

# 最近の超々高压変圧器

## Recent Developments in Extra High Voltage Transformer

電力系統の高電圧、大容量化と社会環境の変化により、電力用変圧器には、これらに対応する新しい構造の開発と、より高い信頼性が要求されている。日立製作所では、これらの要求を満たすため、絶えざる研究開発とデータの蓄積による設計精度の向上、徹底したデザインレビュー、生産技術及び技能の向上による品質管理の充実に努め、幾多の記録的変圧器を製作してきた。本稿は、これら最近の超々高压変圧器に採用された絶縁設計、鉄心設計、漂遊損解析、構造設計などの各種技術の成果について述べる。

福田 輝夫\* *Fukuda Teruo*

木ノ内一之\* *Kinouchi Kazuyuki*

森 悦紀\* *Mori Etsunori*

鹿島 芳丈\* *Kashima Yoshitake*

### 1 緒 言

電力系統の高電圧、大容量化と、それを取り巻く社会環境の変化は、送変電機器の発達に著しい影響を与えている。電力用変圧器についても、三つの大きな要因、すなわち、超大容量化、超々高压(EHV)化、直流変換システムの導入を軸に低騒音化、SF<sub>6</sub>ガス絶縁開閉装置直結、地下設置などを含む種々の要求を満たす構造の開発と、信頼性向上のための努力が重ねられてきた。

変圧器は、電圧、容量、インピーダンス、巻線数などの仕様上の要素の組合せと、構造に対する種々の要求や輸送限界が個々に異なるなど構造設計に関する要因が多く、典型的な多品種少量生産機種の一つである。そのため、信頼性の確保に当たっては、一貫した設計思想に基づく設計、絶えざる研究開発とデータの蓄積による設計精度の向上及び優れた生産設備と技能による充実した品質管理が不可欠である。

日立製作所でも、変圧器の生産を開始してから既に65年余になるが、最近の技術的発展、生産設備の拡充・整備には著しいものがあり、幾多の記録的な変圧器を製作することができた。

この間、理論的現象解析及び要素試作・実器試作による計算と実測との対比、実器でのデータ蓄積などにより生産技術・品質管理(QC)及び品質保証(QA)技術の進歩にも著しいものがあつた。

これらの着実な開発ステップの実行は、変圧器の信頼性向上に著しい効果をもたらしている。

このような自主技術を背景とし、海外からの要望にこたえて機器の単なる輸出だけでなく、400kV級変圧器の技術供与をインド及びポーランドに対し行なっている。特に、インドTelk社では、同国国産による初の400kV 60MVA変圧器を完成し(図1)、出荷できたことは喜ばしい。

以下、日立製作所の超々高压変圧器の現状について述べる。

### 2 変圧器仕様と構造

変圧器の容量は、鉄心一脚当たりの容量により評価されるべきものであり、日立製作所での構造上の進歩の概要を図2に示す。新構造、あるいは記録品の製作に当たっては、多くの要素試作によって信頼性を確認<sup>1)</sup>することはもちろんであるが、実器試作<sup>2)</sup>によって性能を検証することを基本方針としている。

火力・原子力プラント用変圧器では、発電所が臨海地点に多く、海上輸送ができるため輸送上の制約が少ないので三相変圧器が用いられ、多くの600MVA級変圧器を製作してきた。また1,200MVA変圧器については、プロトタイプを完成し、現在500kV 1,100MVA変圧器を製作中である。

水力・揚水プラントは、150~300MW級が主体であるが、変圧器としては2~3台の発電機出力を変圧器で結合するセントラル方式が用いられることもあり、我が国での最大級容量である500kV級 640MVA変圧器<sup>3)</sup>を関西電力株式会社奥多々良木発電所へ納入している。

変電所用変圧器の場合には、シュナーベル形貨車による鉄道輸送が主として行なわれ、輸送重量は200tw程度に制約を受ける。500kV系統と275~187kV系統の連系には、単巻変圧器(一例:図3参照)が用いられ、鉄心一脚の容量で500/3MVA、単相容量では、1,500/3MVAが現状輸送可能な最大容量と考えられる。

