U.D.C. 〔621.33:621.311.4〕(1-21)

都市形電鉄用変電システム

Railway Substation Systems for Big Cities

桑原　誠*　*Makoto Kuwabara*
伊藤　彰**　*Akira Itô*
井川利夫**　*Toshio Igawa*
鈴木保男***　*Yasuo Suzuki*

大都市圏の鉄道輸送需要はますます増加の傾向にあり，新線の建設や既設路線の高密度輸送によって輸送力の向上が図られている。これに伴い，その電力を供給する電鉄用変電所も容量の増強，変電所の新設などの対応を図っている。大都市圏では，近年の土地価格の上昇や用地不足などの事情からいっそうのコンパクト化や信頼性の向上が望まれるなど，地方線区のシステムとは異なった性能や形態が必要となってきた。そこで，いわゆる都市形変電所に対応した最新技術としてコンパクト化，省力化，インテリジェント化などを指向したHSVCB(High Speed Vacuum Circuit Breaker：直流高速度真空遮断器)不燃液冷変圧器，HISMAC(インテリジェント化静止形配電盤)シリーズとしてHISMAC-SGを新たに開発した。都市形変電所を集中管理する電力管理システムには，ワークステーションや知識処理応用の事故復旧支援システムの導入なども計画されている。

1　緒　　言

東京，大阪をはじめとする大都市圏の鉄道による輸送需要は，今後ますます増える傾向にある。また生活様式の変化によって営業運転時間の延長などのニーズもあり，これを支える電鉄用変電システムも大きく変貌(ぼう)しようとしている。都市部への過度の人口集中が問題となっている中で新線建設はさまざまな要因で困難な状況にあり，既設路線の輸送力を車両編成の増加や運転時間間隔の短縮によって向上することが図られている。都市部では限られた敷地の中で既設変電所の更新を行う必要があり，またその機会に種々の機能向上が図られるなど，大都市圏の変電システムは地方閑散線区のシステムとは異なった機能や形態が要求される。本稿では，このような観点から大都市圏の変電システムを「都市形電鉄変電システム」ととらえて，これに対する日立製作所の取り組みの状況と最新技術について述べる。

2　都市形電鉄変電システムの特徴

都市形電鉄変電システムは，次のような特徴を具備すべきものと考えられる。

(1)　高い土地価格に対応して地下や高架下などに設置されることが多く，できるだけコンパクトなシステムであること。

(2)　昭和30年代に建設された老朽設備の更新については，現状の敷地内に既設の出力よりも高出力の変電機器を収納できること。また場合によっては，現状の敷地よりも狭い面積に収納でき，敷地の一部が他の目的に利用できること。

(3)　防災，特に不燃化に配慮したものであること。

(4)　将来予想される保守要員不足に対応して，昼間に極力保守ができるシステム構成や各構成機器の省力化を指向したものであること。

(5)　万一の事故に対して，迅速な対応がとれるようなインテリジェント化されたシステムであること。

(6)　VVVF(Variable Voltage and Variable Frequency)インバータ車両などの，回生電力を有効利用できるシステムであること。

また，このほか車両，通信，信号，変電の各システムの有機的な結合を図り，よりいっそうの省エネルギー化，省力化を目指すことも必要である。一例として車両の位置情報や運転状態の情報(力行中か，惰行中か，回生中か)を変電システムに取り込み，各変電所間の送り出し電圧を制御するなどのくふうも必要と考える。都市形電鉄変電システムを構成する要素技術としては，GIS(SF_6ガス絶縁開閉装置)，ガス絶縁変圧器など従来製品のほか，コンパクト化，防災化を目的とした不燃液冷変圧器，HSVCB(High Speed Vacuum Circuit Breaker：直流高速度真空遮断器)とロータリ形断路器を使った超小形直流キュービクル，H形ディジタル保護リレー，ワー

* 日立製作所 交通事業部　** 日立製作所 国分工場　*** 株式会社 日立情報制御システム

クステーションによる変電所データ管理装置を組み込んだ電力管理システムなどの新製品がある。

3　コンパクト化のための要素技術

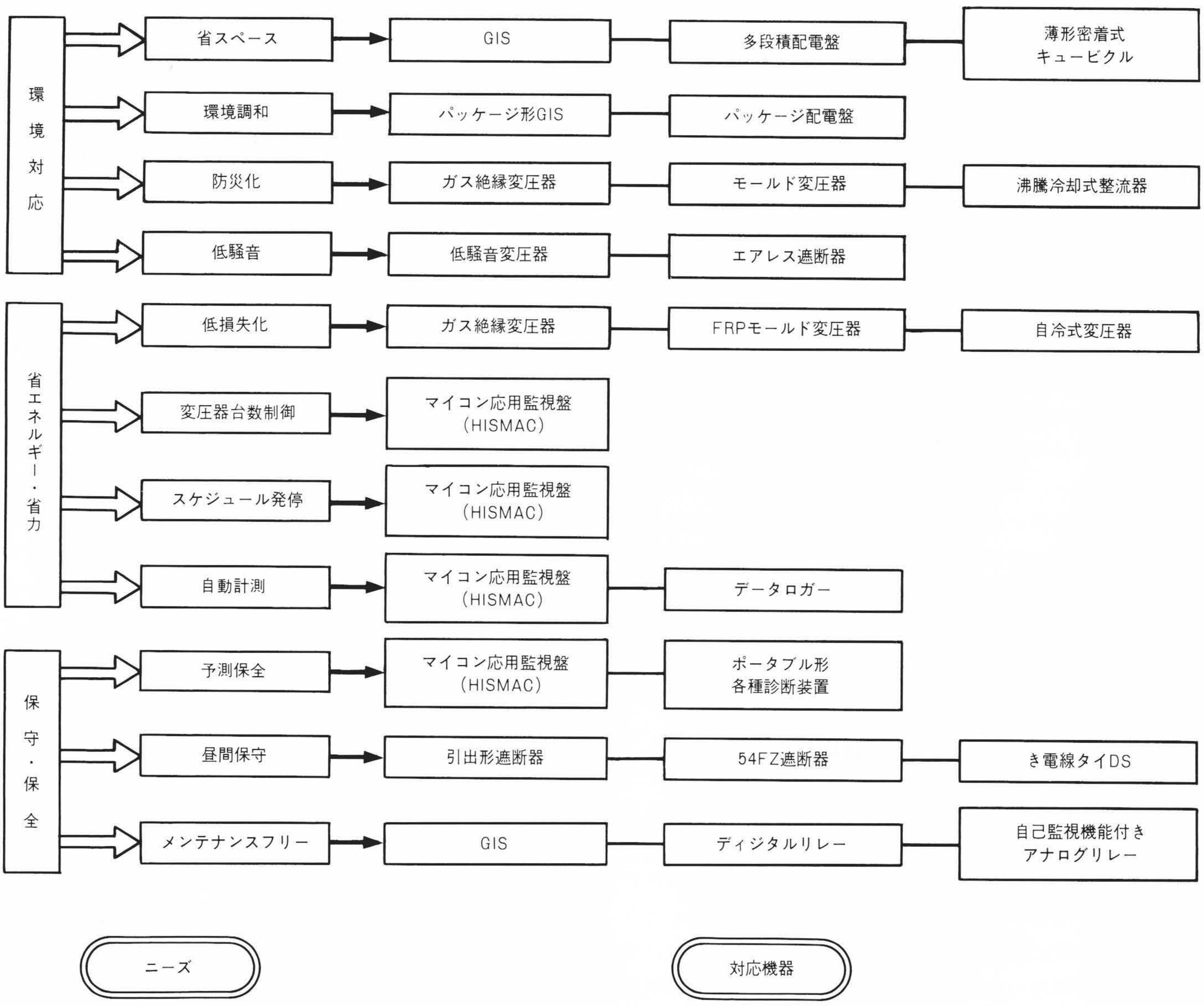
電鉄変電所のコンパクト化は，都市の地価高騰に対応して都市部の新設変電所から始まった。また電鉄変電所は，公共の輸送にかかわる設備として防災性も兼ね備える必要があり，これにこたえる機器が変電所機器として現用されるに至っている。これらの機器を**図1**に示す。

