

火力発電所の防音計画と対策

Plans and Schemes for Noise Control at Thermal Power Plants

In discussing environmental conditions for living and working at the boundary arease of a thermal power plant, it should be admitted that pratically not a single equipment in service is immune from the blame for noise. Not to mention rotating machines, even such equipment without moving sections possibly produces electromagnetic noise or noise arising from fluids used in it. Accordingly, noise control should be made not only for each equipment but should be planned systematically for entire power plant covering the arrangement of equipment, design of buildings housing these machinery and equipment, whereby to reduce composite noise values especially at the boundary area of the power plant.

In this article are dealt with the positioning of sound-emitting items inside or outside of the power plant buildings and the method of evaluation of effects of noise attenuation by distance, based on the *PWL* of each equipment set up for the composition of sound pressure level on the boundary line of the concerned area. Important points in the design of a sound-proofing cover and general practice for noise prevention are also described.

伊藤 文夫* *Fumio Itô*

平松 力** *Tsutomu Hiramatsu*

青木 晃秀*** *Ikuhide Aoki*

1 緒 言

発電プラント、特に火力発電所は比較的人口密度の高い地域に建設されることがあり、最近の環境改善問題にも騒音の関係する場合が増加しつつある。騒音問題は発電所のほとんどの機種が関係すると考えられ、回転機はもとより、静止機器でも電磁的または流体による騒音を発生する可能性がある。したがって個々の機器の騒音の低減を心がけると同時に、敷地境界線上の騒音値を下げるための機器の配置、建屋計画なども考慮し、プラント全体として合成された騒音を低減させる計画や対策が必要である。

火力発電所の最近の傾向として、電力の大口需要を満たすため、単機出力およびユニット数の増加、各種発電用主機、補機類の大形化に伴い、騒音源の音響パワーもしだいに増大しつつある。特に屋外にある各種機器類からの騒音は直接または建屋などで反射回折しながら境界線に到達し、環境改善の対象となることがある。しかし建屋内にある機器でも一応壁によるしゃ音が期待できるが、十分なしゃ音設計のもとに建屋を建設するとはかぎらないし、搬入口、開放された通気窓などからの漏音もある。一方、建屋内ではむしろ作業環境上機器の静粛な運転が望ましく、そのため建屋内部での機器の騒音対策も重要な問題となりつつある。

このような情勢下では、機器単独運転での個々の騒音値を下げることの研究を行なうのはもとより、組み合わせて負荷をとり、システム全体として作動した状態の総合音を低減させる必要がある。また新設のプラントに対しては大きな騒音源のレイアウトを特に考慮し、可能な範囲で従来の配置を変更して対策費用の低減を試みる必要も生ずる。

本稿は既設火力発電所の測定結果に基づき、新設のプラントの騒音問題をできるだけスムーズに解決できるような指針

を解説的に述べ、今後の火力発電所の騒音問題解決の一助になることを期待するものである。

2 火力発電所防音計画の概要

火力発電所は、海岸の埋立地域のような比較的広大な敷地に余裕を持って建設される場合が多いが、やはりしだいに工業地帯にも騒音規制がきびしくなってきた。これに対処する防音計画の一般的な手順としては、図1のフローチャートに示すように行なわれる。すなわち、まず建設すべき地域の都道府県都市条例による騒音規制値、またはそれに類する商取引上の目標値であっても設定する必要がある。この設定がなされると、機器側からと立地条件とより、普通敷地境界線上での目標値を満足するよう、機器個別の騒音値を調査選定する。屋外の境界線から見える機器は直接に距離減衰により決まる騒音レベルが大きい。建屋などで反射して境界に到達する経路がある。さらに建屋により回折して到達する音源もあり、その取扱いはしゃ音壁と同様な効果と見なせる。またタービン建屋などの壁面を透過してくる屋内機器の音源も評価の対象となる。

音源から直接距離減衰によるもの、反射、回折、透過いずれも音源の *PWL* (音響パワーレベル) を基本にして考えられるので、機器別の *PWL* を同形または類似機種の実測値に基づき推定する必要がある。これには無負荷単体と既設プラントで負荷状態の両方の測定値を参考資料とするのが普通である。これ以外にたとえば海岸の埋立地などに建設されるときは、主要音源とみなされるボイラ関係を建屋の海側に設置するとか、境界地には循環水ポンプなどを近接しないとかの工夫を敷地内で行なう必要がある。事情が許せばこのような

* 東京電力株式会社火力部 ** 日立製作所日立研究所 *** 日立製作所電力事業本部

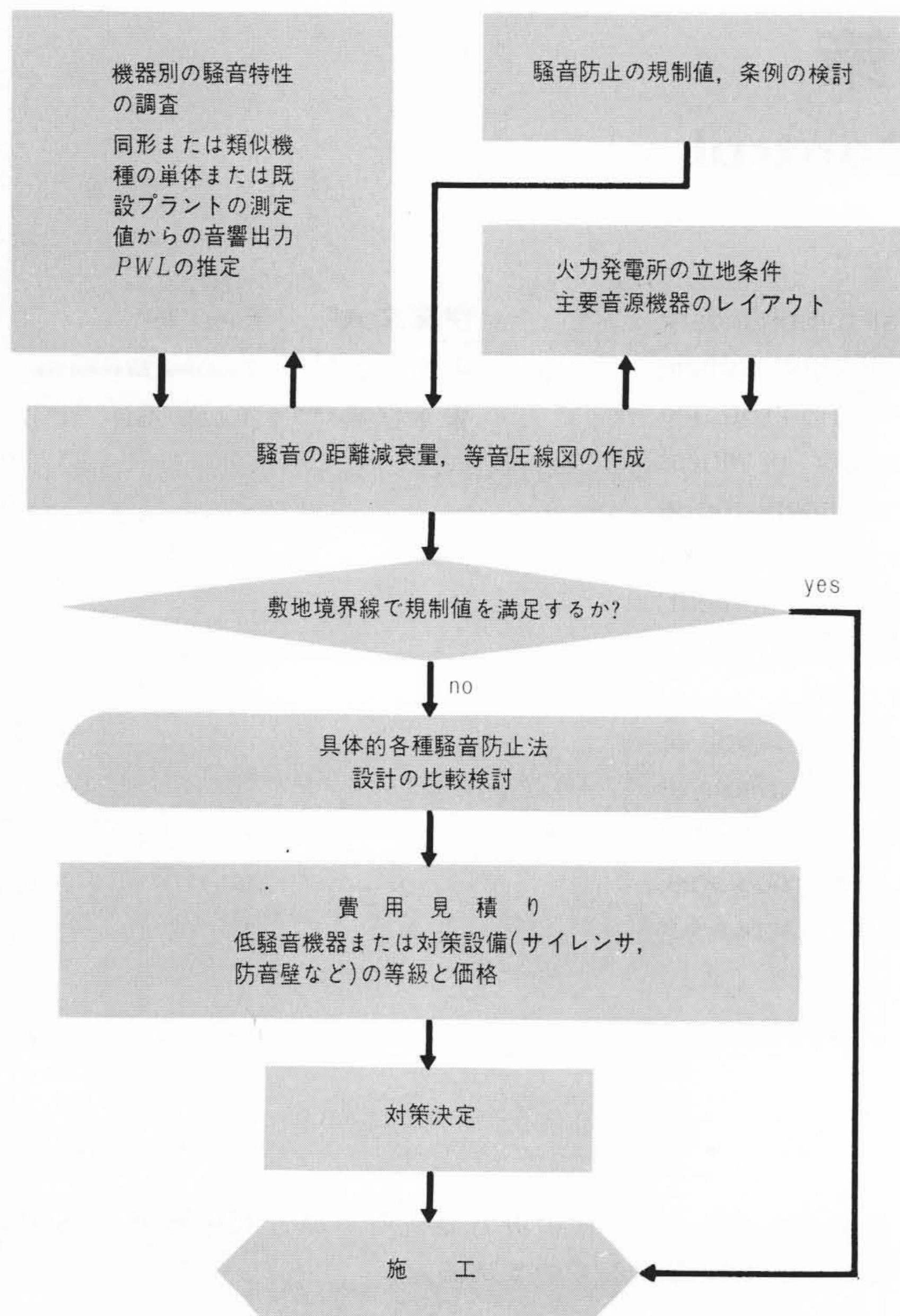


図1 新設火力プラントの防音設計法 新設火力プラントの防音を建設以前に設計するときには比較的自由度が得られ、検討が十分なされる。

Fig. 1 Planning Flow Chart of Noise Reduction for New-establishing Thermal Power Plant

