

高速原型炉「もんじゅ」用ナトリウム機器の開発

Development of Sodium Components for Prototype Fast Breeder Reactor "MONJU"

高速原型炉「もんじゅ」は、高速増殖炉開発計画の一環として、動力炉・核燃料開発事業団を中心に自主開発が進められている我が国初の発電用ナトリウム冷却高速増殖炉である。

本稿は、設置許可申請段階を迎えた高速原型炉「もんじゅ」に使用するナトリウム機器のうち、日立製作所での主な開発状況について述べる。

特に、一次主循環ポンプ、中間熱交換器及び主蒸気発生器については、その流動性、材料特性の分析から始めて、構造設計・機器製作を経て、完成した機器の検査・保守に至るまでの各種検討事項について、その概要を報告する。このほか、一次補助ナトリウム系機器、計測器、配管・弁などの設計・製作上の特長についても述べる。

館 靖雄* Tachi Yasuo
 加沢義彰* Kazawa Yoshiaki
 金尾雄二** Kanao Yūji
 佐川憲彦*** Sagawa Norihiko

1 緒 言

高速増殖炉は、消費する以上の燃料を生み出すウラン資源有効利用形の原子炉で、炉心にプルトニウム燃料を、冷却材としてナトリウムを、それぞれ使用することがその特徴である。このため、軽水炉などの従来の原子炉にない特有の技術分野があり、我が国の国家プロジェクトとして、動力炉・核燃料開発事業団(以下、動燃団と略す)を中心にその開発が推進されている。

高速原型炉「もんじゅ」(以下、「もんじゅ」と略す)は、昭和52年4月臨界に達した高速実験炉「常陽」^{1),2)}(以下、「常陽」と略す)に続いて、上記の目的のため建設が予定されている電気出力約300MWeの発電用プラントであり、昭和43年に予備設計が開始されて以来、その設計研究が進められてきた。

日立製作所は、上記の設計研究で主として、一次主冷却系とその補助系統設備、蒸気発生器及び制御棒駆動機構などを担当し、更に、設計に必要な各種の研究開発試験を動燃団からの受注により、あるいは日立製作所独自の開発計画によりそれぞれ進めてきた。

2 「もんじゅ」の概要

表1に調整設計(Ⅳ)までの設計研究により得られた「もんじゅ」の主要目を、図1に主系統概要図を示す。更に図2に「もんじゅ」の開発工程を示す。

3 ナトリウム機器の特徴

ナトリウムは、高速中性子の減速が少なく、かつ熱輸送媒体として優れた性質をもつため、高速増殖炉用冷却材として使用される。表2に高速増殖炉と軽水炉の冷却材の性質の比較を示す³⁾。冷却材としてナトリウムを使用することから生ずる高速増殖炉用機器の特徴は、下記のとおりである。

- (1) ナトリウムは熱伝導率が大いなど伝熱特性が優れ、炉心冷却に適するとともに、熱交換器などの小形化が図れる。
- (2) ナトリウムの沸点は約880°Cであり、蒸気圧が低いので機器は薄肉構造の採用が可能である。
- (3) ナトリウムの融点は約100°Cであり、流動性を確保し凍結を防止するために、機器・配管を約200°Cに加熱するための設備が必要である。

表1 「もんじゅ」の主要目 調整設計(Ⅳ)の結果による。主として冷却系関係の主要目を示す。

項 目	仕 様	
原 子 炉 型 式	ナトリウム冷却・ループ型	
熱 出 力	714MW	
電 気 出 力	約300MWe	
燃 料	PuO ₂ -UO ₂	
原子炉容器寸法(高さ/直径)	17,800/7,100mm	
ル ー プ 数	3	
原子炉出入口温度(入口/出口)	397/529°C	
一次主冷却系ナトリウム流量	5,120t/h/ループ	
一 次 主 循 環 ポ ン プ	形 式: 縦形自由液面遠心式	
	定 格 揚 程: 94mNa	
	ポンプ位置: コールドレグ	
主 中 間 熱 交 換 器	形 式: 縦形無液面シェルアンドチューブ式	
一 次 主 冷 却 系 配 管	一重管式	
	原子炉入口	24B(609.6mm), 肉厚9.5mm
	原子炉出口	32B(812.8mm), 肉厚11.1mm
二次主冷却系ナトリウム流量	3,530t/h/ループ	
二次系温度(高温側/低温側)	510/320°C	
蒸 気 発 生 器 型 式	ヘリカルコイル貫流分離型	
蒸 気 圧 力(主/再熱)	132/32.2kg/cm ² ・G	
蒸 気 温 度(主)	487°C	

- (4) ナトリウムは、化学的に活性で水や空気とは強い反応性を持ち、更に、純度管理が十分でないと構造材を腐食する。このため、ナトリウム表面を不活性ガス(アルゴンガスなど)雰囲気にするための設備、ナトリウム漏洩による火災やナトリウム-水反応事故を生じさせぬための構造の信頼性、更に、構造材の腐食に対する検討とナトリウムの純度管理技術が必要とされる。