ところが，近年の過度の都市部経済集中は在来線の輸送量を飽和状態にし，また地価高騰は新たな新線計画を困難にしており，在来線の輸送量増強がクローズアップされてきた。このため，電鉄変電所のコンパクト化は，既設変電所の同一敷地内で容量増強更新という，新たな局面への対応を迫られてきた。増強更新計画の一例を**図2**に示す。この例では，22 kV GIS，HSVCBキュービクルにより，同一スペースに2倍の変電所容量機器を設備している。

このような変電機器への厳しいコンパクト化要求に対応する日立製作所の要素技術のいくつかを以下に述べる。

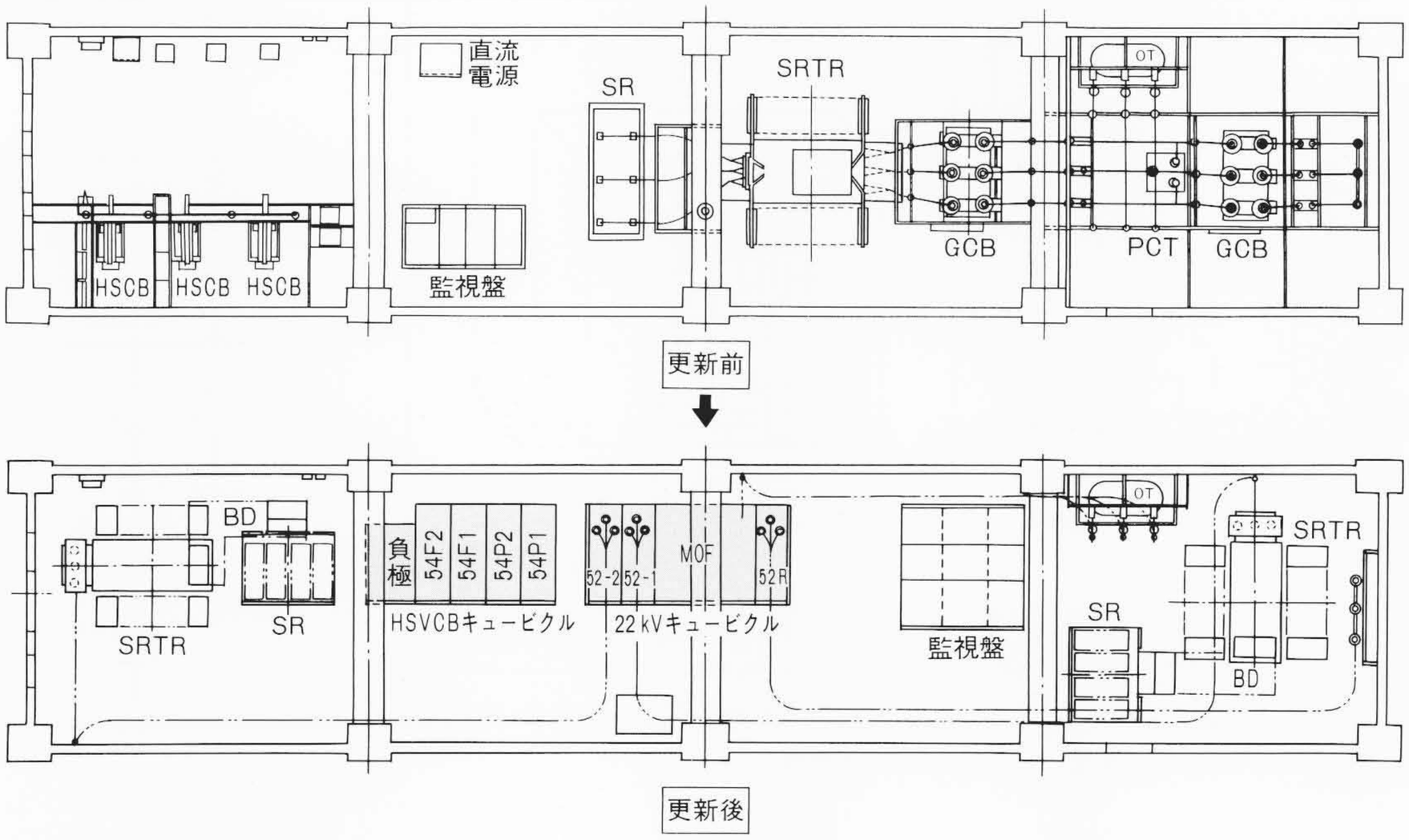
3.1　HSVCB

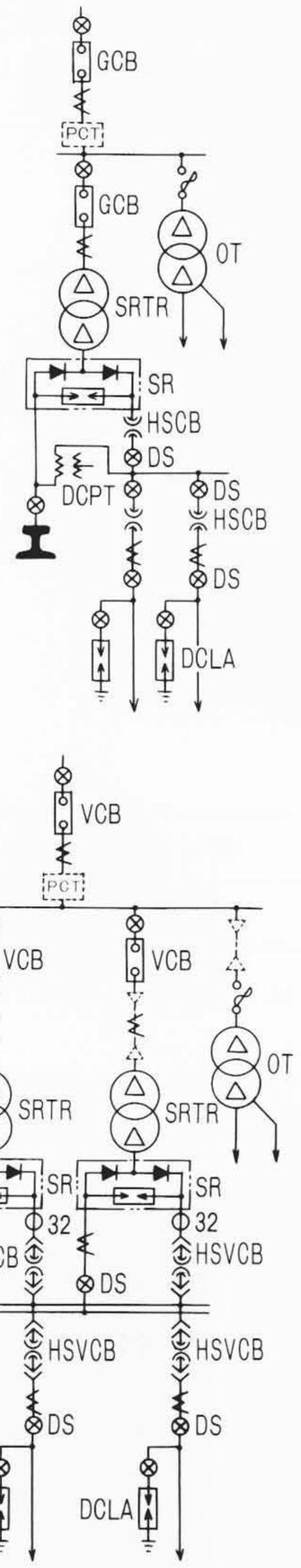
HSCB(高速度直流遮断器)は唯一の直流保護用遮断器として，60年以上の歴史を持ち愛用されてきた。交流配電系の遮断器は油入遮断器→磁気遮断器→真空遮断器と，消弧媒体を変えるごとに小形化されてきた。これに対し，HSCBは，事故電流の立上り初期に，アークをアークシュート(消弧室)内で十分に引き伸ばし，アーク電圧を高めることによる限流効果



注：略語説明など　GIS(ガス絶縁開閉装置)，54FZ(直流回路遮断器)，FRP(ガラス繊維強化プラスチック)，タイDS(連絡用断路器)，マイコン(マイクロコンピュータ)

図1　電鉄変電所のニーズと対応機器　　電鉄変電所の各ニーズに対応した機器が，組み合わせて使用されている。





注：略語説明　GCB（ガス遮断器）　BD（バスダクト）
