

受変電設備用変圧器

Transformers for Substation Systems

受変電設備には、用途の多様化、システムの大規模化・複雑化により特別高圧受電の割合が増加し、大容量化が進むにつれ信頼性、防災性はもとより、設備としての投資効果、隣接他企業・電力会社をも含めた運用効果・供給信頼度など、総合機能を最大限に発揮できることが要求されている。したがって、受変電設備の中核となる変圧器についても、用途に応じた幅広い選択が可能な機種を用意するほか、設備から要求される機能を満足する新技術・新機種の開発によってこれに対処していく必要がある。日立製作所では変圧器単体だけでなく、設備計画全体のエンジニアリングを実施しているが、本稿では最近の受変電設備用変圧器の新技術の動向と適用について述べる。

長屋恒彦* Tsunehiko Nagaya
小佐々 博* Hiroshi Kosasa
久保博文** Hirofumi Kubo

1 緒 言

受変電設備は、各種産業・プラントの生産動力源、保全設備、交通機関、公共設備、ビル・電子計算機制御などの各種電源として重要な位置を占めている。また、近年都市の過密化やシステムの規模の拡大、複雑化によって、特別高圧受電の割合が増加し、受変電設備が大容量化してきている。したがって、受変電設備の機能喪失はシステムや地域社会に重大な影響を及ぼすこととなり、より高い信頼性が強く求められている。一方、負荷の種類についても、電鉄や鉄鋼のように、繰返しの短時間過負荷を必要とするものや、チョップ制御、電力回生用インバータなどのサイリスタ応用製品の使用増加に伴う電源変動、又は高調波抑制対策などが重要視されるようになった。これに対し受変電設備のシステム構成は、常用・予備2回線受電、変圧器の複数バンク化、スポット

ネットワーク方式、区間保護方式などによって供給信頼度の向上を図っているが、そのかなめとなる変圧器についてもこれらの背景を踏まえ、各需要家のニーズの特徴と将来動向を的確に把握したうえで、新機能の追加及びソフトウェア・ハードウェア両面にわたる新技術開発を迅速に推進する必要がある。日立製作所では最近の受変電設備用変圧器に対し、図1に示すような技術的対応を図っている。変圧器の種類には、絶縁・冷却媒体によって大別して油入変圧器と乾式変圧器とがある。油入変圧器としては現在適用範囲の広さと経済性に優れ、実績の最も豊富な鉱油入変圧器が使用され、乾式変圧器としては主にモールド変圧器とSF₆ガス絶縁変圧器が使用される。巻線をシリコンワニスで処理したH種乾式変圧器もあるが、耐湿性の点から最近ではモールド変圧器に

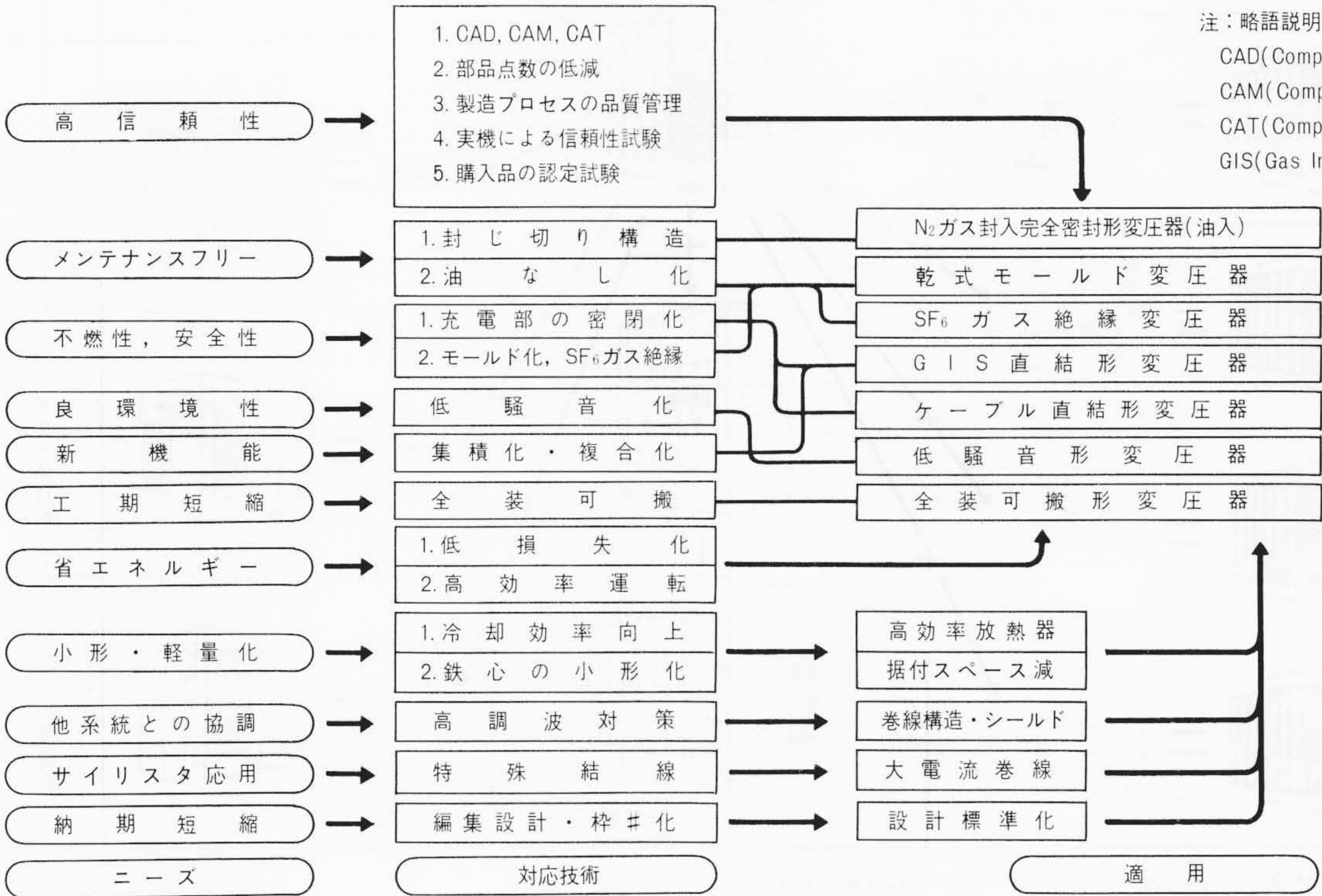


図1 変圧器に対するニーズと適用 受変電設備の高電圧・大容量、複雑化によって変圧器に対するニーズがますます多様化している。

* 日立製作所国分工場 ** 日立製作所中条工場

表1 絶縁冷却媒体から区分した変圧器の種類と特徴 油入変圧器に対し、不燃性のモールド変圧器及びSF₆ガス絶縁変圧器がある。

項 目	油入変圧器	モールド変圧器	SF ₆ ガス絶縁変圧器
1. 絶縁冷却媒体	鉱油	レジン, 空気	SF ₆ ガス
2. 使用場所	屋内・屋外	屋内	屋内・屋外
3. 特 性			
難燃性	△	◎	◎
耐熱性	○	◎	◎
耐湿性	◎	○	◎
耐塵性	◎	○	◎
4. 冷却方式	自冷式	自冷式 風冷式	強制循環自冷式 強制循環風冷式
5. 電圧適用範囲	(任意)	30kV以下	60kV以上
6. 容量適用範囲	(任意)	10MVA以下	30MVA以下
7. 保守点検	(1) 温度計の監視 (2) 絶縁油の特性 チェック (3) 油漏れ点検	(1) 温度計の監視 (2) 掃除機, ウエ スによる清掃 (3) 外観目視点検	(1) 温度計の監視 (2) SF ₆ ガスの性 状チェック (3) ガス漏れ点検 (4) 補機の点検
8. 床 面 積	100%	30~50%	90~110%
9. 重 量	100%	75%	90~110%