- (5) ナトリウムは電氣的良導体で、電磁ポンプ、電磁流量計及び液面計など、この性質を利用した機器が使用される。

- (6) ナトリウムは顕熱によってエネルギーを伝えるため、加

* 日立製作所日立工場 ** 日立製作所土浦工場 *** 日立製作所日立研究所 工学博士

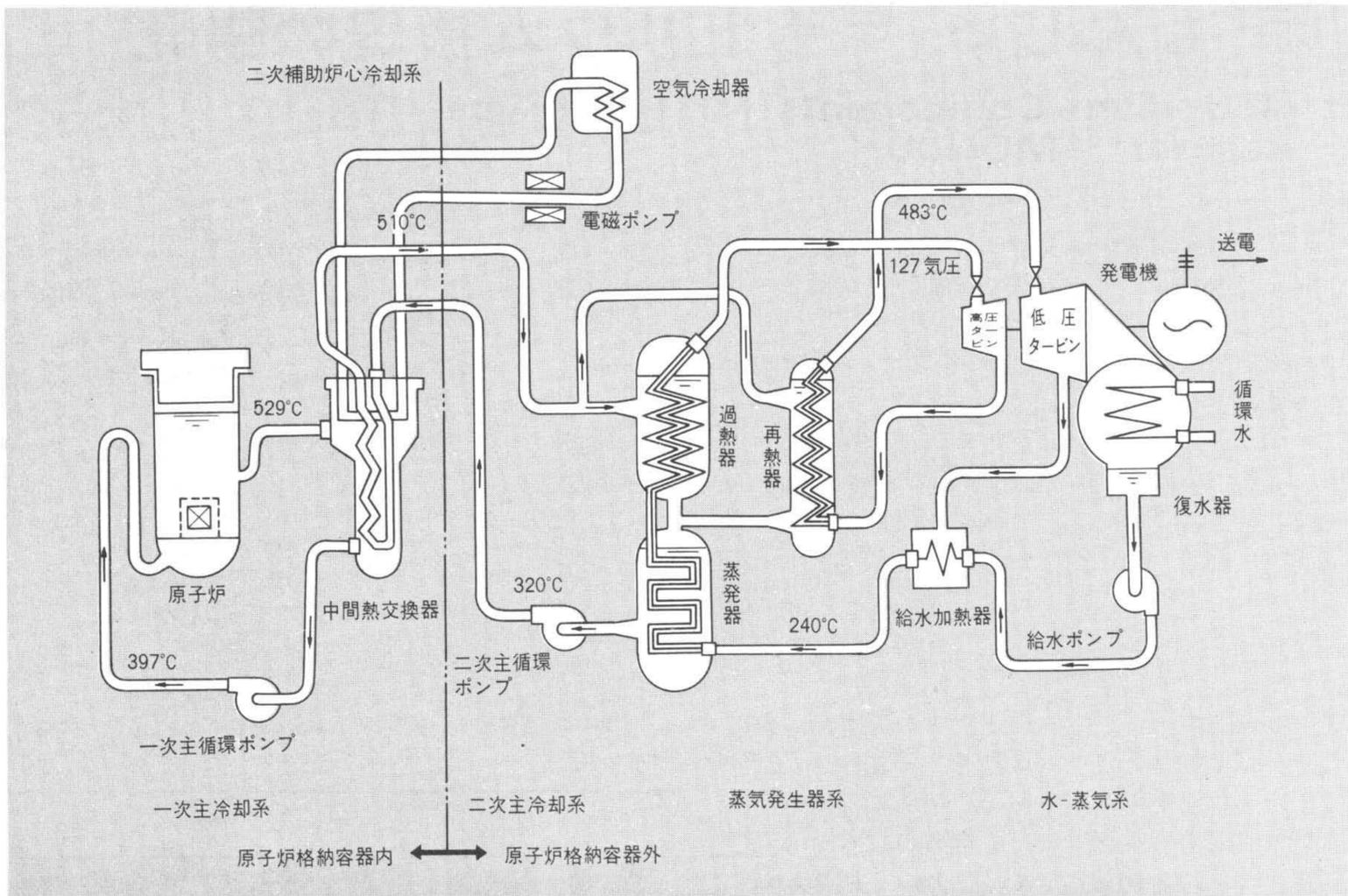


図1 「もんじゅ」主系統概要図 原子炉で発生した熱は、一次主冷却系ナトリウムで中間熱交換器に運ばれ、ここで二次主冷却系ナトリウムに伝達され、更に蒸気発生器を介してタービンを駆動する水蒸気系に伝えられる〔調整設計(IV)の結果による〕。

昭和(年度)	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59
高速原型炉「もんじゅ」	予備設計	原型炉一次設計	「もんじゅ」一次設計	「もんじゅ」二次設計	「もんじゅ」三次設計	調整設計(I)	同(II)	同(III) チェックアンドレビュー	同(IV)	製作準備設計 安全審査							臨界
研究開発			1MW蒸気発生器	50MW蒸気発生器(1号機) 水漏洩検出系	50MW蒸気発生器特性解析 伝熱管ISI, 補修技術				大形ポンプ 部品試験	同左低速 回転試験	モックアップポンプ						
											管-管板溶接構造伝熱・流動試験	ペローズ疲労試験	熱衝撃試験				
						制御棒駆動機構試作	境界性能試験						調整棒駆動機構試作				
											ダッシュポット試験装置						

注: ISI=イン-サービス
インスペクション

図2 「もんじゅ」の開発工程 「もんじゅ」の全体工程は動燃団発行のパンフレットFBR(101×761IA500Q)による。研究開発関係は、日立製作所が動燃団からの受注により実施したもの、あるいは現在実施中のものを示す。

表2 ナトリウムと水の物性値の比較 数値は伝熱工学資料改訂第3版(日本機械学会編)によった。

項目	単位	ナトリウム		水	
		100°C	500°C	0°C	100°C
融点	°C	97.82		0	
沸点	°C	881.4		100	
比重	kg/m ³	927	832	999.9	958.4
比熱	kcal/kg°C	0.333	0.312	1.008	1.007
粘性係数	kg·s/m ²	6.94×10 ⁻⁵	2.51×10 ⁻⁵	1.829×10 ⁻⁴	2.90×10 ⁻⁵
熱伝導率	kcal/mh°C	74.7	57.9	0.489	0.586
表面張力	kg/m	2.01×10 ⁻⁴	1.60×10 ⁻⁴	7.72×10 ⁻³	6.00×10 ⁻³

熱及び冷却により大きな温度変化が生じやすいので、厳しい熱衝撃条件に対する構造強度上の配慮が必要とされる。

(7) ナトリウム機器は高温で運転されるので、大きな熱膨張に対する配慮が必要とされる。

4 日立製作所におけるナトリウム技術の研究開発

日立製作所では、ナトリウム技術の研究を昭和31年に開始し、以降、試験ループによるナトリウムの取扱技術及びナトリウム用機器の基礎的研究を進めてきた。

その技術的蓄積は、昭和44年に動燃団に納入した我が国初の中規模ナトリウムループ「2MWナトリウム流動伝熱試験装置」(以下、2MWループと略す)、更に、「もんじゅ」開発のかな