PCT（計器用変圧変流器）　DCPT（直流計器用変圧器）
SRTR（整流器用変圧器）　DCLA（直流避雷器）
SR（整流器）　52（24 kV交流遮断器）
HSCB（直流高速度遮断器）　54（1,500 V直流遮断器）
HSVCB（直流高速度真空遮断器）　32（逆流継電器）
OT（制御用電源変圧器）　DS（断路器）

図２　電鉄用変電所増強更新計画例　　最新のコンパクト機器使用によって，同一スペース内で整流器3,000 kW１バンクを２バンクに増強更新する例を示す。

で遮断するという原理上の革新がなく，その寸法や質量に大きな変化はなかった。このため，これが電鉄変電所のコンパクト化を阻害する一つの要因となっていた。

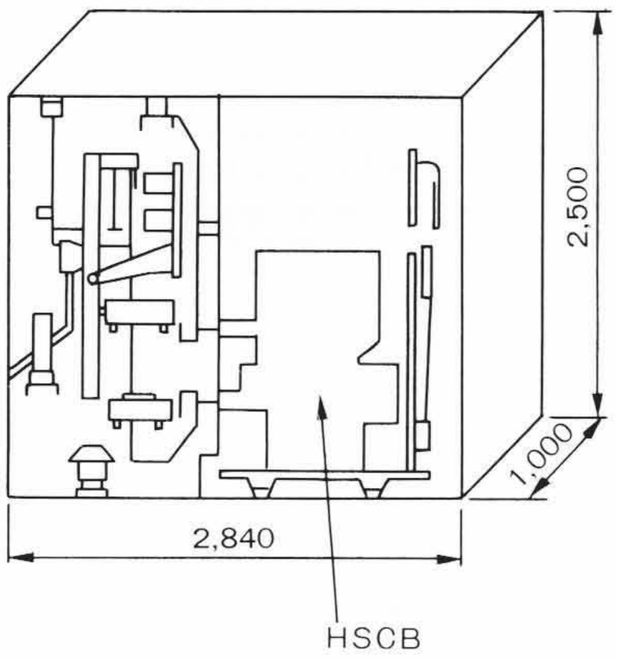
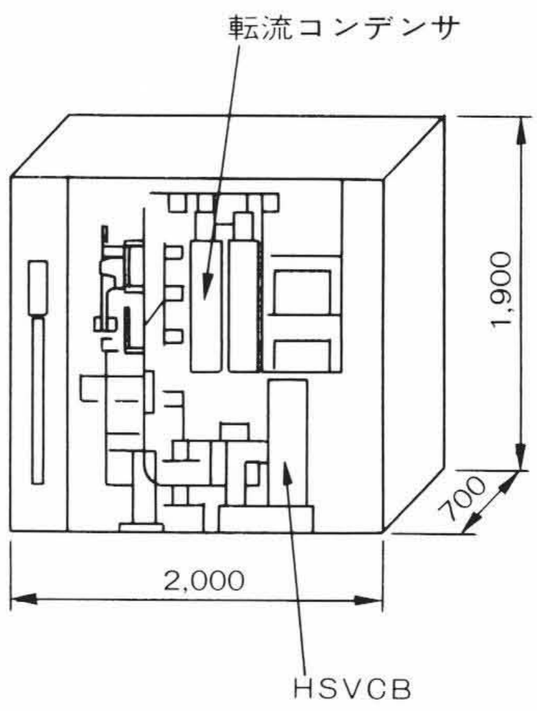
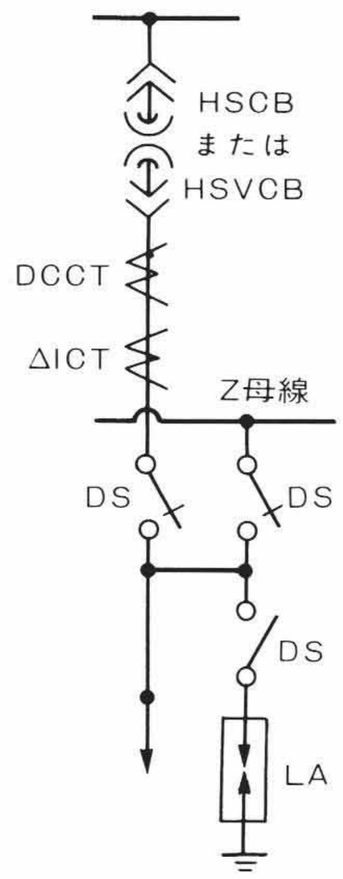
近年，遮断原理を異にする遮断器として，サイリスタあるいはGTO(Gate Turn Off)サイリスタを用いた半導体遮断器が開発され一部で採用されたが，素子自身が常時発生する通電損失熱を冷却するため，冷媒を使用した沸騰冷却器などが必要であり，コンパクト化には寄与しなかった。そこで日立製作所は，微少ギャップで高い絶縁回復特性と高周波電流遮断特性を持つ真空バルブを直流遮断器の主接点とする直流遮断器の研究開発を行った。その結果，電磁反発コイルを使用した独自の高速駆動操作器によって開極時間１ms，遮断時間4.0 msを実現し，大幅に小形化したHSVCBを製品化した。

