

# 変圧器の環境適合技術

## Transformer Technology that Accords with Circumstances

近年、電力用変圧器を取り巻く環境は社会情勢に対応し変化しており、低騒音化、据付けスペース、工期の縮減、輸送質量の低減、防災性、環境調和性の向上などが要望されている。日立製作所では、従来コンパクトで据付け工期の短い低騒音変圧器を開発してきたが、今回、154 kV、100 MVA、55 dB仕様の変圧器を防音タンクなしで製作し納入した。また、輸送の利便の得られない発電所向け変圧器の分解輸送についても、220 kV、250 MVA変圧器を製作、納入するとともに、500 kV変圧器についても分解輸送する技術を開発した。また、不燃性媒体であるパーフルオロカーボンとSF<sub>6</sub>ガスによる複合絶縁方式の275 kV、250 MVA複合絶縁変圧器を製作、納入した。この方式の変圧器は、従来の油入変圧器よりもコンパクトにできるという大きな特長がある。

和田守兄\* *Moriyoshi Wada*

森悦紀\* *Etsunori Mori*

川嶋啓三郎\* *Keizaburō Kawashima*

### 1 緒言

従来、日立製作所ではUHVプロトタイプ試作器をはじめとした種々の試作開発を行い、それらの成果を広く製品に反映させることにより、変圧器の小形化、高効率化、信頼性の向上を達成してきた。しかし、近年の電力用変圧器を取り巻く環境は変化してきており、従来の課題とは異なる要請がでてきている。

一つは低騒音変圧器の据付けスペース、工期の縮減である。変圧器の騒音仕様は年々低下してきているが、用地難から据付けスペースを縮小する一方、厳しい電力需給にこたえて据付け工期を最短にしなければならない。

もう一つは分解輸送技術の確立である。貨物取扱駅の減少、道路通行制限の強化、容量増大に伴う輸送質量の増加などにより、変圧器輸送を取り巻く環境は変化してきているが、立地条件によっては変圧器を分解して輸送するほうが経済的なケースも出てきている。

さらに都市部の変電所に対しては、機器のコンパクト化による変電所全体の縮小化とともに、不燃化による防災性や環境調和性が要求されている。

以下、これら時代の新しい要請にこたえるため開発した日立大容量変圧器の新技术について述べる。

### 2 低騒音変圧器

昭和43年に騒音規制法が施行されて以来、各都道府県では騒音規制値を定めており、変電所用の変圧器、リアクトルは

ほとんど低騒音仕様となっている。反面、切迫した用地事情や系統運用上の制約から、据付け面積の縮小と据付け工期の短縮の要望が高まっている。

日立製作所では、これらの要望に対応するため従来にもましてコンパクトな変圧器を目指した技術開発を行い、300 MVA級変圧器では防音タンクなし構造で65 dBを、鉄板防音タンク付きでは45 dBの低騒音化を達成した。また、100 MVA級変圧器については、防音タンクなし構造で55 dB変圧器も製作、納入した。

#### 2.1 変圧器低騒音化の歴史

防音タンクなし変圧器の騒音低減の歴史を図1に示す。高効率遮音板の開発により、昭和58年にそれまで鉄板防音タンクを必要としていた275 kV、300 MVA級70 dB仕様変圧器を防音タンクなしで製作<sup>2)</sup>したのに続き、平成元年には275 kV、300 MVA変圧器を62 dBで、さらに平成2年には100 MVA級変圧器を52 dBでいずれも防音タンクなしの構造で製作、納入した。

また昭和63年には、従来コンクリート防音建屋でなければ不可能であった50 dB以下仕様の154 kV、200 MVA変圧器についても、高効率遮音板と鉄板防音タンクの組み合わせによって達成している<sup>3)</sup>。これにより、据付けスペースと据付け工期の大幅な低減を達成している。154 kV、100 MVA変圧器の外形を図2に示す。

\* 日立製作所 国分工場

## 2.2 騒音低減技術

変圧器騒音の低減は、

- (1) 鉄心内の磁束分布，固有振動数，磁気ひずみ振動などの解析技術をもとにした最適諸元の決定
- (2) 接合方式の改良と継鉄部の断面形状変更による鉄心内の磁束流れの改善
- (3) 複合NC(数値制御)シヤーラインの導入による鉄板切断精度の向上と切断加工中の特性劣化の低減
- (4) 鉄心組立作業中のソフトタッチの徹底による特性劣化の低減

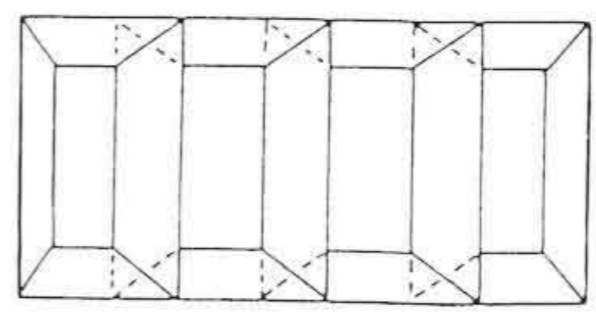
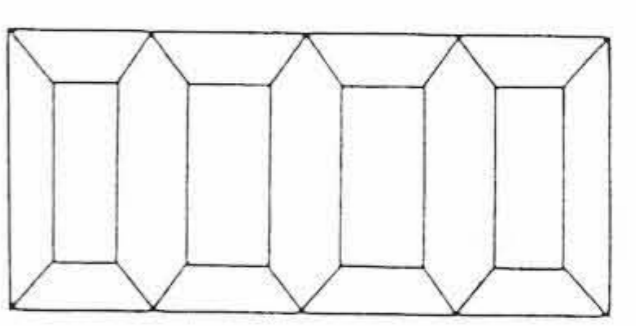

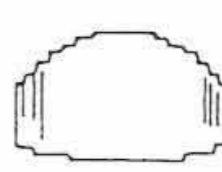
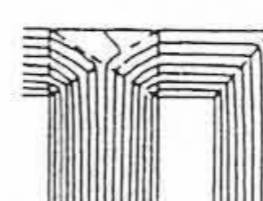
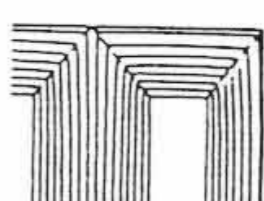
- (5) タンクの剛性コントロールと高効率遮音板の適正な組み合わせによるタンクからの放射音量の低減
- (6) 防音タンクの合理的な諸元選定による防音効果の増加などにより達成されている。

改善後の鉄心構造と従来構造の比較を表1に示す。前記の改良の組み合わせにより、275 kV、300 MVA変圧器については、各指定騒音仕様に対し、図3に示す構造で対応可能な技術を確立している。

## 2.3 分路リアクトルの騒音低減

従来、大容量器に採用していた空心形に代え、巻線内側に

表1 鉄心構造の改善 複合NCシヤーラインの導入により、接合方式を変更して磁束の流れを滑らかにするとともに、継鉄部の断面形状を改善し磁束の渡りを低減した。

項目	従来構造	改善後の構造
接合方式		
継鉄部の断面形状		
接合部の磁束の流れ		
切断方法	広幅シヤーライン	複合NCシヤーライン

注：略語説明 NC(数値制御)

