

最近の変圧器低騒音化技術

Recent Noise Reduction Techniques for Power Transformers

発電所周辺の環境条件は年々厳しさを増して、変圧器やリアクトルは最近ほとんど低騒音仕様を要求され、加えて発電所の切迫した用地事情及び数次のオイルショックの影響で用地縮小化、設備合理化、省エネルギーなどの要請が高まっている。

日立製作所では、これらに応じるため据付面積の縮小、消火設備の合理化、据付工程の短縮や補機損の低減などに有効な高効率遮音板や高効率冷却器などを開発し、既にこれらの技術を適用して防音壁不付きで、75ホン級650MVA、70ホン級300MVAの低騒音変圧器を製作納入している。本稿は、これら最近の変圧器低騒音化技術について述べる。

前島正明* Masaaki Maejima

叶井 実** Minoru Kanoi

1 緒 言

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防止条例により騒音規制値を定めている。それ以来、環境保全の社会的要請が高まり、発電所の変圧器・リアクトルは最近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第二次オイルショックの影響によりますます用地の縮小化、省資材、省エネルギーの要望が高まっている。

したがって、発電所の計画に当たっては、その低騒音化対策が重要な課題であり、目標境界線騒音に対し適切な機器騒音レベルと有効な配置を決定しなければならない。日立製作所では、音の反射、回折、透過などを考慮した精度の高い騒音分布解析法を実用化し、適切な変圧器騒音仕様と配置の決定に活用している。

一方、変圧器の騒音対策は図1に示す振動・騒音伝搬経路を十分把握し、騒音仕様や機器仕様にあった対策を行わなければならない。その主な対策は主騒音源である鉄心振動騒音の低減、二次的原因となるタンク振動の抑制、防音壁による低減や冷却器騒音低減などが挙げられ、用地縮小化、設備合理化、省エネルギーなど時代の要求を反映した方法でなければならない。日立製作所では、工場・研究所が一体となり低騒音化技術の開発を推進し、鉄板防音壁と同等の防音効果をもつ高効率遮音板や従来比で10ホン低減できる高効率冷却器を開発した。そして本技術を適用して、防音壁不付きで75ホン級650MVA、70ホン級300MVAの画期的な低騒音変圧器を製作・納入した。これらの低騒音変圧器は、従来比で据付面積を30%、補機損を50%、据付工程を20%低減すると同時に、消火設備やメンテナンスの合理化も図っている。以下、日立製作所の最近の変圧器低騒音化技術について述べる。

2 鉄 心

鉄心振動が変圧器騒音の主因となっている。鉄心の磁束密度を低減すると騒音は低下するので、本体騒音低減対策としてよく用いられるが、変圧器が大形化し原価高になるので、この方法による低減はせいぜい数ホンまでである。基本的には鉄心材質や解析に基づく構造改善などにより、経済的な対策としなければならない。

日立製作所では各種の実器鉄心試作で検証された鉄心内磁

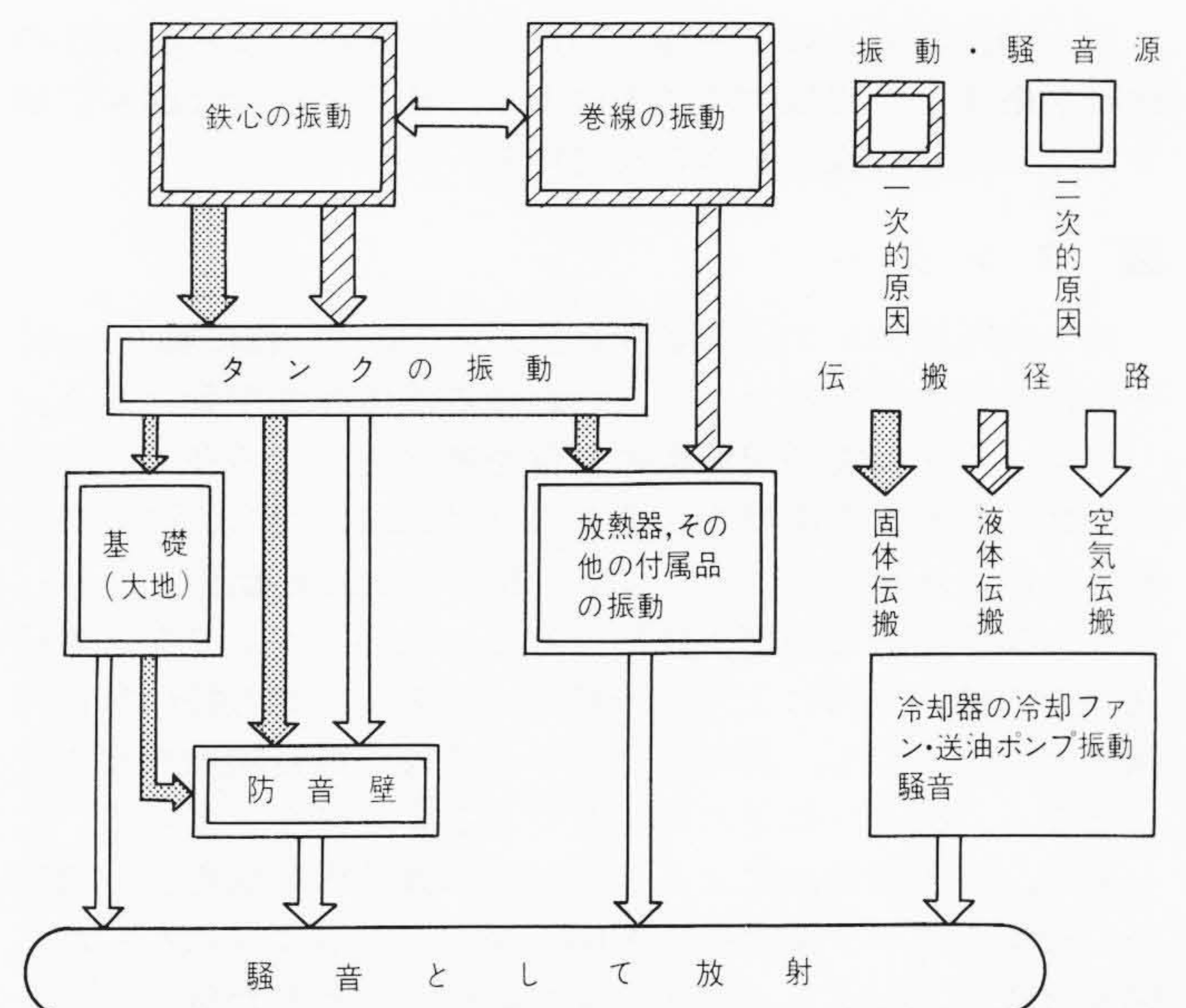


図1 変圧器振動・騒音の伝搬経路 主な騒音対策は、鉄心及びタンク振動の低減と防音壁や冷却器騒音の低減である。

束分布¹⁾、固有振動数、磁気ひずみ振動²⁾、温度上昇分布³⁾などの解析技術を開発している。そしてこの解析技術をもとに、材料のもつ特性を十分生かすための構造設計、製作技術について検討し騒音低減を図ってきた。鉄心の振動は主にけい素鋼板の磁気ひずみにより発生する曲げ振動であり、電源周波数の2倍を基本波としている。したがって、図2に示すように鉄心固有振動数を計算し、電源周波数の2倍及び倍調波で共振しないような寸法諸元としている。更に、図3に示すように磁気ひずみ振動の解析を行ない、振動が最小となる磁気ひずみの組合せについても研究を進め、材質、接合方式、断面形状や断面積比などについて検討し改善を図ってきた。またバインド締付方式は、豊富な経験と均一な締付圧力により騒音低減に大きな効果を挙げている。一方、高精度加工や機械的ひずみの少ない複合NC(数値制御)シャーラインや起立装置を採用するなど、鉄心製作技術の改善も図ってきた。

* 日立製作所国分工場 ** 日立製作所日立研究所

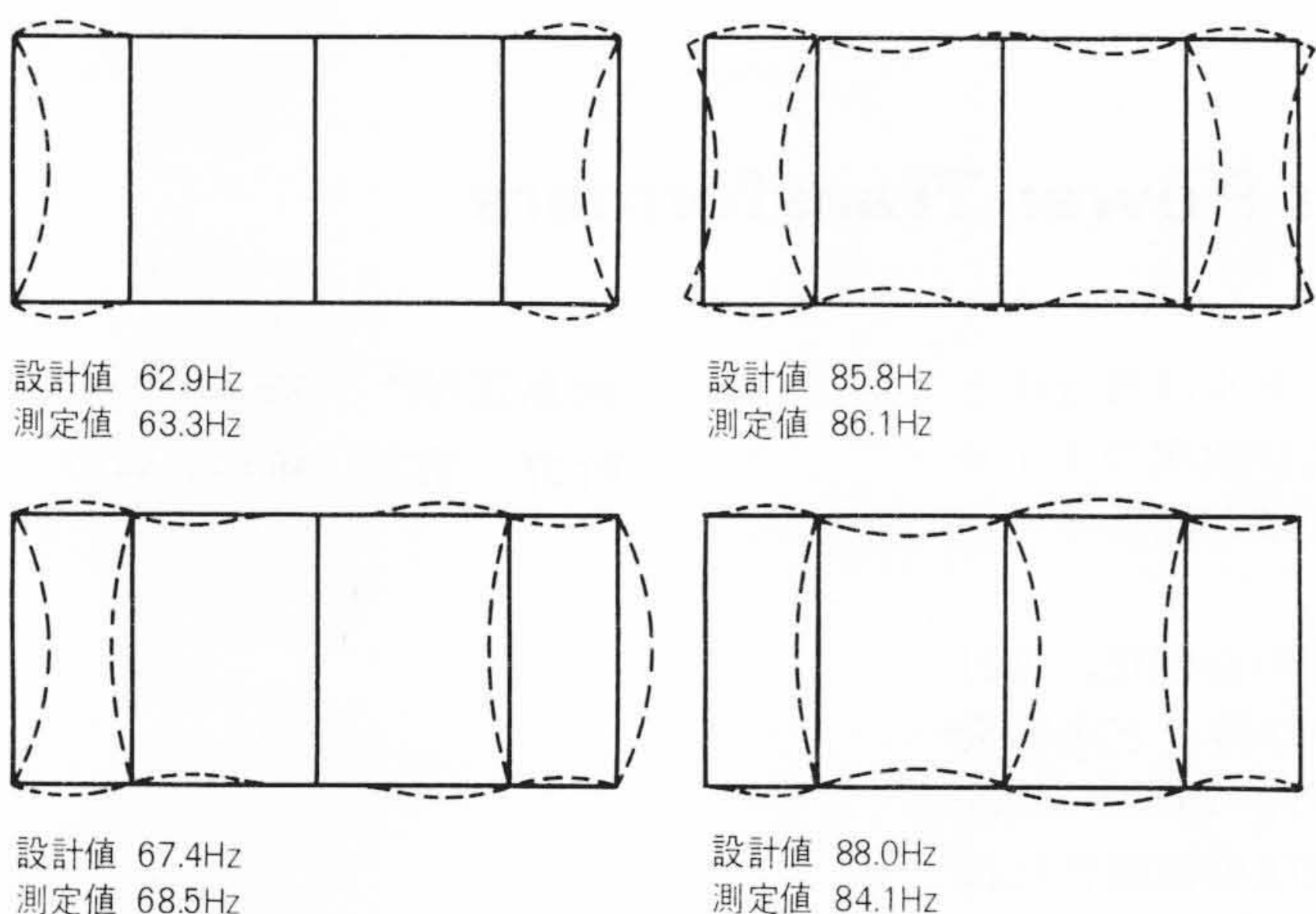


図2 鉄心固有振動数の解析例 各振動モードの固有振動数を解析し、電源周波数の2倍及び倍調波で共振しない寸法諸元としている。

以上の諸対策と製作過程での鉄心単独試験による諸特性の検証を継続して実施することにより、鉄損と騒音は図4に示すように著しい改善がみられている。

3 タンク

油入変圧器タンクは内部の油とタンク壁が一緒に動くため、その振動特性は複雑となり、いわゆる流体弾性振動となる。

タンクもまた電源周波数の2倍を基本波とする多くの励振周波数との共振を避ける必要があり、図5に示すように、有限要素法により計算を行ない共振を避ける寸法諸元としている。

