

沸騰水型原子力発電所用熱交換器の現状と技術開発

Current Status and Development of Heat Exchangers for Boiling Water Reactor Nuclear Power Plant

沸騰水型原子力発電プラントの出力の増大に伴い、各種熱交換器の形状及び容量は大形化し、プラントの運転に際してその信頼性と安全性とが要求されている。

この論文は、信頼性の向上と性能改善の両面から、設計、材料及び製作の各分野にわたり熱交換器の技術開発の最近の動向について述べたものである。

内山義雄* *Yoshio Uchiyama*

西岡周二* *Shûji Nishioka*

伊藤静雄* *Shizuo Itô*

1 緒 言

我が国の沸騰水型原子力発電所(以下、BWR型発電所と略す)は、昭和45年3月初めて日本原子力発電株式会社敦賀原子力発電所(電気出力325MWe)が商業運転に入り、その後発電所の数とともに単機容量も増大し、現在建設中のものは電気出力が1,100MWeに達している。これらBWR型発電所に使用される補助設備の各種熱交換器も、出力の増大に伴って使用条件が複雑化し、また高性能化しつつある。

これらの熱交換器は、発電所の定常運転に使用する系統と緊急時に使用する系統の二つのカテゴリーの系統に分けられる。

(1) 定常運転時に使用する系統

- (a) 原子炉水浄化系統
- (b) 残留熱除去系統の原子炉停止時冷却モード
- (c) 燃料プール冷却系統
- (d) 原子炉補機冷却系統
- (e) 排ガス処理系統

(2) 緊急時、あるいはバックアップ時に使用する系統

- (a) 残留熱除去系統の格納容器スプレイモード
- (b) 残留熱除去系統の原子炉隔離時冷却モード

(1)の系統のものは、伝熱管数1,000本のうちの1本が破損しても、原子力発電所の安全性から運転を停止せねばならず、また、(2)の系統では原子力発電所の異常時に完全にその機能を保持しなければならない。更に、原子力発電所に使用される熱交換器の多くは、放射性の水、あるいはガスを取り扱うため、これらが漏洩し、更に外部に放出されることを避けねばならない。このために、非常に高い信頼性が要求される。この論文では、伝熱、材料の選定、構造と強度及び振動の点よりこれらの熱交換器の現状と今後における信頼性の向上、及び性能向上のための技術開発の方向について述べる。

2 各種熱交換器の概要と問題点

BWR型発電所用熱交換器は、その定常運転時、及び緊急運転時に内蔵する流体の種類、温度、圧力、並びに放射性物質の濃度によって構成材料を選択し、最も目的に合致したものを選定しなければならない。原子炉補助設備で使用される熱交換器は、すべて多管円筒形熱交換器で管板の保持の仕方、伝熱管の形状により分類すると、固定管板形とU字管形とがある。固定管板形は比較的低い温度の場合に適し、管内の沈着スケール除去がU字管形に比べて簡単である。U字管形は胴径が同じならば固定管板形に比較して管板との取合が少なく、漏れに対する安全性は高い。漏洩を極小にすべき流体の

