

産業用受変電設備のモダニゼーション

Modernization of Industrial Substations

最近の受変電設備の更新需要には、事後保全ないしは定期保全から予防保全へ、機能の維持から小形高性能化、信頼性向上、高効率化、メンテナンスフリー化など積極的なレベルアップへのニーズが顕著である。日立製作所ではこれらの時代の要求に呼応して、受変電設備の予防診断技術の開発、更新や増設・拡張のしやすさの検討、モダニゼーション用機器の開発などを総合的に推進してきた。

更新需要にも設備診断の結果や予算などとの関連で、部分的更新で済ませるケースから受変電設備全体の更新、更には設備容量の増強が主目的となるケースまで各種の段階があるが、共通して言えることは単なるリプレースとしてでなく、設備モダニゼーションの一環として常にとらえ、対処してゆくことが重要である。

石田真之助* Shinnosuke Ishida
渡辺 一朗** Ichirō Watanabe
平野靖典*** Yasunori Hirano
大石和明* Kazuaki Ōishi

1 緒 言

受変電システムは、本質的には信頼性理論でいうところの修理系であるが、運転中は非修理系と考えねばならない。すなわち、少なくとも致命的な故障はゼロでなければならない。このためには、システムとしての信頼度の確保と稼働率の向上が必要である。この二つの目的を達成するために、

- (1) 装置・機材の高い固有信頼度
- (2) システムとしての適度の冗長性
- (3) 環境への対応
- (4) 機能の向上
- (5) 予防保全ないしは予知保全が重要となる。

一方、受変電設備は機械系と電気系の複合された、いわゆる電気機械系であり、その故障特性をモデル化すると図1のようになる。許容故障率 λ 以下にこのシステムの故障率を維持するためには保全Mが必要となるが、特性曲線は時間軸に対して右上がりであり、保全の頻度は徐々に多くならざるを得ない。保全の際に更新した部品ないしはサブシステムの範囲にもよるが、システムとしては老朽化が進んでいるので、ある時点で故障頻度や維持管理費の増大が顕著となり寿命の判断がなされる。しかし、この時点で更新を検討したのでは手遅れであり、社会環境の変化や技術の進歩を考慮して、タイミングの良い更新計画、寿命判断をする必要がある。

それでは更新計画や寿命判断は、どの時点で行なうのが妥当であろうか。一例として昭和58年11月発行の電気学会技術報告(II部)第159号中の電気機器の寿命に関するアンケート調査結果を表1に示す¹⁾(この結果は、前回、昭和50年10月に行なった結果とほとんど同じであり、平均値としては妥当な線と考えられる)。また、昭和60年12月の日本電設工業協会 技術委員会 建築設備耐久性部会による電気設備の耐久性に関する調査研究報告²⁾でもほとんど同様の結果が発表されているが、更新を考慮する時期は早まる傾向を示している。

寿命の判断、特に老朽化した設備の更新時期の決定に際しては、設備の重要性和経済性が絡み苦慮しているのが現状である。電気学会と日本電設工業協会の両方のアンケート結果から、更新を考慮する時期はバッテリーは5～10年経過時、開閉器、屋外閉鎖配電盤、高圧CVケーブル、半導体応用品は

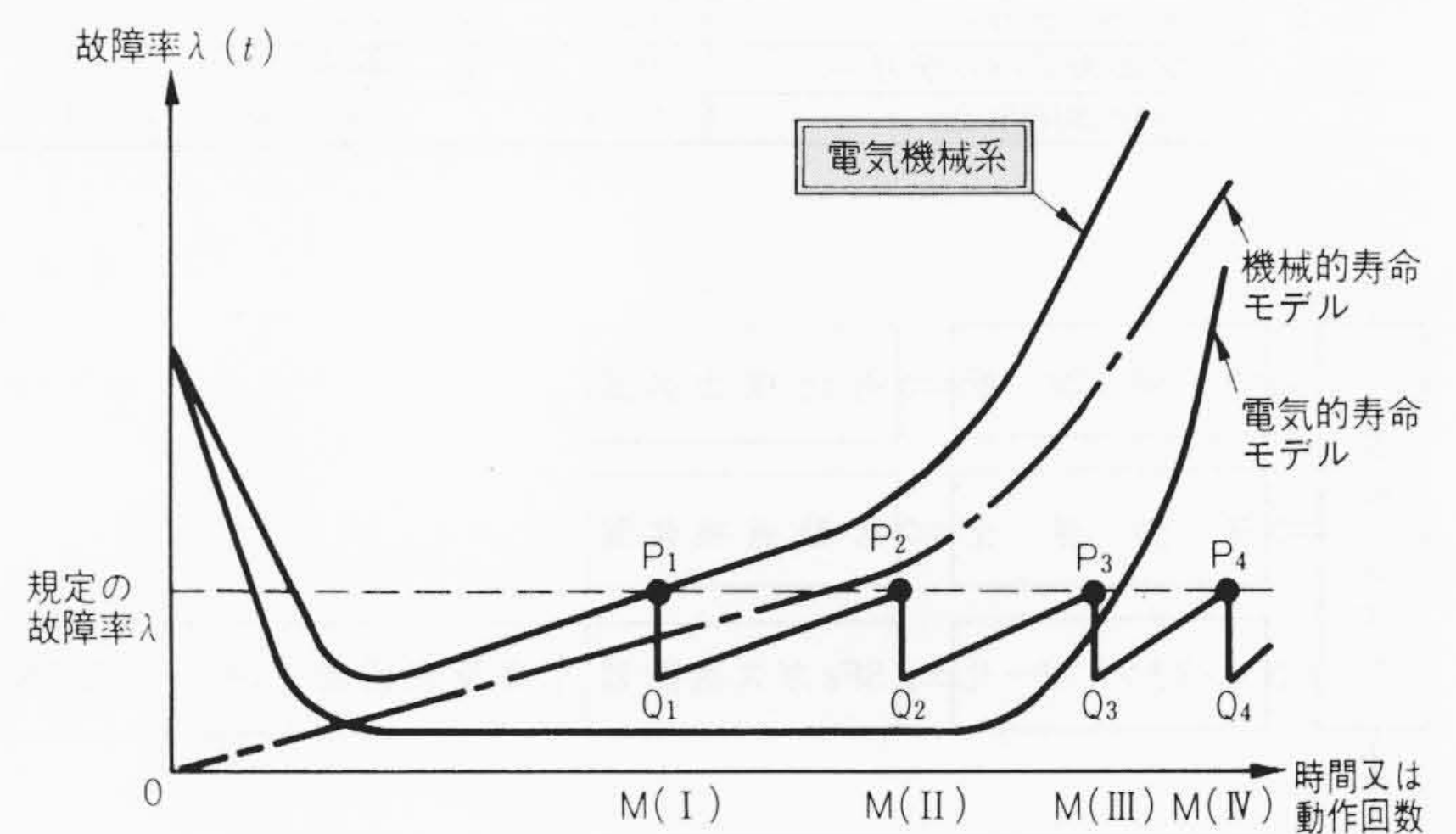


図1 電気機械系の故障モデル 受変電設備は、電気系と機械系が複合した電気機械系と考えられる。通常は図に示すように、適切な保守により一定の故障率以下に保って運用されている。