HSVCBは主接点に真空バルブを用い，これと並列に接続されたコンデンサ(転流コンデンサと呼ぶ。)により，主接点に高周波電流を注入し強制的に電流零点を発生させ，開極した真空バルブ中で消弧するものである。転流コンデンサは，不燃化のためオイルレスコンデンサを使用している。HSVCBの外観を**図３**に示す。現在までに国内の電鉄会社向けとして，８変電所分約60台を製作した。超小形き電キュービクルを実現するために，HSVCBの開発と合わせてロータリ断路器の開発も行い，き電回路１回線分のキュービクルで面積比$\frac{1}{2}$，容量比$\frac{1}{3}$(当社従来製品化)に小形化した。直流き電回路の盤寸法比較を**表１**に示す。

3.2　不燃液冷変圧器

SF_6ガス絶縁変圧器は，あらゆる電圧や容量に適用可能な防災形変圧器として，いち早く電鉄変電所に用いられた。しかし，SF_6ガスは鉱油と比較して，絶縁性能や冷却性能が低いため，油入変圧器に比べて(1)自冷容量に限界があること，(2)外形寸法が大きいことなど，都市形変電所の大容量化・コンパクト化の傾向とは相いれない面もあった。このため，ガス絶縁開閉装置との直結やタンク本体上部からのケーブル引き出

表1 直流キュービクルの縮小化 HSVCBの採用によって，従来に比較して据付け所要面積が半減している。

項目・タイプ	A(HSCB採用)	B(HSVCB採用)	スケルトン
構造			
据付け面積(m^2)	2.8	1.4	
据付け容積(m^3)	7.1	2.7	

注：略語説明 DCCT（直流変流器），ΔICT（故障選択装置用変流器），LA（避雷器）

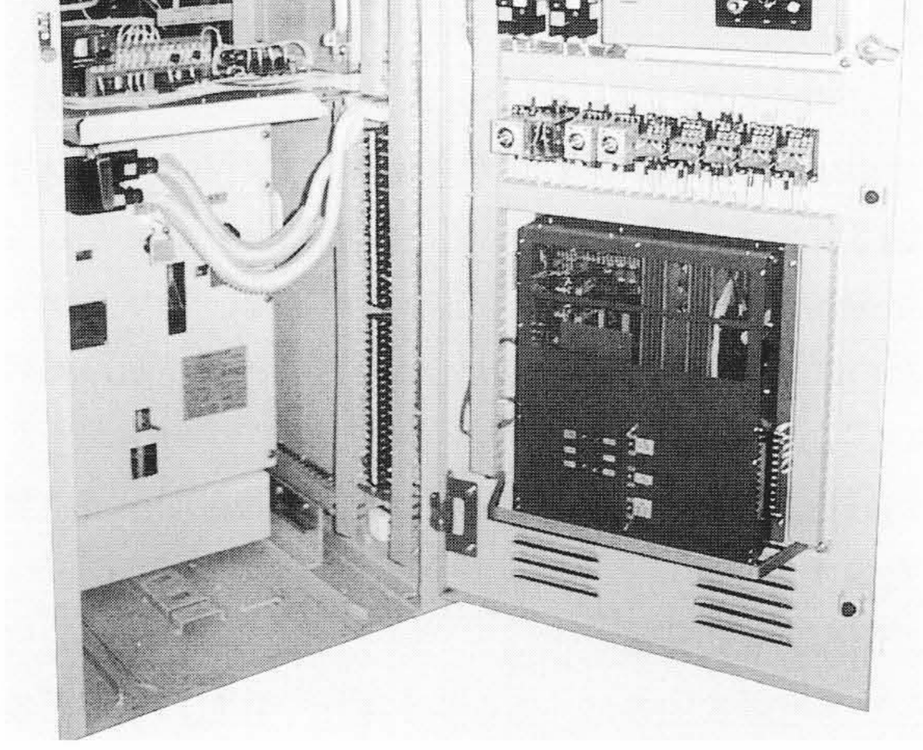


図3 HSVCB 高圧キュービクル以下に縮小化している。レイアウトの自由度を大きく向上させた。

しなど接続方法をくふうし，見掛け上の据付けスペースを設備全体で小さくする努力を払ってきたが，よりいっそうのコンパクト化のためには，変圧器自体の小形化がやはり重要である。そこで日立製作所は，優れた絶縁性・冷却性を持つ不燃冷媒を用いた不燃液冷変圧器を開発した。