154kV以下の系統との連系は、接地方式が異なるため分離巻線変圧器となり、500/154kV 750/3MVA単相変圧器が用いられている。

我が国では、このように単相変圧器が用いられているが、欧州では、輸送限界が大きいことため三相変圧器が多く用いられ



図1 インドTelk社製400kV 60MVA変圧器 インドTelk社では、日立製作所の技術供与によりインド国産として初の400kV変圧器を製作した。

\* 日立製作所国分工場



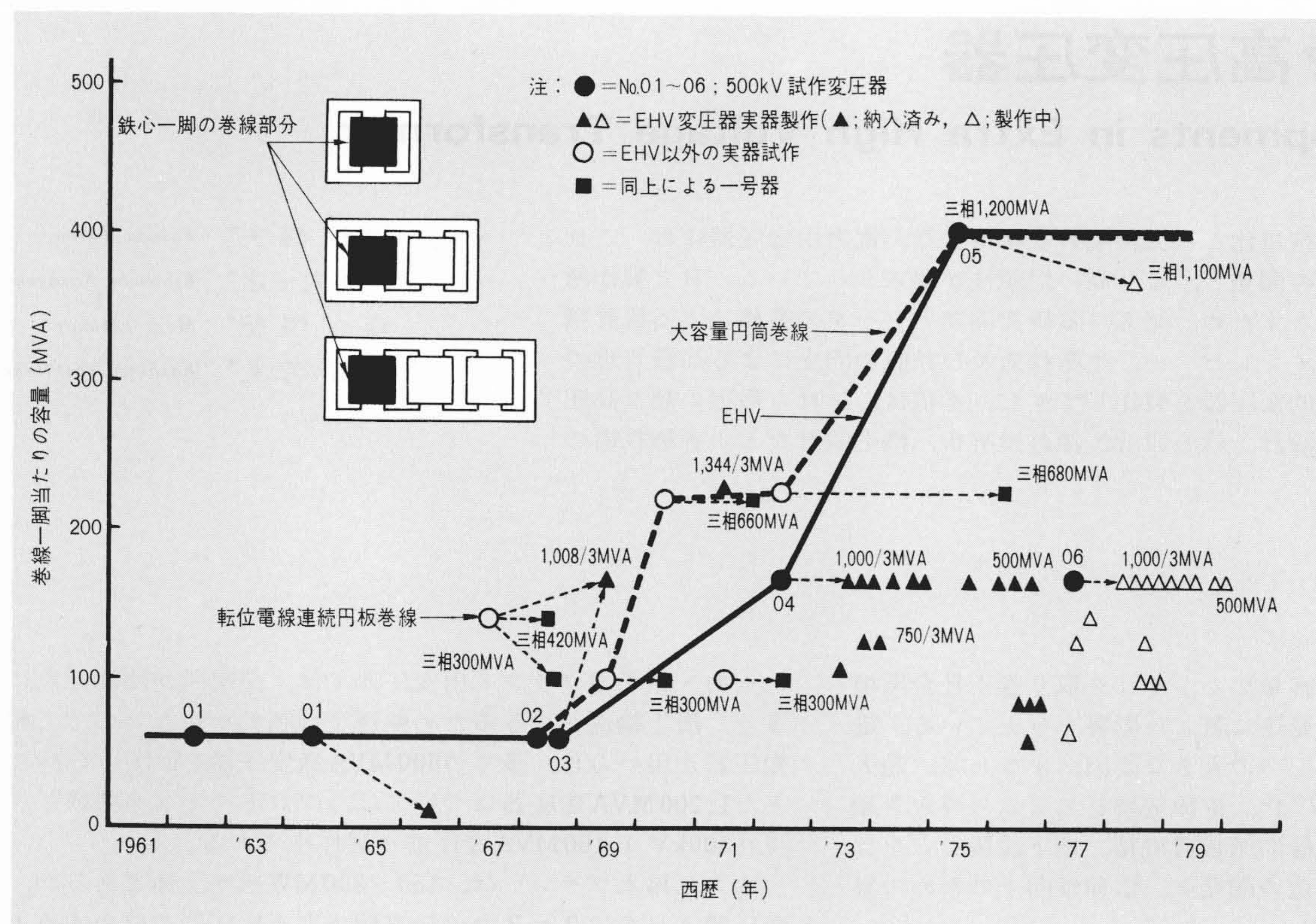


図2 超高压大容量変圧器の容量の変遷  
大容量器の製作に先立ち、  
実器試作により諸特性の確  
認を行なっている。

ている。

現在、我が国では、鉄道輸送時には輸送カバーを用い、現地で本体カバーと交換する方式が一般的であるが、日立製作所では有限要素法(FEM)によるカバーの応力解析、リード線構造の改良などにより、500kV級変圧器でも本体カバーで輸送する方式が可能となりつつあり、より信頼性の高い構造とすることができるようになった。

直流変換用変圧器については、275/110kV 187MVA変圧器を東京電力株式会社新信濃変電所へ納入し、引き続き北海道～本州連系用変圧器(変圧器容量187MVA、2段カスケード方式で、下段の直流電圧は±125kV、上段の直流電圧は±250kV)を製作中である。

### 3 巻線

#### 3.1 絶縁技術

超々高压変圧器の巻線の絶縁上重要な技術は、インパルス電圧に対する電位振動抑制と交流電圧に対する部分放電発生防止の二つである。

##### (1) インパルス絶縁

超々高压変圧器の円板巻線のインパルス電圧に対する電位振動抑制法としては、インターリーブ巻線と、日立製作所独自のC.Cシールド(コンデンサカップリングシールド)法がある。これらはそれぞれ特長をもっているが、図4に示すように、単一コイル当たりの巻回数によって電位分布改善の目安となる巻線の直列静電容量が変化する。したがって、比較的小容量の変圧器にはインターリーブ、大容量器にはC.Cシールドというように適宜選択して巻線設計ができるので、円板巻線の場合には設計の自由度が大きく、絶縁の信頼性向上を図ることができる。一方、大形電子計算機の使用により、多くの巻線を考慮した詳細な電位振動の理論的解析が可能となり、その結果、インパルスが印加される巻線内部の発生電圧及び他の巻線との間の電位差(巻線間電位差)の影響も考慮して、

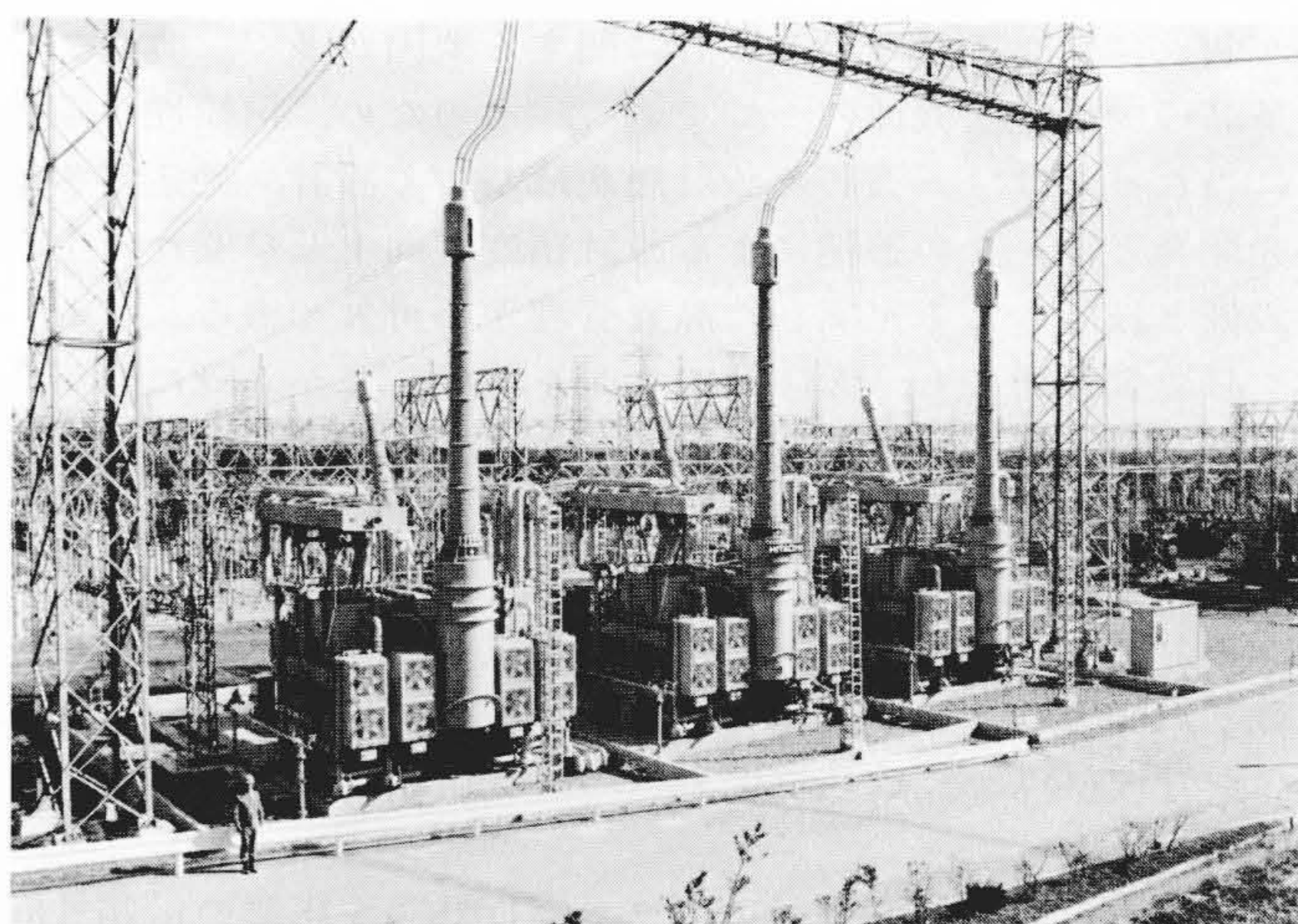


図3 500kV単巻変圧器 東京電力株式会社新福島変電所納め525/275kV 1,000MVA単巻変圧器バンクを示す。

インパルス電圧による電界分布を精度よく計算することが可能となった。図5に、巻線間電位差の波形の計算値と実測値の比較を示すが、最も重要なインパルス電圧印加直後の波形はよく一致している。一方、インパルスコロナ及びインパルス絶縁破壊電圧のV-t特性の研究を行ない<sup>5)</sup>、インパルスコロナ及びインパルス絶縁破壊電圧と電界強度の関係を把握して信頼性の高いインパルス絶縁技術を確立した。