このように、各種解析技術をもとに鉄心・タンクなどの構造改善の積み重ねにより、700MVA級変圧器でも特に騒音対策をとらなくても、長時間励磁や負荷時に騒音増加を起こすことなく、80ホン以下の騒音にできるようになっている。

最近、有限要素法による2次元流体弾性振動解析法を適用し、複雑なタンク振動特性を明らかにできるようになった。

図6は鉄心、油、タンクを2次元で同時に解析した例であり、油の音圧分布とタンク壁の振動性状を求めたものである。その結果、タンク側板を厚くしても内部の圧力が増加し、タンクの振動低減に限界があることが分かり、次節で述べる高効率遮音板の構成が、騒音を低減する上で最も有効な構造であることが判明した。

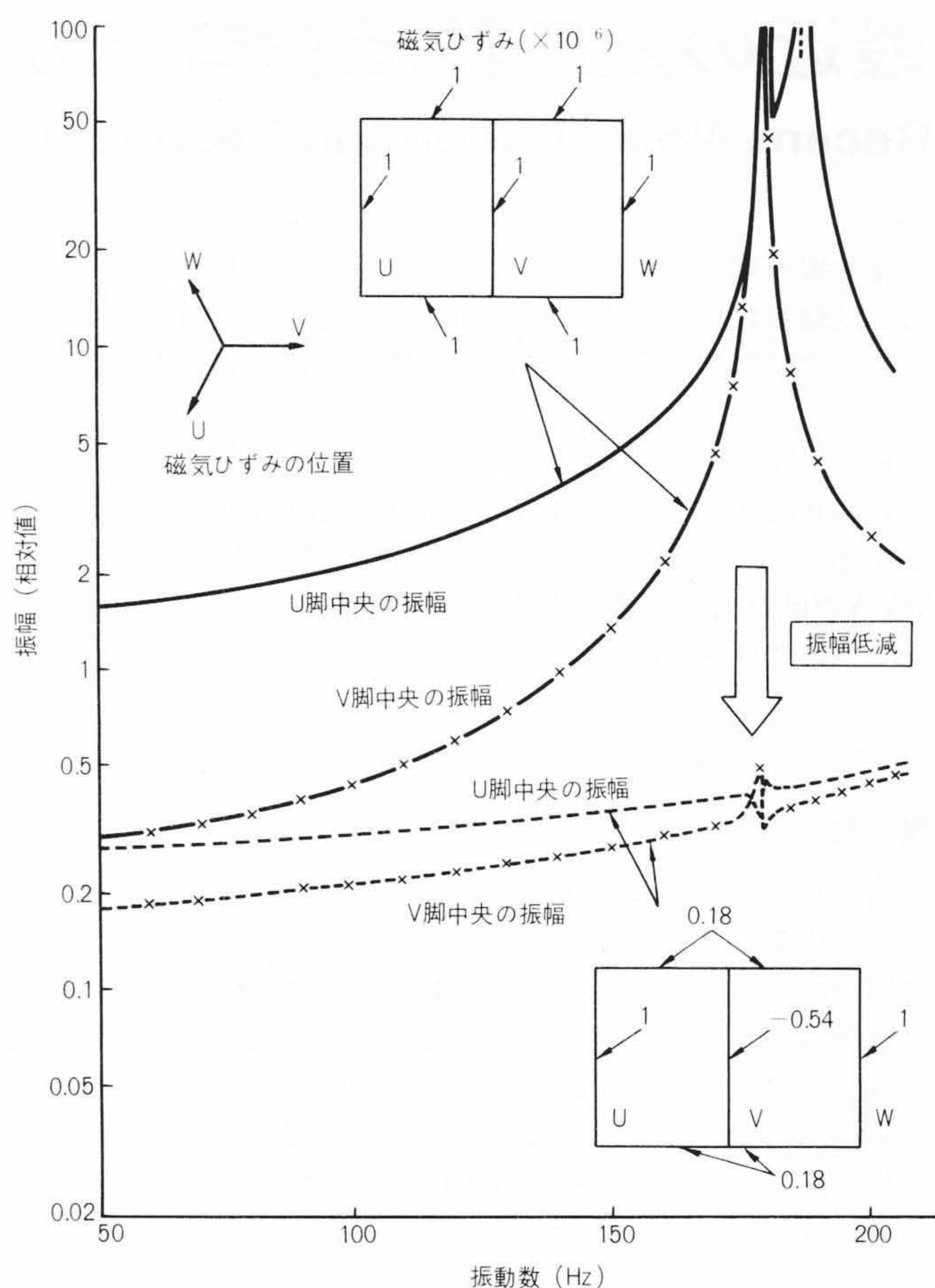


図3 鉄心磁気ひずみ振動の制御 鉄心各部の磁気ひずみをコントロールすることにより、鉄心磁気ひずみ振動振幅を低減できる。

4 高効率遮音板

一般に数ホンを超える騒音低減をする場合には、防音壁を設置するほうが経済的であり、10～20ホンの騒音低減には組立式鉄板防音壁が、これ以上の騒音低減にはコンクリート防音壁が採用されている。この場合には、図7に示すように変圧器据付面積が大幅に増加したり、据付工程の長期化や消火設備が複雑化するなどの不具合が生じる。

日立製作所では、これらの欠点を解消し、省資源・省エネ

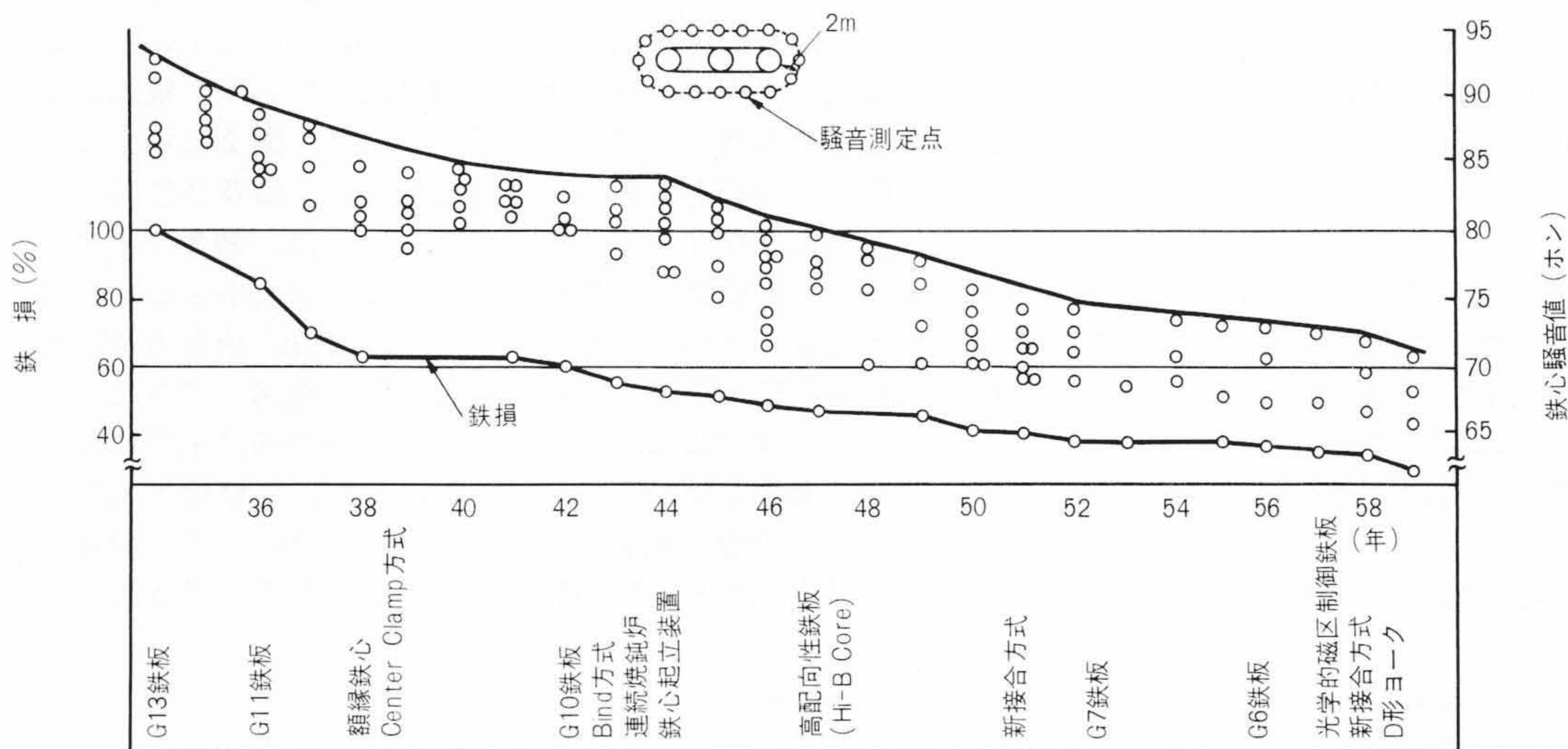
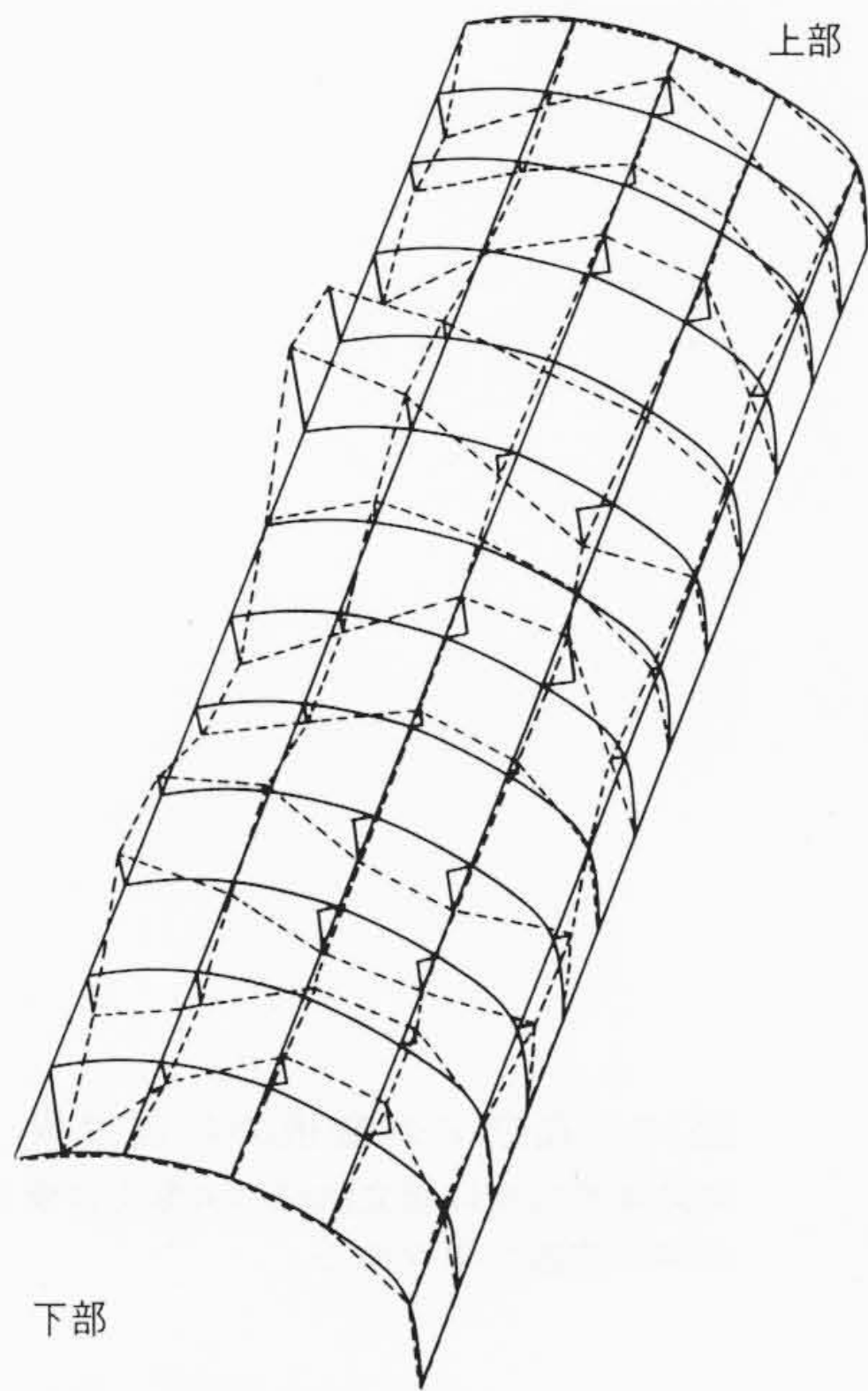