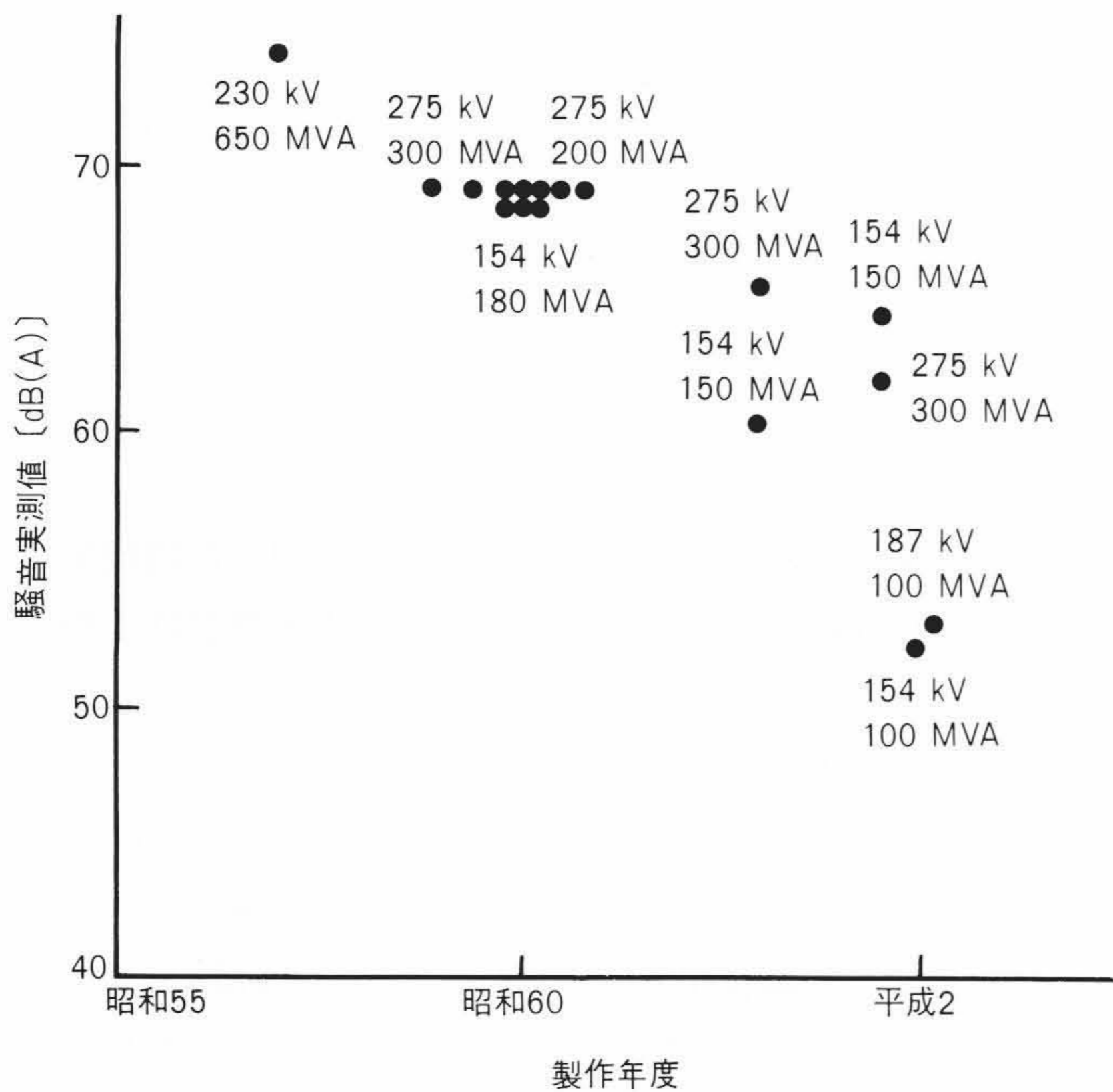
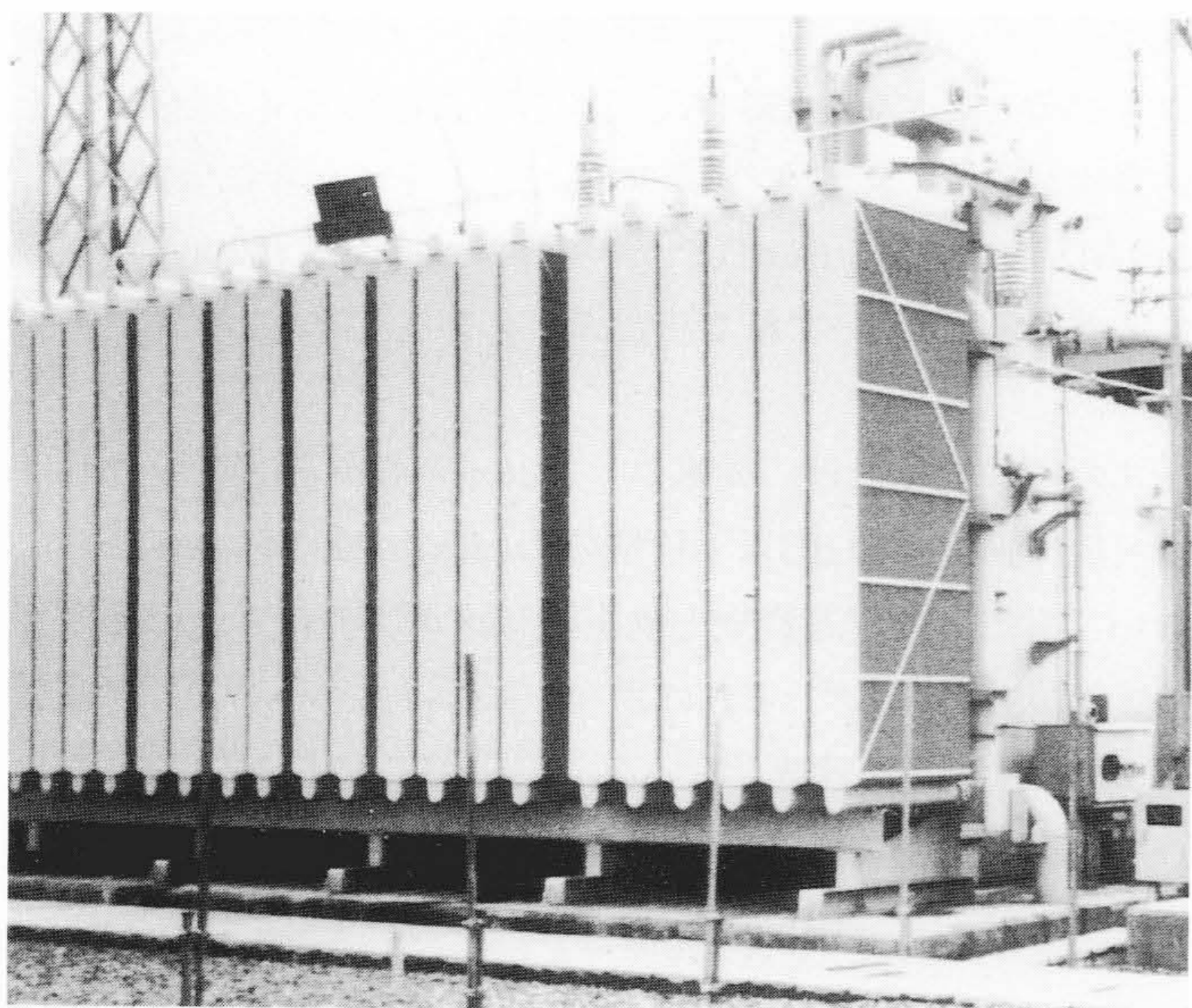
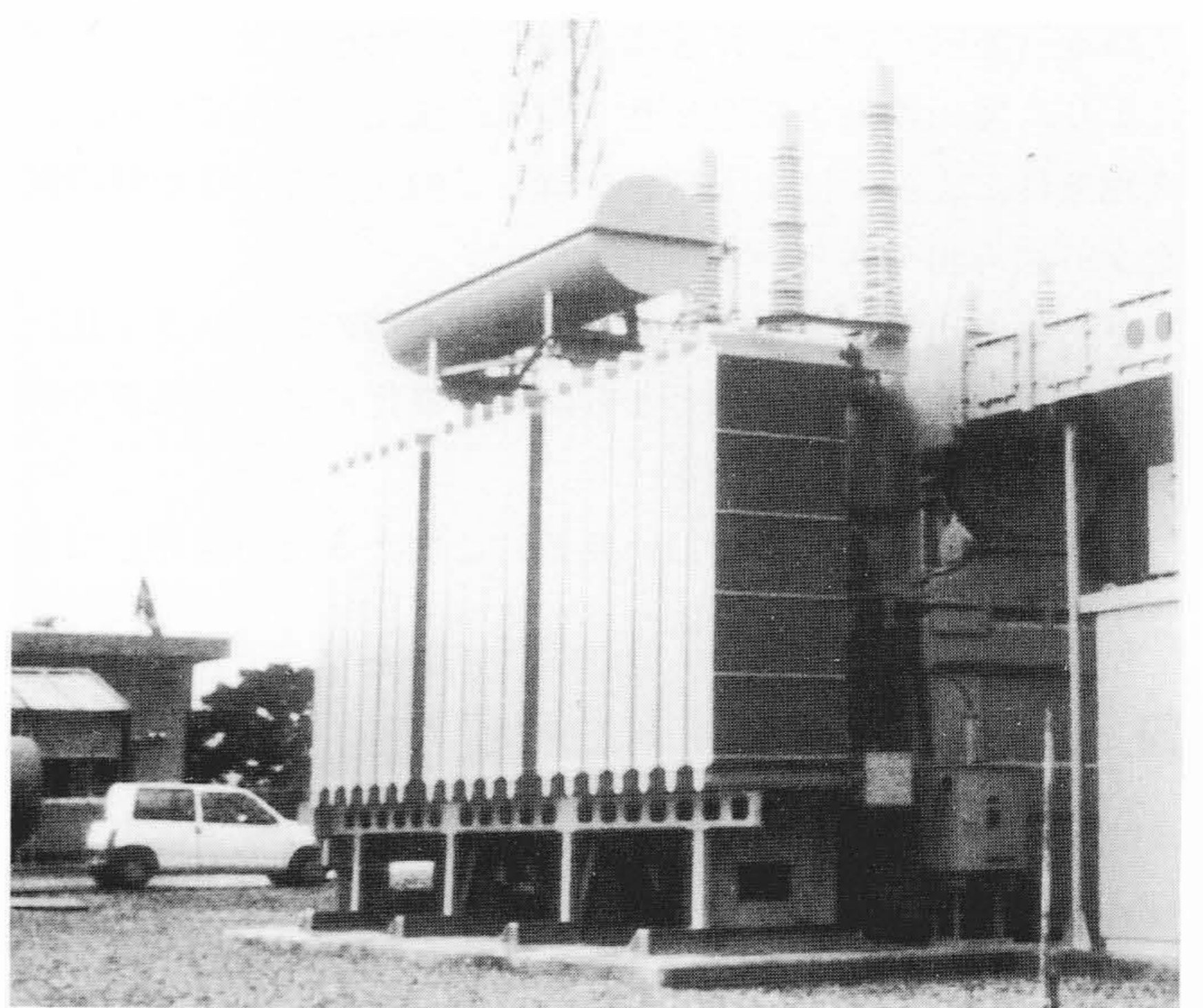


