特集 高速増殖炉もんじゅ発電所用機器

U.D.C. 621.039.526.034.6:621.039.534.625:621.181.22

高速増殖炉もんじゅ発電所 蒸気発生器(過熱器)の設計・製作

Design and Fabrication of Steam Generators (Superheaters) for the Prototype Fast Breeder Reactor "MONJU"

液体金属冷却型高速増殖炉の中で,蒸気発生器は重要な機器の一つとされ, 世界各国ともその開発に重点を置いている。わが国でも,動力炉・核燃料開発 事業団を中心として,蒸気発生器についての伝熱・流動,材料・強度に関する 基礎的なものから,50 MW蒸気発生器をはじめとする大型モックアップの製作, 運転,各種試験に至る広範な研究・開発を実施してきた。さらに,製造・検査 については,管-管板溶接法の改善,微小焦点X線検査装置などの採用による改 善を図った。また,保守技術としての伝熱管超音波探傷プローブの開発も行っ た。高速増殖炉もんじゅ発電所蒸気発生器(過熱器)は,伝熱管材料としてSUS 321鋼を用いたヘリカルコイル シェル アンド チューブ型熱交換器である。こ れらの研究・開発成果を踏まえ,この過熱器の設計,製作を完了し,高速増殖 炉もんじゅ発電所原子炉補助建物への据付けを終了した。

山崖佳昭*	Yoshiaki Yamagishi
河島弘明**	Hiroaki Kawashima
三浦康公***	Yasuhiro Miura
祐川正之****	Masayuki Sukegawa
木村征二*****	Seiji Kimura

1 緒 言

蒸気発生器は,高温のナトリウムと水や蒸気との熱交換器 であるため,従来の火力発電所用ボイラおよび軽水炉用蒸気 発生器とは異なるもので,液体金属冷却型高速増殖炉開発の 一つの鍵(かぎ)とまで言われていた。このため,動力炉・核 燃料開発事業団を中心として,高速増殖炉もんじゅ発電所(以 下,「もんじゅ」と略す。)蒸気発生器の開発が,伝熱・流動, 材料・構造強度,安全,計装,製作,試験・検査,運転およ び保守・補修の全般にわたって実施されてきた。

日立製作所は、これらの開発の一環として社内試験用の0.5 MW蒸気発生器をはじめ、動力炉・核燃料開発事業団向けの 1 MW蒸気発生器¹⁾,50 MW蒸気発生器(1号機)²⁾の開発を行った。また、大型管束部に対する伝熱・流動解析技術の確立、 伝熱管材料の強度や耐食性の確認、管束を持つ多重円筒構造 の耐震解析技術の確立、管板構造高温強度解析技術の確立、 保守・補修技術の開発などを進めてきた。以下に、研究・開 発の経緯、「もんじゅ」過熱器の設計、製作および伝熱管超音 波探傷プローブについて、これらの概要を述べる。

2 蒸気発生器(過熱器)の設計概要

2.1 構造説明

過熱器は、図1に示すようにヘリカルコイル シェル アン ド チューブ型熱交換器であり、加熱媒体のナトリウムは胴側、 被加熱媒体の蒸気は管側を流れる構造となっている。設計主 要目を表1に示す。

加熱媒体である高温ナトリウムは、ナトリウム入口ノズル からリング状のナトリウム分配母管に入り、ここで6本の分 配管に分配され胴体内の胴側に導かれる。さらに、伝熱管管 束部を下降しながら蒸気側と熱交換し、胴体下部のナトリウ ム出口ノズルから流出する。胴側は、ナトリウム自由液面を 持ち、その上部空間は不活性のアルゴンガスで覆われ、この ガスの圧力制御によって液位が一定に保たれる。

一方,被加熱媒体である蒸気は,蒸気入口ノズル,同分配 母管,分配管を経由して蒸気入口水室で147本の伝熱管に分配 され,いったん下降管内を下降したのち最下部で方向を変え, ヘリカルコイル形伝熱管内を上昇しながら加熱媒体である高 温ナトリウムと熱交換し,高温高圧の過熱蒸気となり蒸気出 ロノズルから主蒸気配管へと流出する。

