U. D. C. 697.432 : 662.944.2 : 534.833

低騒音ボイラ「サイレントGUN」の開発

Development of Low-noise Hot-water Boiler

本田寿一* 伊藤克也*
Juichi Honda Katsuya Itô
横山精* 森下惣三*
Akira Yokoyama Sozô Morishita

要　　旨

快適な住まいの設備セントラルヒーティングの設計，施工に際して，長い間望まれていたのは，高出力で安全性が高く，操作が容易でしかも音の静かなボイラである。従来，高出力にポイントを置くと燃焼音が高く，騒音を避ければ熱出力の低い機種を選ばなければならなかった。

こうした設計，施工上の制約に根本的な検討を加えて開発した日立ファミリーボイラ「サイレントGUN」BO-311，BO-321（熱出力30,000 kcal/h）は，もっとも燃焼効率の高いガンタイプバーナの特性を生かしながら，外部に漏れる燃焼音を45 dB（Aスケール）以下とした低騒音ボイラである。

本報告は，低騒音化の検討経過と，開発したBO-311，BO-321の仕様，構造の概要について述べる。

1. 緒　　言

本研究は，セントラルヒーティング用のガンタイプ温水ボイラの低騒音化を目的として，新しいキャビネット構造と，サイレンサ(消音器)を開発したものである。

家庭における許容騒音値が，寝室，居間を除くと40～45 dB (JIS (A)スケール）であるといわれていることから，従来から音についてのみ不利であったガンタイプバーナ方式の，家庭用小形温水ボイラも，この45 dB以下を達成することが望ましく，業界の宿願とするところであった。

音を下げる手段としては，しゃ音，吸音，消音などがあるが，本ボイラは燃焼室内に熱交換と消音を兼ねた共鳴形のサイレンサを採用し，キャビネットに吸音としゃ音を兼ねた吸音材付密閉箱を採用することによって，熱出力30,000 kcal/hのガンタイプボイラとしては，初めて45 dB (A) 以下を実現した。

開発したBO-311（1回路方式），BO-321（2回路方式）は，低騒音化のほかに，据付の面で有利な屋外設置，SEダクト接続方式などの機構を取り入れているが，本文では，特に低騒音化の問題に論点を絞って記述する。

2. 低騒音ボイラの開発仕様

2.1 ボイラ騒音の比較と評価

騒音の評価方法には，JIS，N値，NC値などがある。このうち，**図1**に示すISO規格の聴感曲線に準拠したJIS (A) スケールが，もっとも人間の騒音に対する感覚との対応がよい。したがって本文では，以後特記しない限り，騒音レベルはすべてJIS (A) スケールで表示する。

表1は一般にいわれている室内の許容騒音レベルを示したものである。一般に個人の環境，嗜好，性格，目的などによって，同じ音が騒音になる場合とならない場合があり，一律に規定することはむずかしいが，ここにあげた数値は一般的な基準値とみてさしつかえない。この表から比較的静かさが要求される場所においては，45dB以下という騒音レベルが望ましいということがわかる。ボイラの騒音を45 dBと仮定して，このボイラを暗騒音が40 dBの住宅地に設置したとすると，暗騒音との合成騒音は46.2 dBとなる。このボイラが屋外に設置してあるとすると，壁や振幅による減衰により，室内騒音は45 dB以下となる。

