U.D.C. 621.33:621.311.4

最近の電鉄用変電システム技術

Recent Technology for Traction Power Supply Systems

渡辺幸治* *Kōji Watanabe*
向野茂生** *Shigeo Kôno*
山岸嘉勝** *Yoshikatsu Yamagishi*
鈴木保男*** *Yasuo Suzuki*

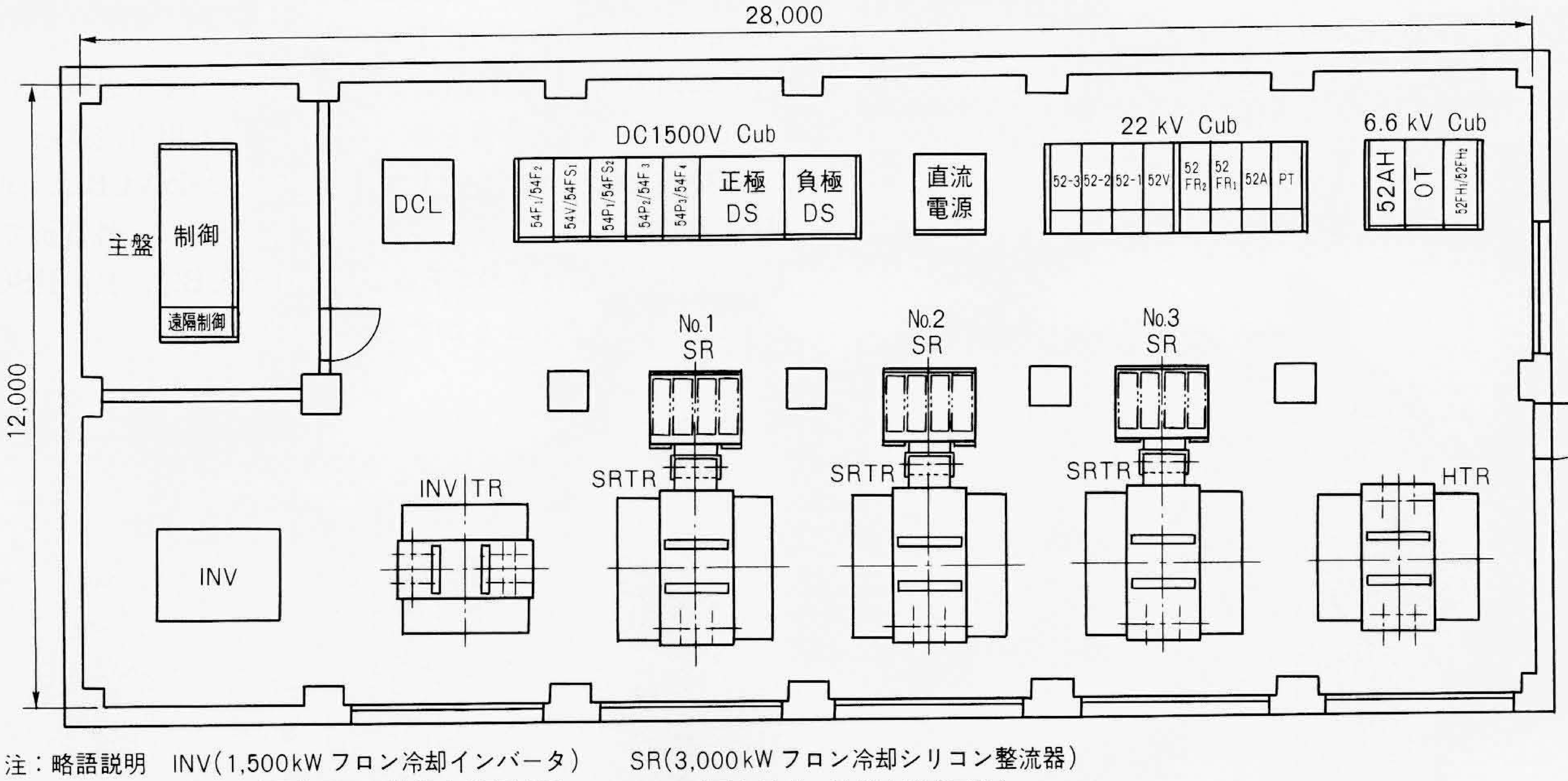
電鉄用変電システムは，変電所と変電所どうしを有機的に結合し，運転，管理する電力管理システムとで構成されるが，近年，それぞれの構成機器について開発，改良が加えられ近代化が図られてきた。近代化とは，ひとことで表現すれば，機器を小形化すること，運転保守の省力化に寄与すること，及びエネルギー消費の低減をもたらすこと，の三つの目的に要約される。もちろん，安全性や信頼性の向上を図ることはいうまでもない。

本論文では，このような目的を具体的に実現した各機器，及びシステムについて述べる。

1 緒　言

電鉄を構成するシステムの中には，車両のように近代化の要素として，乗り心地の良さや美麗さといった情緒的な要求が含まれるものもある。これに対し変電システムは，列車の運行を支える裏方として，高い安全性と信頼性の要求とともに経営的観点から，コストパフォーマンスの高さが求められる。すなわち使用者から見た近代化とは，初期投資と運転コストの低減に寄与するものでなくてはならない。

最近の都市での地価の高騰は，電鉄でも変電所敷地面積の縮小化の要求となって表れている。設備機器の小形化はこの要求を満たす必す(須)の条件で，初期投資低減に対する波及効果は大きい。次に，運転コストの低減とは人件費の節減と消費電力の節減，いわゆる省力化と省エネルギー化である。



注：略語説明
INV(1,500kW フロン冷却インバータ)
INV TR(同上用ガス絶縁冷却変圧器)
DCL(直列リアクトル)
54F, 54P, 54V (直流高速度真空遮断器)
正極DS(正極断路器)
負極DS(負極断路器)
SR(3,000kW フロン冷却シリコン整流器)
SRTR(同上用ガス絶縁冷却変圧器)
52(22kVガス絶縁真空遮断器)
PT(計器用変圧器)
52AH, 52FH (6.6kV真空遮断器)
OT(制御用電源変圧器)
HTR(5,000kVA 高圧配電用ガス絶縁冷却変圧器)

図1　最近の電鉄用変電所レイアウト　従来の変電所に比べ機器が小形化されており床面積が小さい。

* 日立製作所機電事業本部　** 日立製作所国分工場　*** 日立製作所大みか工場

すなわち，前者を支えるものがメンテナンスフリー機器の採用であり，運転及び保守管理の自動化である。また後者は，低損失機器の採用と回生電力の有効利用を意味している。

このように，製作者の目指す近代化の三つの目的とは，そのまま使用者の要求に合致する。

近年，高品質素材の出現や半導体の大容量化，またME(Microelectronics)の発達など，関連基礎技術の進歩は目覚ましく，これをベースとした新しい製品が出現した。真空技術やSF_6ガス応用技術が進歩し，新しい開閉装置や変圧器が造られた。大容量電力用半導体を使用した変換器の出現，あるいは制御装置のME化や遠隔制御装置のコンピュータ化など，それぞれ近代化の目標である小形化，省力化及び省エネルギー化を実現したわけである。

新しく開発された機器によって構成された電鉄用変電所を図1に示す。

2 開閉器

2.1 交流開閉器

変電所の主要機器のひとつである開閉器も，近年の地価高騰によって，据付面積の縮小化が強く要求されている。この要求に対応するため，60 kV以上のガス絶縁開閉装置は配置の自由度が高く，しかも従来形の構成機器を複合集積化して縮小を図った。また，エアレスによるメンテナンスフリー化，適切なガス区画による事故対応性の向上などを図った新形の縮小化ガス絶縁開閉装置を開発し納入に至っている。20 kV～30 kVの開閉器については，縮小化・省力化・高信頼性・安全性の要求に対応すべく，C-GIS(キュービクル形ガス絶縁開閉装置)を開発した。その写真を図2に示す。このC-GISは，真空遮断器を採用したため接触子の損傷が少なく，保守点検は操作器部だけでよく，大幅な省力化が図れる。大気圧近傍の低圧力ガスを採用しているため，ガス容器は第2種圧力容器などの法的規制を受けず，比較的自由な容器構成と機器配置が可能である。据付面積は従来の気中絶縁キュービクルに比べて30～50%に縮小できるなどの特長を持っている。