本過熱器の構造上の特徴は次に述べるとおりである。

(1) ヘリカルコイル形とすることにより小型化を図り、管-管

31

* 動力炉・核燃料開発事業団 動力炉建設運転本部 ** 日立製作所 日立工場 工学博士 *** バブコック日立株式会社 呉工場 **** 日立製作所 日立研究所 ***** バブコック日立株式会社 呉研究所



表 | 過熱器の設計主要目 過熱器は、中間熱交換器からの高温ナ トリウムにより蒸発器から供給される蒸気を約490 ℃・132 kg/cm²Gの蒸 気に加熱する。

	項目	仕様				
型	式	ヘリカルコイル貫流式分離型				
容	量	約50 MW				
伝	熱 面 積	約420 m ²				
ナト	リウム流量	約3.7×10 ⁶ kg/h				
蒸	気 流 量	約3.8×10 ⁵ kg/h				
運転温度	ナトリウム入口・出口	約505・470 ℃				
(定格運転時)	蒸 気入口・出口	約370・490 ℃				
蒸気	出口圧力	約132 kg/cm ² G				
伝熱管寸法	外 径・肉 厚	約31.8・3.5 mm				
伝 熱	管 本 数	147本				
主要寸法	胴 径・全 高	約3.2・I2 m				
主要材質	胴板・伝熱管	オーステナイト系ステンレス鋼 (SUS304・SUS321)				
基	数	3				

(b) ヘリカル部:森,中山の式(気相)4)

 \mathbb{X} | 過熱器の構造 過熱器はヘリカルコイル状に成形された多層伝 熱管管束部を持ち、ナトリウムは胴側を、蒸気は管側をそれぞれ流れる。

板溶接個所数の削減、管板板厚および熱応力の低減を行って いる。

伝熱管管束部を上部胴板から支持することで、必要な場 (2)合の管束引抜きおよび点検・補修を可能としている。

自由液面型とし,蒸気の入口・出口両管板をカバーガス (3)中に設置することで、これらの部分の熱衝撃の緩和を図って いる。また、万一、伝熱管破損によってナトリウムー水反応 事故が生じた場合にも,発生圧力の緩和に効果がある。

(4) 蒸気入口をリング状の母管,また蒸気出口を管板方式と することで, 伝熱管配列を対称とし, 全伝熱管長さを均等と している。

(5) 伝熱管と管板の溶接には、内面突合せ溶接法を採用し、 かつ溶接部に放射線透過試験を実施することによって, 溶接 部の信頼性を確保している。

(6) 6本の分配管を用い、ナトリウムを伝熱管管束部に導入 することで,周方向の偏流を防止している。

(2) ナトリウム側: Hoeの式⁵⁾

を用いた。

伝熱・流動計算は、日立製作所が開発した解析コード SGDESNによって行った。なお、本コードは、伝熱・流動に 関する従来の理論式および実験式に対して、動力炉・核燃料 開発事業団で行われた1MWおよび50 MW蒸気発生器の試験 結果や、日立製作所での伝熱・流動に関する研究など^{6),7)}によ って補正、改良されたものである。

また,管束部の空間特性分布についても,併せて解析評価 を行った。

一方, プラント過渡運転時の熱過渡条件は, 日立製作所で 開発し、50 MW蒸気発生器の試験データで検証された動特性 解析コードSGDPによる解析結果を用いて定め、構造解析に反 映した。

さらに, 胴側ナトリウムの流動状態についても, 日立製作 所が開発した伝熱・流動解析コードTHERVIS-Ⅲによって解 析・評価し構造の妥当性を確認した。

2.3 構造強度

過熱器材料には、高温ナトリウムとの共存性に優れたオー ステナイト系ステンレス鋼を採用しており、胴板材料にはSUS 304鋼, 伝熱管および蒸気出入口管板にはSUS321鋼をそれぞ れ採用している。SUS321鋼は、ステンレス鋼の中でも耐食性