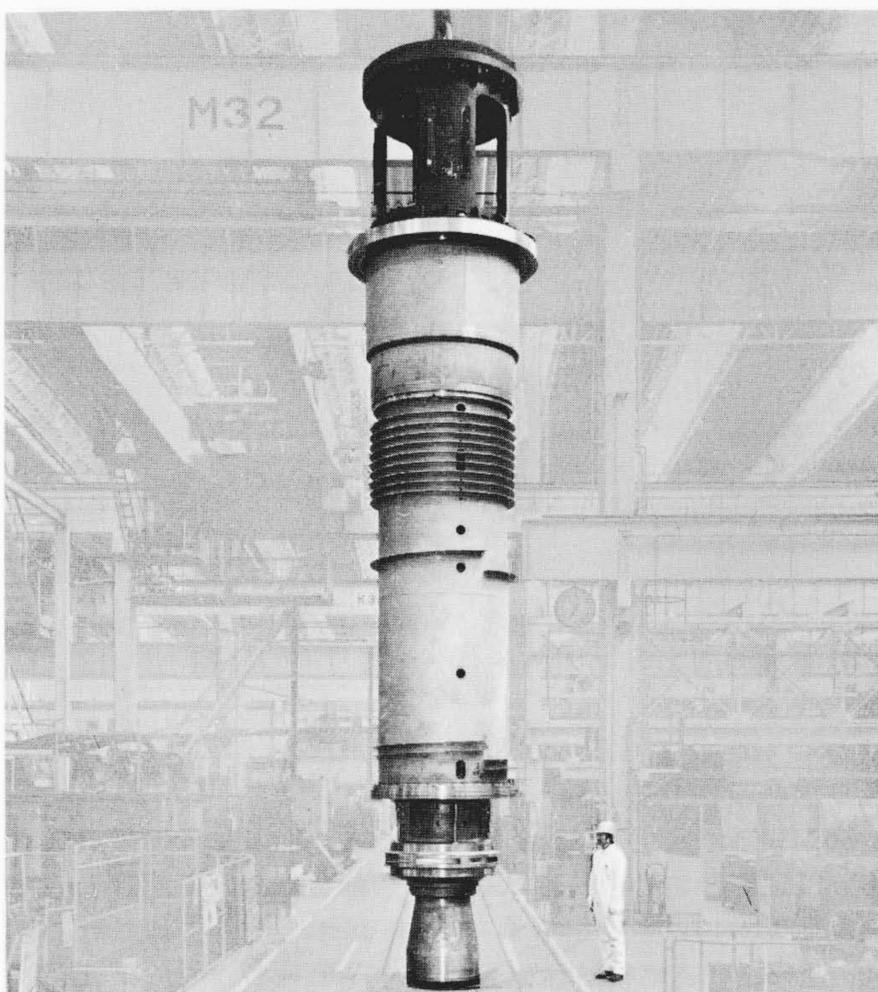


図3 一次主循環ポンプモックアップ試作機(アウトケーシングに組み込む前の内部構造体) 形式:縦形自由液面遠心式, 定格流量:1,260m³/h, 定格揚程:90mNa, 定格回転数:850rpm及び定格所要軸動力:550kW(390°C)で, 回転数制御はサイクロコンバータとサイリスタモータによる。

めとされる「常陽」と50MW蒸気発生器, 及びそれらの研究開発試験装置の建設を推進する原動力となった。

この間, ナトリウム機器の設計, 製作, 据付, 検査及び運転についての貴重な経験が得られ, その成果が「もんじゅ」用機器の設計に反映されている。

5 一次主循環ポンプ

10~100%の広い流量範囲で運転され, 安定性, 過渡時の追従性, 耐久性など, その性能と構造の信頼性が要求される。駆動部とインペラ間が約10mと長く, 内部構造体はメインテナ

ンスを容易にするために一体で引抜き可能な構造としている。

このポンプの開発は, 2MWループ用ポンプ(定格流量:5m³/min), 「常陽」用一次主循環ポンプ(2基), 及び同モックアップ試験ポンプ(いずれも定格流量:1,260m³/h)の製作・運転経験をもとに, 下記に述べる各種の検討と評価試験を進めることにより, その推進を図っている。

開発計画の重要な項目として, 水力性能の検討, 構造材料であるステンレス鋼のナトリウム環境中特性の評価, 上部軸受メカニカルシール構造及びナトリウム軸受構造など重要構造・部品の開発, 並びに実規模大モックアップ試験機による製作及び検査技術の検討と総合評価試験が挙げられている。更に, 運転開始後の供用期間中検査, 保守・補修方法の検討及びこれらのための機器の開発, 並びにナトリウムの洗浄・処理技術の確立についても計画が進められている。

機械式ナトリウムポンプの最重要部品である, 下部ナトリウム潤滑静圧軸受は, ナトリウム中性能確認試験を終了し, 満足すべき結果が得られた。

更に, 実規模大モックアップ試験機は既に製作を完了し, 耐久試験を実施して総合的な機能, 及び信頼性を確認することになっており, 現在これらが進行中である。図3に, このモックアップ試験機の内部構造体の組立状況を示す。

6 中間熱交換器

縦形シェルアンドチューブ式構造を採用した無液面式のナトリウム-ナトリウム熱交換器である。この熱交換器は, 2MWループ用熱交換器(交換熱量:13.3MW, 2基), 「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)の製作経験をもとに, 更に, 下記に述べる各種の検討と試験を実施することにより, その開発を図っている。

