的に解決し、シリコ



第6図 風冷式シリコフォーマの構造

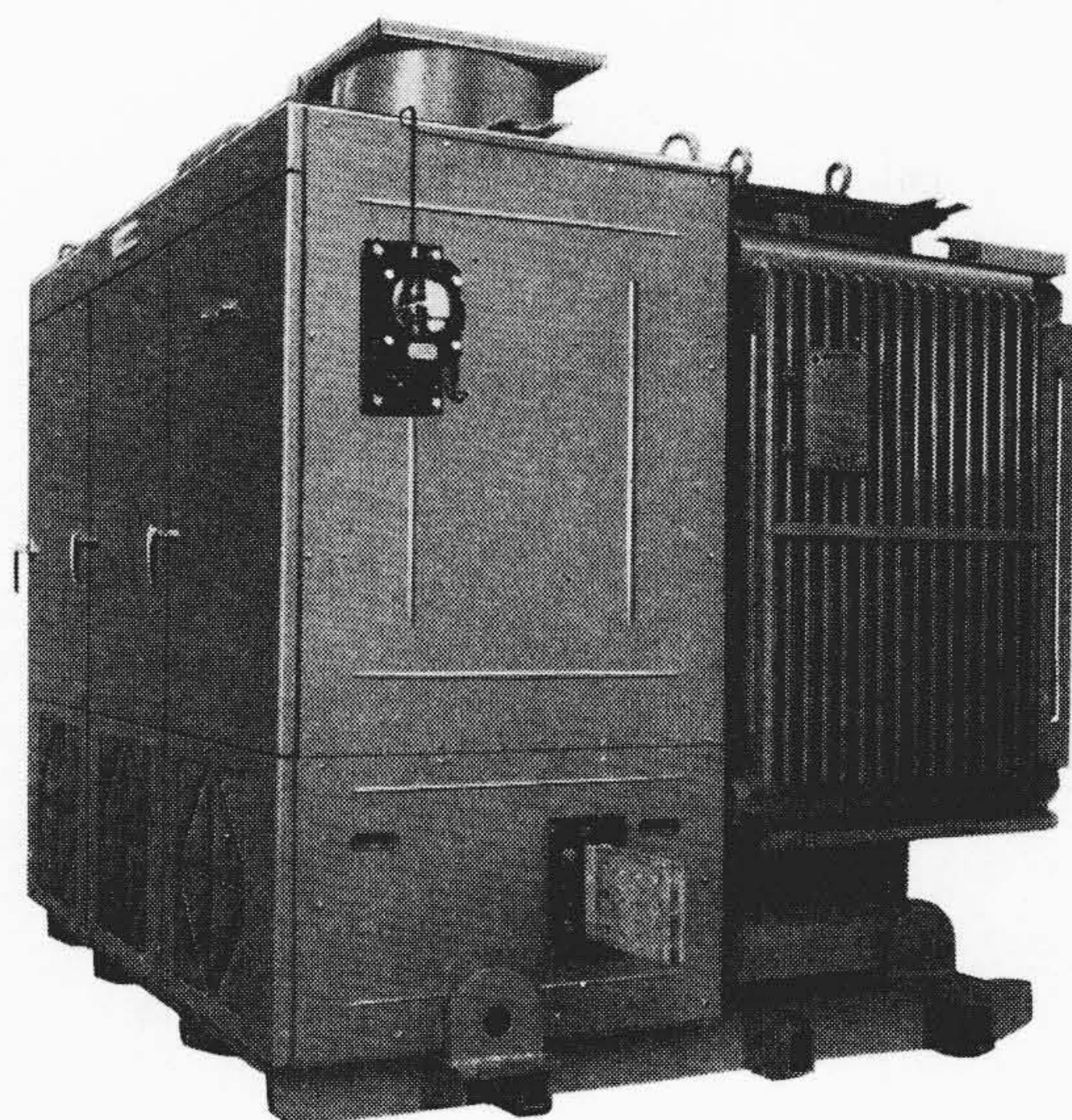
ン整流器の特長を十分発揮できるように、各部品に高度の技術を要する点があっても使用者にとって便利であるよう、完成されたのが、シリコフォーマであり、上記の要点がまたシリコフォーマの特長である。

(a) 整流器部分

第5図の4,000 kW シリコフォーマに示すように、変圧器の2次端子はブッシングで引き出されるので、変圧器タンク側壁を境界として、隣に整流器室を設け、ここにシリコン整流器を構成する。電圧調整に可飽和リアクトルを使用する場合は、この整流器室に収納すると、変圧器本体との寸法協調も良好で外部からの点検も可能である。

シリコン整流素子は第4図のクーラバスに並列素子数ねじ込み、整流スタックを構成するので、整流器部分は著しく小形となる。クーラバスは整流素子をねじ込む導体部分と、その両側にある発生熱を運ぶ冷却ダクトから成っている。この冷却ダクト内を冷却媒体が通過して素子温度をある一定温度に冷却する。さらに整流素子にはハイラップヒューズ（日立高速ヒューズ）が接続され、多数のヒューズをクーラバスに取り付けて、直流または変圧器2次端子に接続される。サージアブソーバも整流スタックに接近して取り付けられ、配線が短くてすむので、周波数の高い異常電圧の低減効果が大きい。ハイラップヒューズの溶断監視用として警報ヒューズ盤を内蔵し、点検のしやすいようになっている。前面は点検時の便宜をはかりドア式としている。

中、小容量器における風冷式では第6図の構造となる。大容量器における液冷式の整流スタックが、風冷式整流スタックになり、冷却用ファンが上部に取り付けられるほか電氣的、機械的構造に特に変わった点はない。変圧器内部の冷却が均一に行なわれるように、整流器室内側の変圧器タンク壁にも小形のラジエータを設け、整流器用ファンを共用して通風するので、変圧器の両側面から冷却された油が対流し、部分的な過熱の生ずる心配がない。整流器の冷却を開放風冷、変圧器を自冷とした200 kW 20 V 10,000 Aのシリコフォーマを第7図に示す。風冷式で変圧器に送油ポン



第7図 200 kW 20 V 10 kA シリコフォーマ

ブを使用することなく中容量級まで製作することができる。

第8図にシリコフォーマの主回路接続の一例を示す。整流回路は普通用いられている相間リアクトル付2重星形6相や3相全波ブリッジが使用されるが、その他の接続すなわち12相整流回路も製作することができる。

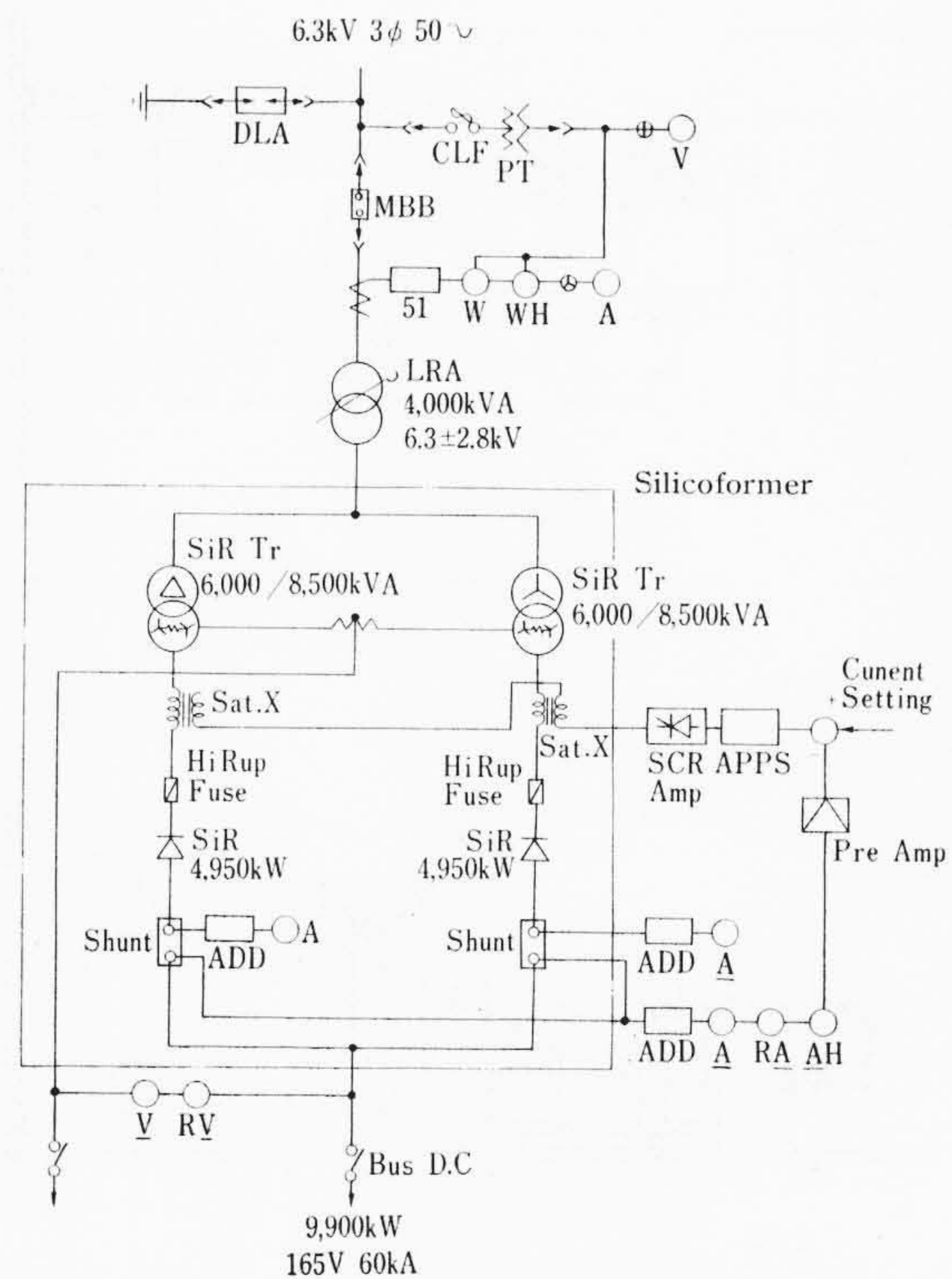
(b) 変圧器

変圧器の内部構造は、従来の構造と基本的には変わらないが、整流器と一体化するために、大電流端子は、変圧器タンク側板から水平に引き出される。したがって巻線からの各導体の配置については、電流の平衡および効率に及ぼす影響が大きいので、とくに慎重に検討している。