図4 大容量変圧器の鉄心特性 鉄心材料、構造、製作技術の改善による鉄損及び騒音の変遷を示す。



設計値 108.5Hz
測定値 110Hz

図5 有限要素法による固有振動数の解析例
複雑な曲面の固有振動数まで解析し、共振を避ける寸法諸元としている。

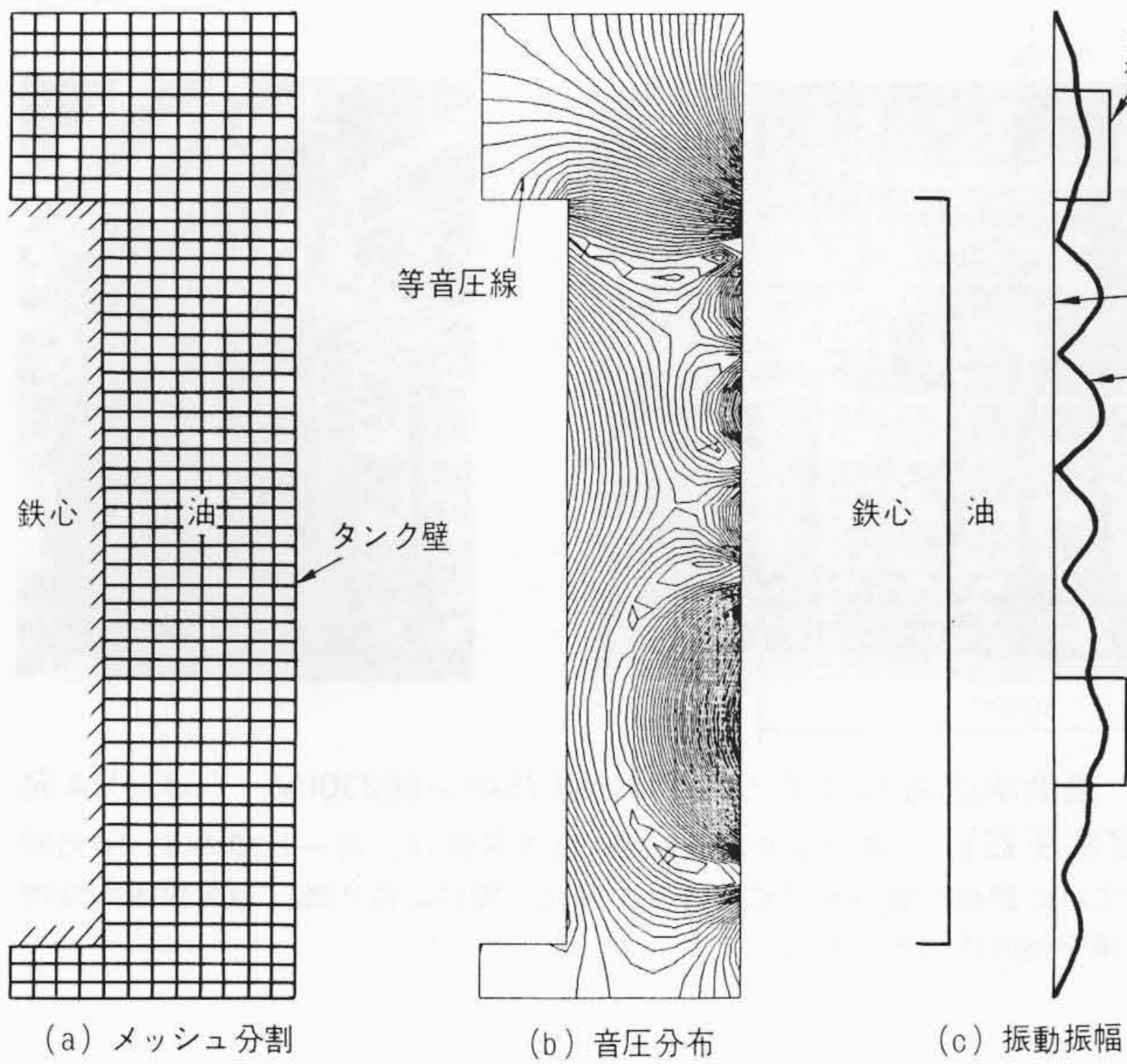
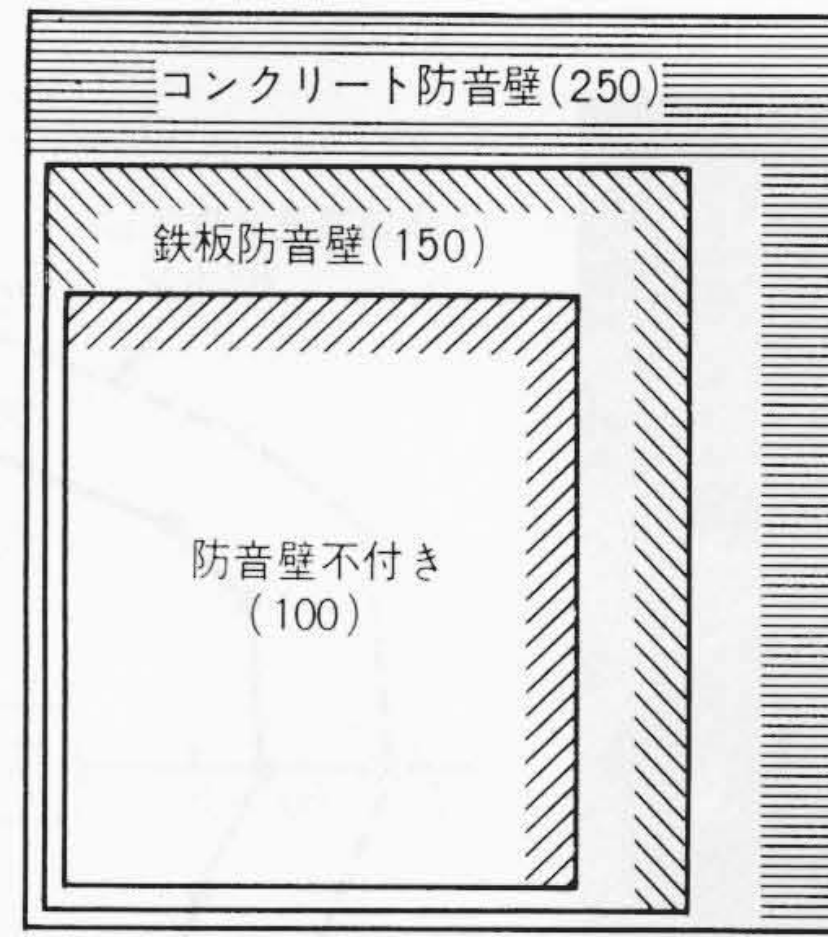
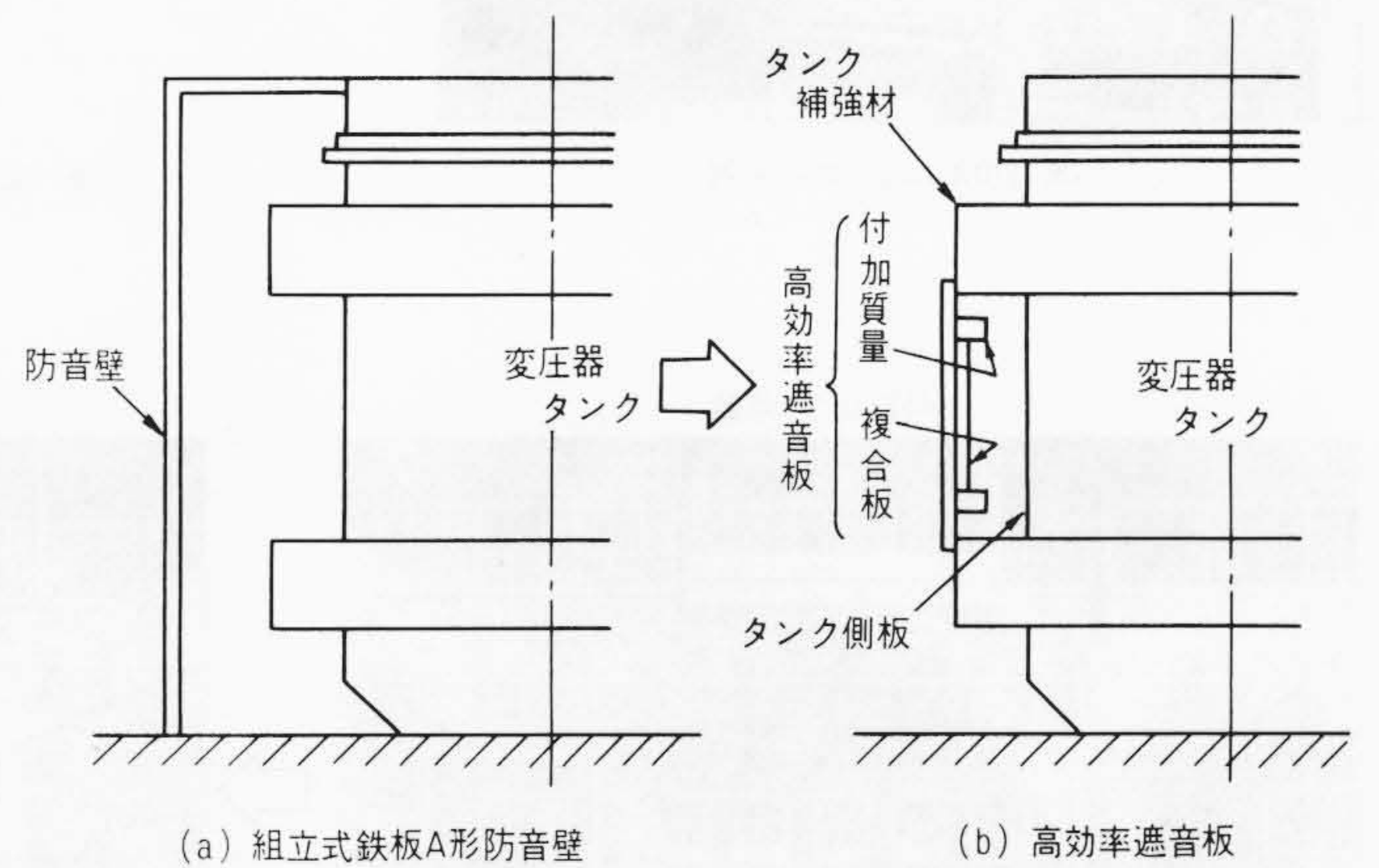