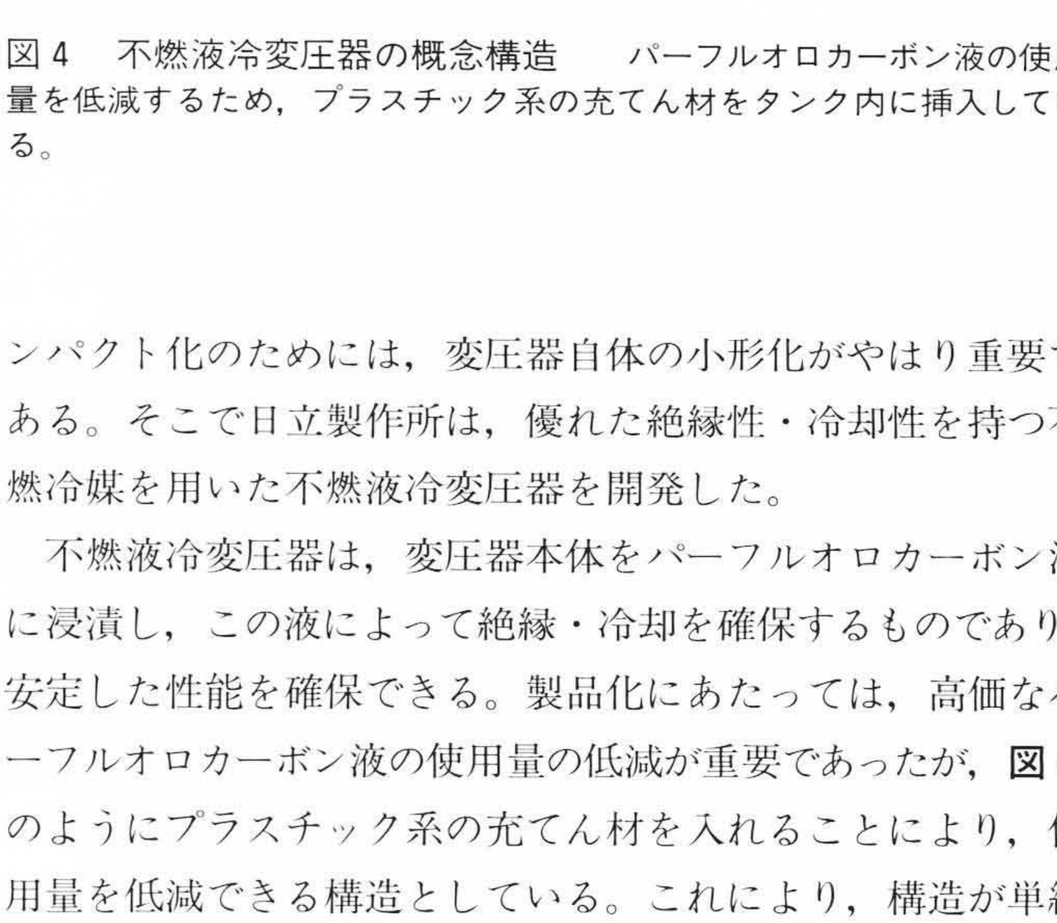


図4 不燃液冷変圧器の概念構造 パーフルオロカーボン液の使用量を低減するため，プラスチック系の充てん材をタンク内に挿入している。

不燃液冷変圧器は，変圧器本体をパーフルオロカーボン液に浸漬し，この液によって絶縁・冷却を確保するものであり，安定した性能を確保できる。製品化にあたっては，高価なパーフルオロカーボン液の使用量の低減が重要であったが，**図4**のようにプラスチック系の充てん材を入れることにより，使用量を低減できる構造としている。これにより，構造が単純で小形・軽量の変圧器とすることができた。また，パーフルオロカーボン液面上をガス空間とすることにより，液の温度変化に伴う体積変化を吸収するガス密封方式を採用した。こ

表2　各種変圧器比較　　不燃液冷変圧器は，据付けスペース・質量ともにSF₆ガス絶縁変圧器の約60%に軽減されており，油入変圧器と同等以下である。

No.	項　目		不燃液冷変圧器	SF₆ガス絶縁変圧器	油入変圧器
1	容　量		7,500(kVA)		
2	電　圧		F69-R66-F63-F60 kV/6.6 kV		
3	結　線		Δ/Δ		
4	周波数		50 Hz		
5	冷　媒		パーフルオロカーボン液	SF₆ガス	鉱　油
6	冷却方式		自　冷　式		
7	寸法(mm)	L	4,300	5,000	4,500
8		W	2,900	3,600	2,700
9		H	3,000	3,500	3,100
10	総質量(t)		17 (61%)	28 (100%)	18.5 (66%)
11	据付け容積(m³)		38 (60%)	63 (100%)	38 (60%)

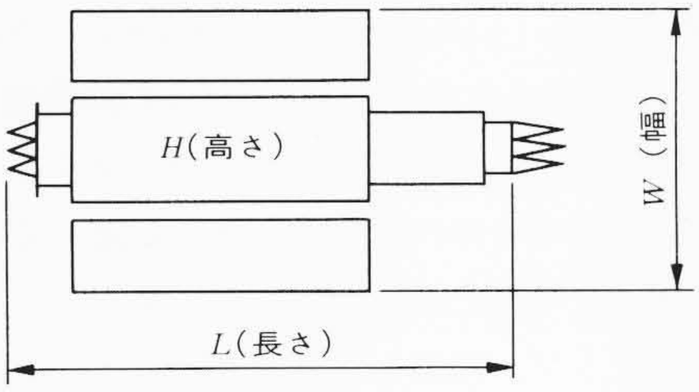


図5　5,000 kVA不燃液冷変圧器　　外観は従来の油入変圧器のイメージであり，巻線や鉄心の基本構造も油入変圧器と同じである。

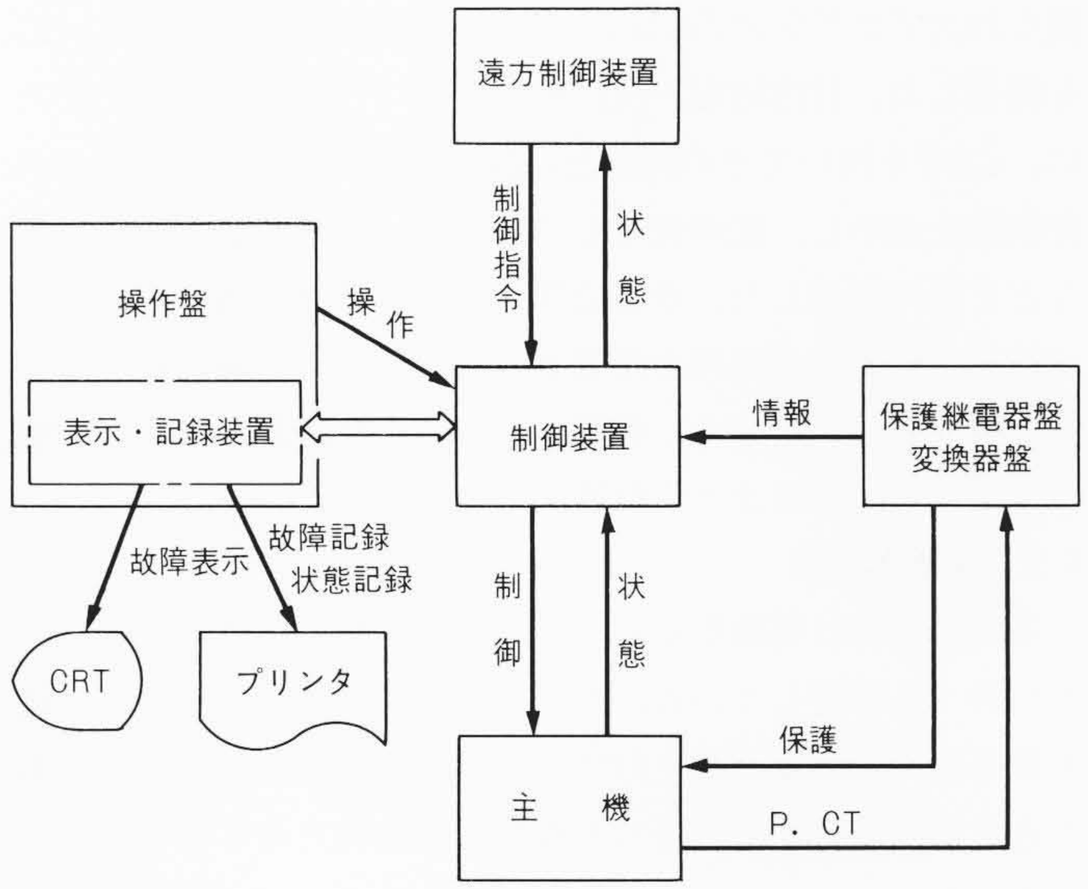
れにより，高温時ガス圧が上昇するため，液の沸点も上昇するという効果と，内部故障時の避圧空間としての機能を合わせて持たせることができた。不燃液冷変圧器の適用範囲は，コスト面から10 MVA以上と考えられるが，冷媒の価格が下がるに従いさらに低容量の変圧器にも適用されると思われる。不燃液冷変圧器・ガス絶縁変圧器・油入変圧器諸元の自社比を**表2**に，不燃液冷変圧器の外観を**図5**に示す。