##### (2) 交流絶縁

日立製作所では1960年代の初めから、部分放電現象の解明、電界解析技術の開発、絶縁処理の理論的解析と絶縁材料の改善、更に材料の非破壊検査などの品質管理技術の充実を図り、内部有害部分放電発生防止に対する設計、製作技術を蓄積してきた。同時に、品質保証の見地から110kV以上のすべての変圧器に対して常規対地電圧の1.5倍の電圧を印加して部分放電試験を実施するとともに、誘導耐電圧試験時にも内部部分



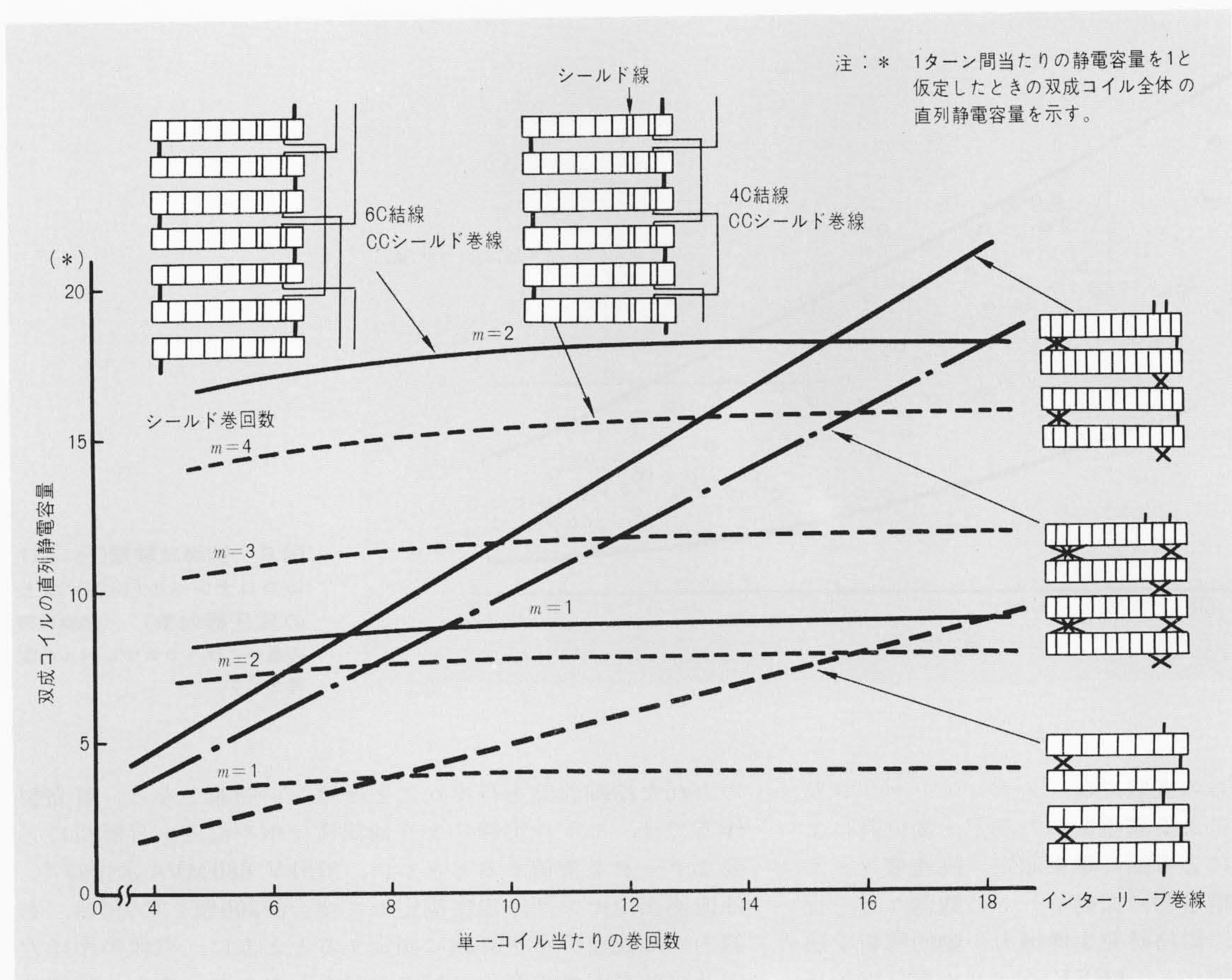


図4 高圧巻線の直列静電容量 C.C.シールド巻線とインターリーブ巻線の直列静電容量を比較した。

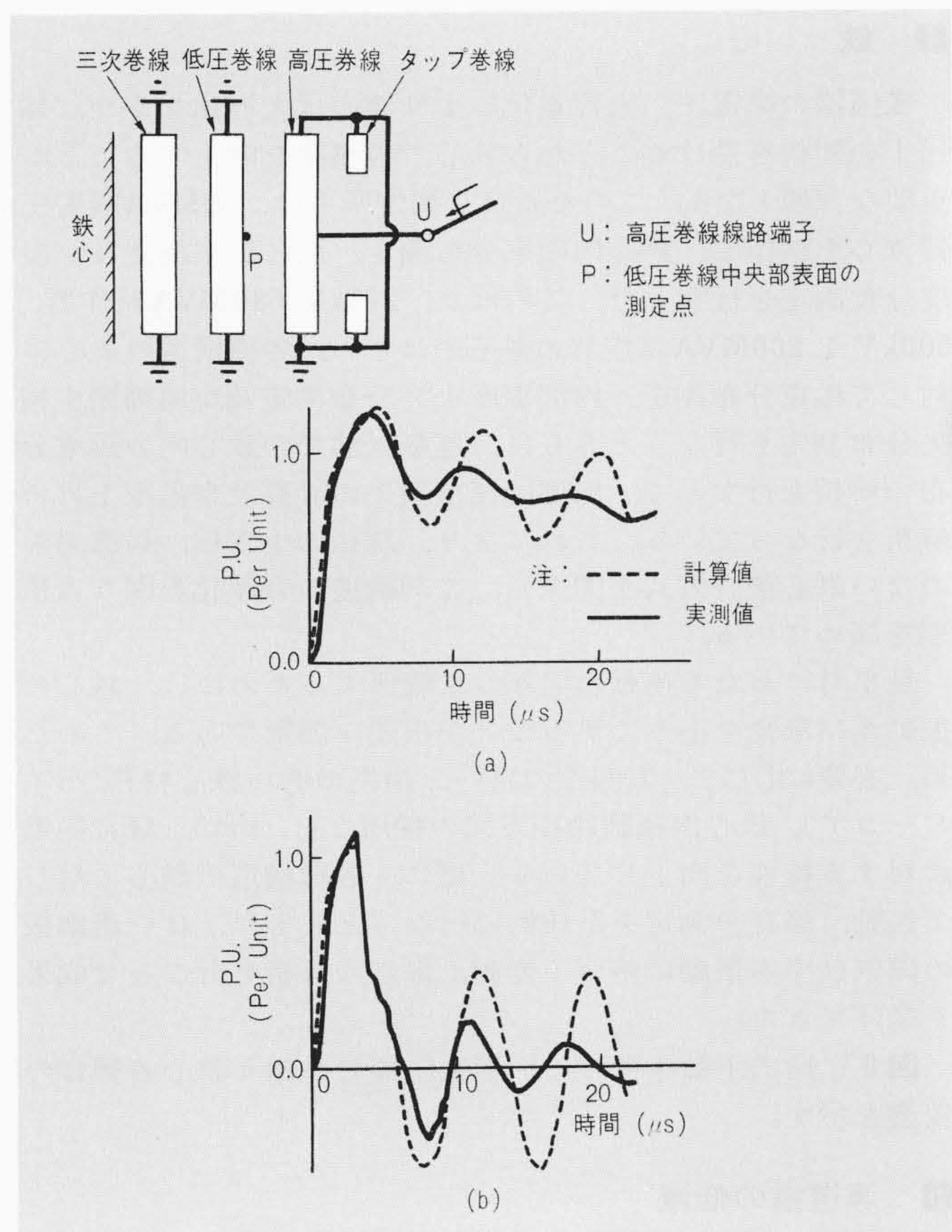


図5 262.5kV 3巻線変圧器の主絶縁間(U~P間)電圧波形 (a)  $1 \times 40 \mu\text{s}$  全波印加時, (b)  $1 \times 40 \mu\text{s}$  3.5  $\mu\text{s}$  さい断波に対する主絶縁間発生電圧波形を示す。

放電を監視し、絶縁の信頼性を確認してきた。図6は誘導耐電圧試験時の内部部分放電レベルの変遷を年代順に整理して示したものである。現在では超々高圧変圧器に要求される仕様〔代表例： $1.5E$  ( $E = \text{最高回路電圧}/\sqrt{3}$ )で $25 \mu\text{V}$ 以下〕に対しても十分裕度のある変圧器の製作が可能となっている。

### (3) 1,000kV級変圧器

次期送電電圧として予想される1,000kV級の変圧器の設計、製作技術確立のため、各種の基礎研究を行なっている。

1,000kV変圧器では輸送上の制約が大きく、絶縁寸法を合理的に縮小する必要がある。特に巻線絶縁に対しては絶縁寸法を1,000kV変圧器の $\frac{1}{2}$ とし、印加電圧を500kV級変圧器と同一とした試作変圧器(電界強度は1,000kV変圧器と同一)を製作し、500kV級変圧器と全く同一の絶縁試験を終了後、1年間にわたり長期課電試験を実施して良好な結果を得ることができた。1,000kV級機器の開発については、関係ユーザーと協調を取り、更に研究を進める考えである。

### (4) 直流絶縁

直流変換用変圧器に対しては、基礎実験及び要素試作により、材料の直流絶縁特性及び変圧器の直流絶縁破壊現象の解明を図るとともに、変圧器の直流電圧印加時の電界マッピング技術を開発し、直流絶縁に対する設計技術を確立した。図7に直流電界マッピングと交流電界マッピングの比較を示す。

### 3.2 巻線の短絡機械強度

系統の高電圧化と短絡容量の増大及び変圧器単器容量の増大に伴い、巻線の短絡機械強度は変圧器の信頼性向上にとってますます重要な問題となっている。日立製作所では、巻線の半径方向、軸方向強度及び短絡時発生機械力の確認のため種々のモデル試験法を開発し、多数の実物大モデルによる実