2.2 伝熱・流動設計	に優れ,5
伝熱計算での蒸気側およびナトリウム側の熱伝達率につい	連研究・開
ては、	過熱器0
(1) 蒸気側	に準じた解
(a) 直 管 部: Dittus-Boelterの式 ³⁾	の解析評価

0 MW蒸気発生器(2 号機過熱器)での実績および関 開発の成果を踏まえて採用されたものである。 の強度設計に当たっては、高温構造設計指針の規定 **〆析評価を実施し、構造健全性を確認している。こ** 西では、プラント運用上想定される熱過渡条件はも

32

高速増殖炉もんじゅ発電所 蒸気発生器(過熱器)の設計・製作 1023

とより,過熱器内での万々一の大規模な伝熱管破損による水 漏えい事故に対しても構造上健全であることを確認している。

また,過熱器の耐震設計に関しては,後述する耐震試験の 成果を踏まえ,過熱器全体を多質点系バネーマスモデルでモデ ル化した耐震解析を実施し,各部の構造健全性を確認してい る。

3 蒸気発生器(過熱器)の研究・開発

3.1 技術課題と研究・開発の経緯

蒸気発生器は、冷却系設備の中でも高い信頼性が要求され る機器の一つであり、日立製作所は昭和30年代から種々の研 究・開発を進め、また動力炉・核燃料開発事業団が行う研究・ 開発に参画してきた。昭和49年には、ヘリカルコイル形とし ては当時世界最大規模の50 MW蒸気発生器(1号機;過熱 器,蒸発器各1基から成る)を製作し、動力炉・核燃料開発事 業団へ納入した。さらに大型管束部の伝熱・流動解析技術の 確立、伝熱管・管板材料の高温特性・耐食性・溶接性の確認、 管束を持つ多重円筒構造の耐震解析技術の確立、管板構造の 高温構造強度解析技術の確立、管-管板溶接部の溶接・検査技 術の確立、伝熱管の管内からの超音波探傷技術を中心とした 保守・補修技術の開発、伝熱管漏えいにかかわる安全研究な ど、広い分野にわたって研究・開発を実施してきた。 与してきた主な研究・開発項目および工程を図2に示す。以下に、その主な成果を紹介する。

3.2 伝熱·流動特性

3.2.1 蒸気発生器の特性試験

蒸気発生器の伝熱・流動特性を正確に評価するためには, 伝熱管形状,加熱媒体および温度・流量・圧力などの試験条 件を適切に模擬した試験データが必要となる。これらの試験 データを得るため,まず基礎試験として昭和45年から電気加 熱へリカルコイル管内熱伝達試験装置によって詳細伝熱デー タを取得した。その後,0.5 MWナトリウム加熱蒸気発生器に よる試験を行い,電気加熱による伝熱試験結果のナトリウム 加熱蒸気発生器への適用性を評価するとともに,静特性およ び動特性に関する数多くのデータを取得した。

これらの試験データに基づく設計評価技術を開発した後, 日立製作所は1MWおよび50MW蒸気発生器(1号機)を製 作し,動力炉・核燃料開発事業団に納入した。動力炉・核燃 料開発事業団大洗工学センターで昭和46年から1MW蒸気発 生器(過熱器・蒸発器一体型)の試験が開始され,静特性試験, 動特性試験,流動安定性試験などが行われた。また,50MW 蒸気発生器(1号機)は昭和49年から試験が開始され,大型蒸 気発生器としての静特性試験,動特性試験,流動安定性試験, 制御性試験などが行われた。これらの蒸気発生器を含む研究・開 発段階および「もんじゅ」蒸気発生器の主要目を**表2**に示す。