2.2 直流開閉器

電鉄直流変電所の保護用として採用されてきたHSCB(直流高速度遮断器)は，保守・騒音・小形化の面から長年改良が望まれてきた。近年，これらの問題を解決する手段として，サイリスタあるいはGTO(Gate Turn Off)サイリスタを用いた無接点遮断器が開発され，一部で採用されている。しかし，日立製作所の製作経験によると電力損失，コスト，寸法などに問題があり，これらの点を解決するには，なお相当の時間が必要と考えられる。そこで，これらの諸問題を解決するものとして，真空バルブを用いたHSVCB(直流高速度真空遮断器)を開発した。その写真を図3に示す。このHSVCBは，主接点に真空バルブを用いたコンデンサ転流方式を採用している。高速駆動装置によって，真空バルブは約1 msで開極する。真空バルブは微小ギャップで，高い絶縁回復性と高周波電流遮断特性を持っているため，遮断時間(転流完了までの時間)を1.5 msに低減できた。このHSVCBは従来のHSCBに比較し，アークスペースが不要となるため2段積みも可能となり，この場合据付面積が従来の約25%に縮小でき，防災性にも優れている。また，動作電流目盛の経年変化がなく，接点消耗が少なく保守性がよい。半導体形遮断器に比較し，通電損失が約5%と小さい。十分な通電容量や遮断容量を持っているため，負荷制限やバックアップが不要である。バイパス回路なしに両方向通電が可能である。過電流耐量や過電圧耐量が優れているなどの特長を持っている。き電用直流遮断器の方式と特性比較を表1に示す。今回開発したHSVCBは，従来のHSCBの持っている諸問題を解決するとともに，性能面でも大幅な向上を図ったものである。このHSVCBは，長いHSCBの歴史を塗り変えることができると確信する。