図1 防音タンクなしでの騒音低減の歴史 総合的な騒音対策により、100 MVA級では防音タンクなしで55 dB以下で製作している。



(a) 1号器



(b) 2号器

図2 55 dB, 100 MVA変圧器 既設器は鉄板防音タンク付きであったが、新設器は防音タンク不付きで55 dBの仕様を達成している。

騒音仕様dB		45	50	55	60	65	70	75	80	85
防 音 構 造	昭和59年 以前		コンクリート防音壁		B形鉄板防音壁 高効率冷却器		A形鉄板防音壁			
	昭和59年～ 昭和62年	コンクリート防音壁	高効率遮音板+B形鉄板防音壁 高効率冷却器		B形鉄板防音壁 高効率冷却器		高効率遮音板 高効率冷却器			
	昭和63年 以降		高効率遮音板+B形鉄板防音壁 (吸音材付き) 高効率冷却器	高効率遮音板+B形鉄板防音壁 (吸音材不付き) 高効率冷却器		高効率遮音板 高効率冷却器				

図3 騒音仕様による変圧器防音構造例(275 kV, 300 MVA) 高効率遮音板と鉄板防音壁の組み合わせにより、50 dB以下も可能となっている。

ギャップ付き鉄心を設けた鉄心形とすることによって5～10 dBの騒音低減が可能となった。

鉄心にはけい素鋼板を放射状に積層したラジアルコアを採用し、ギャップ材には高圧縮強度、高圧縮弾性率で寸法精度が高く、経年収縮のない高品質セラミックを用いて全体を強固に締め付けることにより、低騒音化が実現した。

さらに、ギャップ材とラジアルコアをエポキシ樹脂によって一体にモールドすることにより、いっそうの高信頼性を確保している。

ラジアルコア採用鉄心構造(センタコア)を図4に、鉄心形分路リアクトルの製作・納入経緯を図5に示す。

### 3 分解輸送変圧器(HISAT適用)

大容量変圧器は、設置場所への輸送制限質量によって構造が決定される。大容量変圧器の組立輸送技術がなかった昭和30年代は、分解輸送が常識であり、日立製作所では約40台の分解輸送変圧器を納入している。しかし、その後次のような理由で分解輸送変圧器が採用されなくなった。

- (1) 分解、再組立に伴う信頼性低下と組立期間の増大
  - (2) 輸送手段の進歩(シュナーベル形の貨車、トレーラ)
  - (3) 分割形変圧器(单相組み合わせ)などの軽量化技術の進歩
- しかし、最近になり下記の理由によって分解輸送変圧器が

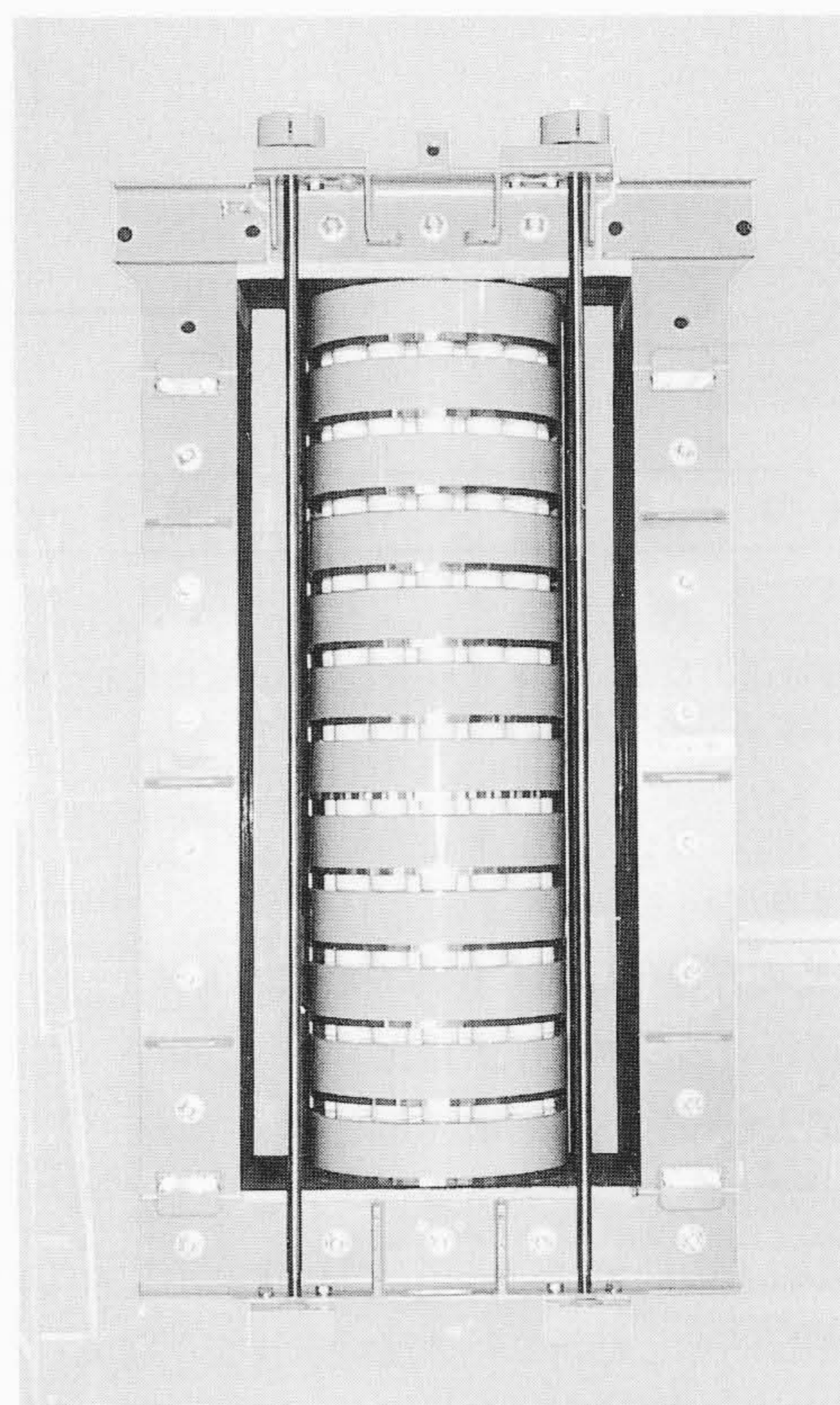


図4 鉄心構造(センタコアタイプ) 主脚はラジアルコアとギャップ材(セラミックスペーサ)とを交互に積み重ね、上下締め付けロッドによって強固に締め付けている。

年度	昭和54	59	60	61	62	63	平成1	2	3	4	5	6
構鉄造心	空心構造		ラジアルコア採用，大容量鉄心形構造の開発，実用化									
実器納入例	▼ トルコ：TEK 420 kV, 97.7MVA×5 ▼ イラク：SOE 400 kV, 50MVA		▼ チリ：ENDESA 242 kV, 24MVA×2			▼ クウェート：MEW 275 kV, 250MVA×2 ▼ 東京電力株式会社新富士発電所SVC 20 kV, 100MVA ▼ パキスタン：550/√3 kV, 111.3/3MVA×6 ▼ サウジアラビア：33 kV, 50MVA×2 ▼ インド：420 kV, 63MVA×5						

注：▽ (空心形構造)，▼ (鉄心形構造)

図5 分路リアクトル製作・納入経緯 昭和60年ごろからラジアルコア採用鉄心形リアクトルを開発し，昭和61年にチリENDESA納め242 kV, 24 MVA×2台を納入し実用化した。

