

高速増殖炉用中間熱交換器及び蒸気発生器の構造に関する研究開発

Research and Development of Intermediate Heat Exchanger and Steam Generator for Fast Breeder Reactor

高速増殖炉の冷却系設備のうち、中間熱交換器は、原子炉で発生した熱を一次冷却系から二次冷却系に伝えるナトリウム-ナトリウムの熱交換器であり、また、蒸気発生器は、更なるその熱を二次冷却系から水・蒸気系に伝えるナトリウム-水・蒸気の熱交換器である。これらの機器は大形で、かつ冷却材に高温ナトリウムを使用するため、熱衝撃、熱膨張、ナトリウム-水反応事故の防止などに対する配慮が必要であり、これら熱交換器の信頼性は、プラントの性能、安全性及び信頼性に大きな影響を与える。

本稿は、本格的段階を迎えた高速増殖炉の中間熱交換器及び蒸気発生器の構造に関する日立製作所での開発内容のうち、(1)伝熱・流動、(2)構造・強度、(3)製作・検査の開発状況について述べる。

柴藤 英造* Eizō Shibatō
 河原 愈* Masaru Kawara
 鈴置 昭** Akira Suzuoki
 下屋敷重広** Shigehiro Shimoyashiki
 佐々木 武*** Takeshi Sasaki

1 緒言

高速増殖原型炉「もんじゅ」(以下、「もんじゅ」と略す。)の冷却系は、原子炉容器、一次ナトリウムと二次ナトリウムの熱交換を行なう中間熱交換器、及び二次ナトリウムと水・蒸気との熱交換を行なう蒸気発生器などの主要機器から構成されている。

日立製作所は、「もんじゅ」の設計研究で、主として一次冷却系とその補助系統設備、蒸気発生器設備などを担当し、更に設計に必要な各種の研究開発を進めるに当たり、動力炉・核燃料開発事業団の委託を受け、あるいは日立製作所独自の開発計画により、それぞれ試験を実施してきた。以下に、「もんじゅ」冷却系の代表的な機器である中間熱交換器と蒸気発生器の構造に関する研究開発の概要について述べる。

2 ナトリウム機器の特徴

高速増殖炉は、沸点が高く、かつ熱伝導率の大きいナトリウムを高温状態(約500℃前後)で冷却材として使用するため、機器の薄肉、小形化が図れるが、反面、熱衝撃、熱膨張、ナトリウム-水反応事故の防止などに対する配慮が必要であり、構造の上で高い信頼性が要求される。

3 中間熱交換器の開発

図1に中間熱交換器の構造例を示す。本熱交換器は、熱出力2MWループ用熱交換器(交換熱量:13.3MW, 2基)、高速実験炉「常陽」用主中間熱交換器(交換熱量:50MW, 1基)及び補助中間熱交換器(交換熱量:2.6MW, 1基)の製作経験を基に、更に、図2に示す各種の検討を実施することにより、その開発を進めている。以下に代表的な研究開発の内容について述べる。