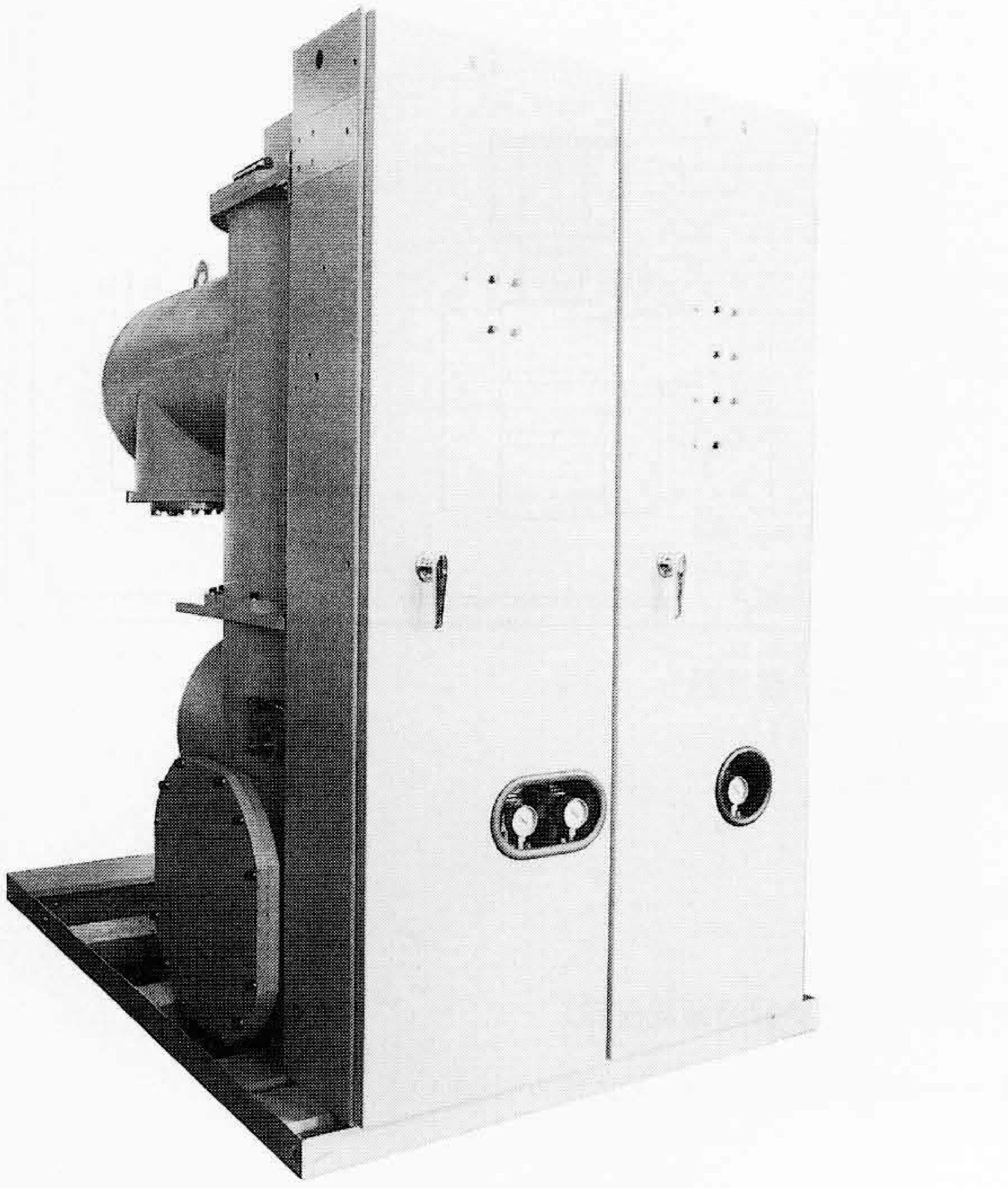


図2　キュービクル形C-GIS(ガス絶縁開閉装置)　図は側面及び裏面カバーを外したものを示す。

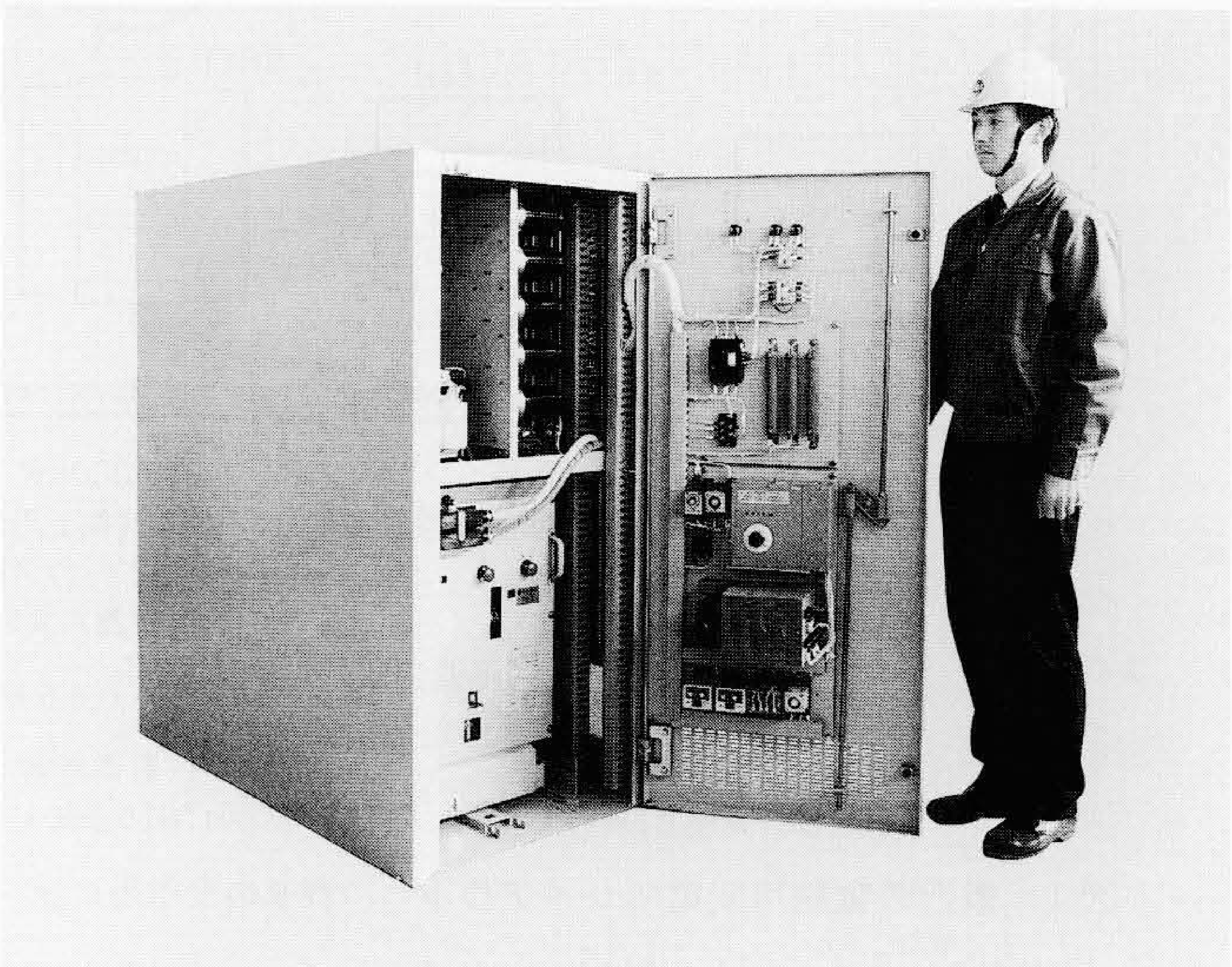


図3　HSVCB(直流高速度真空遮断器)　従来の機械式及び半導体式に比べ非常に小形である。

表1　き電用直流遮断器の方式と特性比較　　直流真空遮断器は他の遮断器に比べ優れた特長を持っている。

No.			1	2	3	4	5
遮断器方式			HSCB	S.HSCB	HSVCB	TH.CB	GTO.CB
構成	遮断原理		気中アークの冷却・拡散による消弧		転流回路によるターンオフ 真空バルブ	サイリスタ	素子自体の消弧機能によるターンオフ
	遮断エネルギー処理		アークシュート		NLR		
	過電流検出		主回路分流による電磁釈放	静止形継電器 アナログ		ディジタル	
	高速駆動装置		ばね (主回路分流 電磁釈放)	ばね (強制逆励磁 電磁釈放)	電磁反発コイル	—	—
	操作器		電磁・空気	電磁	電動ばね	—	—
定格	定格電圧		DC 1,500 V				
	定格電流	連続	~10,000 A		3,000 A	3,000 A	1,000 A
		短時間	最大目盛×90%　1 min		7,200 A　1 min	4,500 A　1 min	2,000 A 20 s
	定格遮断電流		25,000 A		15,000 A	10,000 A	4,500 A
	素子構成		—	—	—	4,000 V 1,500 A ×4 P	4,500 V 2,000 A ×3 P
特性 (1,500 V 3×10^6 A/S 6,000 A認定 選択率100%)	過電流検出時間		—	0.1 ms	0.1 ms	0.4 ms	0.4 ms
	開極時間		4~8 ms	4~5 ms	0.8~1.2 ms	—	—
	アーク時間		10~15 ms	10~15 ms	0.1 ms	—	—
	遮断時間		15~25 ms	15~25 ms	1.8+2.2 ms	2.2+1.8 ms	(0.6+1.6 ms)
	限流値		20~25 kA	20~25 kA	10.5 kA	10.1 kA	(7.4 kA)
	NLR処理エネルギー		—	—	43 kJ	40 J	(22 kJ)
特徴	保守性	目盛調整	△	○	○	○	○
		接触子の補修	△	△	○	○	○
	防災性(気中アーク)		△	△	○	○	○
	信頼性		○	○	○	△	△
	通電損失		○	○	◎	△	△
	保護範囲		○	○	○	△	△
	過電流耐量		○	○	○	△	△
	逆導通性		○	○	○	△	△
	据付スペース		○	○	◎	△	△
	コスト		○	△	△	△	△
	リプレース対応		—	○	○	△	△
	昇圧対応		△	△	○	△	△
	制御電源		○	○	◎	△	△

注：略語説明など　HSCB(直流高速度遮断器)
S.HSCB(静止形過電流引外し装置付き直流高速度遮断器)
HSVCB(直流高速度真空遮断器)
TH.CB(サイリスタ遮断器)
GTO.CB(Gate Turn Offサイリスタ遮断器)
NLR(Non Linear Resister：非線形抵抗)
◎(特に優れている。)，○(優れている。)，△(普通)

3 変換機器

3.1 変圧器

電鉄向け変圧器は省スペース，省エネルギー，保守性の向上はもとより，公共の輸送にかかわる機器として防災の面から不燃化が望まれる。これらの要求を満たす変圧器としてSF_6ガス絶縁変圧器[1)]が開発され実用化されている。その外観を**図4**に示す。

一般に油入変圧器といえば，鉱油入り変圧器を示すほど鉱油系の絶縁油は優れた絶縁・冷却性能，高い経済性を持っているが，不燃性に難点がある。絶縁油としてPCB(Poli Chlorinated Biphenyl)が使用された時期があったが，環境問題で使用禁止となり，難燃性のシリコーン油がこれに代わるものと期待された。しかし，不燃性ではないことと経済性が難点となり，車両用変圧器のような特殊用途を除いて適用さ

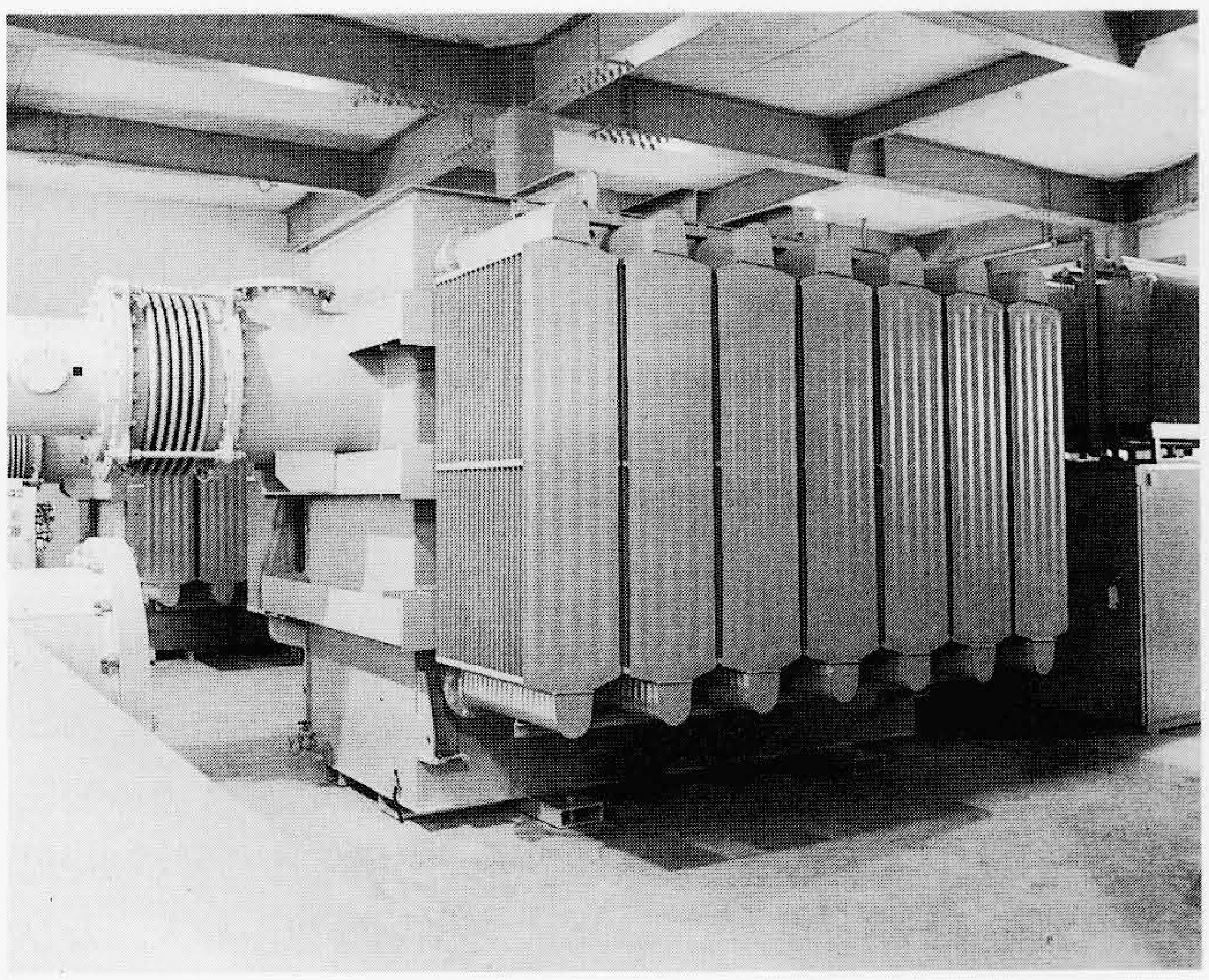


図4　4,950 kVA SF_6ガス絶縁変圧器　　電鉄用の整流器用変圧器として，SF_6ガス絶縁変圧器が使用されている。

表2 各種変圧器の比較 SF_6ガス絶縁変圧器は，不燃性・非爆発性の防災形変圧器として優れた特長を持っている。

No.	項目	SF_6ガス絶縁変圧器		モールド変圧器		H種乾式変圧器		油入変圧器	
1	不燃性	○	—	○	—	○	—	△	引火点140℃
2	非爆発性	○	—	○	—	○	—	△	—
3	耐熱性	—	E種，H種	—	H種	—	H種	—	A種
4	耐湿性	○	完全密封	△	開放形	△	開放形	○	密封
5	耐じん(塵)性	○	完全密封	△	開放形	△	開放形	○	密封
6	冷却性	△	—	△	—	△	—	○	—
7	密封方式	○	完全密封	△	開放形	△	開放形	○	N_2ガス封入密封 無圧密封
8	電圧適用範囲	△	154 kV以下	△	33 kV以下	△	33 kV以下	○	UHV
9	容量適用範囲	△	50 MVA以下	△	10 MVA以下	△	10 MVA以下	○	1,500 MVA
10	据付け	○	ボンベからガス封入	○	—	○	—	△	油処理機材要する。
11	保守	○	ガス分析	△	防湿処理 じんあい(塵埃)除去	△	防湿処理 じんあい除去	○	ガス分析