注：◎印は優，○印は良，△印は可を示す。

移行している。表1は各種変圧器の特徴を簡単に比較したもので、以下これら変圧器の新技术の動向と特長、及びそれを生かした適用法について述べる。

2 油入変圧器

2.1 中・大容量器

油入変圧器は豊富な実績と汎用性をもっているが、それだけに新機能の追加，経済性・信頼性・保守性の向上，短納期への即応などがより強く求められるようになった。これに対し日立製作所では，生産合理化の源流となる設計の標準化，工程の短縮を強力に推進してきた。部品の寸法は規則性のある標準数^{※1)}によって系列化し¹⁾，集約加工を図るとともに，標準外の仕様に対しても互換性のある方式とした。一方，ハードウェアについては信頼性の向上と据付工程短縮のため，全装可搬適用範囲の拡大を図ってきた。

2.1.1 需要家のニーズに沿った構造・特性の改善

(1) 鉄心構造

変圧器の発生損失のうち，固定損である無負荷損を低減することは負荷率の大きさにかかわらず省エネルギー効果が期待できる。日立製作所では無負荷損の低減を図るため良質の方向性けい素鋼板を使用し，小容量変圧器にも丸形ヨーク・45度ラップ額縁接合方式を採用している。また，鉄心はボルトによる締付を行わないバインド締付方式とし，ボルト締付用の孔によって生ずる磁束の乱れをなくすことにより材料

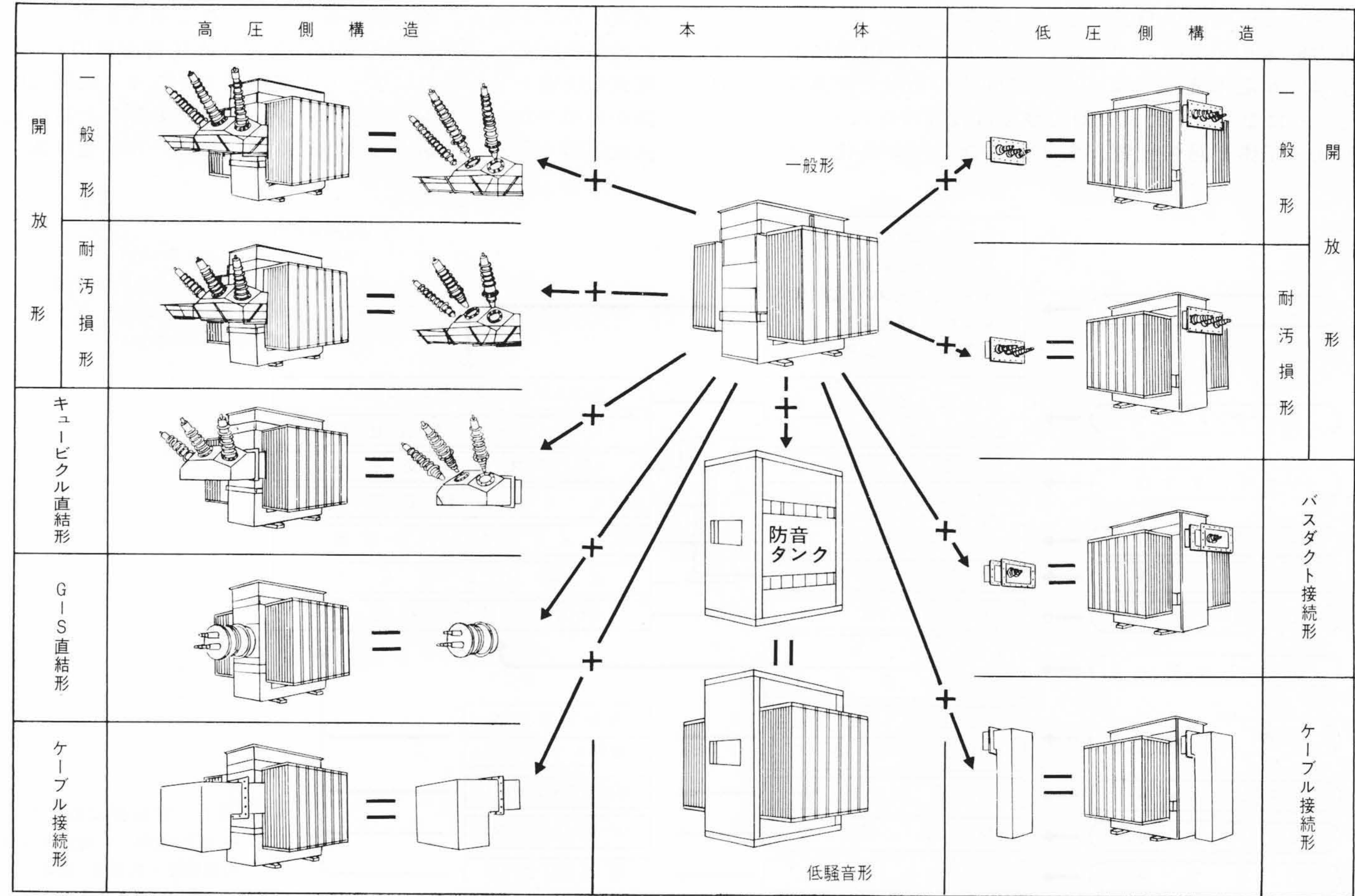


図2 部品ユニットの組合せ例 部品ユニットを自由に組み合わせるワイドセレクション方式である。

※1) JIS Z8601「標準数」を参照。

の特性を有効に発揮できる構造としている。更に、鉄心寸法及び重量低減のため占積率を向上させ、鉄心の小形・軽量化を図っている。

(2) 巻線構造

巻線構造は電圧・電流の大きさによって円板巻線、円筒巻線、ヘリカル巻線を組み合わせている。巻線構造上重要な巻線端部絶縁は、過去の豊富な実績及び電子計算機による電界解析によって標準構造を決定し、高圧巻線は衝撃電圧に対する電位分布の良好なインタリーブ巻線とした。一方、実物大モデル実験による巻線内油流分布と冷却特性の詳細解析の結果をもとに、巻線の冷却構造を改善した。

(3) 外部構造

油入変圧器の油劣化防止方式は、窒素密封形として信頼性を向上させ、保守・点検を容易にした。

タンク構造は内圧・外圧に対する強度、耐震強度及び輸送強度の面から見直し、軽量の構造とした。

ブッシングの接続方法は、受変電設備の安全性、耐塩害性などのニーズに沿い、充電部を密閉したGIS(Gas Insulated Switchgear)直結形、ケーブル接続形及びバスダクト接続形が増加している。日立製作所ではこれらのいずれにも対応できるように、各ユニットを標準化し、それらを設置条件・用途に応じて最適となるように組み合わせて設計・製作する編集設計(枠#方式)の手法を確立している。図2に部品ユニットの組合せ例を示す。

放熱器は放熱効果の良い多ひだ広幅形を採用し、放熱器本数の低減によって変圧器全体の小形・軽量化を図った。図3にこれを適用した66kV、50Hz、4.5MVA変圧器の外観を示す。

2.1.2 全装可搬適用範囲の拡大

変圧器は工場で組み立てた姿のまま輸送できること(全装可搬)が据付工程短縮及び信頼性向上のために理想的であるが、鉄道・道路の輸送限界により大容量器では分解輸送とされる。これに対しては前記の構造改善によって66kV、60Hz、15MVA負荷時タップ切換変圧器の全装可搬が可能となった。

2.2 小容量器(2MVA以下)