開発の重要項目として伝熱設計用熱伝達率の検討, 流動分布及び圧力損失の検討, 伝熱管など構造材料の母材及び溶接部のナトリウム環境中強度の検討, 管-管板溶接構造・耐熱衝撃構造・熱膨張吸収装置(ペローズ)構造など重要構造の強度評価及び非弾性解析手法など設計手法の開発, 並びに管-管板溶接技術を中心とする高品質・高信頼度の製作及び検査技術の確立, 更に供用期間中検査, 保守・補修方法及びこれらのための機器の検討が挙げられる。

形状・他	タイプ	完全差込み形	突合せ形	一部差込み形
管-管板溶接部形状				
特徴		<ol style="list-style-type: none"> すきま腐食の可能性あり。 一般熱交換器などでの実績が多い。 製作工程が短い。 溶接部体積検査が困難。 	<ol style="list-style-type: none"> 溶接部の信頼性が高い。 すきま腐食の可能性がない。 製作工程が長い。 溶接部の体積検査が容易。 	<ol style="list-style-type: none"> 溶接部の信頼性が高い。 すきま腐食の可能性がない。 製作工程が短い。 溶接部の体積検査が容易。
採用例		一般の熱交換器	FFTF(アメリカ)の中間熱交換器及び50MW蒸気発生器(日本)	PFR(イギリス)及びSNR(西ドイツ)の中間熱交換器並びに蒸気発生器

図4 管-管板溶接継手形状 熱交換器の管板と伝熱管の代表的溶接継手形状を示す。一部差込み形はすきま腐食の可能性のないことなど, 溶接部の信頼性及び製造工程上優れている。

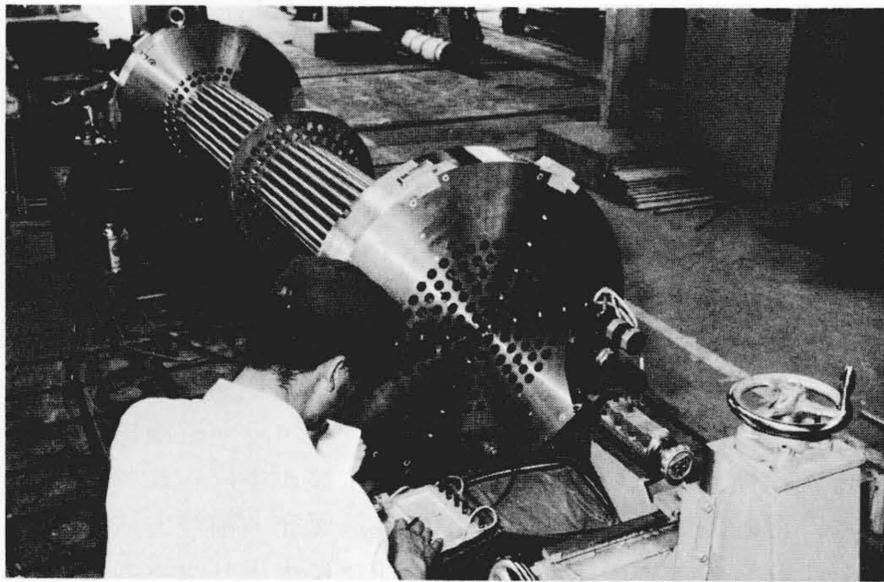


図5 中間熱交換器の管-管板溶接モックアップ 図は部分モックアップ試験体と管-管板溶接設備を示す。

上記開発試験のうち、管-管板溶接構造の開発⁴⁾について、次に詳細を述べる。この熱交換器は、3,174本の直管形の伝熱管が上部管板及び下部管板に溶接される。この溶接部は、一次系と二次系の境界を構成し、高い信頼性が必要である。継手方式としては、図4に示す完全差込み形、突合せ形及び一部差込み形の3種が挙げられる。この開発試験の目的は、高品質、低コスト及び短納期の条件を満たす溶接施工法の確立にある。試験の結果、伝熱管をその肉厚と同じ程度管板に差し込み、これを内面より自動TIG(タングステンイナートガス)溶接機により完全溶け込み溶接を行なう一部差込み形溶接継手を開発し、実機への適用が十分に可能であることを確認した。

この溶接継手方式の開発は、大形熱交換器の将来に明るい見通しを与えるものである。図5に、管-管板溶接構造開発のためのモックアップ試験体を示す

7 配管・弁

一次主冷却系配管は、一重構造配管により構成される大径・薄肉配管であり、放射化された高温の一次ナトリウム環境下で、長期にわたって構造の健全性を要求される。

この配管は、「常陽」の一次系配管をはじめ、多数のナトリウムループ用配管の製作経験をもとに、下記に示す各種の検討、及び開発試験を進めその開発を図っている。すなわち、母材及び溶接部の高温特性の評価及び改善配管エルボの高温特性⁵⁾の検討、あるいはクリープ効果を考慮した高温配管系の強度評価法、及び非弾性解析手法などの構造強度評価手法の開発、並びに保温・予熱ヒータ構造、大径・薄肉配管のサポート構造、実機大の逆止め弁、配管エルボなど配管部品の開発、配管サブアセンブリのモックアップによる据付け工法、及び製作・検査技術の検討、更に供用期間中検査、保守、補修方法及びこれらの目的のための機器の検討などである。

8 蒸気発生器

高温ナトリウムと水/蒸気との熱交換器で、蒸発部と過熱部とを分離した貫流形シェルアンドチューブ式であり、伝熱管は機器の小形化を図るため、ヘリカルコイル状のものを採用している。特に、ナトリウム-水反応事故に対する万全の対策を考慮している。