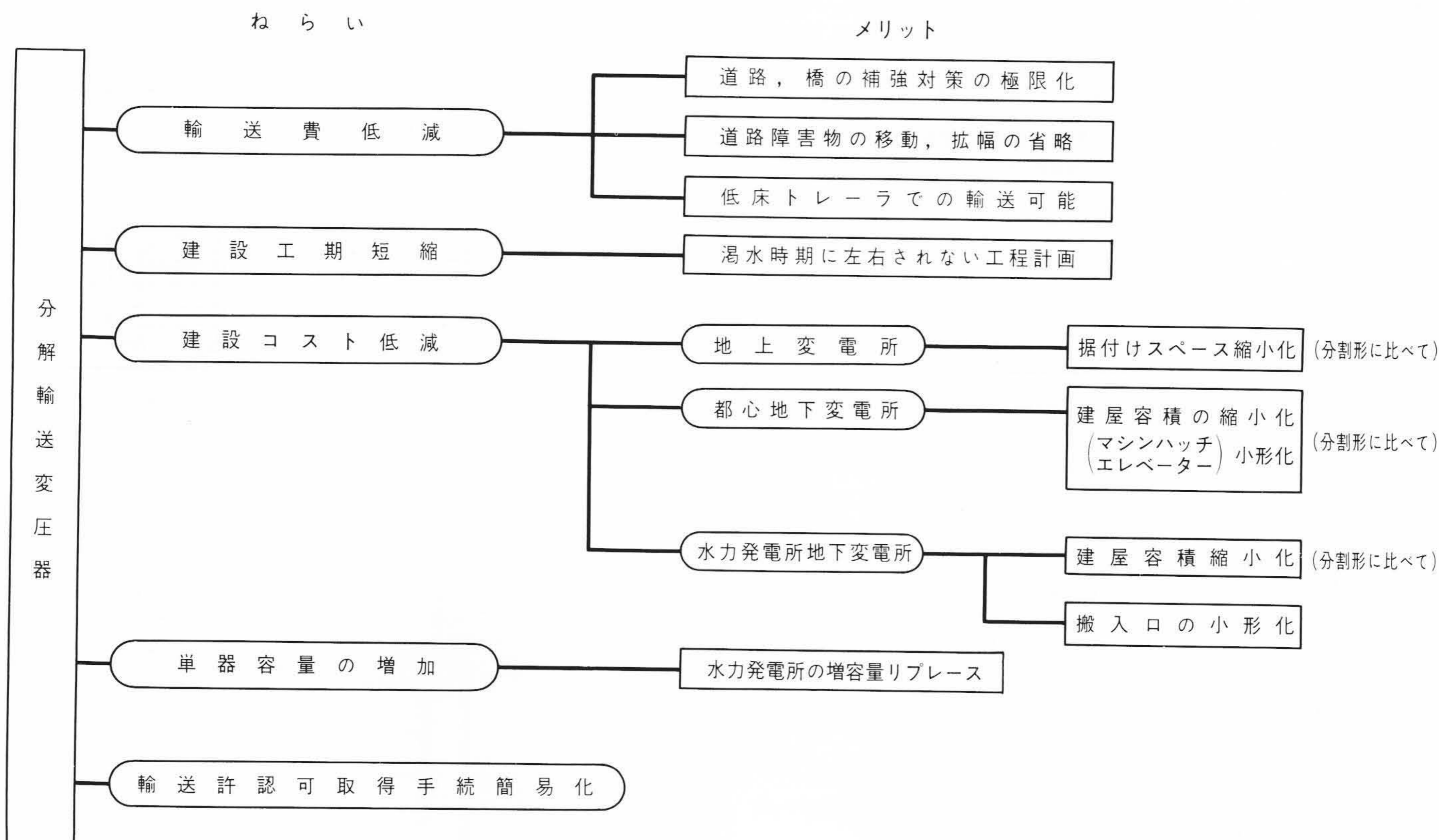


図6 分解輸送のねらいとメリット 輸送合理化のためのねらいは，輸送費の低減と輸送許認可取得手続の簡易化であり，低床トレーラを使用して分解輸送することである。

見直されてきている。

- (1) JR各社の合理化に伴う貨物取扱駅の漸減
- (2) 道路運行の制限強化と困難化
- (3) 容量増大化に伴う輸送限界超過
- (4) 輸送対策費の漸増

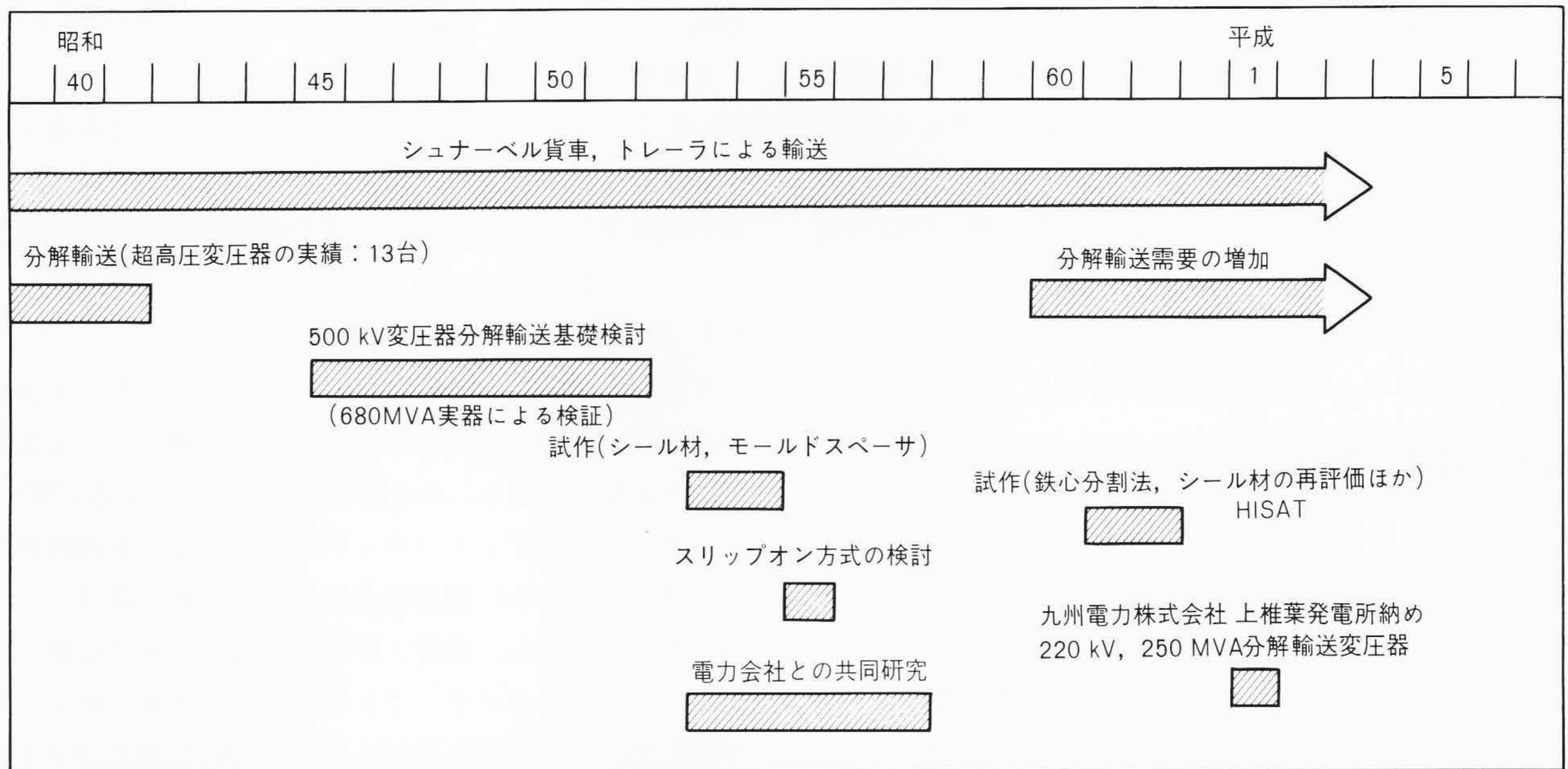
図6はこれらの問題に対応した具体策を示したもので，輸送合理化を目的とした新しい分解輸送技術を開発した。

### 3.1 分解輸送の研究経緯と新しい分解輸送技術(HISAT)の開発

分解輸送変圧器の研究経緯を図7に示す。昭和46～51年に

500 kV変圧器を対象に基礎検討し，680 MVA変圧器の一相分巻線で現地作業を模擬した吸湿と乾燥処理を行い，乾燥含浸理論を完成させた。昭和53年から防湿シール材を含めた分解輸送技術改善の検討を行い，500 kV変圧器を対象とした分割，分解輸送技術を研究してきた。昭和60年後半から，鉄心分割法および組立法の改善，最新の防湿フィルムの再評価を目的とした新しい分解輸送技術(HISAT: Hitachi Site Assembly Transformer)を開発し，平成元年に実用器として最初の超高压250 MVA分解輸送変圧器を製作，納入した。