主音源機器のレイアウトを考慮するのが最も有効な防音計画といえる。配置計画および機器のPWLが一応決定すると直接音、間接音をすべて対象にして、音源から敷地境界線までの距離減衰と位相を考慮した等音圧線図を作るか、境界線のみ問題になる場合は周囲での合成音分布を電子計算機などで求めることができる。

一般に公害関係では敷地境界線、またはそれ以上の距離での騒音レベルが問題になる。まず境界線で目標値を満足していれば、その設計計画は成功しているとして施工の方針に移行できる。しかし満足する騒音値にはならなくても機器の配置を少し変えとか、機器の機種を多少変更するかにより満足できるならば、その範囲内での設計変更を行なうのが望ましい。どうしてもレイアウトの変更が困難で機器も大幅な変更が不可能となれば、防音対策の計画にはいることになる。具体的にどの程度のしゃ音量が必要かにより、防音壁の材質厚さおよび内ばりの吸音材の選定が行なわれる。防音カバーなどで機器をおおうため内部の温度上昇が問題になることがあり、そのときは換気を行なう。強制通風させるとファンが必要となり、しゃ音を妨げる通気口は簡単なサイレンサ構造を採用する必要も生ずる。また防音壁よりもサイレンサ方式が望ましいファン類ではどの程度の透過損失と通風抵抗のものを採用するかは価格とともに検討して設計することになる。

これらの防音対策によるよりも、低騒音機器として最初から設計された機種に変更したほうが価格保守上有利であれば、この時点での設計変更がなされる。このようにして防音計画が多方面から検討されて最適の方法を決定し施工されることになる。

3 防音計画の実際

3.1 機器別の騒音特性と配置

火力発電プラントに設備される機器の種類は100程度であり、それらのほとんどが多少とも騒音発生源と見なされる。しかし個々の小機器の騒音レベル(SPL)が比較的大きくても、PWLが小さいので境界線上での影響は小さい。表1はこのような意味から主要音源と見なされる機器を、それらのPWLおよび設置場所を示すものである。タービン発電機は一般にタービン建屋内にあるが、屋外式のものもある。表1は屋内式250MW級タービン発電機のPWLを示すものである⁽¹⁾。屋内式の場合は建屋によるしゃ音が期待できるので敷地境界線に対しては有利である。図2はタービンおよび発電機の既設の75~600MWの騒音測定値であるが、出力に比例して騒音レベルが上昇するとはかぎらない。むしろ最近作られる大形機は従来の小容量機に比べて多少小さくなっている。

次にポンプ類は建屋1階床(FL)に設置されるものと地上の敷地内に設置されるものとがある。主給水ポンプ(BFP)をはじめ大小多数のポンプ類があり、歯車付きのポンプは多少騒音レベルが大きい。図3はBFPの実測音圧レベル(C特性)と吐出し量 $Q \times (\text{全揚程} H)^2$ で整理したグラフを示すものである。特に顕著な傾向は見られないが、しいて相関性を求めるならば図のような傾斜で上昇するともいえる。これらはタービン同様建屋内にあるのでしゃ音が期待できる。次に循環水ポンプ(CWP)は比較的タービン建屋から離れた敷地内に設置されることが多いが、PWLは表1に示すようにかなり大きいほうであるから境界線近くに置くのは望ましくない。

次に送風機類であるが、これも代表的なものは押込送風機(FDF)とガス再循環通風機(GRF)で、このほか大小多数の送風機がある。FDFおよびGRFはボイラに近接しており、一般にボイラ建屋を背にして海岸側に面しているのでPWLが大きくても境界騒音としては影響が少ない。図4

表1 主要音源機器のPWLと位置 環境騒音の対象となる火力発電所の主要機器はこれらのものであるが、タービン建屋に属するタービン発電機、主給水ポンプ、冷却水ポンプ、復水昇圧ポンプなどから建屋を透過したPWLは100程度である。

Table 1 PWL of Main Noise Sources and Their Positions

機 器 名 称	PWL (dB)	位 置
タービン	108	3FL 屋内
発電機	107	3FL 屋内
循環水ポンプ(CWP)	98	地上 屋外
主給水ポンプ(BFP)	101	1FL 屋内
海水昇圧ポンプ	93	地上 屋外
主変圧器	107	"
所内変圧器	89	"
重油燃料ポンプ(FOP)	98	地上 屋外
押込通風機(FDF)	108	地上ボイラ付近
ガス再循環通風機(GRF)	105	地上ボイラ下
ボイラ	106	地上