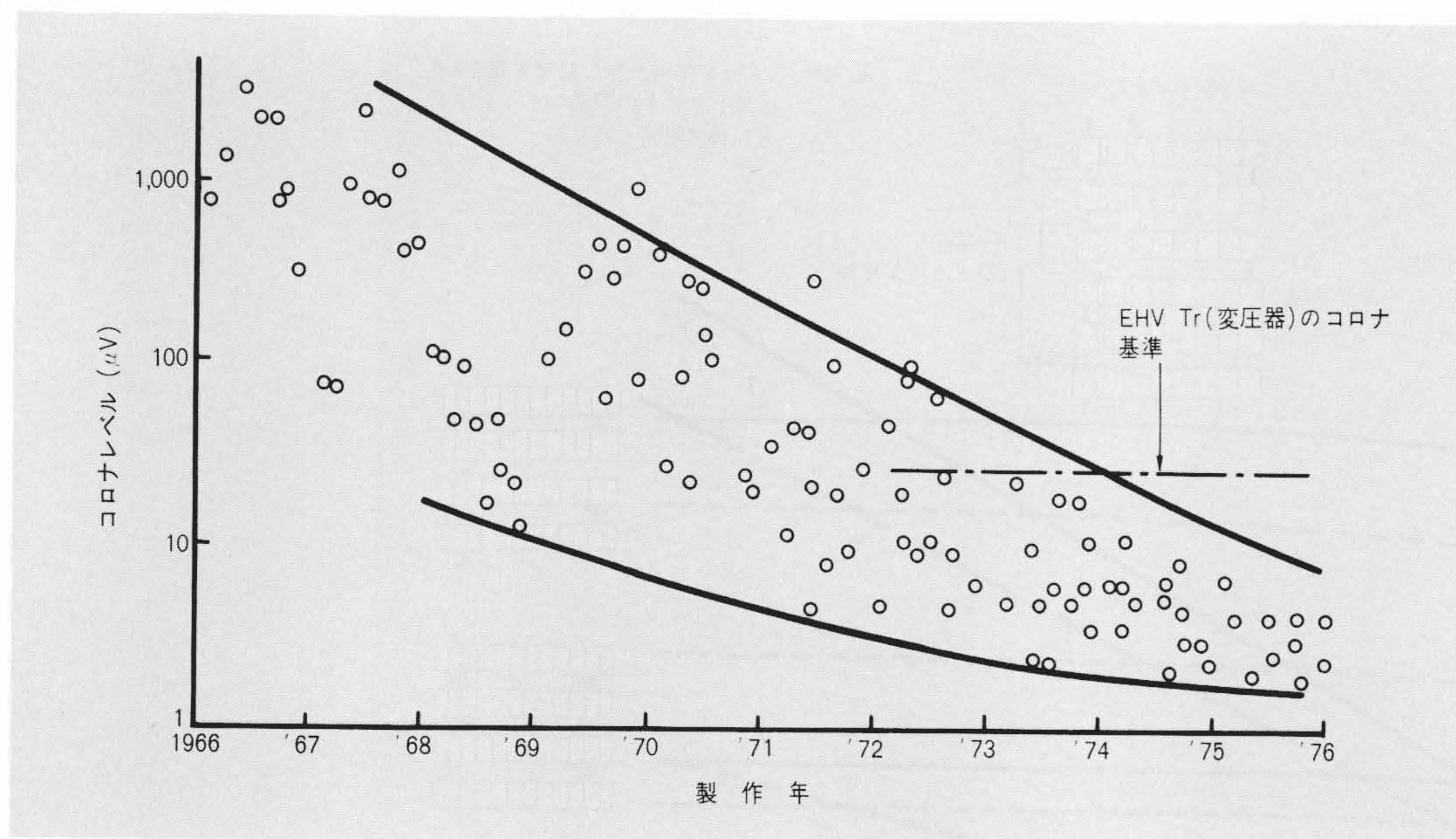


図6 誘導試験電圧におけるコロナレベル(110kV以上の変圧器対象) 絶縁技術の進歩に伴うコロナレベルの変遷を示す。

験を行ってきた。これらの実験では、ストレインゲージ及び絶縁物の残留応力測定による発生電磁力測定、変位計による変位測定、ホール素子による漏れ磁束測定、高速度カメラによる短絡時の巻線及び構造物の振動モードの観測などを行なった。これらによって、短絡時発生機械力の動的解析手法及び巻線の強度計算法を確立し、IEEE(アメリカ電気電子技術者協会)で発表<sup>6),7)</sup>して関心を集めた。更に軸方向振動について、鉄心窓内外の電磁力の差を考慮した振動機械力や、短絡時の各巻線の各時点ごとの偏位を考慮したマッシュー振動方程式による発生機械力の動的解析を行なうとともに、径方向座屈強度に関する理論的計算手法の研究を進めている。

### 3.3 巻線の冷却

高電圧、大容量器になるほど絶縁及び短絡機械強度と協調

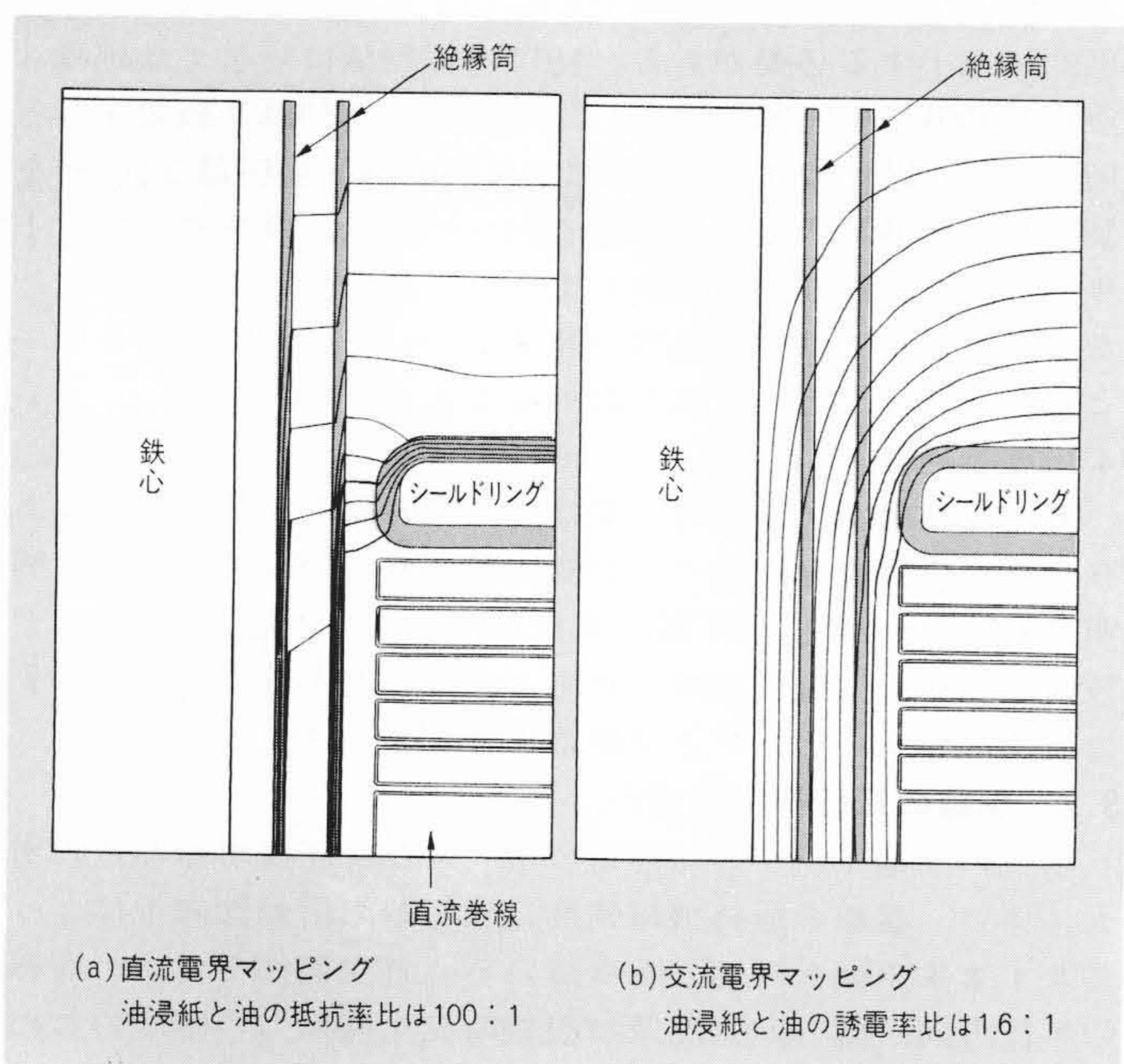


図7 直流電界マッピングと交流電界マッピングの比較 直流絶縁設計、交流絶縁設計とも電子計算機により電界マッピングを行なっている。