HISATは昭和30年代の分解輸送変圧器に比べ下記のような



注: 略語説明 HISAT (Hitachi Site Assembly Transformer)

図7 分解輸送変圧器の研究開発経緯 昭和30年代の第一次分解輸送実績のもとに、高信頼度分解輸送技術の研究開発を継続して行い、最新の分解輸送技術(HISAT)を実用化した。

技術進歩が特筆できる。

- (1) 新しいプラスチックフィルムを用いた巻線やリード線の防湿・防塵(じん)技術
- (2) 鉄心加工設備と鉄心構造(接合方式, 締め付け構造)
- (3) 超低湿度乾燥空気発生装置, 蛇腹ハウス式建屋および空調設備の適用
- (4) 絶縁処理の理論的解析と実器適用技術

これらにより、従来構造の分解輸送に比べ高信頼性のものが製作できるようになった。

### 3.2 九州電力株式会社上椎葉発電所用220 kV, 250 MVA分解輸送変圧器の製作, 納入

以上述べた高信頼度の新しい分解輸送技術(HISAT)を適用して、九州電力株式会社上椎葉発電所用220 kV, 250 MVA変圧器を製作, 納入することができた。図8は、分解輸送変圧器と組立輸送変圧器の現地据付けフローを比較して示したものである。この大きな相違点は、前者では現地で特殊起立装置を用いて鉄心組立を行い、全体組立を防塵ハウス内で行うことである。分解輸送を行ったときの品質管理ポイントとその具体的内容を図9に示す。図10は、現地据付け手順を図で示したものである。

### 3.3 500 kV変圧器の分解輸送

超々高圧変電所の主要機器の一つである500 kV大容量変圧器は、陸路輸送制限の悪化など各種の事情により、これまでの鉄道組立輸送に代え高信頼度分解輸送の適用が要望されている。このため日立製作所では、前述したHISATを適用して500 kV, 1,000 MVA三相単巻変圧器を分解輸送する技術を検討し見通しを得た。500 kV変圧器の分解輸送を行う場合、

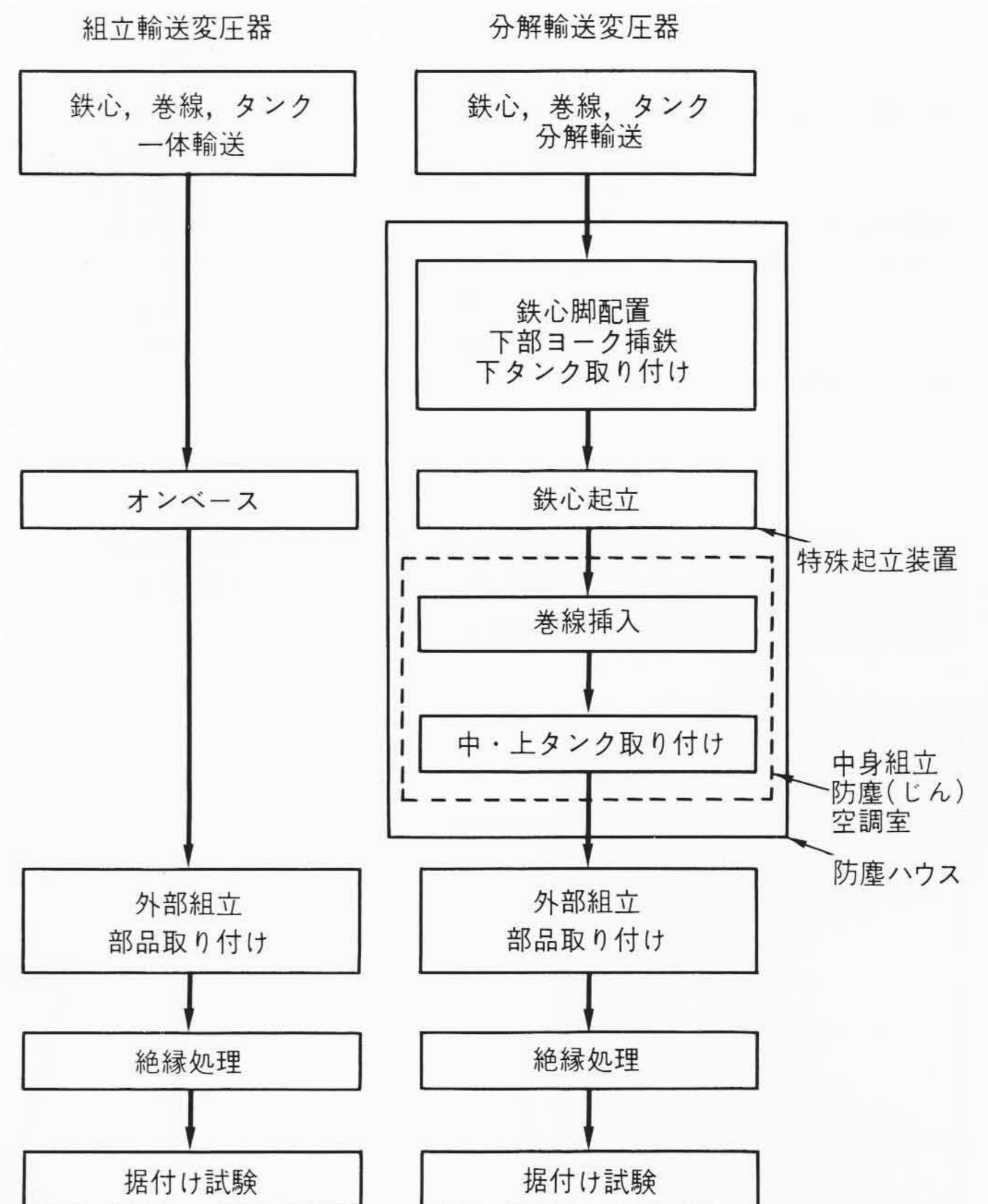


図8 分解輸送変圧器の現地据付けフロー 分解輸送変圧器では、現地で特殊起立装置を用い鉄心組立を行い、全体組立を防塵(じん)ハウス内で行う。

高信頼度を確保するため、次の方法を採用することになっている。

- (1) 基本的に、現状の標準鉄心構造を逸脱しないで分解でき

る三相三脚鉄心構造とし、性能や作業性を改善する。

(2) 従来のタップ巻線別置方式に対し、分解輸送変圧器巻線はタップ巻線を主巻線に内蔵することで巻線の合理化を図る。

(3) 現地で特殊起立装置を使用し鉄心組立を行う。また、変圧器基礎上に防塵ハウスを設置し、徹底した防塵・防湿管理および特殊試験の実施を行う。

これらの方法を採用することにより、現状の組立輸送単相分割形500 kV変圧器と同等の品質確保を図ることができる。

#### 4 複合絶縁変圧器の実用化

都市部に設置される変電所では、機器のコンパクト化による変電所全体の縮小化とともに、不燃化による防災性や環境調和性が要求されている。これに対して数十メガボルトアンペア以下の変圧器ではSF<sub>6</sub>ガス絶縁変圧器が配変用などに実用化されているが、大容量器では冷却性能上からガスだけでは

対処できないため、変圧器油に代わる冷媒が使用されている。

日立製作所は、不燃性冷媒であるパーフルオロカーボンとSF<sub>6</sub>ガスによる複合絶縁液浸方式の超高压・大容量変圧器を中部電力株式会社と共同開発し、このたび275 kV, 250 MVA複合絶縁変圧器を中部電力株式会社安倍変電所に納入した。ここにその概要を述べる。

#### 4.1 複合絶縁変圧器の基本構造

冷媒として使用しているパーフルオロカーボン(C<sub>8</sub>F<sub>16</sub>O)は冷却性能、絶縁耐力とも変圧器油よりも優れている安定な液体であるが、高価なため冷媒の使用量を低減する必要がある。そこでパーフルオロカーボンの優れた冷却・絶縁特性を有効に活用するとともに使用量を低減するため、図11に示す構造とした。すなわち、巻線と鉄心を絶縁筒の中に収納し、絶縁筒内にパーフルオロカーボンを満たして巻線と鉄心を液中に浸漬している。絶縁筒とタンクとの空間にはSF<sub>6</sub>ガスを加圧充てんして対地絶縁を確保するとともに、セパレータによってパーフルオロカーボンも同圧に保持している。絶縁筒およびセパレータによって、液とガスを完全に分離している。このような構造のガス絶縁変圧器を複合絶縁変圧器と呼んでいる。

液中に浸漬して直接冷却するため、均一で確実な冷却ができ、液の良好な冷却・絶縁特性を活用して冷却ダクト寸法や絶縁寸法が短縮できてコンパクト化が可能になる。また、液浸方式では変圧器内部主要部の基本構造は油入変圧器と同じであり、従来技術と同じ手法で設計でき信頼性の確保が容易になる。将来、500 kVなど上位機種への対応も可能と考えている。