2MVA以下の需要家配電用としては、図4(a)に示す日立独

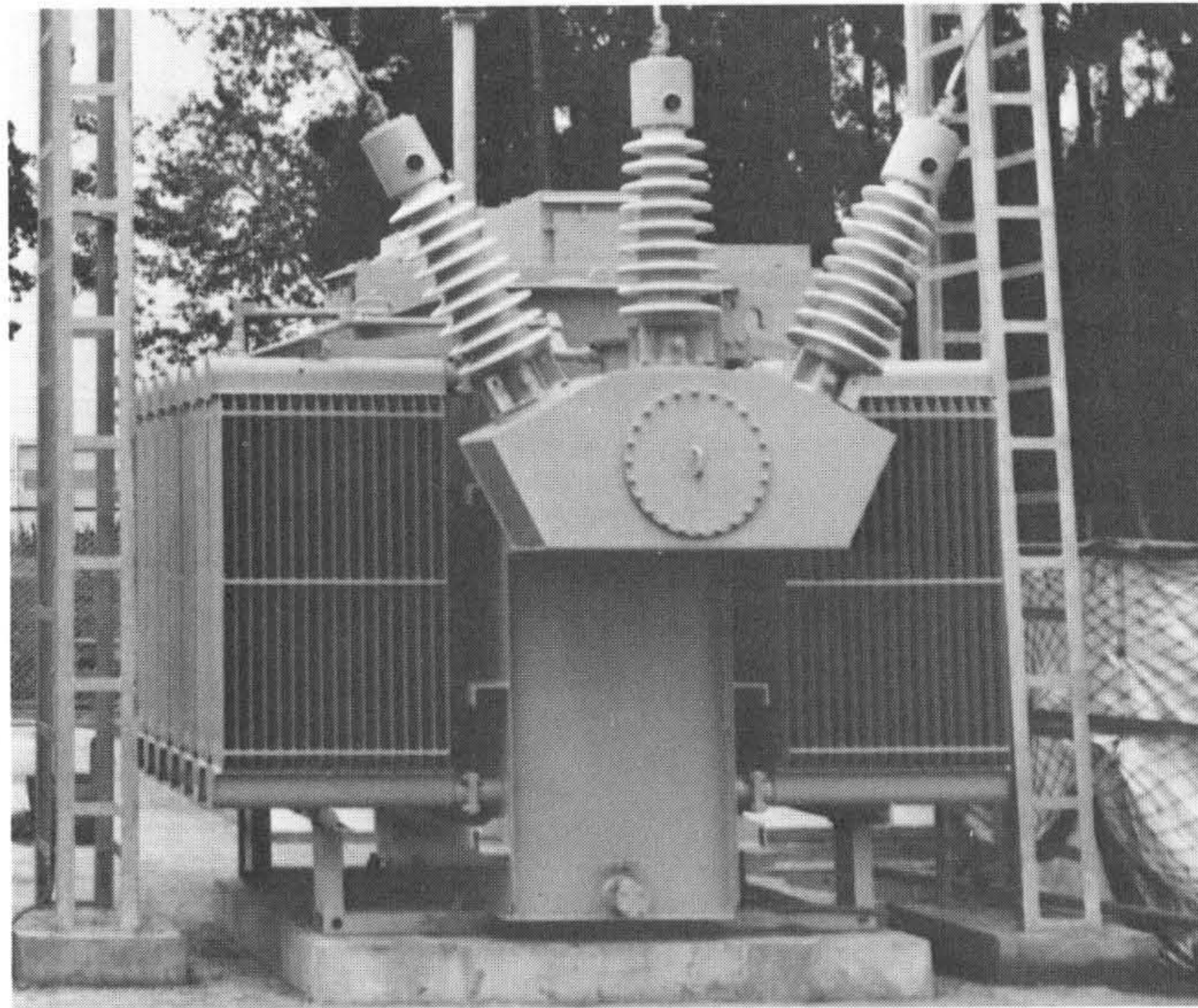


図3 66kV、50Hz、4.5MVA変圧器 窒素ガス封入完全密封形油入変圧器(自冷式)の外観を示す。

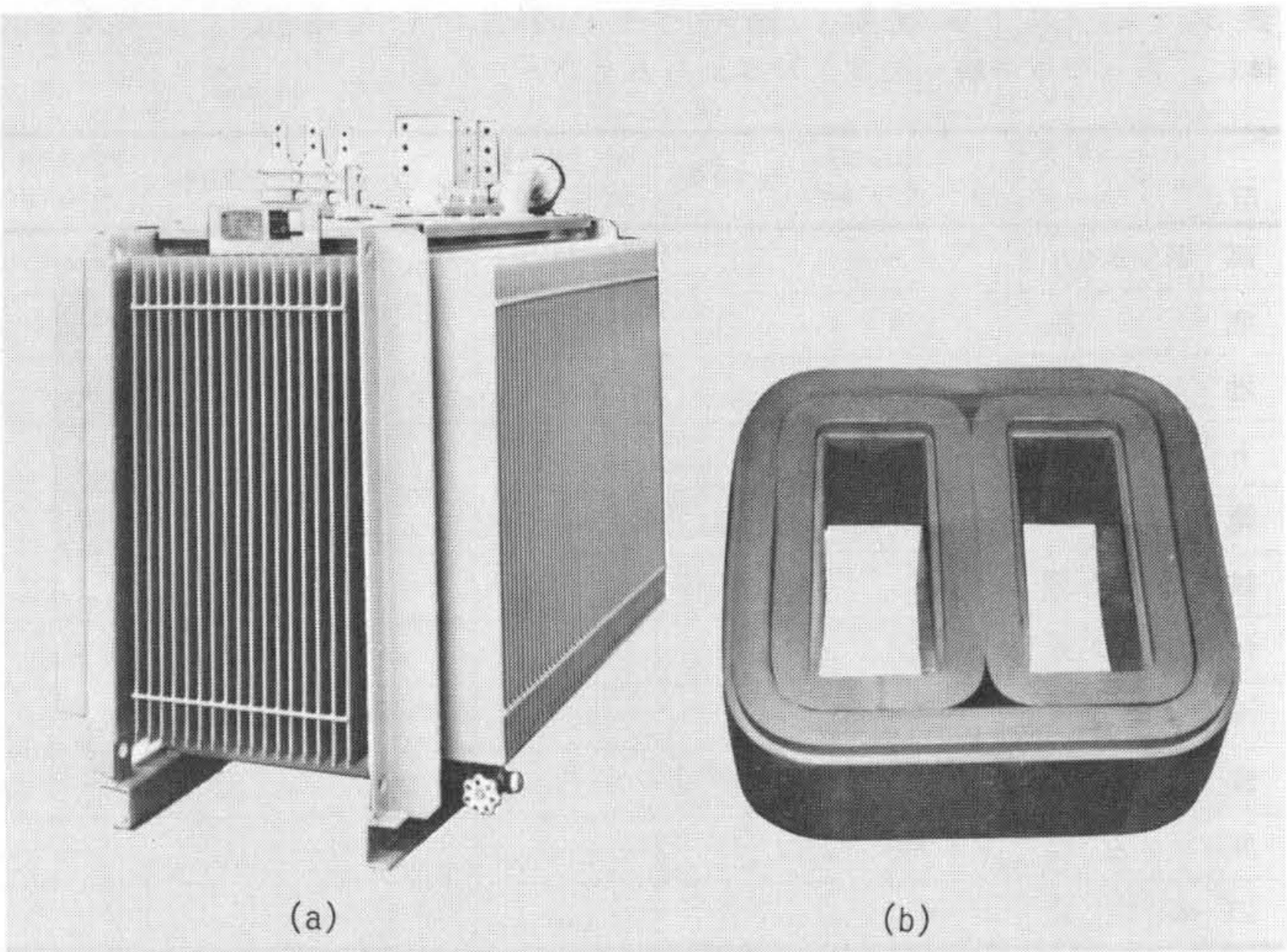


図4 (a)波形タンク構造変圧器及び(b)三相巻鉄心 波形タンク構造の採用によって、冷却効率向上と小形化が図れた。

自の波形タンク構造を採用した油入変圧器を量産している。これらの変圧器は次のような特長をもっている。

- (1) 良質な方向性けい素鋼板の採用と巻鉄心〔図4(b)〕あるいは額縁鉄心構造による、無負荷損の大幅な低減(低損失形)。
- (2) 冷却効率の高い波形タンク構造による、小形・軽量化(据付スペースの縮減)。
- (3) 波形タンク構造による、無圧密封化(絶縁油の劣化を抑制したメンテナンスフリー形)。
- (4) 省溶接構造と全外周溶接による、さびの発生防止と耐候性の向上。