注：記号説明 ○(優)，△(劣)

れていない。

一方，オイルレス変圧器として，H種乾式変圧器やモールド変圧器が使用されている。これらの変圧器は空気を絶縁・冷却媒体としているため，屋内設置で電圧33 kV，容量10 MVA以下で使われる。このため，これらの制限を越える不燃変圧器としてSF_6ガス絶縁変圧器が開発された。現在では，従来H種乾式変圧器やモールド変圧器に使用された領域にも，SF_6ガス絶縁変圧器が使用されるようになっている。各種変圧器の比較を**表2**に示す。なお，SF_6ガス絶縁変圧器は次の特徴を持っている。

(1) 防災性に優れ，消火・防火設備を軽減でき変電所トータルスペースを小さくできる。

SF_6ガスは不燃性・非爆発性であり，変圧器に対する消火・防火設備を軽減できる。また，ガス絶縁開閉器と直結することによって受変電設備の全不燃化と縮小化ができ，運転保守の共通簡素化ができる。

(2) 保守・取扱いが容易である。

変圧器本体は，SF_6ガス中に完全に密封された構造であり，外気の湿気やじんあい(塵埃)の影響を受けないため，変圧器本体の保守は不要である。また，SF_6ガスはガスボンベから直接変圧器に封入でき，据付作業も容易である。

(3) 低騒音，低損失である。

変圧器本体で発生する騒音は，音響インピーダンスの小さいSF_6ガスを伝わるため，一般に騒音は小さくなる。また，自冷式SF_6ガス絶縁変圧器では損失も小さい。

(4) 高電圧・大容量の不燃変圧器が可能である。

SF_6ガスは絶縁耐力・冷却能力が空気より優れ，電圧154 kV，容量50 MVA級の変圧器を不燃化できる。

最近，SF_6ガス絶縁変圧器の完全自冷容量の拡大と，据付スペース縮小のニーズが高まっている。日立製作所ではこのニーズに対応するため，絶縁種別をH種としたSF_6ガス絶縁変圧器を開発した。その外観を**図5**に示す。高精度冷却解析[2)]や温度計測技術(**図6**)に基づく冷却性能の高い巻線の導入，及びポリイミドなど耐熱性の高い絶縁材料を採用し，実現したものである。これにより30 MVA級の完全自冷式SF_6ガス絶縁変圧器も可能となった。

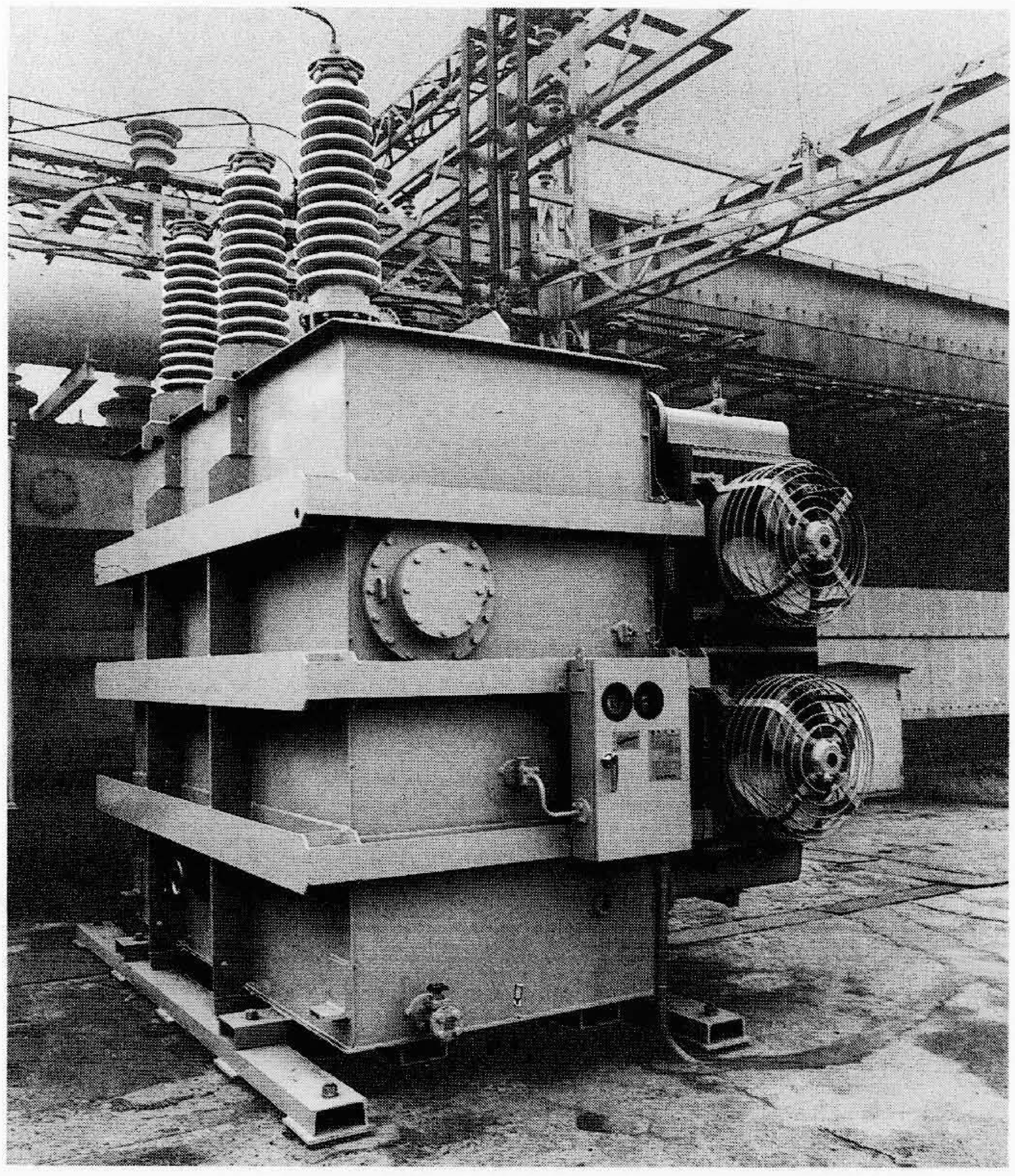


図5 6 MVA H種SF_6ガス絶縁変圧器 H種SF_6ガス絶縁変圧器は，大容量の完全自冷式不燃変圧器を可能とする。

3.2 シリコン整流器

シリコン整流器を構成する半導体素子は，年とともに大形化してきた。素子の容量が増すと，発生損失も増えるために熱容量の大きな冷媒が必要となる。その結果，油冷却方式が出現した。

しかし，素子の容量がそれ以上となると油でも不足となり，代わりに登場したのが沸騰冷却方式である。その外観を**図7**に示す。沸騰冷却では，冷媒の熱抵抗が理想的には零であるために熱交換器は小形となる。