33

日立製作所が蒸気発生器に関して進めてきた、あるいは関

項目	昭和31- 443	~ ₹ 45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63
「もんじ	L Ø		基本記	」 殳計		調	整設	上 計		1	Ⅰ 製作 ោ	↓ ■備設	(〔 [」 道	L È	1	L 設	
主要工	程												設置許	可手続き			設計	・ 工事 I	認可手約	き
安全		ナトリウ	L ム-水反 解	 応基礎詞 	↓ 式験・ ド開発			大・中 (E	 ・小水 本機柄 	 リーク解 【学会)	¥析	水漏え ナトリワ	 い検出装 	 置試作 	ц ф					
伝熱流重	や、 ナトリウム 基礎技術 開発	/伝熱流動基 解析コード	礎試験 ⁰ 11 開発	5MW SG MW SG 試験	┃ 動特性解析 コード開発 ┃	(1号機 50MW SG試験)		空間 特性 コード	不言	 安定解析 −ド開発									
材 *	ナトリウム: 腐食基礎試 	中 使 0.5MW SG		1M 材料	↓ W SG解体 ∤試験		2	1 Cr-11	I Mo伝熱	管ナトリ クリ-	 ウム中 プ試験 		SU SU	L S321伝熱 」 効果試問	熱管ナト クリ	L リウム中 ープ試験				
強	Ξ	製作 1MN	V SG 製作	50N (1号	1W SG 号機)製作			材料試験 非弾性構	 	┃	↓ 試験(耐震) 分, →全体	ムボ? 首 祭 「 「 「 「		, x) / + + 1	云熱管:	プラグ部	」 「腐食試	験		
保乐	F §					伝熱	管UTプ	ローブ語	式作試験	¢		[]	高速探傷	BUTプロ	ーブの	開発			JTプロ・ JTプロ・ 実用イ	- ブの 化試作

注:略語説明 UT (超音波探傷試験), SG (蒸気発生器)

図2 蒸気発生器の主要研究開発 蒸気発生器については、安全、伝熱・流動、材料・強度、製作、保守・補修など、広い分野にわたって研究・ 開発を実施してきた。

表2 研究・開発段階および「もんじゅ」蒸気発生器主要目 蒸気発生器の開発は段階的に進められ,日立製作所は0.5 MW SG, I MW SG, 50 MW SG(I号機)を担当し,これらの経験を踏まえ「もんじゅ」SHを設計・製作した。

百日		甾伝	0 ENAW SC		50 MW S	G(丨号機)	50 MW S	G(2号機)	「もんじゅ」		
	п	中区	0.5 10100 30	TIVIW SG	EV	SH	EV	SH	EV	SH	
熱交換	容量	MW	0.5	1.2	40.1	9.9	40.2	9.8	約190	約50	
型	式		ヘリカル	ヘリカル	ヘリカル	ヘリカル	ヘリカル	ヘリカル	ヘリカル	ヘリカル	
伝 熱	面積	m ²	12.4	6.85	189	100	237	76	約900	約420	
伝 熱 管	本 数	本	I	2	75	60	33	33	140	147	
伝執筒士法 外径	mm	25.4	25.4	25.4	25.4	31.8	31.8	約31.8	約31.8		
	因烈官引公肉厚		4.5	4.2, 5.0	3.2	3.2	3.8	3.5	約3.8	約3.5	
ナトリウム	入口	°C	540	540	470	505	476	515	約470	約505	
側温度	出口	U	350	350	328	470	320	476	約325	約470	
ナトリウム	側流量	kg/h	$7.5 imes 10^{3}$	$1.79 imes10^4$	$7.95 imes 10^{5}$	$7.95 imes 10^{5}$	$7.23 imes 10^{5}$	$7.23 imes10^{5}$	約3.7×10 ⁶	約3.7 $ imes$ IO 6	
茎与冬州	圧力	kg/cm ² G	173	173	143	132	138	132	約146	約132	
杰 xt 未 干	温度	Ĵ	515	513	367	487	366	487	約370	約490	
給水	流量	kg/h	$7.9 imes 10^{2}$	1.89×10^{3}	8.0×10 ⁴	8.0×10 ⁴	$8.0 imes 10^{4}$	8.0×10 ⁴	約3.8×10 ⁵	約3.8×10 ⁵	

注:略語説明 EV(蒸発器) SH(過熱器)

3.2.2 解析コードの概要

「もんじゅ」蒸気発生器の伝熱・流動設計に当たっては,前 述した各種試験によって検証された以下の解析コードを適用 用するSUS321鋼が特有な材料である。実機伝熱管および管板 材料の製造に際しては、この材料強度基準を満足する材料の 製造方法の確立のために、事前に材料メーカーとの共同研究 による試作を実施した。