3 モールド変圧器

モールド変圧器は、油を使用せず巻線の周囲が難燃性、自己消炎性のレジンで完全に覆われているため、防災性に優れている。したがって、表2にその一例を示すように消火設備の軽減を図ることができる。また、従来のH種乾式変圧器よりも耐湿性、耐塵埃性に優れ、構造が簡潔・堅ろうなため機械的強度も大きく、保守・点検が容易である。更に、油入変圧器に比べて低損失であることから省エネルギー効果も大き

表2 受変電設備に設ける消火設備の例 東京都での200m²未満の有人変電設備の場合を示す。

変電設備	全出力(kW)	変圧器の区分	固定消火設備	大消火器	小消火器
7,000V超過(特別高圧)	すべて	油入	○	—	○
		乾式	—	○	○
7,000V以下(高圧・低圧)	1,000以上	油入	○	—	○
		乾式	—	○	○
	500以上1,000未満	油入	—	○	○
		乾式	—	—	○
	500未満	油入	—	—	○
		乾式	—	—	○

注：全出力(kW)は、変電設備の変圧器定格容量(kVA)の和に下記の係数を乗じて算定する。

定格容量の数値の合計(kVA)	500未満	500以上1,000未満	1,000以上
係数	0.80	0.75	0.70

表3 モールド変圧器の特長とそれを生かした用途 防災用を主体に、あらゆる分野への導入が進められている。

用途	特長 (オイルレス) 難燃性	低損失	耐湿性 耐塵埃性	小形・軽量	低騒音	短時間 過負荷
高層ビル	○	○	○	○	○	—
病院	○	○	—	○	○	—
地下街	○	○	○	○	○	—
トンネル内	○	○	○	○	—	—
電鉄用	○	○	○	○	○	○
鉄鋼	○	○	○	—	—	○
化学プラント	○	○	○	—	—	—
浄水場	○	○	○	—	—	—
食品工場	○	○	○	—	○	—
展示会場	○	○	—	—	○	—
工事現場	○	○	○	○	—	—

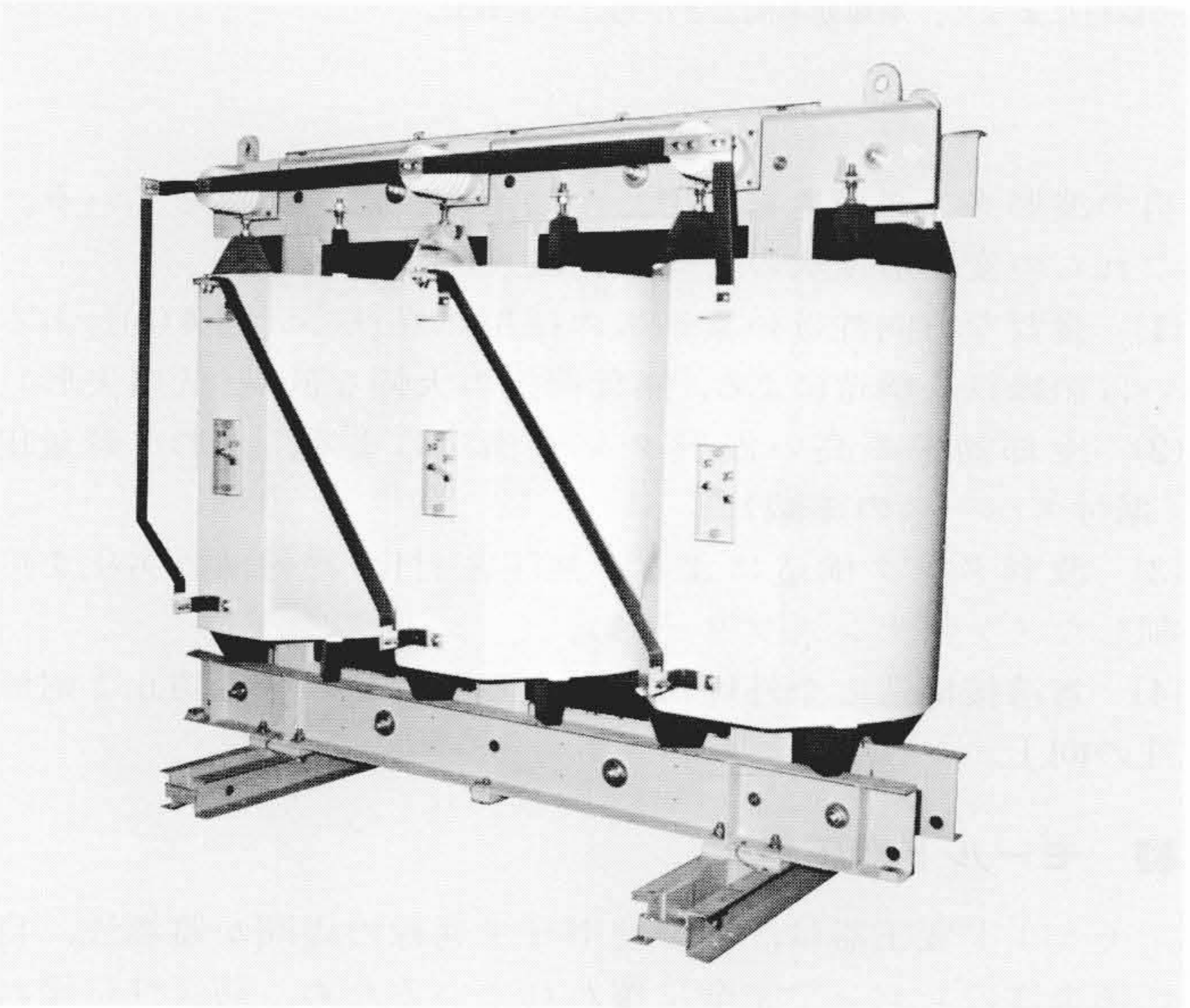
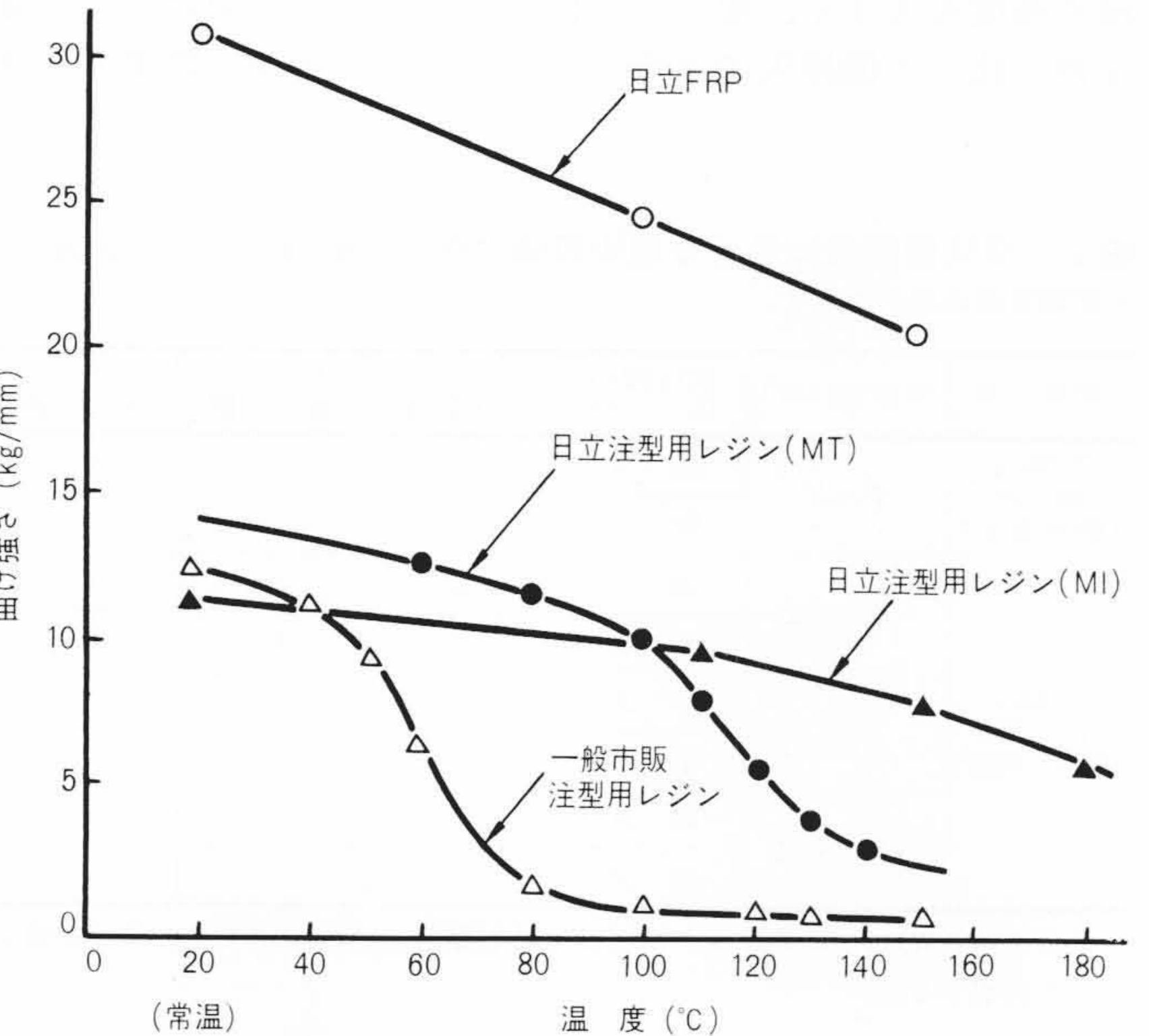


