

高速原型炉「もんじゅ」用50MW蒸気発生器の設計，製作及び運転実績

Design, Fabrication and Operation Experience of the 50MW Steam Generator for the Prototype Fast Breeder Reactor "Monju"

液体金属冷却高速増殖炉の中で蒸気発生器は、最も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おいている。特に大形蒸気発生器においては、(1)設計、製作及び試験・検査、(2)伝熱・流動特性、(3)運転及び計装制御、(4)信頼性などに関する技術の確立を図る必要がある。

このために、動力炉・核燃料開発事業団は、昭和49年7月より試験施設として世界最大規模である50MW蒸気発生器を製作し、各種の運転試験を実施してきた。日立製作所は、本施設の中でその中心となる蒸気発生器本体及びその付属機器を納入したが、試験は極めて順調に行なわれ、静特性、動特性、プラント制御特性及び構造・材料に関する数多くの有効なデータが得られた。

これらの成果は、高速原型炉「もんじゅ」用蒸気発生器の設計、製作及び運転に大きく寄与するとともに、我が国の液体金属冷却高速増殖炉の開発に画期的な一步を印すものであり、本稿は、この蒸気発生器の設計、製作及び運転実績の概要につき述べる。

金森昭士* Akiji Kanamori

河原 愈** Masaru Kawara

八巻秀雄** Hideo Yamaki

1 緒 言

液体金属冷却高速増殖炉(Liquid Metal Fast Breeder Reactor: 以下、LMFBRと略す)の開発は、国家プロジェクトとして動力炉・核燃料開発事業団(以下、動燃事業団と略す)により強力に推進されている。日立製作所もこれに積極的に参加し、各種の研究開発を進めている。

このLMFBRプラントの中でも蒸気発生器は、高温のナトリウムと水/蒸気との熱交換器であるため、従来の火力ボイラ及び軽水炉用蒸気発生器とは特質を異にしたもので、材料、構造、伝熱・流動、安全、計装、製作、試験・検査及び運転の全般にわたって解決しなければならない多くの問題点をもっている⁽¹⁾。このため、蒸気発生器は、LMFBRプラントの性能、安全及び信頼性に大きな影響を与えるもので、LMFBR開発の大きな一つのかぎとまで言われている。

50MW蒸気発生器は、動燃事業団により推進されている高速原型炉「もんじゅ」用蒸気発生器開発計画の中でも中心的なものであり、その最初のステップである1MW蒸気発生器⁽¹⁾(日立製作所が昭和46年に同事業団に納入したもの)に次ぐものである。50MW蒸気発生器試験施設は、世界最大規模のものであり、日立製作所は、本施設の中でその中心となる蒸気発生器本体及び付属機器を昭和49年6月に同事業団大洗工学センターに納入した。以下に本蒸気発生器の設計、製作及び運転・試験の結果の概要について述べる。

2 プラント概要

本蒸気発生器試験施設は、高速原型炉「もんじゅ」を模擬しているため、図1に示すように一次ナトリウム系、二次ナトリウム系及び水/蒸気系から成っている。

蒸気発生器は、各1基の蒸発器及び過熱器から成る分離貫流形であり、中間熱交換器を介して得られた高温ナトリウム

の熱を水/蒸気系に伝え、過熱器出口において高温高压(487℃/132kg/cm²・g)の蒸気を得るものである。

3 設 計

3.1 計画主要目

本蒸気発生器の計画主要目を表1に、代表例として蒸発器の概略構造を図2に示す。蒸発器及び過熱器は、各低合金耐熱鋼2¼Cr-1Mo鋼(伝熱管:STBA 24, 胴体:アメリカ材料試験協会(ASTM)規格SA 387 Gr. D)及びオーステナイト系ステンレス鋼(伝熱管, 胴体:SUS 304)から成っている。

蒸発器及び過熱器の出力配分は、蒸発器4に対し、過熱器1の割合であり、全負荷において過熱器入口の蒸気温度が、過熱度30℃以上となるように計画されている⁽²⁾。

3.2 伝熱・流動設計

伝熱計算における水/蒸気側及びナトリウム側の熱伝達率は、次の式により計算された。

(1) 水/蒸気側

- (a) 予熱、過熱領域: Dittus-Boelter⁽³⁾の式
- (b) $0 < \text{蒸気量} \leq 0.6$ の領域: Rohsenow⁽⁴⁾の式
- (c) $0.6 < \text{蒸気量} < 1.0$ の領域: Colburn⁽³⁾の式の½の値

(2) ナトリウム側: Hoe⁽⁵⁾の式

伝熱・流動計算は、日立製作所が開発した計算コードSG-DESIGNによって行なわれた。なお本コードは、伝熱・流動に関する従来の理論式及び実験式に対して、動燃事業団において行なわれた1MW蒸気発生器の試験結果及び日立製作所における種々の研究、試験結果^{(6)~(8)}により補正され、より適正な計算コードへと改良されたものである。