3.1 伝熱・流動

熱交換器内での流動の不均一は、熱交換器の性能及び構造強度に影響を与えるため、部分モデル及び全体モデルにより水流動試験を実施し、この結果を実機の整流構造に反映して

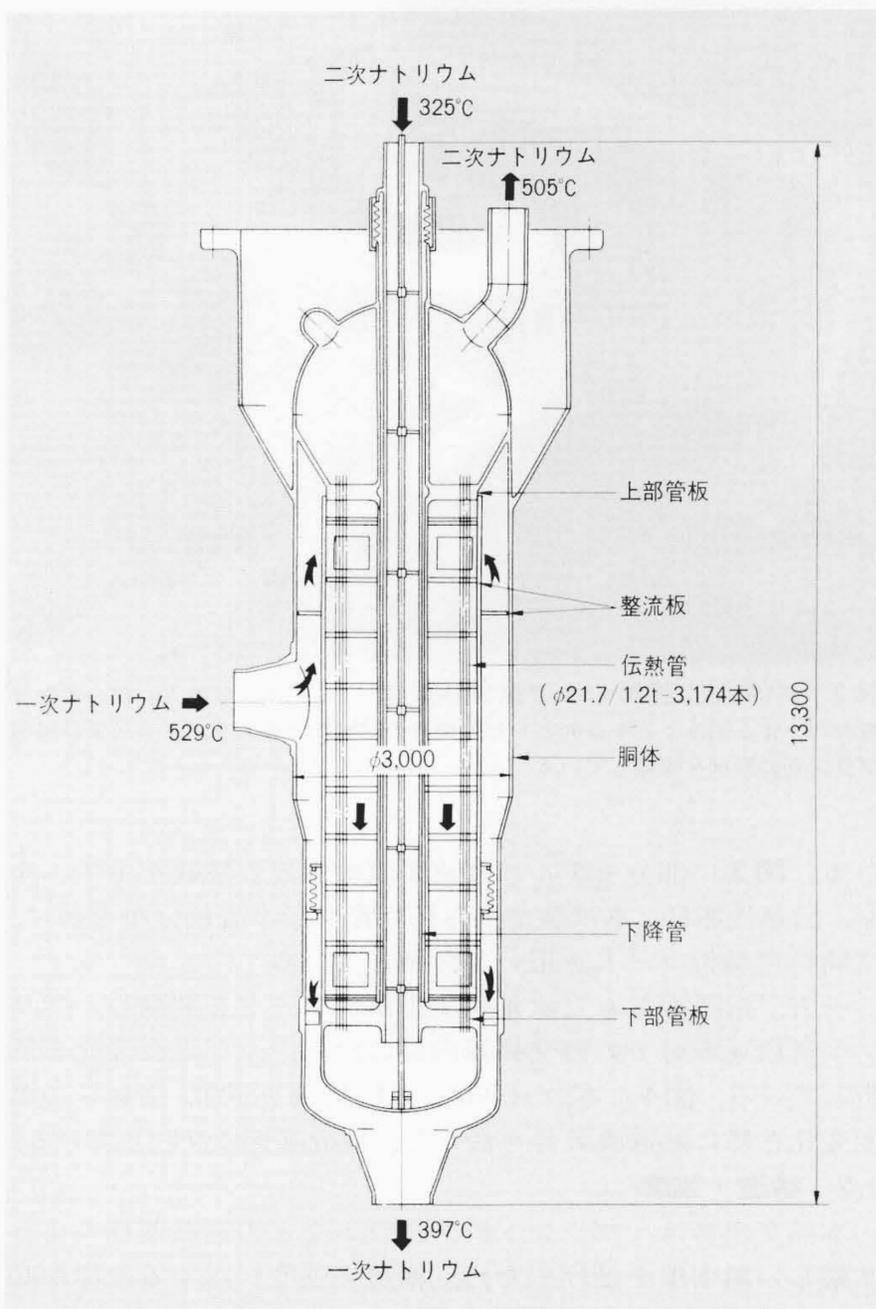


図1 中間熱交換器の構造例 縦形無液面シェルアンドチューブ式のステンレス鋼製の直管形熱交換器であり、一次ナトリウムは胴側、二次ナトリウムは管側を流れる。1基当たりの交換熱量は、238MWと非常に大きい。

* 日立製作所日立工場 ** 日立製作所エネルギー研究所 *** バブコック日立株式会社呉工場

| 昭和(年度) | 45 | 46 | 47 | 48 | 49 | 50 | 51 | 52 | 53 | 54 | 55 | 56 |
|---------------|----------------------------|------|--------------|-----------|-----------|------------------|---------|-----------|-----------|-----------|----|----|
| 高速増殖原型炉「もんじゅ」 | 一次設計 | 二次設計 | 三次設計 | 調整設計(Ⅰ) | 調整設計(Ⅱ) | 調整設計(Ⅲ) | 調整設計(Ⅳ) | 製作準備設計(Ⅰ) | 製作準備設計(Ⅱ) | 製作準備設計(Ⅲ) | | |
| 中間熱交換器 | 2MWループ用熱交換器(1号機) | | | | | 2MWループ用熱交換器(2号機) | | | | | | |
| | 高速実験炉「常陽」主中間熱交換器, 補助中間熱交換器 | | | | | | | | | | | |
| | 伝熱・流動解析, 同試験 | | | | | | | | | | | |
| | 管-管板溶接構造, 管束部モックアップ | | | | | | | | | | | |
| 蒸気発生器 | 500kW蒸気発生器 | | 伝熱・流動, 動特性解析 | | | | | | | | | |
| | 1MW蒸気発生器 | | 改造1MW蒸気発生器 | | 伝熱管環境効果試験 | | | | | | | |
| | 50MW蒸気発生器(1号機) | | | 振動試験 | | | | | | | | |
| | 水漏洩検出装置 | | | 伝熱管支持構造試験 | | | | | | | | |
| | 伝熱管検査, 補修装置 | | | | | | | | | | | |