図5 22/6.6kV、2.5MVA三相自冷式H種モールド変圧器 巻線はMIレジンで注型し、相間接続線は絶縁被覆した結線導体としている。



注：略語説明 FRP(ガラス繊維強化プラスチック)
図6 レジンの曲げ強さ—温度特性 絶縁種別とモールド方式の組み合わせに対し、最適なレジンを使用している。

く、最近では33kV以下の防災形変圧器の主流となっている。表3はモールド変圧器の一般的な特長と、それを生かした用途を示す。日立製作所は容量に応じて最適な構造と製作方法を採用することによって、信頼性の高い各種モールド変圧器を生産している。

3.1 大容量モールド変圧器

1.5MVAを超える大容量器は、絶縁種別をH種として特に小形・軽量化を図っている。図5にH種モールド変圧器の外観を示す。

巻線構造は、注型方式と含浸方式を電圧と用途に応じて使い分けている。(1)注型方式は、巻線に金型をセットしレジン真空注入後、加熱硬化させる方式で、巻線全体が比較的厚いレジン層で覆われているため、高電圧用として汚損、吸湿などの条件が厳しい用途に適している。大容量のH種モールドコイルを注型方式で製作するには、高耐熱性レジンの開発と高度な注型技術を必要とするが、日立製作所では図6に示すMIレジンにより製品化に成功した²⁾。(2)含浸方式は、ガラステープにあらかじめレジンを含浸させた絶縁材料(プリプレグ)をコイルの内外周に巻付け後、加熱硬化させる方式である。この方式は巻線表面に図6に示すような熱応力に対する機械的強度の大きいFRP(ガラス繊維強化プラスチック)の層が形成されるため、巻線周囲のレジン層を薄くすることができる。これによりレジン層での温度こう配が小さくなるため過負荷耐量が向上し、小形にもなる。また金型の一部が省略されるため設計の自由度が大きく、大容量変圧器、整流器

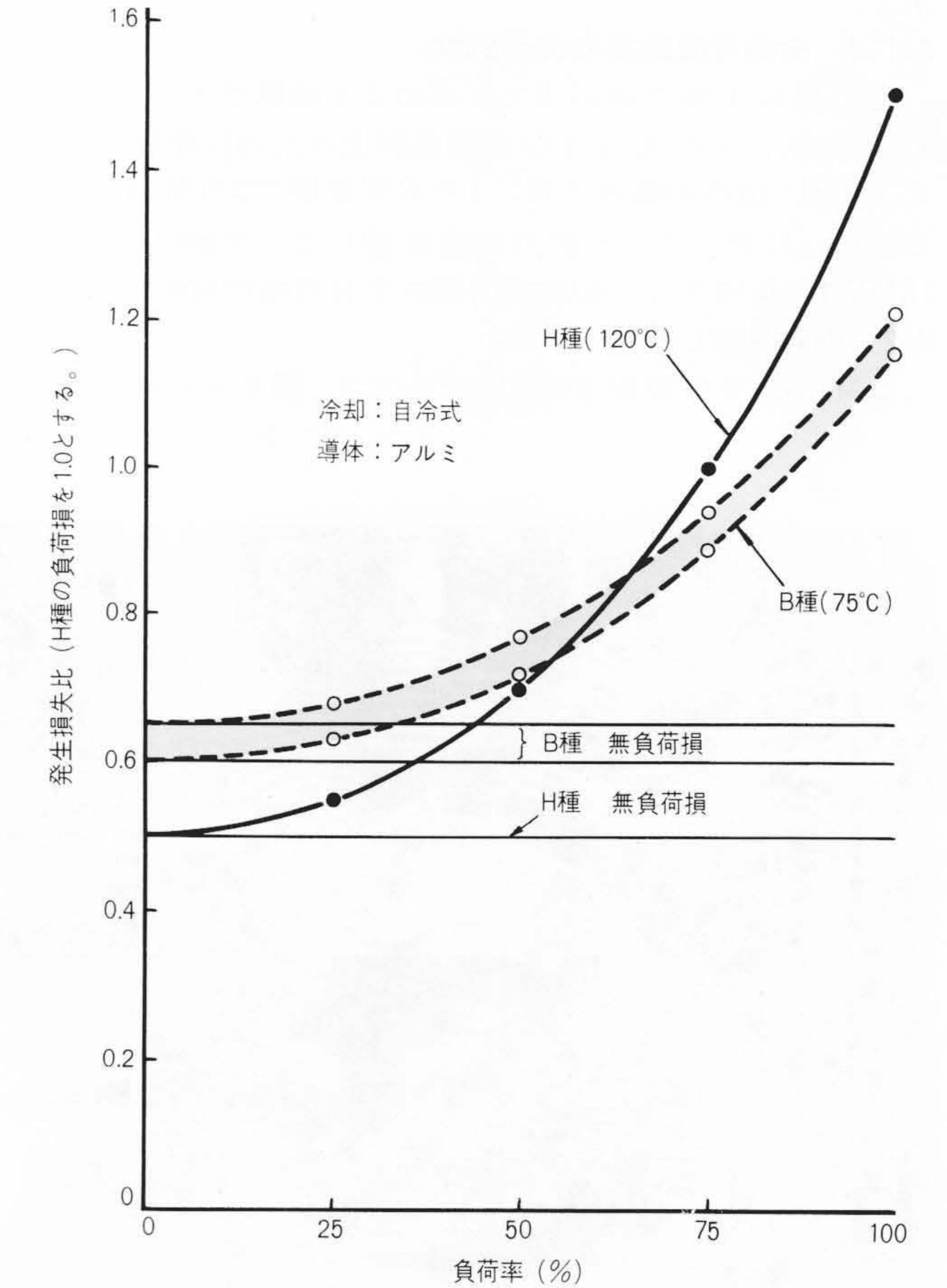


図7 負荷率と発生損失の関係(自社試算例) 温度上昇限度が高いほど負荷損は大きい、小形化によって無負荷損が減少し、軽負荷時の全損失が減少する。

用変圧器、特殊結線の変圧器などに最適である。相間の結線導体は絶縁被覆リードとし、端子間を接続するだけで十分な気中絶縁距離が確保される構造としている。冷却方式は3MVA以上を風冷とするのを一応の標準としているが、コイルを軸方向に適切な大きさに分割する方式とすれば、10MVAまで自冷で製作可能であることを試作器により確認済みである。