蒸気発生器の製作経験としては、日立製作所内での500kW試験装置⁶⁾、1MW蒸気発生器⁷⁾及び50MW蒸気発生器(蒸発器

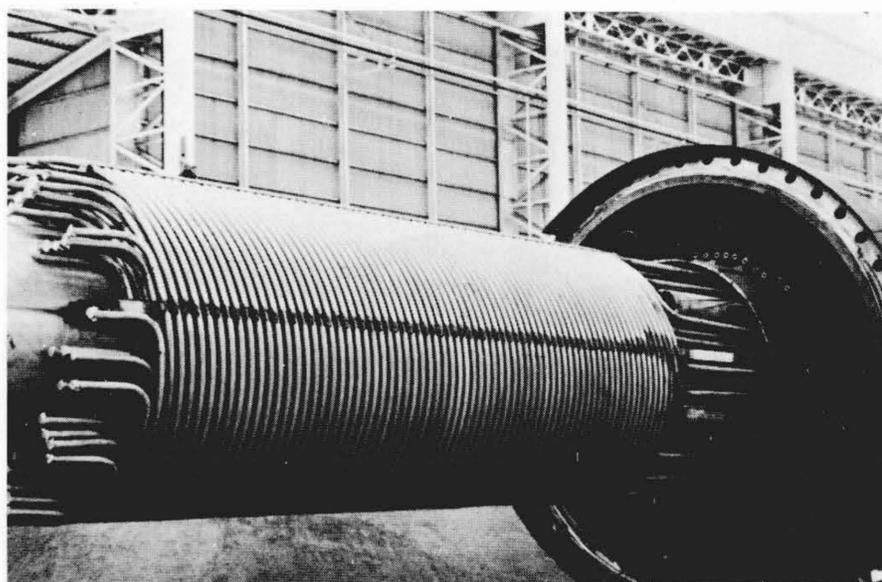


図6 50MW蒸気発生器管束部 図は運転試験完了後の解体検査で、過熱器の管束部を引き出した状況を示す。

及び加熱器各1基)がある。

50MW蒸気発生器は、ヘリカルコイル形では世界最大級であり、運転後の各種特性試験とその解析結果から、計画値と実測値とが良い一致を示すことが確認された⁸⁾。この設計、製作、運転及び運転後解体検査⁹⁾から得られた貴重な成果は、「もんじゅ」蒸気発生器の設計に反映されている。この蒸気発生器は約4,200時間運転後解体された。図6に解体検査時の解体点検状況を示す。

「もんじゅ」用蒸気発生器の開発に当たっては、更に、次に述べるような各種の検討、及び開発試験が進められている¹⁰⁾。すなわち、開発計画の重要な項目として、水/蒸気及びナトリウム側の熱伝達率の検討、流動分布及び圧力損失の検討、低合金鋼伝熱管材料(2 $\frac{1}{4}$ cr-1Mo鋼)の脱炭挙動及び環境効果の検討、大容量機器として信頼性の高い構造の検討、部分モックアップの作成などによる高品質・高信頼度の製作・検査技術の検討、並びに伝熱管の健全性を確認するための供用期間中検査、あるいは保守・補修方法及びこのための機器の検討、更には高感度水漏洩検出装置及び液面制御方式の検討が挙げられる。

9 一次補助ナトリウム系機器

9.1 コールドトラップ

ナトリウム中の酸素溶解度が、温度の低下とともに急減することを利用し、ナトリウムを不純物の飽和溶解度温度以下に冷却し、機内に酸化物を析出捕集する機器である。

日立製作所では、コールドトラップ性能の2次元解析コード“CTRAP”を開発した。この“CTRAP”による解析1号機は、昭和52年5月に運転が開始され、予測どおりの性能を示すことが期待されている。図7にその構造を示す。

酸素単独の捕獲性能は、上記により推定が可能となったが、「もんじゅ」では、ナトリウム中に多重の核分裂生成物や腐食生成物が含まれる可能性があるため、今後これらの挙動についての評価が行なわれる予定である。

9.2 プラギング計

ナトリウム中の酸素飽和溶解度温度を測定し、酸素濃度を監視する機器である。プラギング計に流入したナトリウムは、飽和温度以下まで冷却され、内部に設けられたオリフィス内壁に酸化物を析出し、流量が低下する。この流量低下開始ナトリウム温度を飽和溶解度温度として検出するものである。