のとれた冷却設計を行なうことが難しい問題となる。日立製作所では、モデル実験により油流速分布や温度上昇解析に必要なデータを蓄積するとともに、275kV 680MVA試作器で、油流速測定センサ、温度測定センサ合計200個を取り付け、巻線内の油流速分布を詳細に測定するとともに、導体の半径方向及び軸方向の温度こう配の測定を行なった。また、巻線の端部構造、配管なども含めた油流分布計算手法を開発し、各種の巻線構造に対する巻線温度上昇解析手法を確立している。

## 4 鉄心

変圧器の高電圧、大容量化により鉄心は大形化するが、輸送上の制約を受けることから鉄心の占積率を向上することが重要な課題となる。このため日立製作所では、50MVA級変圧器鉄心を試作し、鉄心内磁束分布測定、漏れ磁束測定及び温度分布測定を行なった。このほか、275kV 680MVA試作器、500kV 1,200MVA試作器の鉄心をはじめ、各種構造の鉄心に対して磁束分布測定、内部温度上昇分布測定及び局部発生損失分布測定を行なうとともに、運転状態での鉄心内の磁束分布の解析を行なって、局部的発生損失の計算及び温度上昇の解析を行なっている。これにより、鉄損の小さい、局部過熱のない鉄心接合方式を開発し、冷却構造の合理化を図り占積率を高めている。

長年月にわたる運転の信頼性を確保するためには、鉄心の振動及び騒音を小さくすることが重要な課題である。このため、必要に応じて、方向性の良い、損失の低い鉄心材料(ハイピーコア)、鉄心内強制冷却方式の採用など、冷却、騒音振動に対する特性を向上している。更に、各種構造の鉄心に対して振動、騒音の測定を系統的に行なうとともに、けい素鋼板の磁気ひずみ振動に基づく振動、騒音の解析を行なって成果を挙げた。