4　変電所制御システムの技術動向

都市形電鉄変電所の制御システムとしては，コンパクトでインテリジェント化され，省力化を指向したシステムが要求される。これらの条件を満たすものとして，マイクロコンピュータ(以下，マイコンと略す。)を用いた制御装置と静止形リレーによってシステムを構成してきた。

近年さらに，設備の有効運用および無人変電所情報の詳細な把握，省力化のため電力管理システムとデータ伝送処理が可能な制御装置が求められるようになってきた。これらにこたえるため，日立製作所ではHISMAC(インテリジェント化静止形配電盤)シリーズとしてHISMAC-SGを新たに開発した。

HISMAC-SGをもとに，最近の変電所制御システムの技術



注：略語説明　P. CT (計器用変圧器・変流器)

図6　HISMAC-SGの全体構成図　　保護継電器はディジタル形を採用し，静止形で実施していた点検回路が不要となり，全体構成が簡潔になった。

図7 HISMAC-SGの外観　監視操作盤にはCRTおよびキーボードを取り付け，CRTにはスケルトン表示，故障表示および電流・電圧表示を行い，状態を一括して見えるようにした。

動向について述べる。HISMAC-SGの全体構成図を**図6**に，その外観を**図7**に示す。

4.1 制御装置

制御装置の機能は主回路機器の制御，機器状態や故障情報の収集・編集，保全データの収集・編集などである。制御シーケンスは容易に組めるものでわかりやすい必要があり，各種保全データの編集のためには，演算機能が充実している必要がある。これらを満足するものとして，ラダーシーケンスを用いるシーケンスモードとコンピュータモードの切換が可能なPC(プログラマブルコントローラ)を用いたHISMAC-SGを開発した。HISMAC-SGではコンパクト化を実現するために，CRTを用いてその画面上に故障内容や電圧，電流などの計測値を表示し，従来使用していたターゲット表示器，計器などを極力削減した。さらにプリンタを標準装備して機器表示情報，機器操作情報を時刻とともに印字し，事故解析の容易な構成とした。また，制御入力の二重化，制御出力の二重化を図り誤制御防止と信頼性向上に配意した。

4.2 保護継電器

保護継電器は電磁形からアナログ静止形へ，さらにディジタル形へと移行している。ディジタル形の採用によって，従来電磁形やアナログ静止形では実現が困難であった，整流器の過負荷耐量特性に見合った保護特性を持たせることが可能となった。

また，ディジタル形ではタップおよび動作時限を細かく設定できるため，よりきめ細かな保護が可能となった。アナログ静止形では継電器点検信号を外部から印加していたが，ディジタル形では継電器内蔵のマイコンによる自己診断機能を向上することにより，点検入力を外部から印加する必要がなくなった。ディジタル形保護継電器の外観を**図8**に，信頼性向上のためのRAS(Reliability, Availability, Serviceability)機能の一部を**表3**に示す。ディジタル形保護継電器はソフトウエアによって特性が決定されるため，マイコン，メモリなどの部品に異常がなければ特性は常に安定している。したがって，将来はより自己診断機能を向上することによって，初期運転時にタップ，時限を整定すれば，ディジタル継電器の自己診断異常が発生しない限り特性試験，調整が不要となることが期待できる。また，ディジタル継電器に計測機能を付加し，故障遮断時の電流，電圧の値および波形を出力し故障分析に役立てることも考えられる。

