

JAERI-Tech

98-045



アコースティック・エミッション法を用いた
高温工学試験研究炉の1次冷却材漏えい
及び熱交換器伝熱管の流体振動の監視装置の開発

1998年10月

橋 幸男・国富一彦・古澤孝之
篠崎正幸・佐藤善之*・柳橋 実*

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合せは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1998

編集兼発行 日本原子力研究所

アコースティック・エミッション法を用いた高温工学試験研究炉の
1次冷却材漏えい及び熱交換器伝熱管の流体振動の監視装置の開発

日本原子力研究所大洗研究所高温工学試験研究炉開発部

橋 幸男・国富 一彦・古澤 孝之

篠崎 正幸・佐藤 善之*・柳橋 実*

(1998年9月17日受理)

高温工学試験研究炉は1次冷却材としてヘリウムガスを使用しており、原子炉格納容器内へのヘリウムガスの漏えいを想定して設計を行っている。1次冷却材の漏えいを可能な限り少なくするためには、漏えいを早期に検知する必要がある。また、高温工学試験研究炉の熱交換器の伝熱管は流体振動を生じない設計となっているが、万一の場合に備えて、流体振動の監視を行う。そこで、アコースティック・エミッション法を用いた二重管の1次冷却材漏えい及び熱交換器伝熱管の流体振動の監視装置について検討し、高温工学試験研究炉に適用した。実機への適用に先立ち、1次冷却設備二重管の外管の1/4スケールの試験体を用いた炉外漏えい試験を実施し、検出可能な漏えい量、各種パラメータ(気体、圧力、漏えい箇所の形状、漏えい箇所からの距離)の影響について検討した。その結果、約5Ncc/secの漏えいを検知できることが明らかになった。高温工学試験研究炉の運転開始後に、ノイズ対策を実施する必要があると考えられるが、漏えい検知に有効な方法となる見通しを得た。

Development of Monitoring System using Acoustic Emission for Detection of Helium Gas Leakage
for Primary Cooling System and Flow-induced Vibration for Heat Transfer Tube of Heat Exchangers
for the High Temperature Engineering Test Reactor(HTTR)

Yukio TACHIBANA, Kazuhiko KUNITOMI, Takayuki FURUSAWA
Masayuki SHINOZAKI, Yoshiyuki SATOH* and Minoru YANAGIBASHI*

Department of HTTR Project
Oarai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received September 17, 1998)

The High Temperature Engineering Test Reactor(HTTR)uses helium gas for its primary coolant, whose leakage inside reactor containment vessel is considered in design of the HTTR. It is necessary to detect leakage of helium gas at an early stage so that total amount of the leakage should be as small as possible. On the other hand, heat transfer tubes of heat exchangers of the HTTR are designed not to vibrate at normal operation, but the flow-induced vibration is to be monitored to provide against an emergency. Thus monitoring system of acoustic emission for detection of primary coolant leakage and vibration of heat transfer tubes was developed and applied to the HTTR. Before the application to the HTTR, leakage detection test was performed using 1/4 scaled model of outer tube of primary concentric hot gas duct. Result of the test covers detectable minimum leakage rate and effect of difference in gas, pressure, shape of leakage path and distance from the leaking point. Detectable minimum leakage rate was about 5 Ncc/sec. The monitoring system is promising in leakage detection, though countermeasure to noise is to be needed after the HTTR starts operating.

Keywords : HTTR, Acoustic Emission, Leakage Gas, Monitoring System

* HESCO

目 次

1. 緒 言	1
2. 高温工学試験研究炉の冷却設備	2
2.1 全体構成	2
2.2 原子炉の冷却設備	2
2.3 1次冷却設備及び補助ヘリウム冷却系のヘリウム漏えいについて	2
2.4 热交換器伝熱管の流体振動について	3
3. アコースティック・エミッション法の適用について	12
4. 炉外漏えい試験	13
4.1 概 要	13
4.2 試験方法	13
4.3 試験条件	13
4.4 試験結果	14
5. 高温工学試験研究炉への適用	26
5.1 装置構成	26
5.2 監視アルゴリズム	26
5.3 今後の課題	28
6. 結 言	36
謝 辞	36
参考文献	36

Contents

1. Introduction	1
2. Cooling System of HTTR	2
2.1 Overview of HTTR	2
2.2 Cooling System of Reactor	2
2.3 Helium Leakage of Primary and Auxiliary Helium Cooling System	2
2.4 Flow-induced Vibration of Heat Transfer Tubes of Heat Exchangers	3
3. Application on Acoustic Emission	12
4. Out-of-pile Helium Leakage Test	13
4.1 Abstract	13
4.2 Test Method	13
4.3 Test Condition	13
4.4 Test Result	14
5. Application of Acoustic Emission to HTTR	26
5.1 Components for Monitoring System	26
5.2 Algorithm for Monitoring	26
5.3 Problem to be Solved	28
6. Conclusion	36
Acknowledgment	36
Appendix	36

1. 緒 言

高温工学試験研究炉 (High Temperature Engineering Test Reactor : HTTR) は、原子炉出力 30 MW、原子炉出口ヘリウムガス温度 950°C (最高) の高温ガス炉であり、高温ガス炉の技術基盤の確立、高度化、先端的基礎研究のための試験研究に供される。HTTR は、平成 10 年 7 月から燃料装荷を開始しており、間もなく初臨界となる予定である。

HTTR では、1 次冷却材がヘリウムガスであるため、原子炉格納容器内の 1 次冷却材の漏えい率として $0.2\%/\text{day}$ ($=2.3 \times 10^{-8} \text{ l/s}$) (1 日に 1 次系全ヘリウム量の 0.2 % が格納容器内に漏えい) を想定し、この値を気体廃棄物の放出量の計算に用いている。従って、原子炉定格運転時の漏えい率が、 $0.2\%/\text{day}$ 以下であることを自主的に確認する必要がある。

原子炉定格運転時は、1 次冷却材圧力は一定圧力に制御されるため、1 次冷却材の供給量を監視することでヘリウムの微小な漏えいを検知することが可能である。また、この方法により、漏えいが拡大しているか、収束に向かっているかの判断も可能である。しかしながら、この方法では検知あるいは判断に、事象の発生から少なくとも 2~3 日を必要とする。1 次冷却材の漏えいを可能な限り少なくするためにには、異常な漏えいを早期に発見する必要がある。またより微小な漏えいを検知できることが望ましい。

HTTR の熱交換器（中間熱交換器、1 次加圧水冷却器及び補助冷却器）の伝熱管は、有意な流体振動を生じない設計となっているが、万一に備えて、異常な流体振動を監視する装置を設置しておく。

そこで、アコースティック・エミッション (Acoustic Emission : AE) 法を用いた漏えい及び流体振動の監視装置の開発に着手した。

本報告では、1 次冷却設備の二重管の外管を模擬した 1/4 スケールの試験体を用いた試験結果及び AE 法の HTTR への適用について述べる。平成 10 年 6 月に HTTR の 1 次冷却設備及び補助ヘリウム冷却系の二重管並びに中間熱交換器、1 次加圧水冷却器、補助冷却器に AE センサを設置し、中央制御室の隣の計算機室で二重管からの漏えい及び熱交換器の流体振動を監視するシステムを完成した。但し、ノイズ対策は現状未実施であり、1 次冷却設備、補助冷却設備を含む HTTR 全設備の運転開始後に検討していく計画である。

2. 高温工学試験研究炉の冷却設備

2. 1 全体構成

高温工学試験研究炉（HTTR）は、Table 2.1 に示すように、熱出力 30 MW、原子炉出口冷却材温度が定格運転時 850°C、高温試験運転時 950°C を目標とする黒鉛減速ヘリウムガス冷却型の高温ガス炉である。

HTTR は、(1) 出力密度が小さく熱容量が大きいため、反応度の異常な上昇や冷却能力の異常な低下などが生じても、炉心温度の変化がきわめて緩慢である、(2) 中性子寿命が長く反応度係数が負で大きいため、反応度の異常な上昇や冷却能力の異常な低下が生じても、出力が急激に上昇しにくい、(3) 冷却材として用いるヘリウムガスは、化学的に不活性であり、燃料や構造物との化学的相互作用が少なく放射化されにくいで、従事者の被ばく線量が低く、放射性廃棄物の発生量が少ない等の固有の安全性を有する点に特長がある。

2. 2 原子炉の冷却設備

HTTR の冷却設備系統図を Fig. 2.1 に示す。HTTR の主冷却設備は、通常運転時における原子炉の冷却を行うための 1 次冷却設備、2 次ヘリウム冷却設備及び加圧水冷却設備から成る。補助冷却設備は、原子炉がスクラムした時に用いられ、補助ヘリウム循環機により 1 次ヘリウムを強制循環することにより、炉心の残留熱除去を行う。一方、炉容器冷却設備は、1 次系の配管破断のように 1 次冷却材の流路が確保できない事故時の残留熱除去に用いられる。

1 次冷却設備には、最大除熱量 10 MW の中間熱交換器 (Fig. 2.2 参照) と最大除熱量 30 MW の 1 次加圧水冷却器 (Fig. 2.3 参照) の 2 種類の熱交換器を並列に設置している。原子炉で発生した熱は、1 次加圧水冷却器並びに中間熱交換器及び 2 次加圧水冷却器を通して加圧水冷却設備に伝えられ、加圧水空気冷却器により大気へ放散する。

補助冷却設備は補助ヘリウム冷却系及び補助冷却水系から成る。補助ヘリウム冷却系は、原子炉からの残留熱を補助冷却器 (Fig. 2.4 参照) を介して補助冷却水系に伝達する。補助冷却水系は、補助冷却器を介して補助冷却水に伝達された熱を補助冷却水空気冷却器により大気に放散する。

主冷却設備及び補助冷却設備の二重管は、Fig. 2.5 に示すように、内管の内側にライナにより表面を覆った断熱材を取り付け、これに同心に外管を組み立てたものである。内管の内側には、炉心から出た高温の 1 次冷却材を流す。内管と外管との環状部には、熱交換器で冷却され、さらに 1 次ヘリウム循環機で昇圧された 1 次冷却材を流す。

2. 3 1 次冷却設備及び補助ヘリウム冷却系のヘリウム漏えいについて

1 次冷却材が原子炉格納容器内に大量に漏えいした場合は、1 次冷却材と加圧水の差圧

の低下、1次加圧水冷却器のヘリウム流量の低下（又は中間熱交換器1次冷却材流量の低下）、原子炉出口冷却材温度の上昇あるいは原子炉格納容器内の放射能の増加により、自動的に原子炉スクラムあるいは原子炉格納容器隔離が行われる。

微小な漏えいの場合には、1次ヘリウム貯蔵供給設備による1次冷却材の供給量あるいは1次冷却材の圧力降下を監視することで検知が可能である。HTTRの1次冷却設備は、圧力制限下限値になると1次ヘリウム貯蔵供給設備のヘリウム供給弁を開とし、圧力制限上限値で閉とする間欠供給方式でヘリウムを供給して圧力を制御している。上限値と下限値の差は約 0.7 kg/cm^2 で、1回あたりの供給量は約11kgである。

HTTRでは原子炉格納容器内の1次冷却材の漏えい率として 0.2 %/day (= $2.3\times10^{-8}\text{ l/s}$)を想定し、この値を用いて気体廃棄物の放出量の計算を行っている。従って、原子炉定格運転時の漏えい率が、 0.2 %/day 以下であることを自主的に確認する必要がある。なお、原子炉運転中に1次冷却設備から原子炉格納容器内へ漏えいし、原子炉格納容器内に蓄積した気体廃棄物は、原子炉格納容器減圧装置のフィルタユニットにより微粒子、放射性よう素等を除去した後、放射性物質の濃度を監視しながら排気筒から放出する。

1次系のヘリウム保有量は約670kgであるため、 0.2 %/day は約 1.3 kg/day あるいは約93atm·cc/s(Ncc/sec、以下cc/sと略す)(Heの密度として 0.166 kg/m^3 (大気圧、 20°C)を使用)に相当する。この微小漏えいは、上記の様に1次冷却材の供給量を監視することで検知可能である。一日あたり約 1.3 kg/day (0.2 %/day)の1次冷却材の漏えいを想定し、さらに、不純物濃度を監視するための1次ヘリウムサンプリング設備及び、1次ヘリウム純化設備から1次系外に流出する量 約 0.5 kg/day を考慮すると、供給頻度は約6日間に1回となる。供給頻度がこれよりも短くなれば、漏えい量が 0.2 %/day を超えてことになる。

この方法の問題点として、 $0.2\sim1.0\text{ %/day}$ 程度の漏えいを検知する場合、漏えいの検知までにかなりの時間を要すること、温度が一定でない時(起動・停止時)は異常を検知できないことがあげられる。1次冷却材の漏えいを可能な限り少なくするためにには、異常な漏えいを早期に発見する必要がある。また、より微小な漏えいを検知できることが望ましいことから、アコースティック・エミッション(Acoustic Emission: AE)法を用いた漏えい監視装置のHTTRへの適用を試みた。この方法では、漏えい量及び漏えい場所の推定を瞬時に行うことが可能であり、上記の想定値 0.2 %/day (約93cc/s)と比較して、低レベルの漏えいを検知することが可能である。

2. 4 熱交換器伝熱管の流体振動について

HTTRの熱交換器(中間熱交換器、1次加圧水冷却器、補助冷却器)の伝熱管は、カルマン渦、流力弹性振動等による異常な流体振動を生じない設計となっている。例えば、中間熱交換器の場合、管外流体が伝熱管に直交して流れているため、伝熱管の後方にカルマン渦が周期的に発生、離脱していく。渦が発生、離脱する頻度(渦の放出振動数)は、流

速にほぼ比例して増加するので、万一、渦の放出振動数が伝熱管の固有振動数と一致する流速で運転すると、伝熱管が振動する可能性がある。Fig. 2.6 に示すように、HTTR では、中間熱交換器の伝熱管を管束支持板により適切な間隔で支持し、伝熱管の固有振動数を高くすることで、カルマン渦により流体振動を生じる流速が、管外流速よりも十分大きくなるように設計することにより、カルマン渦による流体振動を回避している。

なお、流体振動として、この他、流力弹性振動等が考えられるが、流体が気体の場合には、これらの流体振動は、カルマン渦により流体振動が生じる流速よりも高速で生じる。従って、カルマン渦に対処する設計を行えば、他の要因による流体振動を生じることはない。

従って、HTTR では熱交換器の伝熱管の流体振動が生じることはないと考えられるが、万一の場合を想定し、AE 法を用いた流体振動の監視装置を HTTR に適用した。