図8に過去十数年間での大形変圧器の鉄損と鉄心の騒音の変遷を示す。

## 5 漂遊損の低減

大容量変圧器では、うず電流損、循環電流損及びこれらに起因する局部過熱の評価と、局部過熱の防止方法が設計上最も重要な課題である。



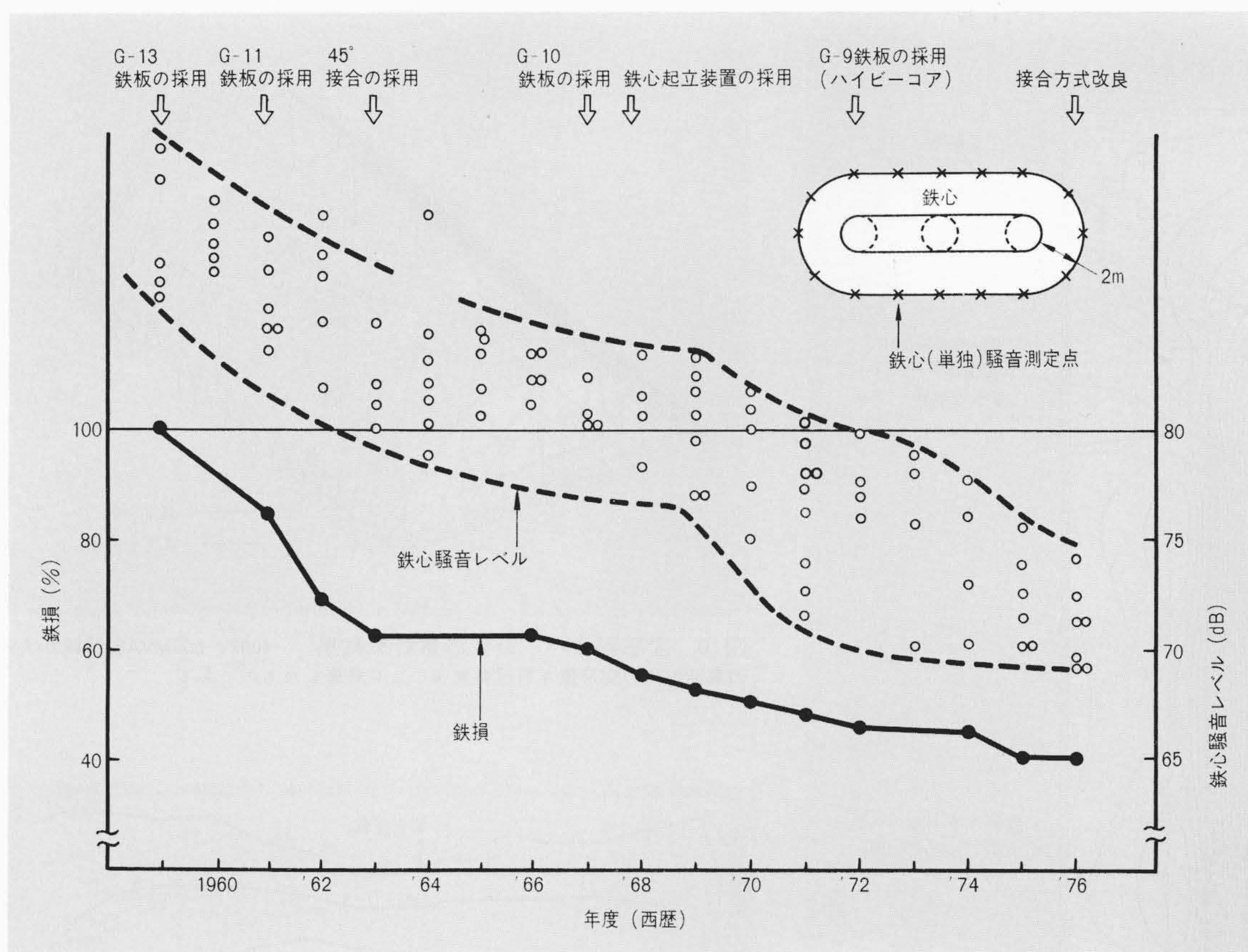


図8 大形変圧器の鉄損と鉄心の騒音変遷  
鉄心製作技術の改善と150 MVA以上の変圧器の鉄損及び騒音の変遷を示す。

日立製作所では、これらの問題を解明するため研究所内に150MVAの漂遊損検討用変圧器を設けて基礎実験を重ね、更に多数の要素試作を行なうことにより、うず電流の影響及び磁性体の飽和を考慮した磁界、並びにうず電流解析手法を確立した。この手法は、マクスウェルの電磁方程式を差分法及び有限要素法を用い、2次元及び軸対称3次元解析を行なって磁界及びうず電流分布を求めるものである。この手法により、種々の構造、材料の組合せに対して解析を行なうことが可能となった。

図9は、タンクに磁性体のシールドを施した場合の巻線、鉄心、タンクなど、各部の磁界分布の計算結果を示すものである。

上記の磁界解析手法を用いて、漂遊損の低減、局部過熱の防止を図ると同時に、有限要素法による構造物の強度解析によって、合理的な構造設計を行ない、強度上の信頼性を高めている。

## 6 本体カバー輸送変圧器

大容量変圧器の構造は輸送条件により決定される。鉄道、道路輸送制限が過酷な場合、輸送時に変圧器の主要構成品の一部、すなわちカバー、負荷時タップ切換装置、リード線などを取り外して輸送制限内に収めて輸送し、現地で再組立を行っている。変圧器の信頼性を高める上からは、輸送時に取り外す部品を少なくし、環境条件の悪い現地での内部の露出時間や絶縁作業を少なくすることが重要課題である。このため、カバー強度の解析及びリード線構造の改善を図り輸送用仮カバーを使用しない本体カバー輸送技術を開発した。この技術の開発に当たっては、有限要素法(FEM)プログラムにより詳細な応力変形量の計算を行なう一方、実器での応力、変形量の実測値との対比と計算精度の確認を行なった。図10

にFEM計算による耐真空時の変形量計算結果の一例を示した。

リード線構造に関しては、輸送上の制約から従来のように、鉄心上に多数のリード線を配置することは不可能の場合があり、巻線とタンク間、若しくは鉄心締金具とタンク間に配置する技術を開発した。

これらの技術開発により、東京電力株式会社新信濃変電所納め三相187MVA変圧器(負荷時タップ切換装置内蔵)をはじめとする超高压変圧器、更に関西電力株式会社南都変電所納め500kV 750/3MVA単相変圧器(負荷時タップ切換装置内蔵)を本体カバー輸送として製作したほか、500kV 1,000/3~1,500/3MVA単相単巻変圧器でも輸送限界が極めて過酷な場合以外は、本体カバー輸送が可能となった。

## 7 計算機の利用

前述したように、日立製作所では、絶縁設計、鉄心設計、漂遊損の解析、構造設計などの種々の分野で、電子計算機を利用して解析を行ない、基礎的技術の蓄積と新技術の開発に努め信頼性の向上を図っているが、更に設計の信頼性向上のため作図の自動化(CAD)を進めている。