低電大電流である点は、従来の整流器用変圧器あるいは炉用変圧器と共通なものがあり、日立シリコフォーマにはこれらの技術が十分に生かされている。その一例として大電流端子は、さきに炉用変圧器用として開発した油密の完全な大電流端子を用い、また巻線からの導体の引き回しには、炉用変圧器における豊富な経験に基づく構造が採用されている。

整流器キュービクルは、変圧タンクにゴムパッキングを介してボルト締めにより取り付けられている。直流電流は、変圧器巻線からいったん大電流端子により変圧器タンク外に引き出され、フレキシブル導体を介して電圧調整用可飽和リアクトルのブスバー、すなわちクーラバスに接続され、整流素子を経て整流器キュービクルの直流端子から引き出されている。

変圧器用冷却器の配置は、整流器と一体化するために制限を受けるので、容量、冷却方式に応じて第3図に示すような方式がと



第8図 シリコフォーマ単線接続図

られる。

一般に中、小容量変圧器の冷却方式は、保守点検が容易で、また経済的なラジエータ形の自冷式が標準とされる(第3図 1-a, 1-b)。

大容量で据付面積および周囲条件などに制限を受ける場合は、それらの条件に応じ強制冷却すなわち送油風冷式(第3図 2-a)または、送油水冷式(第3図 3-a, 3-b)が用いられる。

3.2.2 標準シリーズ

第4表に電解用直流電源としてのシリコフォーマの概略標準を示す。この標準を設定する際考慮した点は次のとおりである。

- (1) 屋外設置、屋内設置用に適するよう設計する。
- (2) 電解工業用のため、腐食性ガスが内部へ侵入しないよう密閉構造とする。
- (3) 直流電圧の調整範囲は、従来の実績上設備ごとに大幅に異なるが、そのうちで比較的ひん度の多い100~65%とする。
- (4) 冷却水の確保できない地点も考え、冷却器は水冷式と風冷式の2種類とする。
- (5) 電解用電源は無停電であることがきわめて重要であるので、整流素子が1個事故を起こしても、そのまま連続運転

第4表 日立シリコフォーマ概略標準表

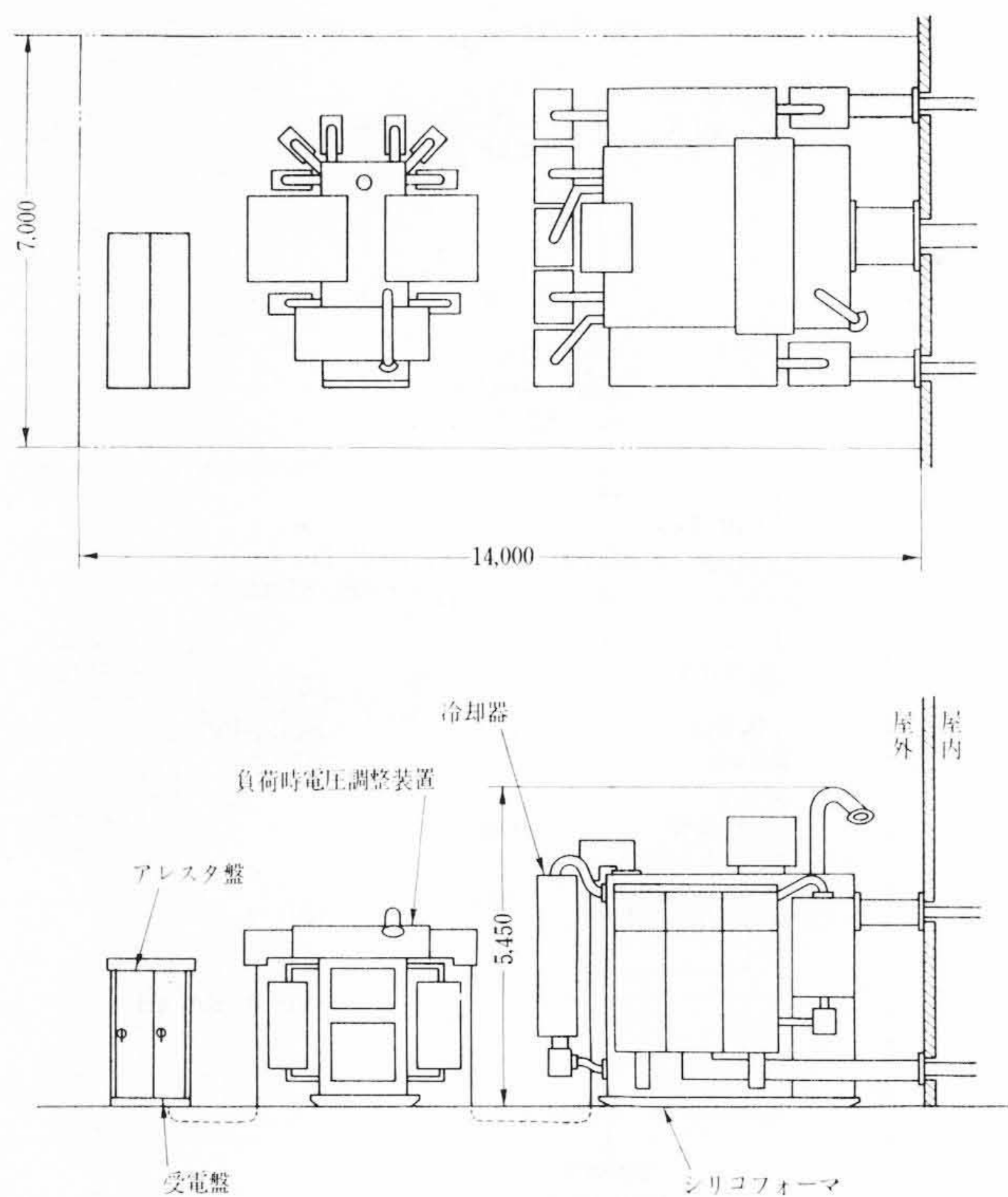
No.	直出力	直電流	直電圧	直電圧調整範囲	変圧器容量	概略寸法(mm)			油なし重量	冷却方式		相間リアクトル
	MW	kA	V	V	1次/2次MVA	H	W	D	kg	変圧器	整流器	
1	2.5	10	250	180~250	2.9/4.1	3,900	3,900	2,100	26,000	自	水冷または風冷	内蔵
2	5.0	20	250	180~250	5.8/8.2	4,500	4,100	2,200	33,500	自	水冷または風冷	内蔵
3	7.5	30	250	180~250	8.8/12.4	4,700	4,350	3,000	44,000	送油風冷または水冷	水冷または風冷	別置
4	10.0	40	250	180~250	12/17	5,000	4,500	4,400	54,000	送油風冷または水冷	水冷または風冷	別置
5	1.5	10	150	100~150	1.7/2.4	3,600	3,900	2,100	20,200	自	水冷または風冷	内蔵
6	3.0	20	150	100~150	3.5/4.95	4,000	4,000	2,150	29,600	自	水冷または風冷	内蔵
7	4.5	30	150	100~150	5.4/7.65	4,400	4,100	2,200	33,000	自	水冷または風冷	別置
8	6.0	40	150	100~150	7.4/10.45	4,600	4,300	4,300	39,800	送油風冷または水冷	水冷または風冷	別置

備考 1. 形式は屋内形とし、2重星形結線、負荷時タップ切換器付とする。

相間リアクトルは、変圧器に内蔵または別置形とし、制御用自己飽和形可飽和リアクトルは、整流器キュービクルに内蔵する。

2. 屋外形の場合、寸法Dが100(mm)増加する。

3. この表以外の仕様についても各種製作できる。



第9図 9,900 kW シリコフォーマ変電所機器配置例

ができる。

3.3 据付と配線

現地工事における据付、配線作業は、シリコフォーマでは著しく簡単である。すなわち中、小容量器では、シリコフォーマ一体のまま輸送するので、現地で基礎上に設置すれば、残りの作業は交流母線と直流母線のつなぎ込みで主回路は構成されるため、炉用変圧器や電力用変圧器並みの工事である。大容量器の場合、輸送制限その他で変圧器部分と整流器部分を分割して送る場合も、現地での組立は、電氣的、機械的接続箇所が数箇所極力減らしてあるため作業は簡単である。

第9図に、9,900 kW 風冷式シリコフォーマを屋外に配置する場合の一例を示す。最近、大電流母線にはアルミ材が多く使用されるようになっているが、シリコフォーマは、このアルミブスにも好適である。第9図の例のとおり雨水が直接アルミブスに触れ、長期使用中に腐食するのを防ぐため、一般にカバーをかぶせたいいわゆるブスダクト式とする。このダクト内部で発生したアルミブスの損失は、シリコフォーマの整流器室内にある冷却装置で通風し冷却できるので、屋外形でも電気抵抗の低い純アルミ材を母線材として用い、比較的電流密度を上げることができるので、銅材母線に比べ経済的である。