Table 2.1 HTTR の基本仕様

項 目	仕 様
原子炉熱出力	30 MW
冷却材	ヘリウムガス
原子炉入口／出口冷却材温度	395／850～950°C
1次冷却材圧力	4 MPa
炉心構造材	黒鉛
炉心有効高さ	2.9 m
炉心等価直径	2.3 m
出力密度	2.5 MW/m ³
燃料	二酸化ウラン・被覆粒子／黒鉛分散型
ウラン濃縮度	3～10 wt% (平均 6 wt%)
燃料体形式	ブロック型
原子炉圧力容器	鋼製 (2 1/4Cr-1Mo 鋼)
主冷却回路数	1 ループ (中間熱交換器及び加圧水冷却器)

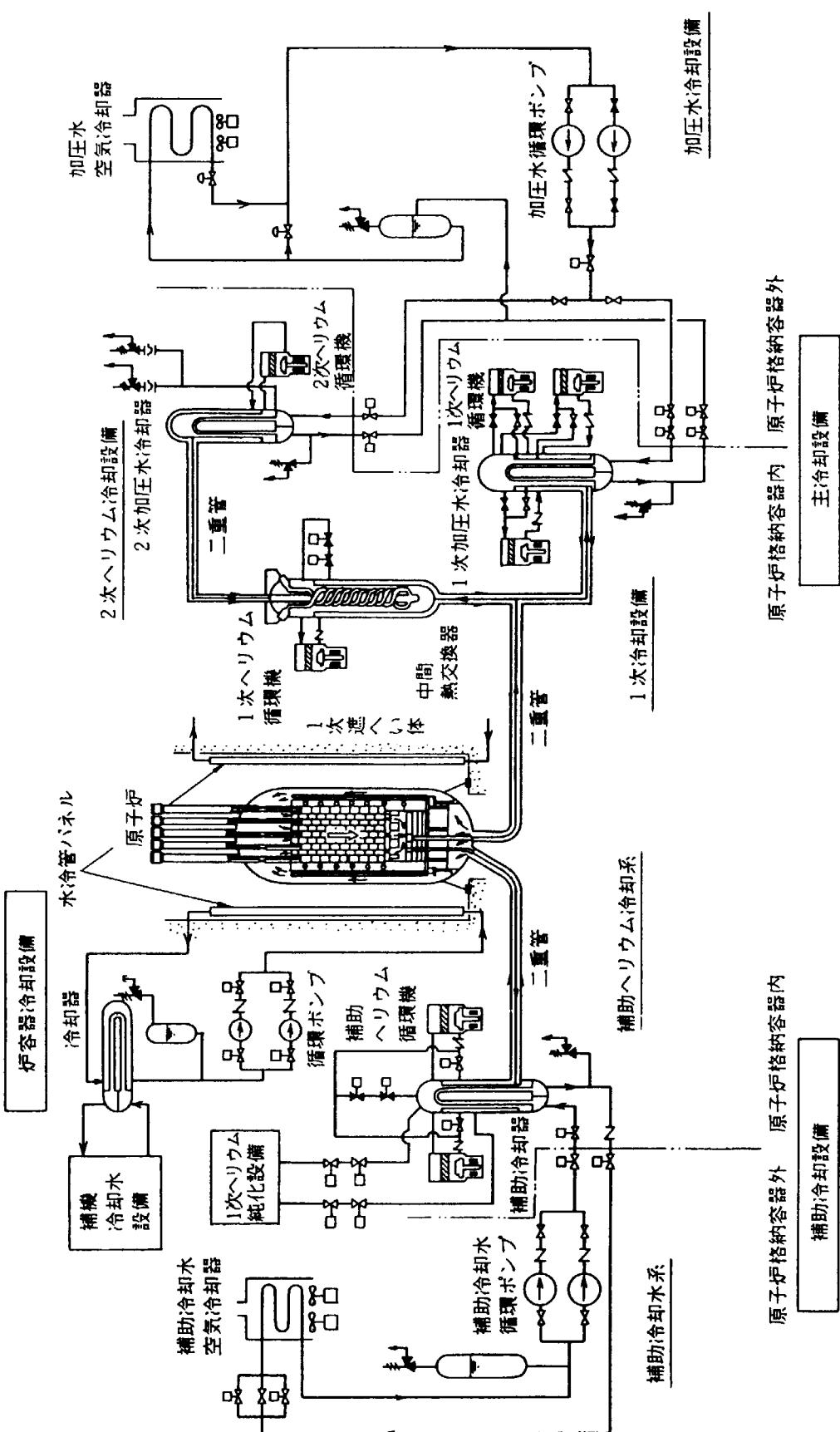


Fig. 2.1 HTTR の冷却設備系統図

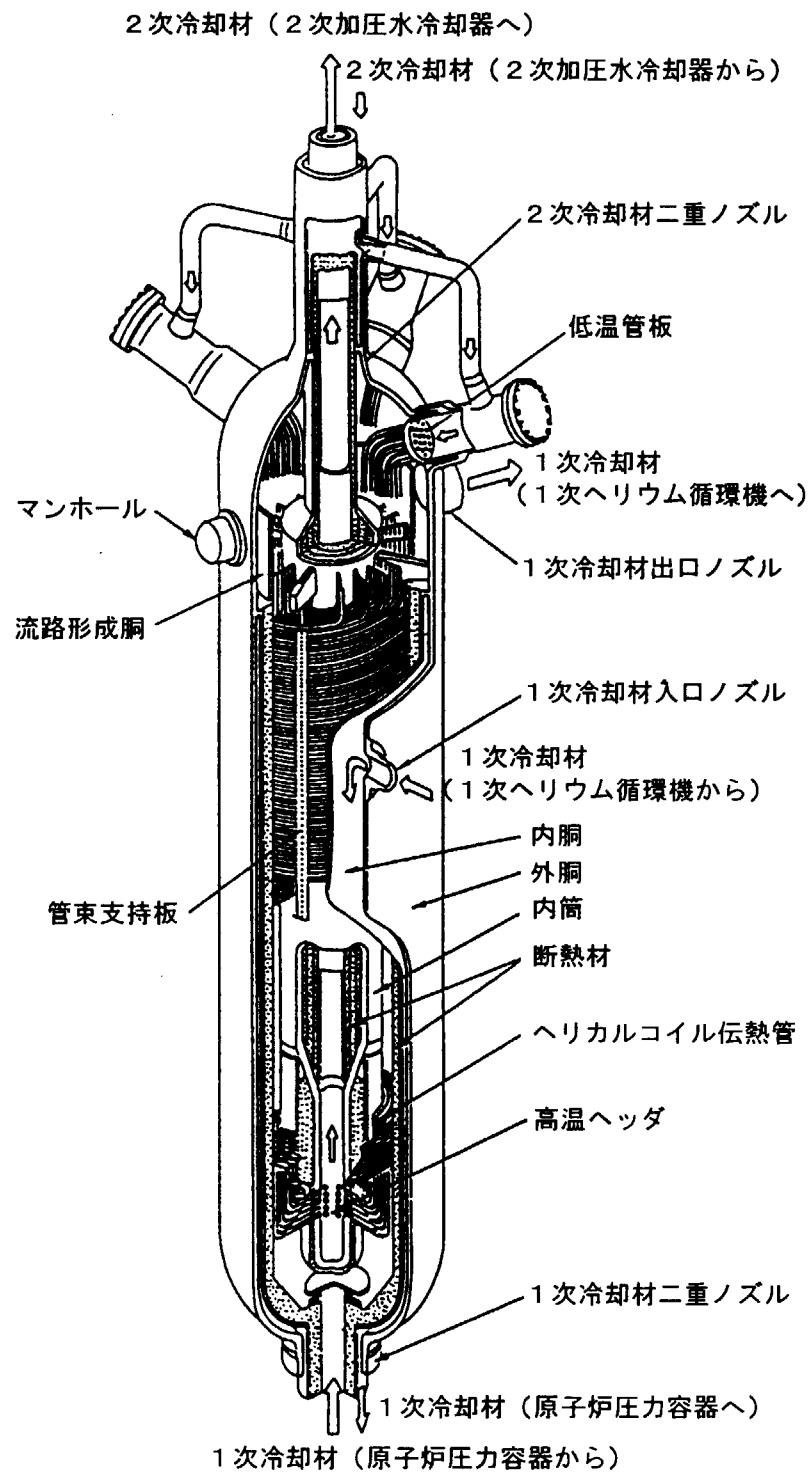


Fig. 2.2 中間熱交換器の構造

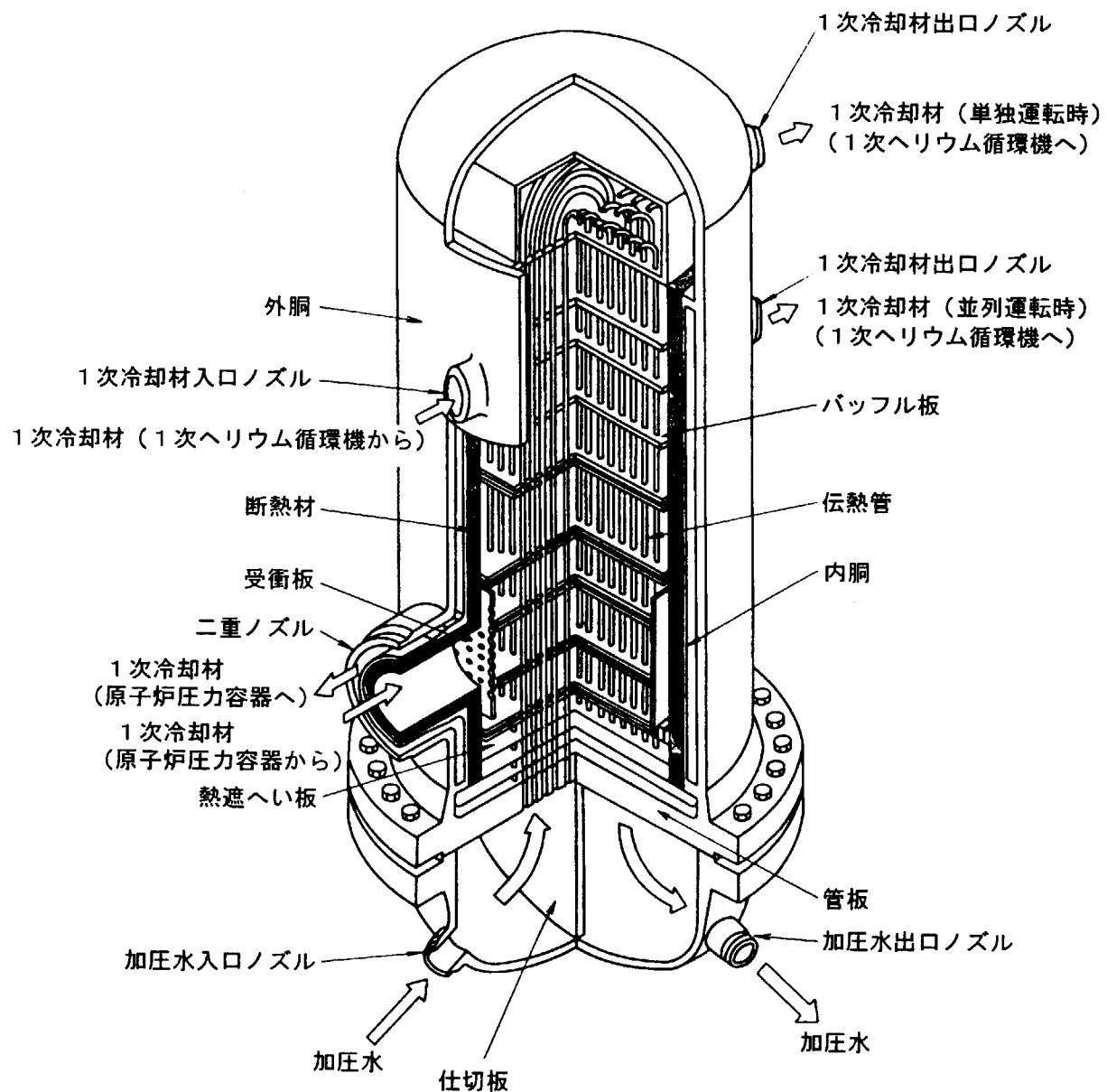


Fig. 2.3 1次加圧水冷却器の構造

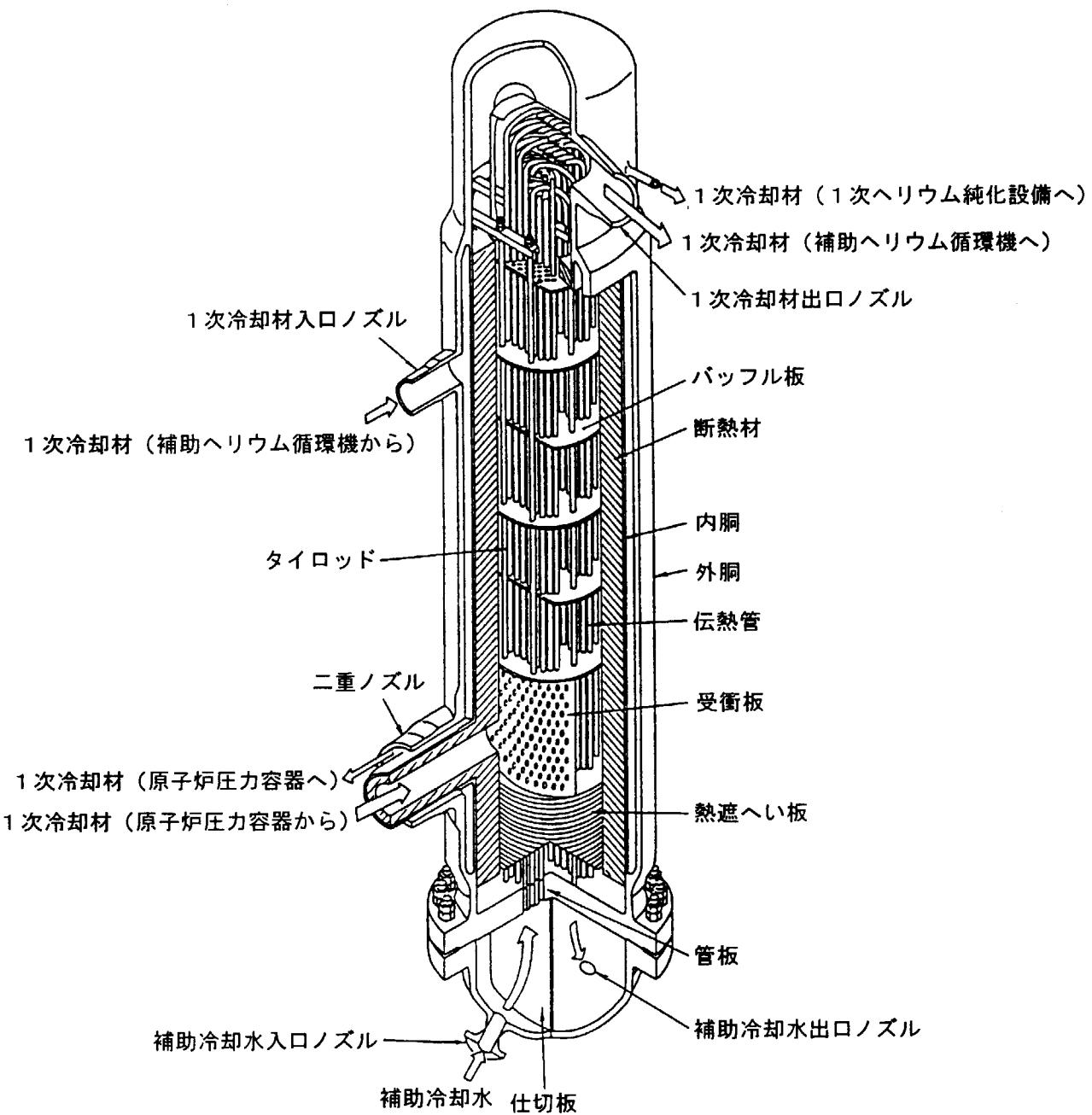


Fig. 2.4 補助冷却器の構造

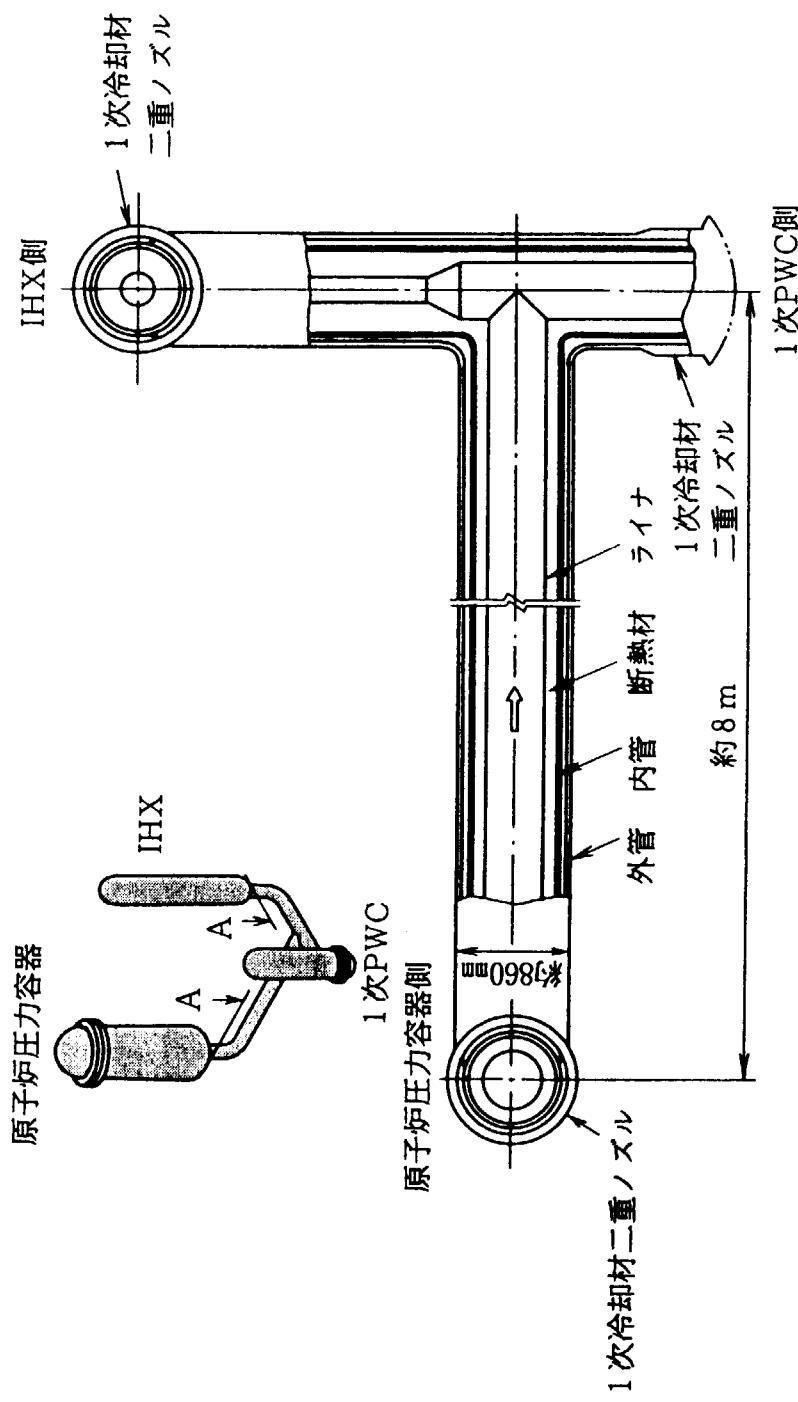


Fig. 2.5 二重管の構造

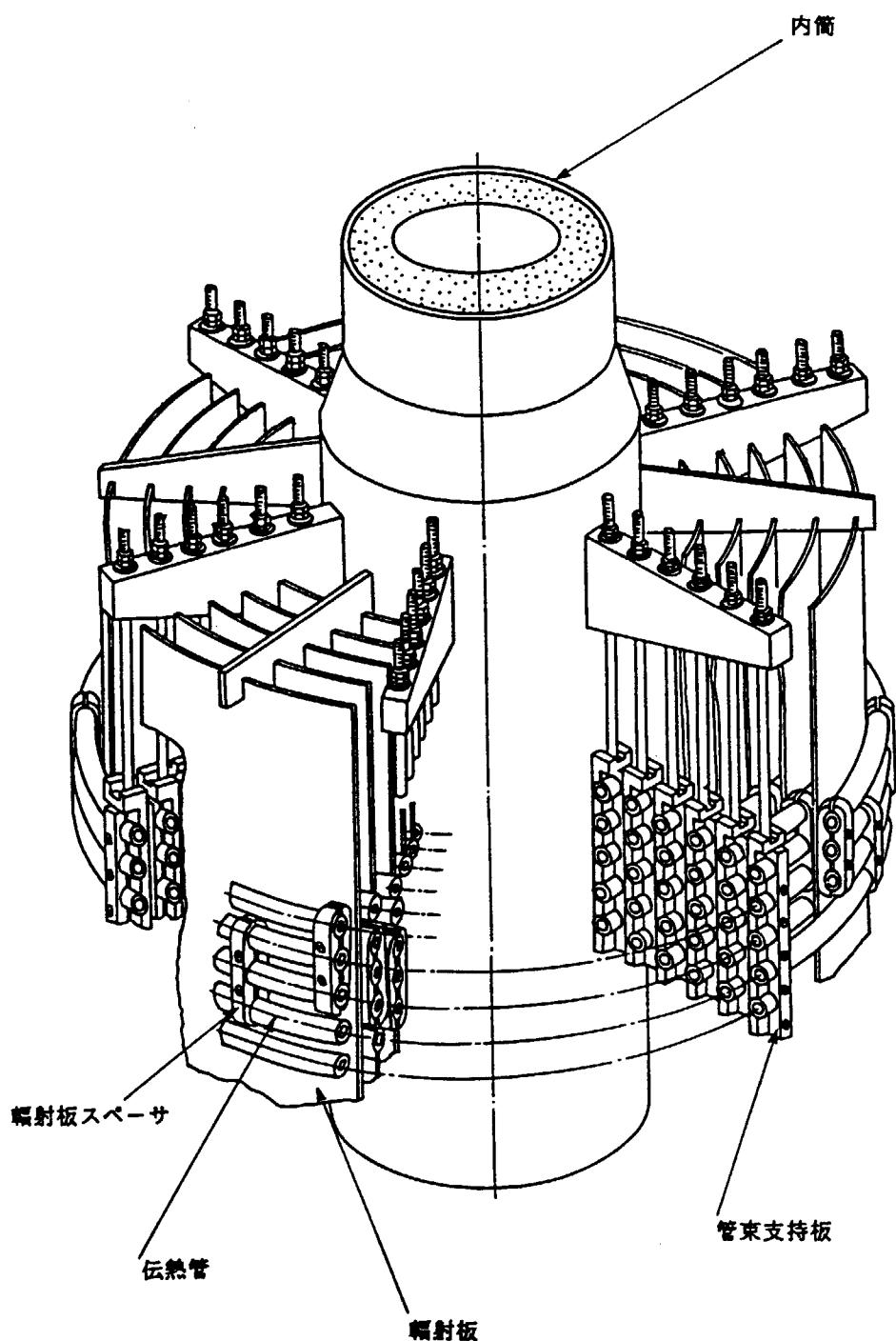


Fig. 2.6 中間熱交換器の上部構造

3. アコースティック・エミッション法の適用について

アコースティック・エミッション（AE）は、材料内で生じる動的な作用によって弾性波が発生する現象である。原因となる動的な作用は、材料の塑性変形、き裂の発生や成長、相変態あるいは結晶粒界の移動などの弾性ひずみエネルギーの急激な解放を伴う過程である。AE 法は、特に、構造物や部材の構造欠陥に対して高い検出感度と位置標定能力を持つ非破壊探傷検査法として、実用化されている。

AE 法の漏えい検出への適用については、配管系における漏えい検出を目的として、漏えい形状による AE 特性、漏えいの位置標定等の研究が実施されてきた[1]。流体が微小な隙間から漏えいする時に発生する超音波帯域の波動（高周波異常音）は、配管を高速で伝播するため AE センサを配管上に設置しておくことによって、早期に漏えいを検出することができる。配管から気体が漏えいする場合の AE の発生メカニズムは、噴流による空気力学的なジェット騒音であると考えられている。気流が漏えい口から噴出する場合、噴流により発生するジェット騒音は噴流と静止気体の気体同士のせん断流によって生じ、発生する音響エネルギー P は、M. J. Lighthill によって、 $P = \kappa \rho /C^5 L^2 U^8$ （但し、 κ ：係数、 ρ ：流体密度、 C ：音速、 L ：代表寸法、 U ：流体速度）の関係で表され、音響エネルギーは漏えい形状と流体速度に関連している[2]。

AE 法による気体の漏えい検知に関して、熊谷らは、発電プラントで使用されている大型弁の内部漏えい検出法を開発してきた[2][3][4][5]が、開発段階において窒素ガスが大気中に漏えいする模擬試験及び、実機弁の弁体シート面の漏えい試験を実施し、窒素ガスが漏えいする際の AE 特性について検討している。前者で、漏えい音の周波数スペクトルは、概略 20~70 kHz のレベルが高い結果となった。後者では、漏えい音の周波数スペクトルは、弁サイズによらず 25~80 kHz 成分が多く、25 kHz 付近で卓越する結果となった。また、供試弁の最小漏えい検出量（微小開度の場合）は、10 インチ弁で約 1.5 cc/s、14 インチ弁で約 15 cc/s、24 インチ弁では約 45 cc/s であった。

