高速増殖原型炉「もんじゅ」冷却系機器の高温構造 設計及び研究開発

High Temperature Structural Design and R& Ds for Heat Transport System Components of FBR "MONJU"

高速増殖原型炉「もんじゅ」の冷却系機器は、クリープ温度領域で運転され、従来の原子力機器用国内構造設計基準の適用上限温度を超えるため、動力炉・核燃料開発事業団を中心に、近年の急速な研究開発の成果を反映させて、高温構造設計指針を作成中である。そのための基礎的データを取得するため、主要構造部材及び構造要素の高温特性試験を実施するとともに、汎用・専用を含め8種の非弾性構造解析プログラム"HI-EPIC"シリーズを開発し、非線形領域での構造設計基礎技術を確立した。また、非線形領域では、膨大な物理量を評価する必要があり、現実的な弾性解析に基づく設計法でも多数の設計線図を使用する必要があるため、評価の信頼性向上を目的に自動評価プログラム"HI-TEP"を開発し、実機設計に備えている。

住川雅晴* Masaharu Sumikawa 中川幸雄** Yukio Nakagawa 福田嘉男*** Yoshio Fukuda 祐川正之**** Masayuki Sukegawa 石崎泰郎***** Tairô Ishizaki

1 緒言

原子力プラントの高温構造設計は、厳しい安全性の要求から、設計寿命を通じて詳細な健全性評価が必要であり、従来の応力ベースの評価から、直接的に応力及びひずみを評価する設計へと大幅な転換が行なわれつつある。これに対応するためには、材料及び構造の高温での特性・挙動を実験的に把握することが必要である。また、実験の制約を補うとともに、より詳細に挙動を把握するために非弾性解析技術の確立が、更に、現実的設計法として弾性解析に基づく適正かつ安全側の高温構造設計法の確立が必要である。

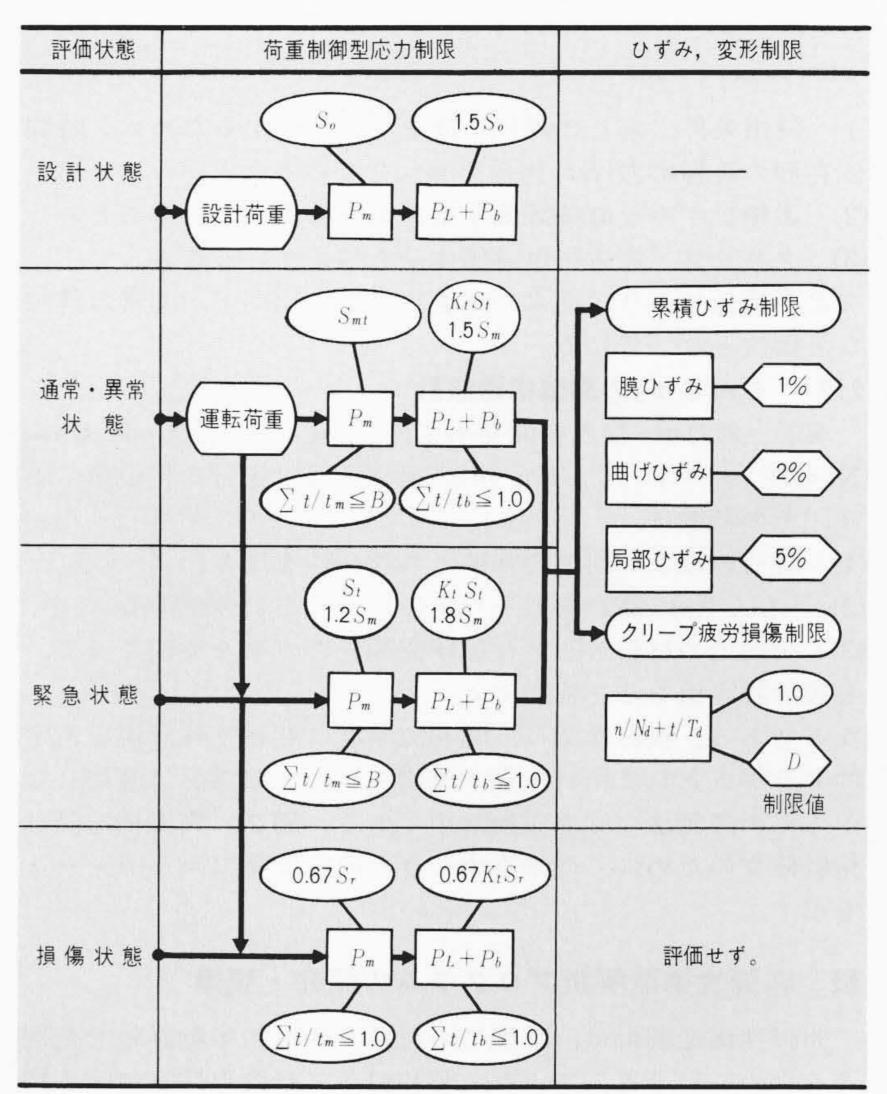
ここでは、動力炉・核燃料開発事業団を中心に開発中の高速増殖原型炉「もんじゅ」(以下、「もんじゅ」と略す。)冷却系機器の高温構造設計に備えて実施した、非弾性構造解析プログラム"HI-EPIC"シリーズの開発、高温構造強度評価プログラム"HI-TEP"の開発及び高温構造・材料の研究開発について紹介する。