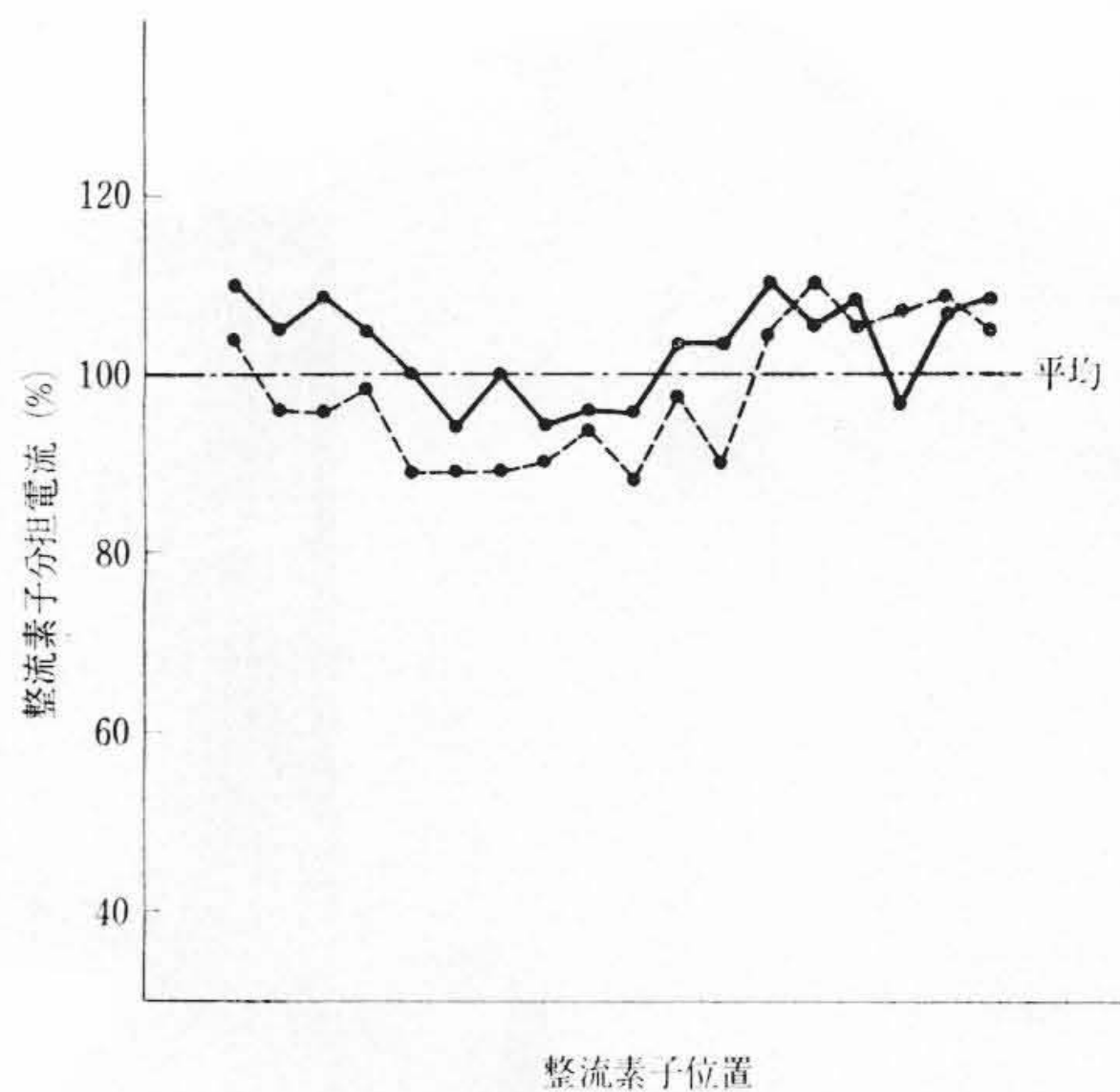
電解槽が100~200 kAと大形化すると、その直流端子の分割方法や配置が直流電源との接続方法とも関連して、並列母線電流の分担が不平衡となることがある。平衡化の方法には種々あるが、これらについては別の機会にゆずることとする。

3.4 製作例

3.4.1 仕様

4,000 kW シリコフォーマを製作し、詳細に性能の確認を行なったが、設計期待どおりの好結果が得られているので一例として紹介する。本装置の仕様は下記のとおりである。

交流入力 6.3 kV 3相 50 c/s
直流出力 4,000 kW
250 V 16,000 A



第10図 整流素子電流分担の一例

定格：連続

電圧調整範囲：210~250 V

負荷時タップ切換器 (17 タップ) と可飽和リアクトルの併用により全域を連続調整

冷却方式 変圧器：油入自冷

整流器：送油風冷

本装置は冷却用水が得られなかったため、空気冷却方式が採られた。

3.4.2 試験結果

(1) 効率、力率、電圧変動率

変圧器の入力端子から整流器の出力端子までの損失、すなわち変圧器、可飽和リアクトル、整流器、各部の導体の損失と冷却用動力、制御装置入力を含めて、効率97.2%が得られた。現地では電解槽とシリコフォーマ間の直流母線の損失が加わるが運転効率は97%が得られた。

力率は、可飽和リアクトル飽和時で92%、非飽和時で91%であり、規約電圧変動率で8.5%を得た。

従来、これらの値と運転値との間に無視しえない差があり、この原因の一つが変圧器と整流器間の接続導体に起因していることを考えるとき、シリコフォーマが低圧大電流電源に非常に適していることがわかる。

(2) 並列素子電流平衡

第10図は1アームの並列整流素子の各分担電流のバランス状態を測定した一例である。とくに各並列素子に、電流バランスや調整用リアクトルなどを使用することなく、日立製作所のみが使用できる素子順電圧降下のマッチングにより⁽⁴⁾、良好なバランスが得られた。各アーム間のバランスも非常によく、測定誤差範囲内で不平衡は認められなかった。

整流器単体を十分離れた別置変圧器で行なったときのバランス状態と、シリコフォーマとして変圧器と一体化したときの状態では、ほとんど変化なく、変圧器の漏えい磁束などによる影響を受けない整流スタック構成であることを確認した。

(3) 温度上昇

冷却は変圧器と整流器が別系統のため、変圧器については特に従来と異なる点はない。整流器部分は送油風冷式であるため、前述のように油冷却器とクーラブスの両者の冷却効果を経済的に配分することが重要である。整流素子を取り付けるクーラブスは小形で冷却効果の大きい構造に設計上考慮されたが、試験結果は、油温に対する素子スタッド部の温度上昇も予定どおりの値が得ら

第5表 電圧調整方式比較表

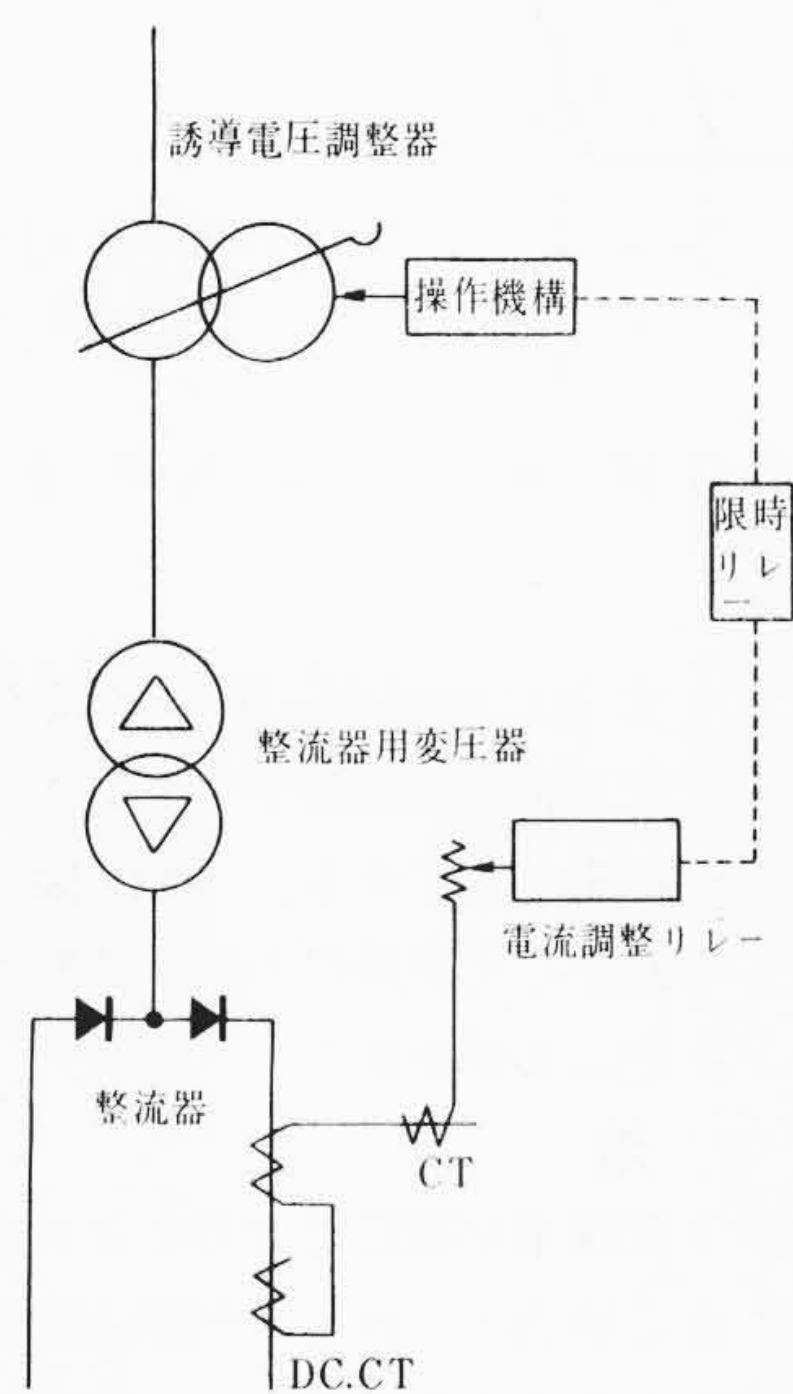
調 整 器	誘導電圧調整器	負荷時電圧調整器	可 飽 和 リアクトル	負荷時電圧調整器+誘導電圧調整器	負荷時電圧調整器+自己飽和形可飽和リアクトル
電圧調整のステップ	連 続	階段状	連 続	連 続	連 続
速 応 性	やや遅い	遅 い	速 い	やや遅い	や や 速 い
力 率	良	良	悪	良	悪
許容される動作ひん度	小	小	大	小	や や 大
電圧調整範囲	大	適	適	適	適
	小	適	適	適	適
対 象	1. 中小容量 2. 連続制御を要するもの	1. 一般	1. 垂下特性を要するもの 2. 連続制御を要するもの 3. 動作ひん度大なるもの	1. 一般 2. 連続制御を要するもの	1. 一般 2. 連続制御を要するもの 3. 小範囲の動作ひん度の大きなもの