10～15年経過時、コンデンサ、乾式変成器、遮断器、断路器、屋内閉鎖配電盤などは15～20年経過時、変圧器、油入変成器は15～25年経過時といえることができる。

更新に当たっては、このように寿命ないしは効率・性能の低下に起因する場合と、より積極的な環境・技術向上への対応又は受電電圧の特別高圧への格上げなど機能・信頼性の向上を目的とするケースがある。これらのニーズに対して、どのような手段・技術を準備すべきかを示したのが図2である。それぞれのレベルと種類に応じて点検・診断、オーバーホール、部品ないしサブシステムの交換、特別高圧ガス絶縁変電所への更新などが準備されているが、モダニゼーションの観点から最近開発された技術を中心に、具体的実施例を交じえて以下に述べる。

2 受変電設備の予防診断技術

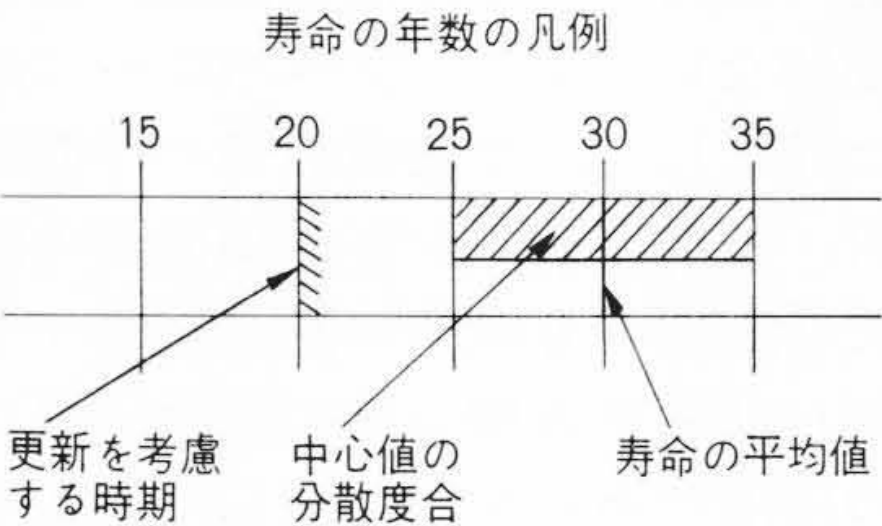
受変電設備は各種産業の動力源、公共設備・病院・ビルなどの電源として重要な位置を占め、高い信頼性を長期間にわたって維持する必要がある。

最近のセンシング技術とコンピュータの活用により、オン

* 日立製作所国分工場 ** 日立製作所機電事業本部 *** 日立サービスエンジニアリング株式会社

表1 電気機器の寿命に関するアンケート調査結果〔電気学会技術報告(II)部第159号から抜粋〕 アンケート結果によると、バッテリーや半導体応用品を除くと、受変電設備の寿命の平均値は24～33年と長寿命であるが、15～25年で更新が考慮されていることが分かる。

No.	機器の種類	寿命の平均値	寿命の年数						寿命の終期状態*					アンケート回答数
			10	15	20	25	30	35	1	2	3	4	5	
1-1	油入変圧器	32.4									○	○		83
1-2	乾式・モールド変圧器	31.0									○	○		64
2	コンデンサ	27.2										○		80
3-1	油入変成器(P・CT)	30.8										○		73
3-2	乾式変成器(P・CT)	27.8										○		80
4-1	油入遮断器	29.0								○		○		72
4-2	小油量遮断器	29.3								○		○		63
4-3	空気遮断器	30.4								○		○		59
4-4	磁気遮断器	29.2								○		○		62
4-5	真空遮断器	28.2								○		○		52
4-6	ガス遮断器	31.5								○		○		41
5	断 路 器	29.8										○		81
6-1	気中開閉器	24.5										○		77
6-2	油入開閉器	25.8										○		62
6-3	真空開閉器	25.6										○		51
7-1	屋外閉鎖配電盤	24.5										○		71
7-2	屋内閉鎖配電盤	29.8										○		80
7-3	その他配電盤類	27.6										○		77
8-1	高圧CVケーブル	24.0										○		80
8-2	低圧CVケーブル	26.6										○		82
9	非常用発電設備(D/G)	28.2										○		46
10-1	鉛バッテリー	14.5										○	○	75
10-2	アルカリバッテリー	16.8										○	○	66
11	半導体応用品	20.5								○	○	○	○	63



- 注：＊ 寿命の終期状態
1. 故障頻度が高くなり、停電による損失が多くなった時点
 2. 交換部品の入手が困難になった時点
 3. 修理が技術的に不可能になった時点
 4. 性能が低下し、使用上の安全性が維持できないと判断した時点
 5. 性能劣化により維持管理費の増大が著しくなった時点



注：略語説明ほか MOF(計器用変成器)，＊ 2MOF形GSSについては3章で記述する。

図2 受変電設備の更新の種類 単に寿命が来たので更新するというケースから、最近はより積極的な信頼性向上、設備増強に伴う機能向上、受電電圧の特別高圧化などのニーズが強く、それに対応する各種の技術が開発されている。