2 「もんじゅ」における高温構造設計

2.1 高温構造設計の特徴

高温構造設計は、古くから火力発電プラント用ボイラの設計で実用化されている。これは、高温・高圧蒸気の容器及び管の設計を対象として、主として荷重制御型応力(一次応力)による破壊防止を目的として、10万時間クリープ強度に基づく簡明な許容応力体系が準備されている¹⁾。

しかし、高速増殖炉用高温機器は、設計寿命を通じて高い信頼性が要求され、かつ異常状態を想定した場合にも原子炉を安全かつ迅速に停止させることが主要な設計条件であるため、熱過渡応力(変位制御型応力:二次応力)が主要な発生応力の一つであり、軽水炉と異なりクリープ効果を考慮した上で、設計寿命末期の健全性保証が必要である。現在最も進んでいる原子力用第一種機器の高温構造設計指針は、ASME(American Society of Mechanical Engineers)Code Case N-47²⁾であり、その評価体系の概要を図1に示す。



注:略語など説明 P_m : 一次一般膜応力, $P_L + P_b$: 一次応力 S_o , S_m , S_t , S_{mt} , S_r : 設計許容応力強さ $\sum t/t_m$, $\sum t/t_b$: 各応力に対応する損傷時間比 K_t : クリープを考慮した断面応力係数 $n/N_d + t/T_d$: 疲労+クリープ損傷

図 I 高温構造強度評価体系の概要(ASME Code Case N-47) 原子力用第一種機器の評価として、温度及び使用時間に依存する許容応力St、累積ひずみの直接評価及びクリープ・疲労損傷評価を導入しているのが特徴である。

解析值

^{*} 日立製作所日立工場 工学博士 ** 日立製作所日立工場 *** 日立製作所機械研究所 工学博士 **** 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