図2 中間熱交換器, 蒸気発生器の開発工程 研究開発は, 動力炉・核燃料開発事業団からの委託及び日立製作所独自の計画により広範囲にわたって進められており, 「もんじゅ」設計に有効に反映されている。

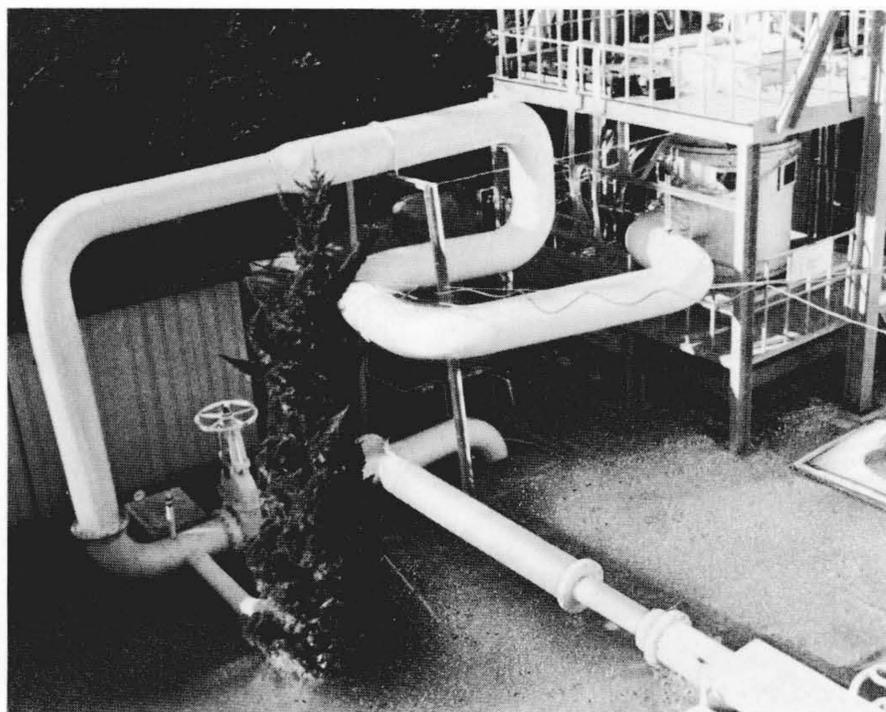


図3 中間熱交換器の水流動試験装置 伝熱管管束入口部の流動分布の均一化を図ることを目的とした縮尺の試験装置であり, 入口配管は実機プラントの形状を模擬している。

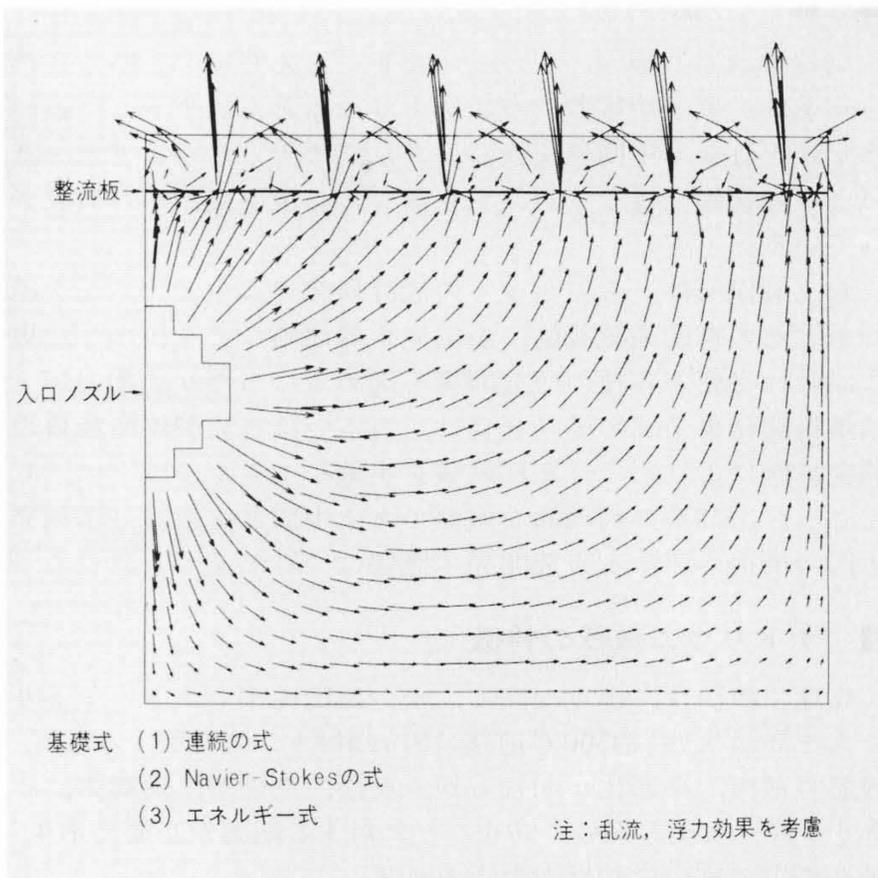


図4 中間熱交換器の過渡熱流動解析の一例 一次入口ノズル近傍の流動状況を180度展開して示したもので, ノズル上部の整流板により流動の均一化が図られている状態がよく分かる。

いる。図3に部分モデルの水流動試験装置の外観を示す。なお, 伝熱性能は, 本試験で得られた管束部の流量分布を基に, 空間特性解析コードを用いて評価している。

一方, 解析面でも二次元熱流動解析コードを開発し, プラント過渡運転時での熱交換器内部の流動, 及び温度変化を解析している。図4に本コードによる解析例を示す。これらの温度変化を基に熱過渡条件を設定し, 構造解析に反映している。

3.2 構造・強度

本熱交換器は, プラントのスクラムなどの過渡運転によって厳しい熱衝撃を受けるため, 構造上強度に対する配慮が必要とされる。このため, 動力炉・核燃料開発事業団大洗工学センターで縮尺モデルを用いた高温ナトリウムによる熱衝撃試験が実施されている。本試験の結果により, 過渡運転時の各部温度変化, 応力状態などのデータが得られ, 実機設計に有効に反映することができた。

図5にベローズ疲労試験体の外観を示す。本試験は, 実機

の上部に設けられているベローズの疲労強度を確認することを目的としたもので, 各種条件により試験の結果, 信頼性が十分であることが確認された。

3.3 製作・検査

伝熱管と管板との溶接部は, 一次系と二次系との境界を構成し, 高い信頼性が必要とされる。このため, 高品質で, しかも低コストの条件を満たす一部差込み形管-管板溶接法を開発した。これは, 伝熱管をその肉厚と同じ程度管板に差し込み, 自動溶接機により内面から完全溶込み溶接を行なう方法であり, 実機への適用が可能であることを確認した¹⁾。図6に, 本溶接法を採用した管束部のモックアップ試験の状況を示す。