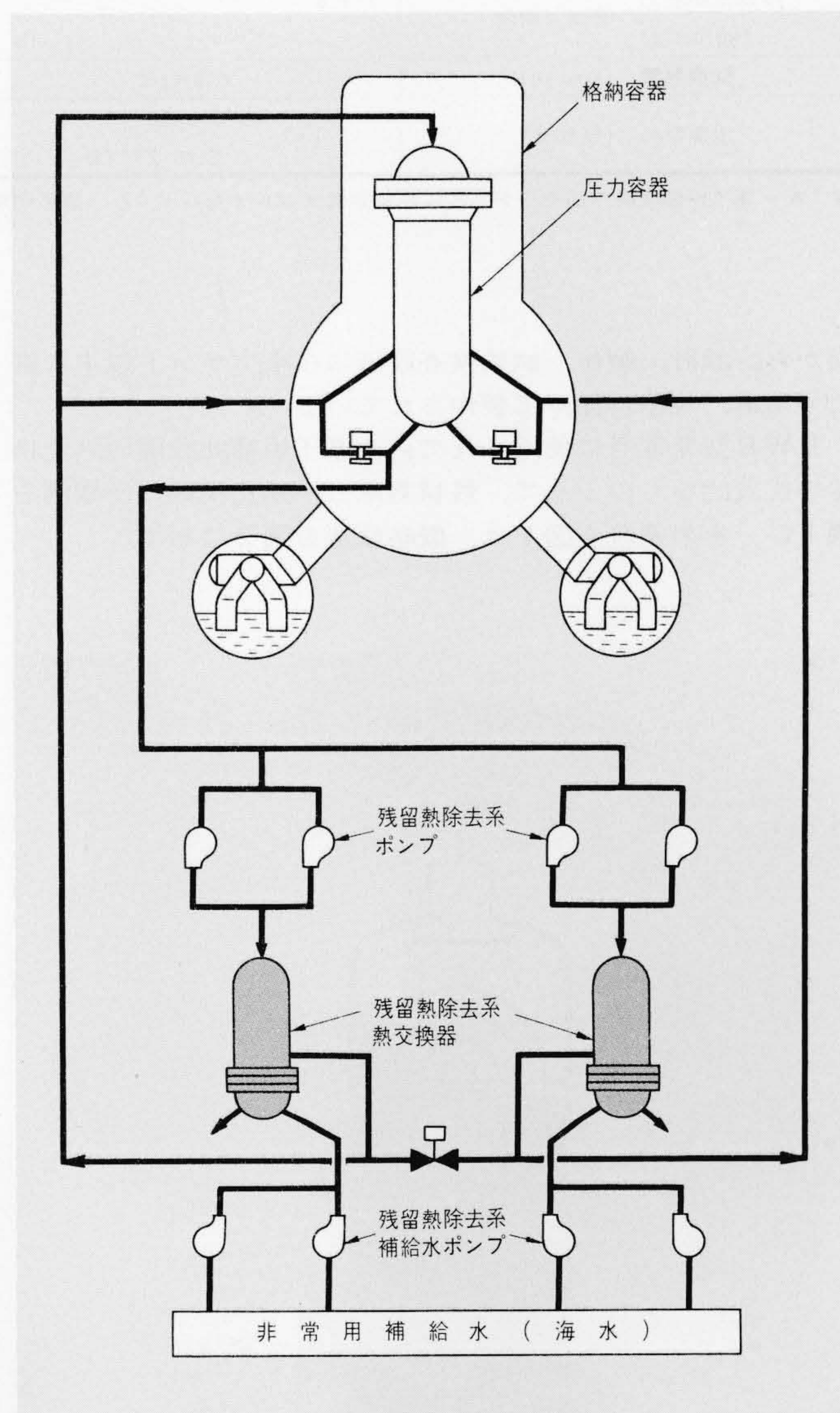


図1 残留熱除去系系統図 残留熱除去系系統の一例を示したものであるが、熱交換器は2基設置される。

場合、あるいは高温・高圧流体の場合にはU字管形を使用し、管末端を管板に溶接して取り付けるのが一般である。一方、原子力発電所の全安性確保のための熱交換器の機能保持、公衆及び従業員の安全確保、並びに電力の安定した供給確保の

* 日立製作所日立工場

表1 残留熱除去系熱交換器の仕様例 BWR型原子力発電所に使用されている原子炉補助設備熱交換器のうち最も使用条件の厳しい残留熱除去系熱交換器の使用例を示した。

項 目	仕				様			
プ ラ ン ト 出 力	460MWe		780MWe		1,100MWe			
製 作 年	昭和46年		昭和49年		昭和49年（予定）			
形 式	縦形U字管式		縦形U字管式		縦形U字管式			
運 転 モ ー ド	B		A	B	C	A	B	C
冷却流体種類 管側／胴側	脱塩水 脱塩水		海水 脱塩水	海水 脱塩水	海水 蒸気	海水 脱塩水	海水 脱塩水	海水 蒸気
冷却流体流量 管側／胴側 (kg/h)	0.71×10 ⁶ 0.78×10 ⁶		1.8×10 ⁶ 1.8×10 ⁶	1.8×10 ⁶ 2.6×10 ⁶	1.8×10 ⁶ 4.5×10 ⁴	1.7×10 ⁶ 1.7×10 ⁶	1.7×10 ⁶ 1.9×10 ⁶	1.7×10 ⁶ 6.1×10 ⁴
管側冷却流体温度 入口／出口（℃）	35 45		21 25	26 68	26 41	22 32	27 54	27 50
胴側冷却流体温度 入口／出口（℃）	54 46		52 47	74 35	199 60	52 42	100 74	198 60
冷却流体圧力 管側／胴側 (kg/cm ² g)	7.6 11～15		15 13	16 14	16 14	— —	— —	— 14
交換熱量（kcal/h）	6.8×10 ⁶		7.8×10 ⁶	17×10 ⁶	27×10 ⁶	17×10 ⁶	46×10 ⁶	37×10 ⁶
主要材料（伝熱管）	JIS G 3463 SUS 27 TB		JIS H 3635 CNTF 3 - 0		JIS H 3635 CNTF 3 - 0			