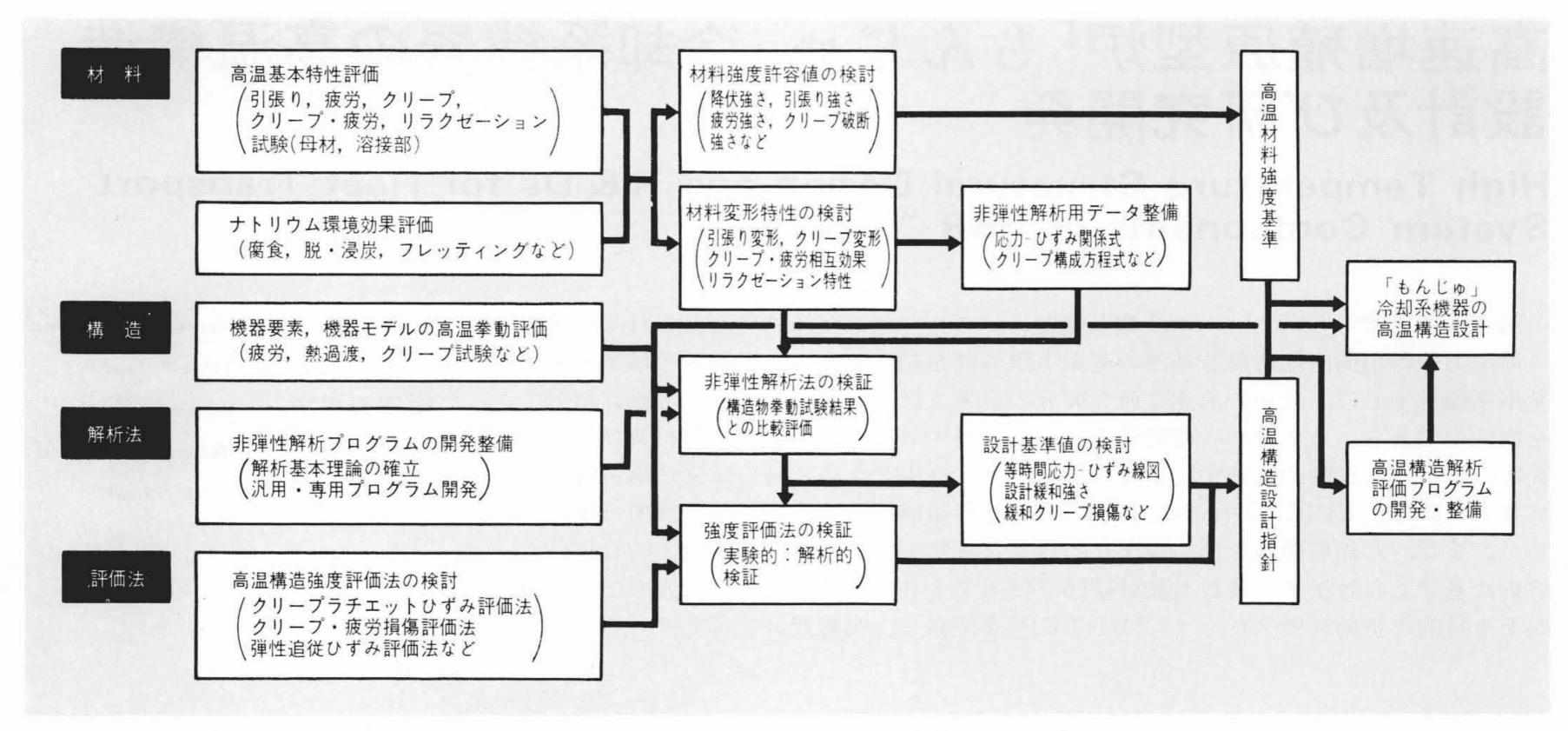


図 2 「もんじゅ」冷却系機器の高温構造設計と研究開発 材料・構造の高温特性評価,非弾性解析法の確立など,膨大な研究開発を基礎に高温構造設計は進められている。

- (1) 使用条件に応じて詳細に健全性を評価するために、時間 依存形の許容応力(St)体系を導入していること。
- (2) 累積ひずみを直接評価する体系を導入していること。
- (3) クリープ・疲労損傷評価体系を備えていること。 などが特長であり、従来の高温設計法に比べて、非常に詳細な評価法となっている。

2.2 「もんじゅ」の高温構造設計

現在,動力炉・核燃料開発事業団を中心に,上記Code Case N-47をベースに「もんじゅ」用高温構造設計指針を作成中であり,その特徴は,

- (1) 現行の軽水炉用国内基準との整合性を図る。
- (2) 「もんじゅ」高温機器を対象に評価法を具体化する。
- (3) 国内での材料データ及び研究開発の成果を反映させて、各設計許容値などを検討する。

などである。検討作業は、昭和52年度に開始され、現在暫定的ドラフトとして指針体系が整備され、実機設計に適用しながらその評価法の細部を検討中である。図2に高温構造設計指針確立のために、従来進めてきた研究開発フローチャートを示す。

3 非弾性構造解析プログラムの開発・整備

非弾性構造解析は、高温での材料・構造の挙動詳細を把握するためには不可欠であり、昭和51年に社内専門家による特別チームを日立製作所の研究所を中心に編成し、非弾性構造解析プログラムの開発に着手した。中・小形汎用プログラム及び回転体・配管などを対象とした小形専用プログラムの開発に重点をおき、社内基礎技術の向上と、中・小形プログラムによる解析時間の短縮を図るため、表1に示すプログラム体系を完成した。また、使用実績及び機能の点で最も進んでいる大形汎用プログラム"MARC"を導入して、多面的なニーズに対応できる体制を確立した。