巻線の温度上昇限度はB種75℃、F種95℃、H種120℃で、温度上昇限度が高くなるほど負荷損は大きくなるが、巻線及び鉄心が小形化されるため、無負荷損は減少する傾向となる。図7はその試算例で、軽負荷ではH種のほうが効率が高くなる傾向がある。熱応力については、導体とレジン線の膨脹係数の差、温度分布、巻線構造からくる応力集中などに起因してレジんに発生する繰返し応力が、疲労寿命を考慮した許容値以下であるように設計している。また、製品には過負荷通電ヒートサイクル試験、部分放電試験などを実施することによって信頼性を十分に確認している。

3.2 小・中容量モールド変圧器(1.5MVA以下)

小・中容量器には標準仕様品として量産に適したB種絶縁・注型方式及び特殊仕様への対応と、低損失・小形化を特長とした6kV級のF種絶縁・含浸方式がある。これらはシリーズ化によって、用途に応じた幅広い選択を可能としている。図8に6kV含浸方式モールド変圧器の外観を示す。

3.3 据 付

モールド変圧器は、安全上キュービクルに収納するか、安全柵内に設置する必要がある。なおコイルが堅ろうなため、狭い場所への分解搬入や現地組立による据付作業も容易である。

4 SF6ガス絶縁変圧器

日立製作所は、昭和56年に電圧147kV、容量20/3MVAのSF6ガス絶縁変圧器³⁾を完成するとともに、電圧154kV、容量30MVAまでの生産体制を確立した。

4.1 特 長

(1) SF6ガスは不燃性・非爆発性、無毒・無臭のため防災性に優れており、防火壁の省略や消火設備の軽減を図ることができる。

- (2) 高電圧・大容量の不燃性変圧器の製作が可能である。
- (3) 本体は密封構造で、ガス漏れの検出・保護や補機類の保守・点検も容易なため、運転・保守が簡単である。
- (4) 本体はタンクに定格圧力のSF6ガスを封入して輸送し、現地では現地で接続された部分にだけSF6ガスを封入する方法によって据付工程を短縮し、信頼性を向上させている。
- (5) GISとの直結によって受変電設備の不燃化と縮小化を実現し、運転・保守の共通化、簡素化を図ることができる。

4.2 構 造

図9にSF6ガス絶縁変圧器の構造例を示す。また表4に油入変圧器との主な相違点を比較して示す。

表4 SF6ガス絶縁変圧器と油入変圧器の構造相違点の比較
鉄心、巻線、性能など同一のものについては除外した。

項 目	ガス絶縁変圧器	油 入 変 圧 器
絶 縁 材 料	SF6ガス ポリエステルフィルム	鉱 油 クラフト紙
タ ン ク	鋼板製気密タンク	鋼板製油密タンク
シール構造	二重Oリング方式	コルクニトリルガスケット
無電圧タップ 切 換 器	スライド式	回転形又はスライド式
負荷時タップ 切 換 装 置	真空スイッチ式	抵 抗 式
ブッシン グ	エポキシコンデンサ形	油浸紙コンデンサ形
コンサベータ	不 付	付・不付
冷 却 方 式	自 冷 式 ガス強制循環自冷式 ガス強制循環風冷式	自 冷 式 送油自冷式 送油風冷式
保 護 装 置	ダイヤル温度計(警報接点付)、 連成計、温度補償付ガス密度 検出器、圧力スイッチ	ダイヤル温度計(警報接点付)、 油面計 放圧板、避圧弁 衝撃圧力継電器