れた。日立製作所の開発したクーラブスが、循環油冷却にもきわめて熱交換性能のよいことが確認された。

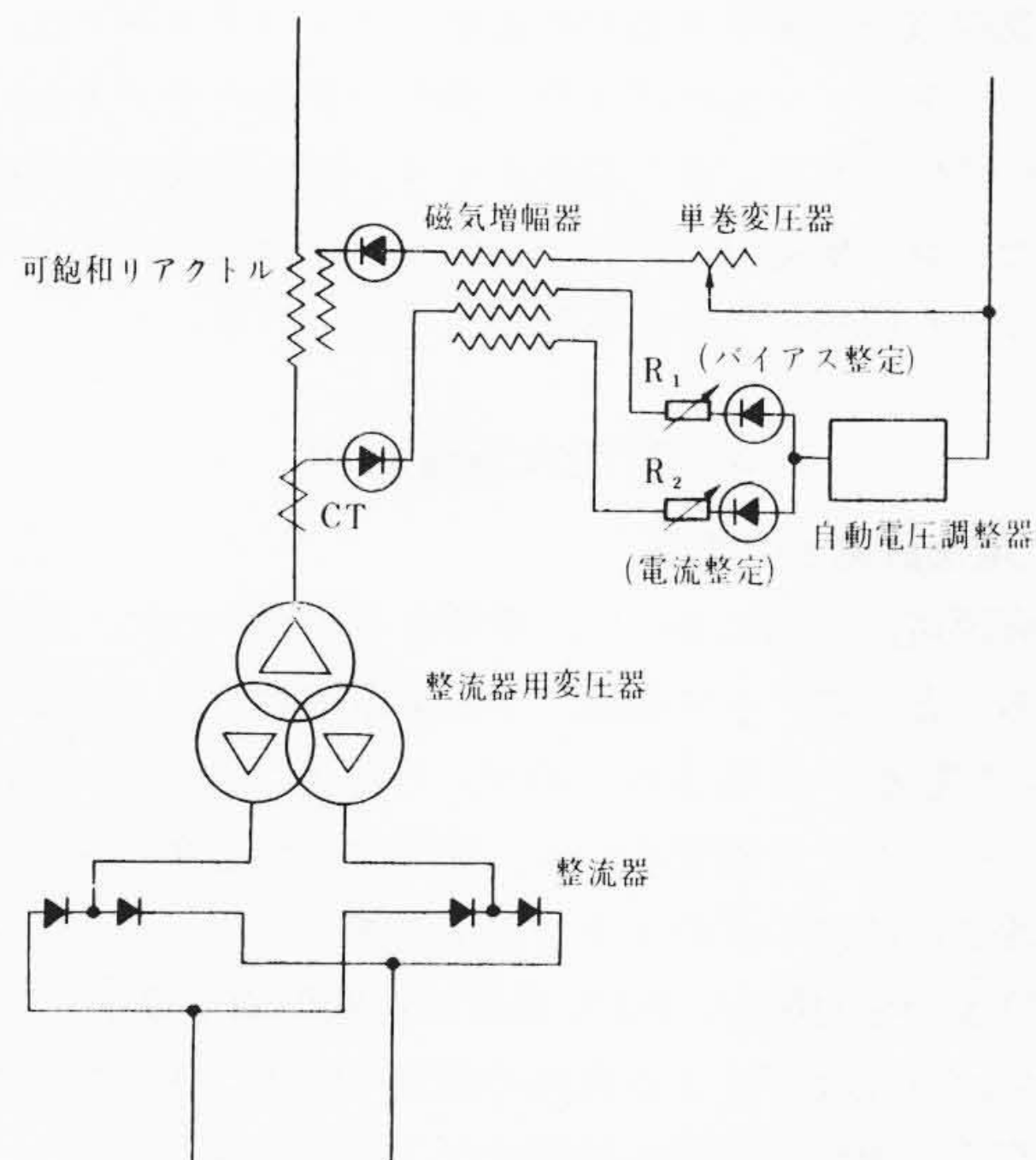
4. 電圧、電流調整方式

4.1 各種調整方式の比較

化学用整流装置においては、電圧電流調整方式が重要な問題である。



第11図 誘導電圧調整器による調整方式



第12図 可飽和リアクトルによる調整方式

電圧調整器としては、誘導電圧調整器、負荷時電圧調整器、可飽和リアクトルなどがあり、整流装置の用途、性能に応じ、これらを単独あるいは2機種を組み合わせて使用する。なお調整器をシリコフォーマと別に設置する場合と、シリコフォーマに内蔵する場合とがあるが、これらの機種、組み合わせ方式の選定は、制御特性あるいは並列台数などを総合して、合理的に決定さるべきである。

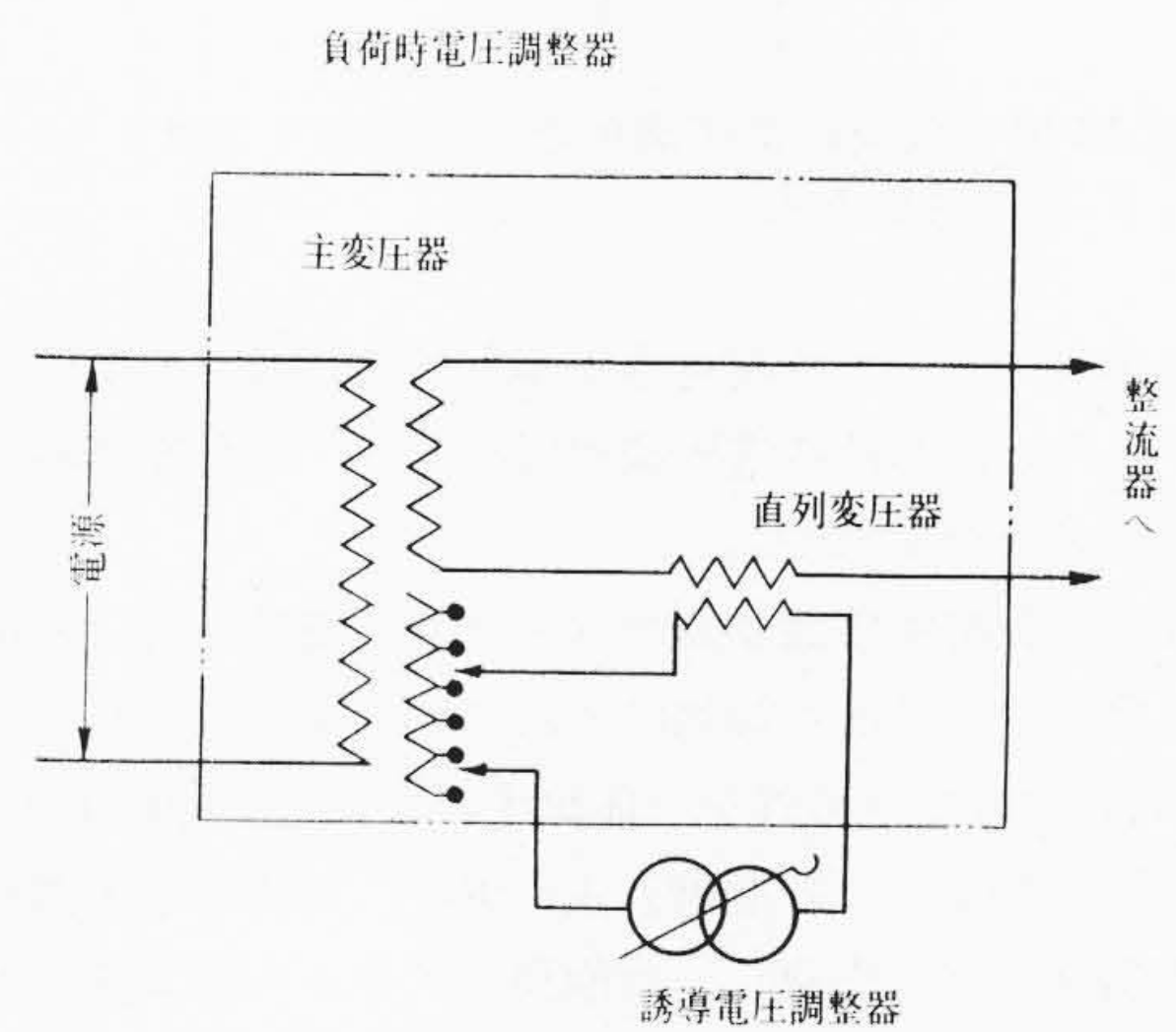
第5表は、これらの各種調整方式の特長とその適用範囲を示したもので、以下にその代表的な各種調整方式の概略について述べる。