非弾性構造解析の分野での研究は目覚ましく,日進月歩の 観があり,これに即応するとともに,プリプロセッサ及びポ ストプロセッサの整備を目的として,開発完了後も専用タス クを継続させ、改良・整備に努めている。特に、非弾性構造解析の信頼性は、弾塑性応力・ひずみ式、クリープ構成方程式などに代表される膨大な材料定数によって支配されるため、材料研究者との連携が重要であり、材料専門家を含め広義の非弾性解析基礎技術の確立体制を整え、「もんじゅ」冷却系機器の高温構造設計に備えている³⁾。

4 高温構造解析評価プログラムの開発

4.1 評価プログラム開発の目的

高温機器の強度を評価するには、弾性解析ベース及び非弾性解析ベースの二つの方法がある。弾性解析による方法は、評価体系が複雑であること、使用する設計線図が多いことなどの点で、また非弾性解析による方法では、膨大な計算量とその数値処理という点で、いずれの場合にもコンピュータによるオンラインデータ処理が不可欠である。日立製作所では、この目的で高温構造解析評価プログラム"HITEP"シリーズを開発した。"HITEP"シリーズは、Code Case 1592(現N-47)による配管評価プログラムの開発(昭和51年)を皮切りに、改良、拡張、修正などを継続し、適用設計指針別、対象機器別、あるいは弾性・非弾性の解析法別など、合計6種類が整備されている。

4.2 "HITEP"の特徴

"HITEP"の開発では、次の点に留意した。

- (1) 温度・応力解析及びポストプロセッサとのオンライン結合による作業時間の短縮とミスの発生防止。
- (2) 最終評価結果だけでなく、関連中間情報を多角的に出力し、合理的設計に向けて十分な検討を可能にする。
- (3) 大量情報記憶システムMSS(Mass Storage System)と TSO(Time Sharing Option)の活用によるデータの蓄積, 及びそれに対するアクセスの容易化

"HITEP"は、温度分布解析のための自動分割から強度計算書の作成まで、大小約20のプログラムと一体になり、全くカードを使用しないで処理できる体系になっている。これらのプログラムによる構造解析評価のメーンフローチャートを図

日立製作所で開発した中・小形汎用及び小形専用の非弾性解析プログラムシリーズであり、原子力 非弾性構造解析プログラム"HI-EPIC"の概要 部門だけでなく広く構造解析に活用されている。

プログラム名称	対 象 構 造	機能	要	素	荷重	降伏条件・硬化則
"HI-EPIC-1"	2次元及び3次元軸対称	熱弾塑性クリープ		4~21節点 4辺形 6面体	節点荷重(変位) 熱 荷 重	Von Mises の降伏条件 等方及び移動硬化則
"HI-EPIC-2"	2 次 元 軸 対 称	熱弾塑性クリープ	1	3角形 4辺形	圧力,遠心力 節点荷重(変位) 熱 荷 重	Von Misesの降伏条件 等方硬化則 Norton クリープ則
"HI-EPIC-4"	2次元及び3次元配管	熱弾塑性クリープ	0	直管曲がり管	節点荷重(変位) 熱 荷 重	指数硬化則
"HI-EPIC-5"	2 次 元 軸 対 称	非定常熱伝導		4~8節点 3角形 4辺形	強制温度 外部熱伝導 内部発熱	
"HI-EPIC-6"	薄肉シェル	熱 弾 塑 性		3角形 平板	圧 力 節点荷重(変位) 熱 荷 重	Von Mises の降伏条件 等方及び移動硬化則
"HI-EPIC-7"	3次元羽根車の回転体	弾 塑 性 熱 弾 性		8~21節点 6面体	遠 心 力 節点荷重(変位) 熱 荷 重	Von Mises の降伏条件 等方及び移動硬化則
"HI-EPIC-8"	2 次 元 軸 対 称	熱弾塑性クリープ		3角形 4辺形	圧 力 節点荷重(変位) 熱 荷 重	Von Mises の降伏条件 等方及び移動硬化則 Blackburn タイプクリープ則
"HI-EPIC-9"	軸対称シェル	弾性クリープ座屈 弾 性 大 変 形		3角形 4辺形	圧 力 節点荷重(変位) 熱 荷 重	