AE 法の伝熱管の異常な流体振動の検出への適用は、伝熱管が異常に振動した際に、伝熱管あるいは伝熱管を支持する構造物が、周りの構造物に衝突するが、その際に摩擦により発生する高周波異常音（Friction AE とも呼ばれる）を AE センサで検出し、異常を診断するものである。前述のように、HTTR の熱交換器の伝熱管は、カルマン渦、流力弹性振動等による異常な流体振動を生じない設計であるが、万一、設計通りに製作されていない等の原因で伝熱管の拘束条件が変化して流体振動を生じた場合に、衝突により発生する AE を測定することで異常を検知できる可能性があるため、HTTR に適用した。

4. 炉外漏えい試験

4. 1 概要

配管からのヘリウム漏えいの検出限界、気体、圧力、漏えい箇所の形状等の相違が、発生する AE 信号に与える影響を調べるために、HTTR の 1 次冷却設備の二重管の外管を模擬した 1/4 スケールの試験体を用いた漏えい試験を実施した。

4. 2 試験方法

Fig. 4.1 及び Fig. 4.2 に示す試験装置を用いて漏えい試験を実施した。配管は、材質：炭素鋼 (STPT410) (実機材料は SCMV4-2)、外径 : 216.3 mm、板厚 : 12.7 mm (200A, Sch80) であり、実機二重管（外径 : 863.6 mm、板厚 : 42 mm）の約 1/4 のスケールである。ヘリウム漏えいは、銅パッキンでシールしたプラグ (Fig. 4.3 参照) あるいはニードル弁 (Fig. 4.4 参照) をゆるめることで生じさせた。漏えいは、配管を締め付けたバンドに固定した約 40 cm のウェーブガイドの先端に設置した AE センサにより検知した。実機二重管表面は断熱材で覆われていること及び約 400°C の高温となることからウェーブガイドを介して AE センサを設置する。気体の漏えい率は、Fig. 4.1 に示すように、メスシリンダ内の水の置換速度を計測し求めた。試験装置の機器構成を Fig. 4.2 に、使用した機器の仕様を Table 4.1 に示す。

AE センサにて検出された信号は、プリアンプにて一次増幅後、メインアンプで再度増幅し、フィルタリング処理等の波形整形を行い、A/D 変換器にてアナログ→デジタル変換後、解析処理装置で周波数分析等の各種解析を実施した。周波数分析結果は、16 回加算平均した結果である。

4. 3 試験条件

最初に実機条件（気体：ヘリウム、圧力：4 MPa）における漏えいの検出限界を求めた。但し、実機温度条件（約 400°C）は、模擬していない。

次に種々のパラメータを変えた試験を実施した。試験条件を Table 4.2 にまとめて示す。気体の違いによる影響を調べるために、ヘリウムガス、窒素ガス及び空気による試験を実施した。漏えい箇所の形状の違いによる影響を調べるために上記の様にプラグとニードル弁の 2 種類について試験した。圧力は、実機条件 4 MPa 及び 2 MPa、0.6 MPa とした。但し、空気については、0.2 MPa で試験を実施した。また、漏えい箇所とウェーブガイドの距離を変えたケースについても試験を行った。これらの試験の際には漏えい量が、漏えい検出限界程度となるように調整した。但し、微調整が困難であるため、漏えい量は幅を持っている。試験時の漏えい量についても Table 4.2 に同時に示している。

4. 4 試験結果

① 漏えいの検出限界

実機条件（気体：ヘリウム、圧力：4 MPa）下における漏えいの検出限界は、約 5 cc/s（最高、約 2 cc/s）であった。

種々のパラメータを変えた場合の試験結果（周波数分析結果）を Fig. 4.5 及び Fig. 4.6 に示す。Fig. 4.5 はプラグ漏えいの場合、Fig. 4.6 はニードル弁漏えいの場合である。各種気体の漏えいが発生すると、約 25 kHz と 2 倍高調波（約 50 kHz）と 3 倍高調波（約 75 kHz）にピークが認められる。これらの特徴周波数は、気体、圧力、漏えい箇所の形状によらず全てのケースに見られる。50 cc/s 程度の大きな漏えいが発生した場合は、Fig. 4.7 のように 50 kHz 周辺全体にピークを生じる。前述の熊谷ら[2]の結果においても、25~80 kHz 成分が高く、25 kHz 付近で卓越する結果となっており、両者の結果には共通点がある。