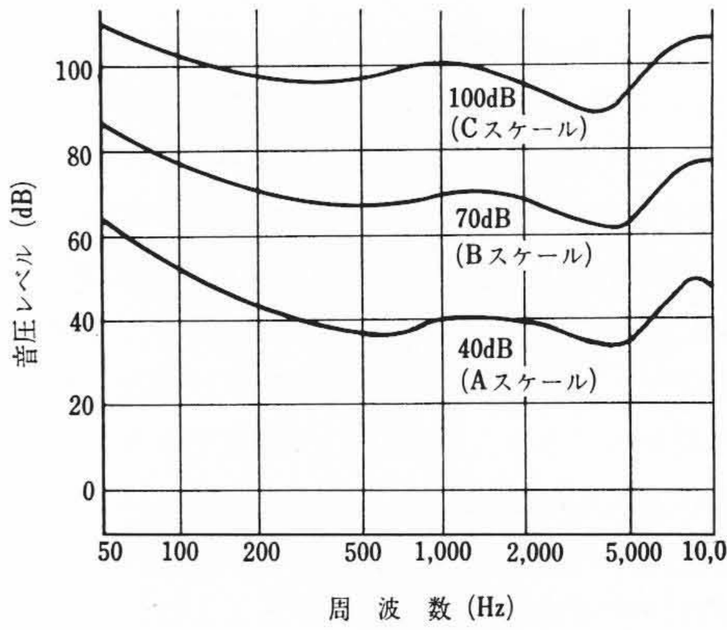


図1　ISO規格の聴感曲線

表1　室内許容騒音レベルの推奨基準値

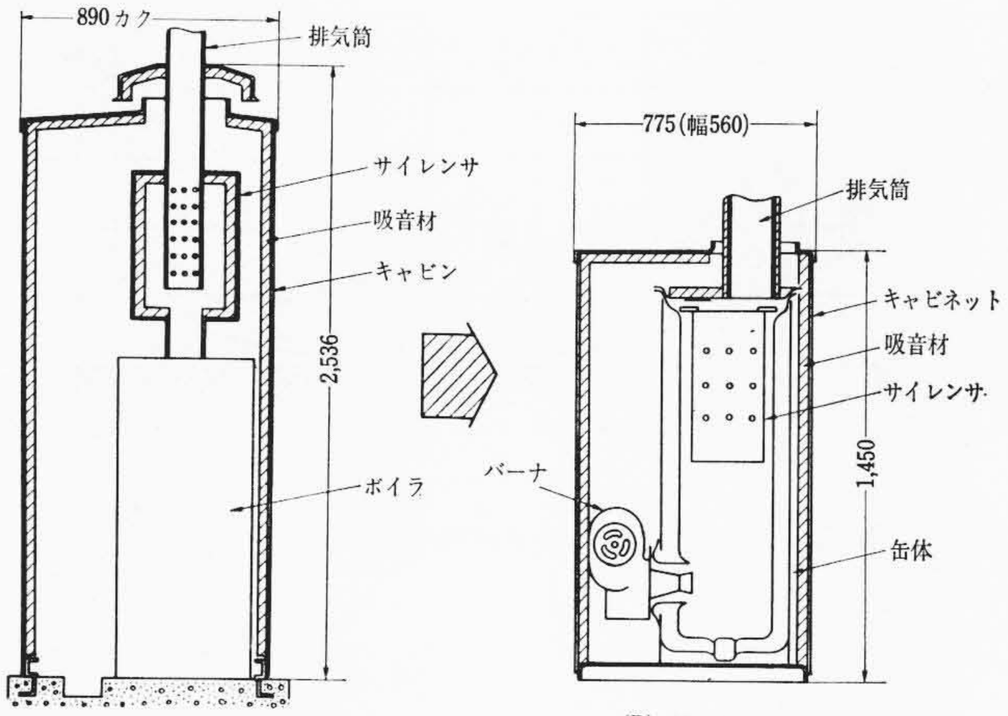
室または建物の種類	騒音計Aスケールの読み (dB≒ホン)
録音スタジオ（大）	30～35
都市住宅，アパート，ホテル	35～45
学校数室，研究室，会議室	35～45
映画館	35～45
図書館	35～45
小事務室，工場内試験室	40～50
大事務室，ロビー	45～55
商店，レストラン	45～55
工場内制御室，管理室	45～55
室内競技場	60

表2　ボイラ騒音（従来形）

項目＼機種	BO-210	BO-320
バーナ	ポット式	ガン式
熱出力 (kcal/h)	20,000	30,000
騒音 (Aスケール dB)	45	56

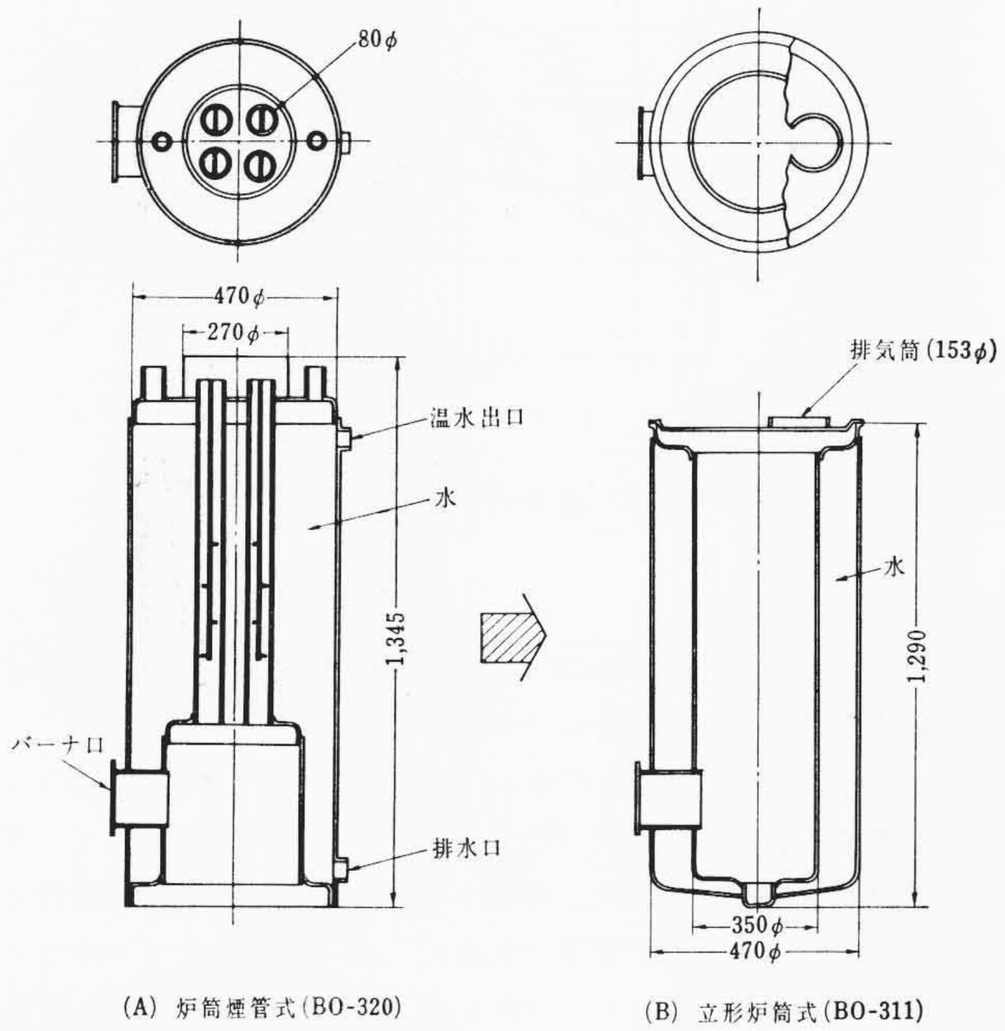
一方，温水ボイラの騒音レベルにつき調査すると，**表2**のようになる。このうちで，ポット形には45 dB以下という騒音値を示すものがあるが，ポット形では20,000 kcal/h以上の高出力は望めないという特性がある。現在，大幅に需要が増大する傾向にある30,000 kcal/hのガンタイプボイラの騒音をみると，この45 dBより約10