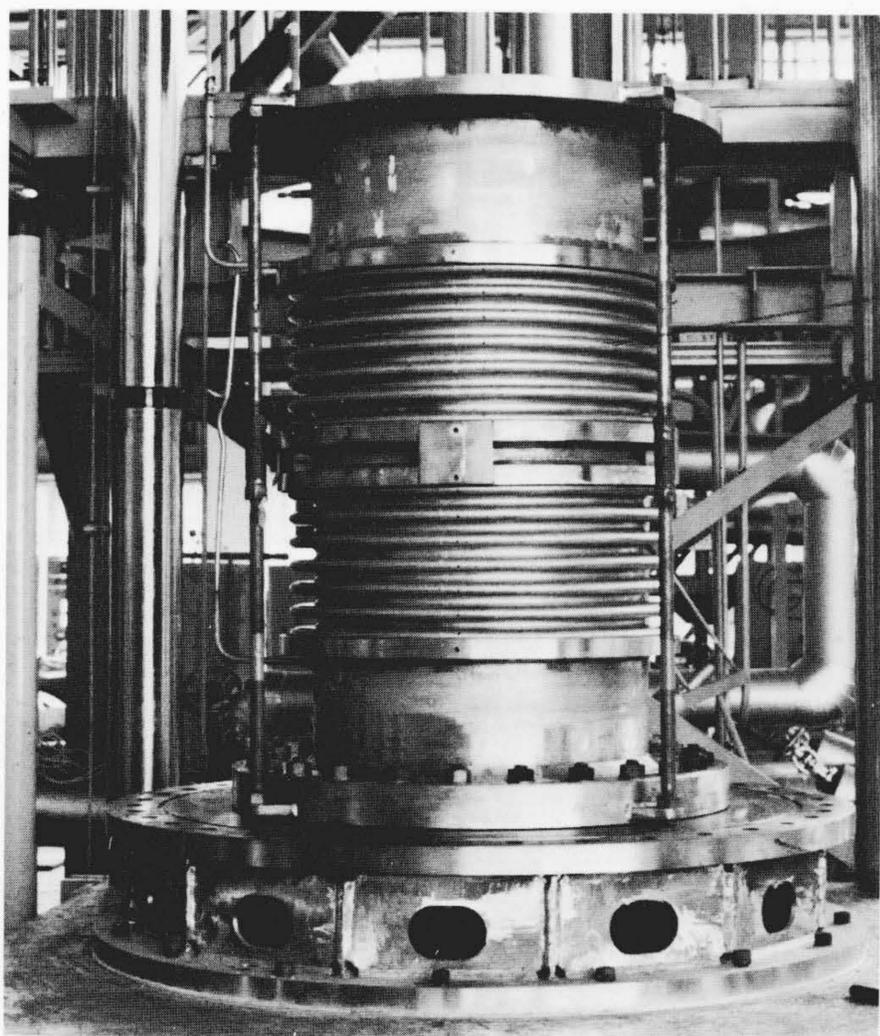


図5 中間熱交換器のペローズ疲労試験体 伝熱管と二次側入口下降管との熱膨張差を吸収するためのペローズの疲労強度を確認することを目的としたものであり、ペローズ構造、寸法は実機用と同一である。

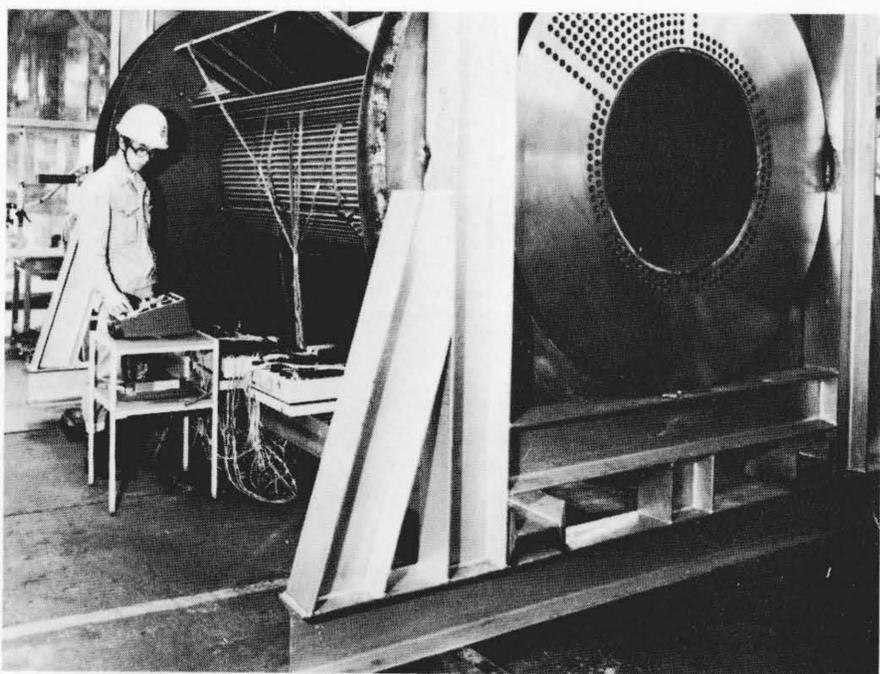


図6 中間熱交換器の管束部モックアップ 実機管束部の製作性、組立性の検討を目的としたもので、管-管板溶接は信頼性の高い一部差込み形を採用している。

4 蒸気発生器の開発

蒸気発生器は、蒸発器と過熱器とを分離した貫流形シェルアンドチューブ式である。図7に、蒸気発生器(蒸発器)の構造例を示す。

本蒸気発生器については、日立製作所内での500kW試験装置²⁾、動力炉・核燃料開発事業団大洗工学センター内での1MW蒸気発生器³⁾及び50MW蒸気発生器⁴⁾(蒸発器、過熱器各1基)の製作経験を基に、更に、図2に示す各種の検討を実施することにより、その開発を進めている⁵⁾。以下に代表的な研究開発の内容について述べる。