また、ナトリウムの熱伝導率が極めて高いため、火力ボイ

* 動力炉・核燃料開発事業団 主任研究員 ** 日立製作所日立工場

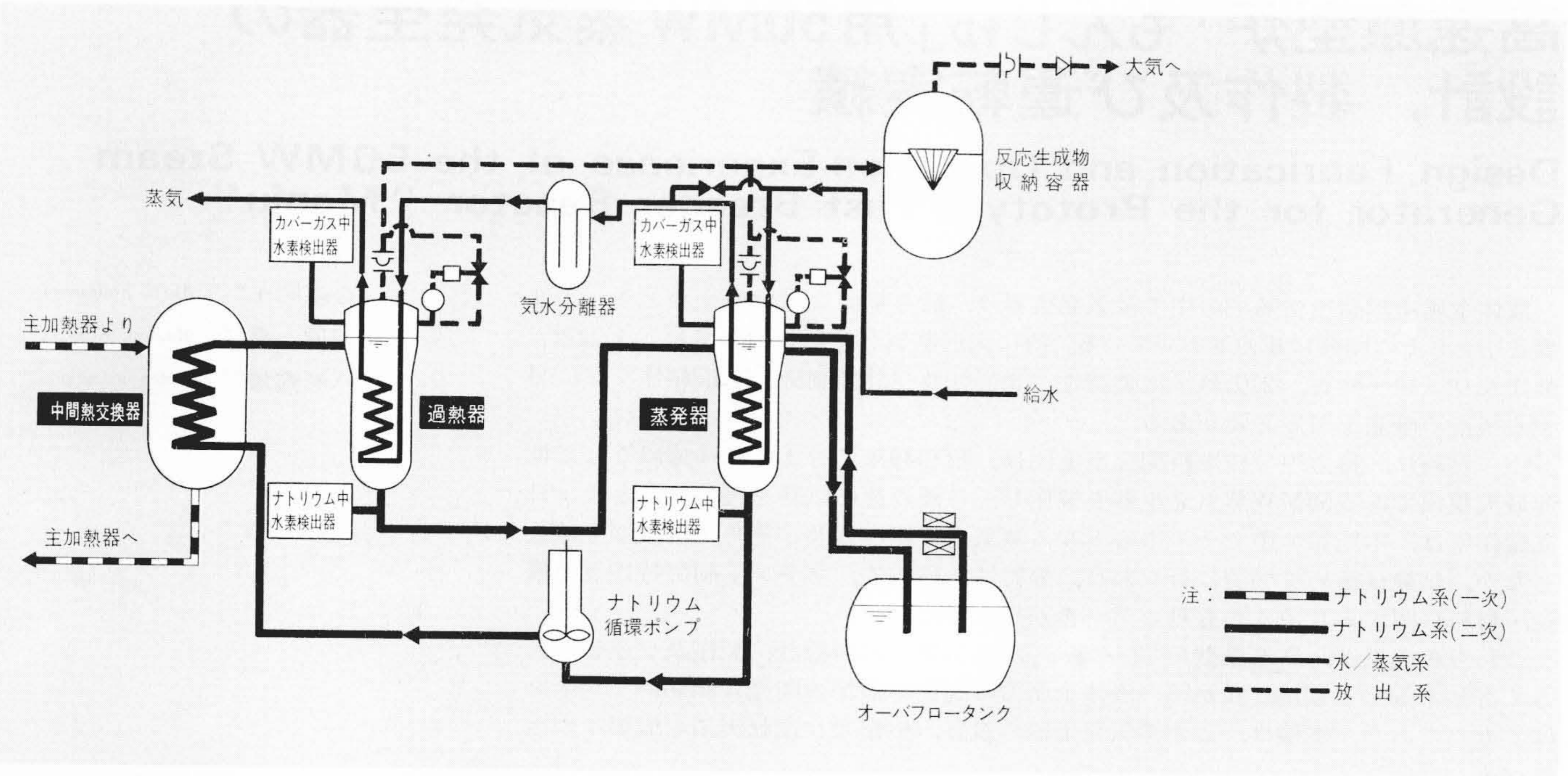


図1 50MW蒸気発生器試験施設主系統図 プラント構成は、高速原型炉「もんじゅ」と同一であり、一次ナトリウム系、二次ナトリウム系及び水/蒸気系から成っているため、蒸気発生器本体の性能試験及びプラント全体の制御性試験が可能な試験施設となっている。

表1 50MW蒸気発生器の仕様 蒸気発生器は、蒸発器、過熱器各1基ずつから成り、中間熱交換器からの高温ナトリウムとの熱交換により487℃/132kg/cm²・gの蒸気が得られる。

項 目	機 器 名 称	
	蒸 発 器	過 熱 器
形 式	貫流ヘリカル コイル形	
交 換 熱 量 (MW)	4 0	1 0
伝 熱 面 積 (m ²)	1 8 6	1 0 0
ナトリウム入口温度 (℃)	4 7 0	5 0 5
ナトリウム出口温度 (℃)	3 2 8	4 7 0
ナトリウム流量 (t/h)	7 9 5	
水/蒸気入口温度 (℃)	2 4 0	3 6 5
蒸気出口温度 (℃)	3 6 7	4 8 7
蒸気出口圧力 (kg/cm ² ・g)	1 4 3	1 3 2
水/蒸気流量 (t/h)	8 0	
伝 熱 管 本 数 (本)	7 5	6 0
伝熱管寸法(外径/肉厚) (mm/mm)	25.4/3.2(4.5)	25.4/3.2
主 要 材 料	2 ¼Cr-1Mo鋼	SUS304鋼

ラに比較して胴側の熱伝達率が大きく、従来あまり問題とされなかった水側の汚れ係数及び低合金鋼伝熱管(STBA24)の熱伝導率は、伝熱計算に大きな影響を与える。これらについても1MW蒸気発生器における試験結果が採用された。

伝熱・流動に関して行なわれた主な解析は次のとおりである。

- (1) 静特性解析：(a)伝熱・流動、(b)部分負荷特性
- (2) 動特性解析：(a)入口ナトリウム温度降下、(b)ナトリウム流量降下、(c)給水温度降下、(d)給水流量停止
- (3) 流動安定性解析

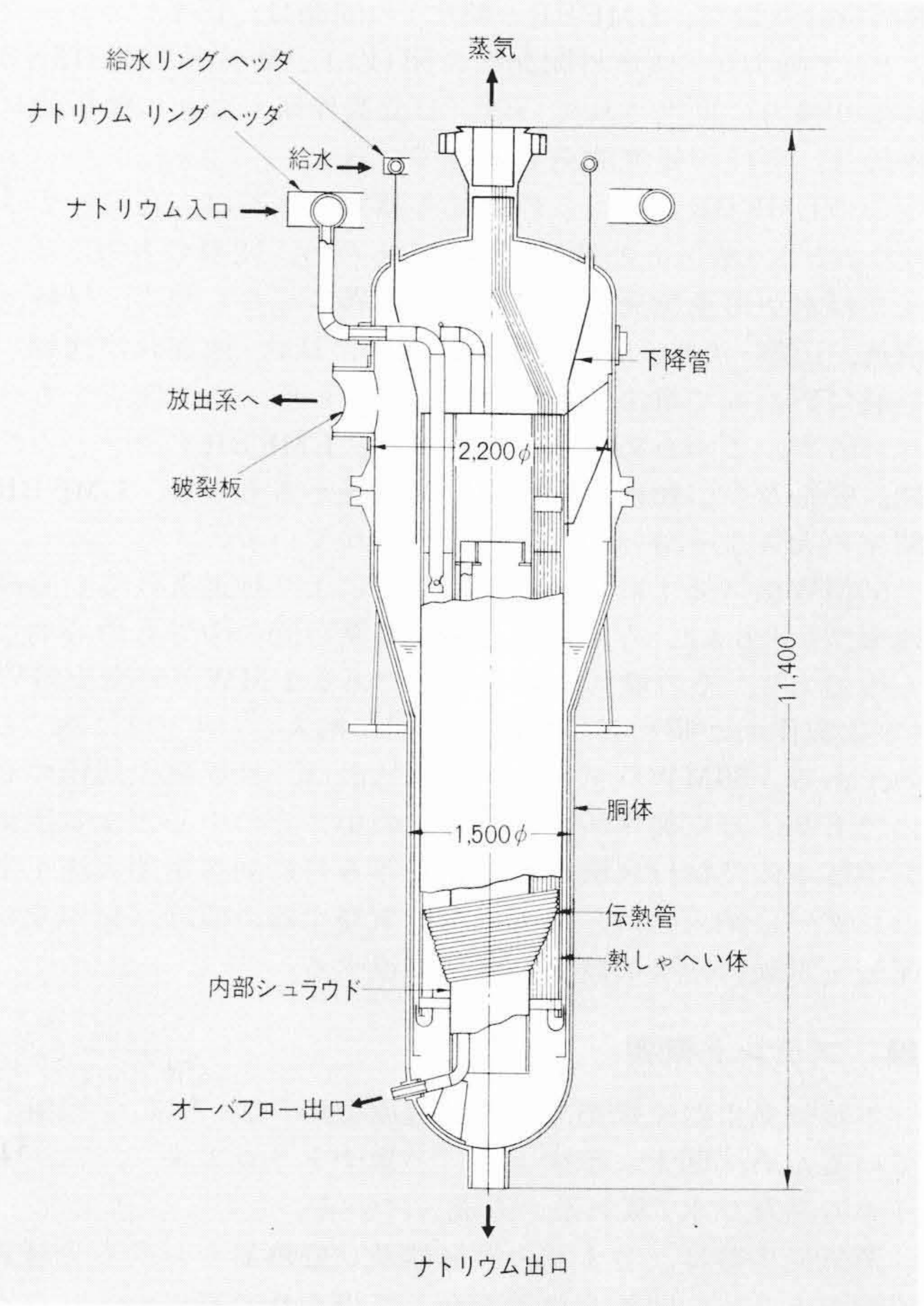


図2 50MW蒸気発生器(蒸発器)の構造 大形プラントにおいて有望とされているヘリカル コイル形であり、加熱媒体のナトリウムは胴側、被加熱媒体の水/蒸気は管側を流れる。蒸発器、過熱器はほぼ同じ構造であり、いずれも胴側において自由液面をもっている。

