

省エネルギー時代における大容量変圧器の諸問題

Various Aspects of Transformer Design in Energy-Saving Age

我が国の大容量変圧器は、電力系統容量の増加を背景として、大容量化によるスケールメリットの面から損失低減がなされてきた。しかし、輸送上の制約から寸法、重量に限界を生じ、大容量化による損失低減効果が少なくなっている。省エネルギー時代での大容量変圧器は、信頼性の高い技術の積み上げにより、これらの制約を打破し省エネルギーと省資材とを実現しなければならない。

日立製作所では、変圧器を構成する巻線、鉄心、タンクなどのすべての構造物と、絶縁、冷却、漏れ磁束、機械強度などのすべての特性解析を総合し、省エネルギー設計に努めている。本稿は、これらの技術について、その概要を取りまとめ述べたものである。

鹿島芳丈* *Yoshitake Kashima*
 奥山賢一** *Ken'ichi Okuyama*
 乾 芳彰*** *Yoshiaki Inui*

1 緒 言

我が国の電力消費地は、国土の20%以下の平野部に集中している。このため、送電系統は大電力送電という点に特長があり、変圧器についても、幾つかの特有の仕様が要求されている。

第一の特長は、系統短絡容量を制限するため、大容量器でも高インピーダンス器が用いられていることである。第二の特長は、鉄道が狭軌であり、重量、寸法上の制約が大きいことである。例えば、500kV 1,000/3 MVA 単巻変圧器では巻線を二組並列としているが、効率面からみると500/3 MVA器を2台並列にしたのと大差がなく、容量増によるスケールメリットが少ない。第三の特長は、低騒音仕様のため冷却器の単器冷却容量が低下し、補機損が増加する傾向にあることである。

変圧器の設計製作では、上述のような技術的制約と仕様のもとに、経済性と信頼性が追求される。これらの条件はすべて相互に関連しており、要求事項の優先順位に適合した製品を作りあげていくことになる。本稿は、変圧器損失である鉄損、抵抗損、漂遊損及び補機損について、日立製作所での最近の技術的改善について述べる。

2 鉄損の低減と鉄心占積率の向上

鉄損の低減には、まず鉄損の少ない鉄心材料を使うことが第一である。最近の高配向性けい素鋼板の進歩によって損失、騒音、重量などの低減は著しい。しかし、材料のもつ特性を十分に生かすためには構造設計、製作技術を十分検討する必要がある。例えば、額縁接合によって磁束をできるだけけい素鋼板の圧延方向に流れやすくしたり、鉄心組立時に起立装置上に積鉄し、装置ごと鉄心を起立させて機械的なひずみを加えないような配慮を施すことにより、鉄心製作時の損失や騒音増加を最小限に抑制することができ、材料特性を有効に発揮することができる。しかし、三相三脚鉄心などでは図1に示すように鉄心内磁界が位相により変化し、図2に示すようにV脚とヨークの接合部には回転磁界が発生し、材料そのものの損失値にまで鉄損を低減することは難しい。しかし、このような解析技術の進歩とともに内鉄形変圧器では、鉄心単独で組立を行ない励磁巻線を巻回して振動、騒音、損

失、温度上昇及びその他の特性を容易に測定できる。これによる構造設計面での進歩も著しく、バインド鉄心の締付力と騒音の関心の解析などについても多くの知見を得て、図3に示すように鉄損、騒音の低減には著しい進展がみられてきた。今後もこのような改善は精力的に進める計画である。

次に占積率向上の観点からみると、鉄心重量を下げることは輸送限界寸法の厳しい変圧器には常に考慮されるべき課題である。特に、円形断面をもつ内鉄形変圧器鉄心では、鉄心の外接円内にいかに多く鉄心材料を積み込むかが一つのポイントとなる。大容量変圧器では、鉄心内に油の冷却通路を設け温度上昇を抑制しているため、この解析が鉄心小形化への道程の一つである。図4に示すように、鉄心温度上昇について測定結果とよく一致する計算手法をもっていることは、省エネルギー、省資源設計にとって非常に有力な武器である。