ラインでの機器の劣化診断が可能になりつつあり、図3にSF₆ガス絶縁開閉装置及び変圧器のオンライン予防診断装置の構成例を示す。

2.1 ガス絶縁開閉装置の予防診断

SF₆ガスはその高絶縁特性と高消弧特性により、ガス遮断器、ガス絶縁開閉装置など受変電設備へ多く使用されるに至って

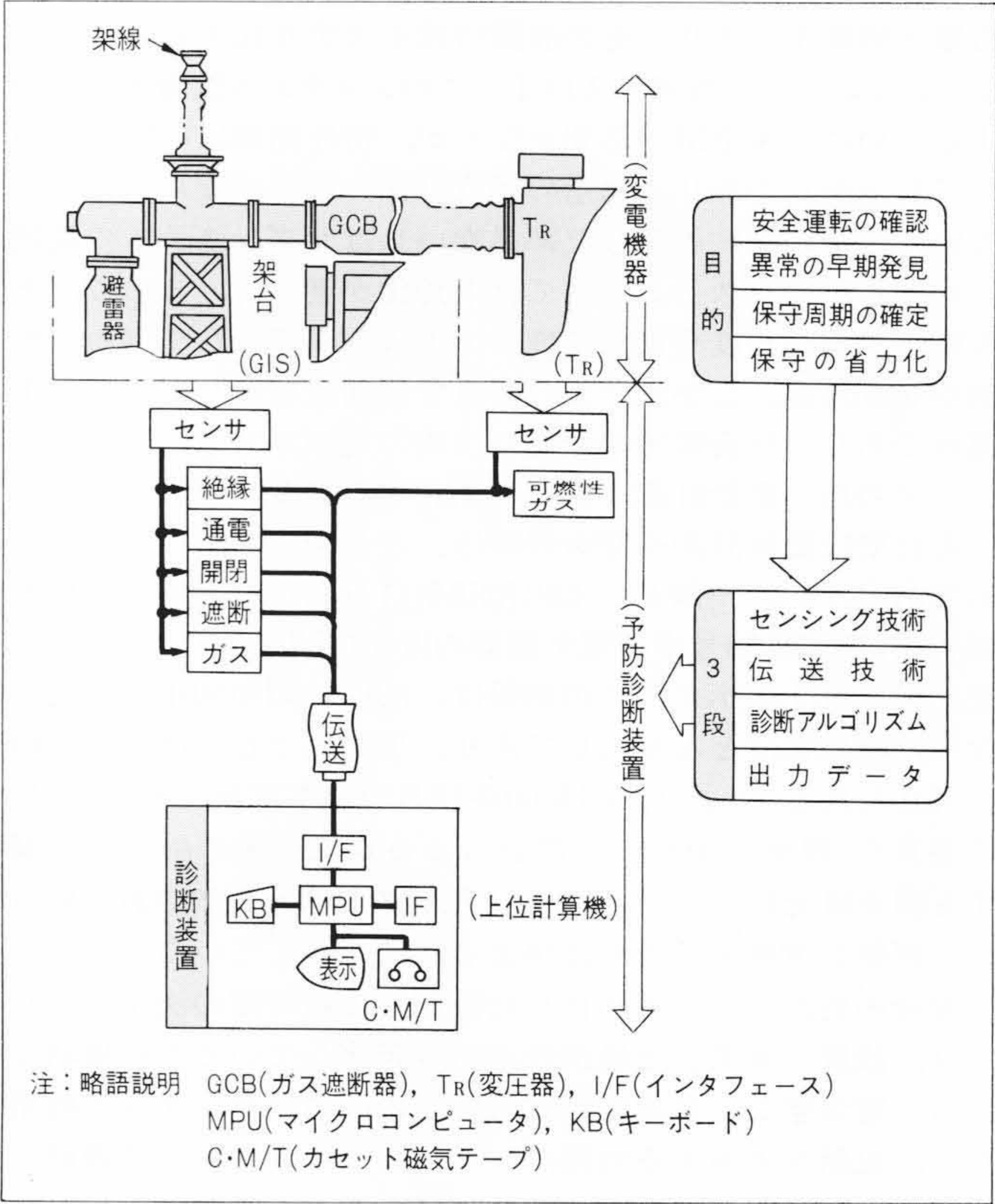


図3 受変電機器の予防診断装置の構成例 最近のセンシング技術の進歩とコンピュータの活用により、オンラインでの劣化診断や劣化の度合いの判定も可能になりつつある。

表2 ガス絶縁開閉装置の予防診断技術 SF₆ガス機器の保守上の特異性は、充電部の全密閉化構造に伴うメンテナンスフリー化であり、内部が健全であることの外部診断による確認のニーズが高まっている。

No.	機 能	診 断 項 目	対 象 部 品	検 出 方 法	測 定 範 囲	内 容
1	絶 縁	コ ロ ナ	GIS全般	電磁カップリング	100PC～1,000PC	接地線に重量する高周波パルス電流の検出。
		金 属 異 物	同 上	超音波マイク	径φ0.2以上 長さ1mm以上	金属異物のダンシングによる振動音を検出。
		分 解 ガ ス (ガスチェッカー)	同 上	指示薬との化学変化	数十ppm	部分放電による分解ガスを検出。
2	開 閉	開 閉 時 間 (開 閉 渋 滞)	遮断器	カットコア+ホール素子	0～999ms	遮断の制御電流により、通電時間を測定 (設定値超過時信号出力)。
3	コンタクト 損傷内部構造	内 部 状 態	GIS全般	X線透視	1mm以上	X線撮影し、接点及びコンタクトの状態を点検。
4	ア レ ス タ	漏 れ 電 流	ZLA(ギャップレス)	第三調波分電流(抵抗分電流)	0.1～1mA	避雷器の接地線電流を電磁カップリングで検出
5	地 絡	ガ ス 圧 検 出	主母線、他	微差圧検出	相分離5,000A 3φ	差圧検出器により、内部地絡時の内圧上昇を検出。
		光 検 出	同 上	地絡光検出	100A以上	地絡時の閃絡光により検出。
		C T 法	同 上	地絡電流検出	数十アンペア	地絡電流により検出。
6	ガ ス 特 性	ガ ス 密 度	各ガス区分	差圧検出+ポテンショメータ	0～5kg/cm ²	対向ペローズによる差圧変化を検出し、アナログ表示。

注：略語説明 GIS(ガス絶縁開閉装置)、ZLA(酸化亜鉛避雷器)

いる。これらのSF₆ガス機器の保守上の特異性は、充電部の全密閉構造に伴うメンテナンスフリー化であり、内部が健全であることの外部診断による確認・裏付けのニーズが高まっている。したがって、充電部の絶縁、開閉、通電、ガス特性などの診断が必要となる。表2にZLA(酸化亜鉛避雷器)を含むガス絶縁開閉装置の予防診断技術を取りまとめて示す。

2.2 変圧器の予防診断

変圧器にはガス絶縁変圧器、モールド変圧器、乾式変圧器、油入変圧器があるが、一般には油入変圧器が多く用いられている。油入変圧器は、内部に異常があると各種ガスが発生することが知られており、変圧器の排油弁から油をサンプリング採取し、ガスクロマトグラフで成分分析する方法が従来行なわれていた。しかし、オンライン用として、油のサンプリングの複雑さをなくすために、図4に示すように、高分子膜により電気協同研究会基準³⁾の6成分ガス(H₂、CH₄、C₂H₆、C₂H₄、C₂H₂、CO)を透過、検出し、その絶対量から異常の有

無を、各成分の組成比及びCO量から異常の形態を診断し、更にC₂H₄/C₂H₆をもとに過熱温度計算を行なう技術も実用化されている。

3 受変電設備更新の基本構想

受変電設備の更新に際しては、1章で述べたように、レベルを定め、しっかりしたビジョンをもって対処することが肝要である。その例として、ほぼ同一の据付面積で設備容量を2倍とし、合わせて信頼性向上などのモダニゼーションを行なう場合の基本構想の例を表3に示す。

この場合、防災化を目的に入れば変圧器はガス絶縁式になるであろうし、低騒音を目指す場合は低騒音形変圧器に、低損失を目的とすれば低損失形の変圧器の採用を前提としての計画になる。

また、設備容量によっては1クラス上の受電電圧を検討すべきで、今まで1回線受電で更に電源としての信頼性を向上したい場合には、同時に常用・予備2回線受電、複数バンク化を図ることが推奨される。最近ではエレクトロニクス工場などで、MOF(計器用変成器)の校正・点検時にも無停電化を図るため、2MOF方式を採用するケースも増えている⁴⁾。

このように受変電設備の更新・モダニゼーションも目的や範囲によって種々の対応が必要となるが、表3の基本構想を一つの柱として、モダニゼーション用の機器、システムとその具体例につき述べる。