* 日立製作所柳井工場



(A) BOキャビン　　(B) 低騒音ボイラ

図2　しゃ音構造の合理化



(A) 炉筒煙管式(BO-320)　　(B) 立形炉筒式(BO-311)

図3　水缶構造の簡略化

dB 高い値を示しており，設置に際してじゅうぶんに騒音対策を施したボイラ小屋などを設ける必要が生じ不利となる。

したがって，以上述べたことから新形ボイラの騒音目標レベルを 45 dB 以下と設定した。

2.2　新機構採用の過程

2.2.1　BO キャビンの概略とその騒音防止の原理

従来，ガンタイプボイラの騒音を下げる目的で，日立製作所で開発製品化したものに BO キャビン[1] がある。BO キャビンは，本研究の目的である製品自体の低騒音化を実現したものではなく，従来構造のボイラをキャビン中に収納し，ボイラから発生する騒音を外部に伝ぱさせない方式とすることにより，騒音防止を図ったものであるが，騒音に対する効果は非常に大きく，注目に値する。

BO キャビンの構造の概略は**図 2** (A) に示すとおりである。この BO キャビンの騒音防止機構は，キャビンの外板（キャビネット）によりしゃ音効果を，外板に内張りした吸音材により吸音効果を，排気筒に接続したサイレンサにより消音効果をねらったものであり，さらにキャビネットと吸音材で密閉構造化を果たした

表3　目　標　仕　様

項目＼形式	BO-311
外法寸法	幅 565×高さ 1,950×奥行 785 mm
本体外法寸法	幅 565×高さ 1,450×奥行 785 mm
熱出力	30,000 kcal/h
貯湯量	90 *l*
貯湯温度	60～85℃
缶体表面処理	グラスライニング
燃料消費量	4.6 *l*/h（白灯油）
バーナ	特殊ガンタイプバーナ
安全装置	フオトセル，安全サーモスタット，過電流ヒューズ
接続配管	25 A（缶体給水，暖房往・戻）
排気筒	153φ
電源	単相 100 V，50/60 Hz
付属品	安全弁，排気ターミナル
騒音	45 dB（A スケール）
通風力制御方式	安全ダンパ
最高使用圧力	1.0 kg/cm²
重量	165 kg

(燃焼空気はキャビネットの上部から取り入れる)ことが特長となっている。

しかし反面，欠点として

（1）　キャビンの組立て工事が必要である。

（2）　ボイラを室内に据付ける時には，スペースならびに工事面で BO キャビンは使用できない。

などがあげられる。

2.2.2　水缶構造の簡略化とサイレンサの採用

従来，日立製作所で製作していた 30,000 kcal/h のガンタイプの機種である，BO-320 形の炉筒煙管式の缶体構造は**図 3** (A)に示すとおりである。この構造を**図 3** (B)に示す立形炉筒式として，構造を簡略化し，この中に BO キャビンと類似構造のサイレンサを使用して吸音効果を発起させる構造を案出した。

このように水缶構造を簡略化すると，燃焼室上部空間が大きくなるので，燃焼室内のガス速度が低下し，対流熱伝達量の低下があるが，内部に使用するサイレンサに，燃焼ガスの上昇速度をあげ，かつ流れを乱して表面の熱伝達量をあげるバッフル効果を持たせることによって，解決することができる。

2.2.3　密閉構造の合理化

図 2 (A) で示した BO キャビンの構造に似せて，**図 2** (B) で示すようにキャビネットをしゃ音密閉構造化すれば，比較的安価に BO キャビンと同じ効果を期待することができる。

2.3　目　標　仕　様

前項までに新開発のボイラ仕様について検討したが，これらをまとめて示したのが**表 3** である。この仕様は従来形の BO-320 と寸法，熱出力，そのほか概略同一仕様で，目標騒音値のみ約 10 dB 低い，45 dB としている。

3.　騒音低減の手法

燃焼騒音は，火炎の圧力波に起因する。その大きさは，火炎面の速度(熱放散割合)，単位質量あたり発熱量，未燃焼ガス密度の三者の積に関連する。また乱流炎では代表速度の 4 乗に，層流炎では代表速度の 2 乗に比例して大きくなる。したがって類似のガンタイプバーナでも，その形状のわずかな違いで発生騒音量が変わることが予想され，この形状を検討することで騒音低減の可能性はあるが，本開発では，BO-320 で実績のある日立製作所独自の構造のサイクロン式ガンタイプバーナ[2]をそのまま使用した。騒音低減の手法として，