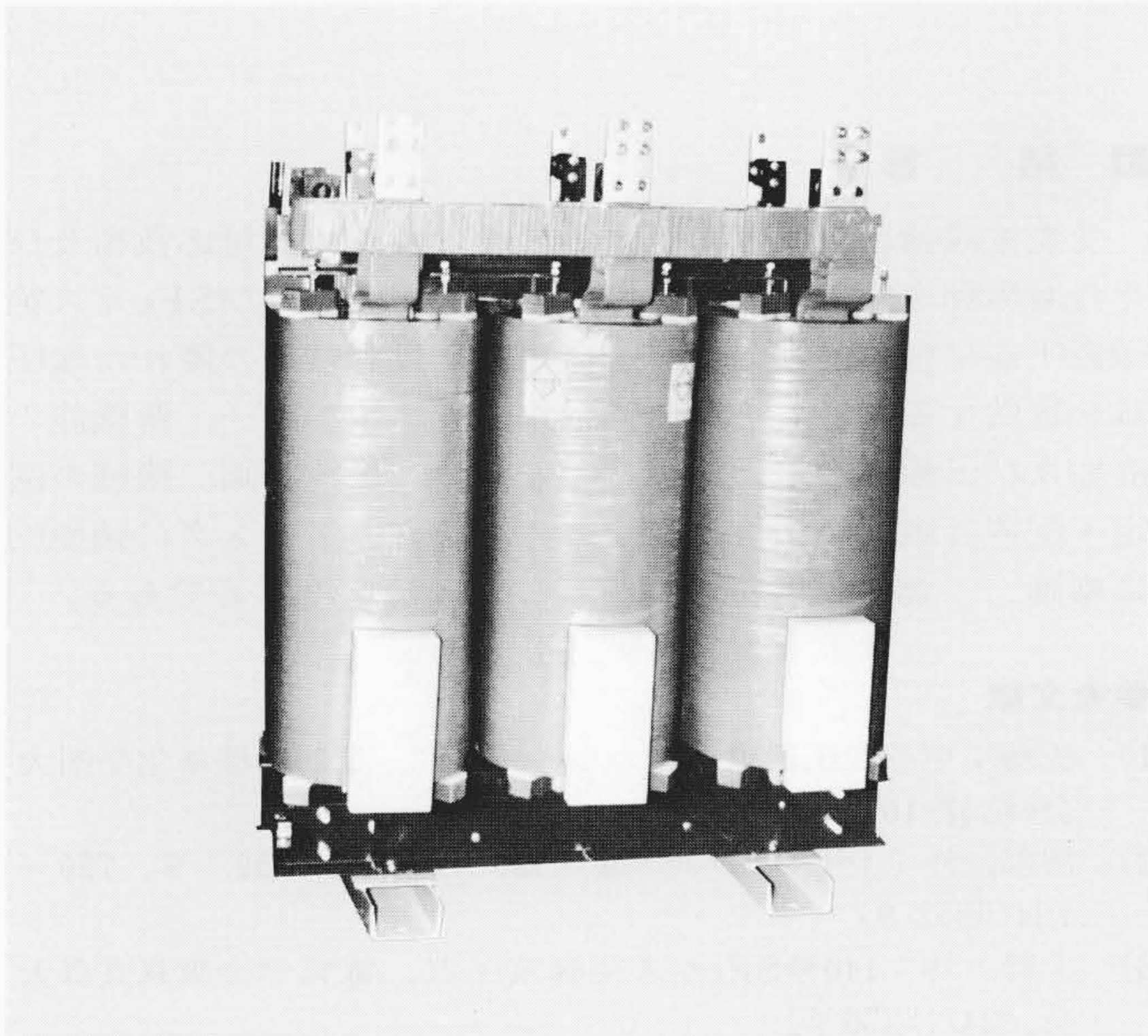


図8 F種絶縁・含浸方式モールド変圧器の外観 高・低圧とも日立FRP(ガラス繊維強化プラスチック)を使用し、低損失化・小形化されている。

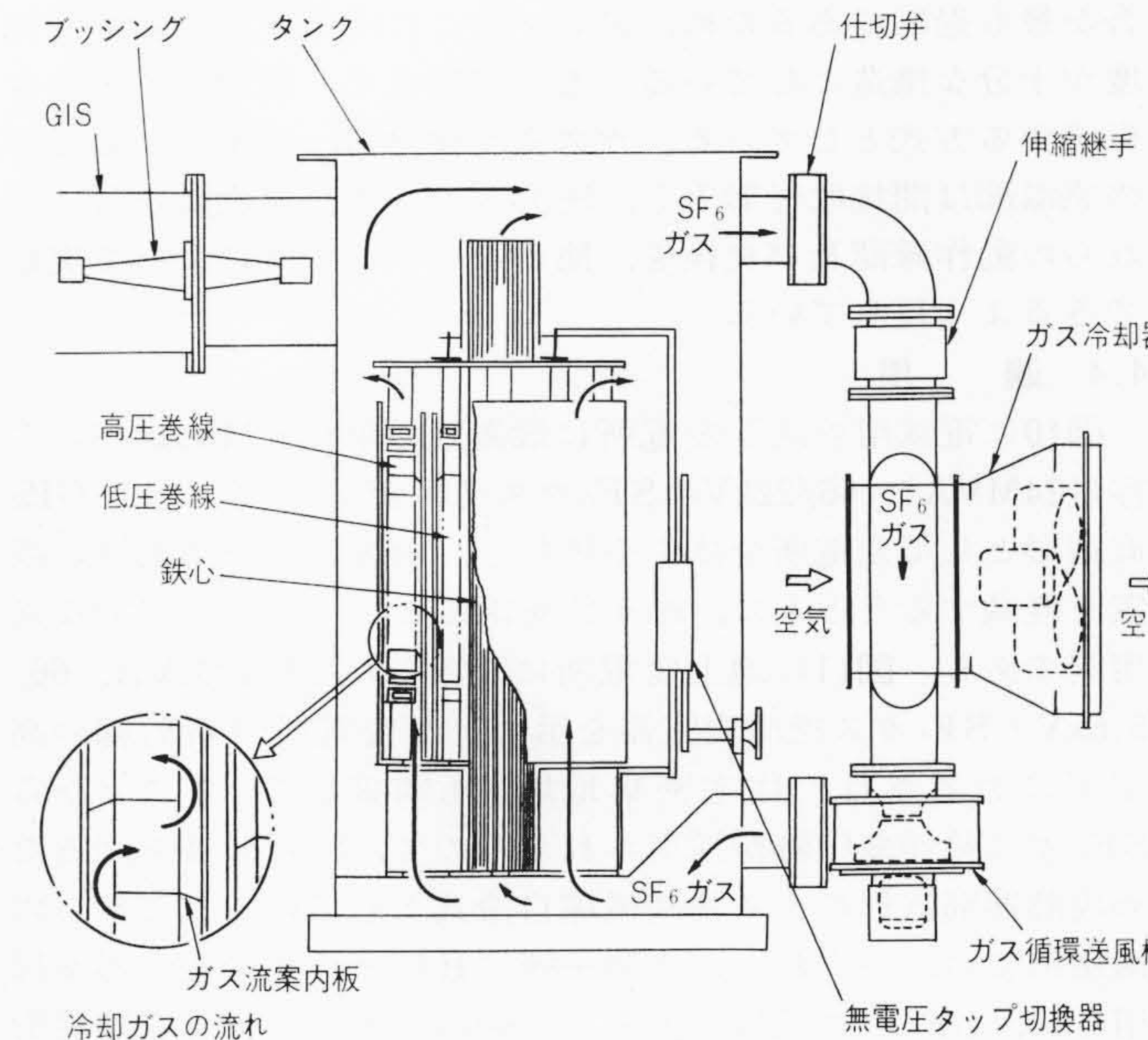


図9 SF6ガス絶縁変圧器の構造例 GIS直結形ガス強制循環風冷式の場合を示す。

(1) 本体の構造

導体の絶縁材料はSF₆ガス中での耐熱性・絶縁特性に優れたポリエステルフィルムを使用し、高圧巻線は衝撃電圧に対する電位分布が良好なインタリーブ巻線としている。各部の電界を平等化して絶縁寸法の縮小による小形・軽量化を図る一方、万一ガス圧力が大気圧まで低下しても、常規運転電圧に耐える設計として信頼性を高めている。

冷却方式はガス強制循環方式とし、ガスをタンク底部から送り込む構造として圧力損失を低減し、冷却器及びガス循環送風機を小形化している。また巻線内では、SF₆ガスをジグザグ状に通す構造として温度分布の均等化を図っている。

タンクは、溶接部の気密試験、製作後の水圧試験によって強度と気密性を確認し、フランジ接合部には二重Oリング方式のシール構造を採用するとともに、組立て後は蓄積法による気密試験を実施することによって、ガス漏れ防止に対して万全を期している。

(2) 付属品

ブッシングは電氣的及びガスシール性能に優れたエポキシコンデンサ形とし、無電圧タップ切換器は地上でハンドル操作で切換えを行なう小形のスライド方式を採用している。冷却器には耐食性、熱交換特性が良好で小形・軽量なアルミニウム製直交形ガス-空気熱交換器を採用し、また自冷式の放熱器には、熱放散特性の良好なパネル形を採用している。ガス循環送風機は潤滑油循環方式、冷却ファンは高耐熱グリースの採用によって軸受の損耗を少なくしている。本体と冷却系統は仕切弁によって完全にガス区画され、付属品の交換を容易にしている。

4.3 運転・保守及び保護

(1) 二重Oリング方式の構造とSF₆ガス封入時の水分管理及び水分吸着剤の装着によって、据付後のSF₆ガス中水分の管理を省力化している。(2) ガス循環送風機及び冷却ファンは、異常音や潤滑油の変色の有無を巡視点検することが主体で、潤滑油の交換も本体のSF₆ガスを抜くことなく実施できる構造としている。(3) ガス漏れによる圧力低下は、温度補償付ガス密度検出器によって警報・遮断の2段階で保護される。(4) 万一の内部事故時にも、アークによる圧力上昇はわずかである。GIS直結時に封入圧力の高いGIS側から変圧器側に漏れる場合が最も過酷であるため、タンクはこの圧力上昇に対する強度が十分な構造としている。万一に備えて、圧力スイッチで保護する方式としている。ガス密度検出器、ダイヤル温度計の感温部は間接取付形とし、圧力スイッチ、連成計を含めこれらの動作確認及び交換を、簡単なバルブ操作によって実施できるようにしている。

4.4 適用

図10に電鉄用の地下変電所に設置した単相8MVA(バンク容量24MVA)、66/22kVのSF₆ガス絶縁変圧器⁴⁾を示す。GIS直結形として変電所全体を不燃化し、消火設備や防火壁の設置を軽減するとともに、縮小化を図るという最も効果的な適用例である。図11に地上変電所に設置した三相10MVA、66/6.6kVのSF₆ガス絶縁変圧器を示す。本変電所は新幹線の高架下に設置され、住宅密集地域にも隣接していることからSF₆ガス絶縁変圧器が採用されたもので、騒音低減を図るため放熱器別置形のガス強制循環自冷式としている。これらの適用例では、いずれも二次側系統にH種モールド変圧器が採用され、SF₆ガス絶縁とモールド絶縁の組合せによる防災形の無人変電所を実現している。