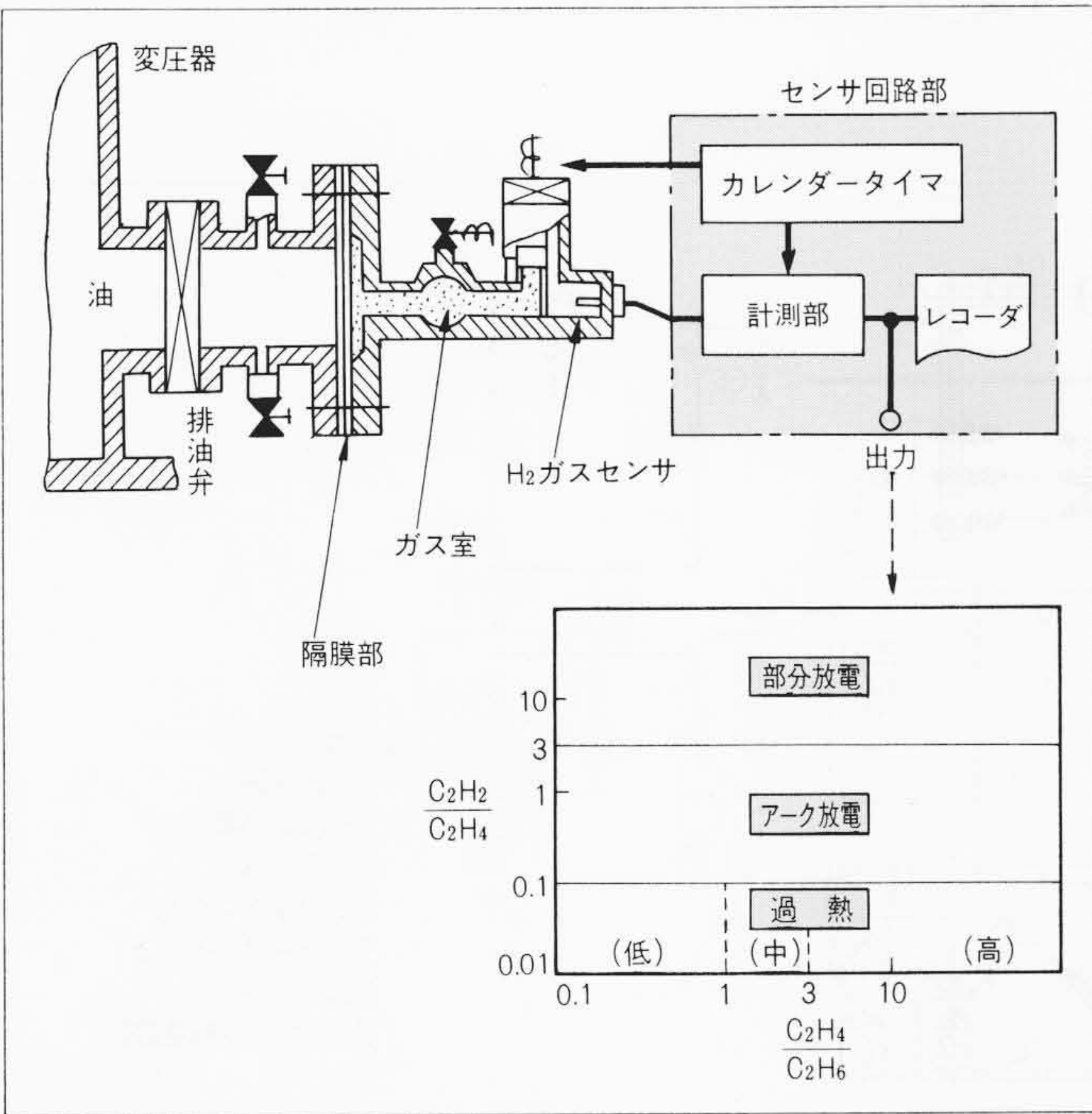


図4 変圧器の油中溶存ガス分離・診断 変圧器の油中溶存ガスを高分子膜から採取・検出し、その絶対量から異常の有無を、組成比から異常の形態などを診断する。

表3 受変電設備更新の基本構想例 開閉装置、変圧器バンク、配電盤、監視制御装置などにつき、それぞれ現状をどのように、何をねらって更新するかを明確にして計画する。

機 器		現 状	更 新 後	効 果
1	監視制御装置	電磁形リレーによる保護制御	監視制御のデジタル化と保護継電器の静止化	● 縮小化 ● 性能の向上 ● 保守性の向上 ● 信頼性の向上
2	開閉装置 (66kV)	気中絶縁式 (ABB, LS)	縮小形ガス絶縁開閉装置 (GIS)	● 縮小化 ● 保守の省力化 ● 信頼性向上
3	変 圧 器 (66/6.6kV)	油入自冷式	倍容量変圧器 (同一据付面積で容量 2倍)	● 電源容量強化 ● 小形・軽量化 ● 損失の低減
			ガス絶縁変圧器	● 防災化
4	配 電 盤 (6.6kV)	MOB収納配電盤	VCB収納2段階閉鎖形 配電盤	● 縮小化 ● 信頼性向上 ● 保守の省力化

注：略語説明 ABB(空気遮断器)、LS(ラインスイッチ)、MOB(小油量遮断器)、VCB(真空遮断器)

4 受変電設備のモダニゼーション

4.1 保護・監視制御装置

従来、受変電設備の保護・監視制御は、電磁形リレーを中心とした保護リレー、及びワイヤードロジックによるシーケンス制御が主体となっていたが、次に述べる点から静止形への要求が強くなってきた。

- (1) 装置据付所要面積の縮小化
- (2) 設備の増設・改造に対する作業性の向上
- (3) 耐振性の改善、信頼性及び機能の向上
- (4) 保守・点検の省力化
- (5) マンマシン インタフェースの向上など。

このため、保護リレー類の静止化と監視制御のデジタル化が図られている。ユニット形接点付き静止形継電器と静止形受変電監視制御装置“HISMAC”の外観を図5に示す。これらは、それぞれがICやLSIの採用により小形高信頼化されているとともに、消費電力が極めてわずかである。また、これらを組み合わせることにより継電器類の自動点検を行なうことも可能である。“HISMAC”はマイクロコンピュータをデータ処理装置として用いた受変電設備用監視制御装置で、データロガー機能から受変電機器の制御、予防保全装置と組み合わせての異常診断、例えばガス絶縁開閉装置の異常診断などを行なわせることができる。

変電所を拡張する場合、従来形監視制御盤の増設が困難で、思いきって“HISMAC”に更新し好評価を得ているケースも多い。“HISMAC”の場合は、機能ユニットを追加してゆだけで、増設・拡張を極めて容易に行なうことができる。

4.2 ガス絶縁開閉装置

高圧以上の開閉装置は、近年急速にオイルレス化、不燃化、メンテナンスフリー指向が進み、最近では66/77kV級ではガス遮断器又はガス絶縁開閉装置が、22/33kV級及び3/6kV級では真空遮断器が油入遮断器や気中遮断器に代わって主流となっている。

SF₆ガスの優れた絶縁特性を生かして、遮断器、断路器、母線、接地開閉器などを金属容器内に合理的に配置構成したガ



図5 静止形継電器を採用したリレー盤と“HISMAC” “HISMAC”は電子化された受変電監視制御装置で、静止形継電器と組み合わせてリレーの自動点検が可能であり、また小形でスペースをとらないため、従来形の監視制御盤が増設困難なとき従来盤の数分の一のスペースで更新及び増設ができる(ディスク幅1,800mm)。

ス絶縁開閉装置は、三相一括形及び縮小形の開発により更に小形となり需要を拡大した。このガス絶縁開閉装置はコンパクトで、母線や断路器など充電部が密閉されているなどの特長のために、モダニゼーションや拡張に極めて好適である。