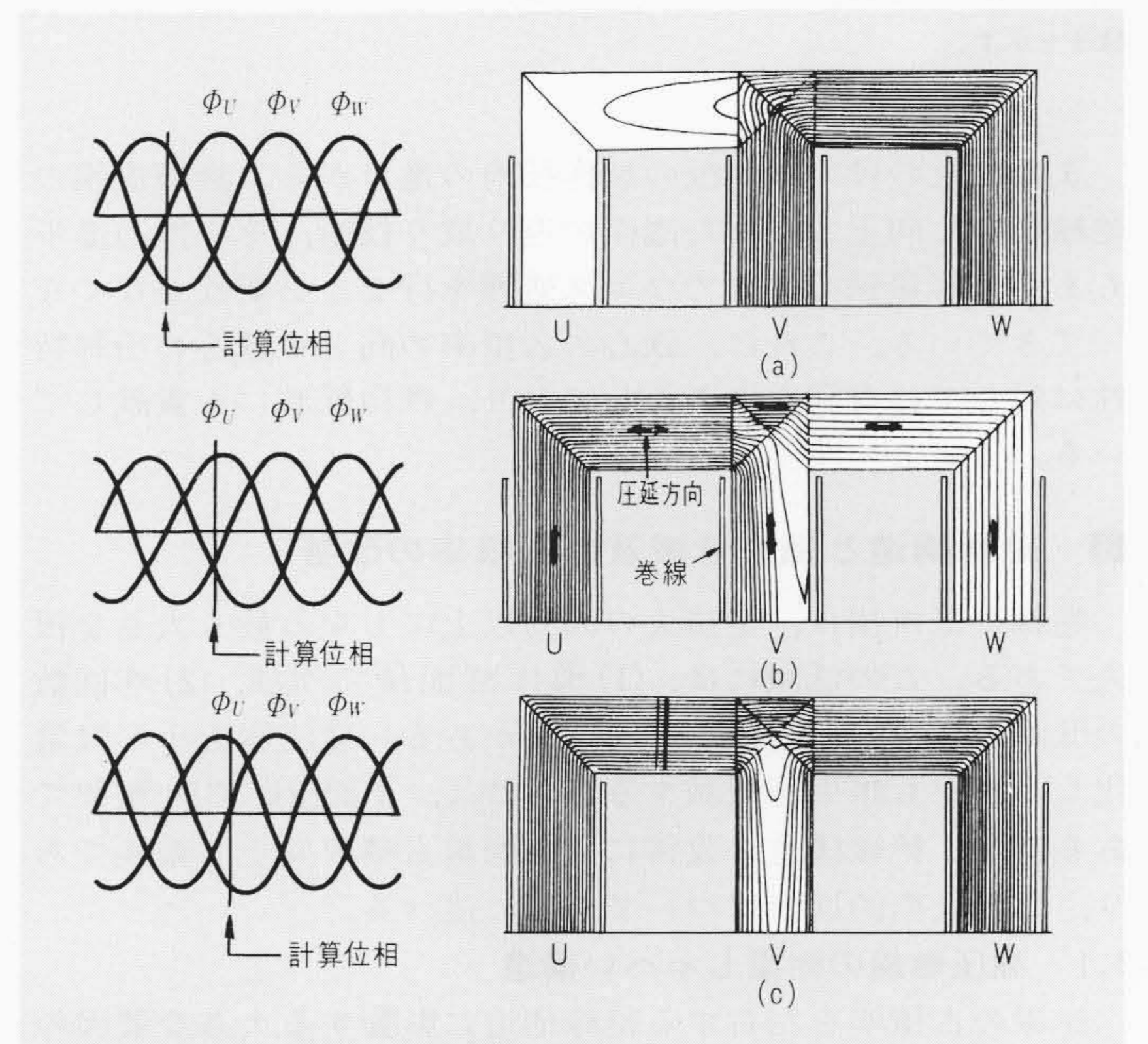


図1 三相三脚鉄心磁束分布 脚とヨークの磁束分布が、電圧位相により異なる状態を示したものである。

* 日立製作所国分工場 ** 日立製作所国分工場 工学博士 *** 日立製作所日立研究所

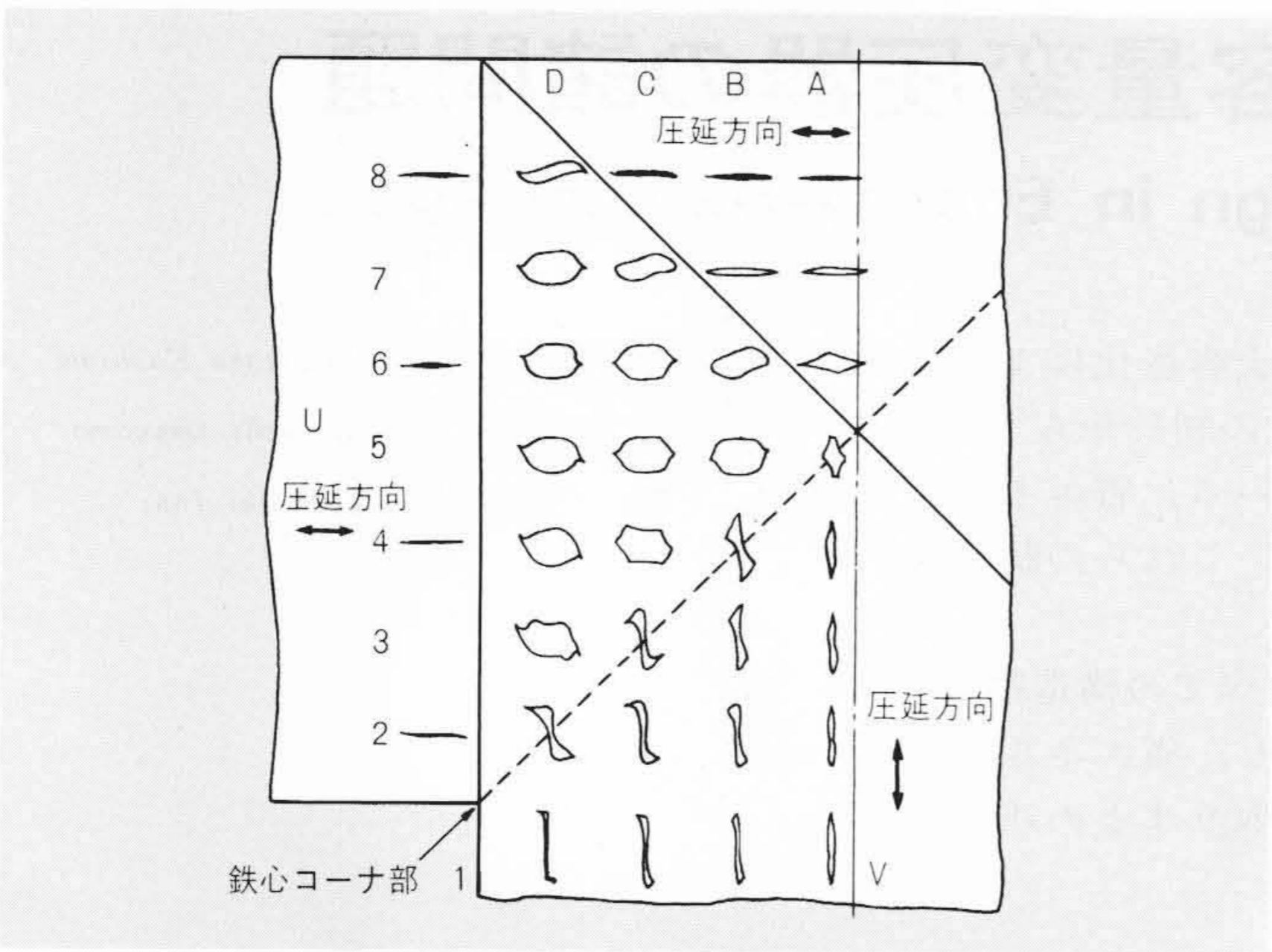


図2 鉄心T接合部の回転磁界磁束分布 三相鉄心のV脚T接合部での回転磁界により、圧延方向以外に磁束が流れる。

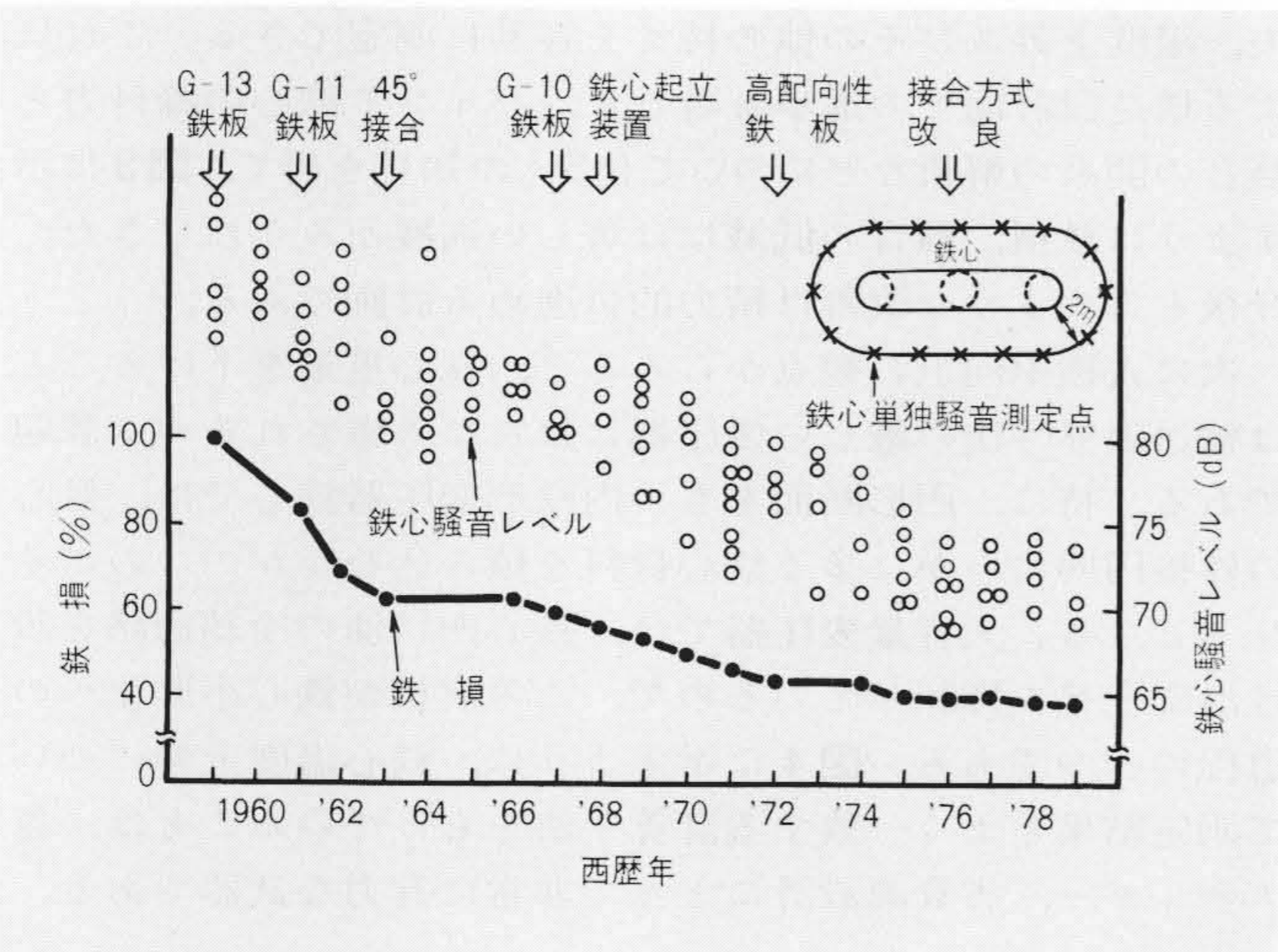


図3 鉄損、騒音の低減 材料、構造の進歩により低減がなされてきた様子を示す。

また最近のけい素鋼板の製作技術の進歩から、無機皮膜の絶縁性能も向上し、また端面の返り取り技術、その他の進歩もあり大容量鉄心にまでワニス処理を行なう必要性がなくなってきた。これは、鉄心の占積率の向上や鉄心の冷却特性に対しては有利な働きをしており、鉄損低減にも貢献している。

3 絶縁構造と損失低減及び占積率の改善

巻線の抵抗損は、全損失の50%以上にもなる最も大きな損失である。この低減には、(1) 導体断面積の増加、(2) 巻回数の低減、(3) 巻線平均長さの低減がある。変圧器を小形軽量化し、しかも損失を低減するためには、上記(2)、(3)が重要であるほか、絶縁構造の改善による巻線占積率向上も重要であり、この技術的進歩について以下に述べる。

3.1 高圧巻線の耐雷しゃへい構造

巻線の占積率を左右する絶縁構造に影響する大きな要因の一つは耐雷絶縁方式であり、高圧円板巻線の雷サージに対する電位分布の改善、すなわちしゃへい方式が挙げられる。これにはインタリーブ巻線と、日立製作所が開発したCCシールド(コンデンサカップリングシールド)巻線がある。

表1にこれらの巻線の基本構造と特長の概要を示す。巻線

の導体は、大容量化とともに断面積を増すことになるが、うず電流損を増加させないためには導体を分割する必要がある。この場合、巻線の占積率を向上するためには、並列導体間の絶縁が少ないほうが望ましく、数本の平角線を相互に絶縁し、これに外装絶縁を行なった多導体電線や、PVF(ポリビニルホルマール)などで絶縁皮膜を設けた平角線を転位して一括外装した転位電線などが用いられている。

インタリーブ巻線を、巻回数が少なく断面積の多い大容量器に用いると並列導体が多くなり、構造が複雑となる。また逆接続があるため、転位電線を用いてインタリーブ巻線とするのはほとんど不可能である。これに対しCCシールド巻線は、導体、シールド共に無接続で巻回できる上、大容量器になるほど絶縁物の巻線中に占める比率が減少し、シールド配置を工夫することにより全体の占積率を向上することができる。

日立製作所ではこのような点に着目し、図5に示すように、導体寸法、漏れ磁束密度などを考慮してしゃへい方式を選択し、電圧、容量に応じて最も占積率の良い巻線を製作している。更に、インタリーブ巻線でも、導体接続が少なく、直列静電容量の大きな日立製作所独自の構造を開発して、より高