3.3 構造

蒸発器及び過熱器は、図2に示すように縦形シェルアンドチューブの熱交換器であり、加熱媒体のナトリウムは胴側、被加熱媒体の水/蒸気は管側を流れる構造となっている。過熱器の構造は、胴側の液面制御方式上図2に示すようなオーバフローノズルがないほかは、蒸発器の構造とほぼ同じであるので、ここでは蒸発器の構造について述べる。

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ヘッダに入り、ここで6本の分配管により等分に分配され、胴体内の胴側に導かれる。そして、伝熱管束部を流下しながら水/蒸気側と熱交換し、胴体下部のナトリウム出口ノズルより排出される。

一方、被加熱媒体である給水はリングヘッダから75本の伝熱管に分歧して、熱しゃへい体と胴体との間のナトリウム停滞領域に配置された下降管内を流下したのち、最下端部でUターンし、ヘリカルコイル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、高温高压の加熱蒸気となって蒸気出口管板で集合され、蒸気系へと排出される。

本蒸気発生器の構造上の主な特長を挙げると次のとおりである。

- (1) ヘリカルコイル形であるためコンパクトである。
- (2) 伝熱管群、内部シュラウド及び熱しゃへい体などはすべて上部胴体から支持されているので、必要により上部胴体と同時に引き抜き可能であり、点検・補修が容易である。
- (3) 自由液面形であり、給水入口管貫通部及び蒸気出口管板部がカバーガス中に設置されているので、これらの部分の熱衝撃が緩和され、ナトリウム-水反応事故のポテンシャルを小さくするとともに、事故発生時規模も小さい。
- (4) 給水入口をリングヘッダ、また蒸気出口を管板方式としているので、伝熱管配列が対称となり、伝熱管長さが均等である。
- (5) 伝熱管と管板との溶接には、内面突合せ溶接法を採用し、且つ、溶接部に対し放射線透過試験を実施しているので、溶接部の信頼性が高い。
- (6) ヘリカルコイル部と下降管部領域との間にアルゴンガス封入の熱しゃへい体を設けているので、下降管での収熱が小さく、ヘリカルコイル部の半径方向ナトリウム温度及び蒸気側の出力分布が均一である。
- (7) ナトリウムは、6本の分配管により伝熱管群部に導入されるので、周方向の偏流がない。

本蒸気発生器は、法規上「ボイラ及び圧力容器安全規則」の適用を受けるが、主要部に対してはASME “Boiler and Pressure Vessel Code Section III”により詳細な応力解析が行なわれた。

3.4 安全上の考慮

ナトリウム加熱蒸気発生器は、伝熱管を境界として高温ナトリウムと高温・高压の蒸気とが共存しているため、前述のように信頼性の高い構造を採用している。しかし、万一水漏えい事故が生じた場合には、それを早期に検出し、ウェステージ⁽⁹⁾による二次破損事故を防止するために図1に示すように次に述べる日立製作所で開発した水漏えい検出器が設けられている。

- (1) カバーガス中：蒸発器及び過熱器カバーガスの連続サンプリングをし、ガスクロマトグラフにより水素濃度の変化を連続監視する。
- (2) ナトリウム中：蒸発器及び過熱器出口ナトリウムの連続サンプリングをし、真空計及び質量分析計によりニッケル膜を拡散する水素量を連続監視する。

また、万一小規模、あるいは大規模のナトリウム-水反応事故が生じた場合には、空気作動逃し弁、あるいは破裂板(蒸発器：600mmφ、過熱器：450mmφ)が作動して放出系へ圧力解放を行なうよう計画されている。

なお、蒸気発生器本体は、ナトリウム-水反応事故に対して、日立製作所で開発された解析コードSORELにより安全解析が行なわれ、初期の瞬時圧力及びその後の準静圧に対し、十分健全であることを確認している。

3.5 計測・制御

本蒸気発生器は、胴側において自由液面をもっているため、液面制御方式として蒸発器はオーバフロー方式を、また過熱器は圧力制御方式を採用した。なお、本制御本式は、現在計画設計中の高速原型炉「もんじゅ」用蒸気発生器における制御方式と同じである。

本蒸気発生器には、伝熱特性の解析上次の計装品が設けられている。

(1) 温度計

- (a) ナトリウム側：蒸発器155本、過熱器78本
- (b) 水/蒸気側：蒸発器24本、過熱器10本

(2) 流量計(水/蒸気側)：蒸発器12台

4 製作・検査

本蒸気発生器の製作に当たっては、水漏えい事故を防止するため、材料の受入れから据付け完了に至るまでの全工程にわたり入念な品質管理が行なわれた。

製作上の主な特長を挙げると次のとおりである。なお、これらの技術は、日立製作所内の試験研究及び試作により開発されたものである。

- (1) 伝熱管と管板との溶接は、図3に示すように自動TIG内面溶接法により完全突合せ溶接を行ない、溶接部に対し伝熱管内より放射線透過試験(線源： ^{170}Tm)を実施しているため、