図6 有限要素法による2次元流体弾性振動解析例 鉄心、油、タンクを同時に解析した例であり、本解析法により低騒音技術の多くの知見が得られた。



注：小括弧内数値は面積比を示す。

図7 防音構造と変圧器の据付面積 防音壁の設置により据付面積が大幅に増加するので、これを省略することが望まれている。



日立特許（特開 昭56-87306, 特開 昭57-128912 他）

図8 防音壁の合理化 高効率遮音板は付加質量と複合板とから構成され、直接剛構造のタンク補強材に溶接されるもので、タンク補強材からの防振や制振効果に優れ、組立式鉄板A形防音壁と同等の防音効果がある。

ルギー時代に即した組立式鉄板防音壁にとって代わることのできる高効率遮音板^{4),5)}を開発・実用化した。この高効率遮音板は図8(b)に示すように、薄鋼板と厚鋼板をスポット溶接により一体とした複合板と棒状の付加質量で構成され、直接剛構造のタンク補強材に溶接されるもので、

- (1) 付加質量による防振効果
- (2) 複合板による制振効果

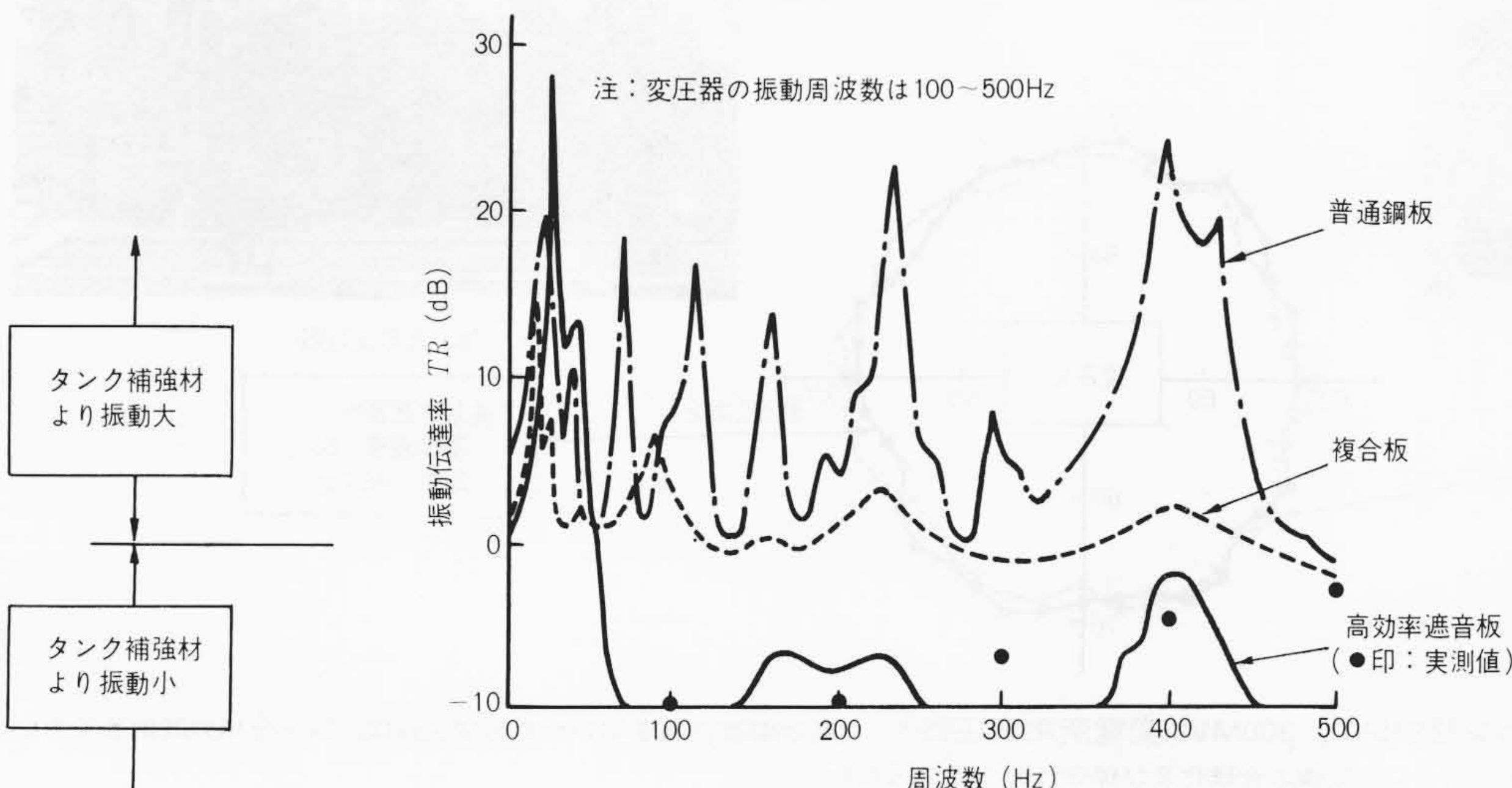
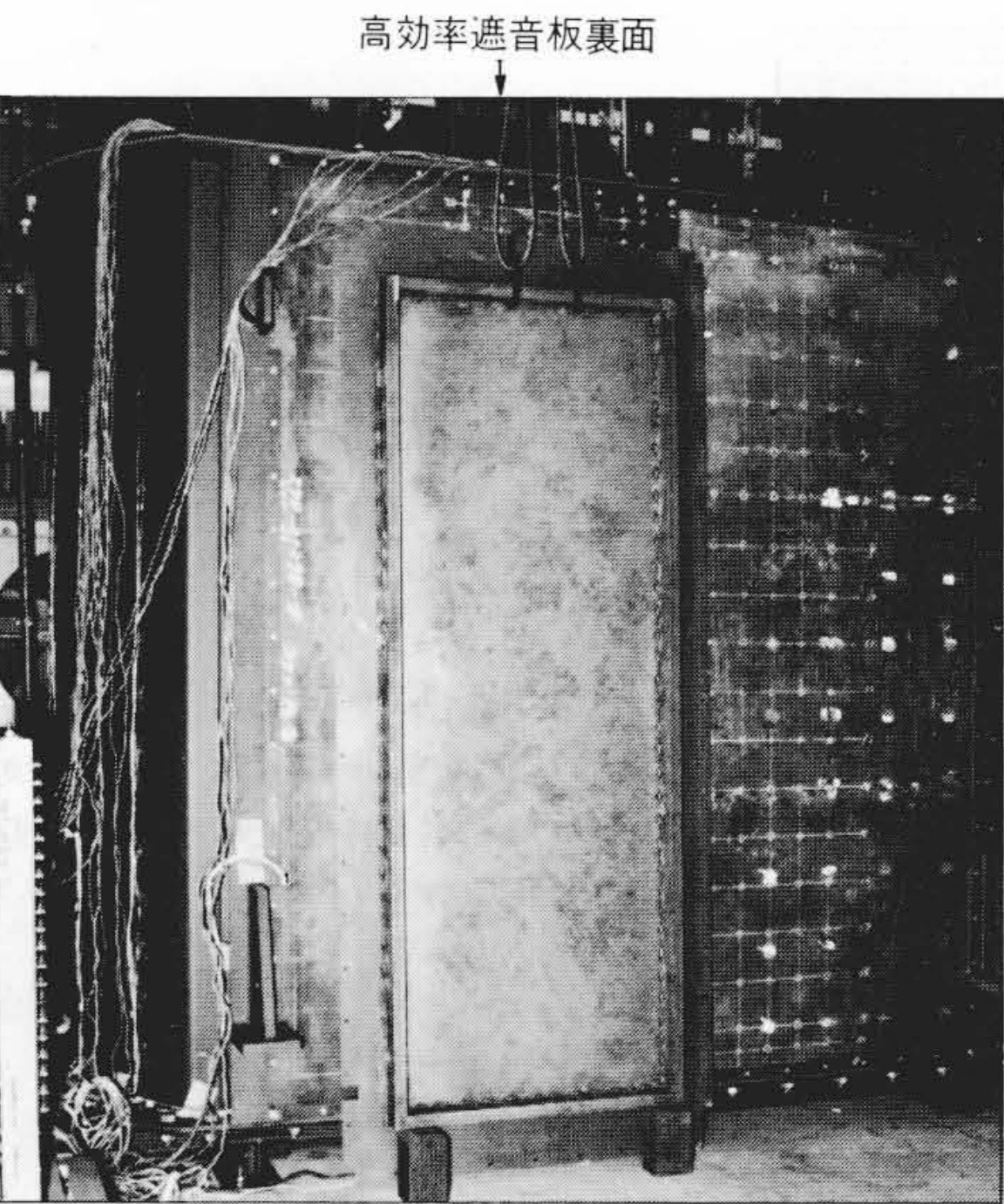
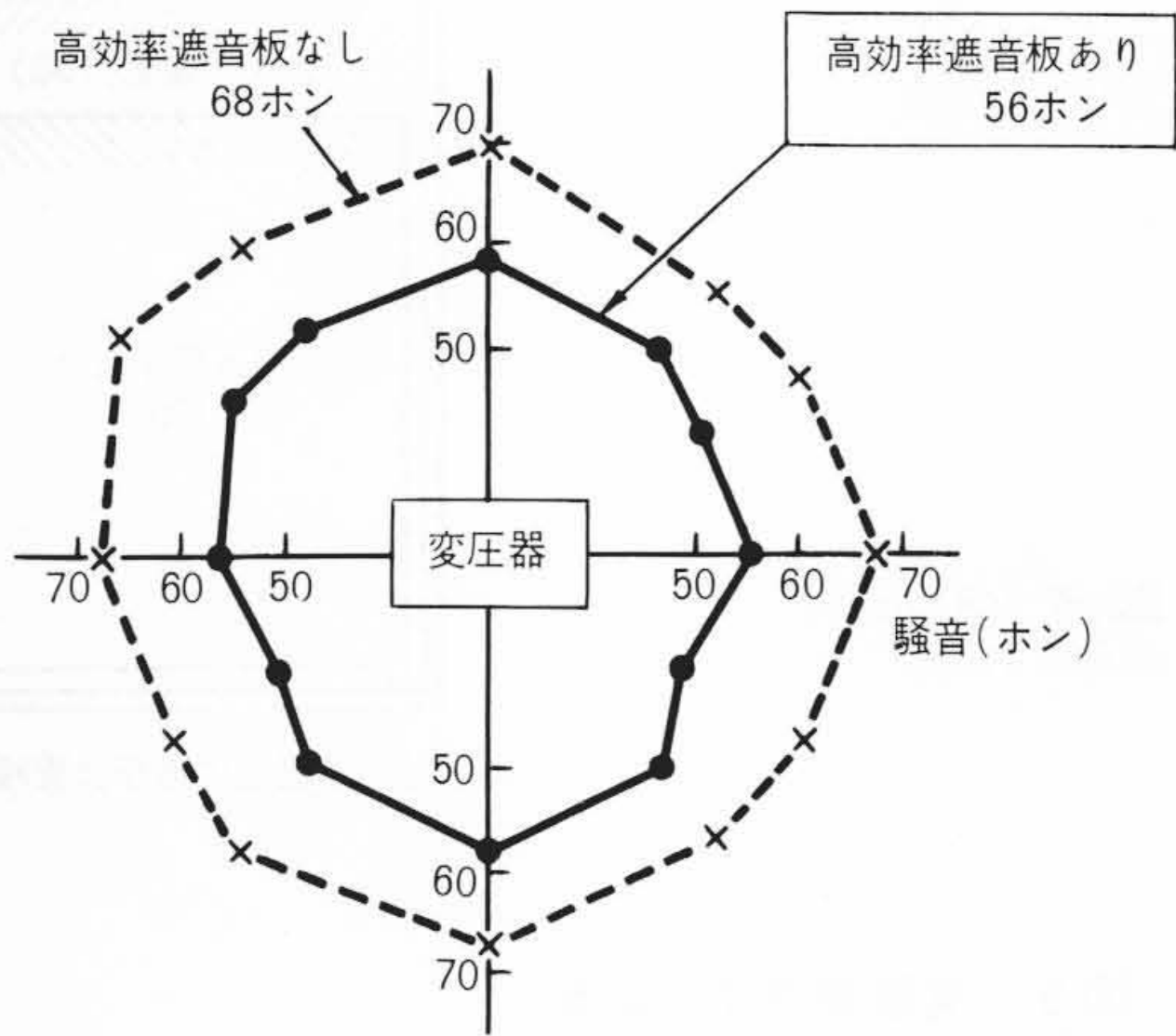