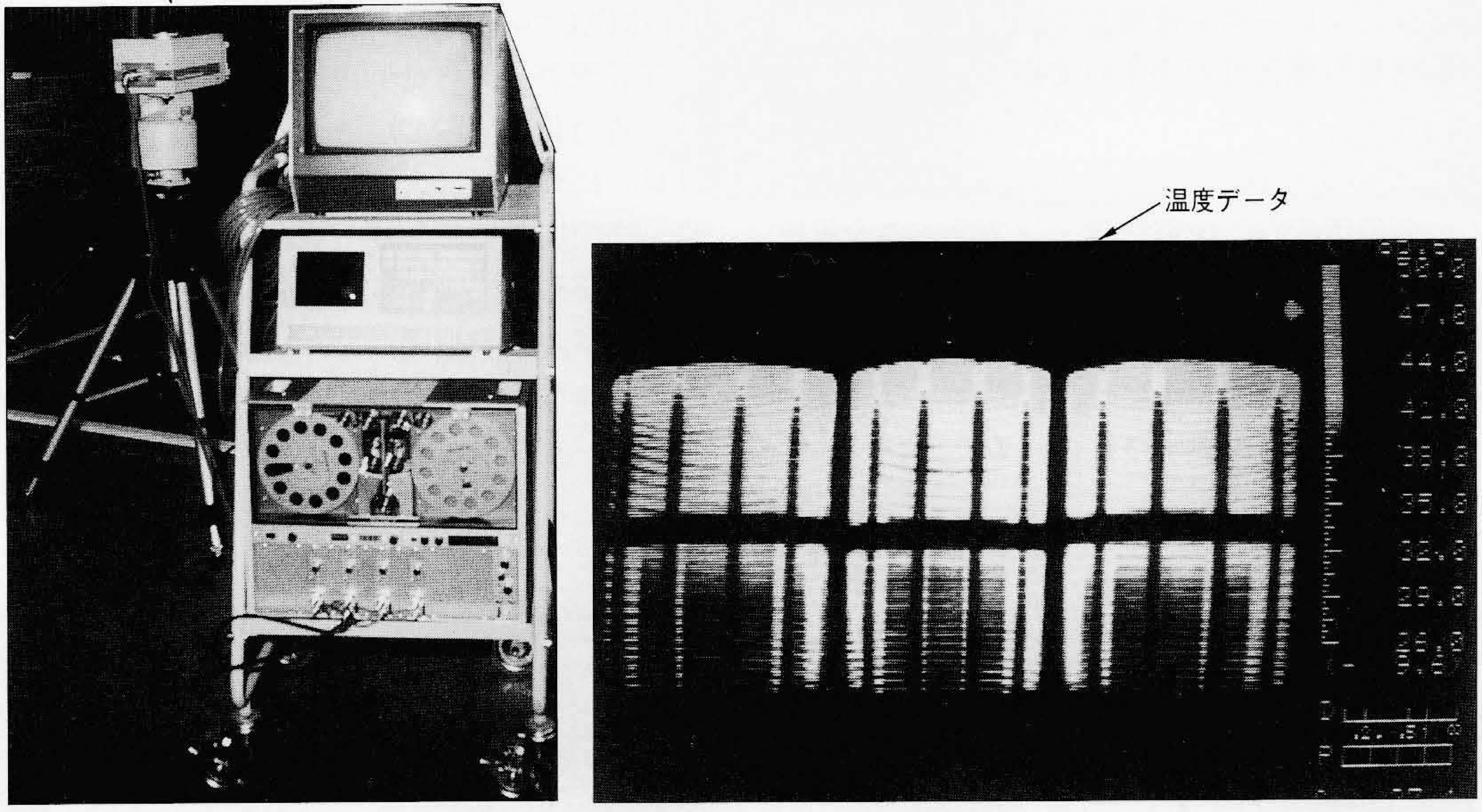


図6　赤外線放射温度計測　　赤外線放射温度計測によって，非接触で大量の温度データを取ることができる。

一方，大容量素子を使うために容積/容量比も小さくなり，装置として小形化が可能となったわけである。現在のところ，沸騰冷却用の冷媒としてはフロンが主流であるが，それ以外の冷媒についても検討されており，対応が可能となっている。

その他，沸騰冷却の一種であるヒートパイプ冷却方式も整流器の構造によっては使用されている。このように沸騰冷却は他の冷却方式に比べ性能が高く，今後とも使われるものと考える。

近年，整流素子の大形化が進むに伴い，制御整流素子であるサイリスタやGTOサイリスタ素子も大容量化し，性能も上がってきた。また，その応用技術も進歩し，回生インバータ[3]や制御整流器が出現した。その外観を**図8**に示す。しかし，

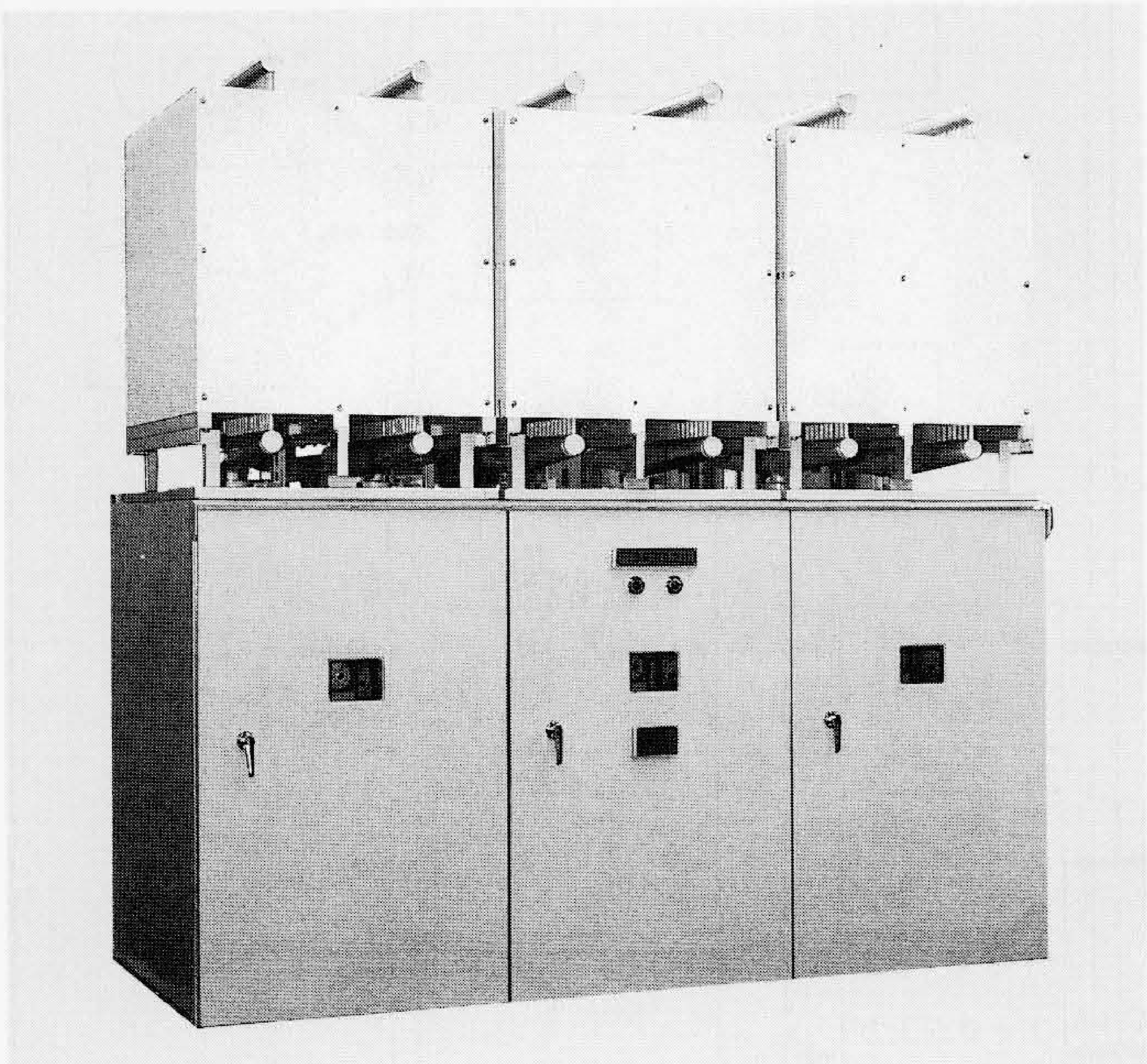


図7　6,000 kW，1,500 V，4,000 A　D種定格フロン冷却シリコン整流器　　写真に示すフロン冷却シリコン整流器は屋内，屋外いずれにも設置可能である。