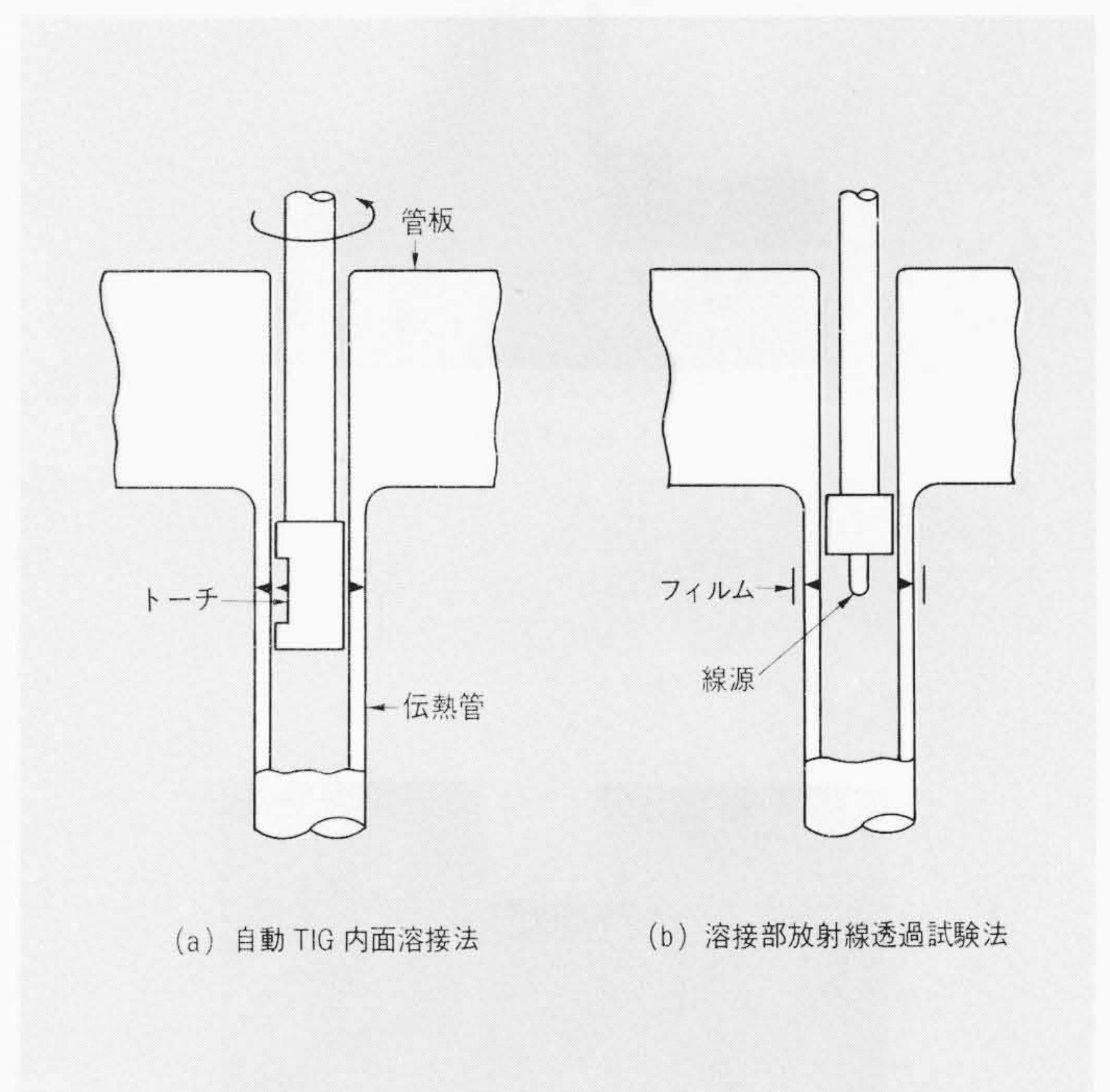
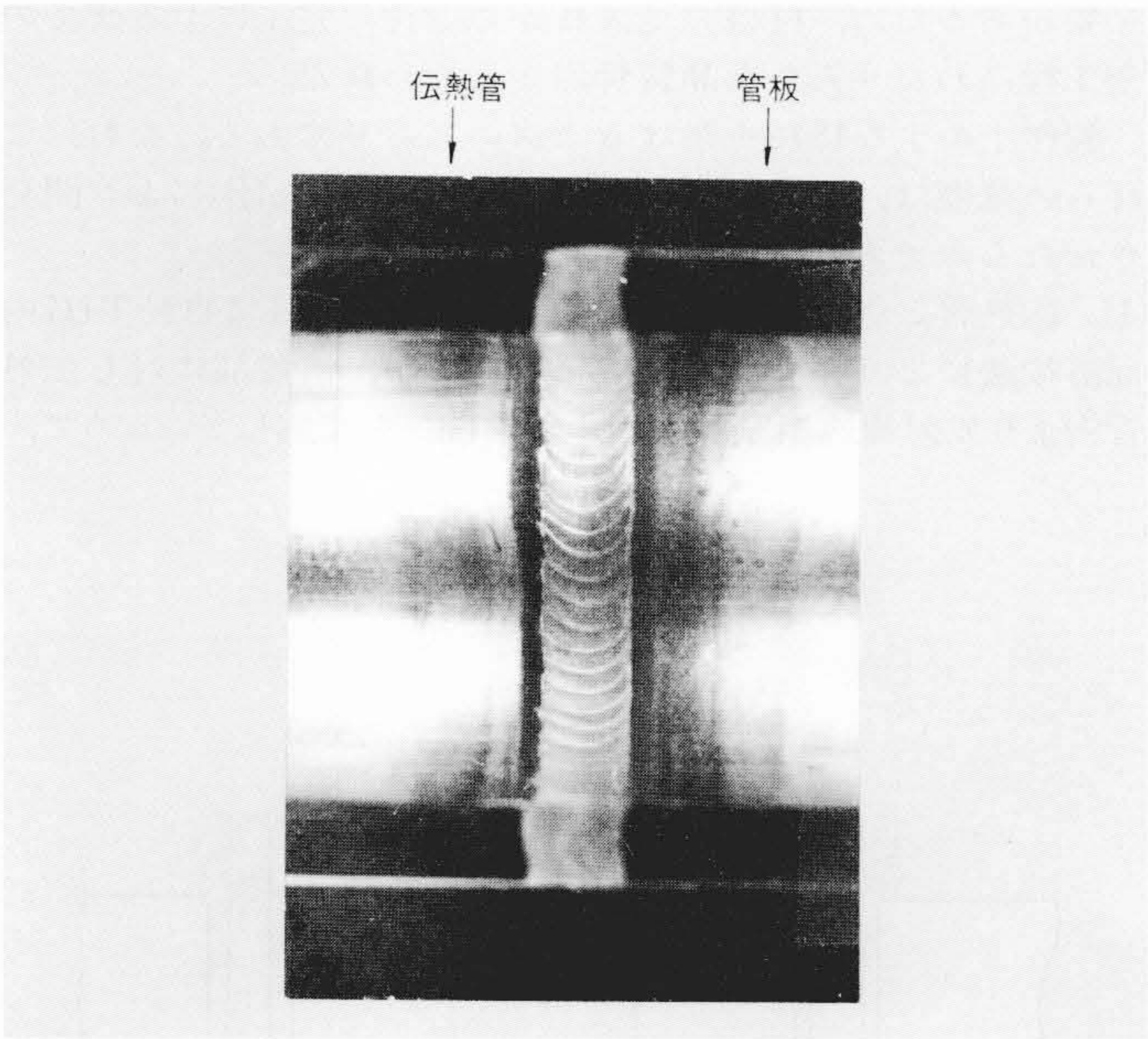


図3 伝熱管-管板溶接及び溶接部検査 伝熱管と管板との溶接には、すきま腐食を避けるため、内面からの完全突合せ溶接法を採用するとともに、溶接部に対し放射線透過試験を実施しているため、溶接部の信頼性が極めて高い。