Fig. 4.5 及び Fig. 4.6 の試験結果から、25, 50, 75 kHz の特徴周波数のピーク電圧を抽出して、気体ごとに整理したものが、Fig. 4.8 である。Fig. 4.8 より以下のことがわかる。なお、Fig. 4.8 に示す様に、炉外漏えい試験時のバックグラウンドノイズレベルは、約 2 mV であった。

② 気体の違いによる影響

ヘリウムと窒素の違いによるリーク特徴周波数のピーク電圧に大きな違いは認められない。空気については、他の気体よりも若干ピーク電圧値が小さい傾向がある。これは圧力（0.2 MPa）が他の気体（4, 2, 0.6 MPa）と比較して極端に低かったためと考える。

③ 圧力の影響

圧力（4, 2, 0.6 MPa）の違いによるリーク特徴周波数のピーク電圧に大きな違いは認められない。但し、0.2 MPa の場合（空気）は、若干ピーク電圧値が小さくなる傾向がある。

④ 漏えい箇所とウェーブガイド（AE センサ）の距離の影響

漏えい箇所とセンサ距離の違いによるリーク特徴周波数のピーク電圧値は、距離が離れるほどピーク電圧値が小さくなる傾向にある。実機条件（気体：ヘリウム、圧力：4 MPa）で約 5 cc/s の漏えいを検知するには、漏えい箇所から 1 m 程度の距離に AE センサが設置されていなければならない。

⑤ 漏えい箇所の形状による影響

漏えい箇所の形状の相違によるリーク特徴周波数のピーク電圧はバルブよりもプラグの方が大きく出る傾向がある。但し、ピーク電圧値が大きく出るのは 25 kHz の 1 次周波数であり、2 倍、3 倍高調波にはほとんど差が認められない。

Table 4.1 炉外漏えい試験に使用した機器の仕様

使用機器	仕 様
AE センサ	チタン酸ジルコン酸鉛磁器 (PZT)、共振型 (共振周波数 : 40 kHz)
プリアンプ	増幅度 : 40 dB、ハイパスフィルタ : 10 kHz
メインアンプ	増幅度 : 50 dB、バンドパスフィルタ : 10 kHz~2 MHz
解析処理装置	パソコン (PC-98)、サンプリングタイム : 5 μs、加算平均回数 : 16 回

Table 4.2 試験条件

漏えい箇所	気体	圧力	漏えい量 (cc/s)			
			0.2 MPa	0.6 MPa	2 MPa	4 MPa
プラグ	ヘリウム	—	4.55	4.55	4.76	
	窒素	—	2.70	4.49	2.78	
	空気	6.67	—	—	—	
ニードル弁	ヘリウム	—	4.65	4.71	4.76	
	窒素	—	4.60	3.39	4.49	
	空気	6.67	—	—	—	

(備考) 漏えい箇所とウェーブガイドの距離を 500 mm, 1000 mm としたケースについて
試験を実施した。

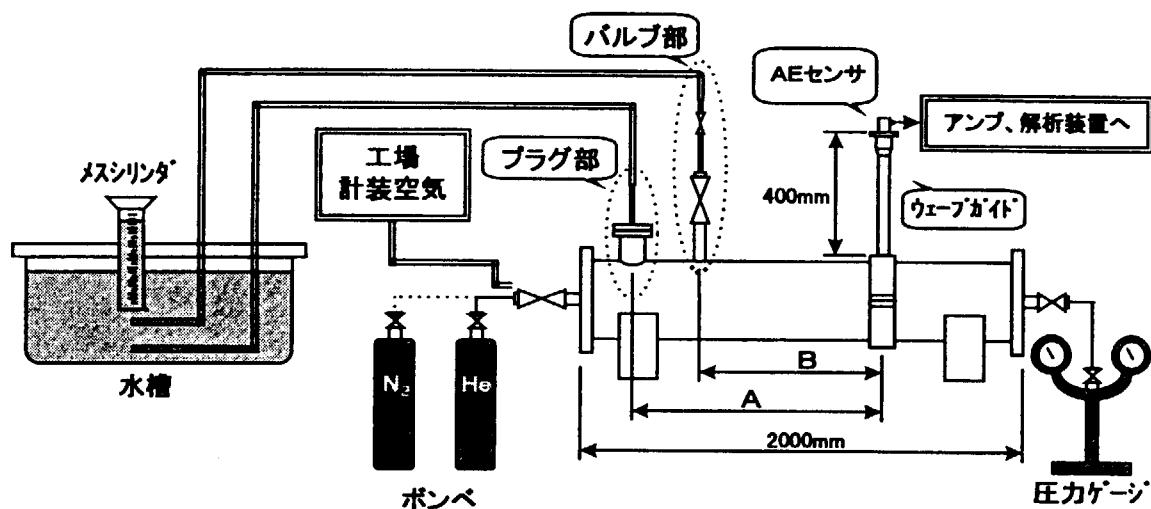


Fig. 4.1 炉外漏えい試験の全体構成

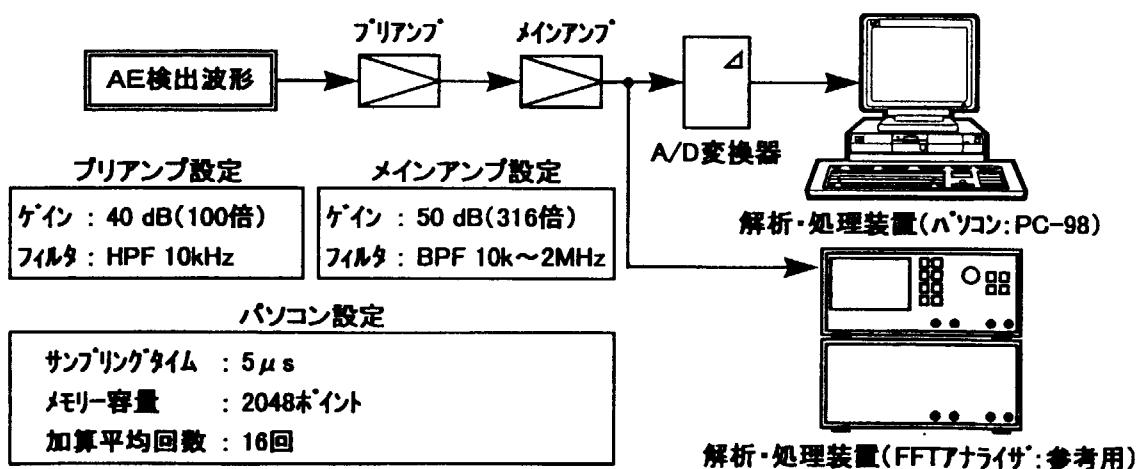
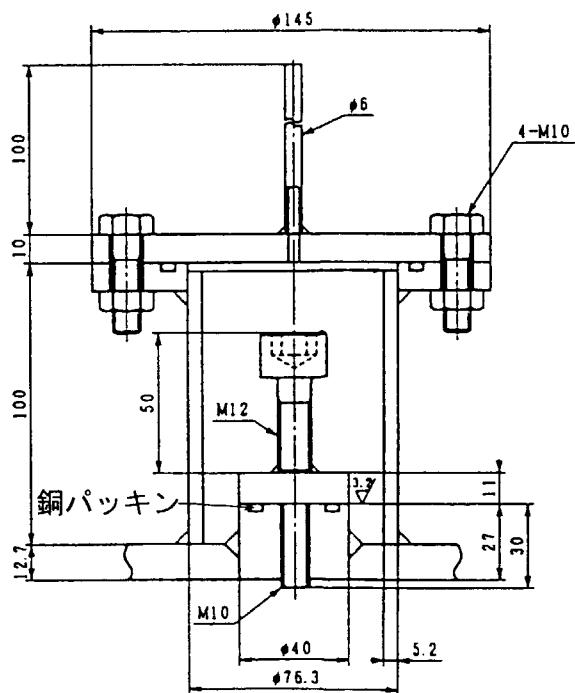