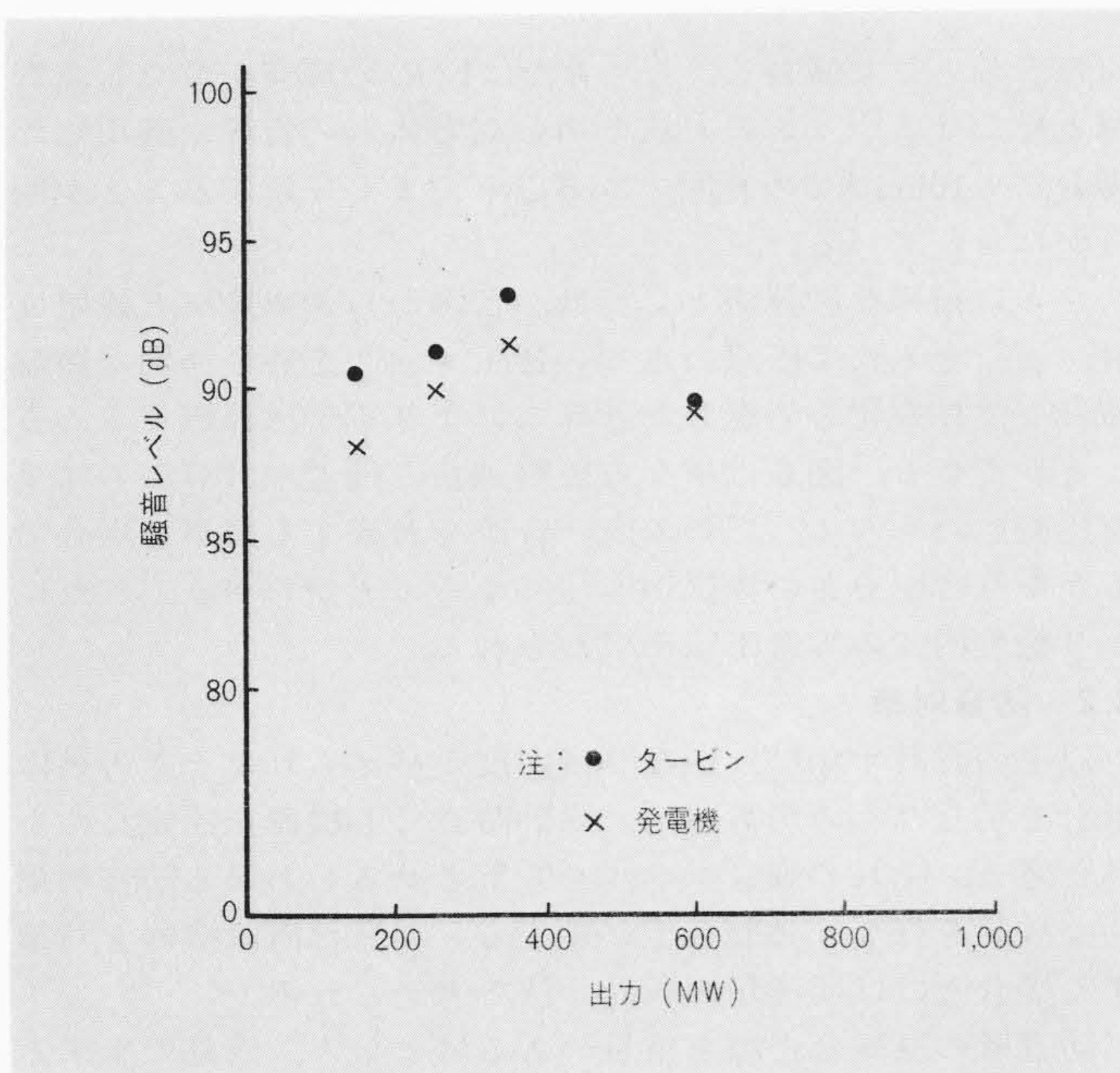


図2 タービン発電機の出力和騒音レベルの関係 最近の蒸気タービンおよび発電機の騒音は、出力増大に対しむしろ小さくなってきている。
Fig.2 Sound Pressure Level and Power Out Put of Steam Turbine and Generator

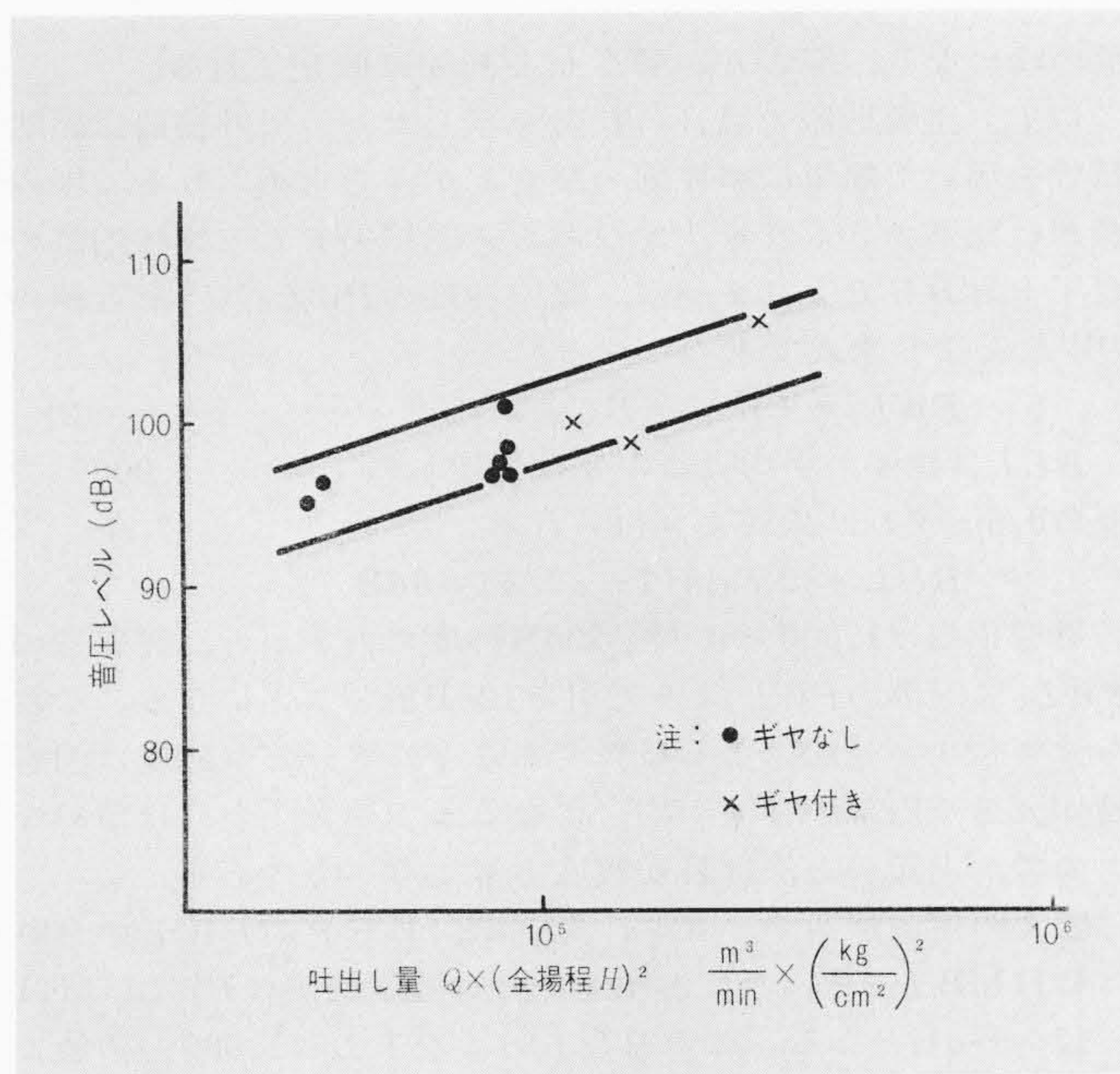


図3 主給水ポンプの音圧レベルと流体特性との関係 主給水ポンプはタービン建屋内に4台程度あり、ギヤ付きと付かないものとある。ギヤ付きは騒音が多少大きい。
Fig.3 Fluid Mechanical Character and Sound Pressure Level of Boiler Feed Pump