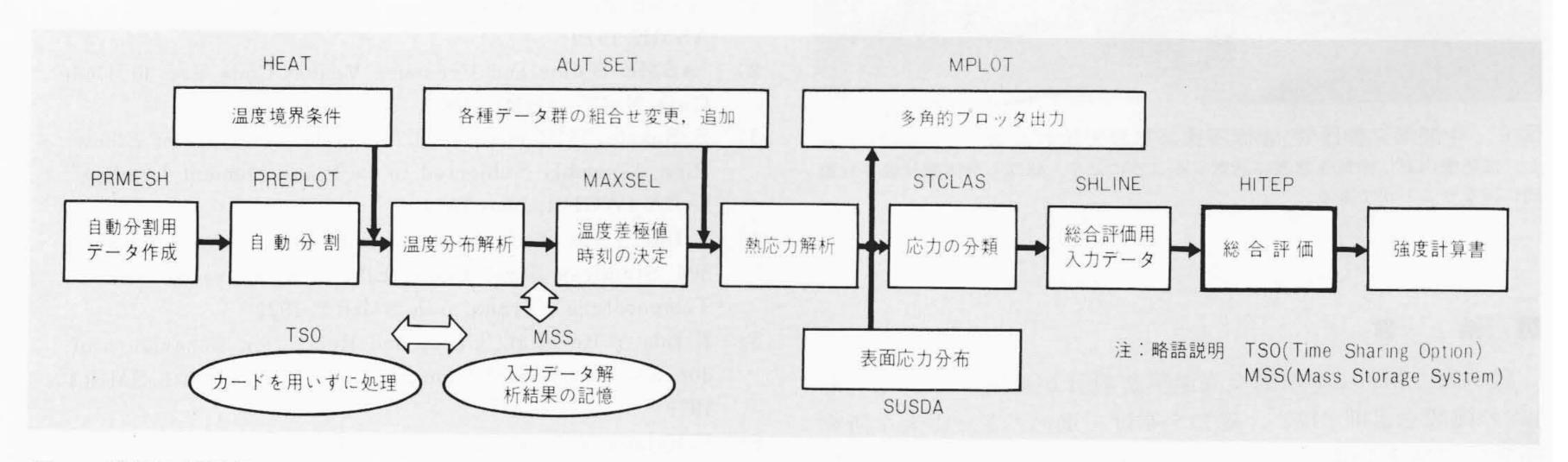
3に、"HITEP"の出力例を**図4**にそれぞれ示す。"HITEP"に よれば、最終評価表の出力ばかりでなく、評価途中の詳細数 値の出力などにより、常に十分な情報のもとで効果的な構造 設計が可能であり、既に「もんじゅ」高温機器の設計に有効に 使用されている。

高温構造・材料の研究開発

高温構造設計には,膨大な材料基本データのほかに,高速 増殖炉特有の高温ナトリウム効果を含めた環境効果などのデ ータの蓄積が必要である。昭和51年に、動力炉・核燃料開発 事業団を中心に材料試験技術検討会が組織され, 試験材料, 試験方法, 試験条件, 計測精度, データシートなどの統一が 行なわれた。これに基づいて、「もんじゅ」高温機器用主要材 料であるオーステナイト系ステンレス鋼,及び2号Cr-1Mo鋼

について, 母材・溶接部の高温基本特性試験を共同分担によ り実施中であり、その成果は高温材料強度基準ドラフトとし て取りまとめられている。図5にクリープ試験装置の一部を 示す。特に、溶接部のクリープ延性については、昭和50年度 から日本溶接協会PFW小委員会で試験研究を進め、必要な 延性が確保できる見通しを得ている。

また, 別途機器要素の高温挙動試験により, 構造設計指針 の妥当性検証を並行して進めている。配管エルボの高温疲労, クリープ試験4),5)及び図6,7にその一例を示す中間熱交換器 管・管板溶接部高温強度試験⁶⁾などを完了し、中間熱交換器管 板・シュラウド接合部熱過渡試験及び蒸気発生器管板リムリ ガメント部熱過渡試験などを社内研究として実施中である。 これらの試験研究成果は,「もんじゅ」中間熱交換器,蒸気発 生器, 主配管など高温機器設計に有効に反映されている。



構造解析評価のメーンフローチャート 高温構造強度評価及び評価途中の設計技術情報などをオンライン処理する目的で、大小合わせて約20のプ ログラムが整備され、実用化されている。