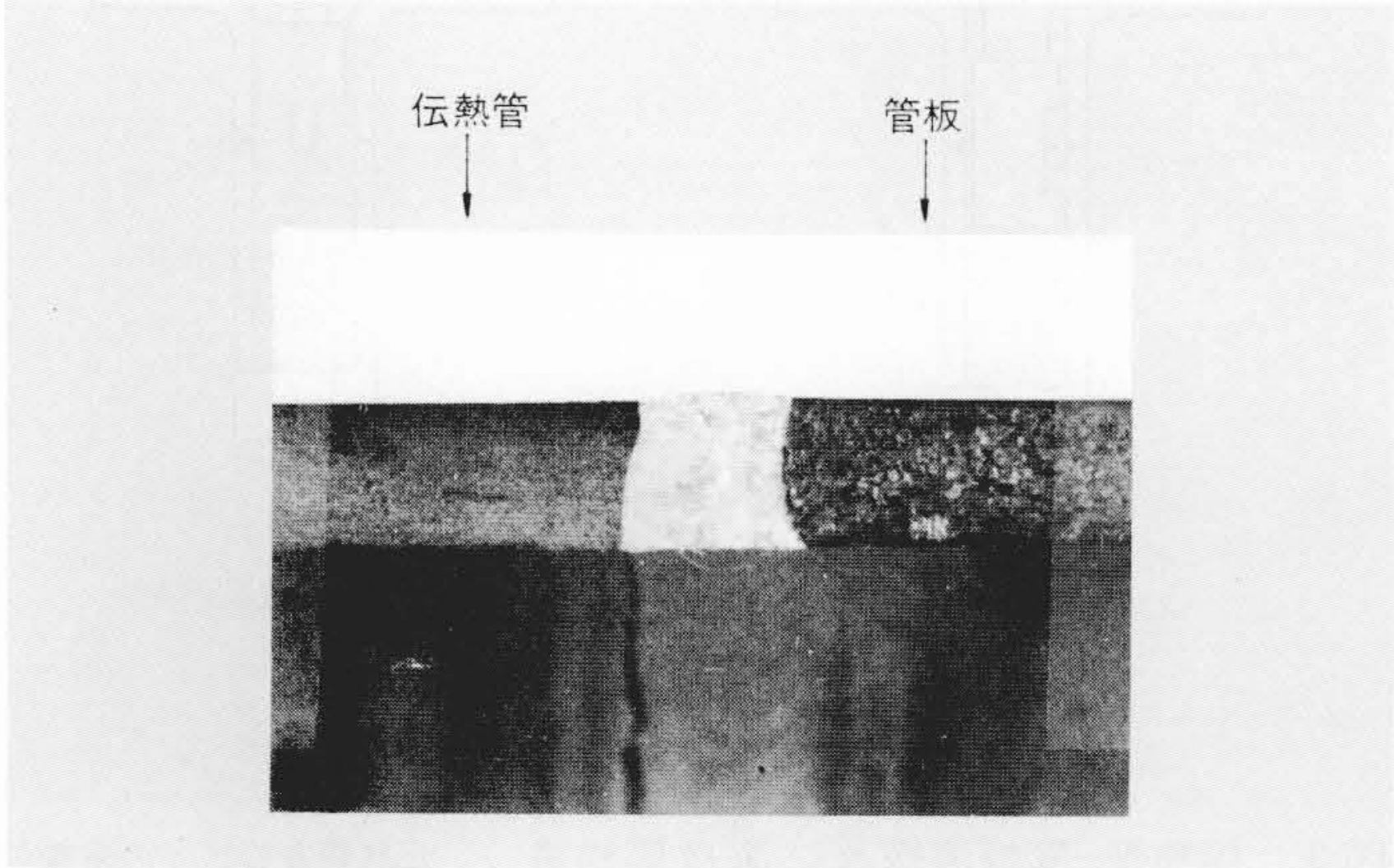
- 溶接部の信頼性が極めて高い。
- (2) コイル ベンダの開発により、厚肉長尺(長さ約30m)のコイル成形精度及び能率が大幅に向上している。
- (3) ヘリカル コイル形蒸気発生器は、コイル部下端及び上端において伝熱管の配列が複雑となるため、実寸大模型により、組立、溶接及び試験検査を考慮して配列を決めている。
- (4) 2¼Cr-1Mo鋼から成る蒸発器の主要部分の溶接部に対しては、応力除去焼鈍が施工されているので、溶接部の残留応力が小さく、健全性が確保されている。
- 伝熱管-管板溶接施工に当たって行なわれた試験結果の一

試 験 項 目	結 果
ビード外観検査	問 題 な し
マクロ、ミクロ試験	"
溶接金属の分析	"
放射線透過試験	無 欠 陥
かたさ試験	問 題 な し
曲げ試験	割 れ な し
常温、高温引張試験	図 5 参 照
クリープ ラプチャ試験	試 験 中