日立製作所では、この自動化を図るため、3種類のモデル

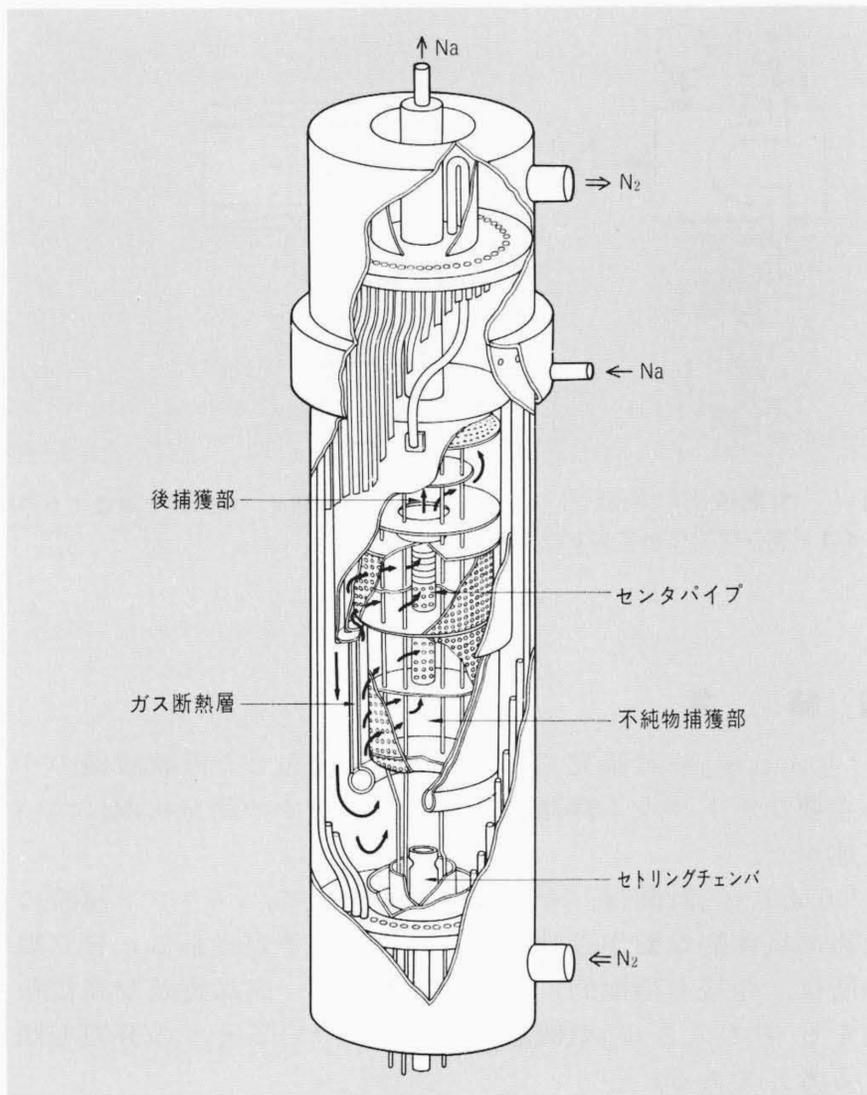


図7 コールドトラップ構造図 流入したナトリウムは窒素ガスによって冷却され、溶解している不純物はメッシュ部を通過する際に析出、捕獲される。

を試作し、ナトリウムループでの試験を実施してオリフィス形自動操作式プラグング計を開発した¹¹⁾。オリフィスは、半閉塞の状態で作動され、冷却量の制御は、ナトリウム流量計の信号により行なわれる。試験ではナトリウム流量、冷却速度などの測定開始条件と測定精度の相関が調べられ、最適運転条件が決定された。「もんじゅ」実機用には、自動操作形プラグング計が使用される予定である。

9.3 電磁ポンプ

構造が簡単で信頼性の高い、フラットリニアインダクションポンプ(以下、FLIPと略す)が採用されている。ポンプ機能は、ナトリウムの流路を成すダクトの両側に配置された固定子が発生する移動磁界と、これによりナトリウム中に誘起さ

れる誘導電流とにより、ナトリウムに電磁力が与えられ圧力を生じさせる。図8にFLIPの構造を示す。

「もんじゅ」一次冷却系では主冷却系の機械式ポンプを除き、他はすべて、FLIPが使用される。

10 制御棒駆動機構

「もんじゅ」炉心の出力制御及び起動・停止は、微調整棒3本、粗調整棒10本及び後備炉停止棒6本の合計19本により行なわれる。制御棒駆動機構は、これら进行操作するための装置で、非常に高い信頼性を要求される。

制御棒駆動機構の開発は、まず実現模大モックアップを試作し、各種試験を実施して問題点と改良点を摘出し実機の設計に反映させる方式が採用された。

制御棒駆動機構の試作機¹²⁾が昭和48年に製作され、水中試験、ナトリウム中試験及びその後、限界性能試験が実施され、水中及びナトリウム中での駆動特性、安全棒に要求されるスクラム機能の確認、偏心特性及びアルゴンシール特性などの各種特性が明らかにされ、更に、地震時の特性に対する貴重なデータを得ることができた。試作機の駆動機構図を図9に、限界性能試験時のスクラム特性を図10にそれぞれ示す。

現在、上記試験結果を反映した、微調整棒駆動機構及び粗調整棒駆動機構の試作機をそれぞれ設計している。

11 計測器

ナトリウム用圧力計測器としては、圧力変換部が直接ナトリウムに接する渦電流式高温圧力変換器、高温用ストレインゲージ式圧力変換器及び高温ナトリウムと圧力変換部が他の媒体で結ばれるナトリウム・カリウム(NaK)封入圧力計、並びに差圧計が開発されている。

上記のうち、NaK封入式のものが多く使用されている。

ナトリウムの液面計測器としては、精度、安定性及び取扱い性の良い電磁誘導式が使用され、運転中較正が可能なものが開発されている。

蒸気発生器内でのナトリウム-水反応の早期検出のため、水素検出計が開発された。これは、水素の検出にイオンポンプをエレクトロニクスセンサとして用いるもので、薄い金属製拡散膜をナトリウムに触れさせておき、ナトリウム中の水素が拡散膜を浸透通過して、他方の真空内に入る事態をイオンポンプで検出するものである。水素検出の連続的な測定のほかに、ナトリウム中の静的平衡圧も測定が可能である。図11に水素検出計の系統図を示す。