した。

(1) 静特性解析コード

本解析コードは,蒸気発生器周りの定格時ヒートバランス 条件に基づく必要伝熱面積および管束部構造仕様の計算なら びに部分負荷時の特性を評価するものである。

(2) 空間特性解析コード

本解析コードは、ヘリカルコイル形伝熱管管束部での半径 方向の各コイル層の温度および流量分布を計算し、管束部の 空間特性を評価するものである。

(3) 流動安定性解析コード

本解析コードは、1 MW蒸気発生器で経験した水側流動 不安定性の評価のために開発したもので、蒸気発生器の構 造および運転条件に対応した流動安定性の評価を行うもので ある。

(4) 蒸気発生器内部動特性解析コード

本解析コードは,蒸気発生器内各部の熱過渡条件を求める もので,蒸気発生器ノズル部での流体(ナトリウムおよび水・ 蒸気)温度,流量,圧力変化を入力条件として,各部の流体状 態量の変化を評価するものである。

3.3 材料·構造強度特性

3.3.1 材料開発

34

「もんじゅ」用主要機器の材料開発は、動力炉・核燃料開発

この試作では、SUS321鋼が、チタン添加のオーステナイト 系ステンレス鋼であることから、強度・延性および耐食性に 重点を置いた開発を行い、Ti/C量、熱処理などの主要パラメ ータについて、実機材料としての製造要領を確立した。

試作した32mの長尺伝熱管および鍛造材については引張特 性のほか,清浄度,デルタフェライト量,クリープ特性,疲 労特性,実機相当環境条件下での耐食性や溶接性などについ ても,過熱器に適した材料であることを確認した後,実機材 料の製造に着手した。

3.3.2 構造強度確性試験

(1) 耐震解析技術

蒸気発生器振動試験の概要を図3に示す。過熱器はナトリ ウム中にヘリカルコイル形伝熱管管束部と多重円筒構造を持 つ複雑な熱交換器であるため、振動試験により耐震解析手法 を検証するとともに、管束部の耐震性を確認した。試験体と して¹/₂縮尺全体モデルおよび実規模の部分モデル(上部連絡 管,下部連絡管)を製作し、20トン振動台を用いて試験を行っ た。試験結果の概要は次のとおりである。

(a) ¹/₂ 縮尺全体モデル試験では,管束部のモデル化手法お よびナトリウム中の多重円筒の解析手法ならびに機器に対 して1.0%の減衰定数を用いることの妥当性を検証した。

事業団主催の構造材料委員会を中心として行われ、日立製作	(b) 実規模の部分モデルでは、伝熱管サポート部をピン支
所もその一員として参加し、各種材料試験および特性評価を	持として解析すること、および伝熱管に対して0.5%の減衰
実施した。その結果を中心とするデータベースに基づき、「も	定数を用いることの妥当性を検証した。
んじゅ」機器設計用材料強度基準が策定された。過熱器とし	(2) 管板解析評価技術
ては、ナトリウムと蒸気の境界部をなす伝熱管と管板部に使	管板は、多孔部(リガメント部)と中実部(リム部)の温度追

高速増殖炉もんじゅ発電所 蒸気発生器(過熱器)の設計・製作 1025





図3 蒸気発生器振動試験の概要 蒸気発生器全体構造量縮尺モデルならびに伝熱管上部および下部連絡管実規模モデルを用いた振動試験を実 施し、その成果を設計に反映した。



h (面間距離), p(ピッチ)

図4 管板熱過渡試験装置 実規模のSUS321鋼製管板を用い,熱 過渡を負荷した場合の温度およびひずみ挙動を確認し、構造解析手法に 反映した。

図 5 管板の非弾性解析 荷重条件およびモデル寸法の組み合わせ を変えた非弾性解析を行い、管板穴まわりのひずみ挙動を評価した。

35

従性の相違によって,比較的大きな熱応力が発生する部位で ある。また,他のナトリウム機器と比較して蒸気側の内圧に よる応力が大きく,かつリガメント部が複雑な構造を持って いるため,温度および応力解析手法ならびに孔周りのひずみ 評価法について以下に述べる評価・確認を行った。