第11図は、整流装置を誘導電圧調整器のみによって調整する電流自動制御方式を示したものであり、調整容量約1,000 kVA程度が限度である。

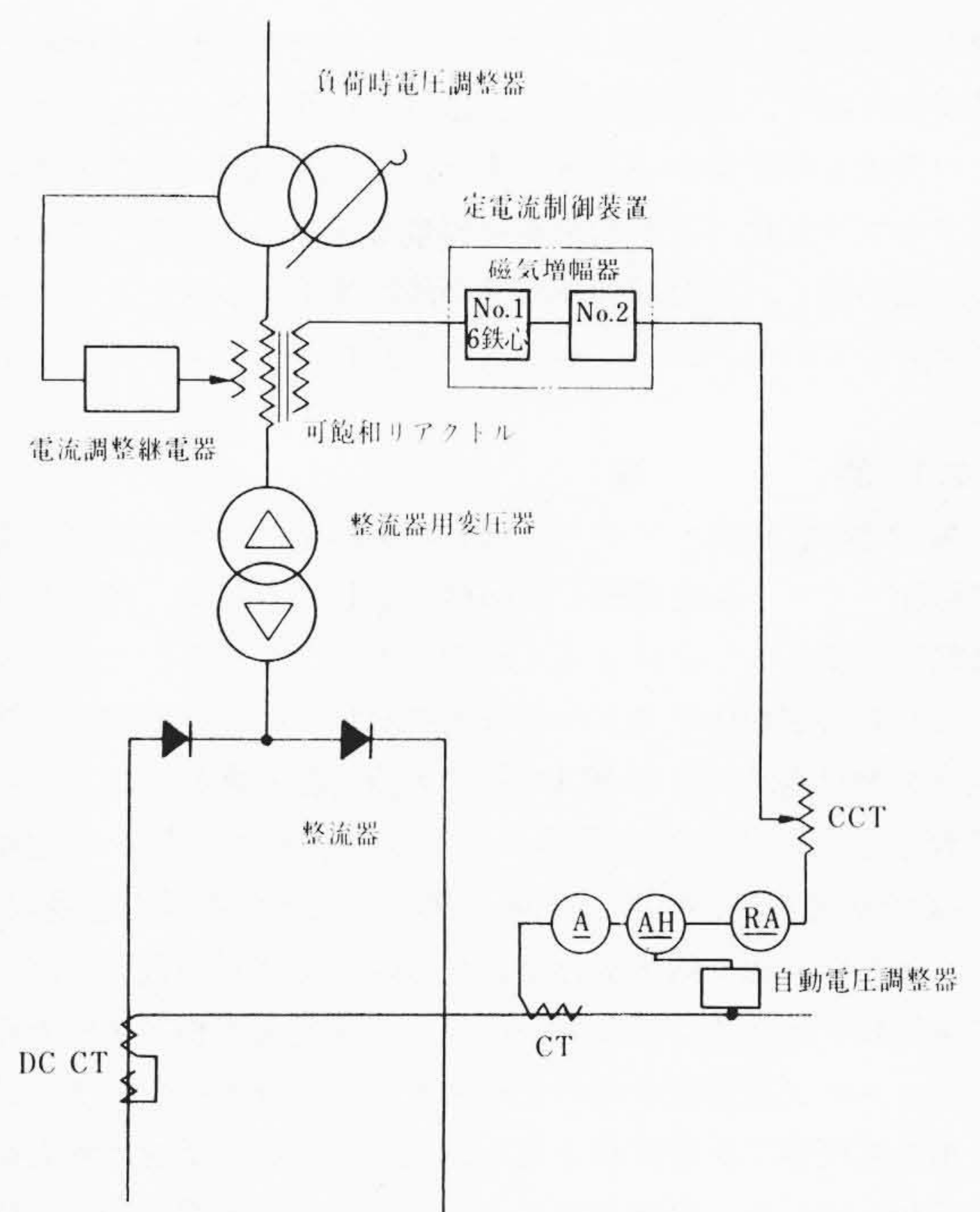
第12図は、電気炉用シリコン整流装置で電気炉が短絡したとき、急速に電流を制限するため、全域を調整しうる可飽和リアクトルを用いたものである。

第13図は、負荷時電圧調整器により粗調整し、そのタップ間は、誘導電圧調整器によって密調整する方式で、この組み合わせは経済性のすぐれた日立製作所独特の方式である。

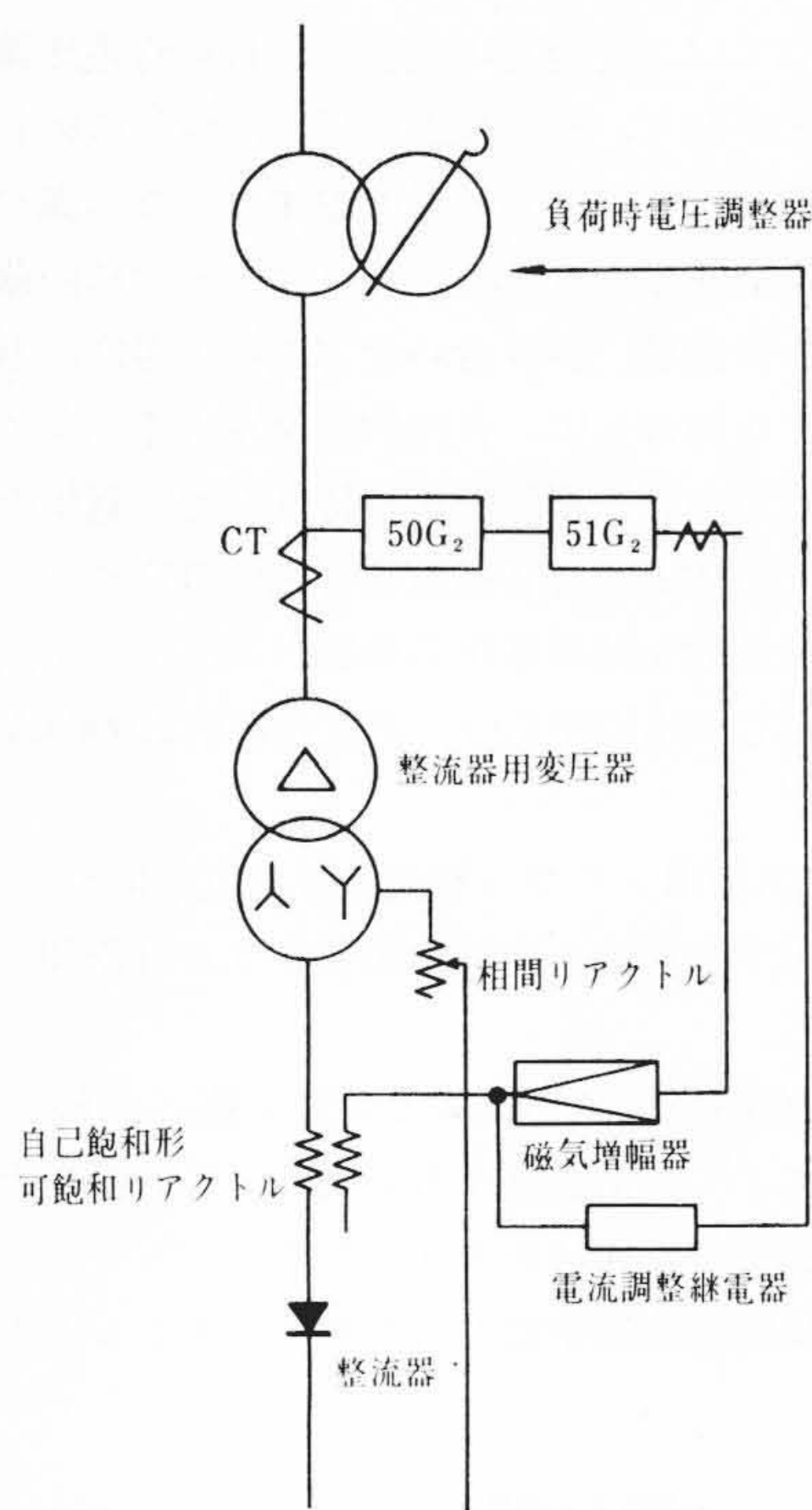
第14図は、負荷時電圧調整器と可飽和リアクトルの組合せによる



第13図 負荷時電圧調整器と誘導電圧調整器の組合せによる調整方式



第14図 負荷時電圧調整器および可飽和リアクトルの組合せによる調整方式



第15図 負荷時電圧調整器と可飽和リアクトルによる調整方式

調整方式を示し、ここで負荷時電圧調整器は粗調整に用いられ、可飽和リアクトルは、負荷時電圧調整器のタップ間を連続的に制御するために設けられたものである。

第15図は、負荷時電圧調整器のタップ間の調整に用いる可飽和リアクトルを変圧器の直流巻線側に入れて制御する例である。シリコフォーマにおいては、全装置を一体化する特長を十分に生かすため、取りまとめに有利な、この制御方式を用い、負荷時電圧調整器を整流器用変圧器タンクに内蔵し、可飽和リアクトルを整流器キュービクル内に組み込むことにより、調整装置一式を含む全装置を一体化する場合が多い。

4.2 可飽和リアクトル

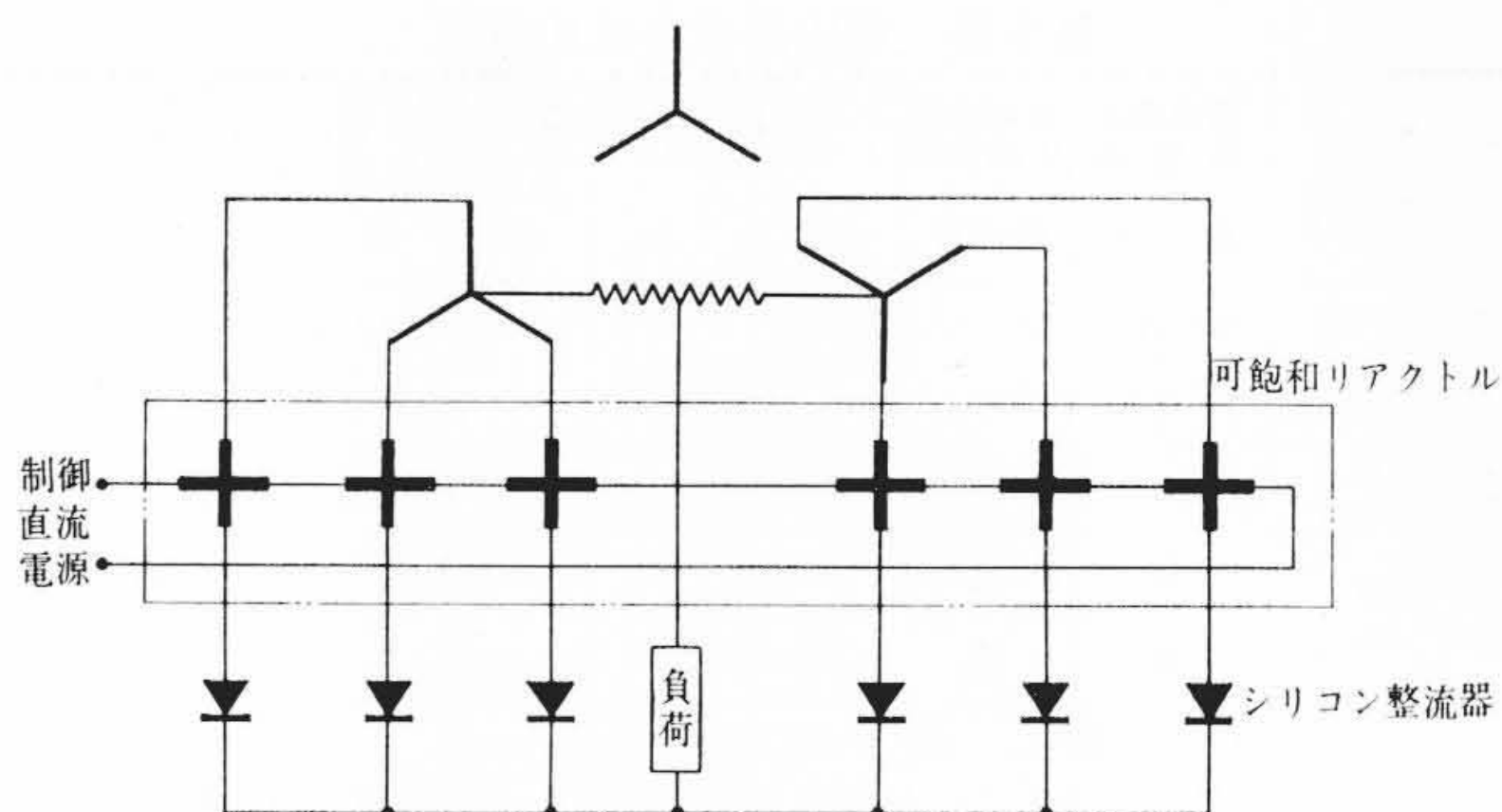
第15図に示した可飽和リアクトルは、自己帰還形磁気増幅器回路を構成しており、制御電流に対し定電圧特性をうることができる。