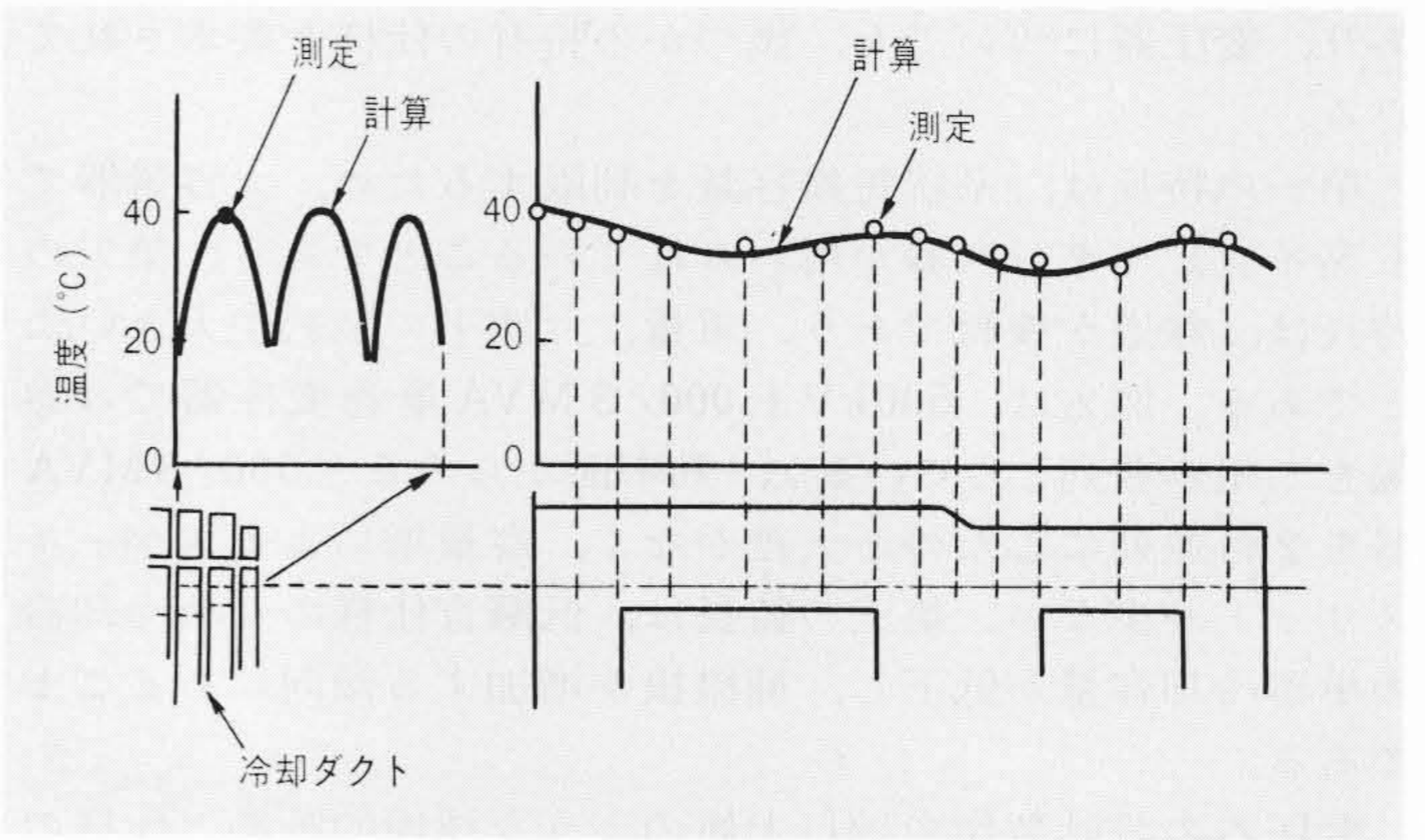


図4 鉄心内部温度上昇分布 T接合部などの発生損失による温度上昇と冷却効果を示す。

表1 円板巻線のしゃへい方式 円板巻線の雷インパルスに対するしゃへい方式にはそれぞれ特長があり、容量、電圧で使い分ける必要がある。

| No. | 項目 | インタリーブ円板巻線 | CCシールド円板巻線 |
|-----|--------|--|--|
| 1 | 基本形状 | <p>(a) 単線インタリーブ (b) 並列導体インタリーブ</p> | <p>シールド</p> |
| 2 | 接続 | A部で導体を接続 | 導体、シールドとも接続不要 |
| 3 | 直列静電容量 | (1) 巻回数に比例して増減。 (2) 大きさの調整困難。 (3) 巻線の20~50%を行なう。 | (1) コイル巻回数に無関係。 (2) シールド巻回数と接続で調整。 (3) 線路側にシールドを入れる。 |
| 4 | 巻線占積率 | (1) 並列導体増えると占積率悪い。 (2) 隣接巻回発生電圧大きく、導体絶縁を薄くできない。 | (1) 大容量ほど占積率良い。 (2) シールド絶縁を増やし、導体絶縁を薄くできる。 |