図9 遮音板の振動伝達率 普通鋼板や複合板だけの場合に比較し、高効率遮音板は圧倒的にタンク補強材からの振動伝達を抑制できる。

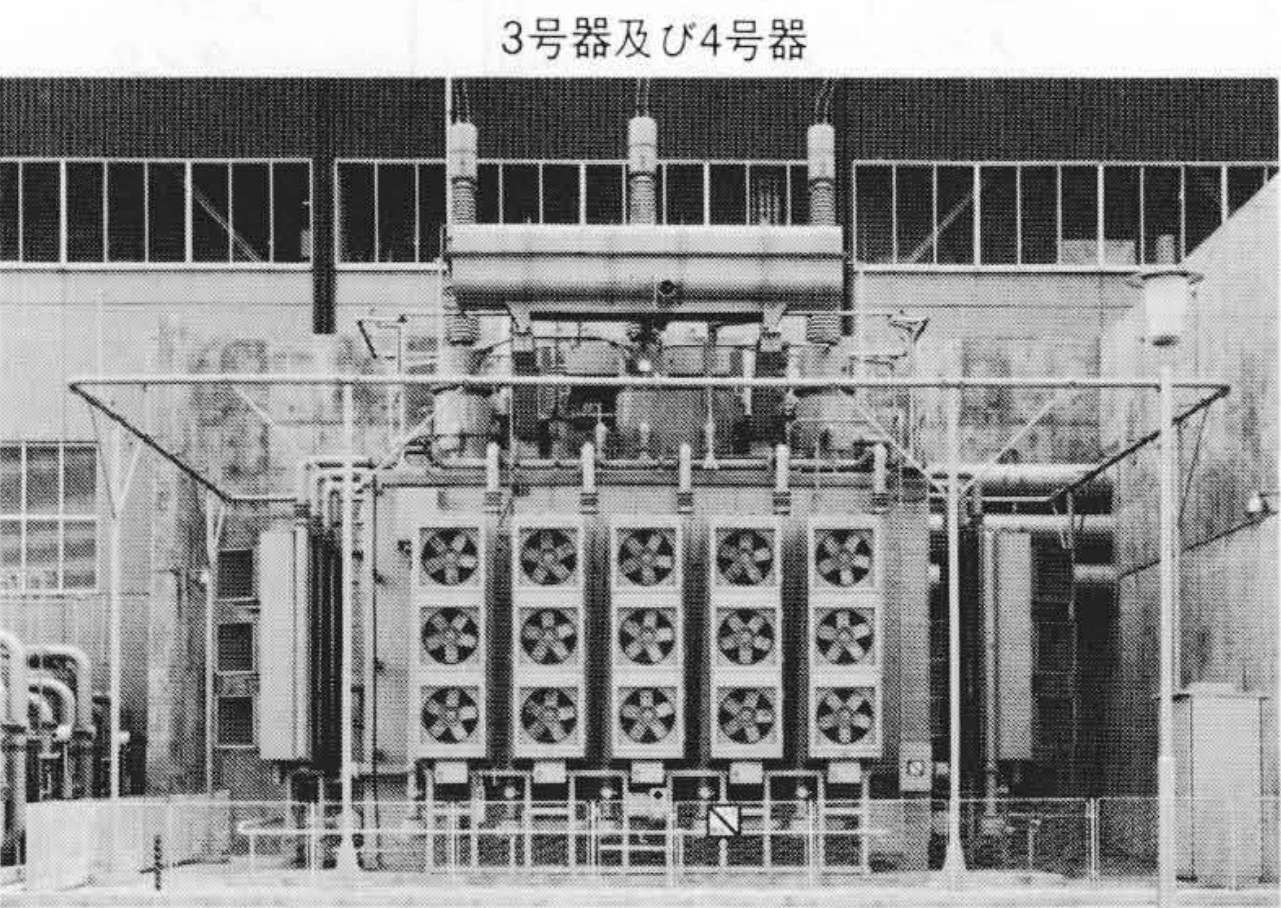


(a) 20MVA試作変圧器

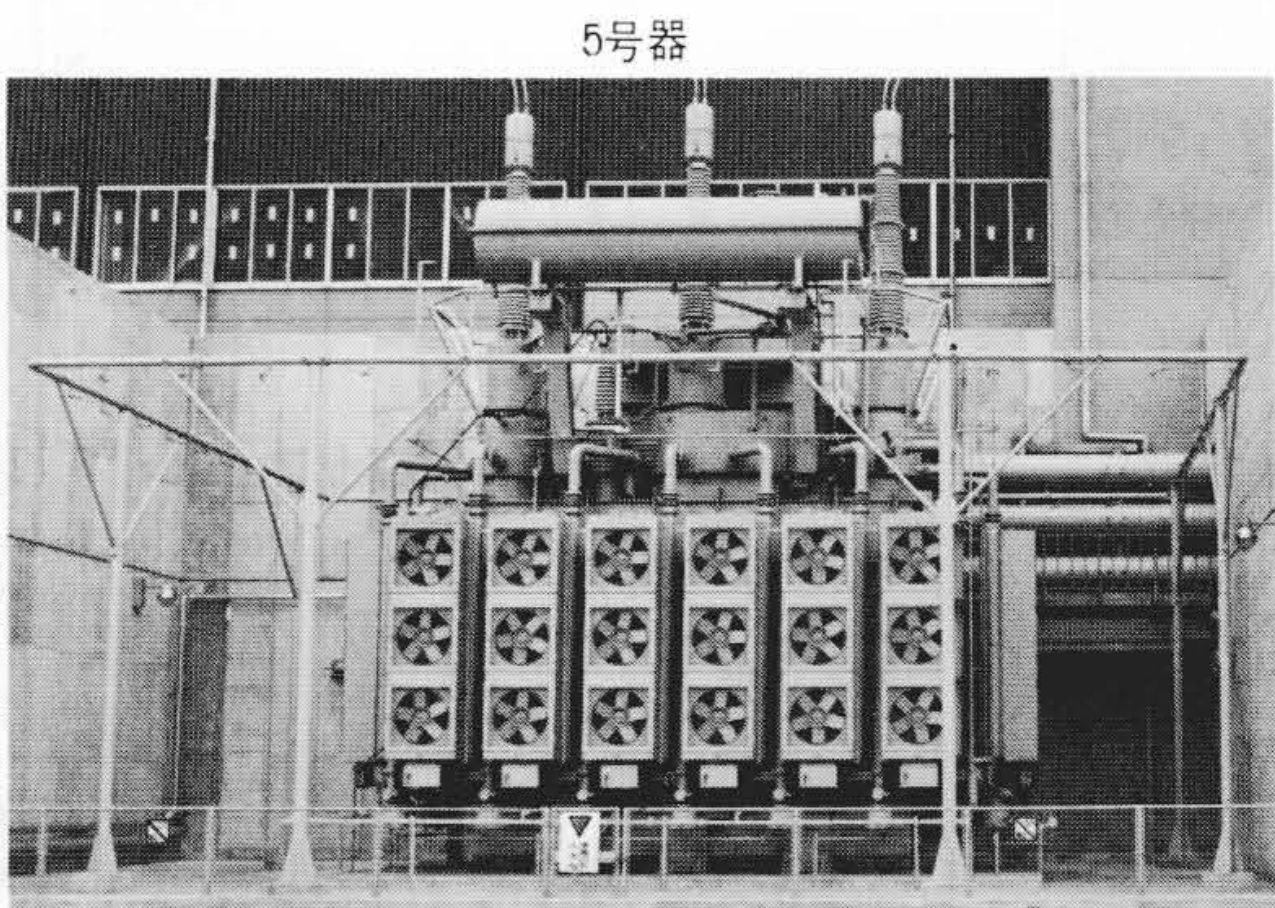


(b) 騒音測定結果

図10 高効率遮音板の防音効果
高効率遮音板は組立式鉄板 A形防音壁と同等の防音効果がある。



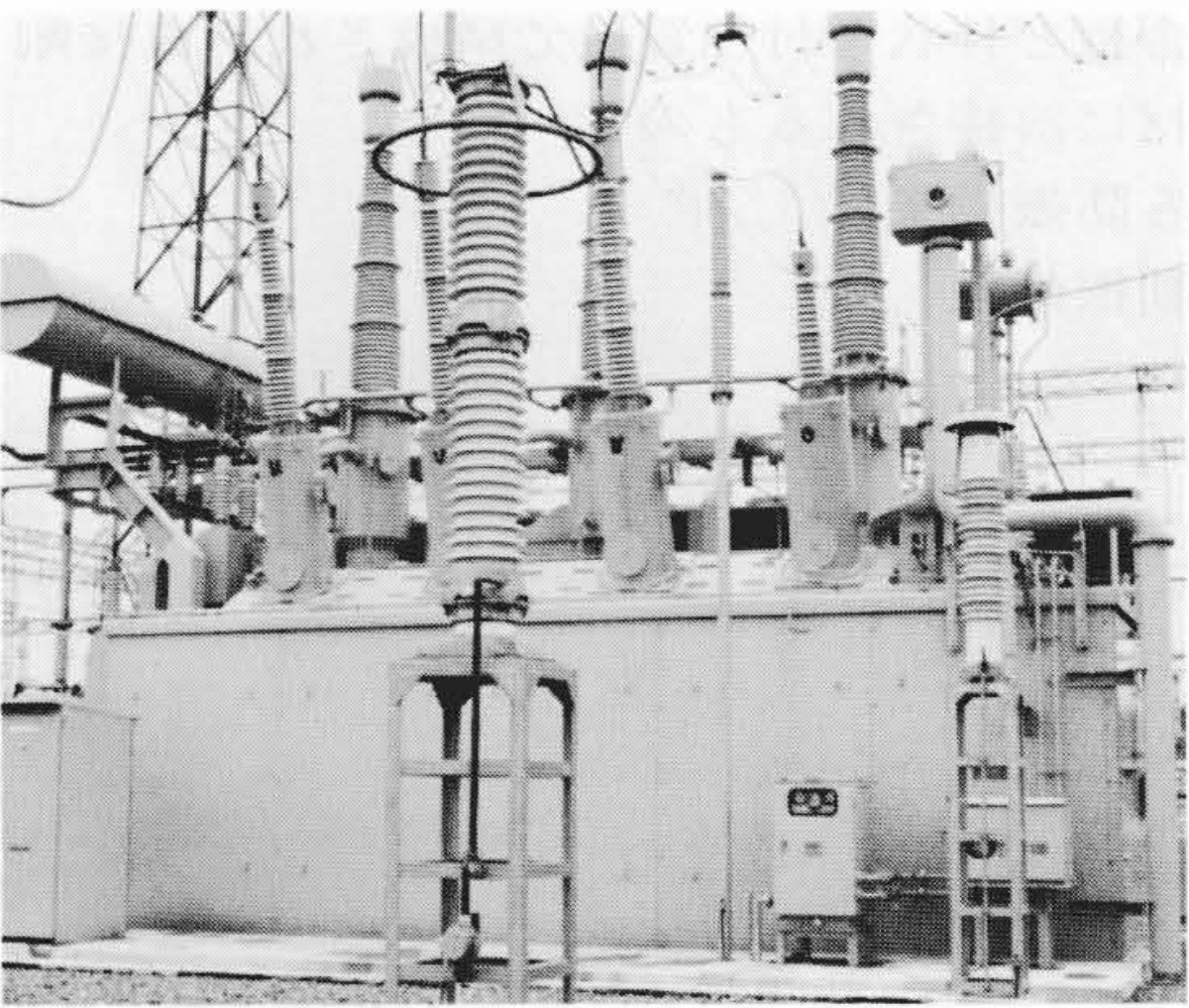
13.4m



10.6m