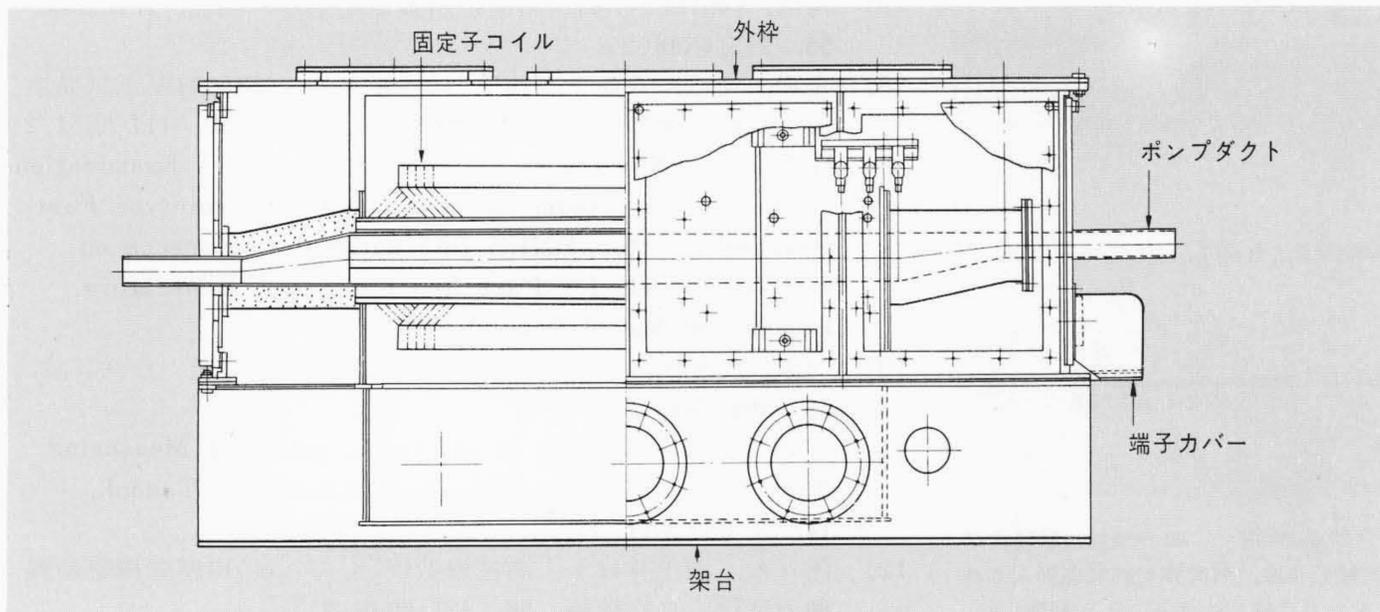


図8 電磁ポンプ構造図 形式はフラットリニアインダクション形で、一次補助ナトリウム系汲上げ用は定格流量50t/h、定格揚程39mNa、運転温度529°C、接続配管径4Bの仕様をもち、窒素ガスにより強制冷却される。

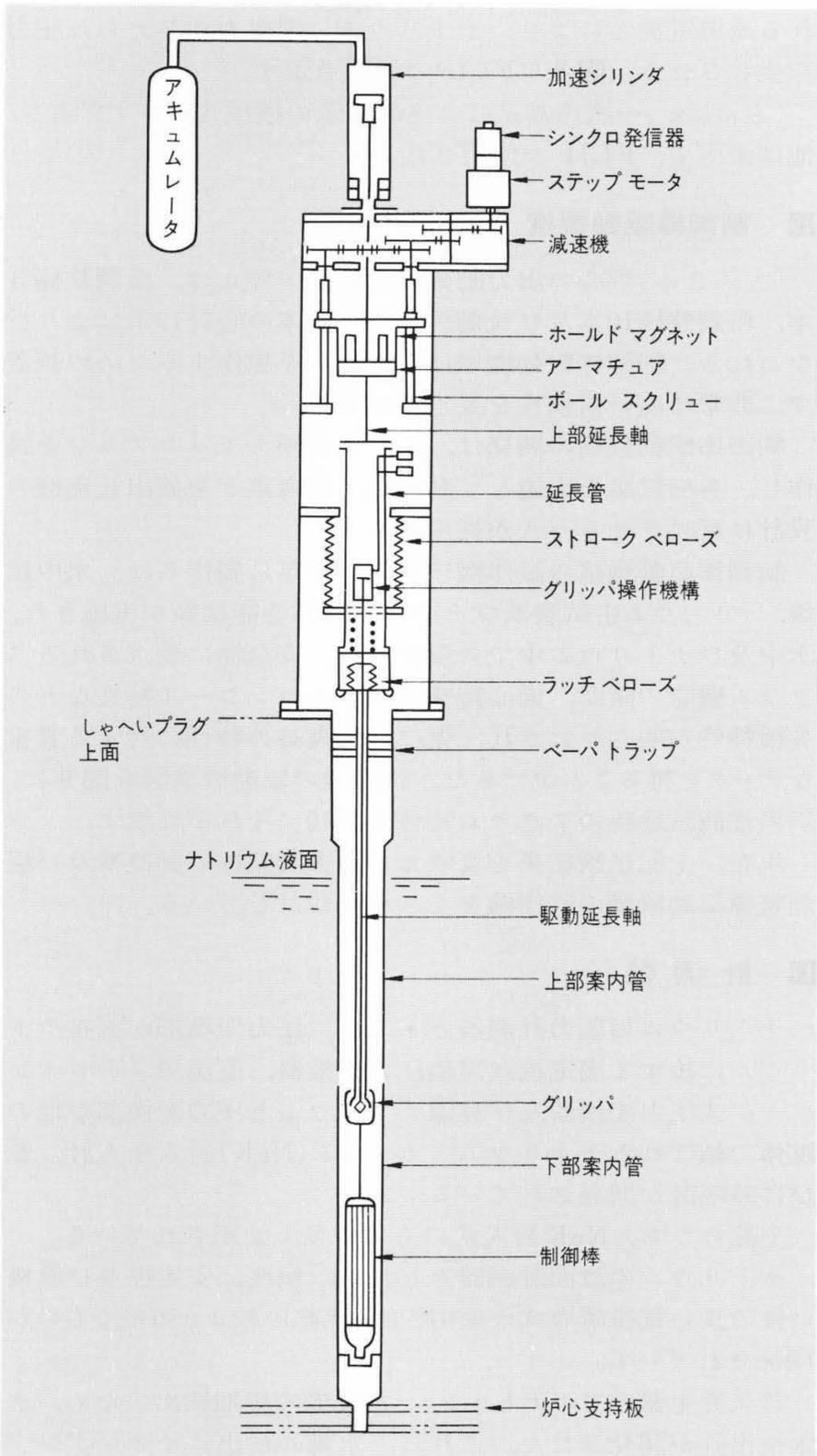


図9 制御棒駆動機構試作機機構図 ステップモータを使用して連続可変速とし、その回転はボールスクリューにより上下動に変換される。スクラムの際にはマグネット消勢後、ガス加速により駆動部と制御棒が一体で落下する。