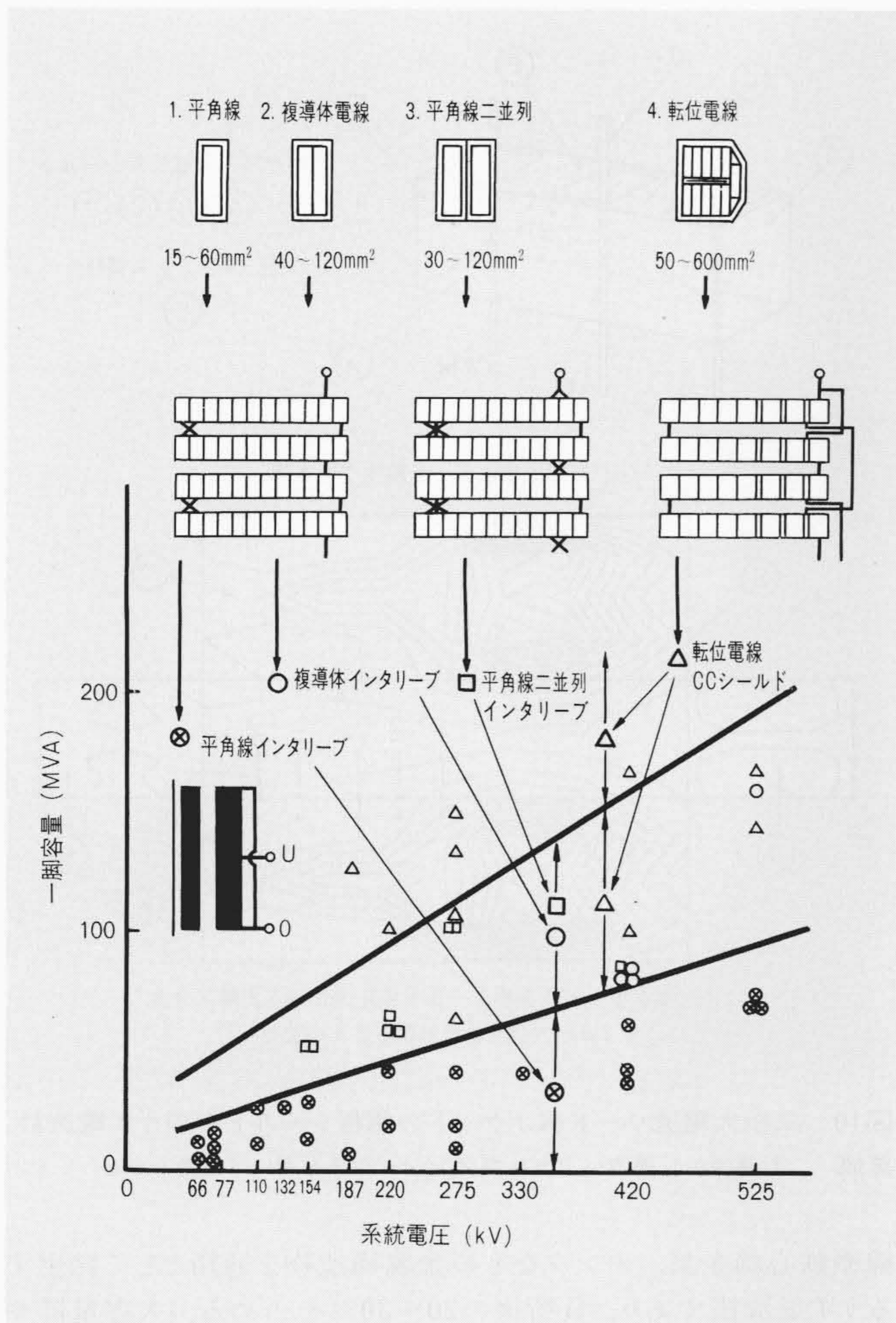


図5 円板巻線の適用例 導体種類, 電圧, 電流による最適適用範囲の例を示す。

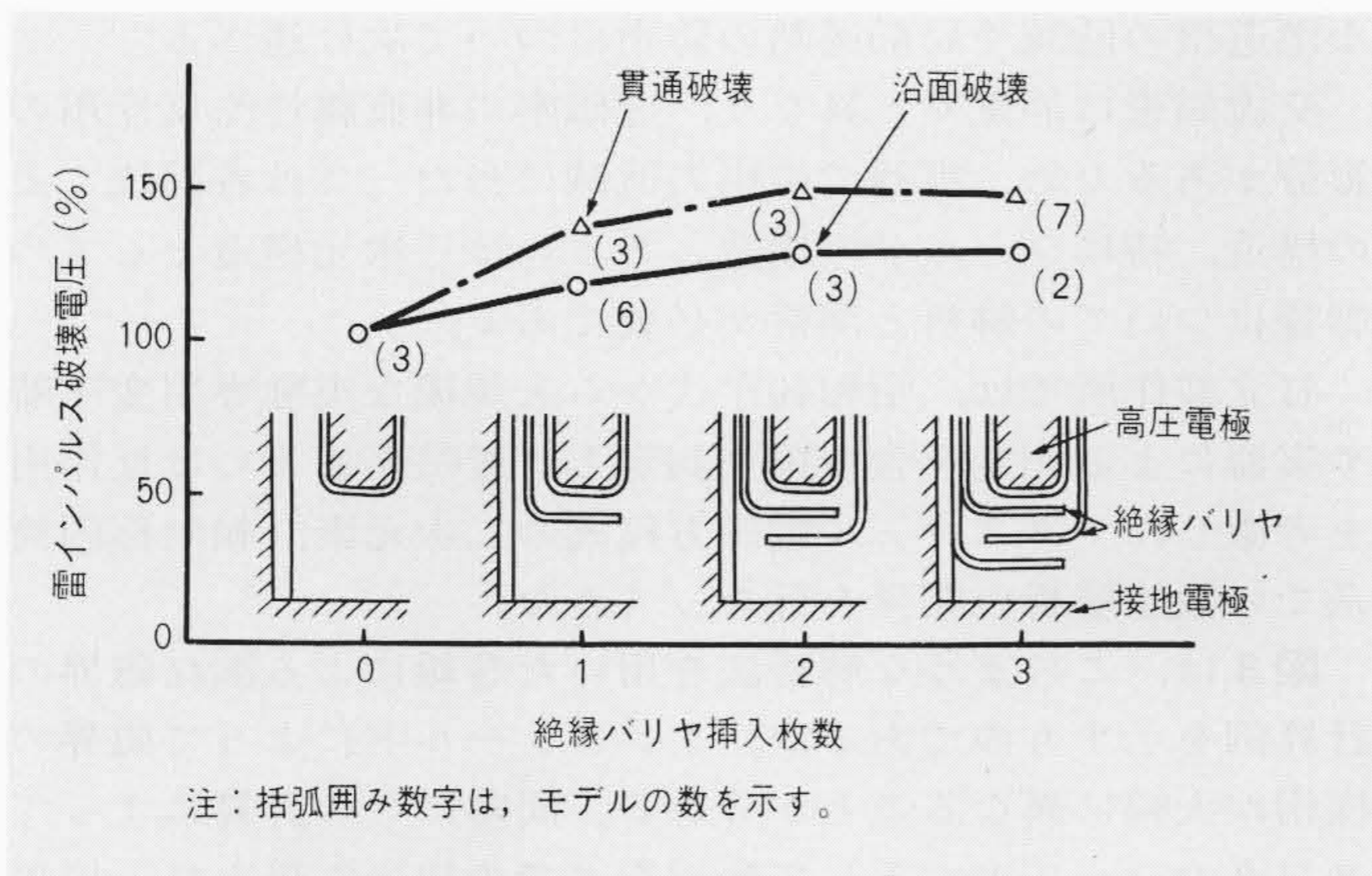


図6 雷インパルス破壊電圧に及ぼす絶縁バリアの効果 バリア数の有効性を同一電極配置でモデル実験したものを示す。

い信頼性を得るべく努力している。

3.2 ハイブリッド絶縁

変圧器絶縁は、誘電率の高い絶縁紙と誘電率の低い油との複合絶縁であり、油又は絶縁紙中に異常がないかぎり、絶縁破壊は油隙部分から生ずる。油隙及び絶縁物の形状寸法は絶縁だけでなく冷却、機械強度、流動帯電、リード線引出しなどの要因を考えて決定されるため、変圧器の仕様、部位によりそれぞれ異なる。占積率向上のための絶縁構造の改善には、これらの部位に対して部分放電、あるいは破壊の実験的解明と、

発生電圧・電界の理論的解明がまず必要である。これについての日立製作所での技術的進歩は次に述べるとおりである。

- (1) 多巻線系の雷インパルス電位振動計算を開発し、巻線の任意の部位、時間での電位が求められるようにした。
- (2) 差分法、有限要素法などでの電界計算法を発展させ、任意部位の電界を求められるようにした。
- (3) 商用周波だけでなく、雷インパルスに対しても部分放電測定法を開発し、雷インパルス部分放電の有害性の限界を明確にした。
- (4) あらゆる部位について、多数のモデルにより部分放電を含めた破壊現象と、有害性、不整現象の原因などを明確にした。
- (5) 部分放電、不整現象の原因に関連する品質管理技術を向上させることにより、部分放電や破壊のばらつきが減少した。

日立製作所は、UHV(Ultra High Voltage)絶縁を含む超高压絶縁構造として、上述の絶縁技術の進歩をもとに、絶縁寸法の縮小に効果的なハイブリッド絶縁を実用化した。ハイブリッド絶縁は、各部位のデータを横断的に統合整理し油