リガメント部・リム部の温度および応力解析手法について は、図4に示す管板熱過渡試験ループを用い、試験体として は、実規模のSUS321鋼で製作した管板を用いた試験によりそ の妥当性を確認した。

一方, 孔周りのひずみ評価法については, 図5に示す8ケ ースの非弾性解析を実施し, 高温構造設計指針に基づくひず み評価によって, ひずみを保守的に評価できることを確認し た。

4 蒸気発生器(過熱器)の製作

4.1 製作・検査技術の特徴

「もんじゅ」過熱器の設計・製作は,50 MW蒸気発生器(1 号機)の開発成果を基本としているが,容量の増大,SUS321 鋼の採用,および信頼性を高めることを主目的に種々の改善 を図った。主要な改善点は次のとおりである。 (1) 溝付きロールを用いたへリカルコイルベンダの採用 (2) バックアップリングを用いた管-管板溶接法の採用 (3) 管-管板溶接部検査への微小焦点X線検査装置の採用 (4) 32 m長尺伝熱管の採用による管-管溶接個所数の削減 (5) 胴体溶接部へのホット ワイヤ スイッチング ティグ溶接 の採用

これらのうち,特に過熱器製作上の重要技術である管-管板 溶接および検査技術について次節で紹介する。









図6 管-管板内面ティグ溶接 伝熱管と管板との溶接には、内面 からの突合せ溶接法を採用し、バックアップリングにより溶着金属成分 を調整している。

36

図7 管-管板溶接部用微小焦点X線検査装置 管-管板溶接部検 査に微小欠陥の検出が可能な微小焦点X線検査装置を用いることによっ て,高い品質を確保している。

4.2 管-管板溶接技術

管-管板溶接部は、隣接管との間隙(げき)が約13 mmと狭く 溶接は伝熱管内面から突合せティグ溶接を行うとともに、伝 熱管内面にX線検査装置を挿入し、放射線透過試験を行った。 これらにより、きわめて高品質の溶接継手を製作した。 (1) 管-管板内面ティグ溶接法

管-管板溶接法の概要を図6に示すが、管板に溶接トーチを 差し込み、トーチを回転させながら1パスで溶接を行うもの で、管外面にはバックアップリングを使用している。これは、 適切な溶接部肉厚の確保および溶接継手の特性を向上させる ための溶着金属の成分調整を目的としたものである。本溶接 法により良好な溶接継手が得られた。

(2) 微小焦点X線検査装置

微小焦点X線検査装置を図7に示す。本装置は、電子銃から 放出された熱電子がターゲットに衝突する際に,パノラマ状 に発生するX線を用いるものである。このX線の発生条件によ って欠陥識別度が大きく変わるため、X線発生部のターゲット 形状、材質などについても種々の検討を行った。この結果欠 陥識別度が大きく改善された。



図9 超音波探傷プローブ外観 軸方向,周方向および減肉欠陥用 のおのおの32チャネルのマルチアレイ型ユニットを一体化した複合プロー ブは、最大長さ84mの伝熱管内に挿入可能である。

伝熱管超音波探傷プローブ⁸⁾ 5

以上述べた技術を確立した後,実機蒸気出口管板と同材質 の実規模モックアップにより管-管板溶接および同溶接部の検 査を行い,これら技術の最終確認をしたうえで,実機製作を 行った。

これらの技術によって組み立てられた過熱器伝熱管管束部 の外観を図8に示す。

ナトリウムと水・蒸気の境界を構成する伝熱管の健全性を 確認するために開発した伝熱管内挿型超音波探傷プローブに ついて以下に紹介する。

超音波探傷プローブは,図9に示すように軸方向,周方向 および減肉欠陥用の3種類の送受波子ユニットを一体化した 複合式であり,1回の挿入で各欠陥の同時探傷が可能である。

37



図8 過熱器ヘリカルコイル形伝熱管管束部 管束部は、半径方向に14層のコイル層を持つ147本の伝熱管群から成り、各コイル層はそれぞれ独 立に熱膨脹が可能な構造となっている。