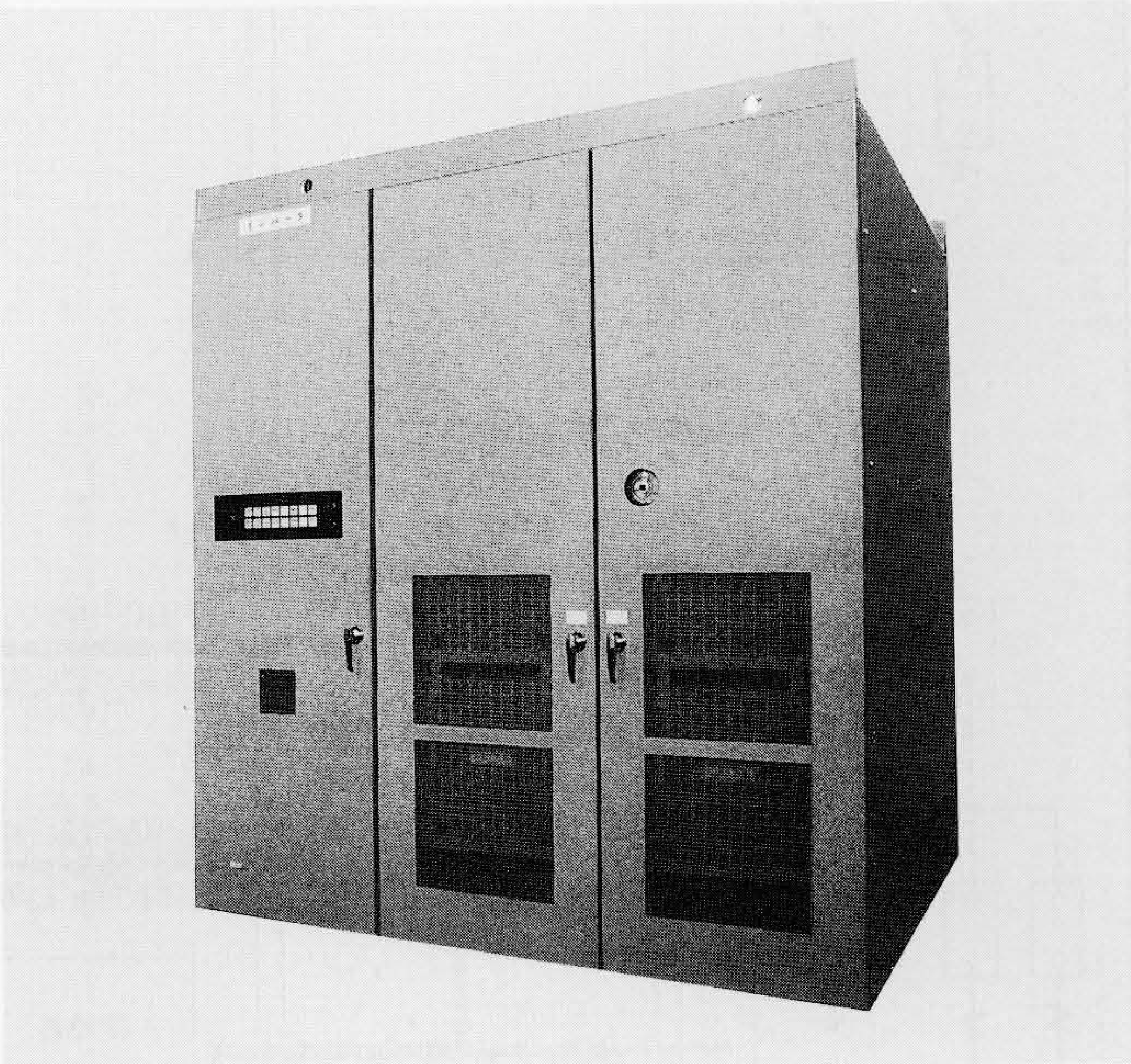


図8　1,500 kW，1,500 V，S種定格ヒートパイプ冷却式回生インバータ　　本回生インバータには光点弧サイリスタを使用しており，高圧部と低圧部が電気的に分離されノイズ誘導を防止している。

これらの機器は電鉄それぞれの性質によって使用効果が異なるため，導入に当たっては十分なコストパフォーマンスの検討が必要である。

日立製作所ではシミュレータを使用して解析し，併せて経済性を検討し，使用者の導入可否決定の支援を行っている。

4　制御装置

電鉄変電所の制御装置でも，配電系統・システムの大規模化・複雑化，変電所の拡大・用地難，省力化・省エネルギー化という社会的背景がある。これらによって，制御・保護性能の向上，信頼性の向上，装置の小形化，自動化，保守性向上及びシステム設計の柔軟性が要求されている。これらの要求に対応するため，配電盤はマイクロコンピュータを使用したHISMAC（インテリジェント化静止形配電盤）を開発，納入してきた。既に130台を超えるHISMACが運転中である。このHISMACの採用によって，自動制御機能，自動監視・点検，保守管理データ自動処理が可能となり，装置の小形化・自動化・省力化を図っている。一方，保護機能の中心となる保護リレーについては，静止形継電装置の採用によって，高速処理・高精度，自動監視・点検が可能となり，信頼性の向上，装置の小形化，保守性の向上を図っている。静止形配電盤・継電装置の効果を**図9**に，その写真を**図10**に示す。**図10**で左から操作盤，データ処理装置盤，補助リレー盤及び静止形保護リレー盤の構成である。この例では，従来の電磁形リレー