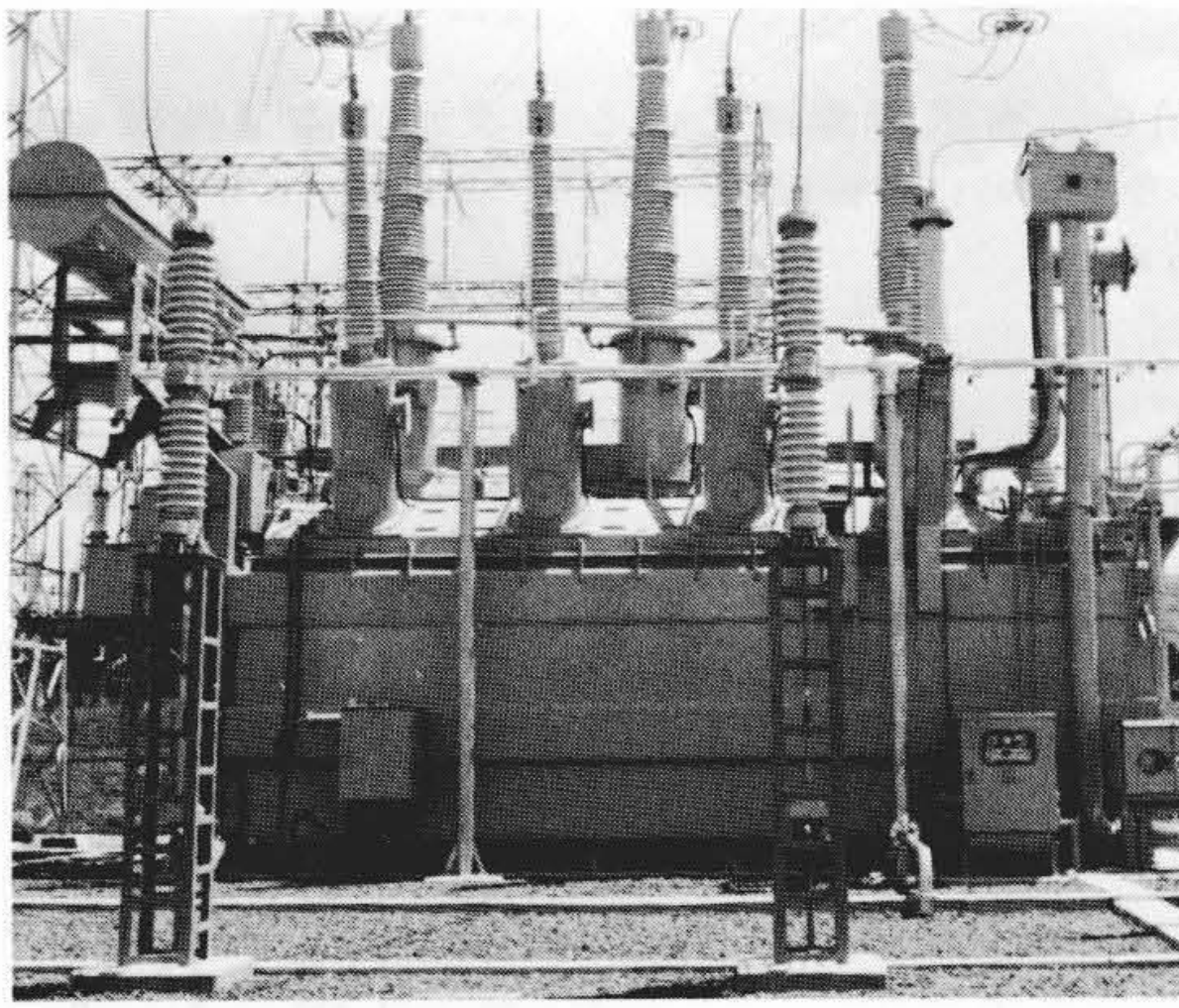
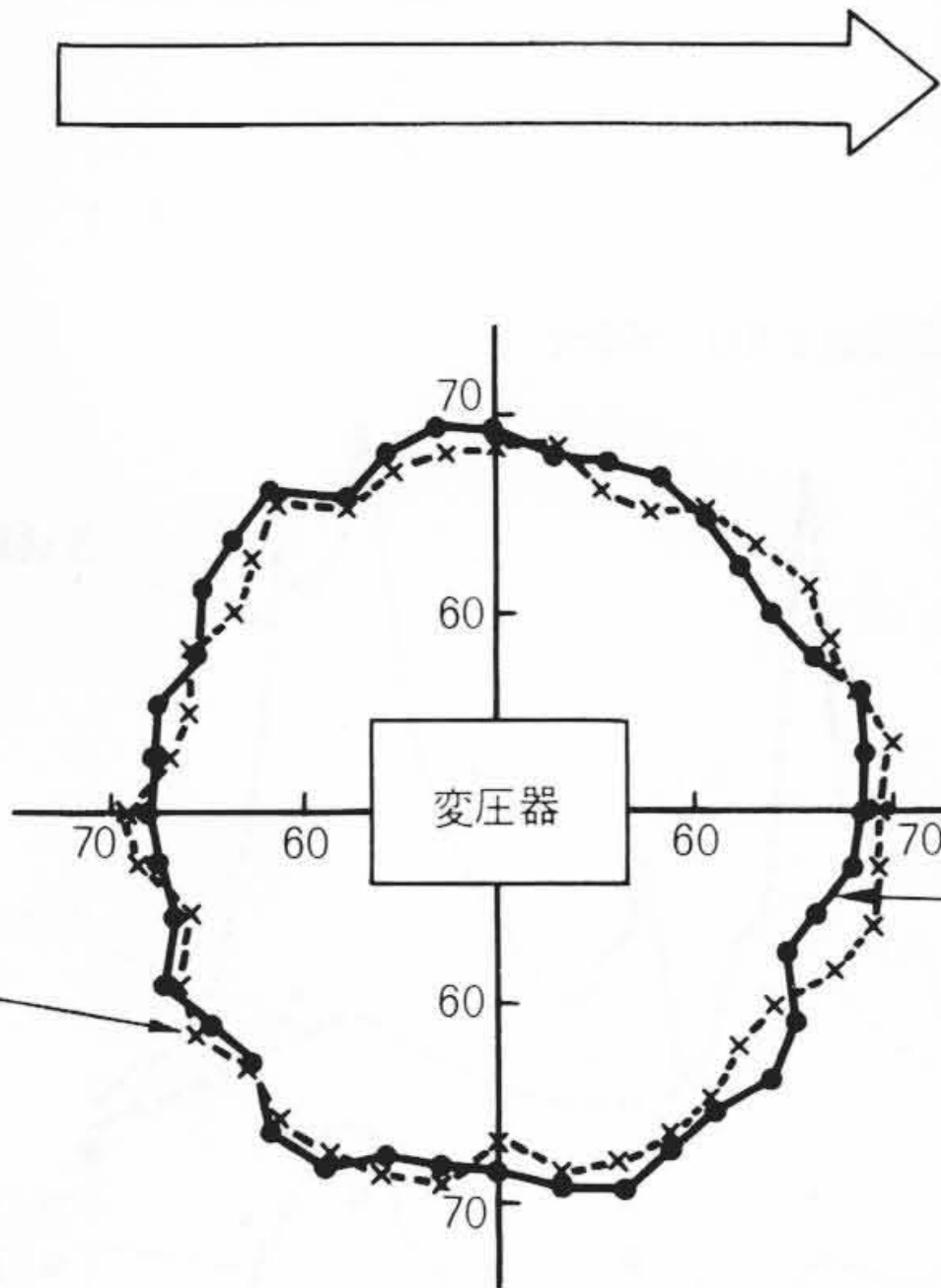
	防音構造	冷却器台数	据付面積	防音壁内消火設備
3号器	鉄板防音壁	10 + 1	100%	あり
5号器	高効率遮音板	9 + 1	70%	なし

図11 高効率遮音板による合理化例(75ホン級230kV, 650MVA発電所用変圧器) 高効率遮音板を用いた5号器は、同一仕様の3, 4号器で用いていた鉄板防音壁を省略でき、小形化、据付工程短縮、消火設備の合理化及び保守性の向上が図れた。