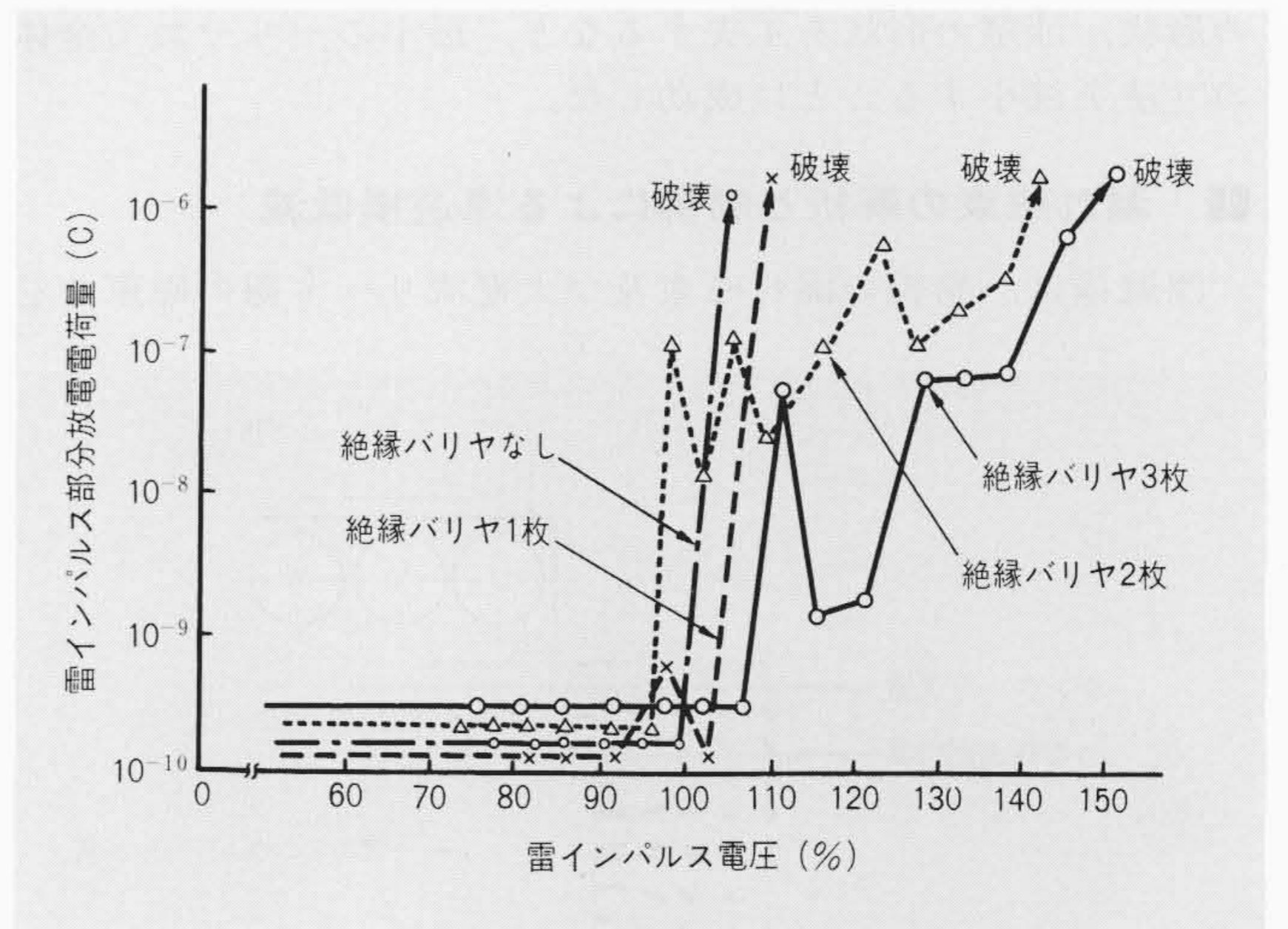


図7 絶縁バリアの有無による雷インパルス部分放電特性の相違 バリアは部分放電開始電圧はあまり向上させず、破壊電圧向上の効果が大きい。

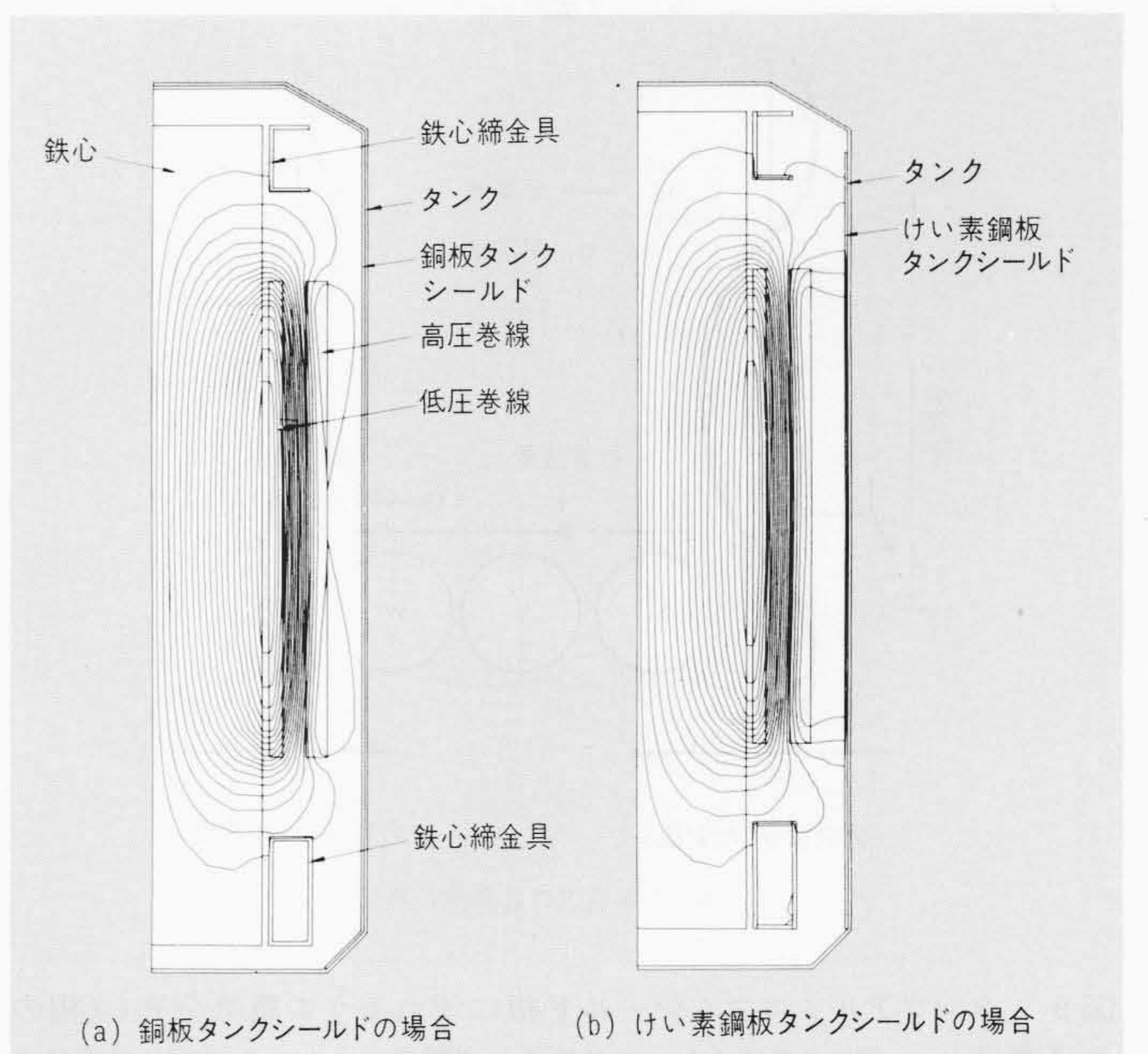


図8 漏れ磁束分布の計算例 巻線からの漏れ磁束分布を、電子計算機で計算した。

隙をバリヤで分割する油隙細分割方式と、誘導体で油隙を充填する充填絶縁方式を組み合わせ、両者の最も良い配分により構造を合理化し、占積率を向上したものである。

一般に準平等電界にある電極間をバリヤで分割していくと、全体の破壊電圧が上昇することが知られている。しかし、巻線表面のように電極がある曲率の凹凸がある部位については、分割の効果が減殺される。このような電極に対向する油隙を第一油隙といい、ハイブリッド絶縁では特別な考慮を払っている。

例えば、図6は雷インパルスに対する巻線端部のバリヤの効果を実験したものである。バリヤ数が増えると、破壊電圧は大幅に上昇するが限界がある。同じモデルでの部分放電の測定結果では、図7に示すように、低レベルの部分放電はバリヤ数を増やしてもあまり上昇はしない。この部分放電を一定レベル以下としなければバリヤ数をむやみに増しても絶縁上有効でない。

ハイブリッド絶縁では第一油隙の電界を調整するため、電極形状を工夫し、また誘導体シールドを配置したり、絶縁物の形状、油隙の形状を工夫するなど、最小のバリヤ数で全体の寸法を縮小することに成功した。

4 漏れ磁束の解析と制御による漂遊損低減

漂遊損は、巻線の漏れ磁束及び大電流リード線の磁束が巻

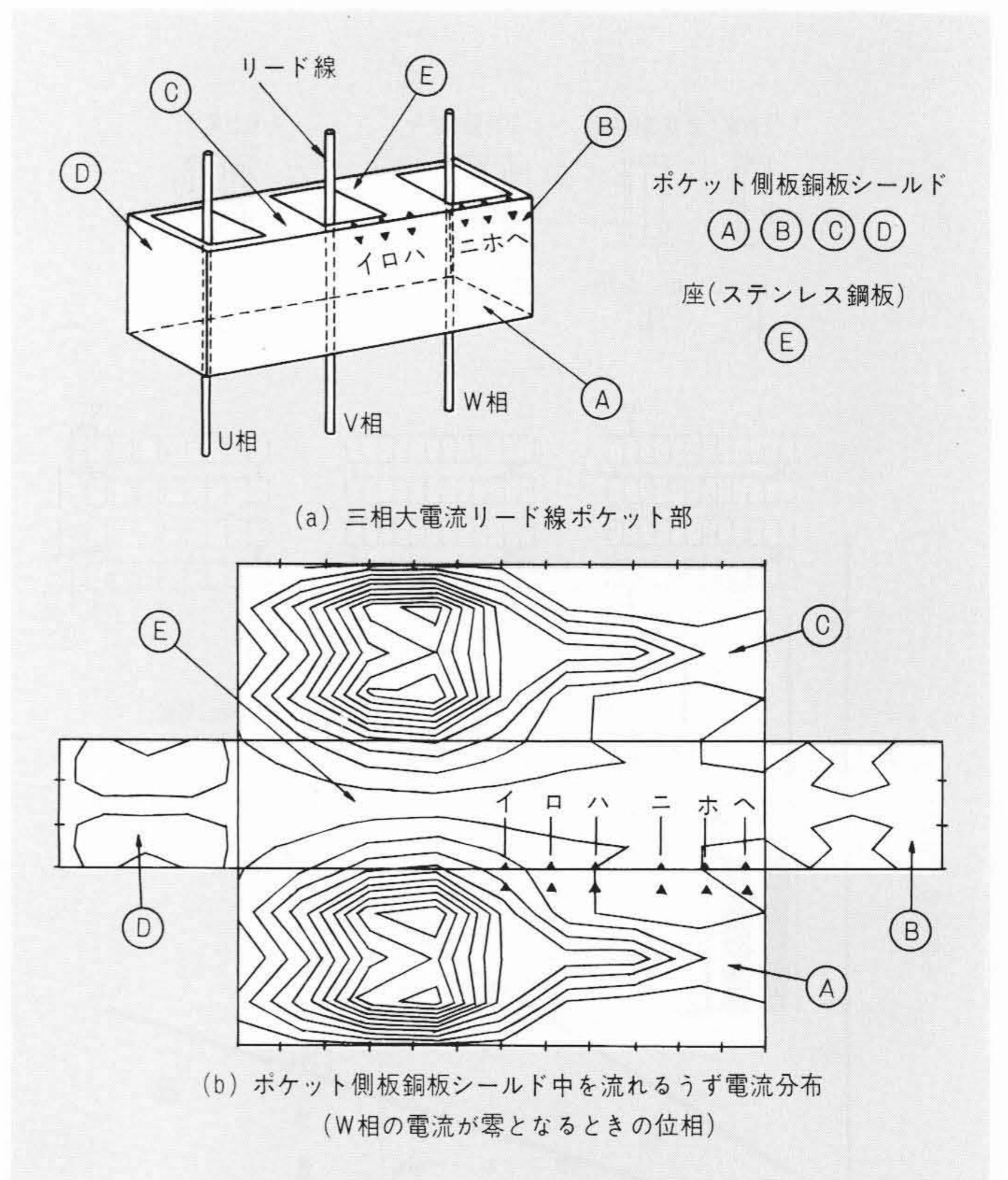


図10 三相大電流リード線ポケットの銅板シールド中のうず電流計算値 計算値は、電流ベクトルポテンシャル法を用いて計算した。

線や鉄心締金具、タンクなどの金属構造物を通路として発生するうず電流損であり、負荷損の20~30%を占める。大容量器や高インピーダンス器では、磁束量あるいは磁束密度の増大から漂遊損失が増加するだけでなく、損失発生が元来局部的に集中する性質から局部過熱を生ずるおそれがある。このような漂遊損の低減や局部過熱の防止について次に述べる。

交流磁束は静電界と異なり、透磁率の非直線性や反作用の影響があるため、実器での損失低減に当たっては各部位ごとの構造、特にシールドの構造、あるいは三次元構造としての影響についての解析と洞察が必要である。