Fig. 4.2 炉外漏えい試験に用いた計測装置



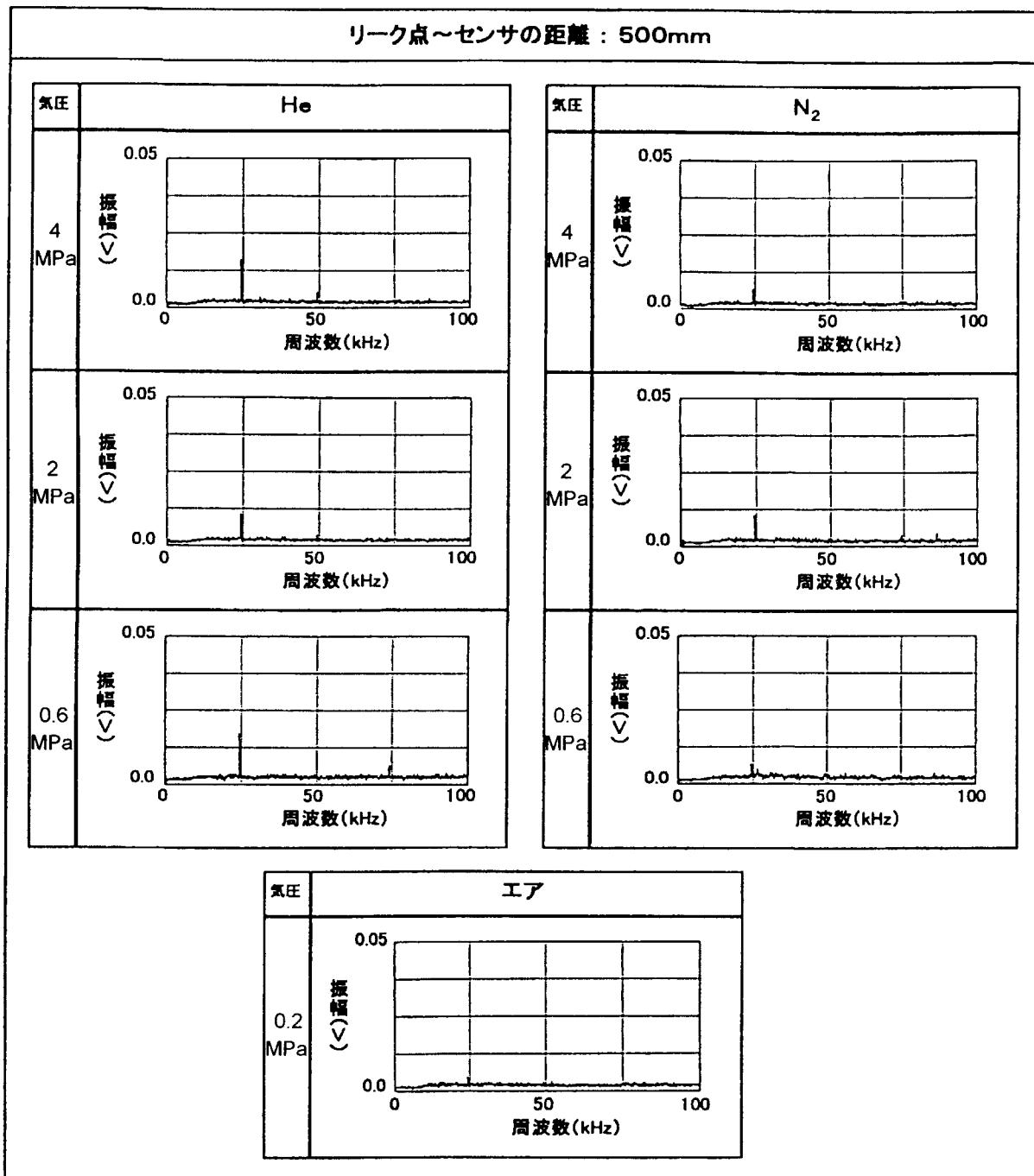


Fig. 4.5 (1/2) 周波数分析結果（プラグの場合、リーク点とセンサの距離：500 mm）

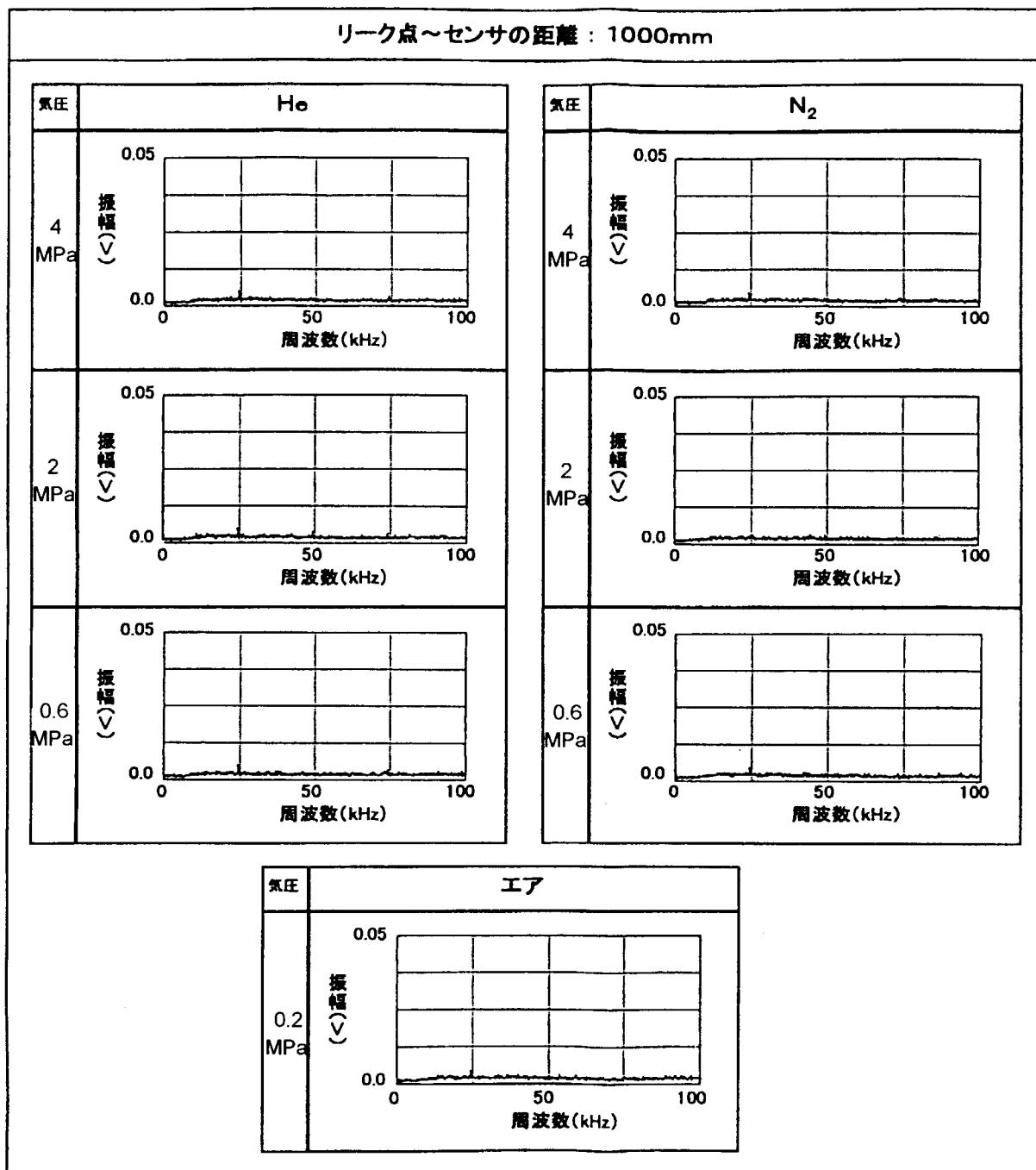


Fig. 4.5 (2/2) 周波数分析結果（プラグの場合、リーク点とセンサの距離：1000 mm）

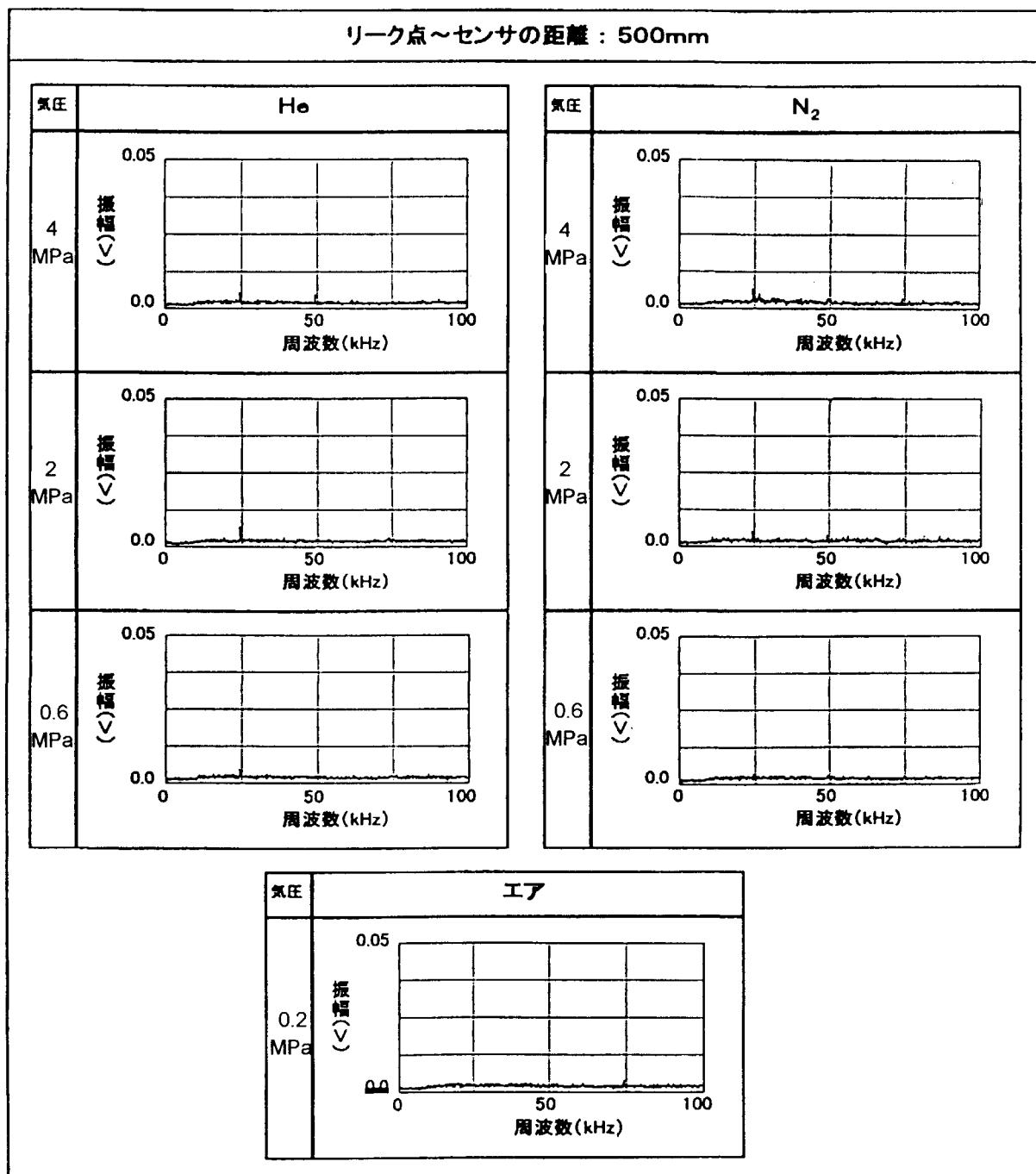


Fig. 4.6 (1/2) 周波数分析結果（ニードル弁の場合、リーク点とセンサの距離：500 mm）

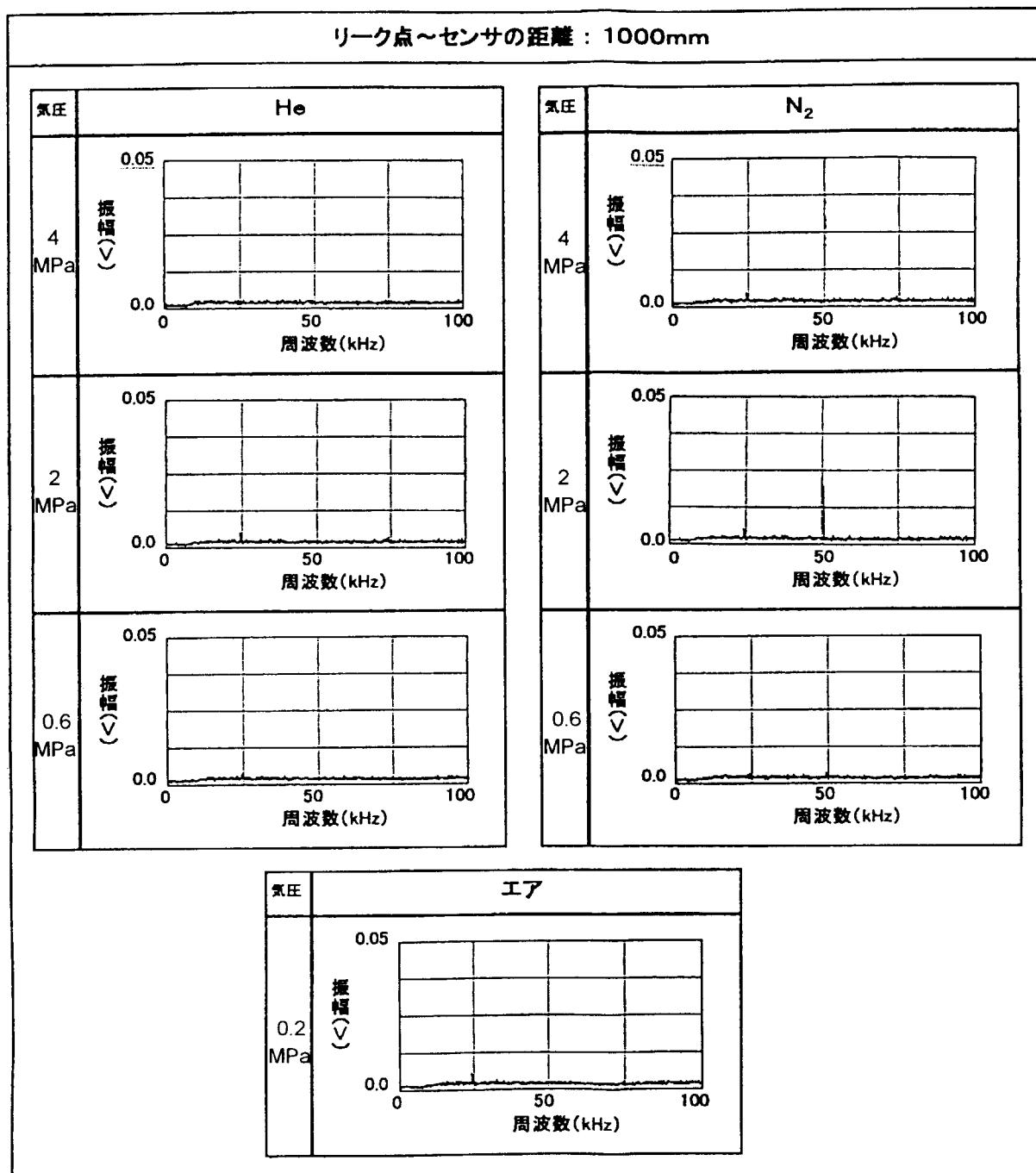


Fig. 4.6 (2/2) 周波数分析結果（ニードル弁の場合、リーク点とセンサの距離：1000 mm）

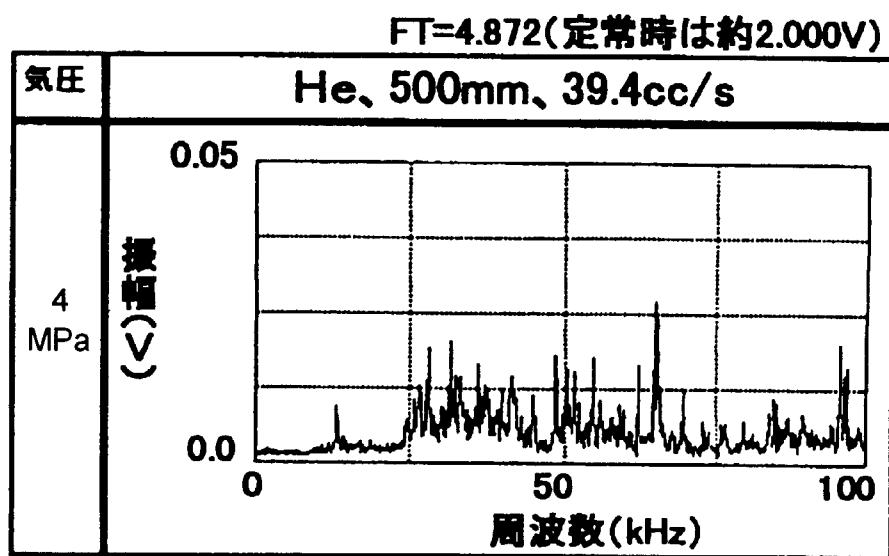


Fig. 4.7 周波数分析結果（漏えい率：39.4 cc/sの場合）

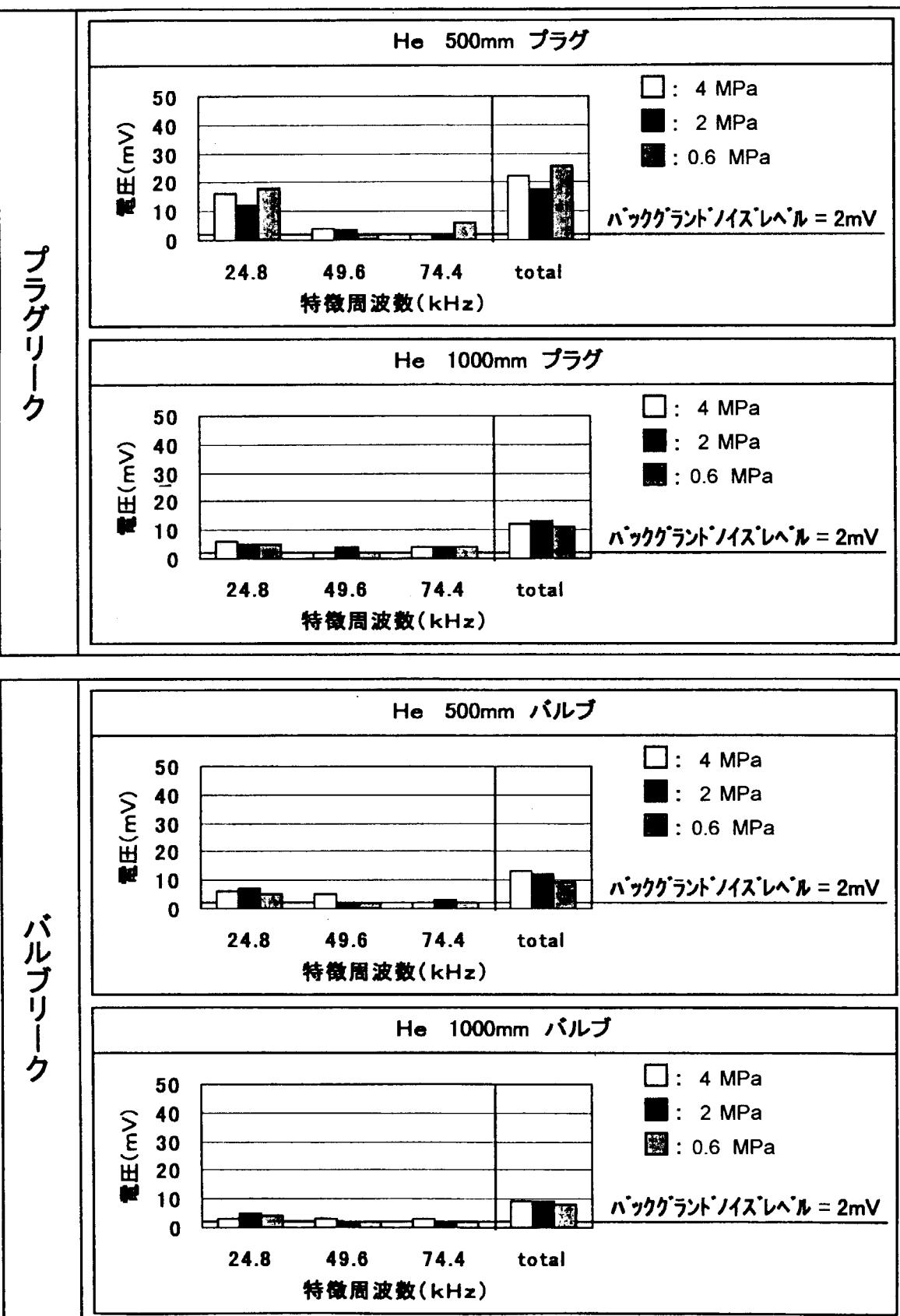


Fig. 4.8 (1/3) 炉外漏えい試験時の特徴周波数レベル

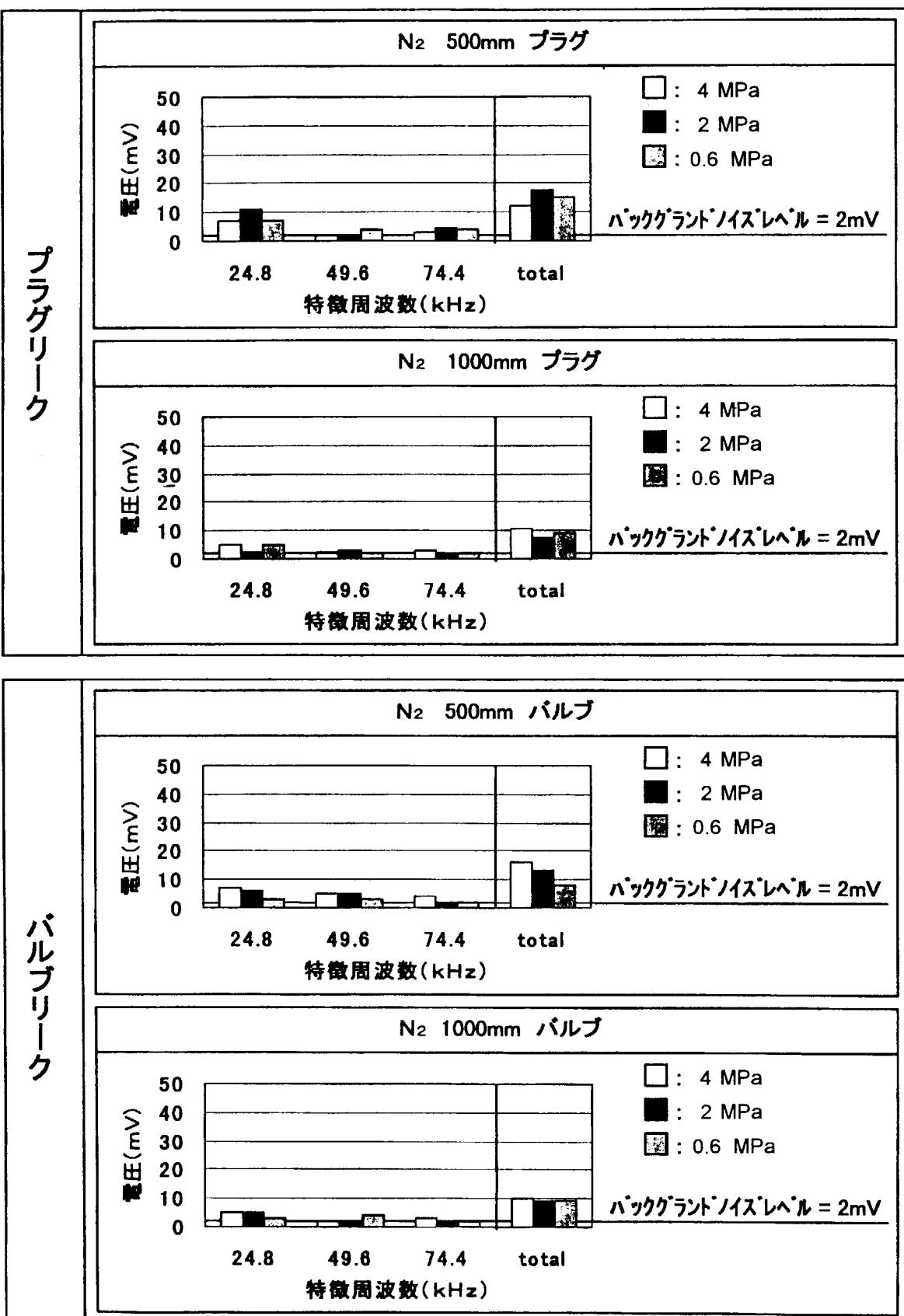


Fig. 4.8 (2/3) 炉外漏えい試験時の特徴周波数レベル

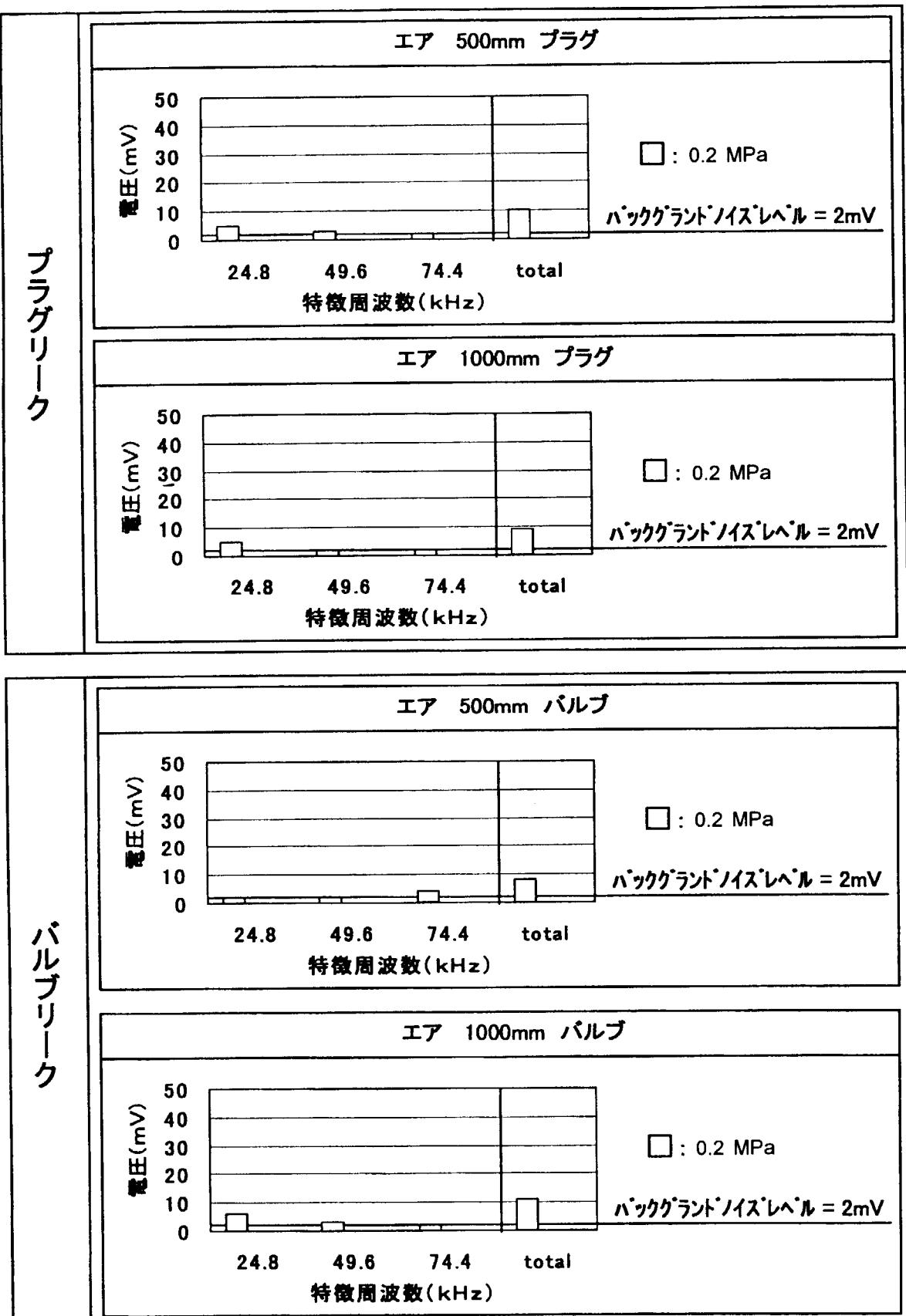


Fig. 4.8 (3/3) 炉外漏えい試験時の特徴周波数レベル

5. 高温工学試験研究炉への適用

5. 1 装置構成

HTTR に適用する AE 法による監視装置は、以下の機器から構成される。

- ① AE センサ（ウェーブガイドの先端に設置）
- ② プリアンプ
- ③ マルチブレクサ
- ④ AE 電源
- ⑤ メインアンプ
- ⑥ A/D 変換器
- ⑦ 解析処理装置（パソコン）

装置構成を Fig. 5.1 に示す。また、各装置の仕様を Table 5.1 に示す。

AE センサは、Fig. 5.2 に示すように、ヘリウム漏えいの監視のために、1 次冷却設備及び補助ヘリウム冷却系二重管表面に合計 12 箇所設置する。また、熱交換器の伝熱管の異常な流体振動の監視のために、1 次冷却設備の中間熱交換器に 3 箇所、1 次加圧水冷却器に 2 箇所、補助ヘリウム冷却系の補助冷却器に 2 箇所設置する。これらの 7 箇所の AE センサは同時にヘリウム漏えいの監視も行う。さらに、参考データ取得用として 1 次ヘリウム循環機に 1 箇所 AE センサを設置している。AE センサの個数は合計 20 個である。1 次遮へい内部（原子炉圧力容器室）は 300°C 以上の高温となるため、現状、AE センサを設置していない。

二重管及び熱交換器の外表面は約 400°C の高温となるため、AE センサはウェーブガイドを介して各機器の外表面に設置される。ウェーブガイドは長さ約 40 cm の SUS304 ステンレス鋼の中実棒で、Fig. 5.3 に示すように、鋼製バンドで二重管を締め付けて固定する。中間熱交換器、1 次加圧水冷却器、補助冷却器については、各機器のプラケットにウェーブガイドを固定した。固定方法の例を Fig. 5.4 に示す。二重管の一部についても、管台に同様な固定方法でウェーブガイドを設置した。

ノイズ低減のため、AE センサの近傍にプリアンプを設置した。原子炉格納容器内にマルチブレクサ（信号切替器）を設置し、原子炉格納容器貫通部の必要なケーブル数を極力低減させた。解析処理装置、メインアンプ、AE 電源及び A/D 変換器は、中央制御室の隣の計算機室に設置し監視を容易にした。

5. 2 監視アルゴリズム

ヘリウム漏えい監視アルゴリズムを Fig. 5.5 に示す。漏えい監視用のアルゴリズムは、炉外漏えい試験結果に基づいて決定した。