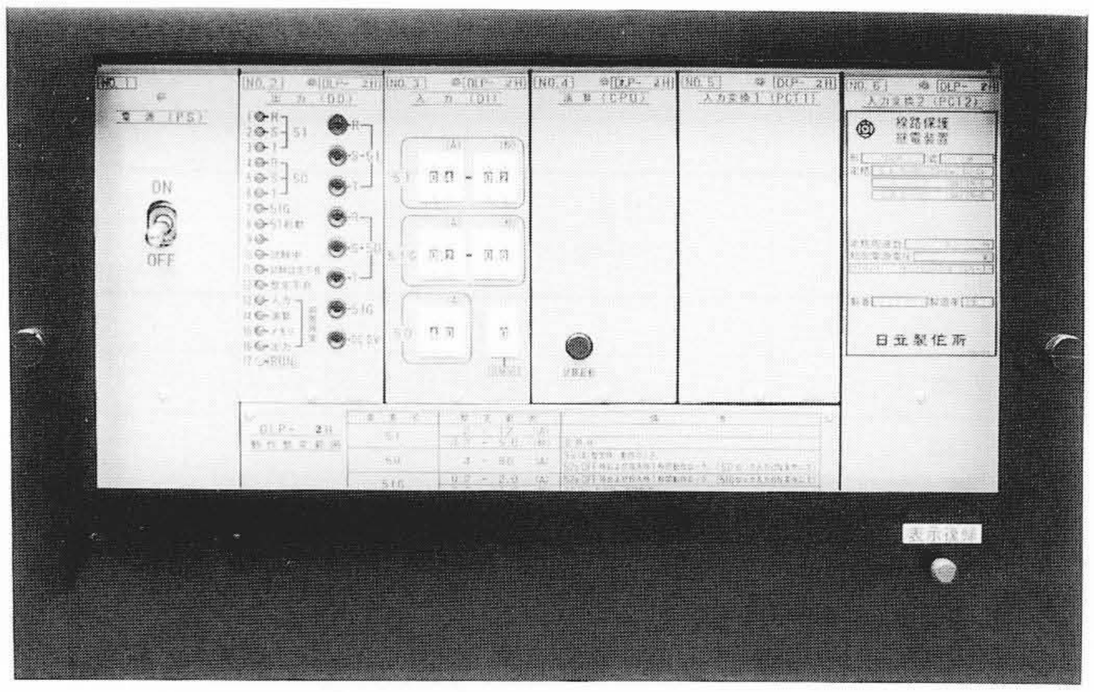


図8 ディジタル形保護継電器Hシリーズの外観　当該品は受電用で，過電流(51)，短絡(50)および地絡過電流(51G)の検出要素を持っている。

制御システムの将来技術としては，

(1) サイリスタ整流器を採用して，電圧，電流の効果的な制御を隣接する変電所間で実施する。

(2) 制御装置のユニット化を実施する。

などが考えられる。

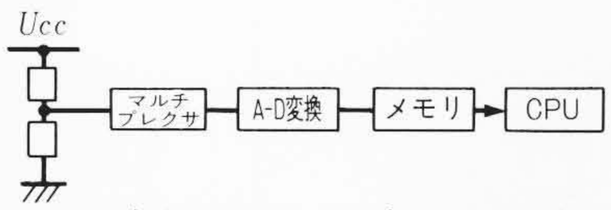
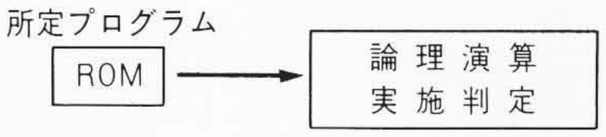
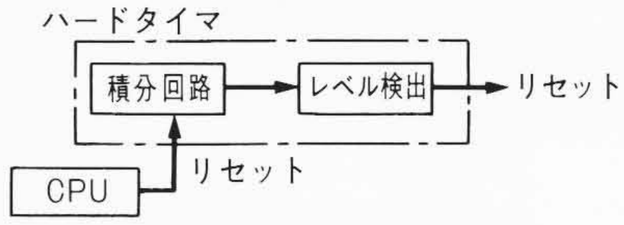
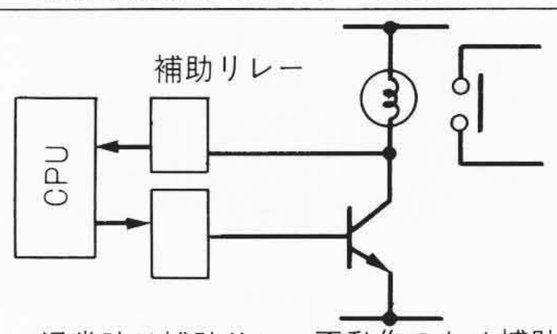
5 電力管理システム

都市形電鉄変電システムを統合してその運転をつかさどる電力管理システムは，より高度に機械化，省力化を進める観点からマンマシン高度化技術，分散処理技術，知識処理応用技術などの新技術を積極的に採用し，新しいシステムの実現が図られている。具体的には，従来適用されてきた電力管理システムの機能に加えて，ワークステーションの活用，知識処理を応用した事故復旧支援の導入，光信号伝送技術の適用などが最近の技術動向である。

5.1 最近のシステム適用例

最新技術を導入した東京都交通局12号線電力管理システムの構成例を**図9**に示す。二重化した制御用計算機を中核とし，

表3　ディジタル形保護継電器Hシリーズの RAS機能　　Hシリーズには上記のRAS機能を持っていて，信頼性を向上させている。

No.	項　目	処理内容
1	A-D変換 精度チェック	 既知直流電圧をマルチプレクサから印加し，CPU部でデータをチェックする。
2	MPUチェック 〔既知固定ROM演算チェック〕	 既知固定プログラムによって演算を実行し，所定の演算結果を得ることをチェックする。
3	ROMチェック 〔サムチェック〕	 ROM全領域のデータの総和と既知データを比較する。
4	RAMチェック 〔リードライトチェック〕	 RAM全領域に所定データを書込み，読出しをして比較する。
5	ウオッチドッグタイマ	 プログラム終了時(一定時間ごと)にCPUから外部ハードタイマにクリア信号を出力することにより，プログラムの停止暴走を監視する。
6	タイマチェック 〔ハードタイマチェック〕	 所定の時間内でハードタイマが，所定の数だけ更新されているか判定
7	DOチェック (DO出力監視)	 通常時は補助リレー不動作のため補助リレー状態を取り込み，補助リレーOFFであることをチェックする。
8	アナログ入力 チェック	(1)　電流入力 R相，T相の事故検出リレー〔51(R)，51(T)〕出力と，電流監視相〔51(CH)〕の出力から，電流アナログ入力回路をチェックする。 (2)　電圧入力 電圧入力値Vと電圧監視入力値V_{CH}との差から，電圧アナログ入力回路をチェックする。

運用でのマンマシン装置として高密度CRTの機能を十分に発揮したコンパクトなシステムを実現した。また，各変電管理所にはワークステーションを設置し，変電システムの運転状態表示や機器点検データ収集加工を行い，指令所との連携を図った。各電鉄変電所は光総合伝送路に接続され，指令所とは効率のよい情報ネットワークで結合されている。総合デスクの外観を**図10**に示す。

5.2　ワークステーションの活用

ワークステーションの技術進歩は目覚ましく，電力管理システム機能の実現に重要な位置づけで組み込む傾向にある。制御用計算機とワークステーションがおのおのの長所を生かした機能分担を図ることで，より効率的なシステム構築が可能である。制御用計算機に集中している電力情報との連携を図り，従来のOA機能を一歩進めたワークステーションの適用により，次に示す効果が期待できる。

(1)　関係部署に設置されたワークステーションに設備の運転状況や事故状況を伝送し，よりスピーディーな連絡と対応が期待できる。

(2)　計画作業の登録，確認を関係部署のワークステーションで行うことができ，現場からの的確な作業指示，確認が図れる。

(3)　変電システムを運用する高機能マンマシン装置として活用できる。

5.3　知識処理応用事故復旧支援システムの導入

熟練運用者の世代交代，事故発生頻度の減少による経験不足に対応して，事故発生時の復旧対応などを迅速かつ的確に行うため，これらを支援するための知識処理を応用した事故復旧支援システムが求められるようになった。日立製作所は電力会社での納入実績をすでに持っており，今後は都市形電鉄変電システムの機能として適用していく考えである。熟練運用者の知的判断の一部を計算機で推論させることにより，事故復旧時間の短縮，ヒューマンエラーの防止が期待できる。

5.4　光信号伝送技術の適用

光ファイバ技術や信号伝送技術の急速な進歩によって，光回線LANの導入が図られている。特に都市形電鉄変電システムでは，光回線LANの適用が一般的になっている。電力指令所と各変電所間の監視制御情報はもとより，指令電話やワークステーションがネットワークで構成され，従来おのおの独