(a) 継手性能試験項目



(b) ビード外観



(c) マクロ写真

図4 伝熱管-管板溶接継手試験 継手部ビード外観は良好であり、各種試験の結果も問題はなく、信頼性の高い溶接継手となっている。

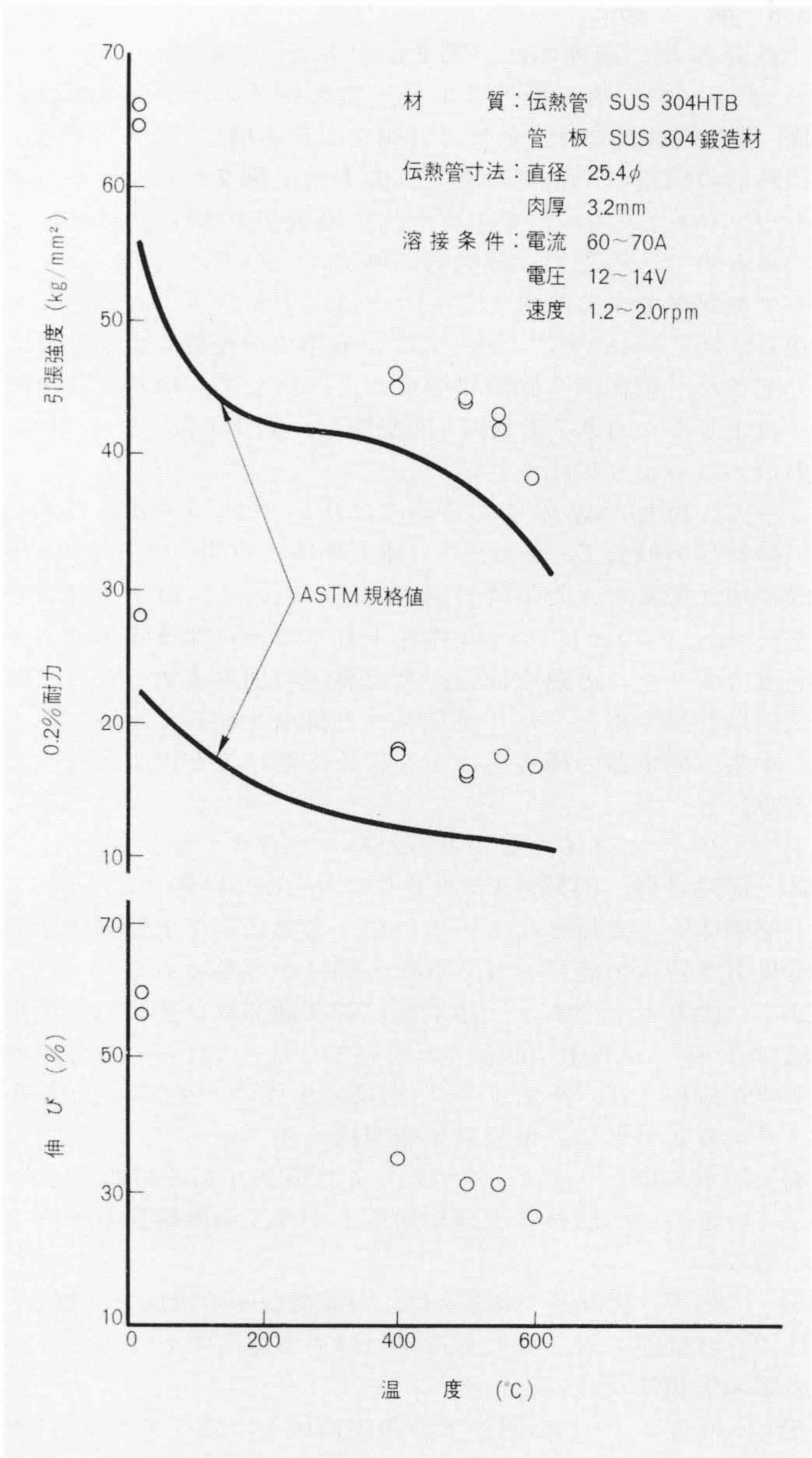


図5 伝熱管-管板溶接継手の引張試験結果 常温及び高温ともASTMの規格値を満足しており、良好な継手性能をもっている。

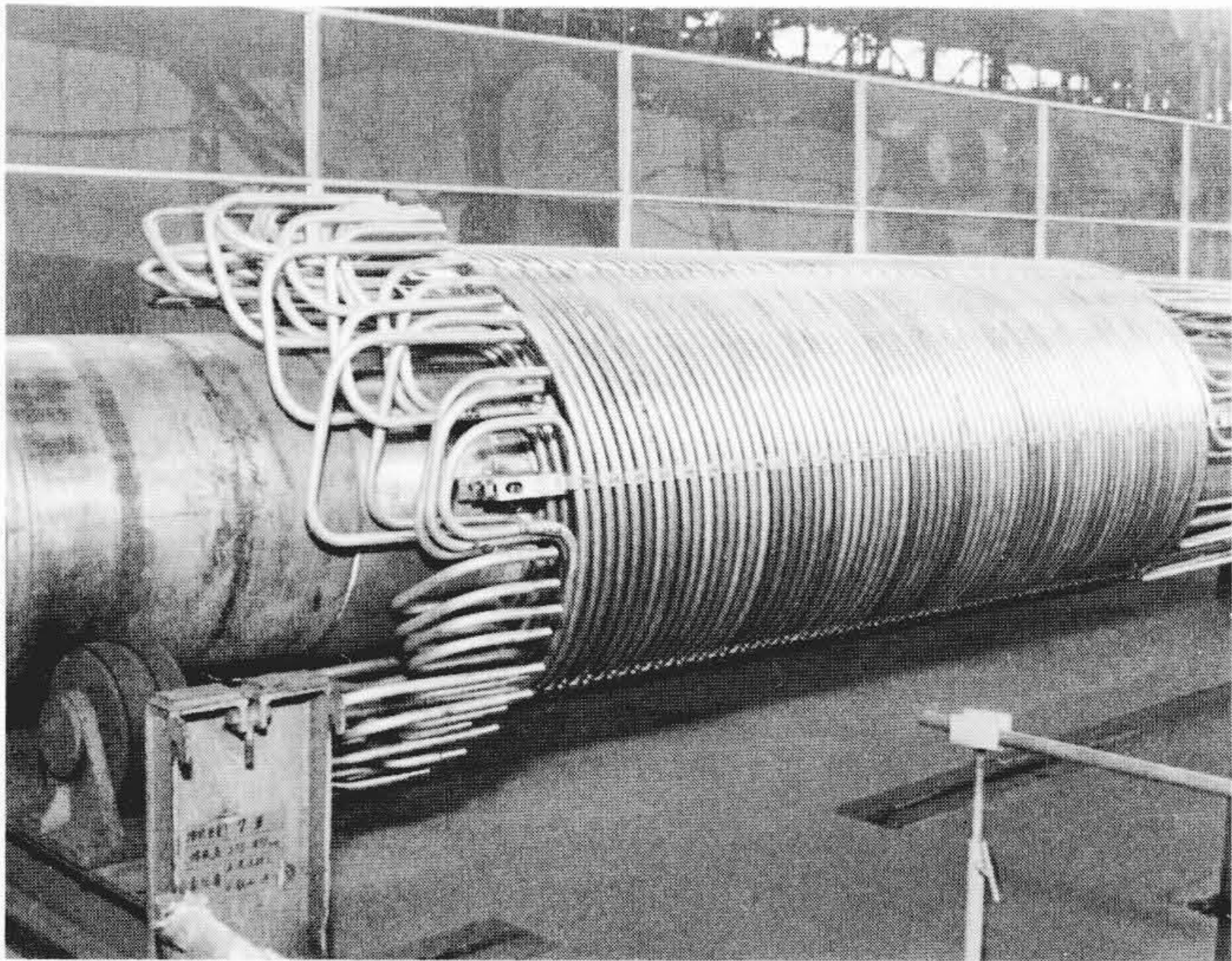


図6 過熱器伝熱管束部の外観 蒸発器及び過熱器のヘリカル コイル部は、各6層及び5層の管群から成り、各層間に温度差が生じた場合にも軸方向の熱膨張が可能な構造となっている。

例として、継手性能試験項目と継手部ビード外観及びマクロ写真を図4に、また、継手の引張強度試験結果を図5に示す。これらの図からも分かるように、各試験において問題なく、常温、高温引張強度及び0.2%耐力ともASTMの規格値を満足しており、良好な継手性能をもっている。

過熱器ヘリカル コイル部の組立中の外観を図6に示す。

5 試 験

本蒸気発生器は、昭和49年4月より総合調整運転に入り、同年6月に50MW定格出力72時間連続運転に成功し、その後昭和50年3月まで種々の特性試験が行なわれた。試験期間中、ナトリウム-水反応事故のような重大事故の発生はなく、稼働率は極めて高く、運転積算時間は、ナトリウム側が約4,200時間、水/蒸気側は蒸発器通水が約3,400時間、過熱器通気が約1,100時間である。

本蒸気発生器により実施した試験経過の概要を表2に示す。試験項目は、極めて多岐にわたっており、採取されたデータは膨大なものである。現在、高速原型炉「もんじゅ」用蒸気発生器の設計に有効に反映させるため詳細な検討が進められている。

試験結果の例を、図7、8、9にそれぞれ示す。

図7は、定格運転時における蒸発器内部の温度及び熱流束分布を示すものである。本試験は、運転初期のものであるので水/蒸気側に汚れがなく、蒸気出口温度は設計値に対し、約30℃高い値となっている。また、下降管部領域での水の温度上昇は非常に小さく、熱しゃへい体の効果が実証されている。また、熱流束の設計値と実験値との差については、膜沸騰領域の熱伝達率の算出において、核沸騰終了点と過熱開始点の熱伝達率を蒸気量に従って比例配分すれば、よく一致することが明らかとなった。

図8は、蒸発器と過熱器の結合運転時における部分負荷運転の試験結果を示すものである。動燃事業団で開発された解析コードによる推定値と実験値はよく一致している。

図9は、外部電源喪失事故模擬試験結果の一例を示すもので、二次ナトリウム循環ポンプ トリップ後、二次ナトリウム系自然循環時の水/蒸気系による除熱運転モードが実現された。