（1）　音源の騒音低下

（2）　しゃ音による騒音低下

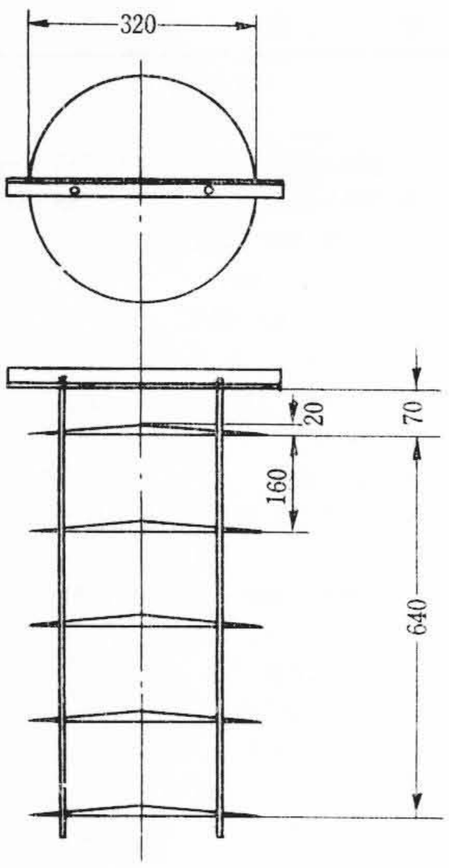


図4　バッフルの形状

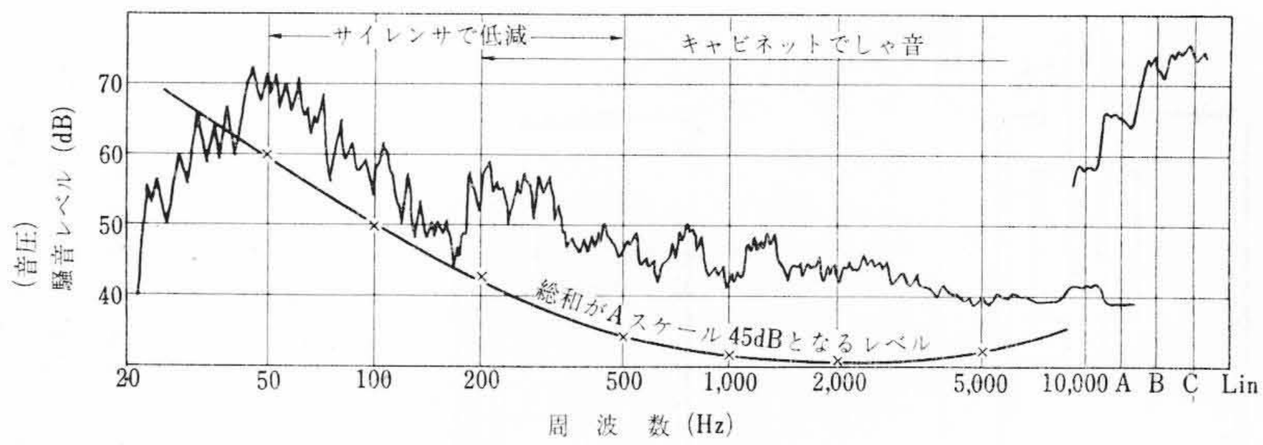


図5　バッフル使用のボイラ騒音

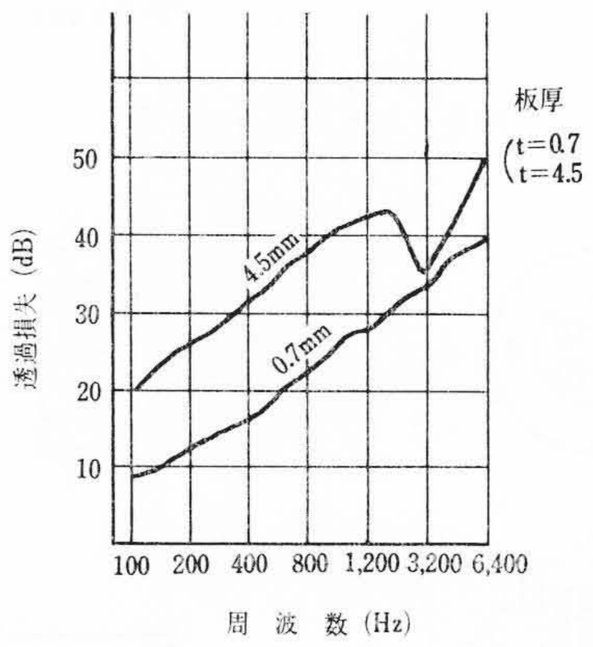


図6　鋼板の透過損失

（3）　吸音による騒音低下

（4）　消音器による消音

があげられるが，上記の理由から（2）～（4）の方法によって低減することにした。

3.1　キャビネットによる効果

構造を簡略化した立形炉筒式水缶の燃焼室の中に，図4に示す熱交換だけを目的としたバッフルを装入した場合のボイラ騒音をブリュエルケア社の1/3オクターブ騒音分析計で記録した結果は図5に示すとおりである。これはボイラ正面1m×高さ1mの位置でキャビネットなしの記録である。

この特性曲線のグラフは各1/3オクターブ(中心周波数25，31.5，40，50，63，……16,000，20,000)帯域のフィルタを被測定騒音が通過して沪(ろ)波されたあとの音圧レベルを示している。図より明らかなように，このボイラの騒音は図1に示したISO規格の聴感曲線の形に近い。またリニア表示（Lin）での騒音レベルは，可聴音を1/3オクターブに分割した32帯域の音圧レベルの和である。