#### 4.2 実用化へのステップ

昭和61年から基礎研究を開始し、冷却特性、絶縁特性、材料適合性などについて各種の検証モデルによって基礎技術の開発を進め、具体的な冷却・絶縁構造の検討を行った。パー

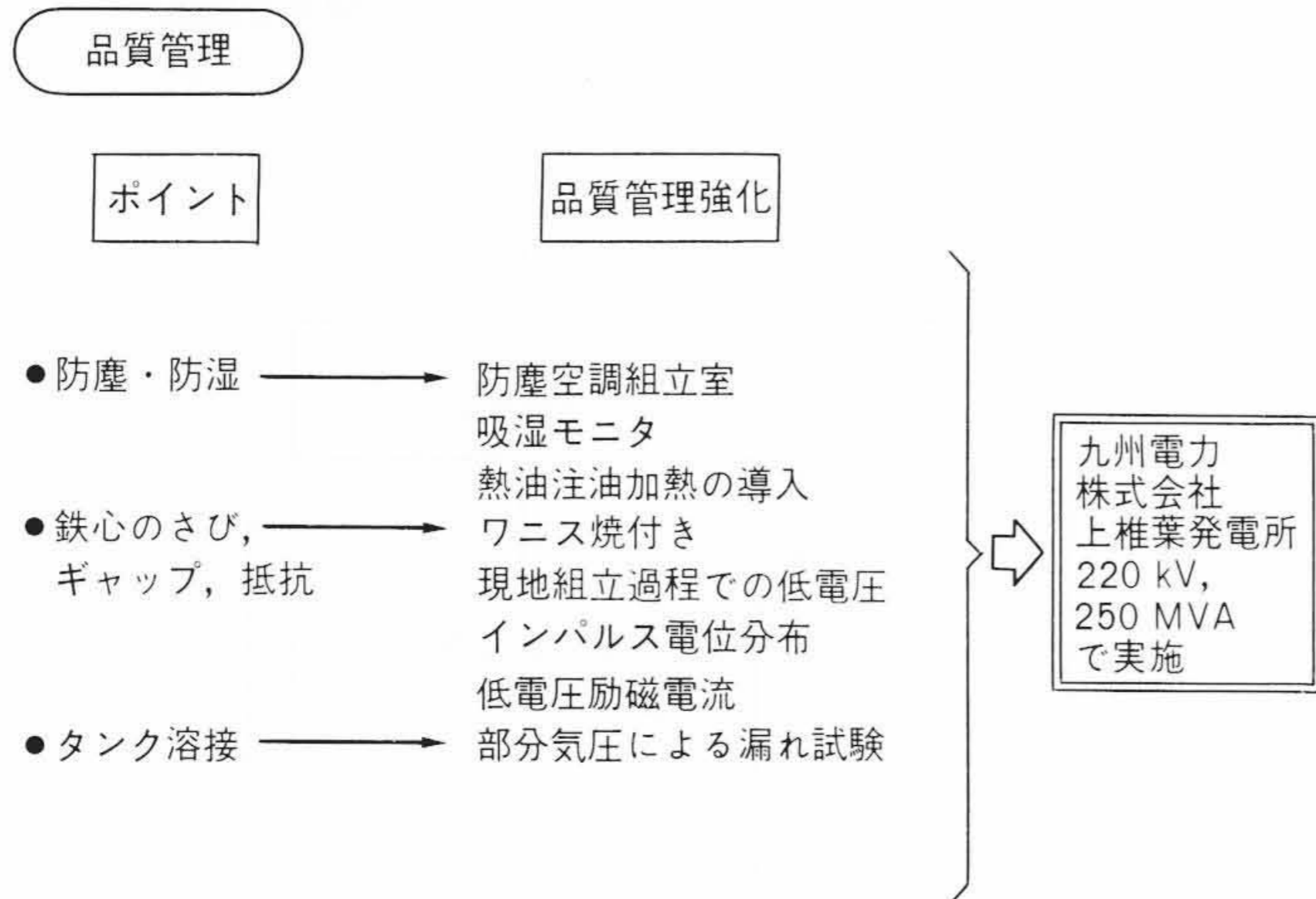


図9 分解輸送変圧器の品質管理ポイント 九州電力株式会社上椎葉発電所用220 kV, 250 MVA変圧器は、上図に示す品質管理を行い、高信頼性の分解輸送変圧器の1号器として納入できた。

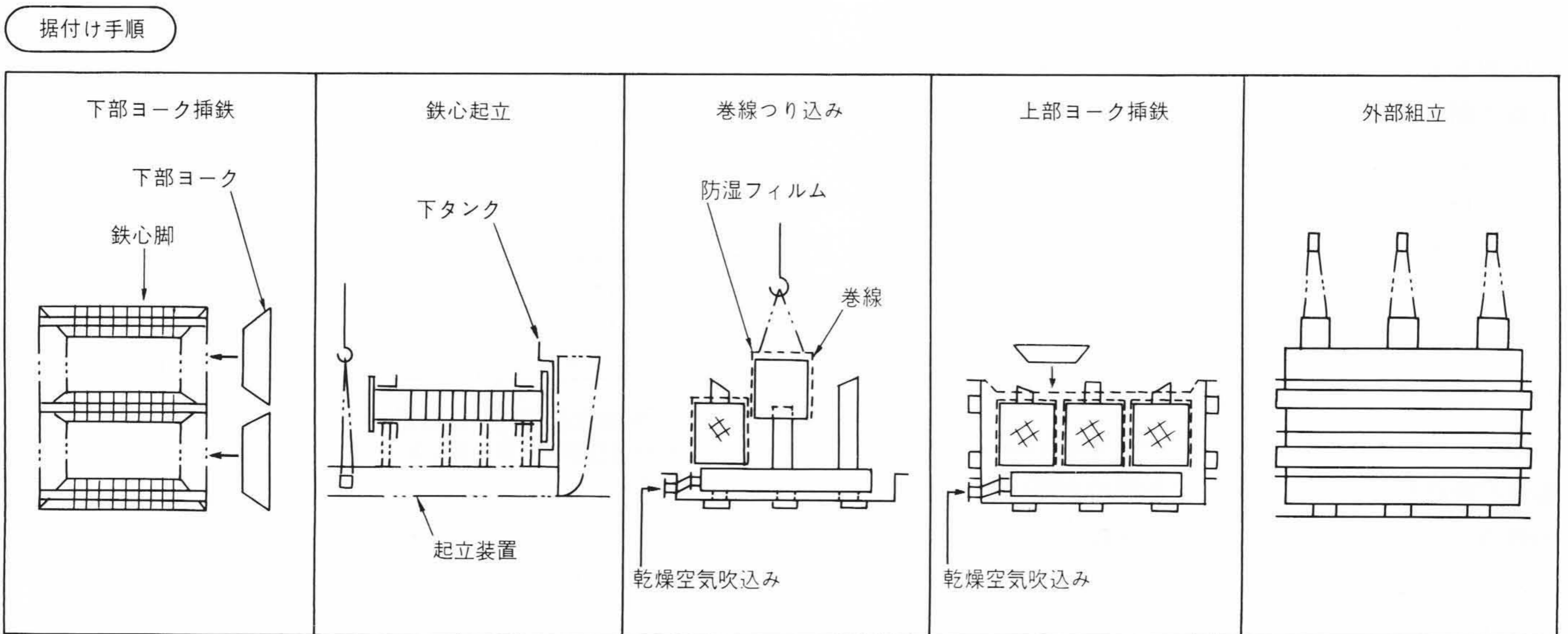


図10 九州電力株式会社上椎葉発電所用220 kV, 250 MVA変圧器の現地据付け手順 現地据付け手順の概要を示す。

フルオロカーボンの熱伝達率は、同一諸元で比較すると変圧器油の約2倍になり、動粘度が非常に小さいため円板巻線のコイル間寸法を油入変圧器の $\frac{1}{2}$ 程度に縮小しても、巻線の温度上昇を均一化できることを確認した<sup>4)</sup>。また絶縁の面では、パーフルオロカーボンの絶縁耐力は圧力依存性があり、圧力の上昇とともに絶縁耐力が向上することなどを検証した。図12に交流絶縁破壊強度のギャップ長依存性を示すが、変圧器油の場合よりも傾きは平坦になり破壊強度も1.5倍程度優れた液体であることを確認した<sup>5)</sup>。このようにパーフルオロカーボンによる液浸方式では、油入変圧器の冷却・絶縁構造と同様の構造で、冷却スペースや絶縁寸法を縮小できることが明らかになった。

基礎研究の成果を踏まえて275 kV、100 MVA三相複合絶縁変圧器を試作した。JEC204による試験項目のほかに $1.2E$  ( $E=287.5/\sqrt{3}$  kV)の長期課電試験および110%の長期過励磁試験によって長期信頼性を確認した<sup>6)</sup>。さらに、交流および雷インパルス過電圧試験により、絶縁裕度を確認し良好な結果を得た。