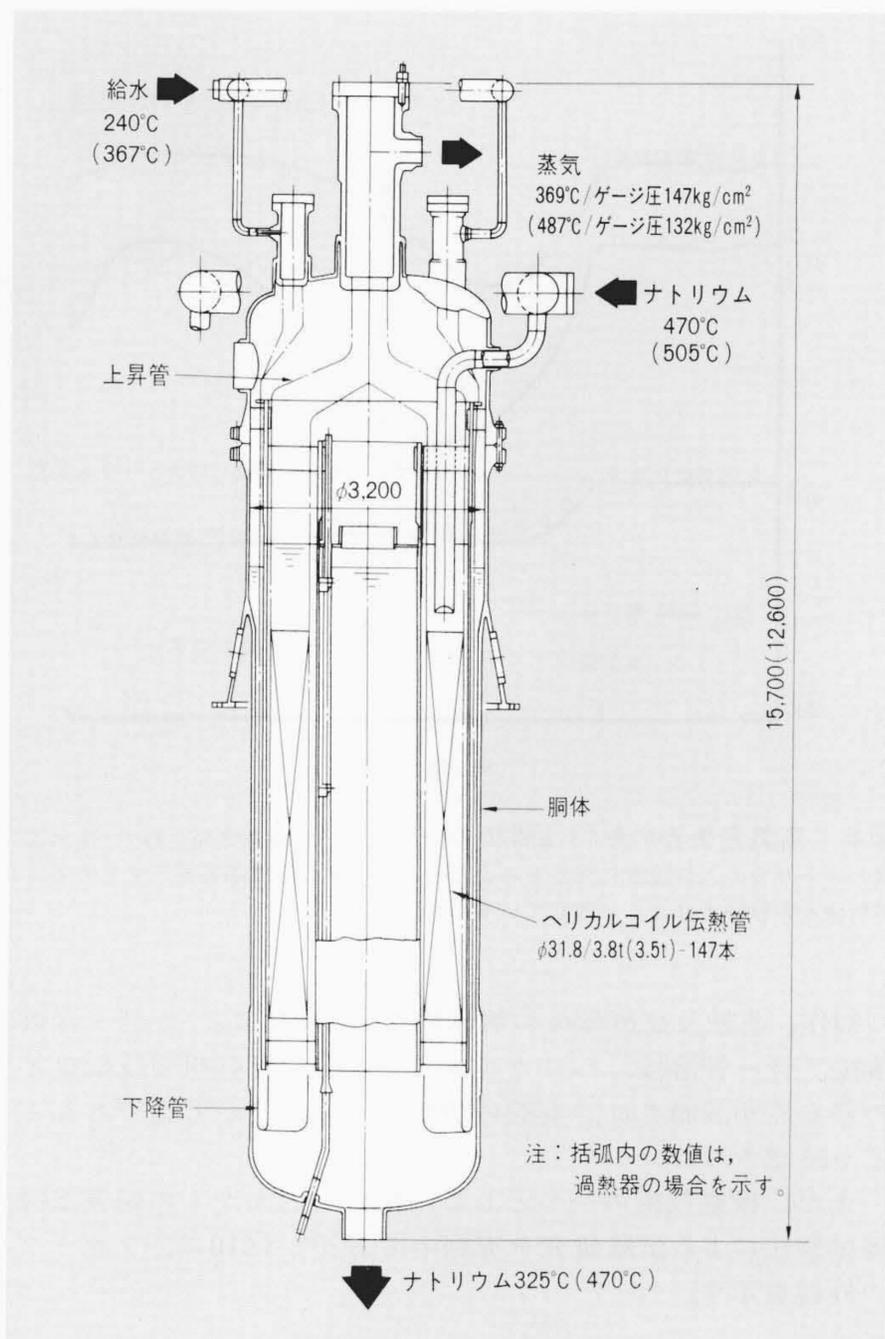


図7 蒸気発生器(蒸発器)の構造例 縦形有液面ヘリカルコイル形であり、ナトリウムは胴側、水・蒸気は管側を流れる。1ループ当たり、蒸発器(低合金鋼製)、過熱器(ステンレス鋼製)各1基ずつから成り、構造はほぼ同じである。