注：A＝原子炉停止時冷却モード，B＝格納容器スプレイモード，C＝原子炉隔離時冷却モード

面から，設計，製作，試験検査段階に在来プラント以上に厳しい基準，規格に従って製作されている。

BWR型発電所に使用されている原子炉補助設備の熱交換器の代表的なものとして，残留熱除去系熱交換器の仕様例を表1に，その系統を図1に，概略構造を図2に示す。

3 設計上の諸技術開発

3.1 伝 熱

補助設備に用いられる熱交換器には，水-水熱交換，蒸気-水熱交換，蒸気-ガス熱交換などがあるが，そのいずれもが強制対流表面接触伝熱式である。これらのうち，非凝縮性ガス例えば，水素，酸素などを含む蒸気を凝縮冷却させる熱交換器(残留熱除去系熱交換器の原子炉隔離時冷却モード)においては，非凝縮性ガスの存在によって蒸気分圧が低下し，それにより蒸気の飽和温度が下がって，温度落差が少なくなるため伝熱が悪くなる。従って，非凝縮性ガスを含む蒸気の伝熱計算を行なう必要があるが，これは熱移動と物質移動を同時に考慮しなければならず，非常に複雑な問題である。現状では凝縮性ガス，非凝縮性ガスがそれぞれ一成分の場合は計算可能であるが，それぞれが多成分になると一成分に近似して計算を行なう以外に方法がない。これには，安全側の仮定が用いられるため，伝熱面積が必要以上に大きくなり熱交換器のコンパクト化，経済面から大きく後退することになる。従って，早急に多成分の非凝縮性ガスを含んだ流体の伝熱計算方法の開発が望まれている。

日立製作所はこの問題に対処するため，残留熱除去系熱交換器のモデル試験装置によって，一定の非凝縮性ガスを混入した蒸気と水の伝熱実験を行ない，非凝縮性ガスのベント方法も含めて伝熱的諸性能を確認した。図3はモデル試験装置の一部である。

3.2 材料の選定

熱交換器用材料は，それぞれ使用する流体の圧力，温度，及び物理的・化学的性質によって最も適した材料を選ぶことが必要である。熱交換器の心臓ともいえる伝熱管に要求される性質は，熱伝導，耐食性，強度，及び経済性に優れていることである。熱伝導率の高いことは性能の向上につながるが，材料選定に際してこれを第一に取り上げることは少なく，また第一に耐食性，更に強度，経済性などを考慮して決定される。二次側冷却水に海水を使用する残留熱除去系熱交換器には，30%キュプロ ニッケル管が使用されているが，今後10%