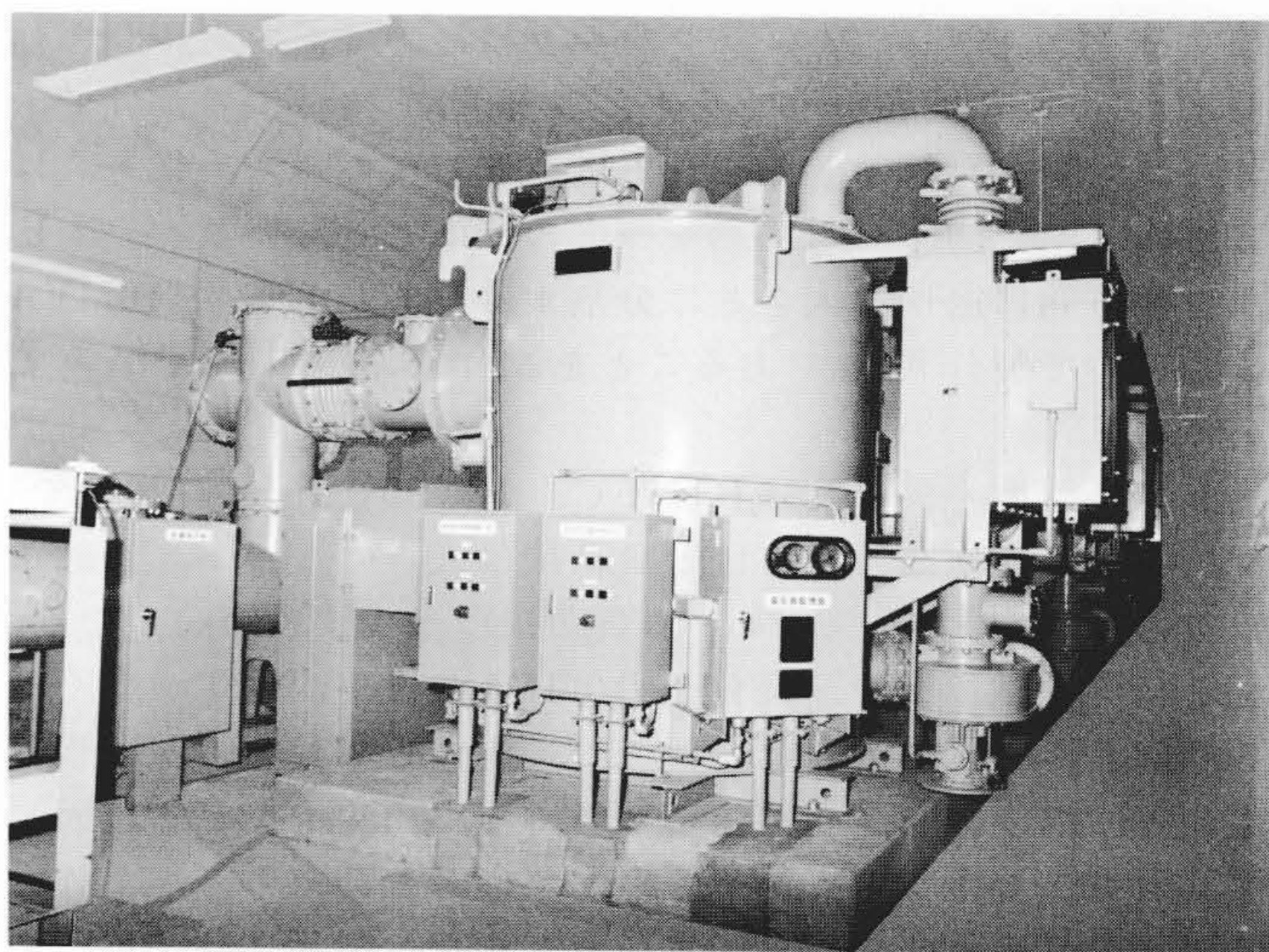


図10 単相8MVA(バンク24MVA)、66/22kV SF₆ガス絶縁変圧器
ガス強制循環風冷式3台をGIS直結とし、V結線の運転を可能とした。冷却系は二重化している。

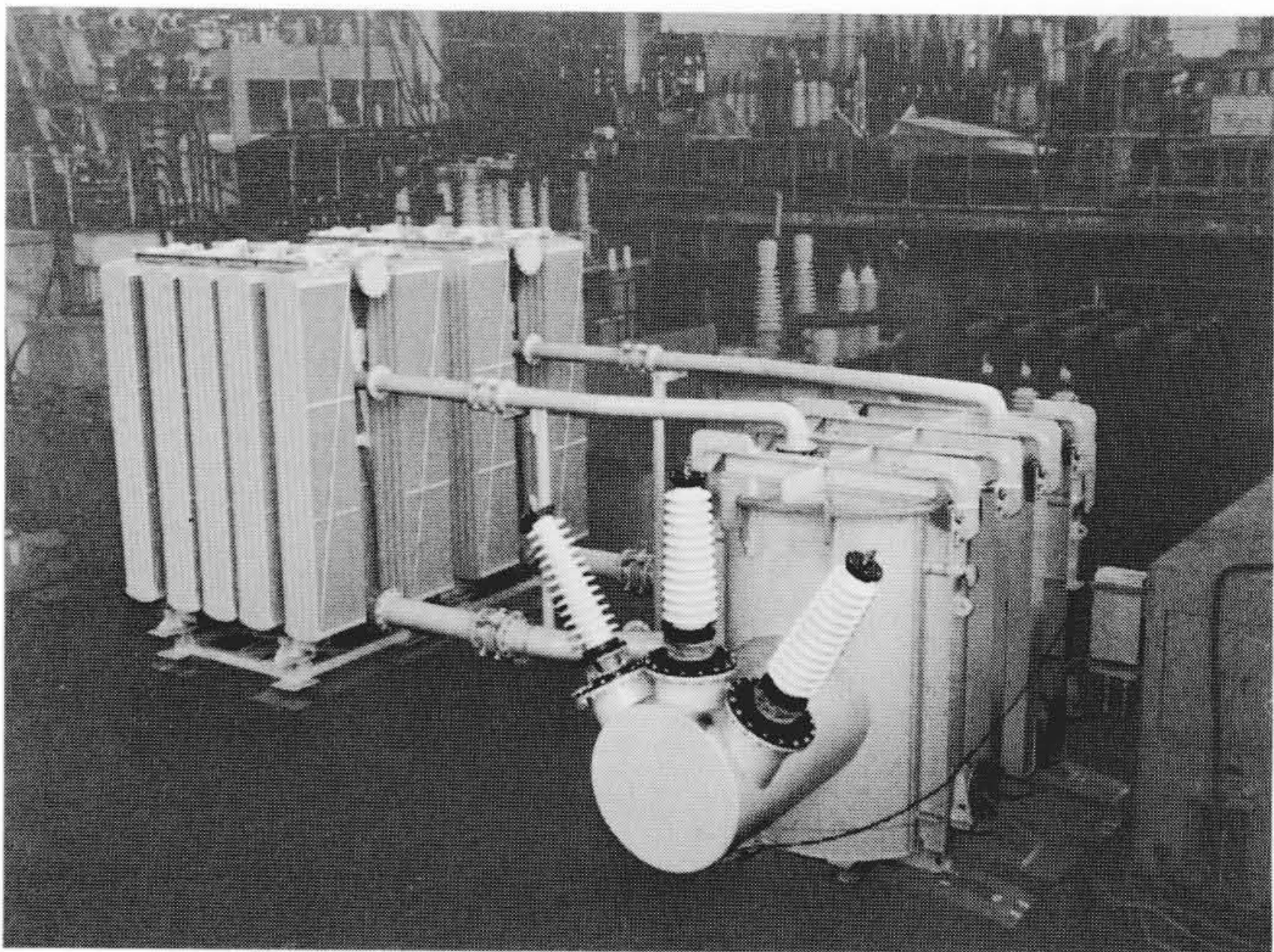


図11 三相10MVA、66/6.6kVのSF₆ガス絶縁変圧器 住宅密集地域のため、放熱器別置形のガス強制循環自冷式としている。

5 結 言

受変電設備用変圧器に対する最近のニーズと対応技術及びその適用例を、油入変圧器、モールド変圧器及びSF₆ガス絶縁変圧器について紹介した。今後更に投資効果の優れた変圧器を提供するため、小形・軽量化、省エネルギー、新機能の追加及び信頼性向上に努めるとともに、系統計画、機種の設定・配置計画、経済性比較などのエンジニアリングに積極的に参画し、需要家各位の期待にこたえてゆく考えである。

参考文献

- 1) 工藤：中形変圧器標準化の歩み10年間、第25回標準化全国大会(昭57-10)
- 2) 磯部、外：レジンモールド変圧器、日立評論、59、9、729～734(昭52-9)
- 3) 上野、外：140号SF₆ガス絶縁変圧器、電気学会東京支部大会、247(昭56年)
- 4) 上野、外：66kV、単相8MVA SF₆ガス絶縁変圧器、電気学会全国大会(昭58年)