この方式を変圧器の一次側、すなわち交流回路にそう入する可飽和リアクトルと比べると制御巻線容量もきわめて小さくてすむため応答速度が速く、また制御巻線側の誘起電圧も小さいという大きな特長を有している。以下に本形式の可飽和リアクトルについて説明する。

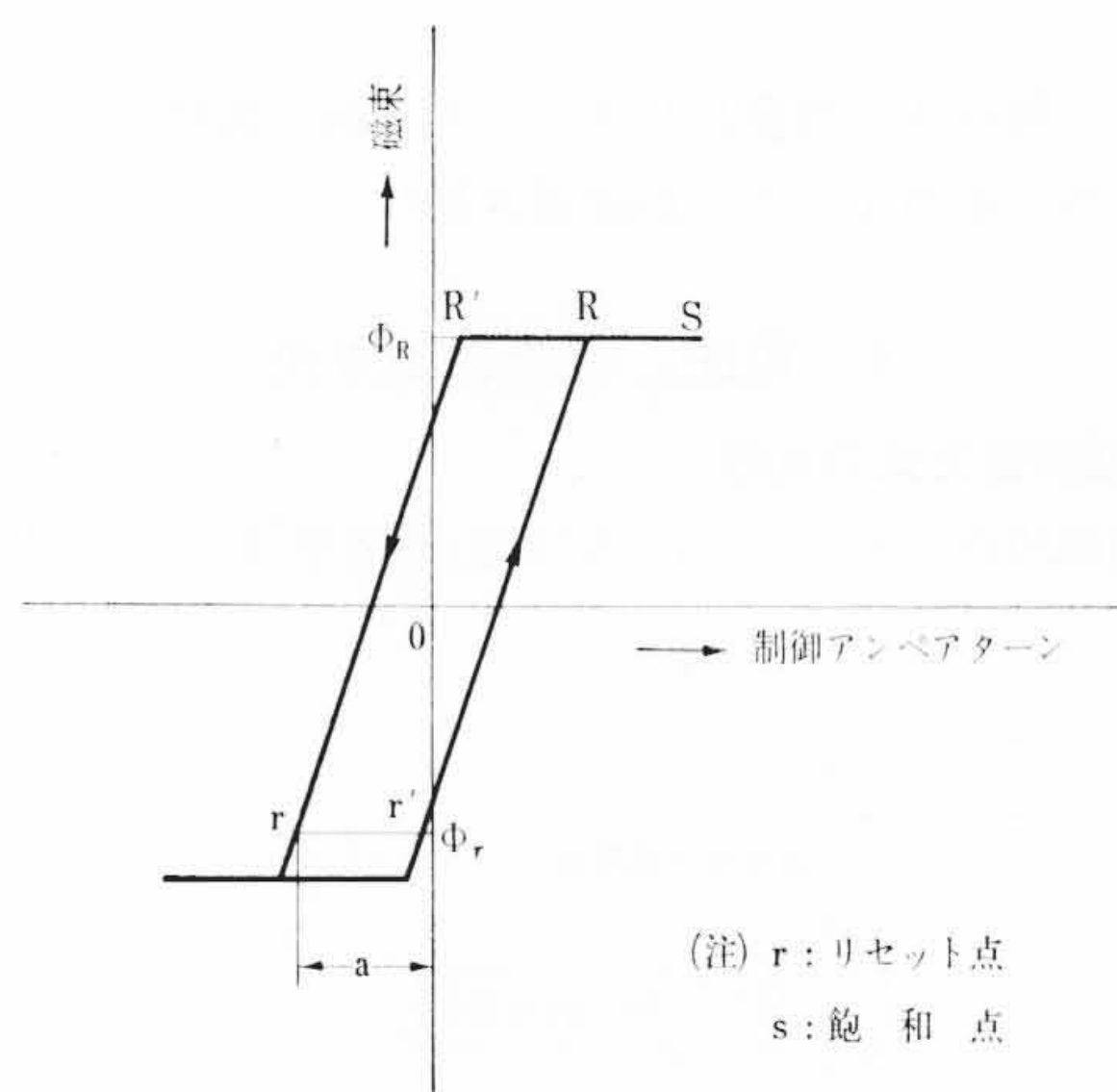
4.2.1 原理

第16図は、相間リアクトル付2重星形結線の整流器の直流側に可飽和リアクトルを接続した回路を示したもので、図中の制御直流電流を変えることによって出力電圧を調整することができる。すなわち可飽和リアクトルを電流の流れていない期間に、鉄心の磁束を制御電流により第17図の r 点(磁束 Φ_r)までリセットしておくと、つぎの通流期間が始まるとき磁束が Φ_r から飽和磁束 Φ_R まで変化し、磁束変化量($\Phi_R - \Phi_r$)に相当する電圧を吸収する。

u 相から v 相へ転流が行なわれる瞬間では v 相電圧が高くなって可飽和リアクトルに電流が流れ、磁束変化に相当する転流リアクタンスによる重なり角のため大きな電圧降下を生じる。さらに v 相の変圧器二次電圧が上昇し電流がしだいに増せば鉄心が R 点で飽和しはじめ、可飽和リアクトルの出力巻線端子間の電圧は急速に減少する。鉄心が飽和しはじめる R 点までは、直流電圧は u 相と v 相の電圧の平均値になる。一方 u 相の可飽和リアクトルの



第16図 相間リアクトル付2重星形結線の直流側可飽和リアクトル結線図



第17図 鉄心の磁気特性

電流は減り S 点より R' 点に移動し、 R' 点で鉄心は飽和状態から解放される。このとき v 相の可飽和リアクトルのインピーダンスはほとんど0となり転流が完了する。第17図で a は直流励磁バイアスを示し、この値としては鉄心の磁気特性の直線部に相当するアンペアターンを選ぶ必要がある。

4.2.2 構造

鉄心は方向性ケイ素鋼帯を環状にまくことが多く、十分な焼鈍を行なう。環状にまく場合は、鉄心の内径は特性上そこを貫通する導体に合わせ極力小さくする。低圧、大電流の場合は、出力巻線を1ターンとし母線を共用することもある。

出力巻線電圧を調整するのに必要なアンペアターンは、普通は数十アンペアターンあれば十分に調整できるので、1ないし数ターン巻いて作られる。また損失が小さいため乾式で製作することも容易で、巻線構造が簡単で小形軽量のため前述のように整流器キュービクルに内そうできる特長をもっている。

5. 直流大電流計測

5.1 大電流計測上の要点

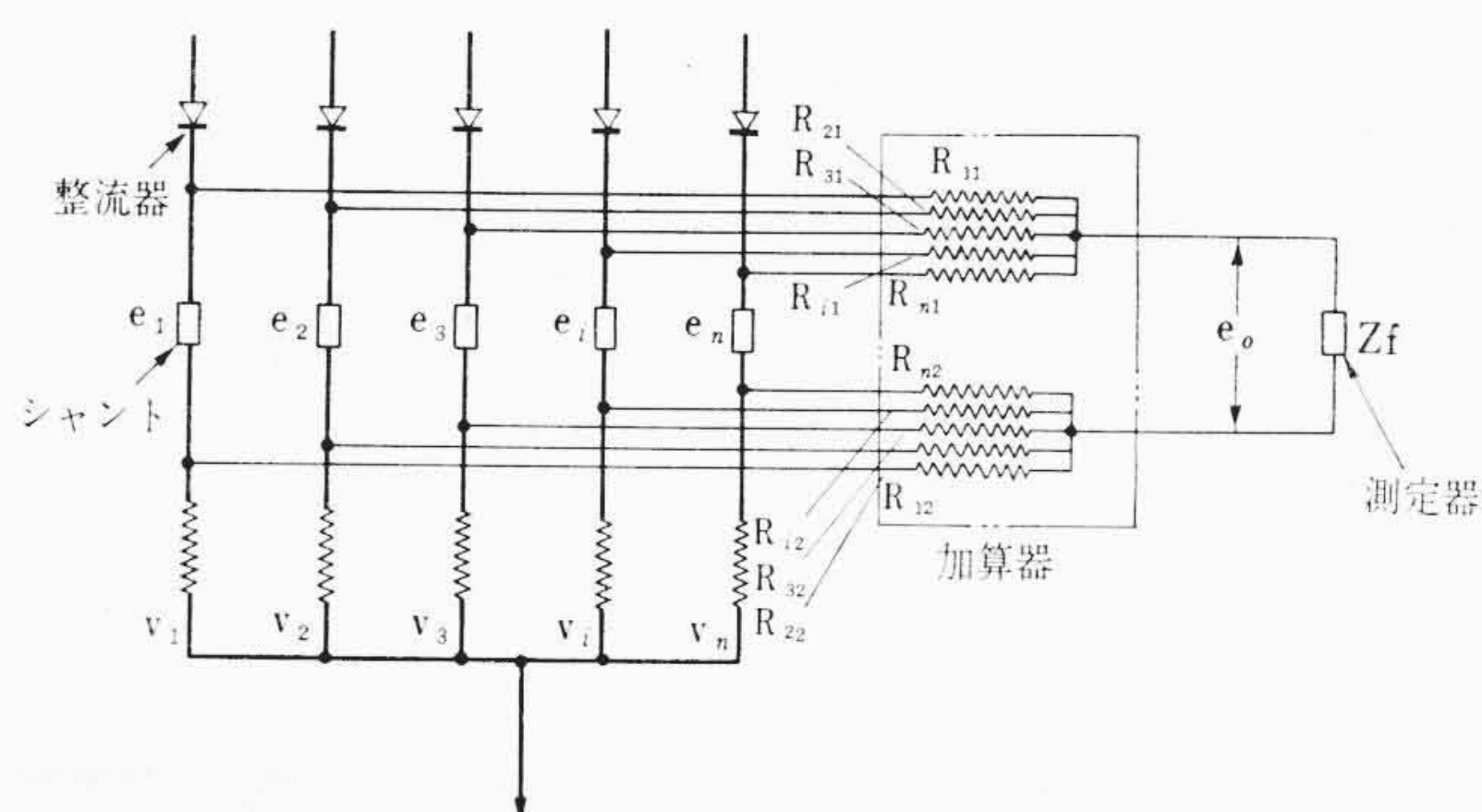
化学用直流電源設備において、重要なものの一つに、直流電流の計測がある。とくにアルミ電解、ソーダ電解設備などでは、10~200 kAに及ぶ大電流が使用されるので、その計測装置も大がかりなものとなり、そのうえ目盛定めにも、種々検討が必要である。この重要な大電流計測にはつぎのような点が要求される。