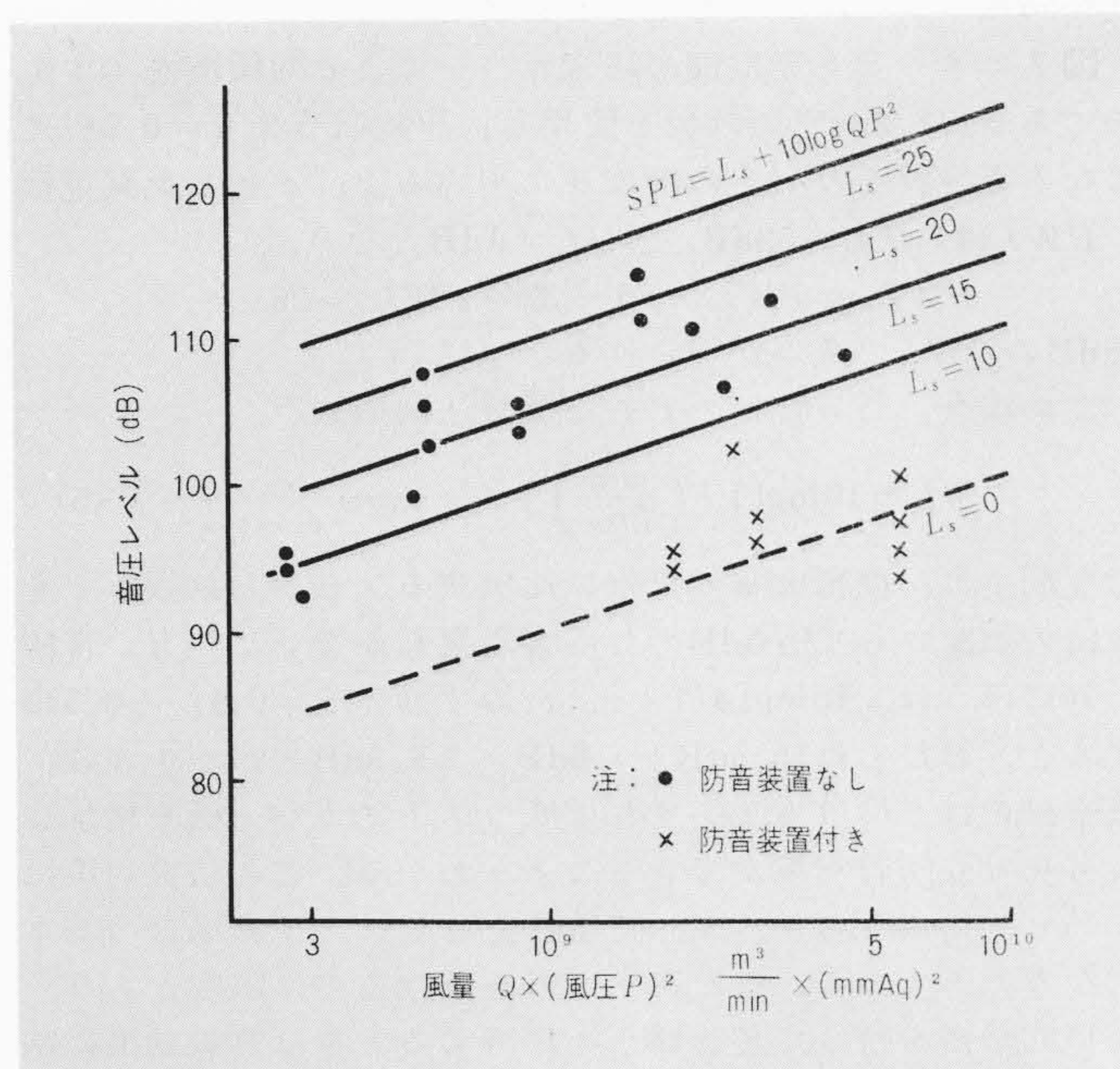


図4 押込送風機の音圧レベルと流体特性との関係 押込送風機は大容量ファンであるが、消音装置で対策すれば特に大きなPWLとは言えない。
Fig.4 Fluid Mechanical Character and Sound Pressure Level of Forced Draft Fan

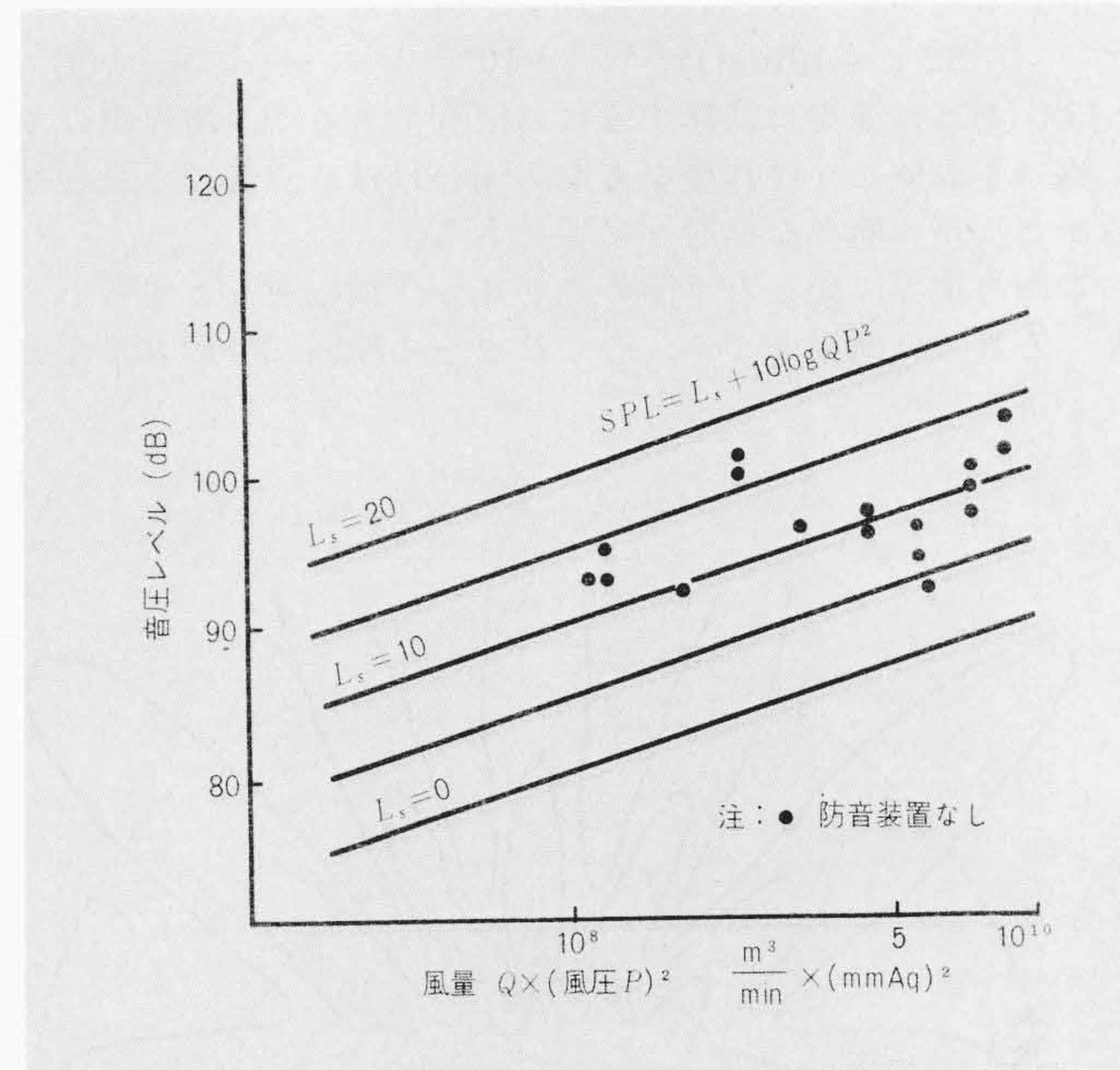


図5 ガス再循環通風機の音圧レベルと流体特性との関係 ガス再循環通風機の比騒音レベルL_sはかなりばらつくが、10程度とみなされる。
Fig.5 Fluid Mechanical Character and Sound Pressure Level of Gas Recirculating Fan

はFDF、図5はGRFの音圧レベルと風量 $Q \times (\text{風圧 } P)^2$ で整理したグラフを示すものである⁽²⁾。比騒音レベル L_s は次式の関係である。

$$SPL = L_s + 10 \log Q \cdot P^2 \dots \dots \dots (1)$$

図4よりFDFの L_s は15、図5よりGRFの L_s は10程度に設定すれば十分である。

ボイラは自身のSPLが大きくはないが表面積が他の機器に比べて1けた以上大きいのでPWLとしては小さいほうではない。しかし、比較的騒音レベルの大きいのは下半分のバーナ周辺であり、ボイラ上部のSPLは比較的小さい。また一般にボイラはタービン建屋を背にして海側にあることが多く、騒音の大きい部分はFDF、GRFと同様にタービン建