(a) 既納品

鉄板防音壁
基礎面積：100%
騒音：68.4ホン



(b) 新形変圧器

高効率遮音板
基礎面積：60%
騒音：68.7ホン

図12 高効率遮音板による合理化例(70ホン級275kV, 300MVA変電所用変圧器) 高効率遮音板を用いた新形変圧器は、同一仕様の既納品で用いていた鉄板防音壁を省略でき、小形化、据付工程短縮、消火設備の合理化及び保守性の向上が図れた。

などを大きくしてタンク補強材からの振動伝達を制限して、タンク側板からの騒音を遮音するものである。

高効率遮音板に伝達される振動は、径路によって次の二つに分けられる。

- (1) タンク補強材の振動によって遮音板が加振されて発生する固体伝達振動
- (2) タンク側板から発生した音波によって加振されて発生する空気伝搬振動

このうち(2)の空気伝搬振動は鋼板製の遮音板とすることにより容易に小さくできるが、(1)の固体伝達振動は遮音板の防音性能を直接左右するもので、これを効果的に低減することがポイントである。各種遮音板の固体伝達振動の割合を、タンク補強材から遮音板への振動伝達率 TR で表わし、図9に示す。振動伝達率が0のときは遮音板とタンク補強材の振動が同じ場合、正の範囲は遮音板の振動がタンク補強材より大きくなる場合、負の範囲は小さくなる場合を示している。付加質量と複合板から構成された高効率遮音板は、タンク補強材からの固体伝達振動を完全に防止できることが分かる。図10は高効率遮音板を用いた20MVA試作変圧器を示したもので、12ホンの防音効果が認められた。この値は従来の組立式A形鉄板防音壁と同等の防音効果である。

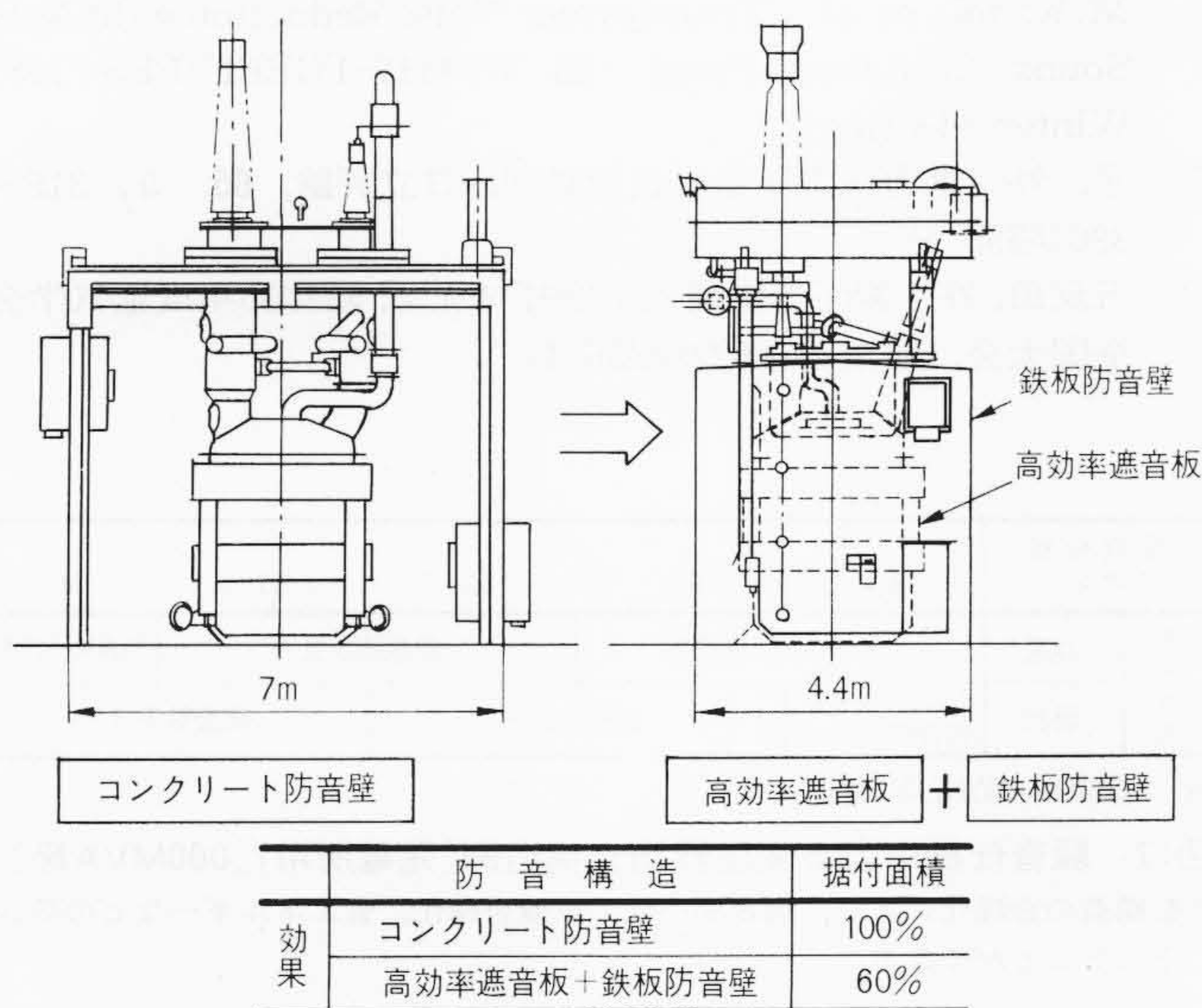


図13 50ホン級300MVA変圧器の防音構造の合理化 高効率遮音板と鉄板防音壁の併用により、コンクリート防音壁と同等の防音効果が得られる。

以下、高効率遮音板を製品に適用した成果について述べる。図11は230kV、650MVA発電所用変圧器に高効率遮音板を適用した例である。本変圧器は75ホン級の騒音仕様に対し、防音壁不付きとした画期的な低騒音変圧器である。同一仕様の既納品3、4号器で用いていた鉄板防音壁が省略でき、据付面積を30%低減するとともに、据付工程の短縮、防音壁内の消火設備の省略と保守性の向上を図ることができた。

一方、図12は275kV、300MVA変電所用変圧器に高効率遮音板を適用した例である。本変圧器も70ホン級の騒音仕様に対し防音壁不付きとした画期的な低騒音変圧器である。同一仕様の既納品で用いていた鉄板防音壁が省略でき、基礎面積を40%低減するとともに、据付工程の短縮、防音壁内の消火設備の省略や保守性の向上を図ることができた。

更に、本変圧器はUHVの開発によって得られた⁶⁾ハイブリッド絶縁を適用した超高压変圧器の第1号である。この技術の採用によって巻線高さが低くでき、輸送制限高さに対する余裕空間を利用して鉄心ヨーク断面をD形に改善するなど、本体騒音の低減と全損失20%の低減も図っている。

なお、50ホン級300MVA超低騒音変圧器に高効率遮音板を併用することにより、図13に示すように従来のコンクリート防音壁の代わりに鉄板防音壁で構成することが可能となり、よりいっそうの小形化が図れる。

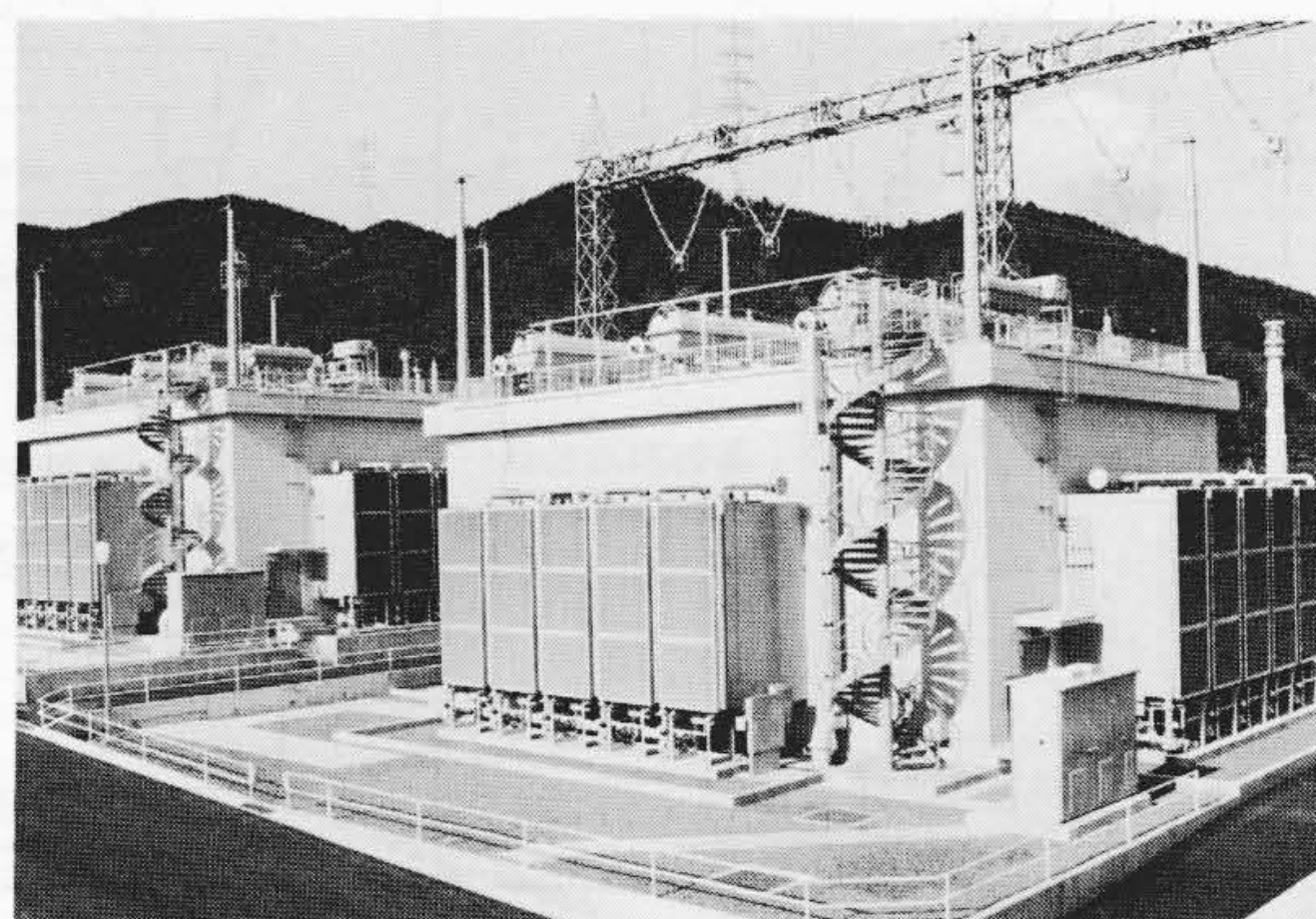
5 高効率冷却器

送油風冷式冷却器の騒音は、その大部分が冷却ファンによるもので、従来騒音低減のために回転数を減らす方法を採用してきた。しかし、冷却性能もこれに応じて低下するため、必要冷却器台数が増加し、据付面積や補機損の増加を招いていた。