音圧レベルAと音圧レベルBの和Cは，レベルA，Bをそれぞれ

$$A=20\log_{10}\frac{P_A}{P_0} \quad \cdots\cdots(1)$$

$$B=20\log_{10}\frac{P_B}{P_0} \quad \cdots\cdots(2)$$

とすると

$$C=[A+B]=20\log_{10}\frac{\sqrt{P_A{}^2+P_B{}^2}}{P_0} \quad \cdots\cdots(3)$$

$$\because \quad P_C=\sqrt{P_A{}^2+P_B{}^2} \quad \cdots\cdots(4)$$

ここに，　P_0：最小可聴音圧　(0.0002 μbar，at 1,000 Hz)

P_A, P_B, P_C：音　　圧　(μbar)

A, B, C：音圧レベル　(SPL：Sound Pressure Level) (dB)

同一レベルの騒音をn個並置した場合の合計の音$\sum$は

$$\sum=A+10\log_{10}n \quad \cdots\cdots(5)$$

ここで騒音低減量の目安を示す曲線として，50～3,000 Hz間の1/3オクターブ帯域数22個の音圧レベルの総和が(A)スケール45 dBとなる線を引く（これはJIS(A)スケール45 dBの線から，(5)式の右辺第2項の$10\log_{10}n$だけ差し引いた線である)。したがって，騒音低減分の目安としては，この曲線から上にはみだした音である。

キャビネットは鋼板製であるが，鋼板の透過損失は図6のようになる。これによると，200 Hz以下では通常のキャビネットに使用する薄鋼板の透過損失は10 dB以下である。

しゃ音壁の材料の選定の目安として数値をあげた文献[3]によると，透過損失の値が10 dB以下の場合は，実際上の問題として，振動の伝ぱ，取付個所の漏れなどによって，そのしゃ音の効果はほとんどないものと考えるのが常識である。このことからキャビネットでは比較的高音の250 Hz以上の音を約13 dB低下させることを目標とし，低音域の250 Hz以下については次に述べるサイレンサで低減させることにした。

3.2　サイレンサによる効果

前項に述べたキャビネットのしゃ音効果を大きく期待できない低周波数域の騒音については，サイレンサによりその改善策を見いだすことができる。サイレンサには

（1）　拡大形サイレンサ

（2）　共鳴形サイレンサ

（3）　干渉形サイレンサ

（4）　吸音材内貼(ばり)形サイレンサ

などが広く使用されているが，このうちで共鳴形は低周波の騒音の減音に対して利用しやすい利点を持っており，またある目標とする周波数を中心に狭い帯域で大きな減衰量を得ることができるので，本ボイラのサイレンサ用として最適である。本開発では，このサイレンサを図3（B）の立形炉筒に適用できるよう考案したものを採用した。

4.　サイレンサによる騒音低減の検討

4.1　理論設計（共鳴形サイレンサの特性）

共鳴形サイレンサを採用するにあたって，その減衰量の周波数特性を検討した。減衰量TL(dB)は

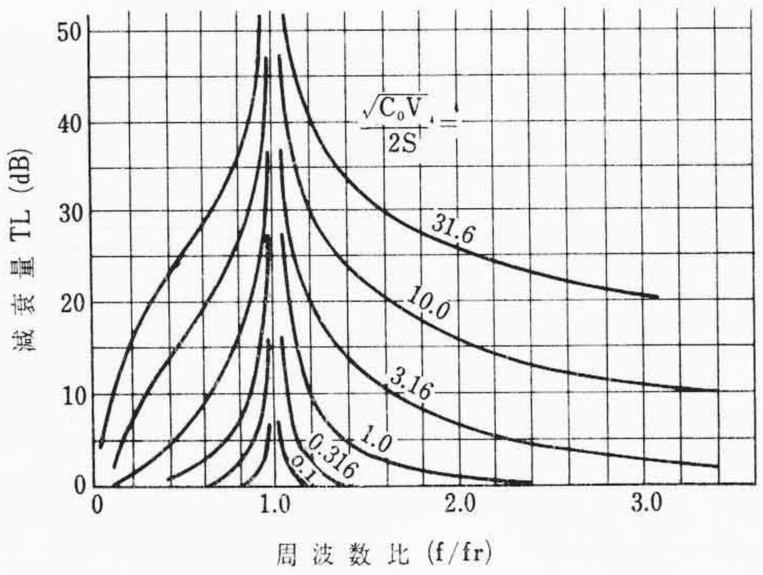


図7　共鳴形サイレンサ減衰量の周波数特性

$$TL=10\log_{10}\left[1+\left\{\frac{\sqrt{C_0V}}{2S}\Big/\left(\frac{f}{f_r}-\frac{f_r}{f}\right)\right\}^2\right] \quad \cdots\cdots(6)$$

$$C_0=n\pi a^2/(l+1.6a) \quad \cdots\cdots(7)$$

で表わされる。

ここに，V：空洞の容積
S：ダクト断面積
f_r：共鳴周波数
f：任意の周波数
n：穴の個数
a：穴の半径
l：板厚

減衰量 TL は $\sqrt{C_0V}/2S$ によって決まり，この減衰量の周波数特性を示すと**図7**のようになる。

この**図7**から，共鳴形サイレンサの減衰特性は，1個所でピークとなる特性を示していることがわかる。したがって目標とする周波数を中心に一定範囲の周波数域のみ効果があるということで，すべての周波数域に同時に効果を表わすことはできない。また共鳴周波数を高くとれば減衰される周波数帯域の幅は広くなることがわかる。