本体の開発と並行して、すでに実用化している配変用ガス絶縁負荷時タップ切換器の技術を延長し、275 kV対応の高電圧・大容量負荷時タップ切換器を開発した。ステップ電圧1,900 V、通過電流600 Aでその外観を図13に示す。特長は次のとおりである。

- (1) 2抵抗4真空スイッチ方式によるタップ切換の信頼性向上
- (2) 切換開閉器とタップ選択器を同心配置として絶縁筒に収納し、可動部分の一体つり上げ点検による保守性の向上
- (3) 絶縁筒内には絶縁、冷却特性が優れるパーフルオロカーボン

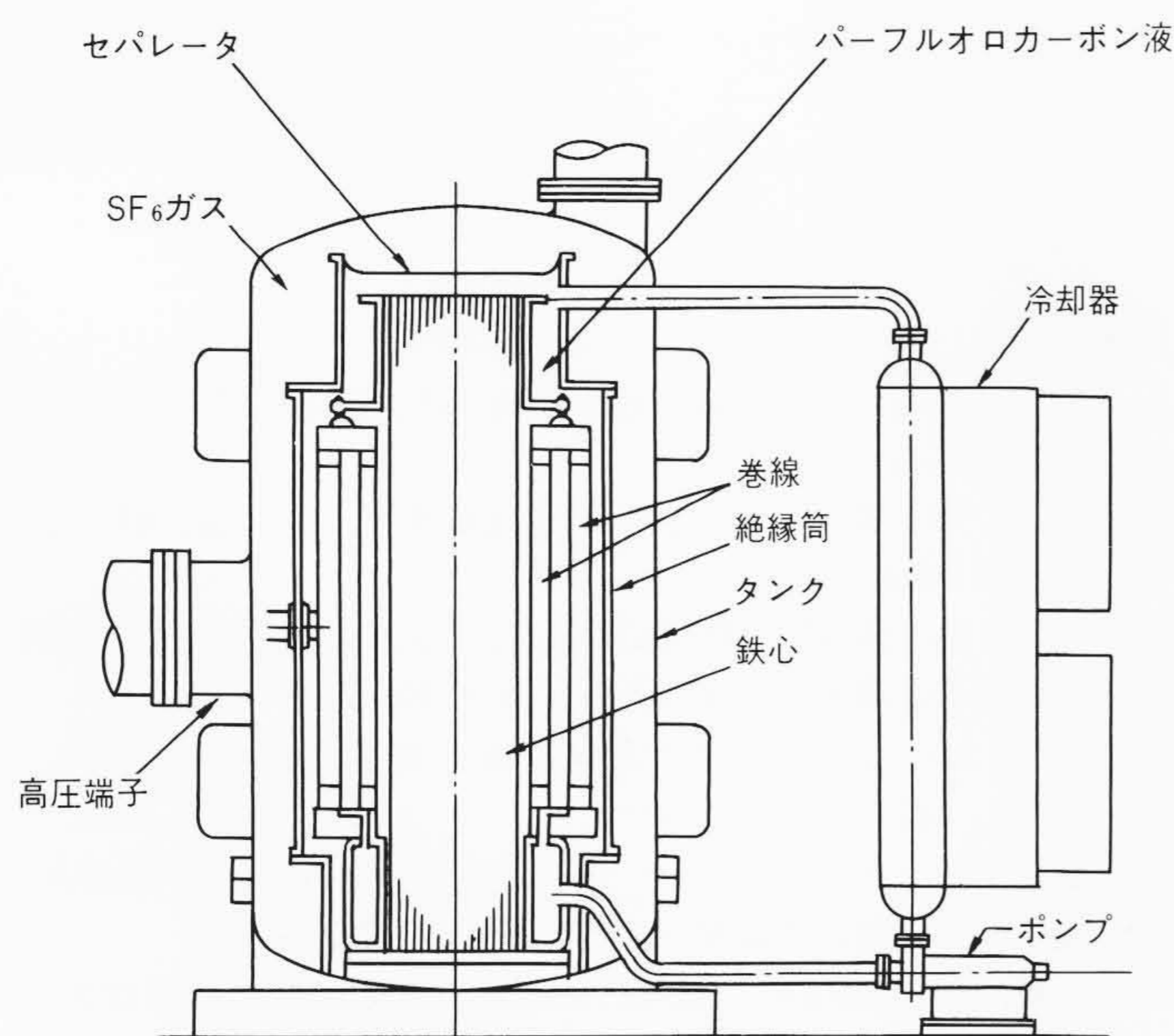


図11 複合絶縁変圧器の基本構造 パーフルオロカーボンとSF<sub>6</sub>ガスによる複合絶縁液浸構造として、冷媒液とSF<sub>6</sub>ガスは完全に分離されている。

ポンを封入してコンパクト化

- (4) タップ選択器には摩耗粉の発生がないローラタイプ接触子による無しゅう動切換方式の採用

試作した負荷時タップ切換器ではJEC規定の1.5倍の120万回の機械的耐用切換試験(電気的耐用切換試験30万回を含む。)を行い、切換機構部や真空スイッチの電気的・機械的信頼性を確認した。

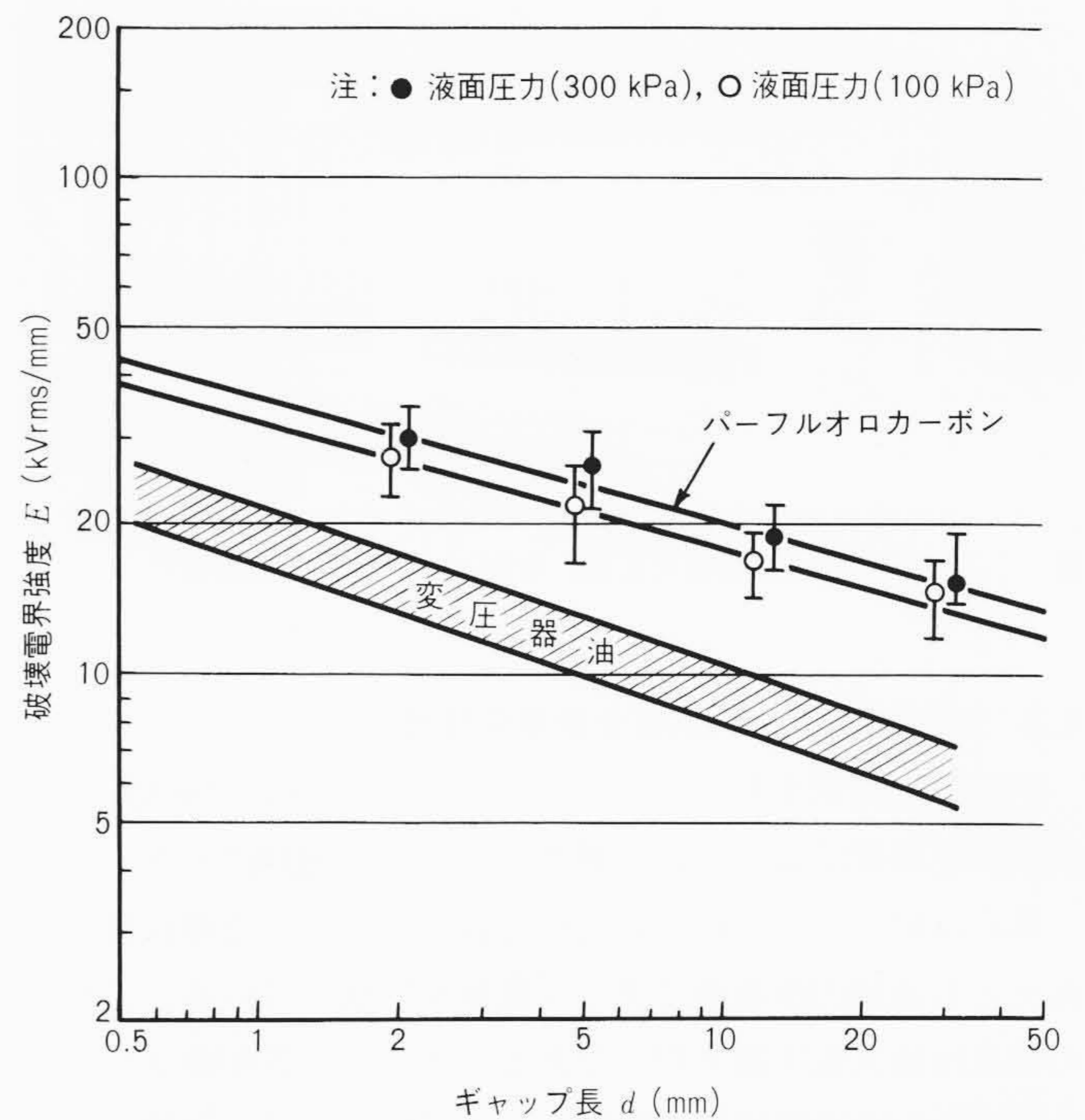


図12 交流破壊電界強度のギャップ長依存性 変圧器油と同様に破壊電界強度のギャップ長依存性があるが、パーフルオロカーボンでは傾きは平坦になり、破壊電圧も1.5倍程度高い。