図6にガス絶縁開閉装置による更新と増設の例を示す。(a)は従来、老朽油入遮断器のあった鉄骨ストラクチャ式変電所の跡にガス絶縁開閉装置をコンパクトに設置し、屋外鉄構とラインスイッチを撤去した例で、小形になっただけでなく、メンテナンスフリーに近づき、耐塩害性が強化された。

(b)はスイッチハウス式変電所の容量増強の例で、スイッチハウスを建て増すことは不経済であり、充電部が密閉されたガス絶縁開閉装置の特長を最大限に発揮して、スイッチハウスの側壁を母線で貫通させ、環境調和も図りながら容量倍増を実現した例である。

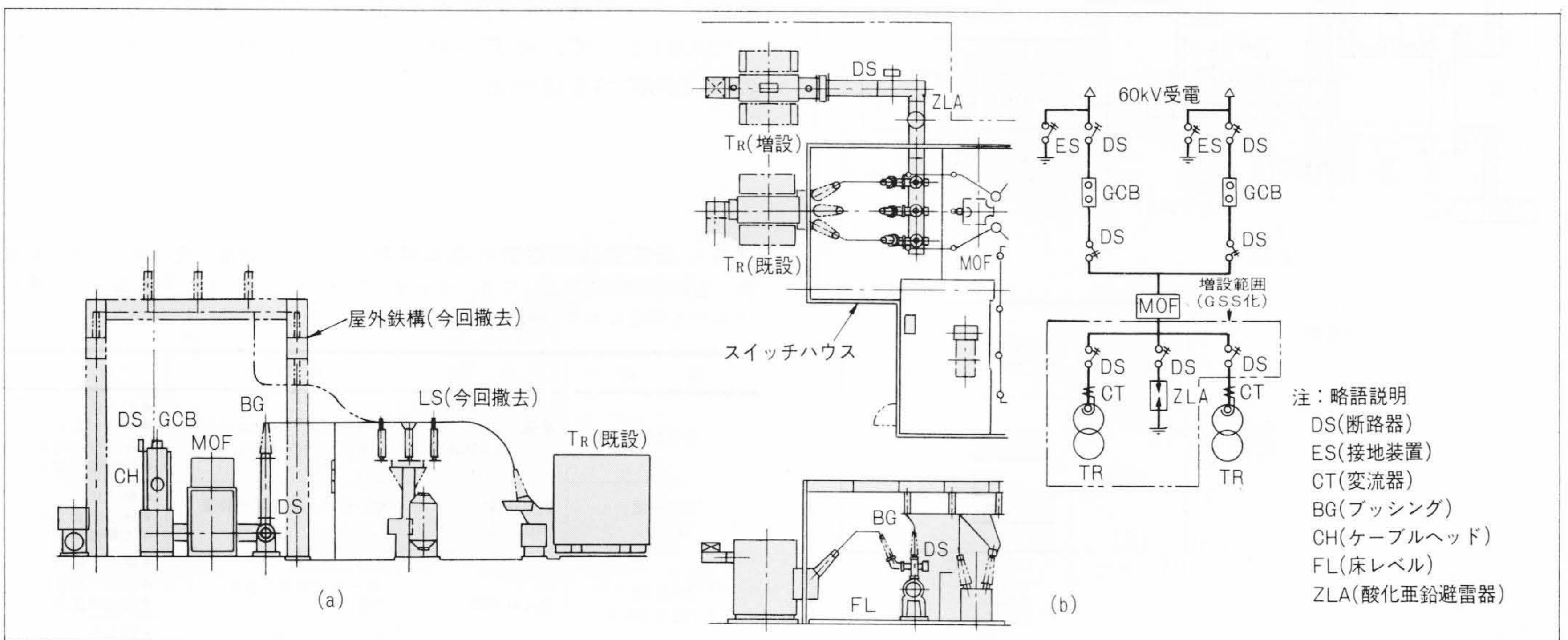


図6 ガス絶縁開閉装置による更新、増設の例 縮小形ガス絶縁開閉装置は、場所をとらず、母線類も金属容器中のガスに封入されているので、鉄骨ストラクチャ式やスイッチハウス式変電所の部分更新や増設にも適している。(a)は従来遮断器とラインスイッチをガス絶縁開閉装置でリプレース、(b)はスイッチハウス式変電所に容易にガス絶縁開閉装置を連結増設した例を示す。

4.3 変圧器および変圧器バンク

変圧器の最近の技術動向は、難燃化と低損失化が著しい傾向を示している⁹⁾。従来、オイルレス化に対しては専らH種乾式変圧器が用いられていたが、近年、耐トラッキング材料の開発により22/33kV級以下にはモールド変圧器が、絶縁構造設計の改善により66/77kV級にはSF₆ガス絶縁変圧器が採用されるケースが増えてきている。

これらの新絶縁材料変圧器は、難燃性の観点からは優れているが、モールド変圧器は高電圧化に対して、ガス絶縁変圧器は冷却、すなわち大容量化に対し現状では限界があるので、目的のウェートづけによって適材適所の採用を計画することが必要である。一例として、66kVガス絶縁開閉装置直結形10MVA屋外用全装可搬変圧器（油入自冷式、窒素封入）の外観を図7に示す。本器は絶縁及び冷却については油入自冷とし、上部に窒素ガスを封入して吸湿呼吸器、コンサベータを不要とし、全装可搬としたもので、小形・軽量化、保守・信頼性を向上し、ガス絶縁開閉装置との直結を可能としている。また、図8は自らの励磁電流が開閉可能なガス絶縁断路器を付属した変圧器で、変圧器の更新やバンク増設に極めて便利になっている。

一方、巻線占積率の向上、銅損及び鉄損の低減、冷却効率の向上などにより、既納変圧器とほとんど同じ据付面積で容量を2倍にする倍容量変圧器も実現している。この技術は実際の負荷が2倍になる場合に、据付面積がほぼ同一で変圧器の更新が可能というだけでなく、図9(a)に示すように変圧器の低損失化技術にもなっている。すなわち、変圧器の負荷損（主に銅損）は負荷電流の二乗に比例するので、3,000kVA変圧器に代えて、5,000kVA変圧器を使用した場合、負荷容量を3,000kVAとすると損失は41kWから28kWとなり、13kW（32%）の損失低減となる。

また、図9(b)は3,500kVA変圧器1台運転と2台平行運転の場合の損失比較を示す。負荷が3,500kVA変圧器1台の100%の場合を例にとると、2台平行運転したほうが20%損失を低減している。この場合は損失低減に加えて、変圧器バンクの複数バンク化という信頼性向上も同時に達成できる。