① FT 判定では、周波数分布の総和（FT）を比較し、波形の大小を把握する。ここで、FT が大きければ、②へ進む。例えば、100 cc/s 以上の大きな漏えいが発生した場合あるいは

はノイズ（電源ノイズ等）が発生した場合を検出する。

- ② K_{mp} 判定では、上記の FT 判定で大きな信号が発生していると判定された場合、漏えいがあるいはノイズかを判定する。漏えいによる AE 波形が検出された場合は、Fig. 5.7 に示す連続型波形になり、ノイズによる AE 波形が検出されると周期的あるいはランダムに突発型波形が検出される。リークとノイズを識別するために、下記の式にて K_{mp} （反波高率）を算出する。

$$K_{mp} = V_{mean} / V_{peak} \quad (5.1)$$

V_{mean} : 波形の平均値

V_{peak} : しきい値（例えば、 V_{mean} の 1.5 倍）を超えたピーク波形の平均値
(しきい値を超えた波形の振幅の総和／しきい値を超えた波形の数)

K_{mp} がしきい値（判定値） β より小さい場合はノイズ、大きい場合は漏えいと判定される。

- ③ FMV 判定では、周波数分析結果の 20 kHz～60 kHz 部分（範囲については任意に変更可能）のトータル電圧値（FMV）を算出し、しきい値（判定値）と比較することで 50 cc/s 程度の漏えいを検知する。なお、前述のように、炉外漏えい試験で 50 cc/s 程度の漏えいの場合は、40 kHz 周辺にピークを生じたことからこの判定を設けている。
- ④ FPT 判定では、リーク特徴周波数の総和電圧（FPT）を算出し、5 cc/s 程度の微小リークを検出する。

$$FPT = FP1V + FP2V + FP3V \quad (5.2)$$

FP1V (第 1 パーシャル周波数電圧 : 25 kHz の電圧値)

FP2V (第 2 パーシャル周波数電圧 : 50 kHz の電圧値)

FP3V (第 3 パーシャル周波数電圧 : 75 kHz の電圧値)

ここで、FPT が設定しきい値（判定値）よりも小さければリークなし、大きければリークありと判定する。この判定は、前述のように微小なリークの場合、炉外漏えい試験で、25、50、75 kHz にピークを生じたことから選定した。

伝熱管の流体振動の監視のためのアルゴリズムを Fig. 5.6 に示す。流体振動監視のアルゴリズムについては、物体が接触した場合には、一般的に、特徴的な周波数の波形が発生することから、その波形を検知できるアルゴリズムとした。

- ① V_{peak} 判定では、AE 信号波形の振幅の大きさにより、波形の大小を把握する。
- ② K_{mp}/N 判定では、Fig. 5.8 に示すように、 K_{mp}/N （反波高率／しきい値を超えた波形の数）が大きい場合（波形持続時間が長い場合）はノイズ、小さい場合（波形持続時間が短い場合）は伝熱管の流体振動による衝突と判定される。

- ③ K_{mp} 判定では、流体振動による微小な振動を識別する。 K_{mp} が小さい場合は異常なしと判定され、大きい場合は漏えいと判定される。

上記のパラメータの設定しきい値（判定値）については、HTTR の運転開始後、ノイズの調査・対策後に設定する計画である。

5. 3 今後の課題

前述のように、炉外漏えい試験では、約 5 cc/s のヘリウム漏えいを検知できる見通しを得たが、HTTR に適用した場合はノイズ等の影響で低レベルの漏えいの検知が困難となる可能性があり、ノイズの調査及び対策を実施していく必要がある。現在、HTTR は臨界前であるため、HTTR の運転開始後にノイズ対策を実施する必要がある。

ヘリウム漏えい監視に関して、今回は、1 次系のうち二重管を主に AE センサを取り付け、漏えい監視を実施できるシステムを構築した。しかしながら、本システムで監視できる範囲は 1 次系のうちの一部であるため、今後、AE センサの増設を検討していく必要がある。また、漏えいを生じやすいフランジ等に AE センサを重点的に設置することも同時に検討する必要がある。