- (1) 電流の絶対値を、0.5%程度の精度で測り得ること。
- (2) 帰路電流などによる周囲の磁界の影響を受けないこと。
- (3) 測定結果が、温度に無関係なこと。
- (4) 指示が、直線的であること。

第6表 大電流計測方式の比較

	確 度	外部磁界 の 影 響	温度影響	指 示 線 の 性	出 力	経年変化	較 正	主回路絶縁	損 失	電 流	参 考 文 献
シ ャ ン ト	0.05~ 0.5%	な し	な し	最もすぐ れている	普 通	な し	容 易	計 器 に 絶 縁 耐力をもたせる	比較的 大	20 kA (60 kA)*	横河技報, 1959, No. 4 P 55~60
D C C T	0.5~1.0%	あ り	な し	普 通	大	な し	現地較正困難	容 易	小	60 kA	西野: 電学誌 61 634 P 241~242 (昭 16-5) AEG Mit. 49 10/11 S606-609 (Oct/Nov. 1959)
ホ ー ル C T	0.2~0.5%	あ り	あ り	普 通	小	今後の実 績による	現地較正困難	容 易	小	150 kA	ETZ-A. 77 14 S487-490 (Jul. 1956) ETZ-A. 78 20 S734-736 (Oct. 1957)
補 償 変 流 器	0.01~ 0.02%	な し	な し	すぐれて いる	大	な し	容 易	容 易	小	20 kA	ETZ-A. 80 18 S629-632 (Sept. 1959) IEEE Commu & Elec., No. 70 P22-27 (Jan. 1964)
シ ャ ン ト + 磁 気 増 幅 器	0.3%	あ り	あ り	普 通	大	少 ない	現地較正困難	容 易	比較的 大	125 kA	EE. 73 2 P148 (Feb. 1954) TAIEE. 73 P93-96 (May. 1954) TAIEE. 76 P300-302 (Nov. 1957)
シ ャ ン ト + 加 算 器	0.1~0.5%	な し	な し	最もすぐ れている	普 通	な し	容 易	計 器 に 絶 縁 耐力をもたせる	比較的 大	200 kA	

備考: * フランス CdC, ISOSHUNT. 30 mV. 確度 ±0.1%



第18図 並列加算方式

- (5) 直読計, 記録計, アンペアアワー計などを動かすのに十分な出力をもつこと。
- (6) 経年変化がないこと。
- (7) 目盛定めが容易であること。
- (8) 主回路導体と計測回路が絶縁されていること。
- (9) 損失が少ないこと。

以下, 大電流計測の各種方式を比較し, さらに, 最近, 日立製作所が開発した並列シャントの加算方式を紹介する。

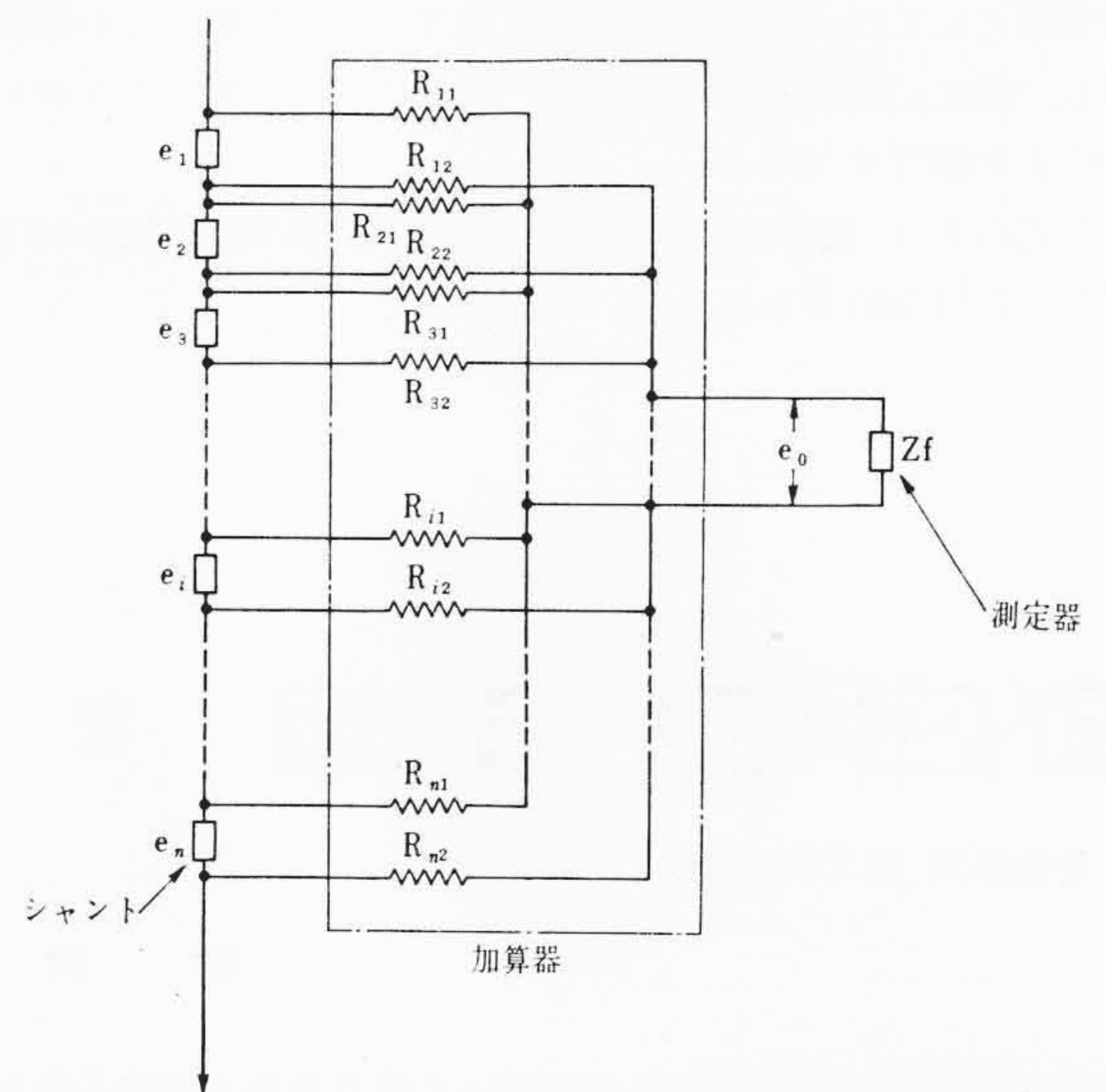
5.2 各種方式の比較

大電流計測には, 種々な方法があり, おもなものとしては,

- (1) シ ャ ン ト
- (2) 直 流 変 流 器 ((DCCT))
- (3) ホ ー ル 変 流 器 (ホ ー ル C T)
- (4) 補 償 変 流 器
- (5) シ ャ ン ト と 磁 気 増 幅 器 の 組 合 せ
- (6) シ ャ ン ト と 抵 抗 加 算 器 の 組 合 せ

などがあげられる。これらには, それぞれ, 一長一短があるので, 計測方式の計画にあたっては, 設備の規模および要求精度により検討することが好ましい。

第6表は, 大電流計測の各種方式を比較したもので, 表中の電流欄は, 今までに実施されたもの, または, 実施見込みのある概略の電流限界を示したものである。また製作工場とか, 電気試験所などにおいて, 10~15 kA 程度の電源で, 目盛定めを行なった後, 実際の設備で, 100~150 kA に使用し, これが所定の精度で測定されているかどうか確かめる必要があるが, 大電流回路では, 困難であるため建設当初から母線, 導体の電圧降下および磁場による誤差が生じないよう母線配置を考慮することが好ましい。こうすれば稼働後の



第19図 シャントの目盛定め法

電流較正も容易となる。

5.3 並列シャントの加算方式

第18図は, 並列シャント加算方式の原理を示し, シャント, 加算器, および測定器から構成される。

測定器の, 入力インピーダンスを Z_f , 各シャントの電圧降下を $e_1 \dots e_n$, 母線電圧降下を $v_1 \dots v_n$ とすると, Z_f の端子電圧 e_0 は,

$$e_0 = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{R_{i2}} \left(\sum_{j=1}^n \frac{e_j}{R_{i1}} + \sum_{j=1}^n \frac{v_j}{v_{i1}} \right) - \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_{i1}} \sum_{j=1}^n \frac{v_j}{R_{i2}}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{R_{i1}} \sum_{j=1}^n \frac{1}{R_{i2}} + \frac{1}{Z_f} \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{R_{i1}} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_{i2}} \right)} \dots (1)$$

となり, 母線電圧降下を誤差の要因として含んだ値となる。

今, 各シャントに属する加算器の, 対の組の抵抗値を, e_0 の所要精度以内になるようにそろえれば, (1)式から, 母線電圧降下 v_i は消去され,

$$e_0 = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{R_{i2}} \sum_{j=1}^n \frac{e_j}{R_{i1}}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{R_{i1}} \sum_{j=1}^n \frac{1}{R_{i2}} + \frac{1}{Z_f} \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{R_{i1}} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_{i2}} \right)} \dots (2)$$