このほか、各種の現象解析にも電子計算機による計算手法を確立し、変圧器の使用状態での問題点の把握と運転の信頼性向上を目指している。その代表例を次に述べる。

### (1) 絶縁協調

雷撃によるサージ伝搬特性の計算と機器、送電線各部の異常電圧解析

### (2) 騒音分布

音の反射、回折、透過を考慮した騒音分布の解析(図11に本解析結果の一例を示す。)

### (3) 変圧器内部事故時の電流分布計算、励磁突入電流計算

### (4) 変圧器の耐震強度の解析



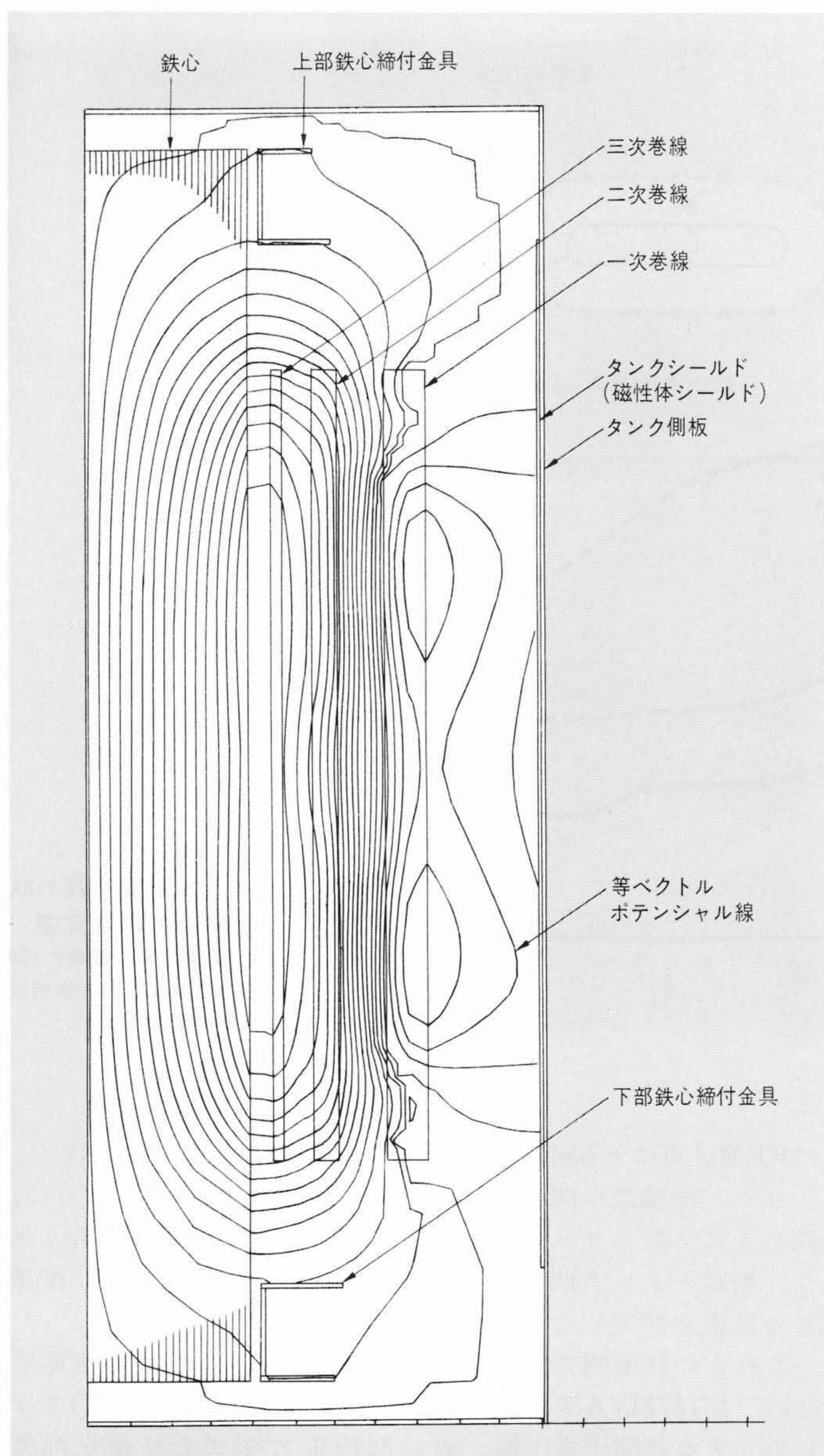


図9 巻線の漏れ磁界分布 マクスウェルの電磁方程式による一次、二次、三次同時負荷時の等ベクトルポテンシャル線の分布例を示す。

## 8 結 言

以上述べたように、日立製作所は、超々高圧変圧器の開発に当たっては電力系統の高電圧、大容量化と社会環境の変化に対処するため、新構造の開発と信頼性の確保に努め、幾多の記録的変圧器を製作するとともに、海外への技術供与も行なってきたが、今後とも時代の要求にかなった信頼性の高い製品の開発に全力をあげる考えである。

終わりに、終始、御指導、御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る次第である。

## 参考文献

- 1) 川嶋ほか：500kV 変圧器の信頼性向上，日立評論，57，905（昭50-11）
- 2) 鹿島ほか：500kV 1,000/3MVA単巻変圧器，日立評論，55，219（昭48-3）
- 3) 福田ほか：関西電力奥多々良木発電所納 500kV 640MVA変圧器，日立評論，56，115（昭49-2）