Table 5.1 AE 法による監視装置の仕様

No.	装 置 名	員数	仕 様
1	AE センサ (富士セラミックス(株)製 HAE-403DH150)	20	素子：チタン酸ジルコン酸鉛磁器、型式：共振型（共振周波数：40 kHz）、感度：75 dB 以上（0 dB=1 V/m/s）、検出方法：平衡方式、構造：絶縁型、使用温度：0～150°C
2	プリアンプ	20	入力信号：20 mVp-p (最大)、増幅度：20, 40 dB、周波数帯域：10 kHz～2 MHz、出力電圧：2 Vp-p (最大)、ハイパスフィルタ：10, 100 kHz
3	マルチプレクサ	4	入力信号数：各 8 ch、入力信号：2 Vp-p、周波数帯域：10 kHz～2 MHz、出力信号数：2 ch、入出力ゲイン：0 dB、切替方式：自動（計算機からの信号）、手動
4	端子ボックス	1	入力信号数：20 ch、制御信号出力：マルチプレクサ 4 台分
5	DO ボード	1	出力方式：フォトカプチア絶縁による電流シグナル出力（負論理）、出力信号：32 点、応答時間：1 ms 以内、I/O アドレス：8 bit × 4 ポート占有
6	AE 電源	1	出力電圧：DC±15 V
7	メインアンプ	1	入力電圧：2 Vp-p (最大)、増幅度：1～50 dB (可変)、周波数帯域：10 kHz～2 MHz、ハイパスフィルタ：10 Hz, 10, 100, 300 kHz、ローパスフィルタ：30, 100, 300 kHz, 2 MHz、整形出力：20 Vp-p
8	A/D 変換器	1	アナログ入力数：16 ch、入力電圧レンジ：0～5 V, -2.5～2.5 V, -5～5 V, -10～10 V、サンプリングタイム：最速 1.3 μs、分解能：12 bit、メモリ容量：4 Mbit
9	解析処理装置	1	DOS/V パソコン、OS：Windows95、CPU：Pentium II 266MHz、メインメモリ：128 MB

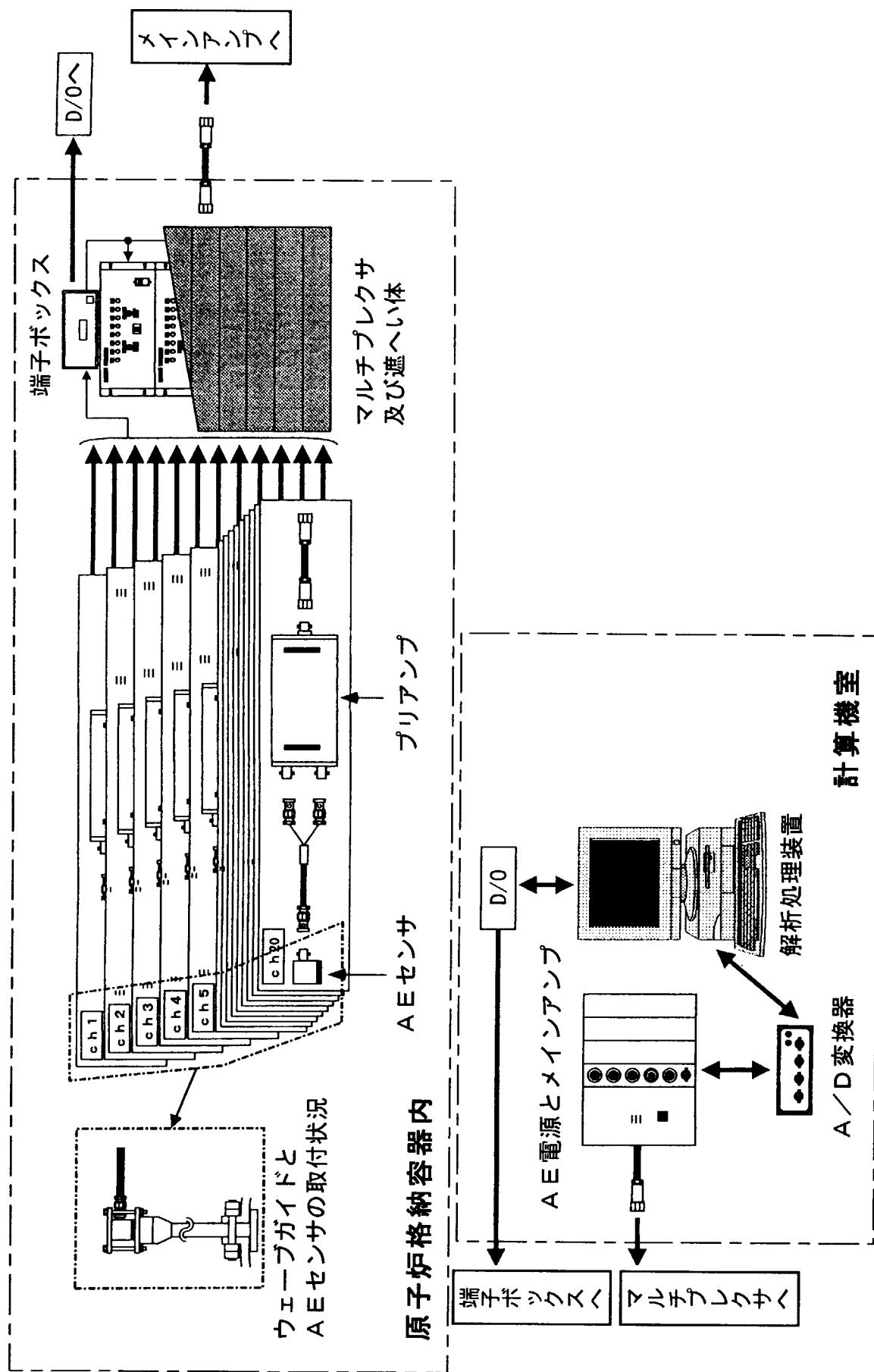


Fig. 5.1 AE法による監視装置の機器構成

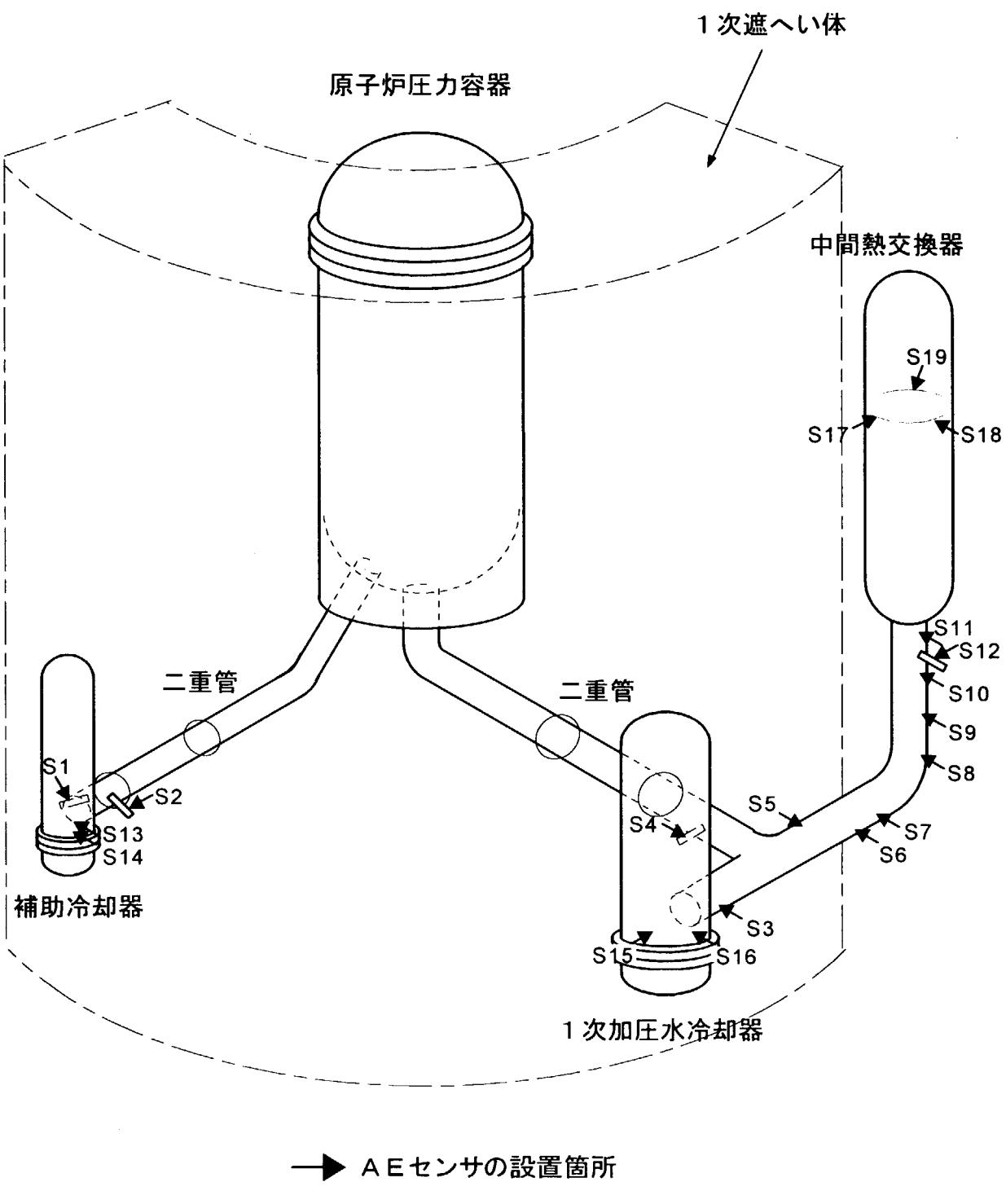


Fig. 5.2 AEセンサの設置位置図

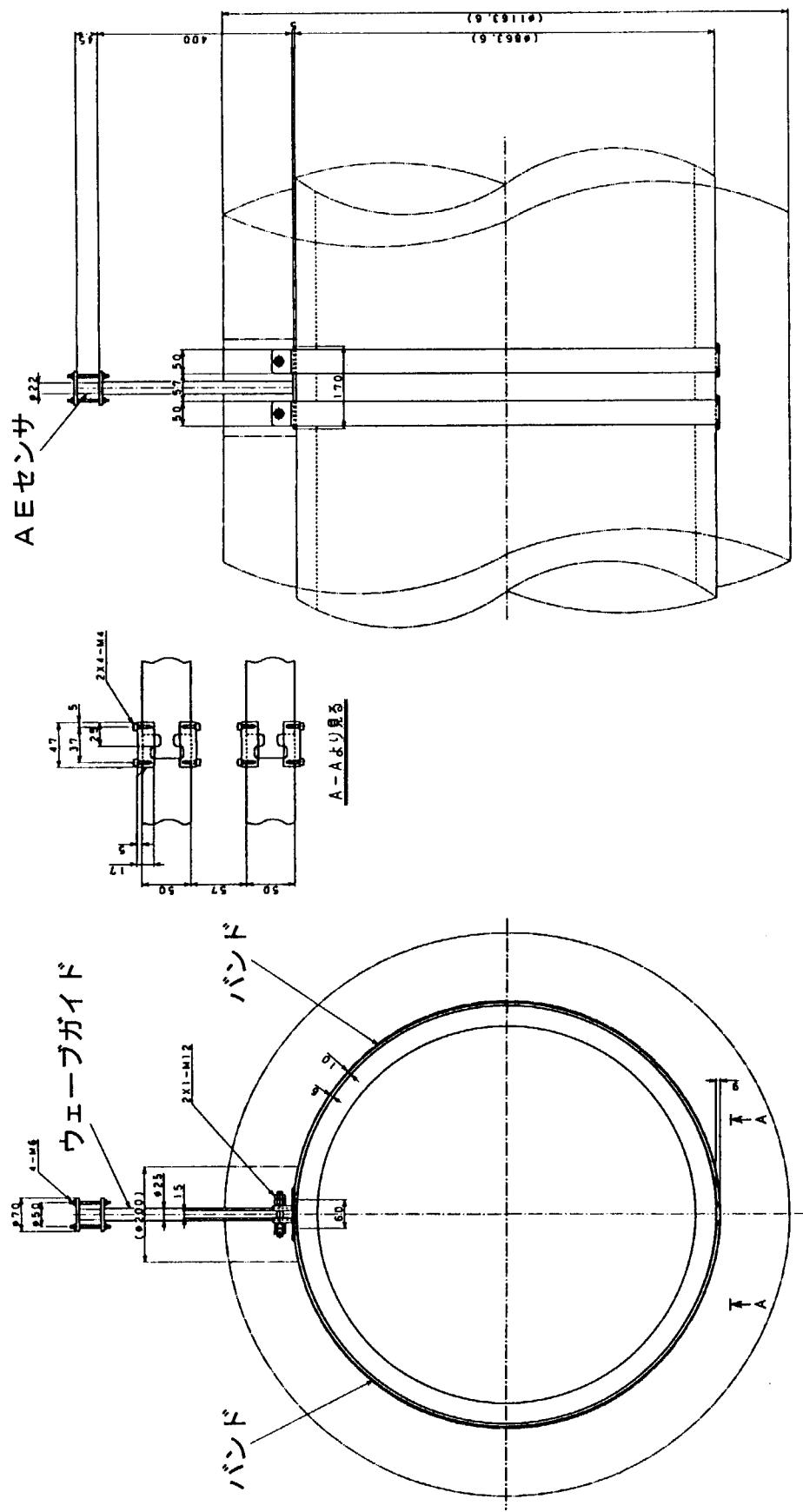


Fig. 5.3 ウエーブガイドの固定方法 (1)

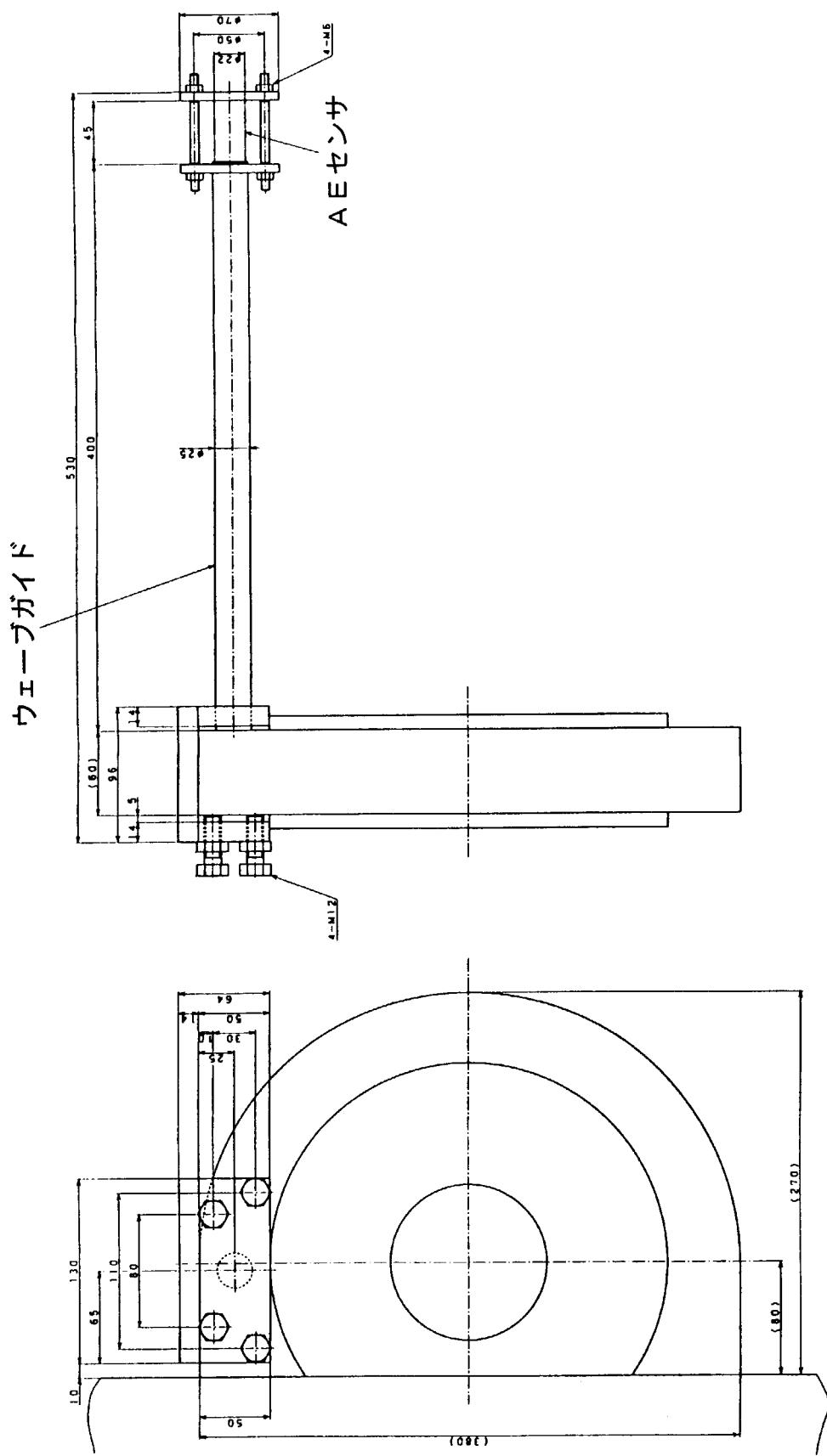


Fig. 5.4 ウエーブガイドの固定方法 (2)