4.4 閉鎖配電盤

6kV級配電盤は、従来、油入遮断器入りアミクラ構造や磁

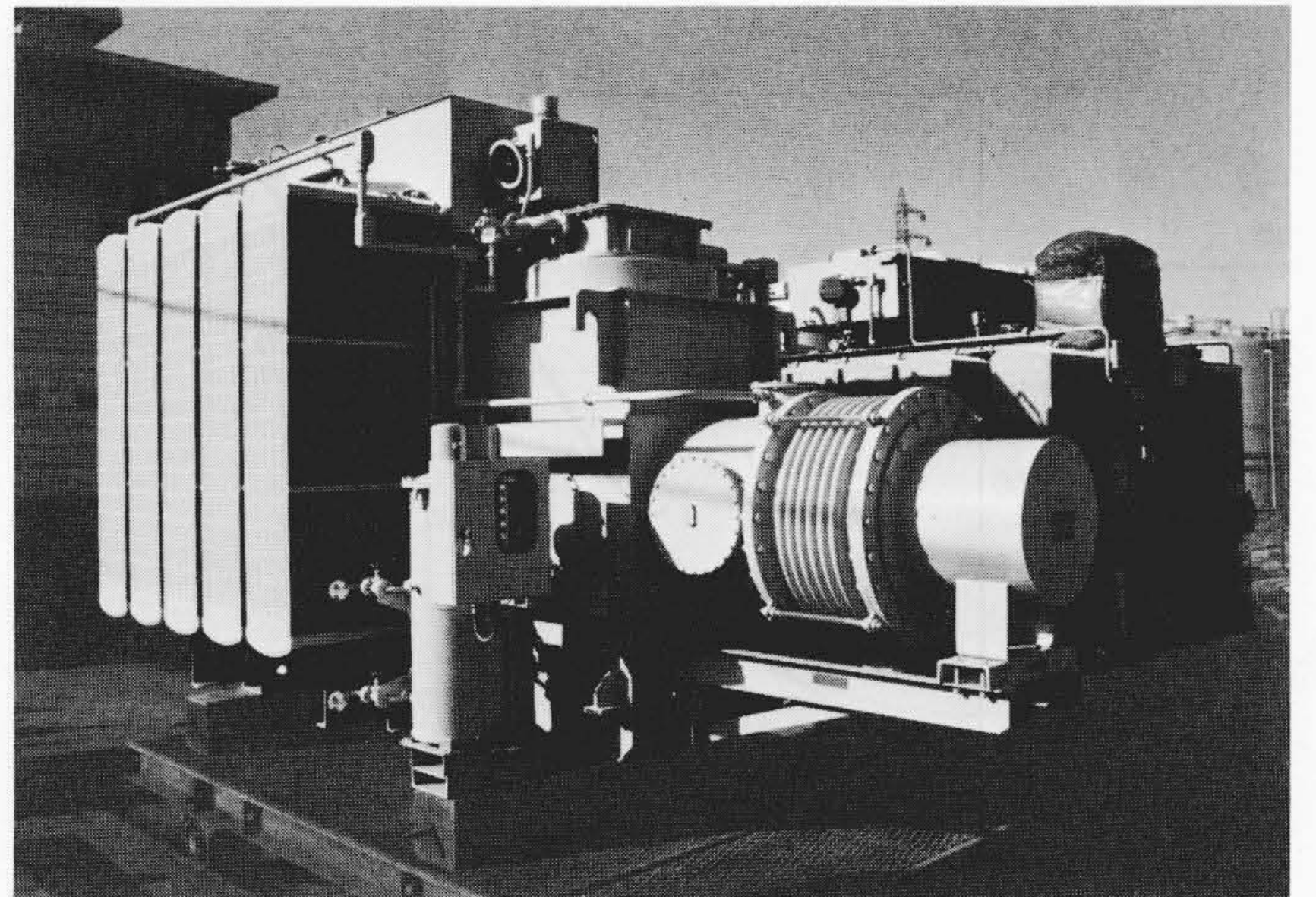


図7 66kVガス絶縁開閉装置連結形屋外用全装可搬変圧器 油入自冷式で窒素ガスを封入してコンサベータを不要とし、組立完成品のまま輸送できる。すなわち全装可搬となっている。また、66kVガス絶縁開閉装置とガス絶縁開閉装置との直結形となっており、ガス絶縁変電所を構成する（高さ3,500mm）。

気遮断器収納JEM-1153F級相当配電盤が多く使われていたが、機器の小形化、保守の省力の観点から、遮断部が密封化された真空遮断器収納2段積閉鎖配電盤が開発され普及してきている。

小形真空遮断器の2段積により配電容量の増大、据付面積の縮小化を実現するとともに、同一盤内にバイパス断路器を設置することにより、配電系統を単母線方式からバイパス断路器方式にして、電力供給信頼度を大幅に向上することも可能となった。図10に7.2kV小形真空遮断器収納2段積閉鎖配電盤の外観を示す。

また、電気室スペースの有効活用に、ケーブル接続作業や保守点検がすべて前面から行なえる7.2kV薄形壁密着式配電盤（フィットバックキュービクル）も普及しつつある。図11にその外観と配置計画例を示す。このフィットバックキュービクルは、奥行700mmと薄形で、電気室などの壁に密着して設置できる（保守・点検はすべて前面から行なえる。）ので、スペースに制約のある場所での更新や増設に好適である。