4.1 伝熱・流動

蒸気発生器の伝熱性能は、ナトリウムで加熱されるヘリカルコイル状の伝熱管での伝熱データの信頼性に左右される。このため、伝熱・流動設計は、500kW、1 MW及び50MW蒸気発生器で、定格から極低負荷に至る広範囲の伝熱・流動試験データで検証された空間特性解析コードにより行なわれる。また、水側に生ずる流動不安定現象を予想する解析コード⁶⁾を開発し、安定性の高い蒸気発生器の熱流力設計及び安定領域の明確化⁷⁾を図った。

一方、プラント過渡運転時の熱衝撃は、50MW蒸気発生器の動特性試験データで検証された動特性解析コードにより熱過渡条件を決定し、構造解析に反映している。図8に本コードによる解析例を示す。

4.2 構造・強度

本蒸気発生器は、下降管とヘリカルコイル状の伝熱管群から構成される大形機器であるため、モデルによる耐震強度の試験研究が行なわれている。図9に、上昇管部モデルの外観を示す。

また、伝熱管の支持構造は、熱膨張及び振動に対する配慮が重要であり、実機と同一の構造により試験研究が行なわれている。

4.3 製作・検査

ヘリカルコイル形では世界最大級である50MW蒸気発生器

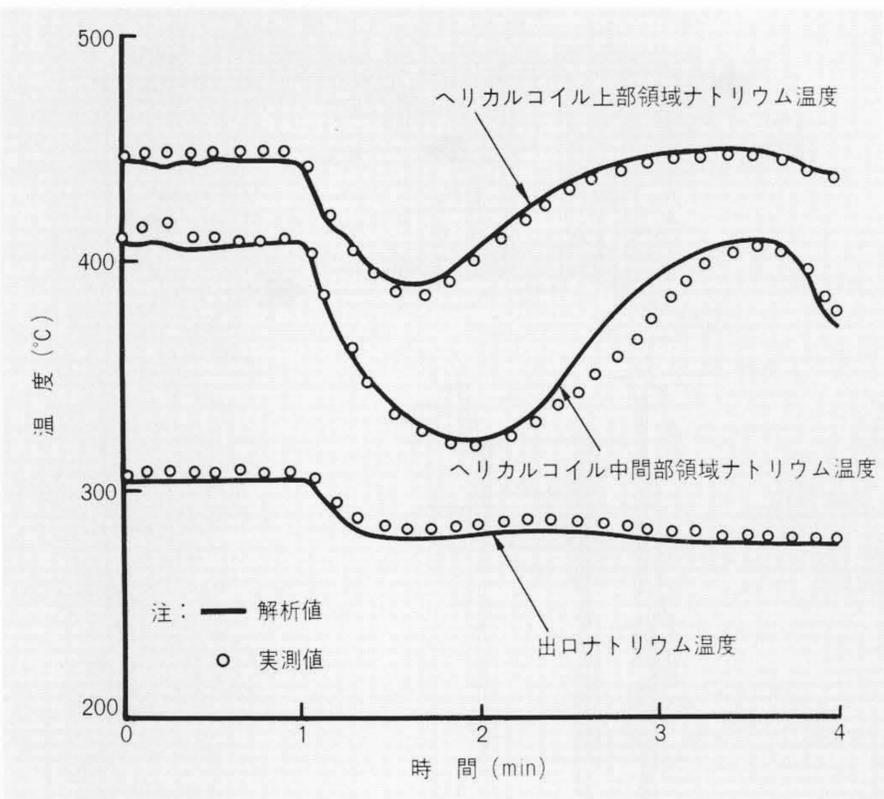


図8 蒸気発生器の動特性解析の一例 50MW蒸気発生器で、給水流量とナトリウム入口温度に外乱を与えたときの内部の温度応答を示すもので、解析値と実験値とはよく一致している。

の製作、運転及び運転後の解体検査⁸⁾の経験により、管-管板溶接、管-管溶接、ヘリカルコイル成形、管群組立技術などの妥当性が評価され、実機の製作に十分適用が可能であることが確認された。

また、検査技術の一つとして、伝熱管内面からの超音波探傷試験法による試験研究を実施中である⁹⁾。図10に、プローブの外観を示す。

5 結 言

「もんじゅ」設計研究で、日立製作所が担当した冷却系設備のうち、代表的な機器である中間熱交換器と蒸気発生器に関して、その開発状況を述べた。

日立製作所は、今後も本計画に積極的に参画し、高品質で信頼性の高い高速増殖炉用機器の開発に向けて、よりいっそうの努力を傾注する考えである。

終わりに、「もんじゅ」の設計研究及びこれに関連する研究・開発試験を実施するに当たり、終始、御指導をいただいた動力炉・核燃料開発事業団の各位に対し、深謝の意を表わす次第である。