共鳴周波数 f_r は

$$f_r=\frac{C}{2\pi}\sqrt{\frac{nG}{V}} \quad \cdots\cdots(8)$$

$$nG=C_0, \qquad G=\frac{\pi a^2}{(l+1.6a)} \quad \cdots\cdots(9)$$

ここで C は音速(m/s)を表わし，t を使用温度(℃)とすれば，

$$C=331.5\sqrt{1+\frac{1}{273}t} \quad \cdots\cdots(10)$$

λ_r を共鳴波長とすると，望ましい各部の寸法は文献[4]によると，

共鳴器各部の寸法 $<\lambda_r/3$
せん孔域幅 $<\lambda_r/12$

である。

(8)式に目標とする共鳴周波数を与えれば，穴の数，穴の径などを算出することができる。

4.2 形状と効果

一般の共鳴形サイレンサは，**図8**に示す形状となっている。しかし本ボイラで用いたサイレンサは熱交換の役目を果たさねばならないため，一般のサイレンサの内筒がこのサイレンサの外筒に相当する。またその寸法は，ボイラの内筒により制限される。

本ボイラに適用したサイレンサの構造は**図9**に示すとおりである。このサイレンサによる効果は，バッフル(**図4**)使用の場合に比較すると500 Hz以下でかなりの減衰量を示し，この中でも特に当初目標とした，250 Hz以下の低周波域に大きな効果をもたらした。

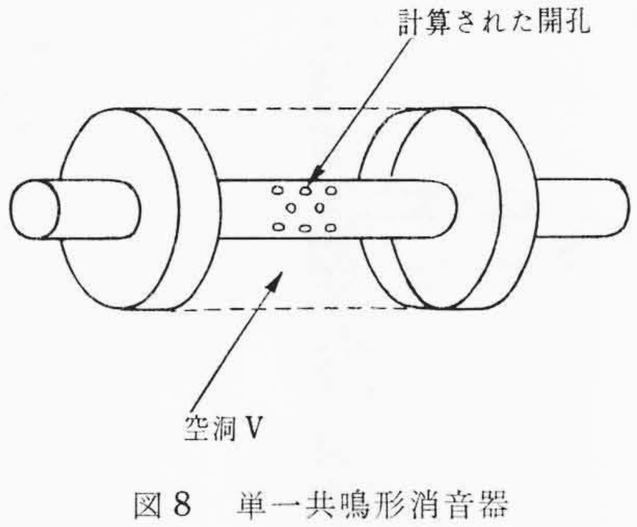


図8　単一共鳴形消音器

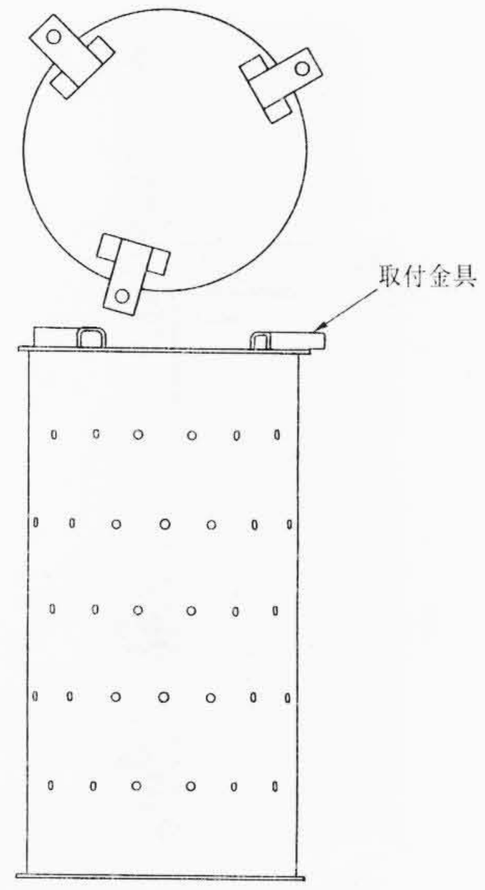


図9　サイレンサの構造

5. キャビネットによる騒音低減の検討

5.1 透過損失理論

透過損失 TL_0(dB)は次式で示される。

$$TL_0=10\log_{10}\left\{1+\left(\frac{\omega m}{2\rho C}\right)^2\right\}\fallingdotseq 20\log_{10}\frac{\pi m f}{\rho C} \quad [\mathrm{dB}] \quad \cdots\cdots(11)$$

ここに，m：単位面積あたりの質量
f：周波数
ρ：空気の密度
c：音速

(11)式からわかるように，TL_0 はしゃ音壁の質量の関数であり，壁材の密度が大きいほど，また壁が厚いほど，また入射してくる音波の周波数が高いほど透過損失は大である。したがってしゃ音材を選ぶとき，できるだけ重い材料で厚い材料を選択することが効果的である。しゃ音材の選定の目安として数値をあげた文献[3]によると，