日立製作所では、昭和40年代から大規模な実験専用変圧器や実器による測定を含む損失測定と、透磁率あるいは反作用を考慮したマクスウェル電磁方程式の二次元素、軸対称円筒系での数値解析の開発を行ってきた。

図8は、このような解析法を用いた巻線による漏れ磁界の計算例を示すものであるが、タンクシールドによって磁界の様相が大幅に異なることが分かる。同時にこの計算によってタンクやシールド、そして巻線などでの損失も得られ、損失低減のための構造改善ができる。

(1) 巻線の漂遊損低減

巻線の漂遊損は、全漂遊損の20~50%を占める。磁界計算の結果をもとに、アンペアターンの調整あるいは転位電線、平角線の適用など最適導体の選定を行なっている。更に多数の並列導体で構成される低圧大電流巻線については、最適転位法を磁界計算をもとに決定し、循環電流損を最小にするようにしている。

(2) タンクの漂遊損低減

容量が小さい場合は、巻線のアンペアターンを調整してタンクへの漏れ磁束を制御する方法が用いられるが、大容量器では、銅板あるいはけい素鋼板のシールドにより積極的に損

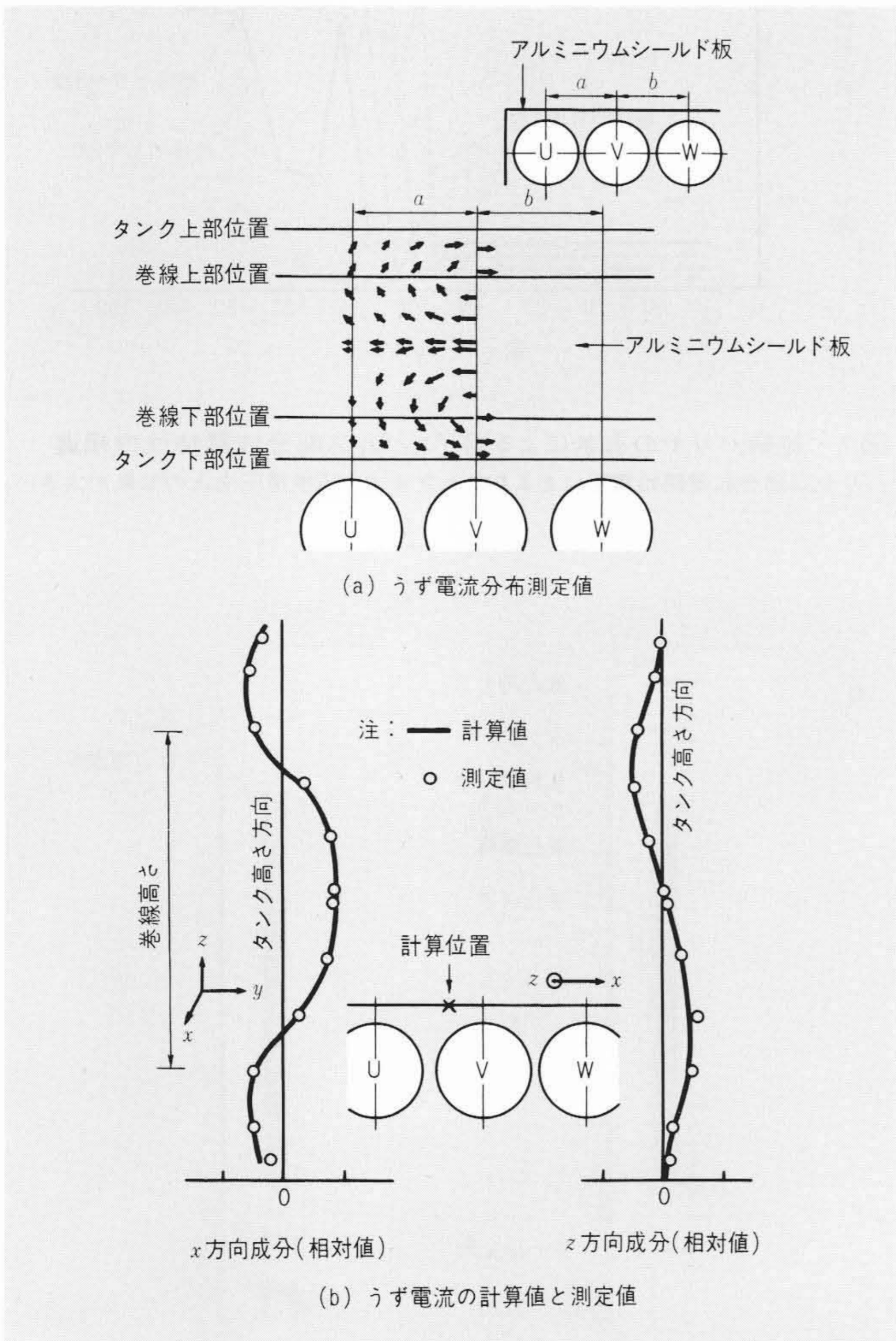


図9 タンクアルミニウムシールド板に流れるうず電流分布(V相のみ通電時) アルミニウムシールド板のうず電流は、シールド板に垂直に侵入しようとする磁束を包みこむように流れている(a図)。相中心部から離れたタンク長手方向の位置のシールド板のうず電流も、精度よく計算できる。

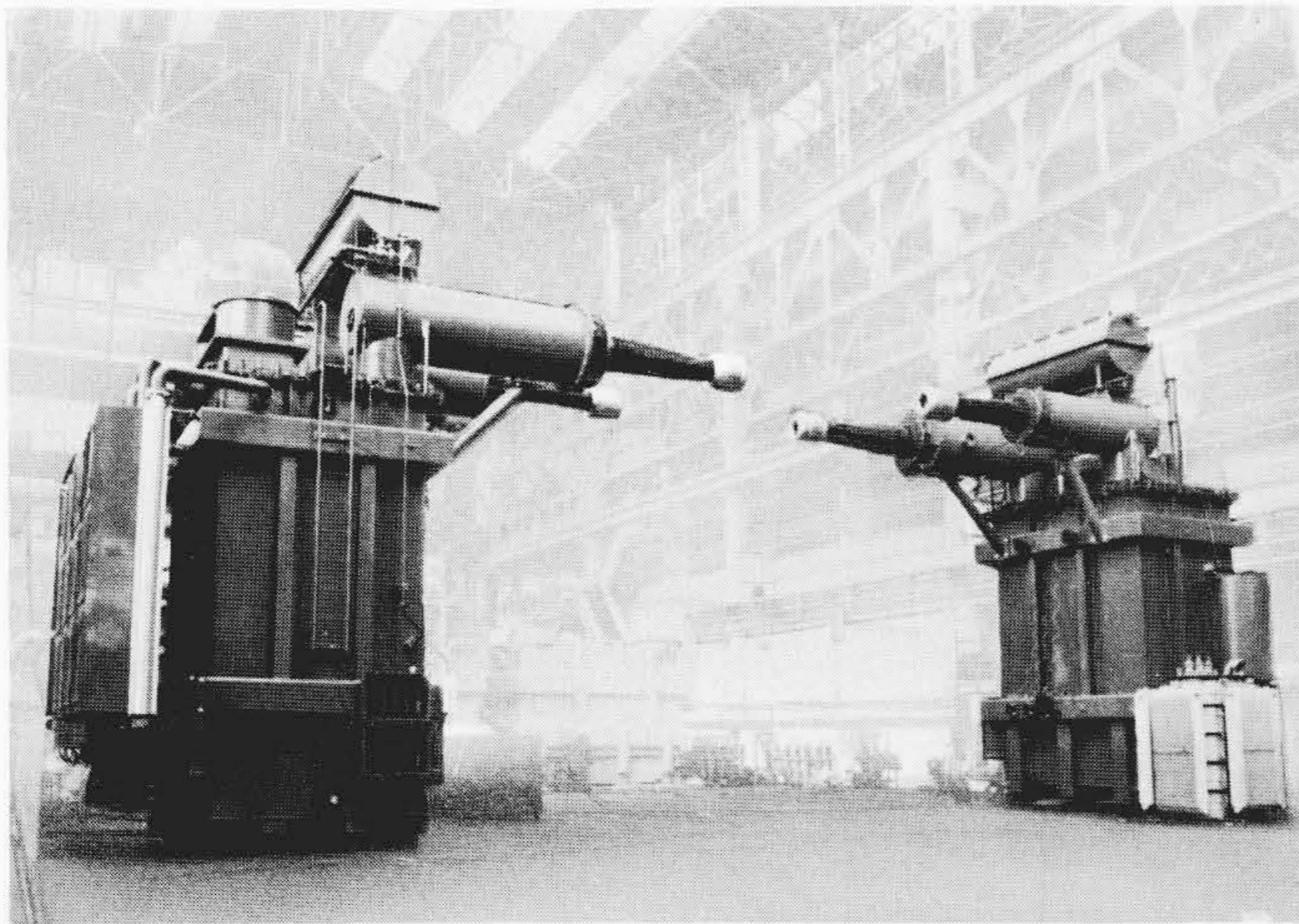


図11 345kV, 1,008/3 MVA変圧器 高圧巻線を転位電線を用いたCCシールド円板巻線とし、非分割巻線構成として全損失を低減している。

失を低減する。図9はタンクシールド中のうず電流の分布を示すものであるが、損失と同時に局部過熱のチェックも行なわれる。シールドを設けることにより、タンク損失は数分の一から数十分の一に低減される。