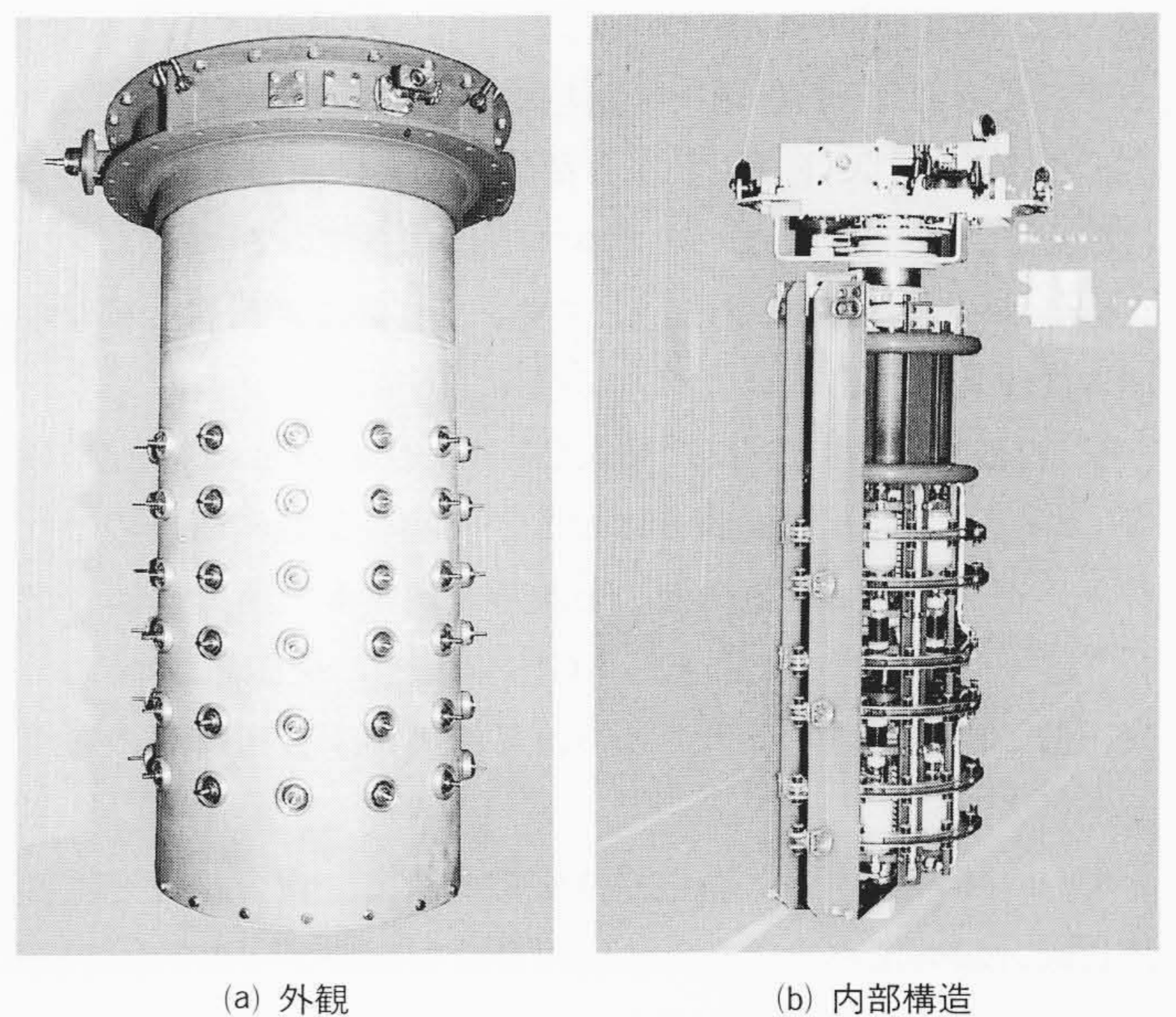


図13 高電圧・大容量負荷時タップ切換器 真空スイッチを含む内部(写真右)は、外観の絶縁筒の中に同心状に組み立てられ、パーフルオロカーボン液が封入される。

表2 275 kV, 250 MVA複合絶縁変圧器の仕様 275 kVの三相変圧器で、50 dBの低騒音仕様になっている。

容量	電 圧		周波数	相 数	インピーダンス	冷却方式	騒 音
	一 次	二 次					
250 MVA	275 <sup>+25</sup> / <sub>-31.2</sub> kV (19タップ)	77 kV	60 Hz	三 相	22%	送液風冷式	50 dB



図14 中部電力株式会社安倍変電所に据え付けられた250 MVA変圧器 写真左側が複合絶縁変圧器，右側が油入変圧器である。

#### 4.3 275 kV, 250 MVA複合絶縁変圧器

中部電力株式会社安倍変電所納めの275 kV, 250 MVA三相複合絶縁変圧器の仕様を表2に、外観を図14に示す。

鉄心は輸送上の制約から三相五脚鉄心とし、巻線は高压、低压とも連続円板巻線でタップ巻線を内蔵している。これらの構造は油入変圧器と同じである。絶縁筒は各相独立した相分離形として冷媒液量を低減すると同時に、リード線の引出しが容易な構造とした。変圧器本体タンクの高圧圧力はゲージ圧350 kPa(20℃)で、圧力容器となるが長円形断面構造として変圧器中身の形状に最も近い形状としてコンパクト化を図った。高圧線路はGIS(ガス絶縁開閉装置)に直結され、スペーサで変圧器側とGIS側を区画している。低压線路はブッシングで引き出している。LTC(負荷時タップ切換器)は別タンクに収納し、モールド端子板で本体と仕切っている。LTCタンク内のガス圧は120 kPa(20℃)で封入している。騒音仕様から油入変圧器と同様の防音タンク構造としている。

複合絶縁変圧器と同時に納入した同一仕様の油入変圧器(騒音は55 dB)との比較を表3に示すが、複合絶縁変圧器のほうがコンパクトにできることがわかる。地下変電所では防音タンクは不要で、端子の引出しもGISやケーブル接続になるので変圧器の高さはさらに低くなり、将来の地下変電所への適用が期待される。

なお、中部電力株式会社安倍変電所では、複合絶縁変圧器に自動計測装置を設置し、各種の貴重な運転データを蓄積し、今後の設計に反映させる予定である。

表3 275 kV, 250 MVA変圧器の比較 油入変圧器に比べて複合絶縁変圧器は、質量、体格ともコンパクトにできる。

変 圧 器		油入変圧器	複合絶縁変圧器
質 量	中 身 質 量	110 t (100)	100 t (90)
	総 質 量	255 t (100)	210 t (82)
体 格	変 圧 器 高 さ	7.5 m (100)	6.3 m (84)
	据 付 け 面 積	114 m <sup>2</sup> (100)	110 m <sup>2</sup> (96)
	変 圧 器 容 積	853 m <sup>3</sup> (100)	693 m <sup>3</sup> (81)
構 造	コ ン サ ベ ー タ	付 き	不 要
	G I S と の 接 続	ウォールブッシング	スペーサ直結
	負荷時タップ切換器	油中切換方式	真空スイッチ方式

注：略語説明 GIS(ガス絶縁開閉装置)

## 5 結 言

以上述べたように、日立製作所では、低騒音、据付けスペース、工期の縮減、輸送質量の低減、防災性、環境調和性の向上など、時代の新しい要求に沿った新技術を開発した。今後も変圧器に対する要求はますます多様化してくることが予想されるが、それらの要求に沿った新技術の開発によってこたえていきたい。

終わりに、開発にあたり終始ご指導・ご援助をいただいた電力会社の関係各位に対し、厚くお礼を申し上げます次第である。

### 参考文献

- 1) 星，外：電力用変圧器の技術動向，日立評論，65，5，461～466(昭58-5)
- 2) 前島，外：最近の変圧器低騒音化技術，日立評論，67，2，55～60(昭60-2)
- 3) 花原，外：鉄板防音壁付45ホン級200 MVA変圧器完成，電気関係学会北海道支部連合大会，94(昭和63)
- 4) 和田，外：高電圧・大容量変圧器の技術動向，日立評論，70，8，847～854(昭63-8)
- 5) 高木，外：パーフルオロカーボン液破壊強度のギャップ長効果，電気学会電力エネルギー部門全国大会，247(平成2)
- 6) 小林，外：275 kV, 100 MVA三相不燃変圧器の長期課電試験，電気学会全国大会，827(平成2)