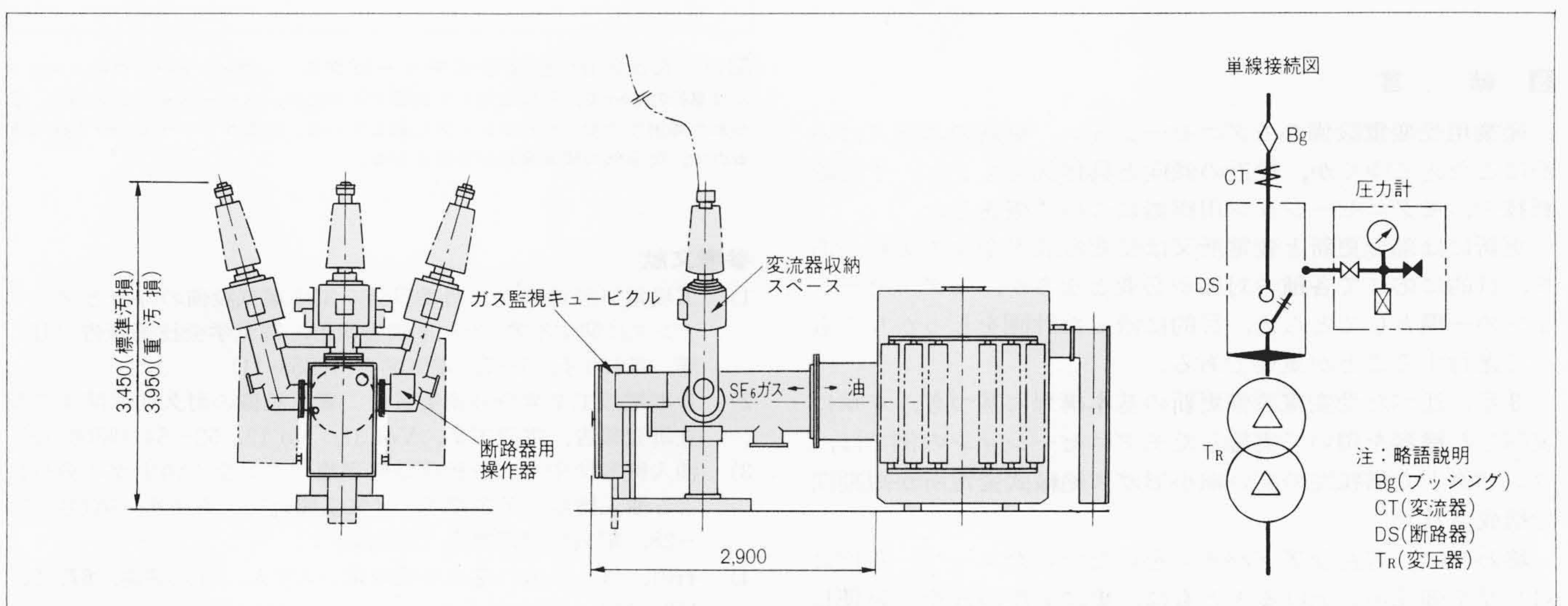
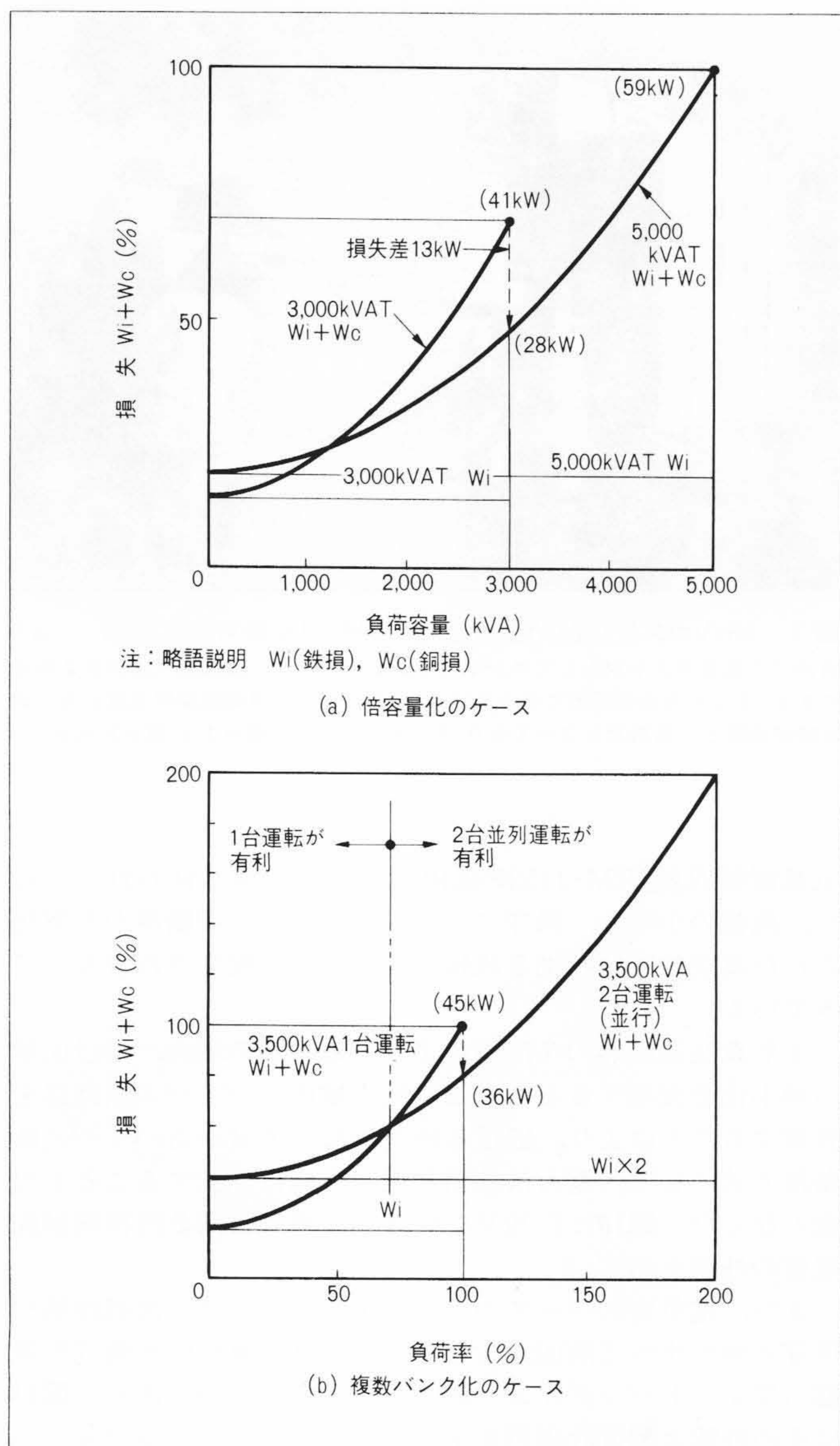


図8 励磁電流開閉断路器付き変圧器 励磁電流5A（50MVA相当）の開閉が可能なSF₆ガス絶縁断路器をもつ変圧器で、ブッシング変流器を収納可能であり、変圧器バンクの増設や更新に便利である。



5 結 言

産業用受変電設備のモダニゼーション、更新のニーズにいかに対応してゆくか、最近の傾向と具体例をもとに、予防診断技術、モダニゼーション用機器について概説した。

更新には部分更新と変電所又は受変電設備全体の更新があり、目的に応じて各種の対処が必要となるが、モダニゼーションの一環としてとらえ、目的に沿った計画をしっかりとって遂行することが重要である。

3章に述べた受変電設備更新の基本構想に基づき、4章に説明した機器を用いて実施したモダニゼーションの例では、コンパクトで信頼性の高い縮小形ガス絶縁式変電所が短期間で構成された。

終わりに、有益なアドバイスをいただいたユーザー各位に対し厚く御礼申し上げるとともに、更に高度の技術を駆使して効果の大きい受変電設備のモダニゼーションに取り組む考えである。