(3) 内部構造物の漂遊損低減

鉄心当板、締金具などの内部構造物は、絶縁物と接している場合が多く、冷却条件も個々に異なるため、局部過熱に特に留意する必要がある。このため、各部位についてモデル実験、磁界解析と実器測定データにより、例えば、鉄心締金具の小形化、単相センタコア鉄心の当板の廃止、鉄心表面部分のスリットの追加、非磁性材の使用などの対策を行なっている。これらの効果は、一般には油中温度上昇試験で確認しているが、最近では気中で定格電流の50~70%を短時間通電する試験も試みており、有力な手段の一つとなっている。

(4) 大電流ブッシング、リード線部分の漂遊損低減

低電流大電流リード線周辺、特にブッシングポケット及びカバー部については、リード線配置を工夫し磁界制御を行なう。また、銅板シールドあるいは非磁性材が使用される。相分離母線と連なるブッシングカバー部は、連続形相分離母線の考えを応用し、カバーをアルミニウム製として両端で三相

一括するとともに、カバーとポケット座を電氣的に接続し損失低減とともに、他の構造物への漏れ磁界を少なくしている。図10は、三相大電流リード線ポケットの銅板シールドに流れるうず電流分布を示すものである。電流ベクトルポテンシャル法により解析したもので、三次元的物体を展開して、模擬三次元的取扱いを行なう場合に有効である。

漂遊損低減の手段は、上述したように磁界集中を減らすとか、シールドにより損失を減らす方法が一般であった。最近では、これを一歩進めて漏れ磁束を希望する通路を通し、全体のうず電流損を小さくする方法も試みられている。この方法は、巻線と鉄心締金具の間に、けい素銅板による磁束制御用クランプを設け、締金具、タンクなどへの磁束を吸収し、巻線端の半径方向漏れ磁束を低減するものである。この方法は、構造、仕様によっては従来以上の損失低減を行なう上で有効な手段である。

5 巻線構造と損失低減

5.1 巻線配置の改善

鉄心や巻線の占積率向上、あるいは各種特性の解析技術の向上により巻線の配置、構成を見直し、より合理的な構成とすることにより全体の損失が低減される。

(1) 超大容量発電所用変圧器

従来、高圧巻線を二分割する二重同心配置構造が用いられていたが、鉄心構造と製作技術、漏れ磁束や機械強度の解析制御技術の進歩により、巻線を非分割で製作できる容量は増大している。転位電線を用いたCCシールド連続円板巻線はこのような大容量器に最適であり、日立製作所では既に図11に示すように、345kV, 1,008/3 MVA変圧器を製作している。これにより、1,000~1,500MVA級について非分割構造を採用し、全体の損失を低減するとともに高負荷運転される発電所に、より適合した変圧器を製作できる見通しを得た。

(2) 500kV変電所用変圧器

鉄道輸送上の制約から、巻線を二組み又は三組み並列としているが、ハイブリッド絶縁その他の適用により、巻線数を減らすことが可能となりつつある。1,000/3 MVAを巻線二組みから巻線一組みに、1,500/3 MVAを巻線三組みから巻線二組みにすることにより、損失をそれぞれ20%、10%程度

| No. | 方式 | 結線 | 従来構造(I) | 従来構造(II) | 新構造 |
|-----|------|---|-----------------------|----------|----------|
| 1 | 極性切換 | <p>主巻線 タップ巻線 極性切換器 タップ切換器</p> | <p>二次巻線 一次主巻線</p> | <p>U</p> | |
| 2 | 転位切換 | <p>主巻線 転位切換器 疎タップ巻線 密タップ巻線 タップ切換器</p> | <p>二次巻線 一次主巻線</p> | <p>U</p> | <p>U</p> |

図12 タップ切換方式と巻線構造 転位切換と極性切換での代表的な巻線構成を示す。

低減できる。例えば、現在550/242kV, 750/3MVA変圧器を巻線一組みで製作しており、この巻線を二組み用いれば1,500/3MVA変圧器にできる。

このような大容量化により短絡時の巻線発生力が増大するが、電線断面積を増大させない方法として、無酸素銅半硬銅電線やハイボン(Hitachi Self-bonded)転位電線を実用化している。また、多くの実験に裏打された機械強度に関する計算技術の進歩の効果も大きい。

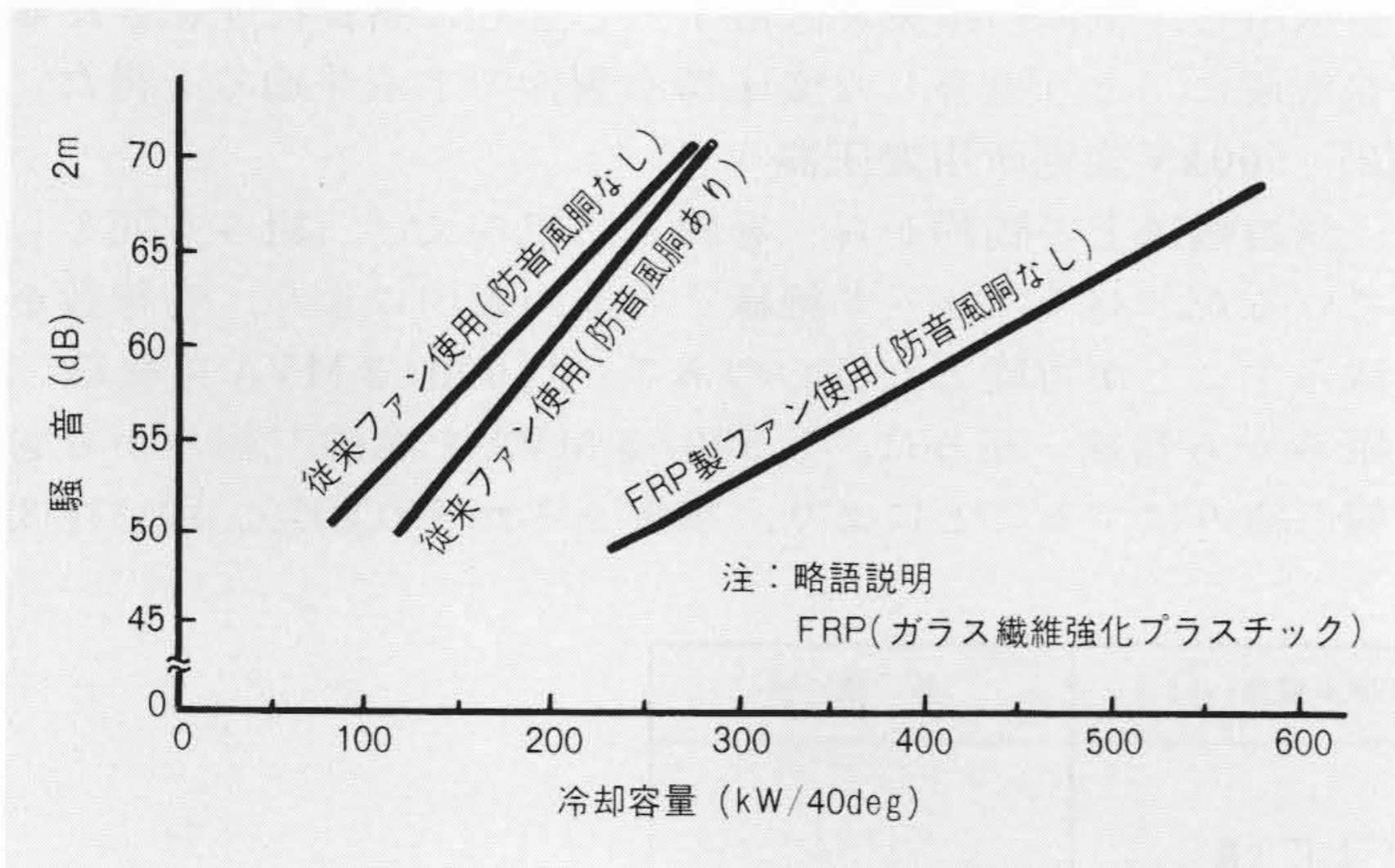
5.2 タップ巻線構造

負荷時タップ切換変圧器のタップ切換方式と巻線配置には、図12に示す極性切換方式と転位切換方式がある。極性切換方式は巻線構成が単純であるが、電流が最大となる最低電圧タップで巻回数が最大となるため、抵抗損が増加する。転位切換方式ではタップ巻線が二組みあり、構造が複雑となる上これを別置すれば巻線外径が大となる欠点がある。