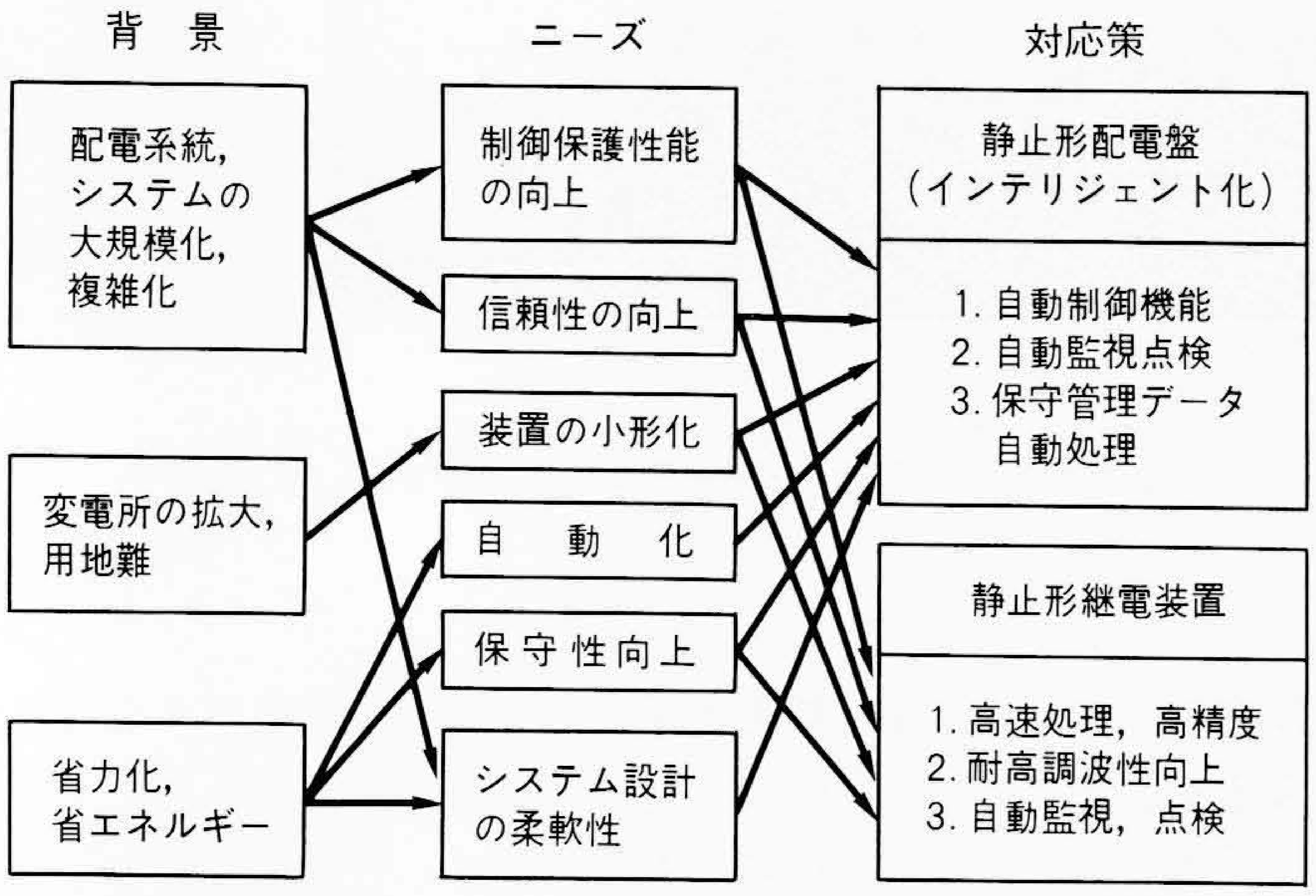


図9　静止形配電盤及び静止形継電装置の効果　使用者のニーズを静止形配電盤で対応した。

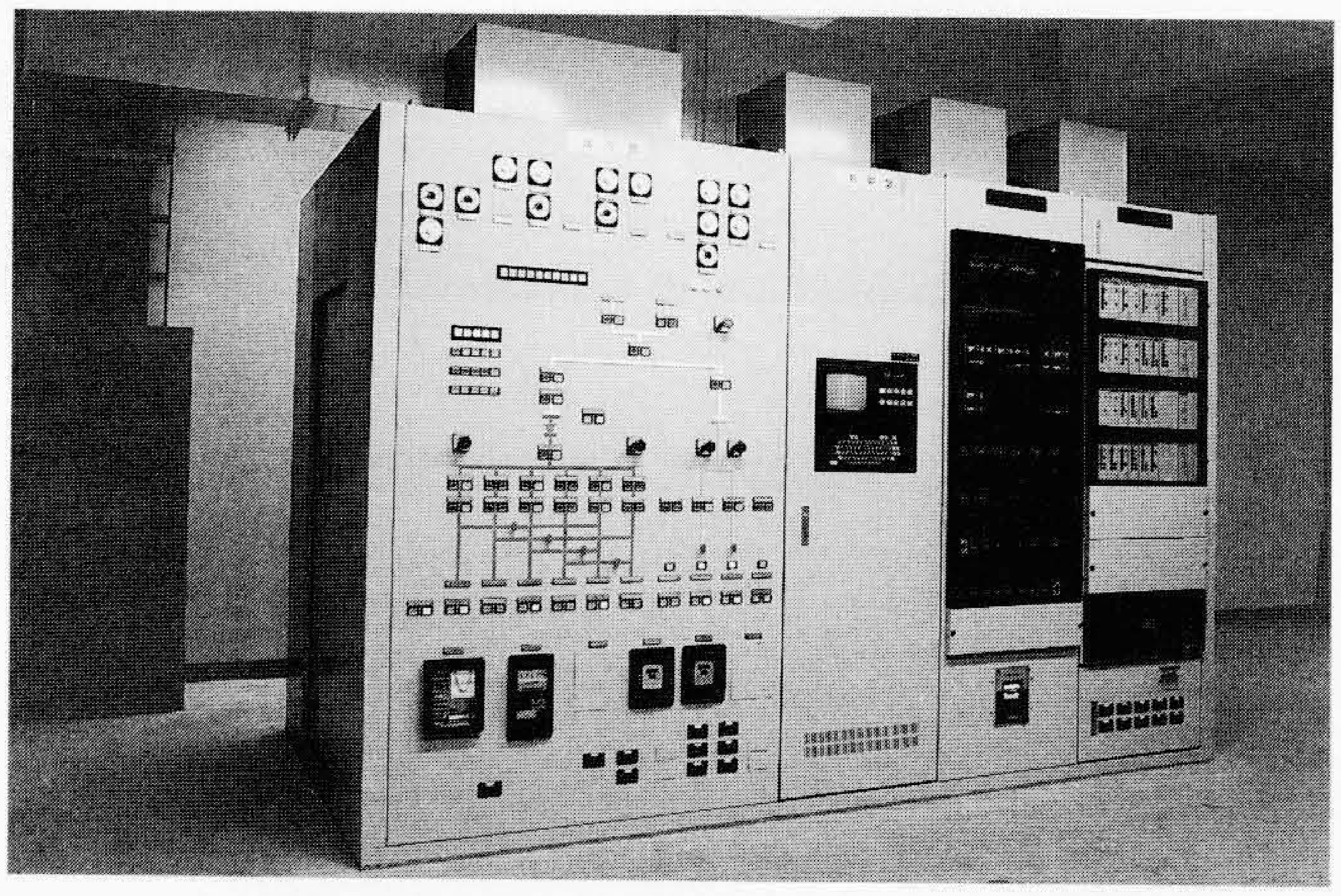
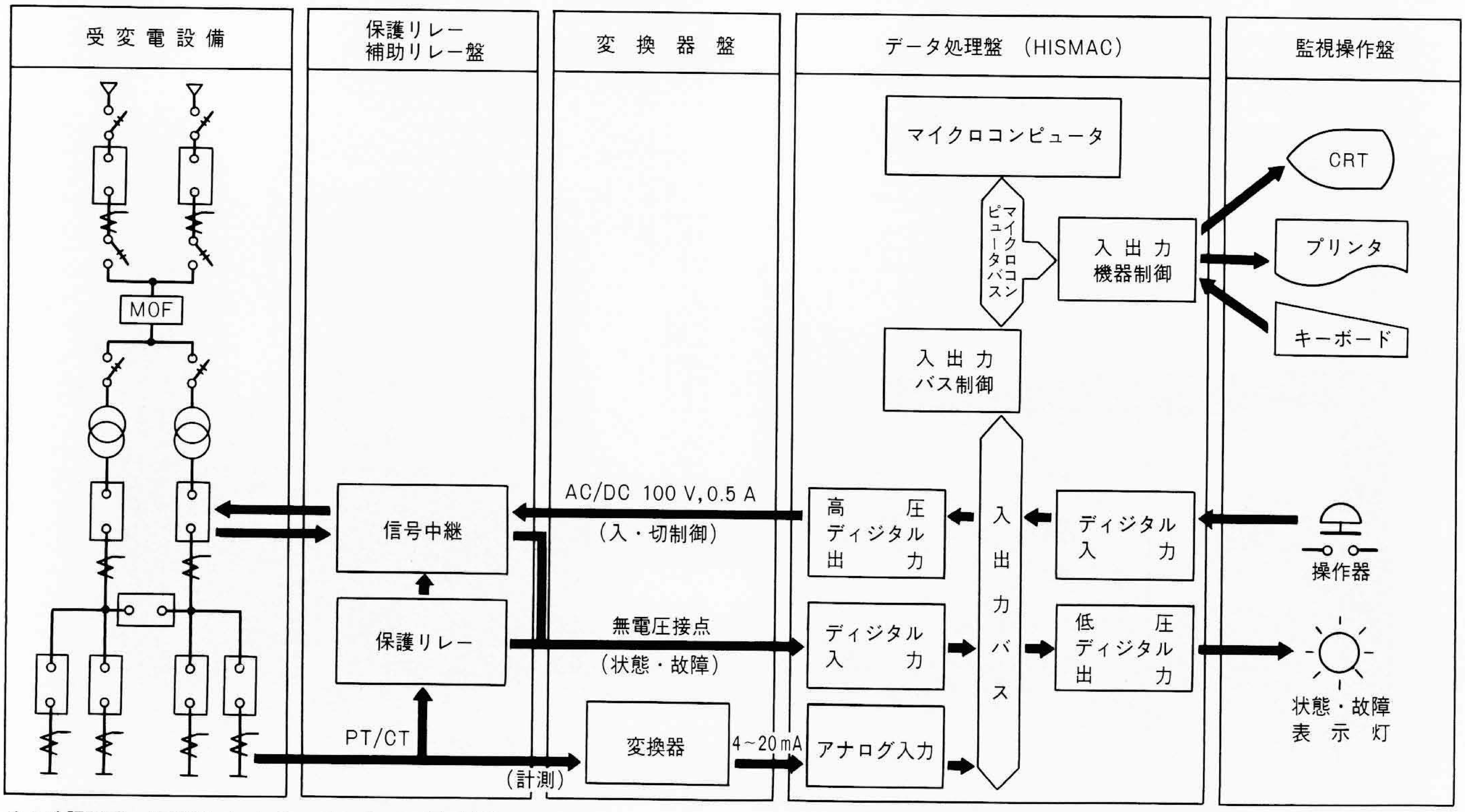


図10　静止形配電盤及び静止形継電装置　静止形配電盤は多くの機能を持っているが，従来形の配電盤に比べ小形化されている。



注：略語説明　CRT（Cathode Ray Tube），CT（変流器）

図11　HISMACシステムのブロック図　本図はHISMAC内部の情報処理と入出力のルートを示したものである。

を使用した配電盤に比較し，据付面積で約65％に縮小されている。HISMACを使用したシステムブロック図を**図11**に示す。今後，高機能・高信頼性・保守性向上の特徴を持ちながら，装置の小形化が図れる静止形制御装置は，新設備・旧設備の更新とともにますます採用されていくものと考えられる。

表3　要求ニーズと実現内容　電力管理システムに要求されるニーズとその実現内容について示す。

分類	No.	要求ニーズ	No.	実現内容
機能面	1	監視，制御機能の向上	(1)	マンマシン機能の充実 (a) 高密度CRTによる文字，図形，画面スクロール機能などの高機能活用 (b) 音声による耳からの状況把握
			(2)	自動制御機能の拡大 (a) 電気所子局のマイクロプロセッサ化による分散制御 (b) 集中制御と分散制御の協調 (c) マクロ指令による機能制御の実現
	2	機能拡張に対応可能な柔軟なシステム	(1)	計算機を中核としたシステム (a) システム拡張の容易性 ● ハードウェア，ソフトウェア増強の容易性 ● プログラム開発機能の搭載 (b) 電気所増改造時の試験の容易性 ● ソフトウェア，データテーブルメンテナンス機能 ● シミュレータ機能
	3	機能高度化に伴うシステム信頼性の確保	(1)	計算機システムの多重化 重要部分を果たす計算機本体，マンマシン系，伝送系統の多重化
			(2)	多重化不可部分のバックアップシステム採用
	4	作業統制業務の自動化	(1)	運用形態にマッチした入出力装置(端末機器，CRTなど)の提供 ● 作業登録，作業管理，作業票作成
			(2)	計算機による手順作成，模擬による事前確認，実行
	5	他システムとの連係	(1)	計算機間通信によるトータルシステム化への推進 運行管理，情報システム，防災設備などとの総合運用
			(2)	電力情報サービスの自動化 (a) 電力情報の伝送，連絡，OA設備との接続 (b) 通信制御技術，光LANシステムの導入
構成面	1	制御所，電気所のシステム構成	(1)	計算機中心のシンプルなシステム構成 ● CBSC方式
			(2)	電気所子局のマイクロプロセッサ化による小形・高機能化
	2	高効率，高信頼度の伝送システム	(1)	光LAN伝送方式
			(2)	ポーリング式伝送方式 高速，多量データの伝送