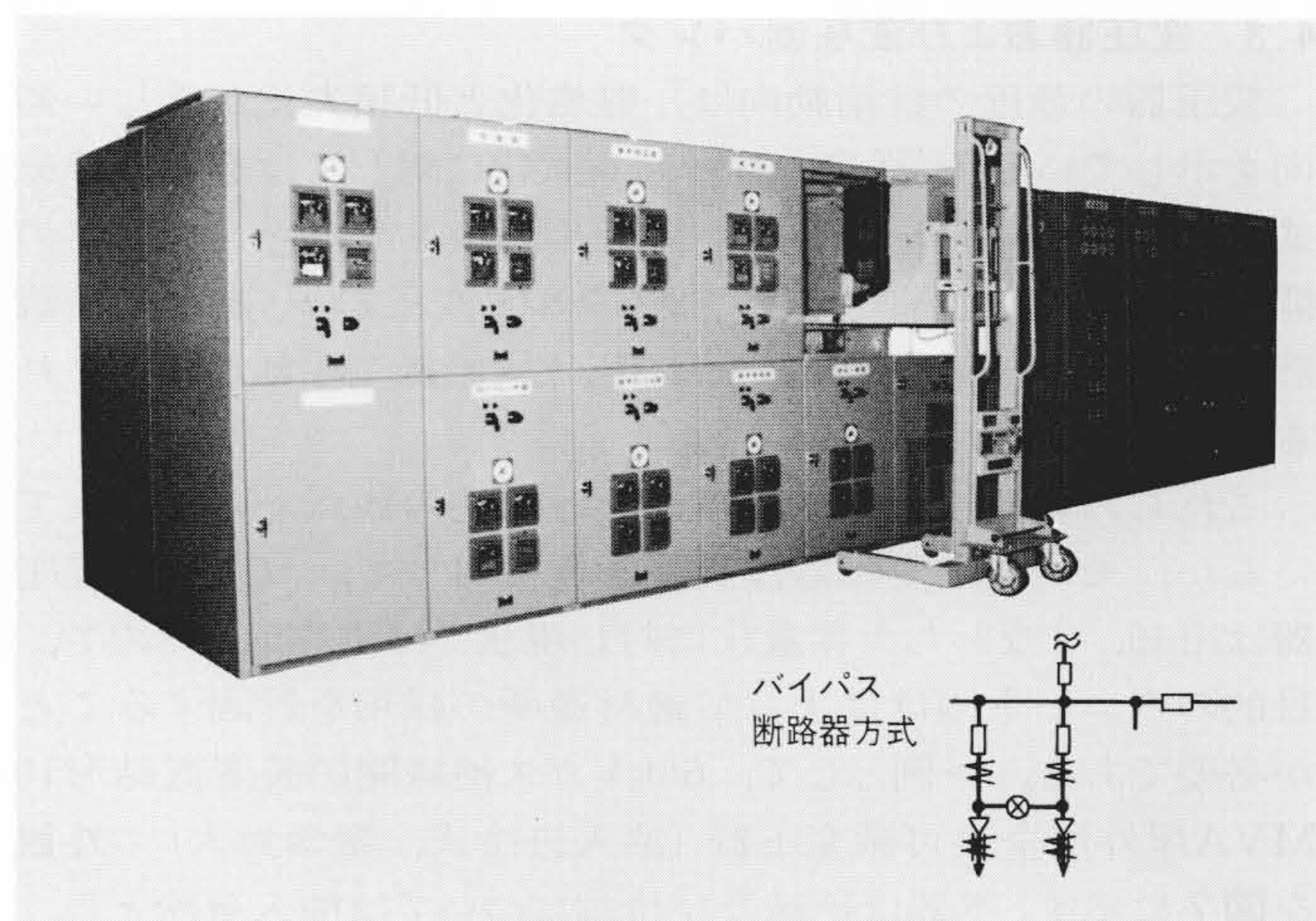


図10 7.2kV真空遮断器収納2段積閉鎖配電盤 小形真空遮断器の採用、低サージ真空遮断器の開発などにより、高圧閉鎖配電盤も小形・高性能化されており、また同一盤内にバイパス断路器を収納し、電力供給信頼度を向上することも行なわれている(高さ2,300mm)。

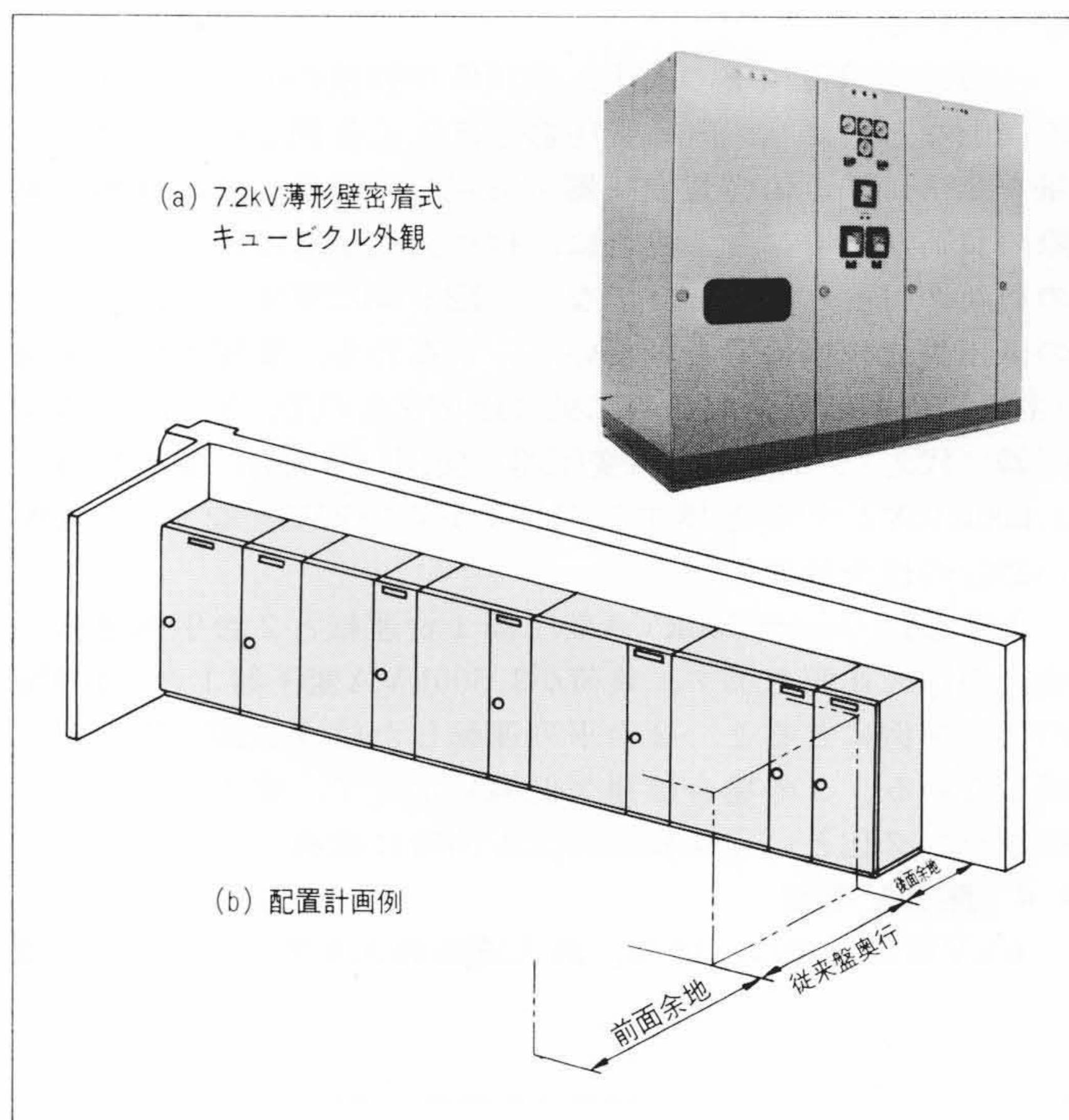


図11 7.2kV薄形壁密着式キュービクル フィットバックキュービクルは奥行700mmで、壁に密着して設置できるため、スペースが少ない場所、限られた場所での増設やリプレースに適している。前面からすべて保守点検できるので、従来盤の後面余地が不要となる。

参考文献

- 1) 工場電気設備調査専門委員会：工場電気設備の寿命とメンテナンスに関するアンケート調査報告、電気学会技術報告(II)部、第159号、5～7、電気学会(昭58-11)
- 2) 日本電設工業協会技術委員会：電気設備の耐久性に関する調査研究報告、電設工業、Vol.31, No.12, 52～54(昭60-12)
- 3) 油入機器油中ガス分析保守管理専門委員会：油中ガス分析による油入機器の保守管理、電気協同研究、第36巻、第1号、26～28、電気協同研究会(昭和55-7)
- 4) 石田、外：最近の産業用受変電システム、日立評論、67, 2, 159～164(昭60-2)
- 5) 石田、外：受変電設備の防災化、日立評論、68, 3, 249～254(昭61-3)