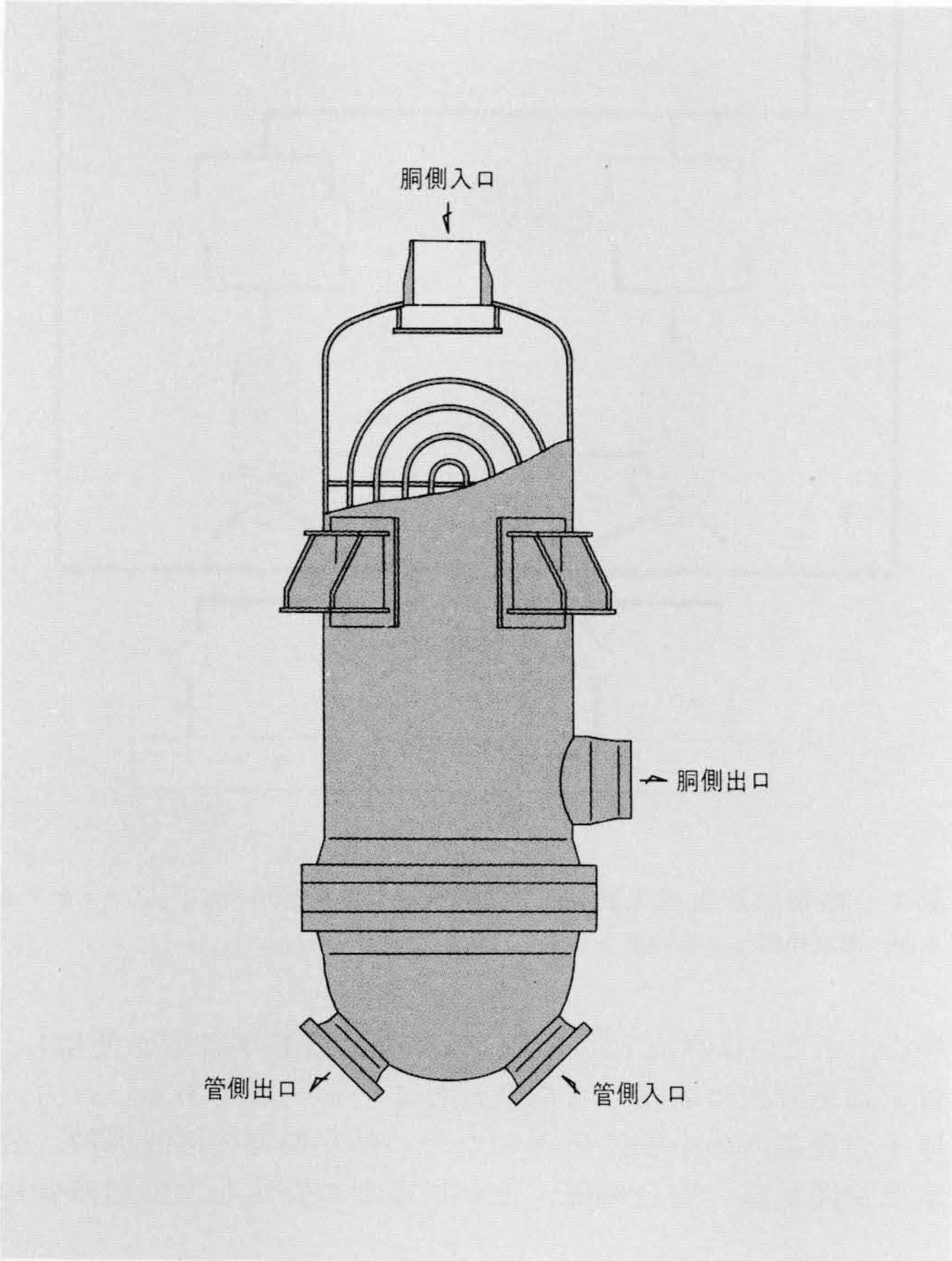


図2 残留熱除去系熱交換器構造図 この熱交換器は，縦形U字管式熱交換器であり，3種類の運転モードをもつ特異なタイプのものである。

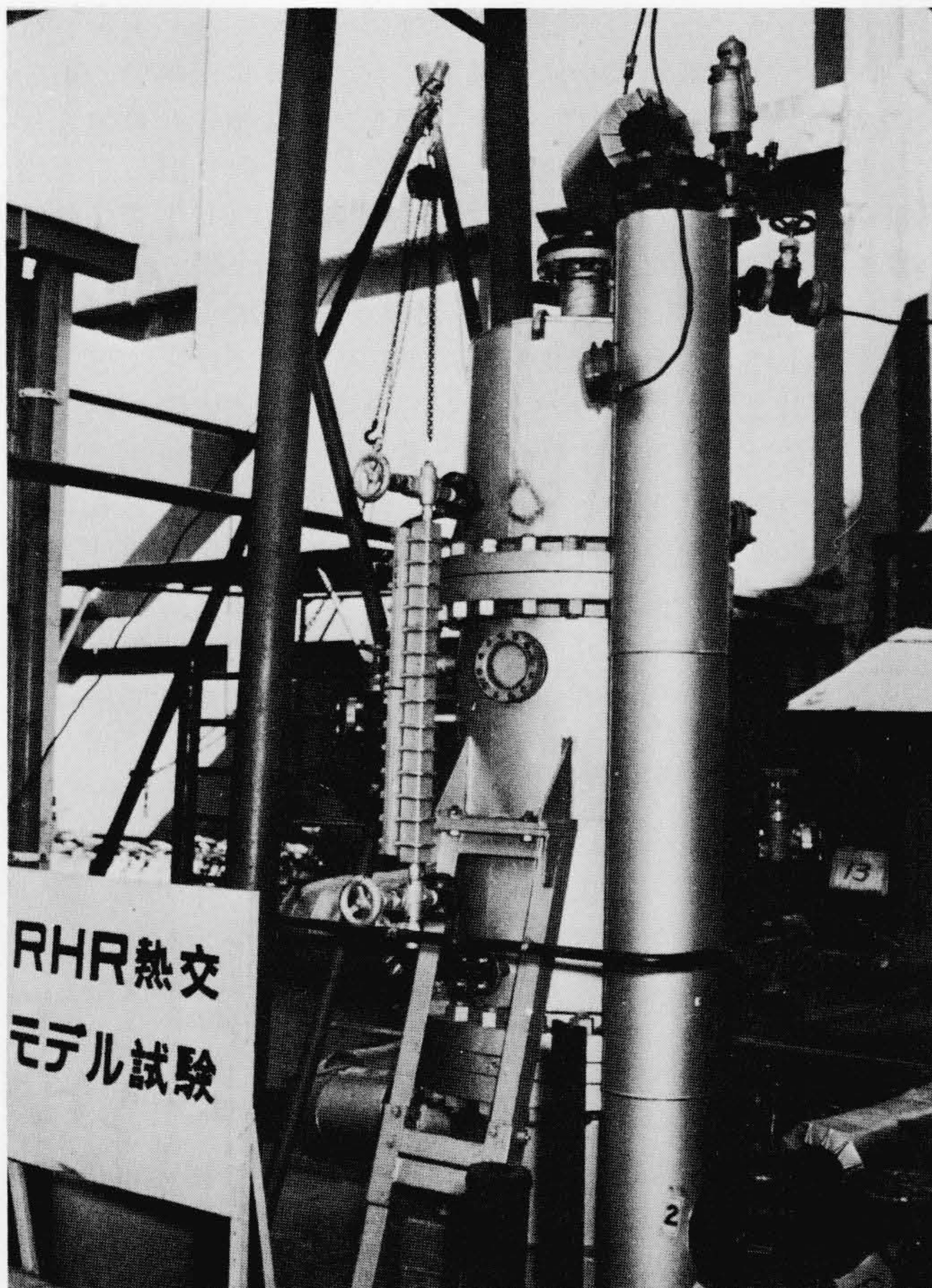


図3 残留熱除去系熱交換器モデル試験装置 熱交換及びベント特性などを確認するため、実機の約 $\frac{1}{5}$ に製作された、モデル試験装置である。

表2 補助設備各種熱交換器に用いられる伝熱管 熱交換器の使用流体の性質に適した材質の伝熱管が選択される。

伝熱管名称	特長	適用熱交換器
JIS H3635 CNTF 復水器用白銅継目なし管	海水に対する耐食性が優れている。	残留熱除去系熱交換器
JIS H3632 BsTF 復水器用黄銅継目なし管	"	原子炉補機冷却系熱交換器
JIS G3463 SUS TB ボイラ、熱交換器用ステンレス鋼管	耐食性が優れている。	原子炉冷却材浄化系再生熱交換器 原子炉冷却材浄化系非再生熱交換器 燃料プール冷却系熱交換器 排ガス処理系排ガス予熱器 排ガス処理系排ガス復水器