となり, 母線電圧降下は無関係となる。

つぎに, (2)式におけるシャントの電圧降下 e_i のばらつきについては, 所定の精度に較正されてさえいれば, 対応する加算抵抗器の対の抵抗値で補正しておけばよい。

このようにして、各シャントの精度が明らかであれば、10~15 kA のシャントで、100~200 kA の大電流を、高精度に測定することができる。さらに本方式の、10~15 kA 電源による目盛定めは、シャントを第19図のように、直列接続として行こなうとができる。すなわち、シャントの電圧降下を $e_1 \cdots e_n$ とし、加算器の抵抗値を R_{i1} , $R_{i2} \cdots R_{in}$, R_{n2} 測定器の入力インピーダンスを、 Z_f とすれば、 Z_f の端子電圧 e_0 は、

$$e_0 = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{R_{i2}} \sum_{j=1}^n \frac{e_j}{R_{i1}} - \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_{i1}} \sum_{j=1}^n \frac{e_{j+1}}{R_{i2}}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{R_{i1}} \sum_{j=1}^n \frac{1}{R_{i2}} + \frac{1}{Z_f} \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{R_{i1}} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_{i2}} \right)} \cdots \cdots (3)$$

となり、 e_0 は、各シャントの端子電圧の和に比例することがわかる。この方式において、シャント誤差は0.05~0.5%、加算抵抗器の誤差は0.02%程度にできるので、シャントと加算器の総合誤差は、0.1~0.5%となる。

測定器としては、連続測定には、精度0.5%の電子式平衡計器を使用し、特に、数値表示を要する場合には、 e_0 をデジタルボルトメータにより測定すればよい。

本方式により、実回路でシャント並列数12個の総合電流40 kAを測定し、良好な結果を収めた。

6. 結 言

以上、最近の化学工業用シリコン整流装置の概要を紹介したが、著しい特長として、大電流計測に簡単で0.1~0.5%級の高精度が得られる方法が新しく開発されたことおよび、一体構造の整流装置、シリコフォーマが実用化され、単器で11,000 kW という大形器が輸出される段階にきていることである。

一方シリコン制御整流素子の進歩により素子の電圧、電流容量が増加しているので、低圧大電流分野にもしだいに用いられてきている。日立製作所ではすでに600kW 3,000A、90 kW 5,000Aなどを完成し営業運転が行なわれており今後の進出が大いに期待される。電圧調整装置は格段に簡単となるので、この制御整流素子を使用したシリコフォーマがきわめて有望である。これらの詳細は別の機会に報告する予定である。

生産の合理化がきわめて重要である現在、製品原料の価格を大きく支配する直流電力の精密計測と設備費の低廉な整流装置を開発したことは、今後の生産性向上に貢献するものと思われる。

参 考 文 献

- (1) 近藤、高橋：日立評論 42, 935 (昭 35)
- (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 700340 号
- (4) 登録実用新案 第 733943 号



新 案 の 紹 介

登録新案 第733919号

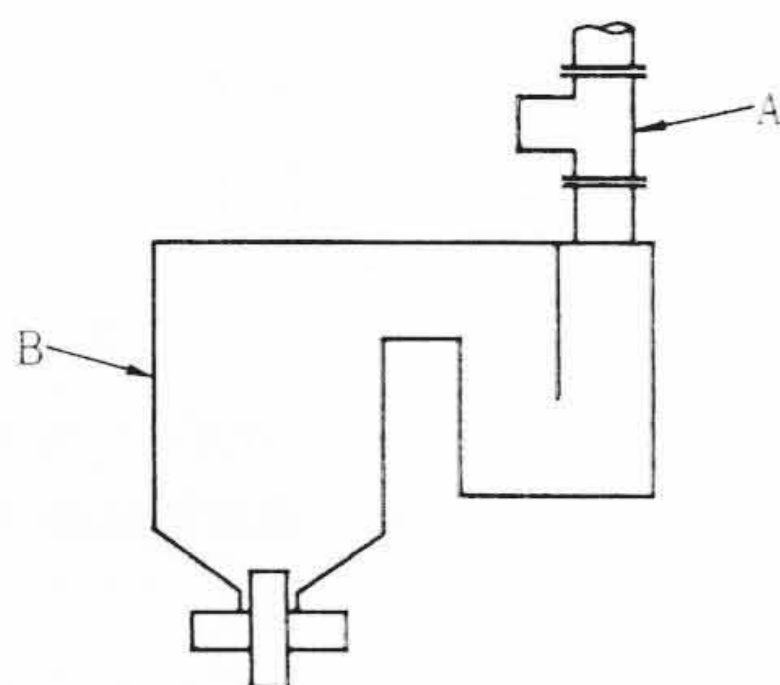
勝 尾 貞 徳

炉 内 圧 調 節 器

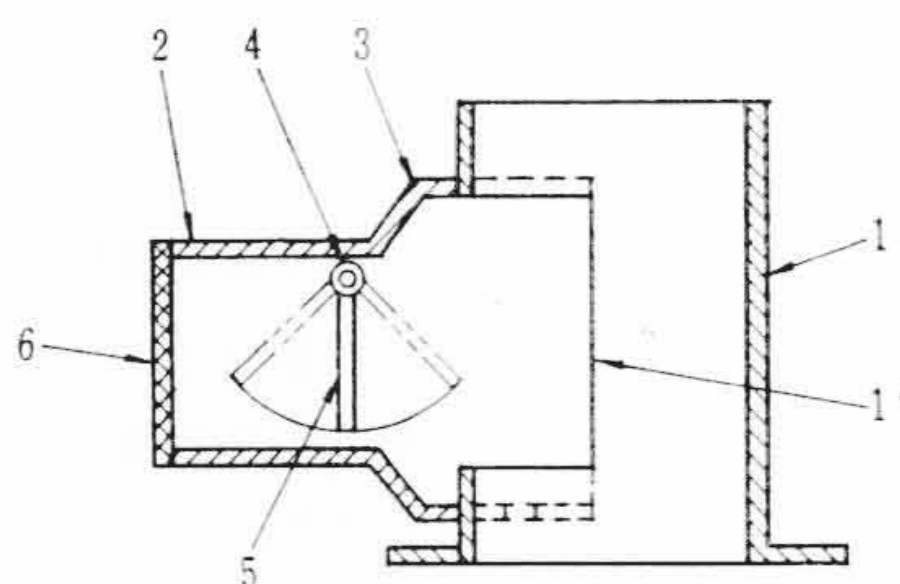
小形温風炉またはボイラなどにおいて煙突通風力の過不足および変動は、特に燃焼の良否および安定性に大きく影響し事故発生の原因となっている。この考案は煙突通風力および炉内圧力の変動に応じて通風力および炉内圧力を調節し、かつ火炎吹出しおよび雨水の炉内侵入を防止して通風力および炉内圧力を常に安定した状態に保つ炉内圧調節器に関するものである。

炉内圧調節器Aは第1図に示すように燃焼炉Bの出口部に設けられて通風力の調節を行なう。第2図、第3図において1は開口部1'を設けた筒、2は拡大部3を設け開口部1'下端と段違いを設けて筒1に固定されたダンパケース、4は回転軸、5は上端を回転軸4に

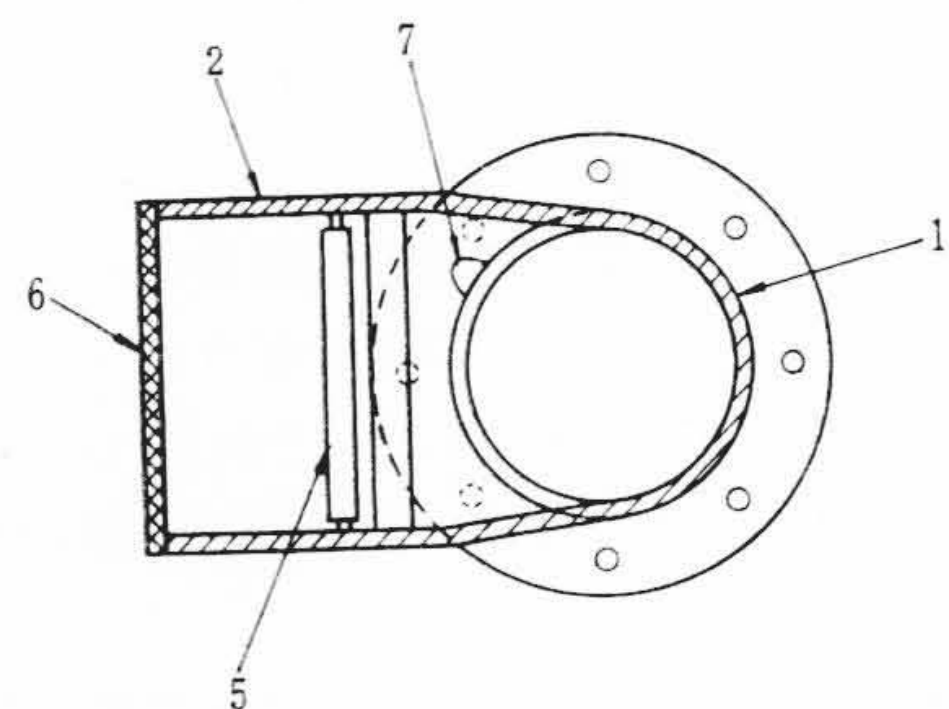
回転自在に支持されたダンパ、6はフレームキャッチャー、7は拡大部3に設けた水抜穴である。しかしてダンパ5は自由に内外両側に開くことができるので煙突の吸引力過度、煙突先端よりの突風吹込み、燃焼器始動時、異常着火時などに応じて内側あるいは外側に開き通風力および炉内圧は調節される。この場合ダンパケース2には拡大部3が設けてあるため気流はなめらかとなり、ダンパ5のわずかな動きを拡大するため微圧変動に対して敏感に作用する。また異常着火などによる火炎の吹き出しはフレームキャッチャー6により防止され、雨水は水抜穴7より排水される。したがって通風力および炉内圧力は常に安定した状態に保たれる。



第 1 図



第 2 図



第 3 図