注：略語説明　LAN(Local Area Network)，
CBSC(Computer Based Supervisory Control)

5　電力管理システム

現在，制御用計算機を導入した電力管理システムは，既に広く採用され電鉄変電設備の効率的運用になくてはならない大きな役割を果たしている。しかし，ますます拡大，複雑化する電鉄システムで更に高度な機械化，省力化を進めるニーズと，制御用計算機の飛躍的技術向上，及びマイクロプロセッサ技術の採用による分散処理の発達などの新技術によって，新しい電力管理システムの実現が要求されてきた。以上の背景のもとに，最近の電力管理システムについて述べる。

5.1　要求ニーズと実現システム

要求ニーズとその実現内容について**表3**に示す。電力管理システムは，より充実した監視制御機能，システムの拡大，発展に伴う機能拡張，対象設備の増改造に対応できる柔軟なシステムが要求されている。また，最近の技術動向でもあるOA(Office Automation)機器との連携による各種電力情報サービスの向上も大きなニーズである。これらのニーズにこたえるため，制御所は制御用計算機を主体としたシステムで構築した。更に，電気所側子局装置は，インテリジェンス機能を持たせた分散処理により高機能・高信頼性を実現した。

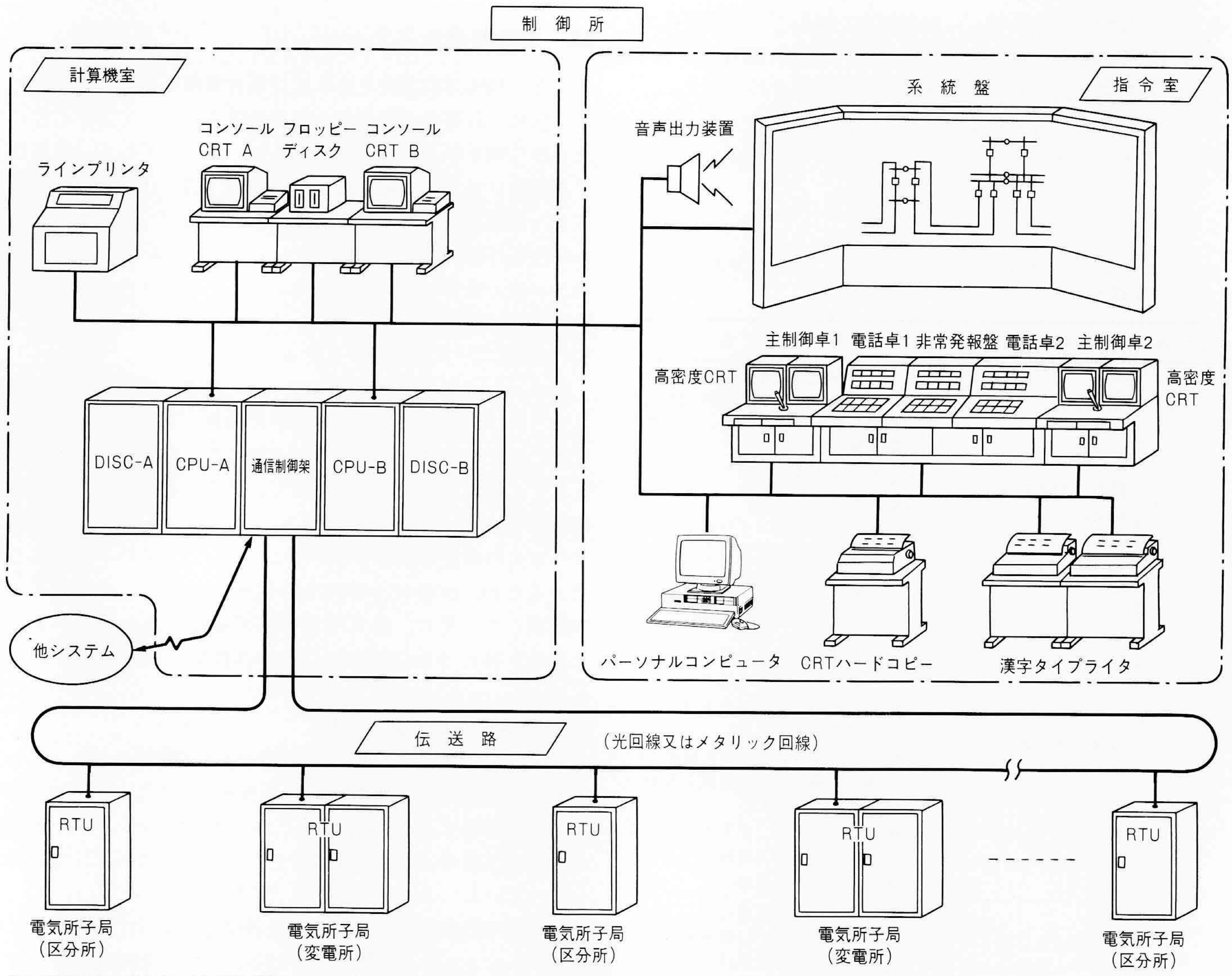
5.2　システム構成例と特長

最近の電力管理システム構成例について**図12**に示す。本システムは，二重化された制御用計算機を中核とし，2台のCRT(Cathode Ray Tube)を配置した主制御卓をマンマシン装置の中心に位置づけた構成(**図13**)としており，次のような特長を持っている。

(1)　制御用計算機で制御所電力管理機能のすべてを実現したシンプルなシステム構成としている。また，信頼性確保のため主要ハードウェアは二重化し，異常時の自動切替を行った。

(2)　機能の充実と容易な監視制御実現のため，マンマシン装置の機能分担を行い，使いやすさに配慮した。

図12　系統監視盤と主制御卓の外観　系統監視盤による全体系統の監視と，主制御卓のCRTから詳細の監視及び機器制御を行う。



注：略語説明 CPU(中央処理装置)，DISC(磁気ディスク装置)，RTU(遠方監視制御装置子局)

図13 電鉄電力管理システム全体構成図 制御所は二重系制御用計算機を中核とし，電気所は，マイクロプロセッサ内蔵のインテリジェンス子局で構成され高機能，高信頼度システムを実現している。

(a) 電力系統全体監視，事故点把握：系統盤，音声出力装置

(b) 詳細監視，運転データ設定，事故分析：高密度CRT

(c) 帳票，データ保存，分析：漢字タイプライタ

(3) 電気所子局とのデータ伝送は最新の伝送手順とポーリング方式の採用により必要時，必要量のデータを高速かつ多量に伝送することが可能となった。これにより，電気所の監視制御対象を，従来100～200点程度を最大表示入力512点，計測128量，制御256点と大容量化した。

(4) 子局装置はマイクロプロセッサ内蔵のインテリジェンス機能を持ち，データ処理，自動制御機能を実現した。

そして事故時などの故障リレー動作，機器状態検出の分解能を従来の1～2s程度から10msへと飛躍的な向上を図った。

以上の新しい技術を導入した電力管理システムの実現によって，電鉄変電設備のより安定運用，迅速，的確な対応など多くの効果が期待できると考える。

6 結　言

電鉄用変電システムを構成する機器は，それぞれ機能は異なるが，開発，改良の目指すところは，使用者が求める近代化の目的であるコストパフォーマンスの向上に結びつくものであり，基礎関連技術の進歩によってそれが実現化してきたわけである。しかし，技術革新の速度は非常に速く，今後，より目標に近づけるべく技術開発を進めていく考えである。

参考文献

1) 長屋，外：SF_6ガス絶縁変圧器の開発と実用化，日立評論，**65**，12，863～868(昭58-12)

2) 松島，外：有限要素法による対流場と熱伝導場の複合伝熱解析，日本機械学会九州支部講演会，No.878-2(昭62-7)

3) 大鋸，外：電力回生インバータ付き鉄道変電システム，日立評論，**68**，3，211～214(昭61-3)