屋の陰になり、騒音が影響される範囲は限定される。

以上、主要機器の騒音の特徴を示したが、屋外機器は距離特性を用いて簡単に境界線の騒音レベルを求められる。屋内機器は建屋のしゃ音量、すなわち透過損失 TL と建屋内部の音圧上昇 BUL よりタービン建屋外部の PWL_0 は内部音源の PWL_i とより次式で求められる。

$$PWL_0 = PWL_i + BUL - TL \dots\dots\dots(2)$$

BUL は建屋の平均吸音率 $\bar{\alpha}$ は決定しにくいだが、1,000%で仮に0.5とすれば次式より得られる。

$$BUL = 10 \log \{4(1 - \bar{\alpha}) / \bar{\alpha}\} = 6 \text{ dB}$$

透過損失は1,000%に対し20dB程度であるから、建屋外の PWL_0 は内部の PWL_i より差引き12dB低いことになる。これらはエネルギー法による概算であるが、タービン建屋は内容積が大きく内部の音圧が均一になるまでの音圧上昇は望めないで、上記の方法は目安程度と考えるべきである。

表1の屋内機器タービン、発電機、BFPの PWL の合計は約111dBとなる。これよりタービン建屋外側の PWL_0 は111-12=99dBとなる。この BUL および TL は1,000%の値であるが、かなりの周波数範囲で成り立つのでタービン建屋の概略の PWL は100dB程度と見なせる。

以上の PWL を基にして、境界線での SPL を算定するには最も簡単な方法として次式により機器個別に距離減衰を求め、デシベル加算を行えばよい。 R_j は j 機器の距離である。

$$SPL_j = PWL_j - 20 \log R_j - 8 \dots\dots\dots(3)$$

求める境界線の SPL は次式より得られる。

$$SPL = 10 \log \{10^{SPL_1/10} + 10^{SPL_2/10} + \dots\dots\} \dots\dots(4)$$

(3)、(4)式は簡単に試算するには便利であるが、境界線近くに機器を設置しなければならない場合には、点音源と見なせるかどうかの簡単な検討が必要である。

音源の境界に面した平面の高さを a 、横幅を b とすると、 $R < \frac{a}{\pi}$ までは減衰がなく、 $\frac{a}{\pi} < R < \frac{b}{\pi}$ の範囲では $1/R$ すなわ

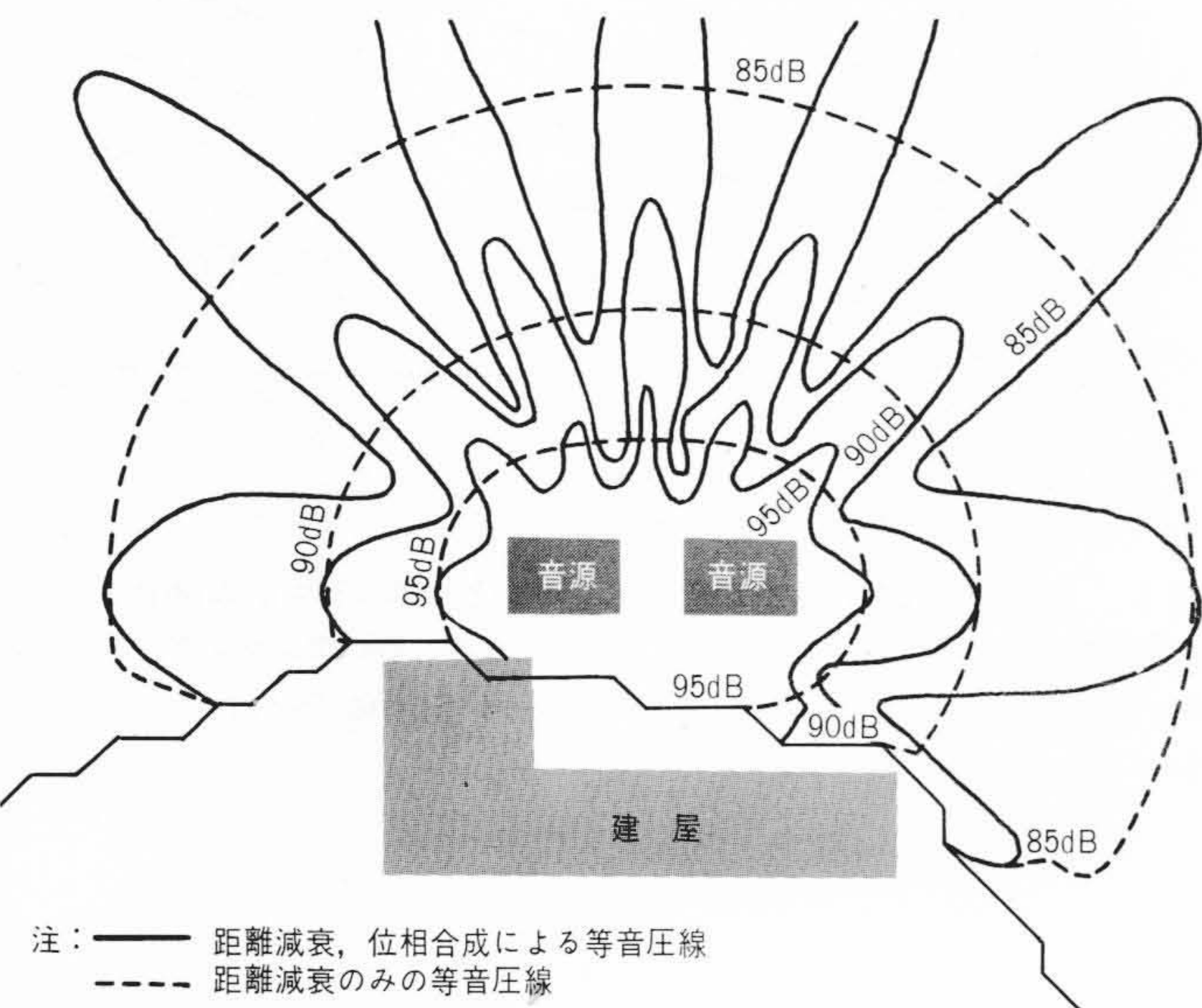


図6 二つの音源と建屋反射による等音圧線図の比較 距離減衰のみの(3)式と、さらに位相を考慮した式による電子計算機でプロットした結果ではこのようになり相違する。音響双極子の特徴を示している。

Fig. 6 Comparision between Two Calculutating Methods for Equi-Sound Pressure Line from Two Sound Sources

ち線音源として減衰し、 $\frac{b}{\pi} < R$ では $1/R^2$ の減衰が成立し点音源と見なせる⁽³⁾。この方法を用い立方体形の音源に適用した場合にも100mまでの範囲で2dB以下でよく一致することが明らかにされている。

さらに精細な計算法としては、音源からの直接波と建屋反射、屈折を入れて任意の点での音圧レベルを各経路別に距離減衰と位相変化を考慮した計算式により電子計算機で求めることができる。図6は単なる距離減衰と後者の計算法の結果を比較したもので、二つの同一音源を合成する簡単な場合でもかなり音圧分布の様相が違ってくることがわかる。これにより敷地内での等音圧線が求められる。

3.2 防音対策

以上の設計手順は、かなり自由度が与えられたときの具体指針を示したものであるが、設計時点でも機器を固定したものと考え、その騒音レベルを低下させるいわゆる防音対策的な設計を行なう必要も生じてくる。これは既設機器を対策する場合とはほぼ同種類の設計手法と考えられる。

防音壁の原理は音源を重量のある壁で包み、内部で生ずる音圧上昇を吸音材を内ばりして低下させることに尽きる。この場合の計算式は(2)式を用いることができる。

比較的小さな機器は全体を防音カバーで対策しても経費はかからないが、大形機器は部分的に騒音レベルの大きい場所があれば、それを中心とした部分的な防音カバーで対策ができる。その場合もカバーの振動絶縁を図るため、カバーの基礎を防振ゴムで浮かせる工夫が必要である。