$TL_0>40$ dB……かなりしゃ音効果あり
$TL_0=20\sim30$ dB……普通
$TL_0<10$ dB……しゃ音効果なし

となっている。これは前述のように壁や取付個所の漏れ，そのほかのために，実際には計算どおりの効果が得がたいことを示している。

したがってしゃ音効果を上げるために，騒音源を確実に密閉し，さらに振動伝ぱを少なくすることが設計の重大ポイントになる。

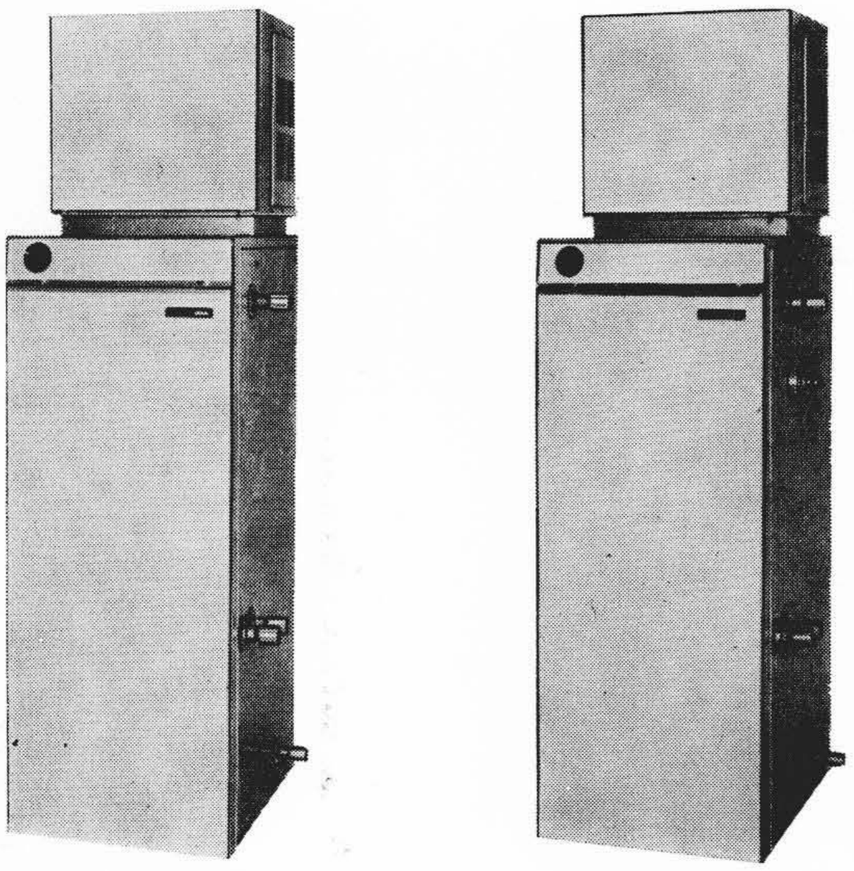
5.2 キャビネットの設計とその効果

キャビネットには，鋼板とグラスウールをはり合わせて使用した。なおグラスウールは吸音材であるが，透過損失による効果が大であることのほか共振防止，密閉構造化などの意味で付加した。**図5**によりキャビネットで低減しなければならないレベルは，250 Hz以上の帯域で，8～13 dBである。しゃ音，密閉構造を取り入れたキャビネット(後述)による効果は，250～500 Hzで平均8 dB，500 Hz以上で13 dBとなっており，全帯域での騒音低減効果は10 dBであって，設計上必要とする効果がこのキャビネットで得られた。

6. 低騒音ボイラの構造概要

検討結果に基づいて設計製作した日立ファミリーボイラ「サイレントGUN」の外観は**図10**に，内部構造は**図11**に示すとおりである。低騒音化のための検討項目をまとめると，