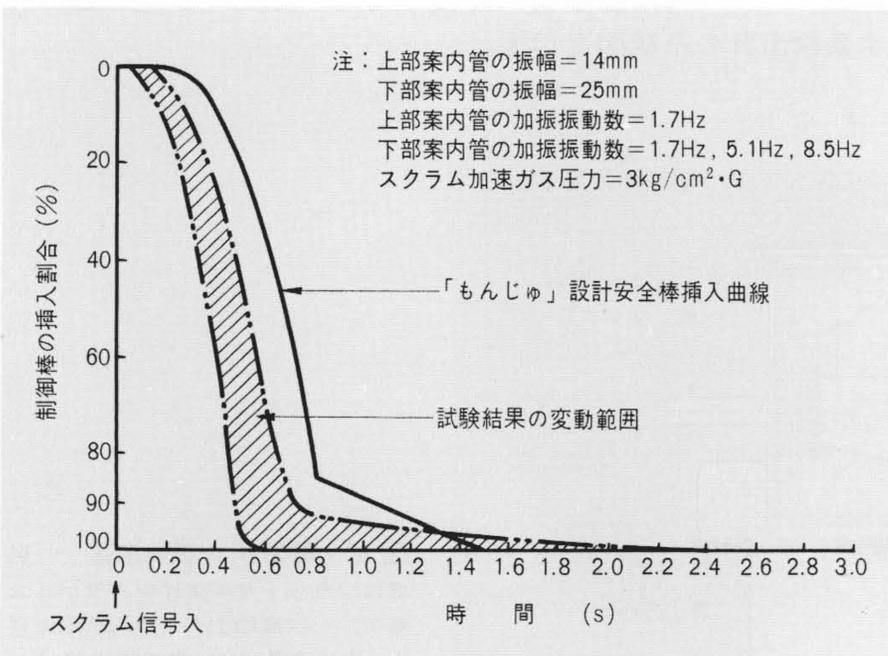


図10 制御棒駆動機構試作機のスクラム特性 限界性能試験時のスクラム特性を示す。振動下でのスクラム試験の結果、制御棒が約90%挿入された状態から100%挿入までの所要時間に、かなりの幅が生ずることが判明した。

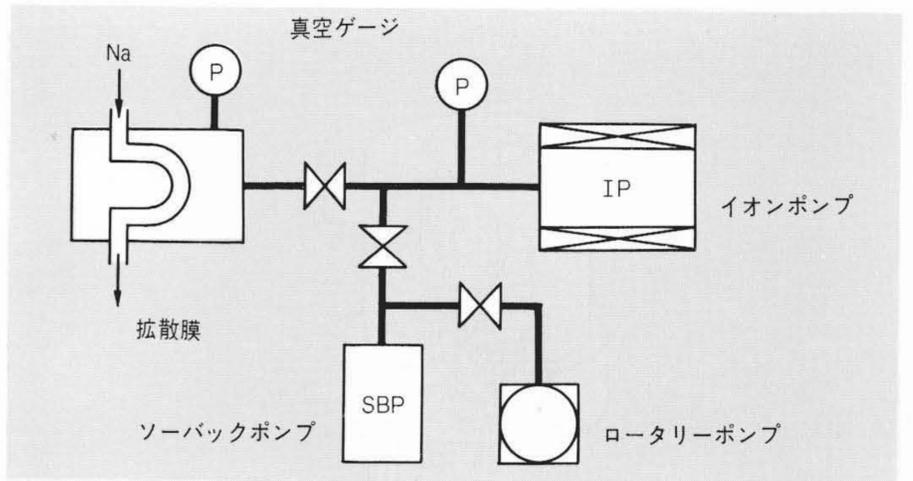


図11 水素検出計系統図 ナトリウム中の水素が、拡散膜を浸透するのをイオンポンプで検出するものである。

12 結 言

「もんじゅ」設計研究で日立製作所が担当した系統設備のうち主要なナトリウム機器の、日立製作所での開発状況について述べた。

「もんじゅ」計画は、今後安全審査を経て、プラント建設のための具体的な製作設計段階に移行する予定である。日立製作所は、今後も積極的に同計画に参画し、高品質及び高信頼度をもつ「もんじゅ」用機器の開発によりいっそうの努力を傾ける考えである。

終わりに、「もんじゅ」設計研究及び関連する研究・開発試験に当たり、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) 野本, 青木ほか: 高速実験炉「常陽」原子炉容器および一次冷却系の建設, 日立評論, 59, 1001(昭52-12)
- 2) 野本, 八巻ほか: 高速実験炉「常陽」一次冷却系の総合機能試験, 日立評論, 59, 1007(昭52-12)
- 3) 日本機械学会: 伝熱工学資料(改訂第3版)(昭50-2)
- 4) 間瀬, 河原ほか: 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(昭52-9)
- 5) M.Naitoh, A.Nakamura et al.: Dryout in Helically Coiled Tube of Sodium Heated Steam Generator, ASME 74-WA/HT-48, New York, Nov. 17~22(1974)
- 6) M.Sumikawa, E.Shibato et al.: Mechanical Behaviors of Stainless Steel Elbows at Elevated Temperatures, IAEA Specialists' Meeting on "Properties of Primary Circuit Structural Materials Including Environmental Effects" Bensberg, Oct. 17~21(1977)
- 7) 河原, 杉山ほか: 高速増殖炉用蒸気発生器の開発, 日立評論, 55, 213(昭48-3)
- 8) 金森, 河原, 八巻: 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(昭51-2)
- 9) H.Tsuda, M.Kawara et al.: Post-Performance Examination of the 50 MW Steam Generator for the Prototype Fast Breeder Reactor, BNES International Conference on Ferritic Steels for Fast Reactor Steam Generators, London, 30 May-2 June (1977)
- 10) 河原, 八巻ほか: 高速増殖炉用蒸気発生器の開発, 日立評論, 56, 907(昭49-9)
- 11) H.Yamamoto, S.Izumi et al.: Investigation of Measuring Accuracy of Plugging Indicators, J.Nucl. Sci. Technol., 14, 10, 689(Oct. 1977)
- 12) 佐々木, 城土井ほか: 高速原型炉「もんじゅ」用制御棒駆動機構の試作, 日立評論, 56, 421(昭49-5)