日立製作所では、翼形断面に成形しやすく振動減衰の大きいFRP(ガラス繊維強化プラスチック)を採用した風量、風圧の大きい低騒音仕様に好適な高効率冷却ファン⁷⁾を開発した〔図14(a)〕。この高効率冷却ファンを用いた高効率冷却器は、同一騒音であれば2倍の冷却容量が得られ、また同一冷却容量であれば騒音を10ホン低減できる。同図(b)に高効率冷却器を用いた65ホン級500kV、1,500MVA変圧器の外観を示す。冷却器台数は、冷却容量が大きいため、わずか15台である。また70ホン級230kV、540MVA変圧器に適用した例を表1に示す。補機損が従来形冷却器の約半分に低減し、その値もわずか25kWである。また冷却器台数も半減するので保守の容易化、据付面積の低減(30%)も図れている。図15に、変圧器仕様に対する補機損低減の状況を示す。



(a) FRP製冷却ファン
日立特許(特開昭55-153897)



(b) 65ホン級500kV、1,500MVA適用例

図14 高効率冷却器適用例(65ホン級500kV、1,500MVA) FRP製冷却ファンを用いた高効率冷却器は、補機損低減、小形化及びメンテナンスの向上に優れている。

6 騒音仕様と防音構造

以上の低騒音化技術の確立により、275kV、300MVA級及び500kV、1,000/3MVA級変電所用変圧器の防音構造は図16

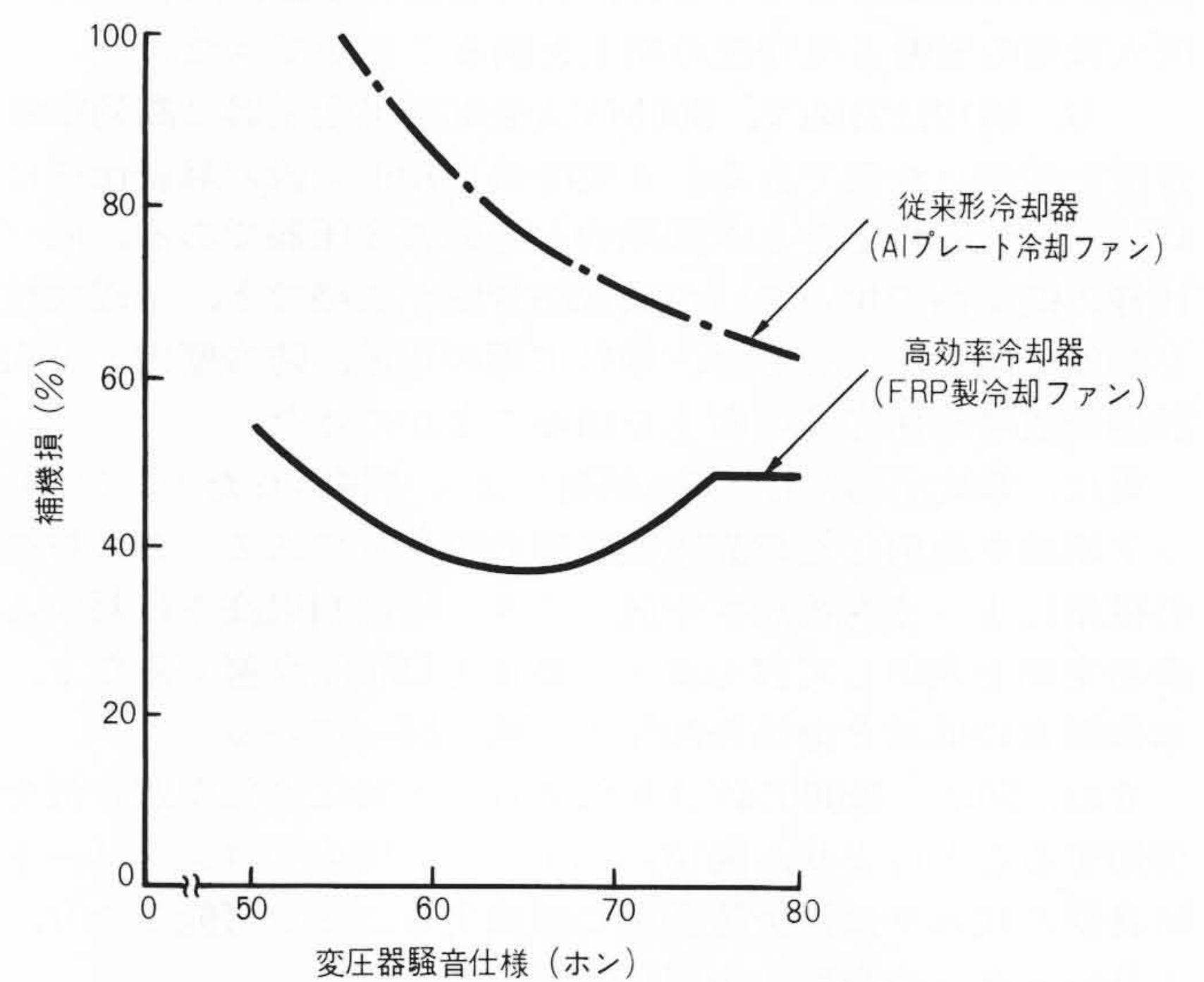


図15 高効率冷却器の補機損低減効果 高効率冷却器は、補機損を従来より30～60%低減できる。

表1 高効率冷却器による補機損低減例 高効率冷却器は、取付台数が半減するのでメンテナンスの面でも有利である。

No.	項 目		従来形冷却器 (Alプレート冷却ファン)	高効率冷却器 (FRP製冷却ファン)
1	単位冷却器性能	揚程(m油柱)	6	4
2		流 量	1,500l/min	2,000l/min
3		出 力	3 kW	2.2kW
4		損 失	3.6kW	2.6kW
5	ファン電動機	極数(回転数)	12(600rpm)	12(600rpm)
6		出 力	0.3kW	1.05kW
7		損 失	0.4kW×3台	1.23kW×2台
8	単位冷却器の損失		4.8kW	5.06kW
9	冷 却 容 量		380kW/40deg	360kW/40deg
10	騒 音		62ホン	62ホン
11	取 付 台 数 (予備除く)		10	5
12	補 機 損		48kW(100%)	25.3kW(53%)

注：70ホン級230kV、540MVA変圧器の場合

に示すところまで合理化されている。これにより、据付面積の縮小、消火設備の合理化、据付工程の短縮、保守の容易化及び補機損の低減が図れる。一方、1,000MVA級発電所用変圧器についても図17に示すところまで合理化され、同様な効果が得られる。

7 結 言

以上述べたように、日立製作所では超低騒音、省資材、省エネルギーなど時代の要求にかなった高効率遮音板や高効率冷却器などの低騒音化技術を開発し、その技術を多くの低騒音変圧器に適用し実績を積み重ねてきた。今後とも時代の要求にかなった新技術の開発に努めていく考えである。

終わりに、終始、御指導・御援助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。

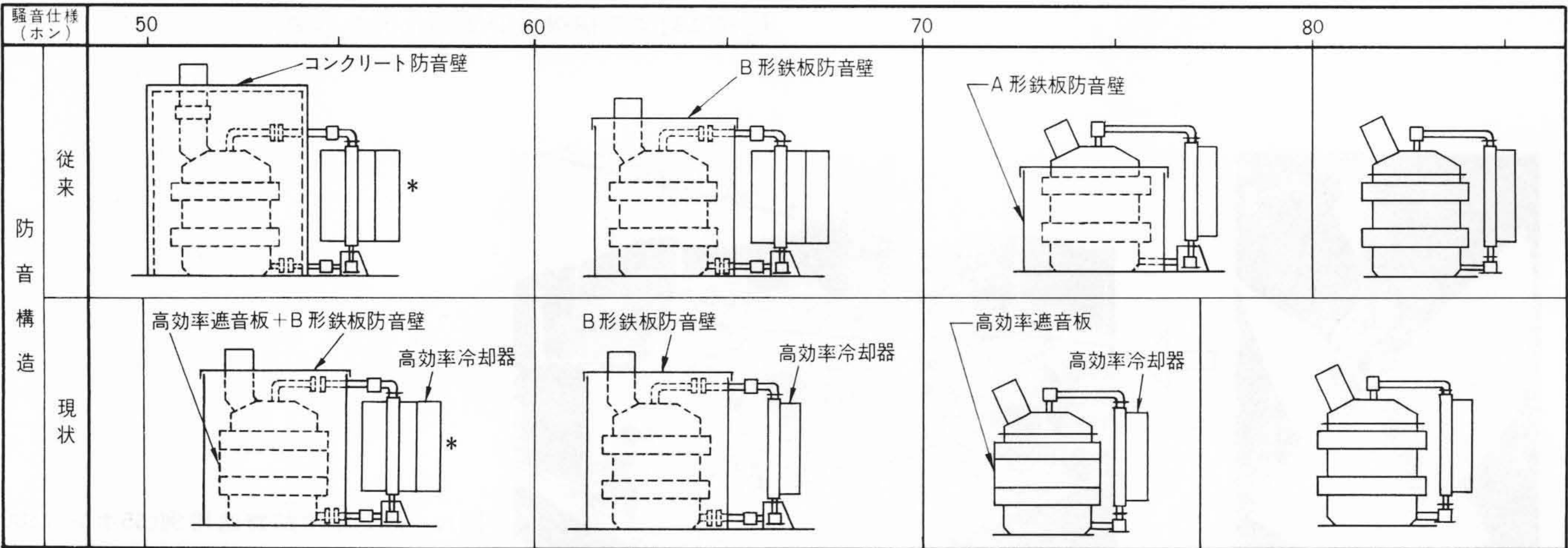
参考文献

- 1) 前島，外：三相三脚変圧器鉄心内部および外部磁束分布解析，静止器研究会，TC-75-9(昭50-12)
- 2) 堀：変圧器鉄心の磁気ひずみ振動，昭和46年度電気四学会，中国支部連合大会，講演番号30509(昭46-3)
- 3) 安齊，外：変圧器鉄心の温度上昇，昭和49年電気学会全国大会，講演番号971(昭49-3)
- 4) 叶井，外：高効率遮音板の開発，静止器研究会，SA-81-45(昭56-11)
- 5) M.Kanoi, et al.：Transformer Noise Reduction with New Sound Insulation Panel. 83 WM116-1(IEEE/PES 1983 Winter Meeting)
- 6) 星，外：電力用変圧器の技術動向，日立評論，65，5，315～320(昭58-5)
- 7) 五反田，外：変圧器用高効率冷却ファン，昭和56年度電気学会全国大会，講演番号629(昭56-4)

騒音仕様 (ホン)		50	60	70	80	90
防音構造	従来	コンクリート防音壁		鉄板防音壁		防音壁不付き
	現状	コンクリート防音壁	鉄板防音壁		防音壁不付き	

注：1,000MVA級変圧器の場合

図17 騒音仕様による変圧器防音構造例(発電所用1,000MVA級) 防音構造の合理化により、用地縮小化，設備合理化，省エネルギーなどの要求に応じることができる。



注：＊ ラジエータを用い送油自冷式とする場合あり。

図16 騒音仕様による変圧器防音構造例(300MVA級) 防音構造の合理化により、用地縮小化，設備合理化，省エネルギーなどの要求に応じることができる。