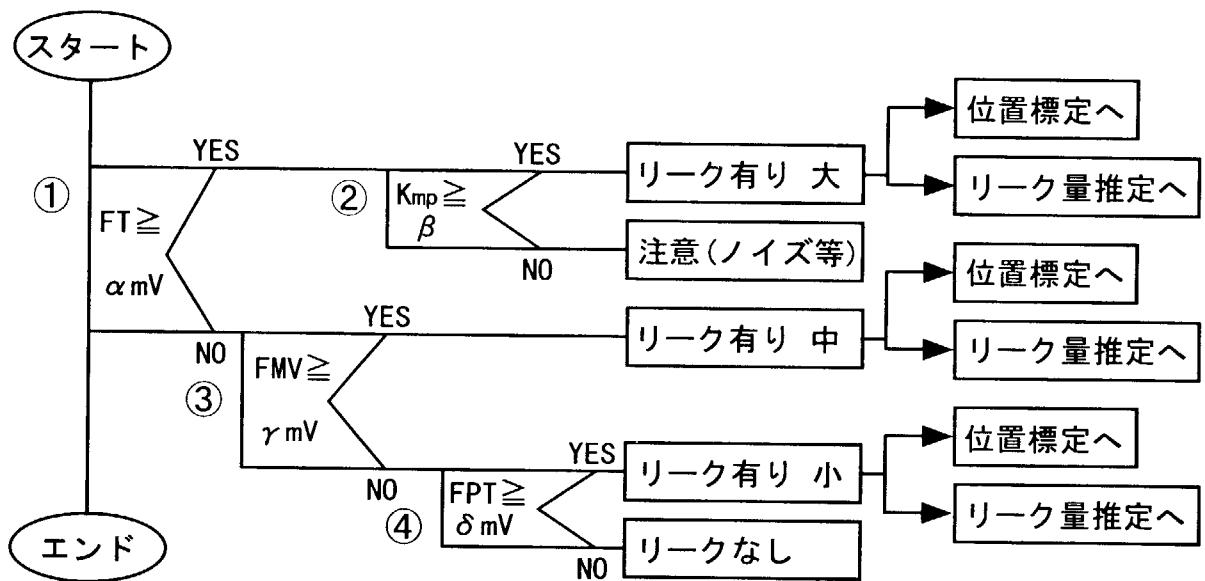


Fig. 5.5 ヘリウム漏えい監視アルゴリズム

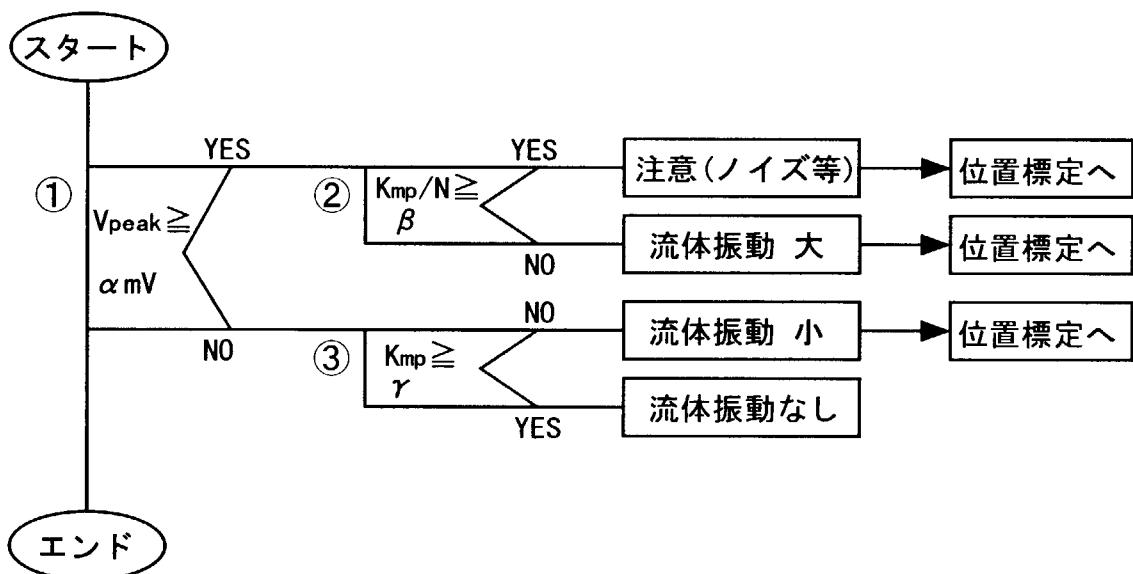
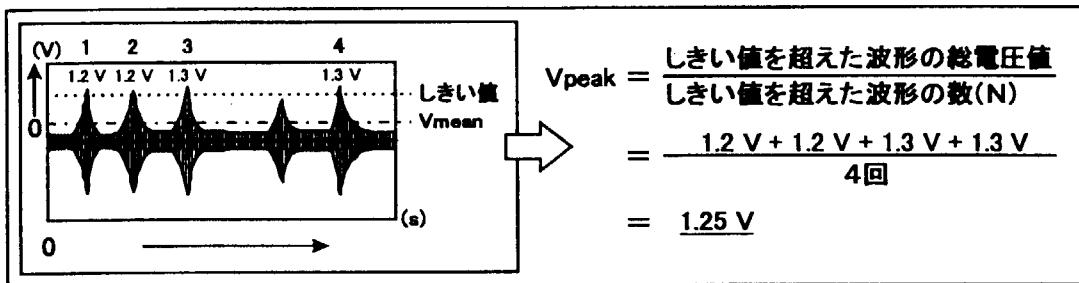


Fig. 5.6 流体振動監視アルゴリズム

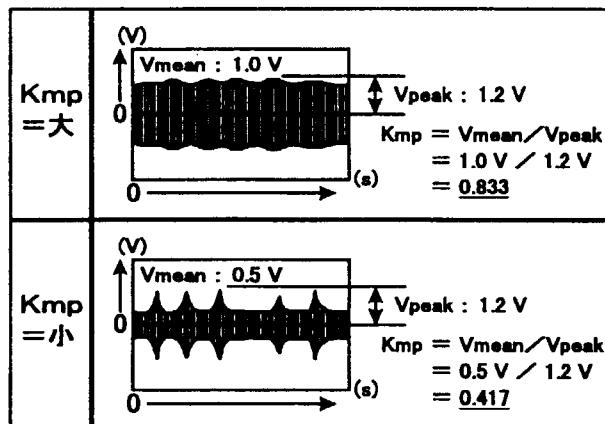
V_{peak} : 平均ピーク電圧 (V)
しきい値を超えたピーク波形の平均値



K_{mp} : 反波高率 (Non Division)
波形形状の評価値

K_{mp} = 大 : 連続型波形

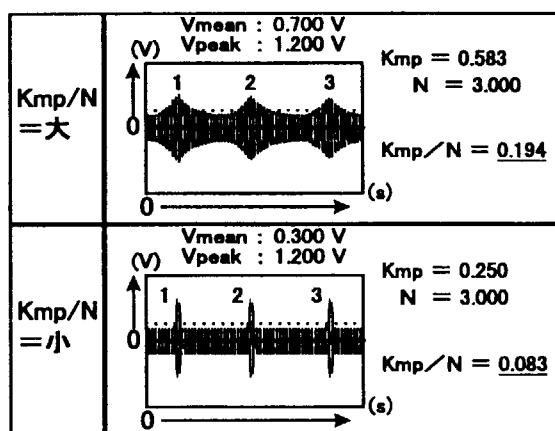
K_{mp} = 小 : 突発型波形

Fig. 5.7 K_{mp} 判定の概念図

K_{mp}/N : 波形持続換算値
反波高率/しきい値を超えた波形の数

K_{mp}/N = 大 : ノイズ成分
(波形持続時間が長い)

K_{mp}/N = 小 : 衝突成分
(波形持続時間が短い)

Fig. 5.8 K_{mp}/N 判定の概念図

6. 結 言

アコースティックエミッション法を用いた監視装置を開発し、HTTR に適用した。二重管の 1/4 スケールモデルを用いて実施した炉外漏えい試験では、約 5 cc/s のヘリウム漏えいを検知できる結果を得た。また、漏えい量が微小な場合、周波数分析結果で 25, 50, 75 kHz の特徴周波数にピークを生じることがわかった。実機においても、今後、ノイズ対策を実施していくことにより、有効な手法となりうると判断できる。

謝 辞

本論文をまとめるにあたり、貴重な助言をいただいた、高温工学試験研究炉開発部田中利幸部長、大久保実次長、HTTR 計画室藤川正剛室長、HTTR 技術開発室茂木春義室長、HTTR 試験室鈴木紘室長、猿田徹冷却機器第 1 グループリーダー、同グループ赤澤逸生氏に感謝致します。

参考文献

- [1] アコースティック・エミッション, 日本非破壊検査協会, 1990.
- [2] 熊谷博道, 音響法による弁内部漏洩検査法の開発, 電力中央研究所報告 総合報告 T17, 1990.
- [3] 北島 晟, 音響法による弁開閉・漏洩監視システムの開発検討, 電力中央研究所報告 研究報告 285089, 1986.
- [4] 熊谷博道, 鈴木昭雄, 北島 晟, 深田智久, 田代久夫 他, バルブ内部漏洩検査法の適用性評価－実機弁による工場試験での実証検討－, 電力中央研究所報告 研究報告 T87112, 1988.
- [5] 熊谷博道, 鈴木昭雄, 音響法による弁内部漏洩検査法の実用化評価－漏洩音のスペクトル分析による検出方法－, 電力中央研究所報告, 研究報告 T89011, 1989.

国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光强度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
力	ニュートン	N	m·kg/s ²
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	N·m
功率、放射束	ワット	W	J/s
電気量、電荷	クーロン	C	A·s
電位、電圧、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束密度	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束度	ルーメン	lm	cd·sr
照度	ルクス	lx	lm/m ²
放射能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名 称	記 号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ', "
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 ¹⁸	エクサ	E
10 ¹⁵	ペタ	P
10 ¹²	テラ	T
10 ⁹	ギガ	G
10 ⁶	メガ	M
10 ³	キロ	k
10 ²	ヘクト	h
10 ¹	デカ	da
10 ⁻¹	デシ	d
10 ⁻²	センチ	c
10 ⁻³	ミリ	m
10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ⁻¹⁸	アト	a

(注)

- 表1～5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC関係理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換 算 表

力	N(=10 ³ dyn)	kgf	lbf
1	0.101972	0.224809	
9.80665	1	2.20462	
4.44822	0.453592	1	

$$\text{粘度 } 1 \text{ Pa}\cdot\text{s} (\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2) = 10 \text{ P(ポアズ)} (\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s}))$$

$$\text{動粘度 } 1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St(ストークス)} (\text{cm}^2/\text{s})$$

圧力	MPa(=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)
力	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 ³	145.038
	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322 × 10 ⁻⁴	1.35951 × 10 ⁻³	1.31579 × 10 ⁻³	1	1.93368 × 10 ⁻²
	6.89476 × 10 ⁻³	7.03070 × 10 ⁻²	6.80460 × 10 ⁻²	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J(=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft · lbf	eV	1 cal = 4.18605 J(計量法)	
								= 4.184 J(熱化学)	
1	0.101972	2.77778 × 10 ⁻⁷	0.238889	9.47813 × 10 ⁻⁴	0.737562	6.24150 × 10 ¹⁸		= 4.1855 J(15 °C)	
9.80665	1	2.72407 × 10 ⁻⁶	2.34270	9.29487 × 10 ⁻³	7.23301	6.12082 × 10 ¹⁹		= 4.1868 J(国際蒸気表)	
3.6 × 10 ⁶	3.67098 × 10 ⁵	1	8.59999 × 10 ⁵	3412.13	2.65522 × 10 ⁶	2.24694 × 10 ²⁵		仕事率 1 PS(仏馬力)	
4.18605	0.426858	1.16279 × 10 ⁻⁶	1	3.96759 × 10 ⁻³	3.08747	2.61272 × 10 ¹⁹		= 75 kgf·m/s	
1055.06	107.586	2.93072 × 10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 ²¹		= 735.499 W	
1.35582	0.138255	3.76616 × 10 ⁻⁷	0.323890	1.28506 × 10 ⁻³	1	8.46233 × 10 ¹⁸			
1.60218 × 10 ⁻¹⁹	1.63377 × 10 ⁻²⁰	4.45050 × 10 ⁻²⁶	3.82743 × 10 ⁻²⁰	1.51857 × 10 ⁻²²	1.18171 × 10 ⁻¹⁹	1			

放射能	Bq	Ci	吸収線量	Gy	rad	昭射線量	C/kg	R	Sv		rem
									1	100	
	3.7 × 10 ¹⁰	1	0.01	1		2.58 × 10 ⁻⁴	1	1	0.01	1	

(86年12月26日現在)

アコースティック・エミッション法を用いた高温工学試験研究炉の1次冷却材漏えい及び熱交換器伝熱管の流体振動の監視装置の開発