図7はタービン発電機の防音カバーによる対策例を示すものである。3.2mm厚の鉄板を使用し、平均吸音率 $\bar{\alpha} = 0.5$ 程度になる吸音材をカバーの内ばりに用いると、タービン発電機の PWL は、 $TL = 32 \text{ dB}$ 、 $BUL = 6 \text{ dB}$ となり、

$$PWL_0 = PWL_i + 6 - 32 = PWL_i - 26$$

26dBの PWL の低下が得られる。

この場合、しゃ音材の TL は質量法則の式⁽⁴⁾、

$$TL = 10 \log \left[1 + \left(\frac{\omega m}{2\rho_c} \right)^2 \right] \dots\dots\dots(5)$$

で支配され、面密度 m の自乗に比例する。しかし鉄板などを2倍の板厚にしても6dBのしゃ音効果しかない。一方、音圧上昇のほうは、 $10 \log \{4(1 - \bar{\alpha}) / \bar{\alpha}\}$ のように $\bar{\alpha} = 0.1$ から0.5にすると、 BUL は15.5dBから6dBへと9.5dBの差が生ずる。吸音材のはり付けを工夫すれば低コストでカバー板厚増加よりも有効な防音対策ができることがわかる。この防音対策はタービンのみならず、すべて機器をしゃへいする場合の基本的な考え方である。ただ音圧上昇を下げるのは限度があり、経済的余裕を持って超低騒音を期待するときは質量効果に基づき、重い材料と十分な厚さで使用方法がとられる。

変圧器は50Hz周波数電源に対し、100%を主成分として二次、三次から五次程度まで発生するが、周波数が定まるのでタンク壁の共振などによる騒音対策は比較的容易である。電動機は広範囲に使用され、大小種々あり電磁的原因による成分にも電磁吸引力による100%を基本とする成分とスロットリップルによる広範囲の高周波成分があり、その他に冷却用ファンベーンの空気力学的音がある⁽⁵⁾。図8は水平軸形電動機の防音カバー付消音装置の一例を示すものである。通風性を要求されるので空気の入出口はベンド形のサイレンサ構造を採り直接音が放射されることを避けている。

ポンプ類は立て形と水平軸形とでは対策方法が異なる。CWPなどは立て形でポンプが地下に埋められているので対策は特に行なわない。BFPなどの水平軸形では全体を防音カ

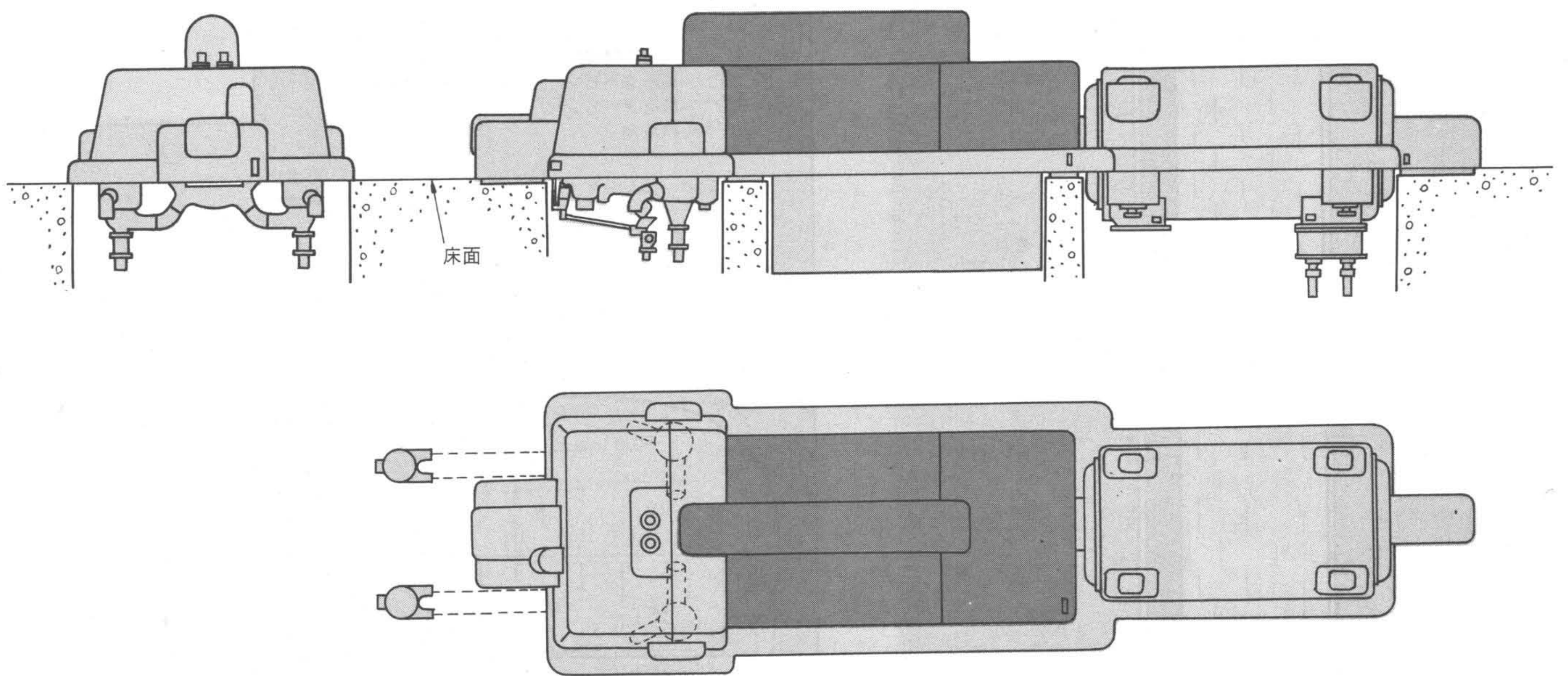


図7 防音カバーを付けた屋内式220MWタービン発電機 タービン発電機に防音カバーを付けることにより、原理的には26dB程度のPWLの低減が得られることになる。しかし、全周波数でこの効果は望めない。

Fig.7 Indoor Type 220MW Steam Turbine Generator with Sound Reduction Cover

バーでおおうことが多く、タービンで述べた方法と同じ原理に基づく構造である。

送風機類は騒音源が空気によるためサイレンサ構造を用いる。空気出口は煙突に通じるので特に防音処置は行なわれないが、煙突までのダクトは振動を少なくするため、壁に防振処理を行なうことがある。

ボイラは表面積が $2,000\text{m}^2$ 以上あり、バーナまわりを対策するにしても大がかりの対策になる。方法として壁近くに二重壁構造にしてしゃ音材を用い、空けきに吸音材をそう入する。二重構造の一例として図9に示す断面のものでは、材料費と工賃が相当量必要になる。

以上のほかに火力発電所には常時使用しない機器があり、たとえばボイラ起動時にのみ使用する起動用給水ポンプとか

加熱器バイパス弁なども騒音を発生する。これらを間欠騒音と名づけると、騒音持続時間が限られても、弁からの音や蒸気放出音は情緒的、身体的にも影響が大きいことがある。過熱器バイパス弁はボイラを水から起動させるとき、キャビテーション音が大きく、また過熱蒸気が弁を通過するときも相当大きな音を発生する。弁の対策は弁本体や配管の一部を防音壁で囲う方法をとる⁽⁶⁾。蒸気放出管には管端に折返し形か膨張形のサイレンサを使用するが、通気抵抗が小さく、構造が比較的簡単で切口などでうずを発生しにくいものがよい。

以上主要機器の防音対策を説明してきたが、境界線での目標値に対して各機器がどれだけの騒音レベルに押えるべきかを決定し、それに見合う経済的で保守の容易な構造上の対策を行なうことになる。