キュプロ ニッケル管(強度は30%キュプロ管より劣るが熱伝導性に優れている)、あるいは溶接性その他で研究を必要とするが、チタン管の採用も検討の必要があるものと考えられる。表2にBWR型発電所補助設備の各種熱交換器に用いられる代表的な伝熱管を示す。

一方、容器の材料においては、熱交換器の大容量化に伴い材料が厚肉化し(主に、ボイラ用圧延鋼材(SB材)、溶接構造用圧延鋼材(SM材)、炭素鋼鍛鋼品(SF材))、製品完成後の脆性破壊の危険をなくすため素材の靱性が特に重要視さ

れている。工学的安全設備に属する熱交換器などにおいては、運転中の脆性破壊を防止するために、日本電気協会の「原子力技術規定」により機器の最低使用温度で衝撃試験を実施するよう義務づけられている。

また、冷却水に海水を用いる熱交換器の管板には、耐食性の高い銅合金、あるいはニッケル合金が使用されるが、最近建設中のBWR型発電所のこれら熱交換器には銅合金板、あるいはニッケル合金板を爆着したクラッド鋼板が使用されているものもある。これについては日本高圧力協会の委託で熱交換器材料に爆着クラッド鋼板を適用することを検討する委員会が設けられ、種々実験を行ない原子力用熱交換器に十分使用が可能であることを結論づけている。また、その中では管板だけでなく、水室の鏡板のような球面形状部品にも十分適用可能であると報告されている。なお、この爆着圧接は、火力発電プラントでは多くの実績がある。