(1)　しゃ音，気密構造の確立



BO-311（1回路式）　BO-321（2回路式）

図 10　サイレント GUN

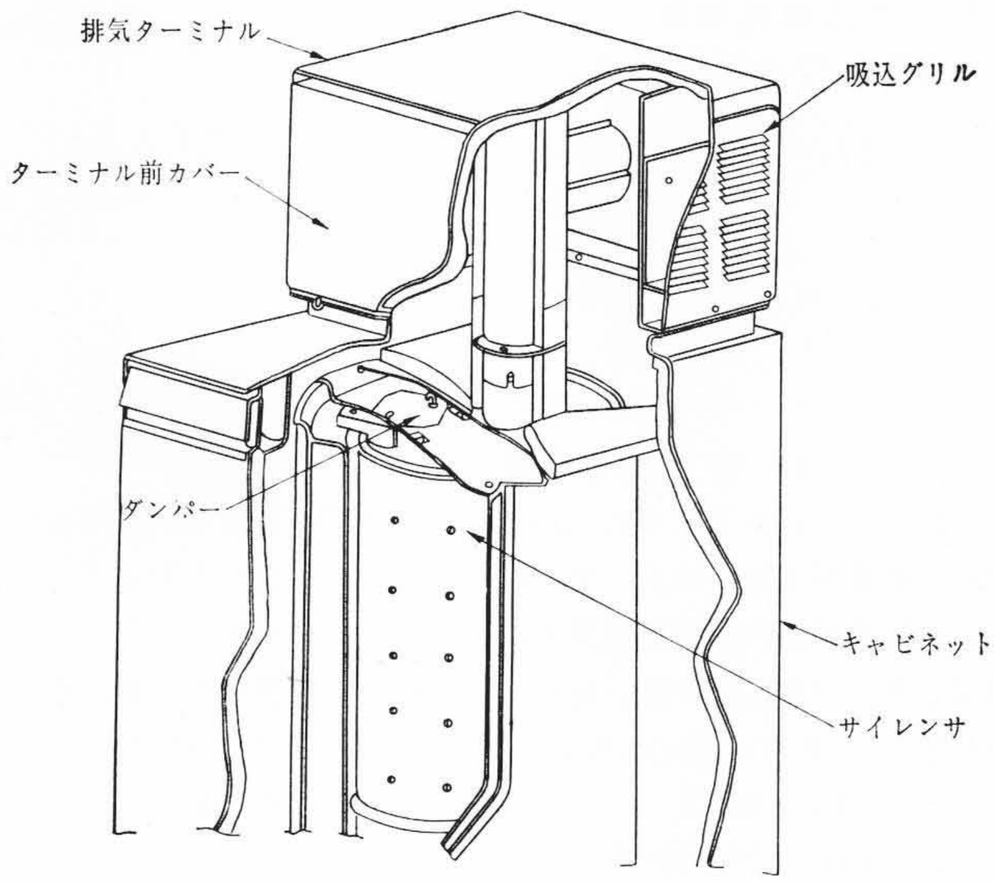


図 11　サイレント GUN の内部構造図

（2） 騒音を外部に出さない給気方式の確立

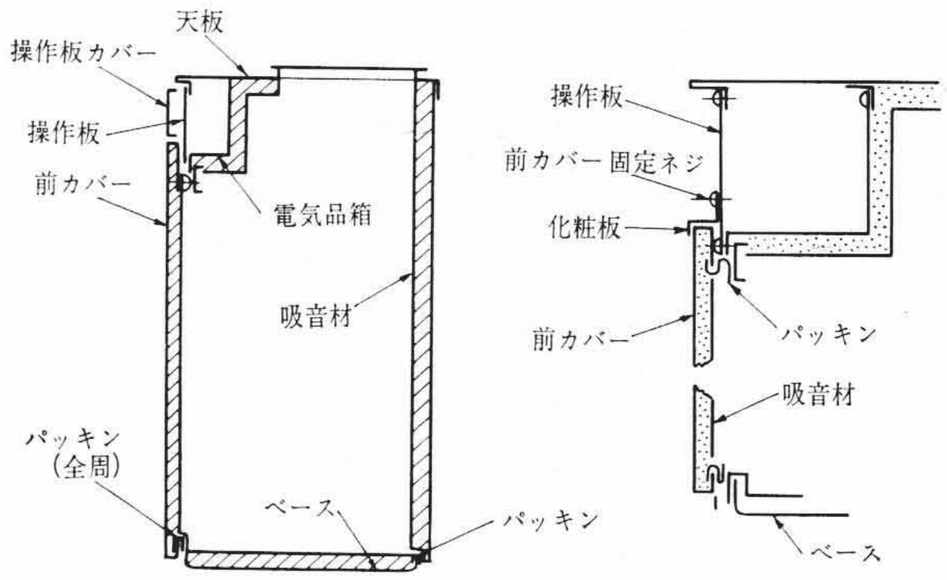
（3） 密閉構造化に伴う電気品温度上昇の防止

となる。これらの検討項目を取り入れて検討した結果，キャビネットは図 12 に示すような構造のものとした。 構造上のおもな特長は以下のとおりである。

（1） しゃ音，気密構造化のため，鋼板にグラスウールをはり合わせて使用，そのほかのシールは，ゴム発泡(ぽう)品をパッキンとして使用している。

（2） キャビネット密閉化により，燃焼空気取入口を騒音低減に有利なキャビネット上部に設けた。

（3） 完全に内部としゃ断された独立部屋(へや)をキャビネット正面上部に設け，電気品をその中に組み込む構造とした。



(a) キャビネット構造　(b) 前カバーの固定と気密構造

図 12　キャビネット構造概要

（4） 燃焼空気取入口部，キャビネット溶接部などを雨仕舞構造とし，ボイラの屋外設置を可能にした。

この構造で騒音を検討した結果，44～45 dB(A) となり，目標値 45 dB を達成した。

7. 結　　言

ガンタイプバーナ使用の温水ボイラの低騒音化を目的とし，キャビネットおよびサイレンサについて理論的，実験的検討を加え，「サイレント GUN」の名称で製品化した。検討の成果を要約すると以下のとおりである。

（1） キャビネットとサイレンサによるしゃ音，吸音手法を検討し，構造を確立した。 この結果，熱出力 30,000 kcal/h で 45 dB(A) を達成し，従来形の BO-320 形に比べ，11 dB 低減した。

（2） 上記，騒音低減の検討は，種々の付帯的効果をもたらした。製品としての特長を要約すると次のとおりである。

（a） 火災に対する安全性が向上し，万一ボイラから失火してもキャビネットの外部に延焼する恐れがほとんどない。

（b） 雨，風に対する処置が強化され，従来のような重構造のボイラ小屋が不要になった。

（c） 燃焼空気取入口を 1 個所にまとめたことで，4 種類の排気筒工事が可能になり，据付しやすい構造となった。

以上の検討結果により，熱出力 50,000 kcal/h の BO-510，BO-520 も開発し，あわせて 4 機種を「サイレント GUN シリーズ」として製品化した。

終わりに，本開発の進行にあたり種々ご指導いただいた，日立製作所機械研究所，家電研究所の関係者各位に対し深甚の謝意を表する次第である。

参　考　文　献

（1） 伊藤ほか 2 名： 日立評論 **52**，69（昭 45-5）
（2） 横山，三森： 日立評論 **52**，35（昭 45-4）
（3） 福田基一，奥田襄介： 機械の騒音とその対策，237（昭-42 共立出版）
（4） 日本音響材料協会： 騒音対策ハンドブック，398（昭-41 技報堂）
（5） 飯野 香： 防音装置の設計（昭-38 理工図書）
（6） 守田 栄： 騒音と騒音防止（昭-44 オーム社）