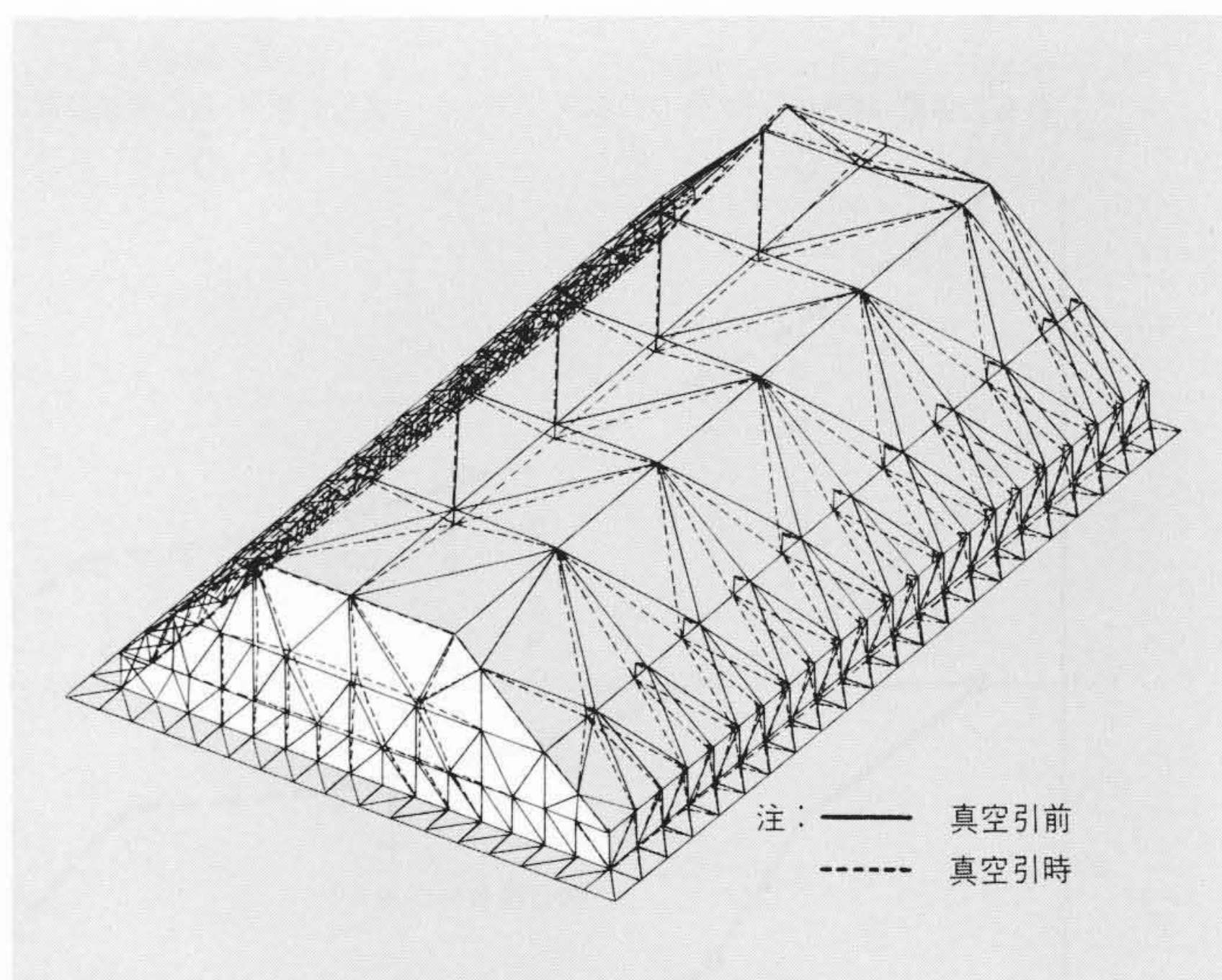


図10 変圧器カバーの変形量計算結果 400kV 500MVA変圧器カバーの真空引時の変形量を有限要素法により計算したものである。

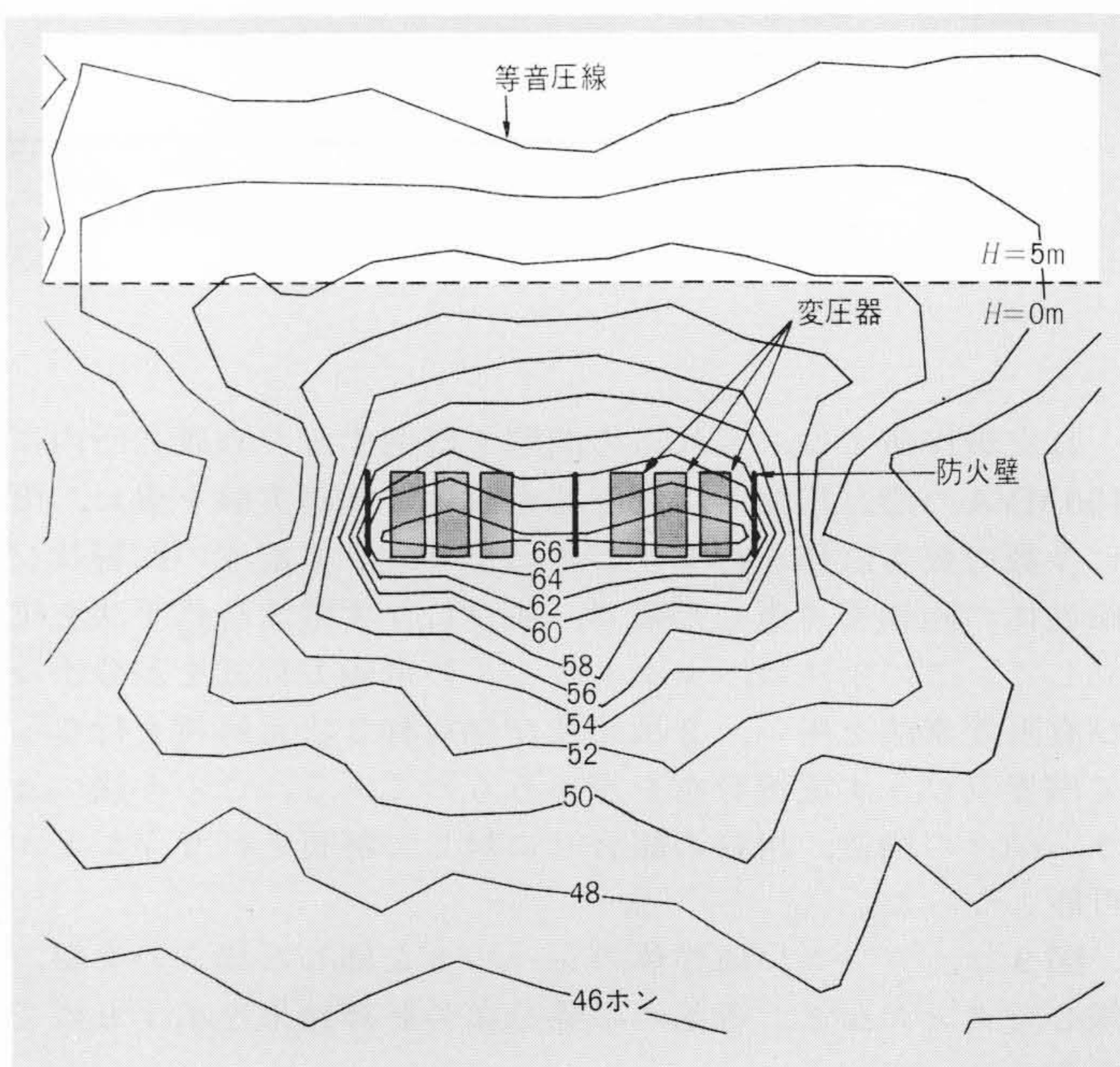


図11 変電所内の騒音分布計算 土地の高低差(5m)及び防火壁の影響を考慮した計算例を示す。

- 4) A. Miki et al. : A Calculation Method for Impulse Voltage Distribution and Transferred Voltage in Transformer Windings IEEE Paper F77 583-8
- 5) U. Kamata et al. : Lightning Impulse Volt-Time Characteristics in Transformer Insulation IEEE Paper No. C73 028-8 (1973)
- 6) K. Kurita et al. : Mechanical Strength of Transformer Windings under Short-Circuit Conditions IEEE Transactions on PAS Vol.88 p.222 (1969)
- 7) K. Hiraishi et al. : Mechanical Strength of Transformer Windings under Short-Circuit Conditions IEEE Transactions on PAS Vol.90 p.2381 (1971)
- 8) 秋丸ほか：275kV 660MVA負荷時タップ切換変圧器，日立評論，54，117（昭47-2）