3.3 強度設計法

熱交換器の強度設計は最大主応力説を基とした「発電用原子力、又は火力設備に関する技術基準を定める省令」が適用され、更に詳細検討が必要と認められる個所には、American Society of Mechanical Engineers (ASME) 基準 Boiler and Pressure Vessel Code Section IIIに示されている最大主応力差、すなわち応力強さによって強さを評価する考え方が、これら加味されるようになってきた。これは、破壊理論として最大せん断応力説を用い、発生する応力をその分布状態から、一次一般膜応力、局部膜応力、曲げ応力、二次応力、及びピーク応力の各応力に分類し、それらの応力強さを求めて、それぞれ異なった制限値を設けるという評価法である。

熱交換器に作用する荷重としては、内圧、外圧、熱荷重、地震荷重、配管の熱膨張による反力、及びボルト締付力などがあるが、形状、材質、又は寸法などが急変する不連続部分の支持脚部、ノズル部、伝熱管と管板取付部などが詳細検討の対象個所である。例えば、プラントの起動、停止の際の熱サイクルによる伝熱管と管板の溶接部の疲労解析、あるいはクラッド鋼板(管板部)の境界面に対する破壊力学によるクラック伝搬解析などは、この代表的な詳細検討例である。また、現在用いられている規格計算の方式にしても幾つか改善、若しくは再検討の必要があるものと思われるが、ここではその一例として管板の肉厚計算について述べる。管板の肉厚計算は、現在 Tubular Exchanger Manufacturers Association⁽¹⁾ (TEMA)の式が使われている。この式は、実績のある安全なものであるとはいえ、均一荷重を受ける薄肉円板の最大応力を求める式より導いたもので、管により管板に与えられる影響を考慮しておらず、多数の管孔による弱め効果の影響についても考えられていない。これらの影響を考慮した論文⁽²⁾⁽³⁾も多く発表されているが、例えば、Gardnerによれば管板が弾性基礎にあるとし、管板の孔による弱め効果をリガメント効率を導入して解析に含めている。伝熱管の管板に与える影響は、管板の最大応力を減少させ、一方、孔の弱め効果は、この最大応力を増加させる傾向にある。一般にこれらの全効果を考えた場合、管板の肉厚は前記TEMAの式より薄くなる。今後の設計ではこれらの手法を用いて特殊な条件を十分に加味したものとすべきことは当然である。

3.4 伝熱管の振動

発電所出力の増大、及び安全系統の追加などに伴って熱交換器の使用条件は複雑化する傾向にあり、現在、伝熱管の振動に対する検討が各国の熱交換器メーカーにおいて鋭意行な

われている。

熱交換器で発生する故障の50%以上は伝熱管に起こっており、その状況は、伝熱管の腐食・摩耗による減肉とせん孔、及び振動による管板取付部の緩み、じゃま板との接触部の摩耗などである。このうち振動損傷のほとんどは、伝熱管外面とじゃま板の伝熱管孔との間隙が規定値より大きい場合に、伝熱管内外の流体の流れによって起こる脈動、胴体流体の不均一流によるものである。従って、

- (1) この間隙をできるだけ小さくすること。
- (2) じゃま板数を多くして伝熱管の振幅を小さくすること。
- (3) 伝熱管の固有振動数と伝熱管外周に発生する渦発生周期を十分に離すこと。

などを十分に考慮し、設計する必要がある。上記の対策うち

(1)、(2)は製作上、あるいは熱交換器の性能確保の点からも検討が必要で、(3)については伝熱管の固有振動数を正確に把握することが重要となる。従って、これらの厳密な検討には理論的な解析のほかに定性的な解析が必要となる場合が多い。

例えばU字管熱交換器の場合伝熱管を分布定数系として扱い、遷移行列を用いて求める方法を確立した。この方法では伝熱管上の任意の点の振動状態は、変位・回転・力・モーメントの12次元ベクトルで完全に記述される。