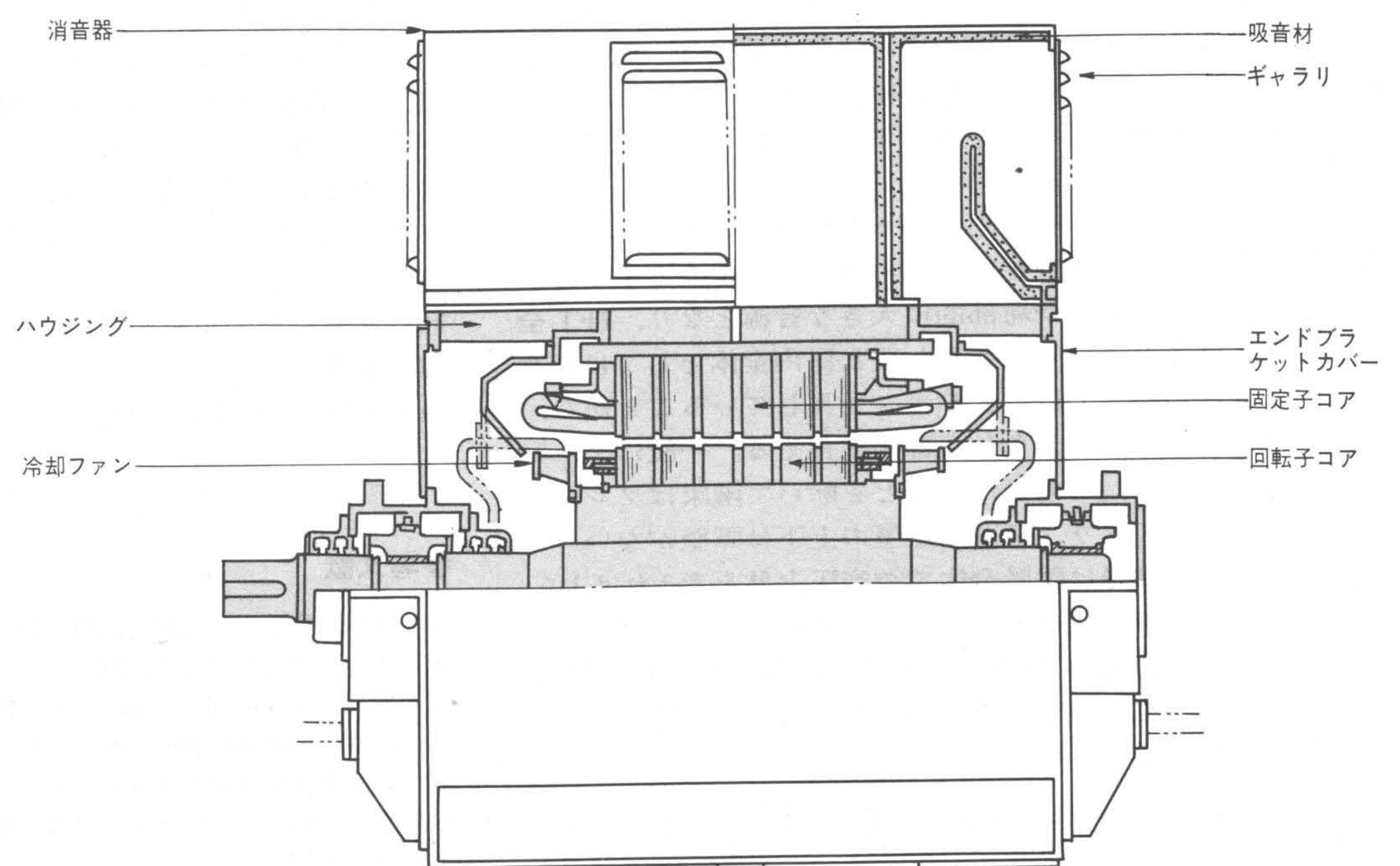


図8 防音対策を行なった誘導電動機 電動機の通風を妨げない消音装置として効果を持つ構造は多少大形になるが、迷路で吸音材による消音効果をねらう方式になる。

Fig.8 Induction Motor with Silencer

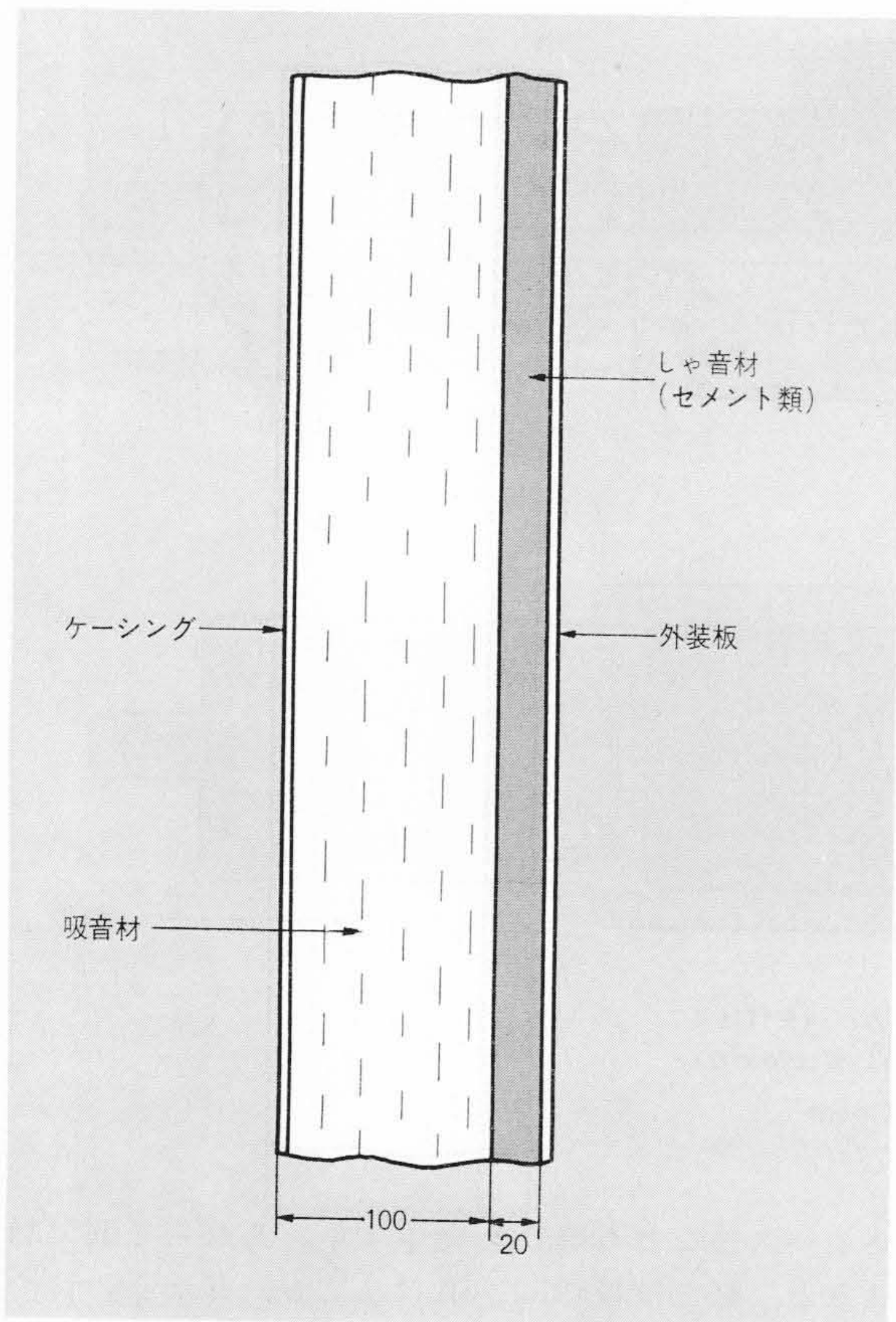


図9 ボイラ壁に対する二重防音壁構造断面 ボイラの防音対策は大がかりになるので経費が増す。ここに示したものは一般的な構造を示すものである。

Fig.9 Cross Section of Sound Reduction Device for Boiler Wall

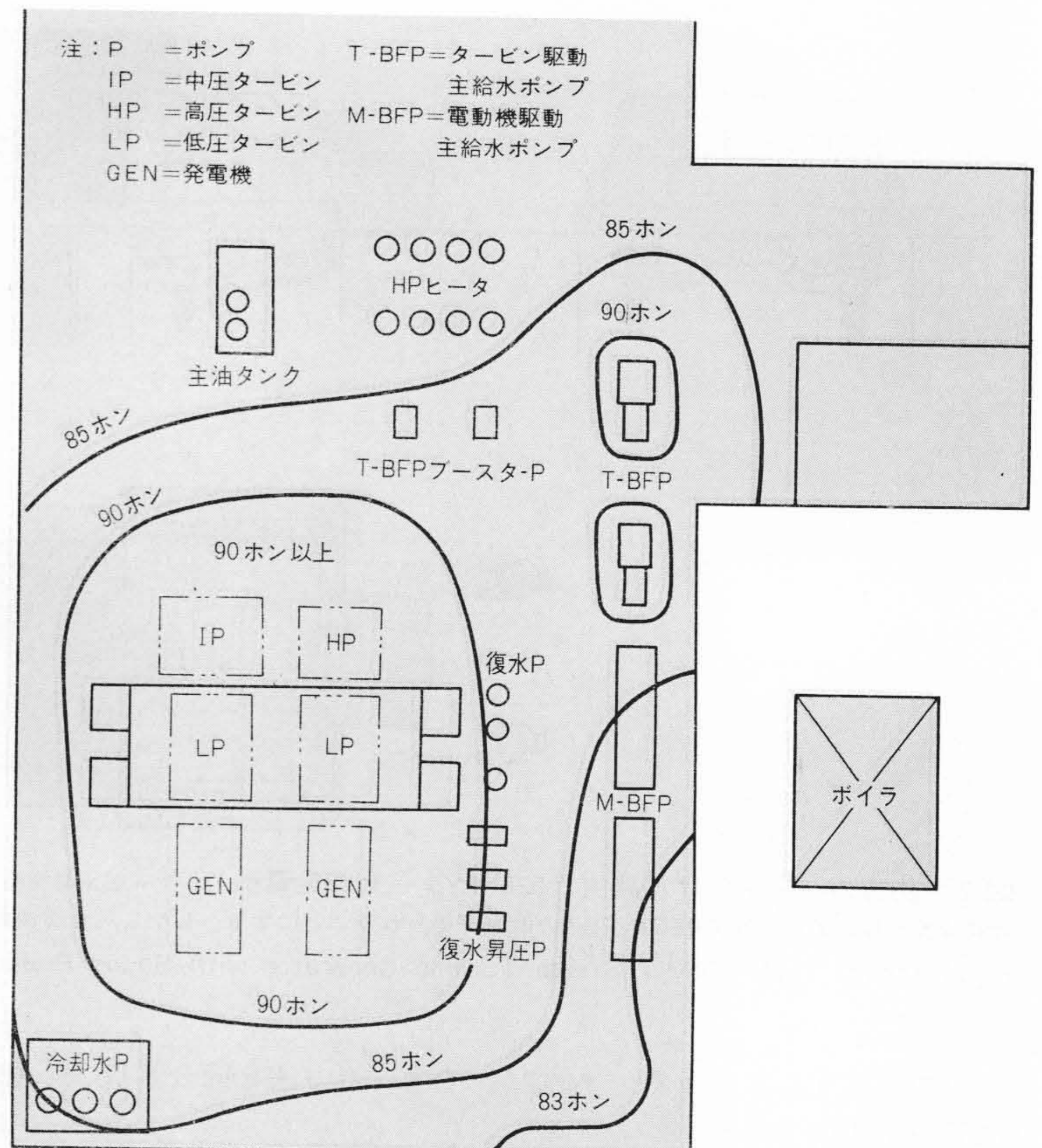


図10 火力発電所1階床の騒音分布 1階床に多数のポンプ類、ファン類があるが、騒音の主要機器は1階床から2階床へわたるタービン発電機であることを示す。

Fig.10 Sound Pressure Level Distribution of Thermal Power Plant of 1st Floor

4 職場環境上の防音

敷地境界付近の環境を改善するための防音設計方法は、主要音源をピックアップして、3で述べた計画検討を行なえばよいが、建屋内での職場環境上の騒音低減設計なり対策を行なうことはかなり困難な要素が多い。屋内機器は一般に小形機器が多いがいずれも同程度のPWLのものが並んでいると見られるので主要音源のみを対策するのでは不十分な場合が多い。

図10は1FLの等音圧分布図であるが、2FLにあるタービン発電機の下半分と主さい止弁などの補機類を中心とする音源を中心に2台のBFPが局部的に大きな音源となり、1FL全体の分布を決定している。しかし1FL屋内全体としては85ホンで、これらの機器の付近で5ホン上昇していることから、屋内全体がかなり均一化された音場と言える。一般にタービン建屋は発電装置、中央操作室などを除いて階床はグレーティングで仕切られており、空間は建屋の上下は障壁がない。したがって1FLの機器は建屋全体での音圧上昇を考えればよく、次式により点音源と見なされる距離での騒音レベルは音圧上昇分は小さい。 $R(m)$ の距離で音源の指向係数 Q (1:空間, 2:床の中央, 4:壁床の隅(すみ)の中央, 8:建屋の隅)に対して次式で与えられる⁽⁷⁾。