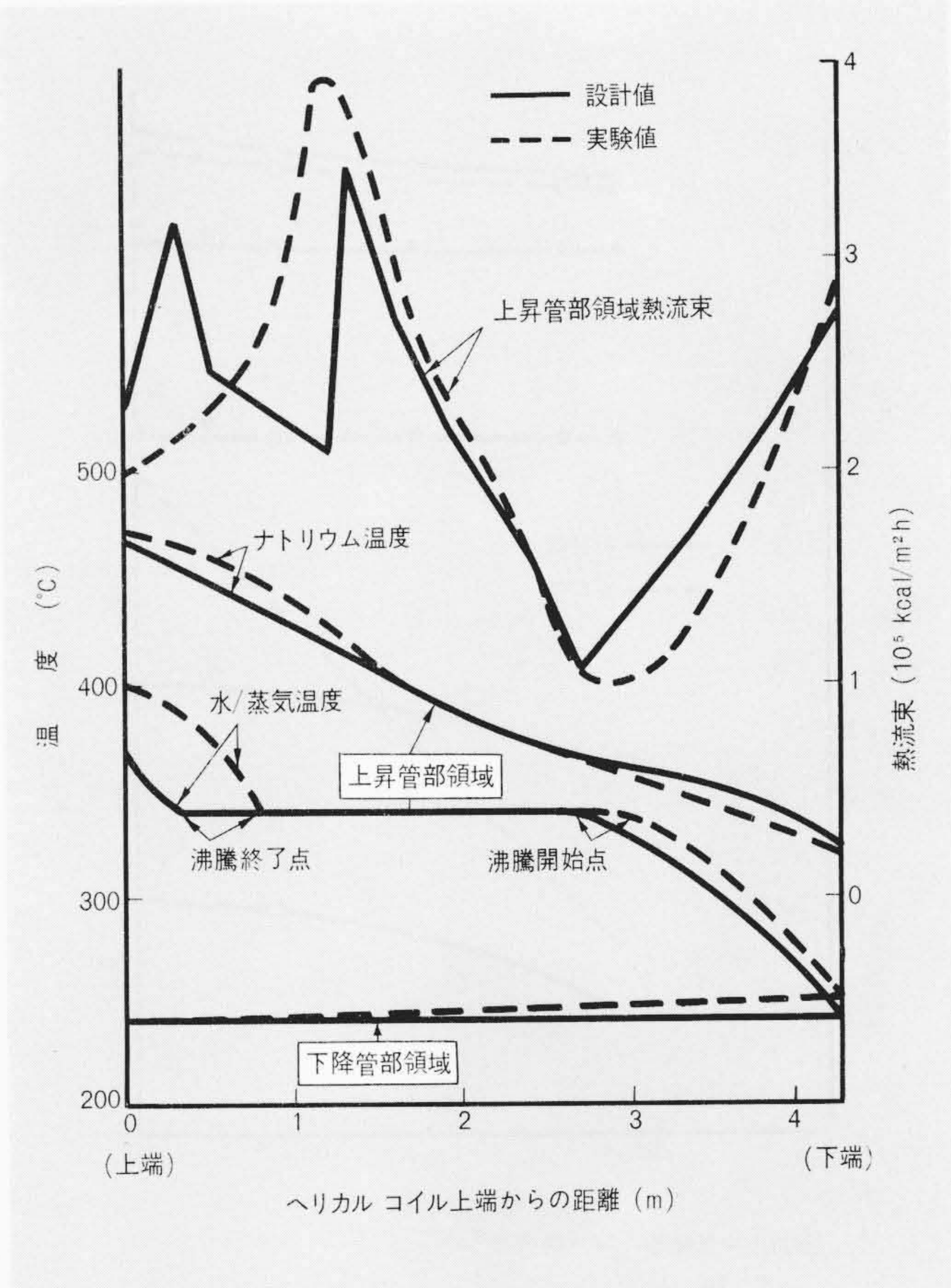


図7 定格運転時蒸発器内部の温度及び熱流束分布 給水は、下降管内を流下した後、最下端部でUターンし、上昇管部において予熱、沸騰、過熱されて蒸発器外へ排出される。熱しゃへい体のため、下降管部領域での水の温度上昇はほとんどない。

6 そ の 他

種々の試験を終了した本蒸気発生器は、構造及び材料上の問題点を明確にするために、解体、洗浄された。その後、解体及び材料検査とその評価が行なわれている。

表2 50MW蒸気発生器試験経過の概要 昭和49年6月、72時間の定格連続運転に成功して以来、極めて短期間に数多くの試験が効率よく行なわれ、貴重なデータが得られた。これらのデータは現在解析中であり、高速原型炉「もんじゅ」の設計に反映される。

項 目	昭和年月												49年			50年		
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9
試 運 転	総合調整運転																	
ル ー プ 特 性 試 験	ループ特性						ループ動特性											
蒸 発 器 単 体 試 験	静特性						動特性						静・動特性					
蒸発器、過熱器結合試験							静・動特性						動特性					
安 定 性 試 験																		
制 御 性、他 試 験													「もんじゅ」制御性					
													事故模擬					

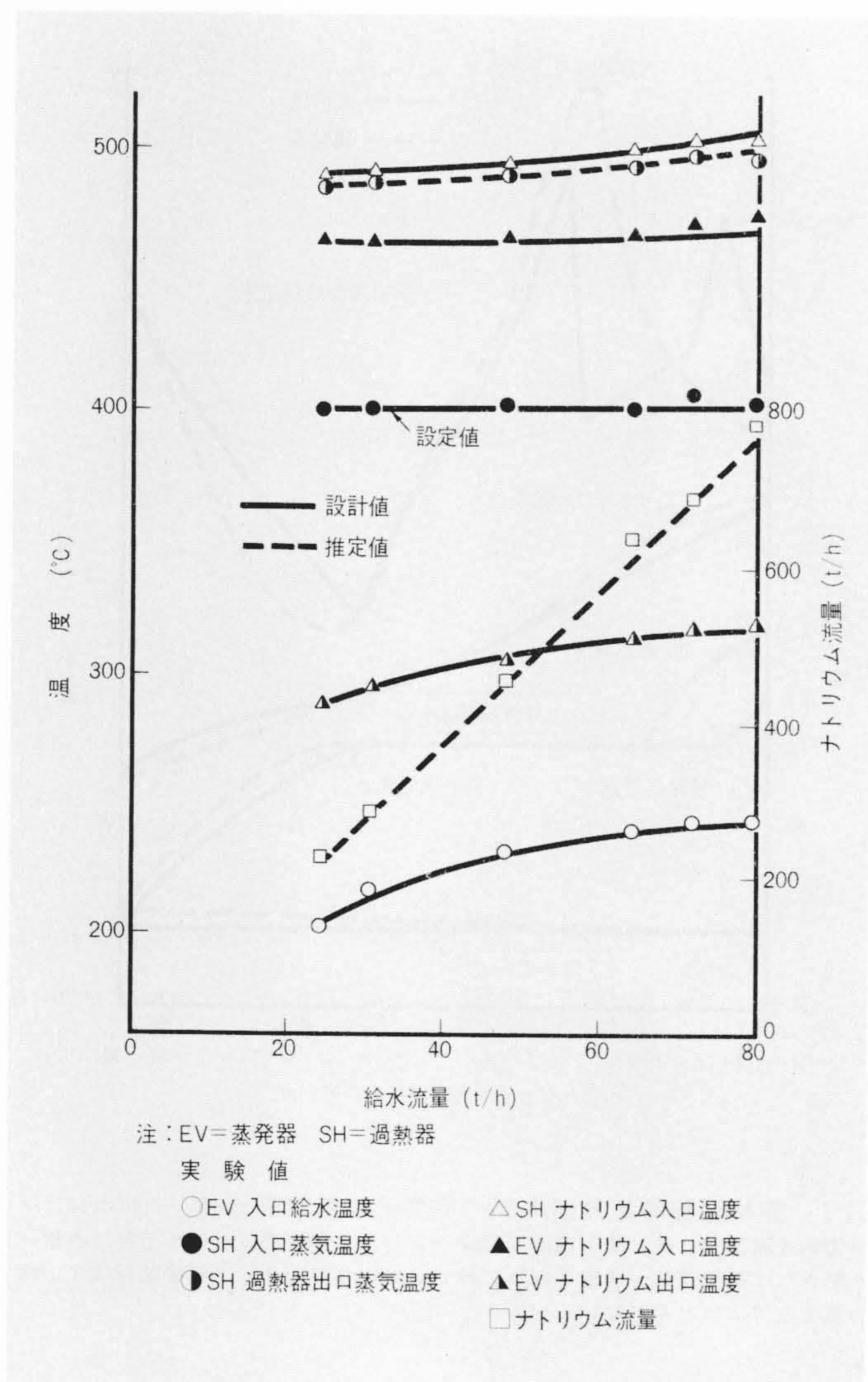


図8 部分負荷特性試験結果 解析コード評価のために種々の運転条件による試験が行なわれた。蒸発器と過熱器を結合した状態において、30%から100%負荷まで安定した運転が得られている。