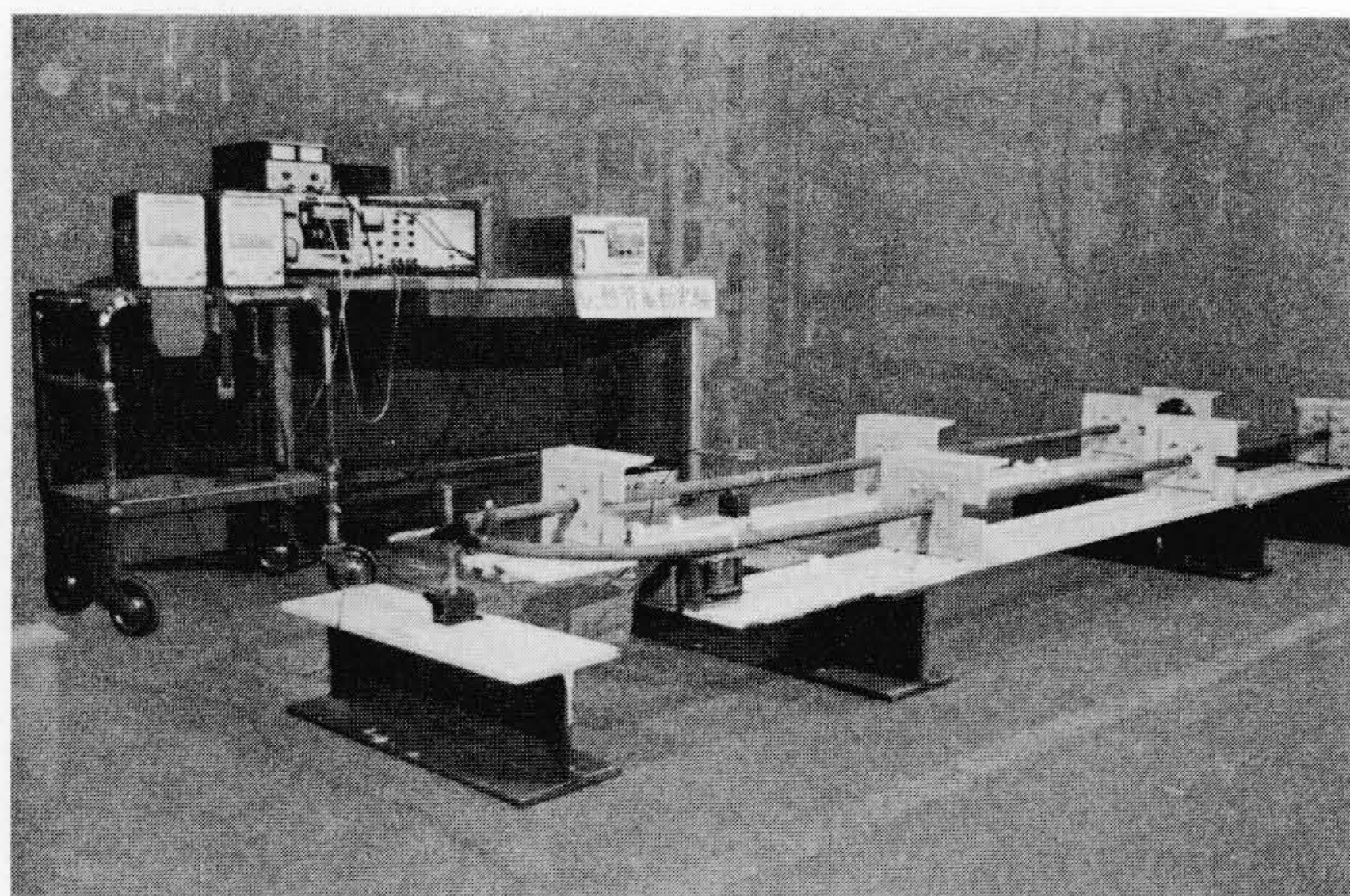


図4 伝熱管振動実験装置 この実験装置は、U字管タイプ伝熱管を使用し、振動に最も弱いとされているU字管部を磁石によって加振したことが特徴である。

日立製作所では、U字管形伝熱管について一連の実験を行ない、固有振動数の解析法を確立した。図4に伝熱管の振動に関する実験装置を示す。また、図5に実験値と計算値〔単スパン解析法(各バップル間の伝熱管だけを取り出し、両端支持条件で計算する方法)、連続スパン解析法(U字管伝熱管を直線状に伸ばした系により両端固定条件で計算する方法)、U字管状解析法(この説明により計算する方法)〕との比較を示すが、上述したU字管状解析法は、実験値とほとんど一致し十分妥当なものであったことが分かる。ただ実際の熱交換器の伝熱管は、種々の支持状態にあるのでこの解析法による値に流体の流動状況などを考慮し、十分な安全率をとることが必要である。更に、熱交換器は胴側にじゃま板が設けられ流体が屈曲しつつ流れるので、管群自体は整然としていても胴側の流れは複雑であり、流体と構造体との相関関係を正確に評価することが設計者にとって大きな課題となっている。