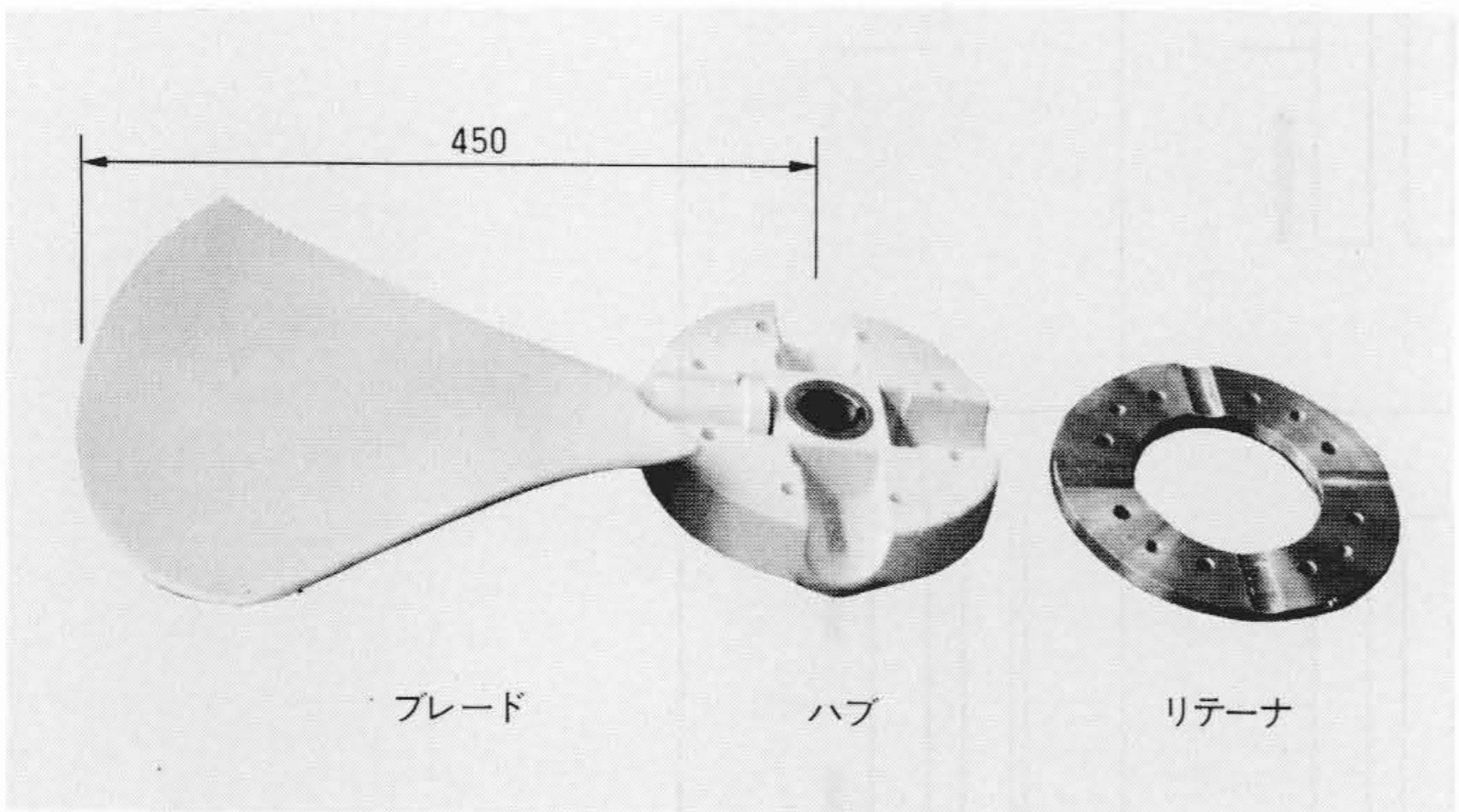
日立製作所では従来、転位切換方式を用いる場合、タップ巻線を主巻線の上下に配置する方式を採用してきたが、短絡時発生機械力、漏れ磁束、雷サージ移行電圧の解析技術の進歩、タンクシールドの改良などにより、この方式を200MVA級まで拡大するとともに、更に大容量器に対しては、図12に示すような新構造とし、更に今まで述べてきた施策を行なって300MVA級変圧器に実用化した。この結果では、全損失を最低タップで約15%、定格タップで約10%低減できた。

6 補機損の低減

低騒音化により冷却器の送風量低減、防音風胴取付など冷却効率が低下するため、冷却器取付台数が増加し補機損が増加する。日立製作所では昭和43年ごろから冷却器の大容量化



(a) 冷却器容量の比較



(b) ファンブレード形状

図13 FRPファンと冷却器性能 ファンブレードを形状の優れたFRP製とし冷却性能を大幅に向上した。

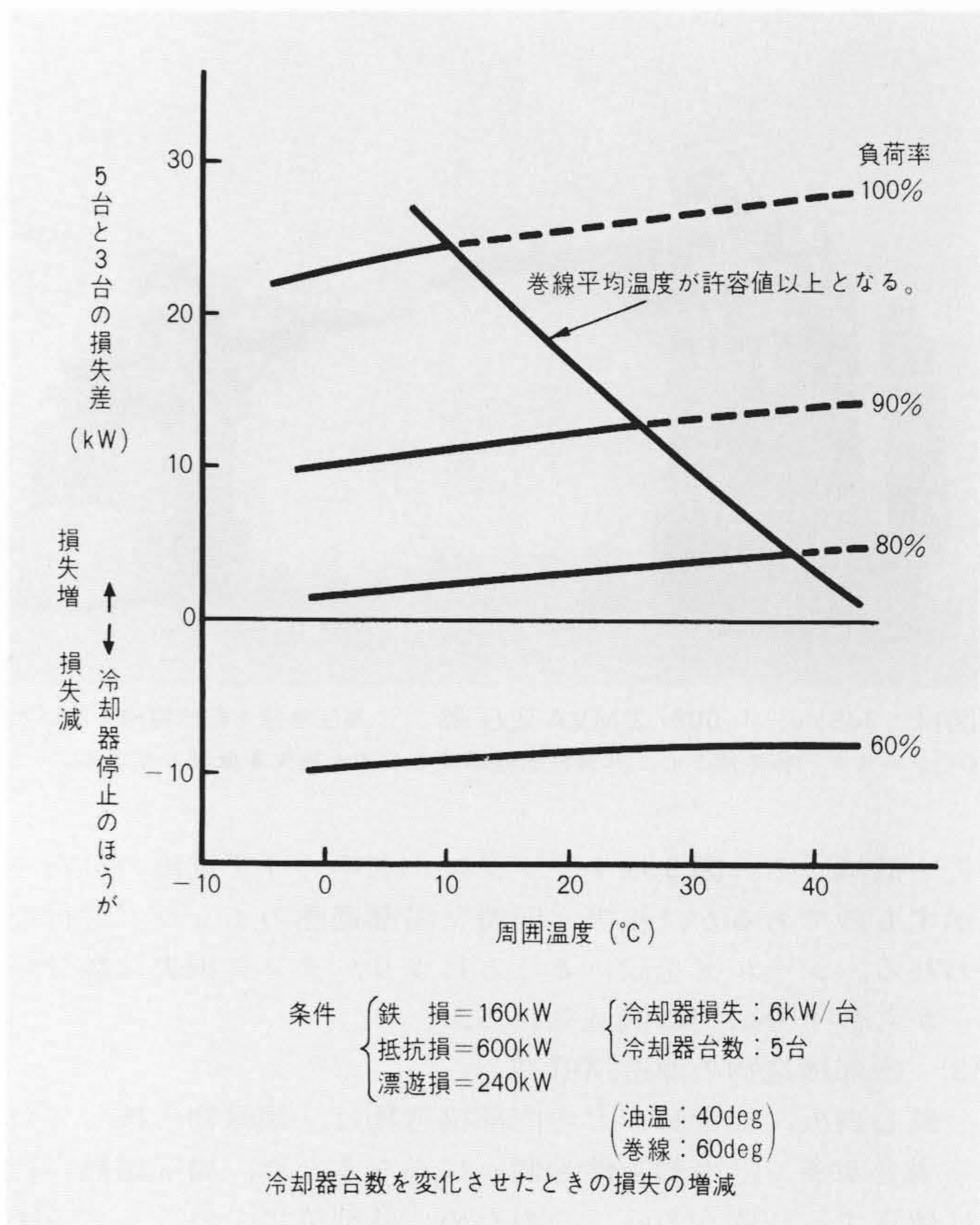


図14 負荷率、周温と冷却器台数による総合損失(計算例) 負荷率が高いと抵抗が増え、全損失は減少しない。

のためにアルミニウムプレート形のコンパクトクーラを採用し、取付台数の低減を図ってきた。しかし、従来の鋼板製のファンは空気抵抗も大きく騒音も大きいため、低騒音形冷却器に用いると冷却容量の低下が大きい。このため、FRP(ガラス繊維強化プラスチック)による新しいファンを採用し、高効率・大容量冷却器を開発した。FRPファンは、図13に示すようにその形状を空気力学的に最も効率良く製作でき、軽量で強度が大であることから大口径のものを容易に製作できる。本冷却器により、取付台数、損失共従来に比べ約60%に低減することができた。更に300MVA級で50ホン以下という超低騒音変圧器の製作も可能となった。

補機損については、負荷率あるいは周囲温度から、冷却器の運転台数を制御して低減することが可能である。しかし、負荷率が高い場合には巻線温度上昇による抵抗損増加を考えて、総合的に判断する必要がある。図14はその一例を示すものであるが、負荷率が60%以下ぐらにならないと全体損失の低減効果が少ないことが分かる。

7 結 言

現状の技術を中心に、大容量変圧器の省エネルギーの諸問題について述べたが、損失の利用あるいは運用面での損失低減についても、メーカー、ユーザー一体となり検討していく必要がある。更には、アモルファス、極低温導電材料、合成樹脂絶縁材料など新しい材料の応用についても今後の課題である。また構造面でも、巻線容量を大きくし、しかも輸送限界を打破するような分解・分割の新技术の開発も進めていく考えである。

終わりに、これらの技術開発と実用化に対し終始御指導、御援助をいただいた電力会社の関係各位に対し厚く御礼申し上げます。