7 結 言

以上、高速原型炉「もんじゅ」用蒸気発生器の研究開発計画の中でも中心的なものである50MW蒸気発生器の設計、製作及び運転試験の概要について述べた。

本蒸気発生器は、ヘリカルコイル形としては世界最大容量であり、その試験は当初の計画どおりに進捗し、昭和50年3月に無事運転を終了した。現在各種の試験、検査結果の評価が行なわれている。

これらの成果は、高速原型炉「もんじゅ」用蒸気発生器の設計、製作及び運転に大きく寄与するものである。我々は今日までの貴重な経験と実績に加えて、本蒸気発生器の開発によって得られた結果を今後の設計に反映させるとともに、更に積極的な研究開発を進めていく計画である。

最後に、本蒸気発生器の開発に当たり終始御指導と御援助をいただいた動力炉・核燃料開発事業団の関係各位及び運転に当たり終始御援助をいただいた本蒸気発生器試験施設の製作者である川崎重工業株式会社、富士電機製造株式会社の関係各位並びに本開発計画に終始御協力を得た日立製作所日立工場、同日立研究所、同大みか工場、同那珂工場の関係各位に対し深く謝意を表わす次第である。

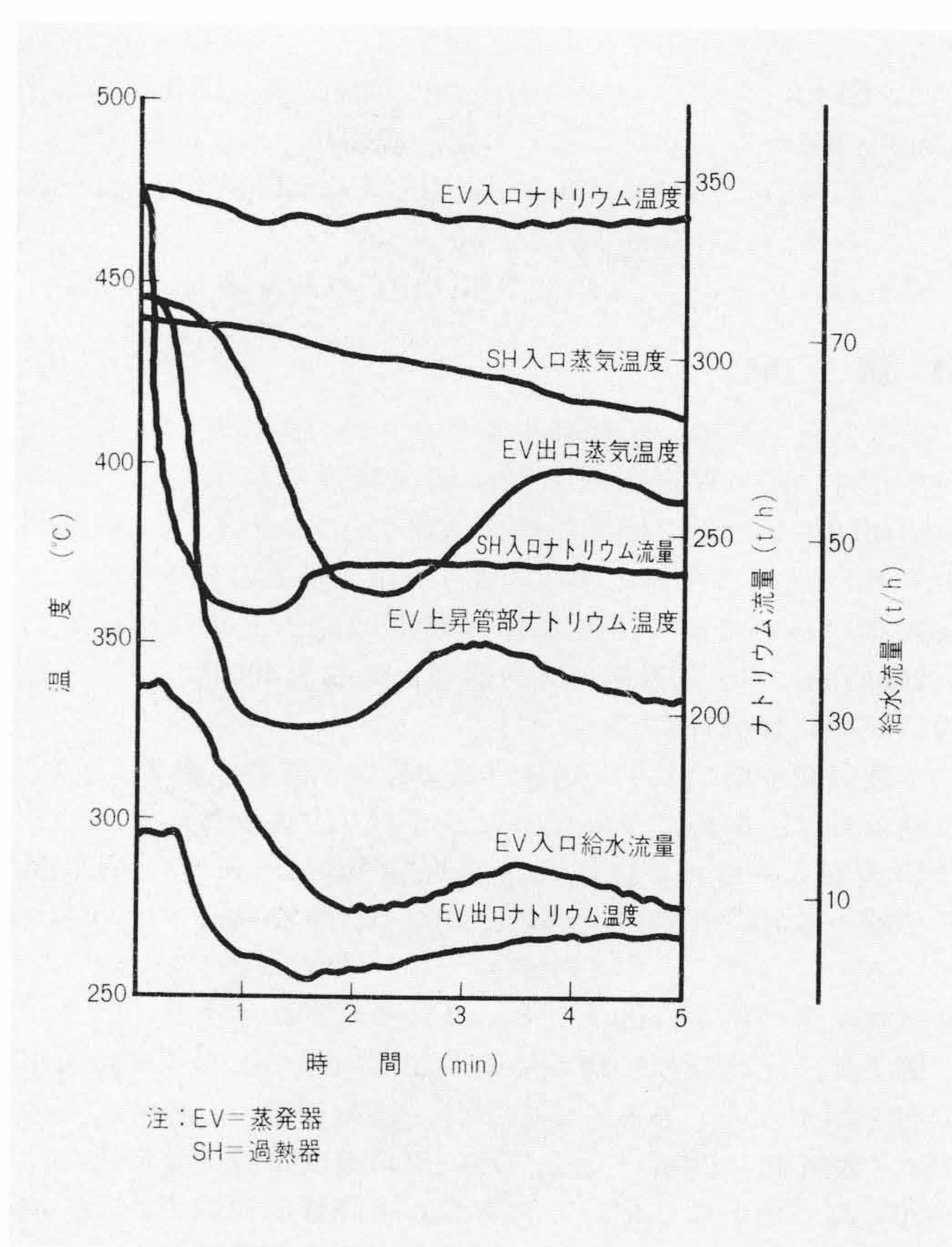


図9 外部電源喪失事故模擬試験の一例 各種事故模擬試験の結果が評価され、高速原型炉「もんじゅ」用蒸気発生器の設計条件、制御方式などに反映される。

参考文献

- (1) 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)
- (2) M. Kawara, H. Yamaki et al: "Design and Operating Experiences with 50MW Steam Generator", I. A. E. A. Study Group Meeting on Steam Generators for LMFBR's, Bensberg, FRG, Oct. 14-17 (1974)
- (3) W. H. McAdams: "Heat Transmission", 3rd ed. McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, (1954)
- (4) J. A. Clark, W. M. Rohsenow: "Local Boiling Heat Transfer to Water at Low Reynolds Numbers and High Pressures" Trans. A. S. M. E., 76, 553, May (1954)
- (5) C. L. Rickard, O. E. Dwyer et al: "Heat Transfer Rates to Cross-Flowing Mercury in a Staggered Tube Bank" Trans. A. S. M. E., 8, 646, Apr. (1958)
- (6) 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, 97 (昭49-9)
- (7) S. Kawahara, H. Ogasawara et al: "Design of the Sodium-Heated Steam Generator for the FBR Nuclear Power Station", Proceedings of a Symposium on Progress in Sodium-Cooled Fast Reactor Engineering, IAEA-SM-130/3, 489, Monaco, Mar. (1970)
- (8) M. Naitoh, A. Nakamura 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)
- (9) N. Sakurama, M. Ueno et al: "Material Wastage Resulting from Small Leak Sodium-Water Reaction" I. A. E. A. Specialist Meeting on Sodium-Water Reaction, Melekes, U. S. S. R., May 18 (1971)