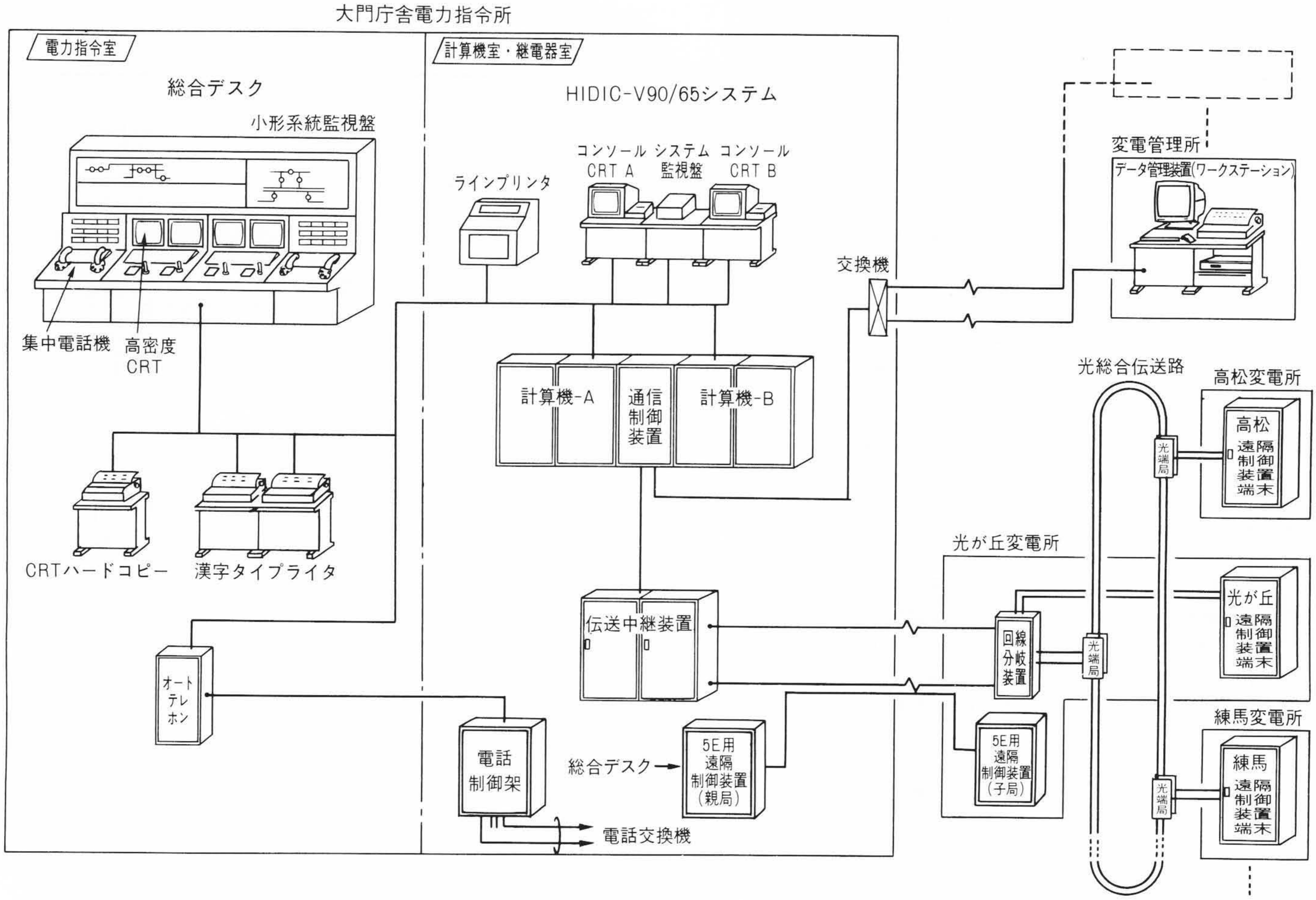


図9 電力管理システム全体構成図　ワークステーション活用による機能分担，光総合伝送路との結合，また変電所設置遠隔制御装置端末は，マイクロプロセッサ内蔵のインテリジェント装置の採用など，新技術を導入した電力管理システムを実現している。

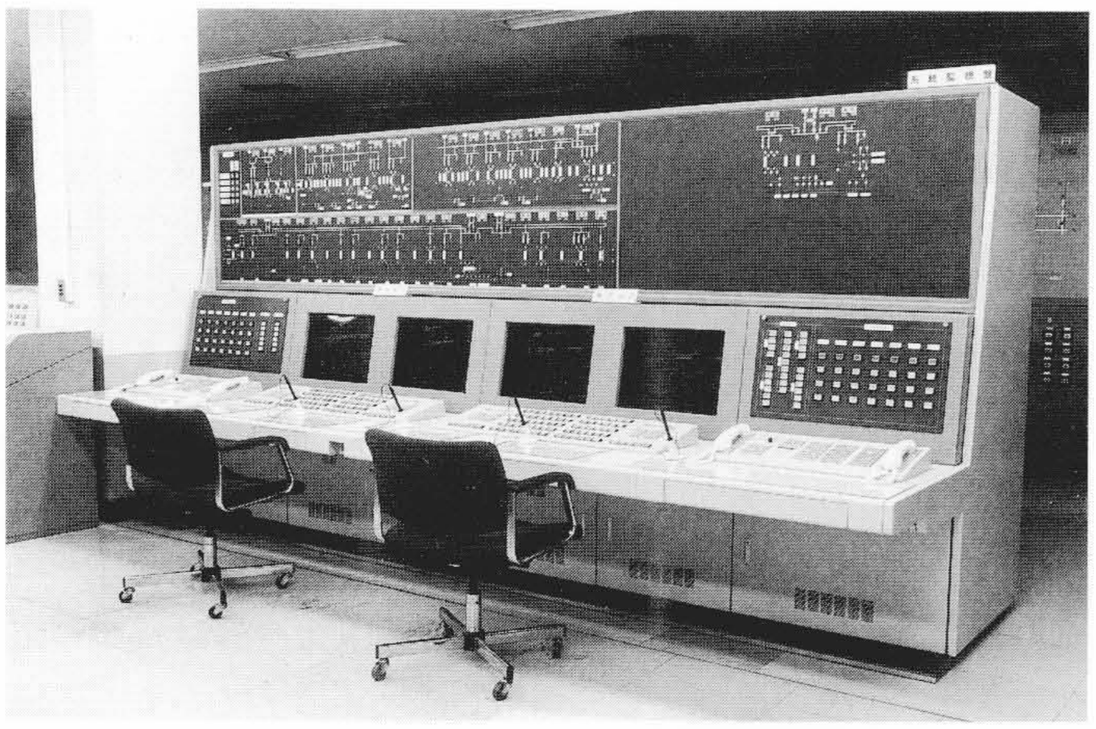


図10 総合デスクの外観　デスクと一体となった小形系統盤に全体系統の表示を行い，高密度CRTからの詳細監視，制御を行うことによってマンマシン装置のコンパクト化を実現した。

立していたシステムが効率よく情報接続する統合システム化も図られてきている。

6 結　言

都市形電鉄用変電システムは，今後の社会環境の変化による使用者の近代化ニーズに従って変化していくものと思われる。本文で述べたように，今後は，車両や運行管理システムなどの他のシステムと緊密な連携を保って発展していくものと考えられるので，さらに技術開発を進めていく考えである。

参考文献

1) 渡辺，外：最近の電鉄用変電システム技術，日立評論，**70**，7，725～732(昭63-7)
2) 桑原，外：直流高速度真空遮断器の開発，電気学会交通，電気鉄道研究会(1988-11)
3) 斎藤，外：東京都交通局電力管理システム，平成2年度鉄道におけるサイバネテックス利用シンポジウム