参考文献

- 1) 間瀬, 外: 高速増殖炉用熱交換器における管-管板溶接構造の開発, 日立評論, 59, 747~752 (昭52-9)
- 2) M. Naitoh, A. Nakamura et al.: Dryout in Helically Coiled Tube of Sodium Heated Steam Generator, ASME 74-WA/HT-48, New York, Nov. (1974)
- 3) 河原, 外: 高速増殖炉用蒸気発生器の開発, 日立評論, 55, 213~218 (昭48-3)
- 4) 金森, 外: 高速原型炉「もんじゅ」用50MW蒸気発生器の設計, 製作および運転実績, 日立評論, 58, 111~116 (昭51-2)
- 5) 河原, 外: 高速増殖炉用蒸気発生器の開発, 日立評論, 56, 907~912 (昭49-9)
- 6) 鈴置, 外: 流動不安定現象の研究(第1報), 機械学会論文集, 41, 2866~2877 (昭50-10)
- 7) A. Suzuoki, M. Yamakawa et al.: A Flow Instability Analysis in Sodium-Heated Once-Through Steam Generator, ANS Trans., Atlanta, June (1979)



図9 蒸気発生器の振動試験体モデル 伝熱管の上昇管とヘリカルコイルの一部を模擬したモデルにより、各種地震波の試験が行なわれ、設計に反映されている。

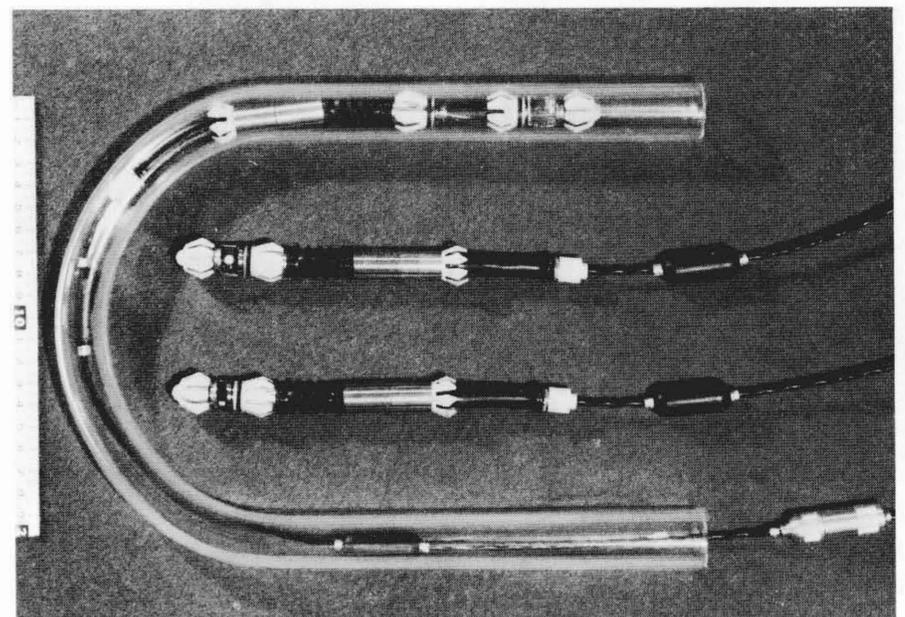


図10 蒸気発生器伝熱管の超音波探傷試験用プローブ 伝熱管の内部にプローブを挿入して、欠陥の検出を行なうもので、U字管は実機の下降管下端を模擬したものである。本装置は、実機の伝熱管の全長わたり挿入が可能である。

- 8) H. Tsuda, M. Kawara et al.: Post-Performance Examination of the 50MW Steam Generator for the Prototype Fast Breeder Reactor "MONJU," BNES Inter National Conference on Ferritic Steels for Fast Breeder Reactor Steam Generators, London, May-June (1977)
- 9) 木野, 外: 蒸気発生器伝熱管用管内挿入式超音波探傷技術, 非破壊検査, 昭和54年度春季大会講演概要 (II-14), 28, 114~115 (昭54-2)