表3 伝熱管超音波探傷プローブの主な仕様 探傷速度約4 m/min で伝熱管の全周の探傷が可能であり、プローブ単体で肉厚の約5%の軸 方向および周方向ノッチ状欠陥ならびに減肉欠陥が検出できる。

項目		仕 様						
プローブ型式	電子走查式·	マルチアレイ型	複合プローブ					
対象 欠 陥	軸方向欠陥	周方向欠陥	減肉欠陥					
チャネル数	32	32	32					
探傷周波数(MHz)	5	5	10~15					
探傷速度(m/min)		約 4						
伝 熱 管 材 質	クロムモ	リブデン鋼, スラ	テンレス鋼					
	管外径:約31.8, 肉厚:約3.5							
伝熱管寸法(mm)	管長:最大約84,000, ベンド部:半径約160, ヘリカルコイル径:約1,200~約2,700							
2	軸方向ノッチ状欠陥約5%肉厚							
検出性能	周方向ノッチ状欠陥約5%肉厚							
(プローブ単体)	減	肉欠陥約5%肉	习厚					
	ピンホール欠陥 約ø0.5 mm							

各送受波子ユニットは、伝熱管全周に対し32対の送受波子 を配置したマルチアレイ型ユニットであり、送受波子を順次 駆動し、最大1万5,000 r/minで超音波ビームを電子的に回転 しながら、約4 m/minの速度で伝熱管の全周探傷が可能であ る。 微小焦点X線検査装置などの採用による改善を図った。また, 保守技術としての伝熱管超音波探傷プローブの開発も行った。 これらの成果を踏まえ,「もんじゅ」過熱器の設計,製作を行 い,平成元年7月から8月にかけて全3基の工場製作を完了 し,「もんじゅ」原子炉補助建物への据付けを終了した。 本過熱器の完成は,約30年の長きにわたる「もんじゅ」蒸 気発生器開発の成果によるものである。今後は平成4年以降 のプラント性能試験に始まる蒸気発生器の運転を成功裏に導 くよう,プラントの据付け,その後の機能・性能試験へより いっそうの努力を重ねていきたい。

参考文献

- 1) 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)
- 金森,外:高速原型炉「もんじゅ」用50 MW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)
- 3) W. H. McAdams : Heat Transmission, 3rd ed. McGraw-

本プローブは,表3に示すような伝熱管への挿入性能を持ち,欠陥検出性能として伝熱管肉厚の約5%の軸および周方向のノッチ状欠陥,ならびに減肉欠陥を検出できる。

6 結 言

「もんじゅ」蒸気発生器については、伝熱・流動、材料・構造強度に関する基礎的な研究から、動力炉・核燃料開発事業 団大洗工学センター向け50 MW蒸気発生器(1号機)などの大型モックアップの製作・試験に至る広範な研究・開発を行った。さらに、製造・検査については、管-管板溶接法の改善、 Hill Book Company, Inc., New York (1954)

- 4) 森,外:曲円管内強制対流熱伝達に関する研究,日本機械学会 論文集,31,1521~1532(昭40-10)
- 5) C. L. Richard, et al. Heat Transfer Rates to Cross-Flowing Mercury in a Staggered Tube Bank, Trans. A.
 S.M.E. 80, 646, (Apr. 1958)
- 6) S. Kawahara, et al.: Design of the Sodium-Heated Steam Generator for the FBR Nuclear Power Station, Proceeding of a Symposium on Progress in Sodium-Cooled Fast Reactor Engineering, IAEA-SM-130/3, 489, Monaco, (Mar. 1970)
- 7) M. Naitoh, et al. Dryout in Helically Coiled Tube of Sodium Heated Steam Generator, A.S.M.E. Winter Annual Meeting, 74-WA/HT-48, New York, Nov. 17~ 22(1974)
- 8) 阿部,外:高速増殖炉原型炉「もんじゅ」蒸気発生器伝熱管超 音波探傷システムの開発,日立評論,67,859~864(昭60-11)