$$SPL = PWL + 10 \log \left\{ \frac{Q}{4\pi R^2} + \frac{4(1-\bar{\alpha})}{\bar{\alpha} S} \right\} \dots (6)$$

屋内1FLでの等音圧線を求めるには、機器の大きさと距離

R から、3に述べた $\frac{a}{\pi} > R$, $\frac{a}{\pi} < R < \frac{b}{\pi}$, $R > \frac{b}{\pi}$ の条件に応じた距離減衰方式を求め、点音源と見なせる機器からの寄与は(6)式を用いてSPLの合計を求めプロットする。

5 結 言

火力発電プラントの騒音につき敷地境界付近および職場環境上の防音計画および対策の概略を述べた。屋内屋外にある主要音源機器を示し、境界線上での音圧レベル合成のため機器のPWLを基本にし、距離減衰による影響の評価法を述べ、対策法としてしゃ音壁の設計上の注意事項を説明した。さらに一般的な防音対策の実施手法を示すことにより、環境を良好にするための指針を示した。火力発電所の騒音発生機器が種々多数であることから、概括的な説明に終始したが、今後の問題解決の一助になればと考える。

参考文献

- (1) 平松, 竹下: 火力発電, 23, 10号, 27 (昭47-8)
- (2) 玉河, 高井: 機学誌, 67, 547 (1964)
- (3) E. J. Rathe: J. Sound Vib. 10, 472 (1969)
- (4) 日本音響材料協会編: 騒音対策ハンドブック, 284 (昭43技報堂)
- (5) 日本電気協会編: 発電所等における騒音防止対策指針, 23 (昭46)
- (6) 平松, 荒川: 日立評論, 日立研究所創立三十周年記念論文集, 86 (昭39-11)
- (7) 久我新一: 音響入門 1, 125 (昭33彰国社)