PRIMARY STRESS		ACCUMULATED IN-ELASTIC STRAIN									CREEP	DAMAGE				
	POINT	7000	A		5N* (35MH)						EEC+ EEF(QEF)M		<q+q*>R</q+q*>	DF	DC	DF+0C (D)
1	12-1	10	1		2.40 (29.19)					1.29E-04 (0.010)	1.29E-04 (0.010)	3.84E-04 (0.020)	7	l 0.0006 l m1'		0.351
2	12-0	1 0	1 1		 3.97 (29.34)						4.66E-05 (0.010)			 0.0002 h1'	0.3544	
3 1	32-1	10	1 1								0.0		T	0.0535 m1'	0.3441	
4	32-0	10	1 1		1 2.00 (29.51)						0.0			 0.0001 H1'	0.3500	
5 1	61-I	10	1		 4.37 (29.45)				-	0.0	0.0	4.73E-04 (0.020)		0.0069 H1'	0.3375	
6 1	61-0	0	1		1 6.62			- 1	-	0.0	0.0	4.73E-04 (0.020)		 0.0678 M1'	0.3533	

NOTE :

(1) PRIMARY STRESS ... DIACCEPTABLE, XIND

121 ACCREEP EFFECT) ... 1; KENCHO DE ARU, 2; KENCHO DE NAI

(3) BICHOKI ICHIJI ORYOKU JYOTAI) ... 1; CHOKI ICHIJI ORYOKU JYOTAI 1, 2; CHOKI ICHIJI ORYOKU JYOTAI

(4) DF ... MO; VDS 7.2.1(2), M1'; VDS 7.2.1(2)5) (METHOD-1'), M1; VDS 7.2.2(2)1) (METHOD-1), M2; VDS 7

(5) () ... VALUE ALLOWED

図 4 "HITEP"による高温構造強度評価出力例 一目で強度評価全体を把握でき、構造設計の妥当性を確認することができる。必要に応じて、評価途中の詳細情報を出力することも可能であり、高温構造設計に有効に活用されている。

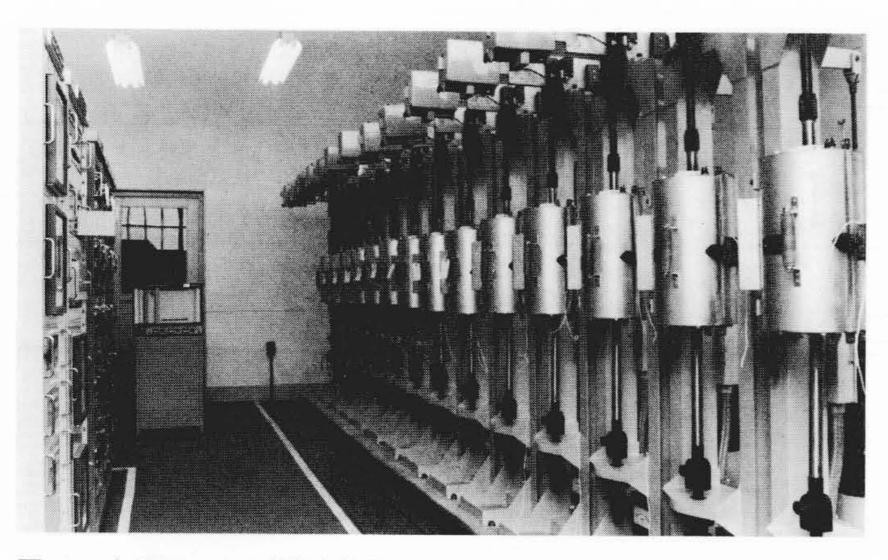


図 5 自動クリープ試験装置 温度調節器,自動データ集録器などを備えたクリープ試験装置(動力炉・核燃料開発事業団からの貸与品)により、精度の高いクリープ特性試験が実施されている。