4 加工上の技術開発

材料の項でも述べたように、最大の課題であった爆着クラッド鋼についてはその技術が確立された。

最近化学プラントではチタン材が使用されつつあるが、原子力用熱交換器に使用する場合には、特に原子力用機器としての溶接技術の確立をする必要がある。

5 結 言

BWR型発電所の補助設備に用いられる熱交換器の現状と、今後の技術開発の方向についてその概要を述べたが、今後、発電所の単機容量が更に増大することが予想され、これら熱交換器は、ますます高信頼性が要求されるため、設計者にとっていっそう高度な技術の開発と修得とが必要である。

参考文献

- (1) Tubular Exchanger Manufacturers Association, Inc. George P. Byrne, "Standards of Tubular Exchanger Manufacturers Association" Fifth Edition (1968)
- (2) K. A. Gardner, "Heat Exchanger Tube Sheet Design" Trans ASME, '70, A-377~385 (1948)
- (3) K. A. Gardner, "Heat Exchanger Tube Sheet Design-2 Fixed Tube Sheets," Trans, ASME, '74, A-159~166 (1952)
- (4) 内山, "原子力プラント配管系の計算" 配管技術 No.2 (1970)

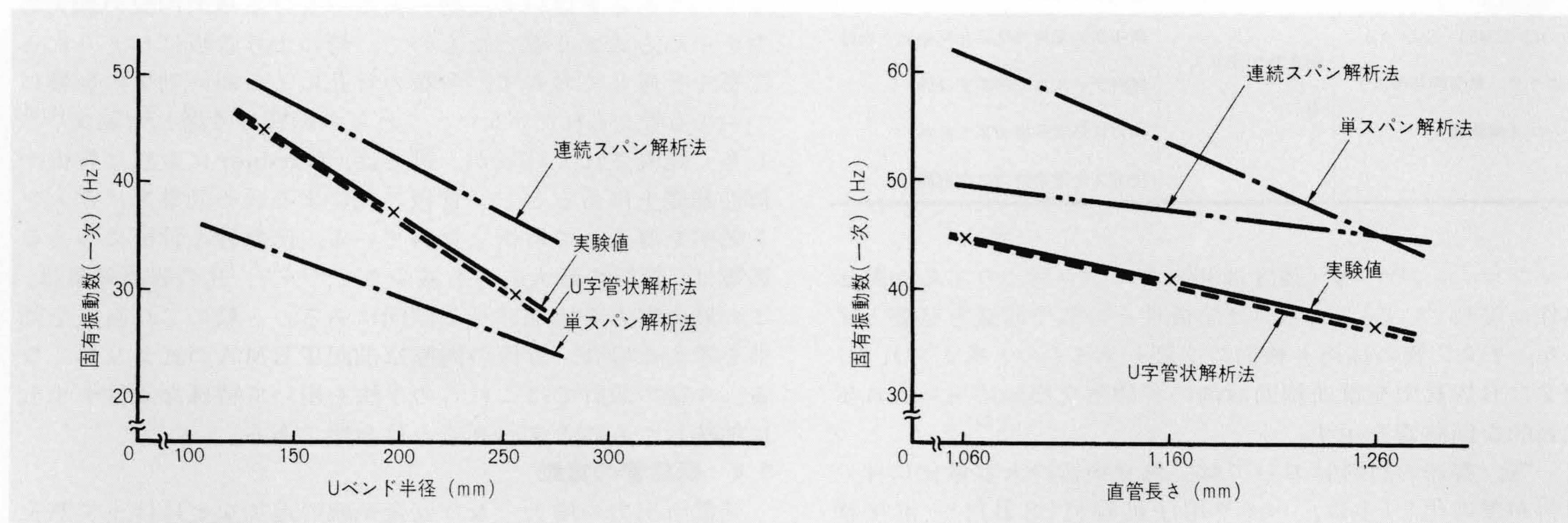


図5 伝熱管固有振動数の比較 Uベンド半径及び直管部の長さを変化させた場合の固有振動数の実験値と、解析値の比較であるが、U字管状解析法が実験値とほぼ一致することが分かる。