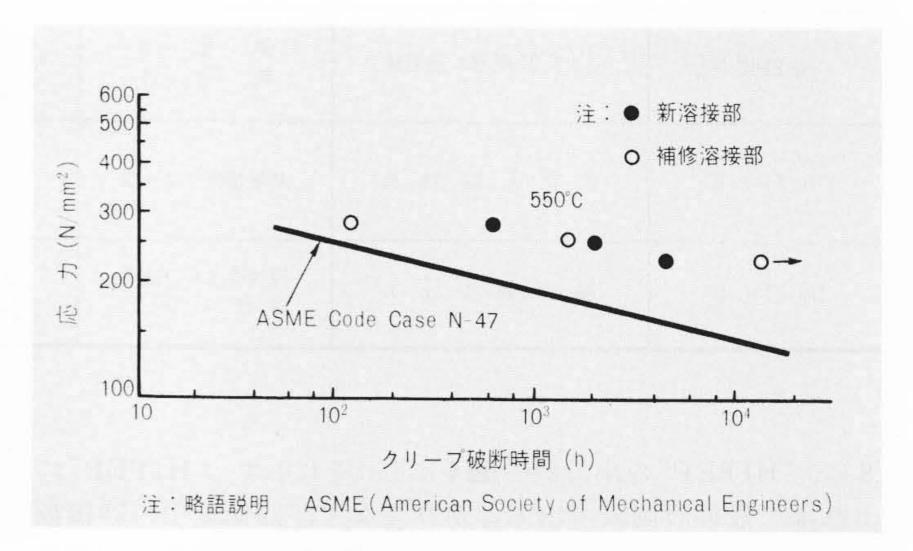


図7 中間熱交換器管-管板溶接部のクリープ強度 実寸大管状試験片によるクリープ破断試験結果である。他に高温引張試験,高温疲労試験, 繰返し熱衝撃試験などにより同溶接部の健全性が検証されている。

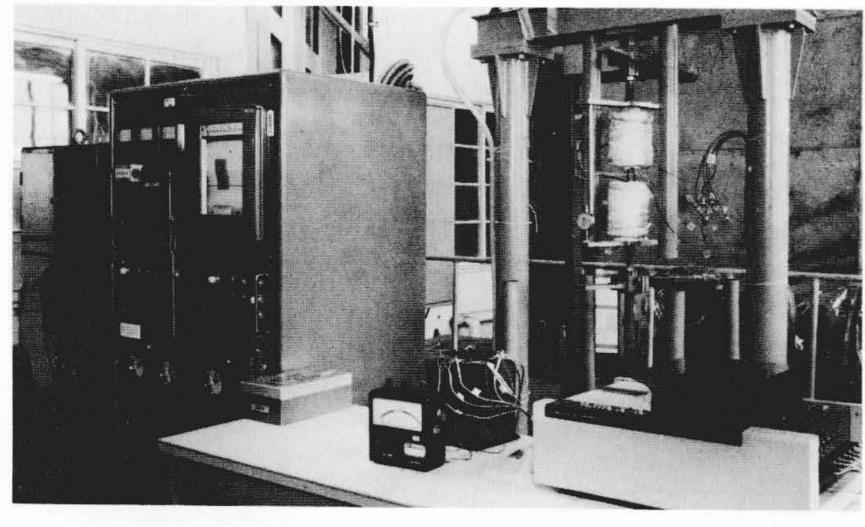


図 6 中間熱交換器管-管板溶接部熱疲労試験装置 溶接部を加熱し、伝熱管内部に冷気を急激に通気することにより、繰返し熱衝撃試験を自動的に行なうことができる。

6 結 言

6

我が国で初めて本格的な高温構造設計が適用される「もんじゅ」の建設を目前に控え、総力を挙げて進めてきた膨大な研究開発の成果を基礎に、その適用準備が整ってきた。新しい原子炉の開発には、技術的な進歩に基礎を置きながら、一方安全に対しては保守的な考えを貫くことが不可欠であり、今後

とも実証された技術に基づく設計を進めていく考えである。 ここでは、高温構造設計にかかわる研究開発の一部を紹介 するにとどめたが、これらの推進に当たっては、動力炉・核 燃料開発事業団高速増殖炉開発本部の関係各位及び日本溶接 協会、高温構造安全技術研究組合での共同研究で、諸先生方 の直接御指導をいただいたことを記し、深く感謝の意を表わ す次第である。

参考文献

- 1) "ASME Boiler and Pressure Vessel Code Sec. WII", ASME, 1979
- 2) "ASME Boiler and Pressure Vessel Code Sec. III, Code Case N-47", ASME, 1977
- 3) S. Sakata, T. Shimizu et al. "Inelastic Analysis of Elbow-Pipe Assembly Subjected to In-Plane Moment Loading" IAEA IWGFR, June 1979
- 4) K. Iida, Y. Ito et al. "Low-Cycle Fatigue Behaviours of 304 Stainless Steel Piping Elbows at Elevated Temperature" Trans, 5th SMiRT, 1979
- 5) K. Iida Y. Ito et al. "Creep and Relaxation Behaviours of 304 Stainless Steel Piping Elbows" Trans 5th SMiRT, 1979
- F. Hataya, Y. Ito et al. "Development of a New Tube-to-Tubesheet Welding Type for FBR's Heat Exchangers" Proc, 3rd International Conference on Welding in Nuclear Engineering, June 1978