

# 高速増殖炉用機器の材料・強度・耐震に関する研究開発

## Research and Development on Materials Structural Strength and Seismic Integrity of FBR Components

高速増殖炉は、主要構造材料のクリープ温度領域で運転され、しかも原子力特有の高い安全性が要求される。これを実現するためには、構造材料の高温特性、機器の非線形挙動、耐震性などに関する幅広い基礎的研究が必要である。

そこで、信頼性の高い高温構造設計法を確立する目的で、最新技術を採用するとともに、それらを検証した上で設計に反映するとの考え方に基づいて、各種の研究開発を進めている。

ここでは、動力炉・核燃料開発事業団の委託研究及び自主研究として実施した(1)高温構造材料の特性研究、(2)高温機器の非線形挙動評価研究、(3)高温機器の耐震性評価研究などの現状について述べる。

住川 雅晴\* Masaharu Sumikawa  
 桐原 誠信\*\* Seishin Kirihara  
 重田 政之\*\*\* Masayuki Shigeta  
 下屋敷重広\*\*\*\* Shigehiro Shimoyashiki  
 西岡 章夫\*\*\*\*\* Akio Nishioka

### 1 緒 言

高速増殖炉の高温構造設計には、原子力特有の高い安全性要求に基づいて、信頼性の高い設計が要求され、同時にプラント設計寿命全期間にわたっての構造健全性を保証する必要がある<sup>1)</sup>。

高温機器はクリープ温度領域で運転され、非線形の挙動を示すため、その構造健全性の詳細評価に当たっては、電子計算機の大容量化及び高速化ともあいまって、非線形構造解析が大幅に使用されるようになった。日立製作所では、社内の専門家による特別チームを組織し、非線形構造解析及び評価プログラムを独自に開発・整備するとともに、汎用大形プログラムを導入してその体制を確立してきた<sup>2)</sup>。

高温構造設計法を確立するためには、構造解析技術の開発・整備だけでなく、構造材料の高温特性、機器構造の高温挙動、耐震性など幅広い研究開発が必要であり、各種の研究開発を進めている。

ここでは、これらの研究開発の一部について、その現状を紹介する。

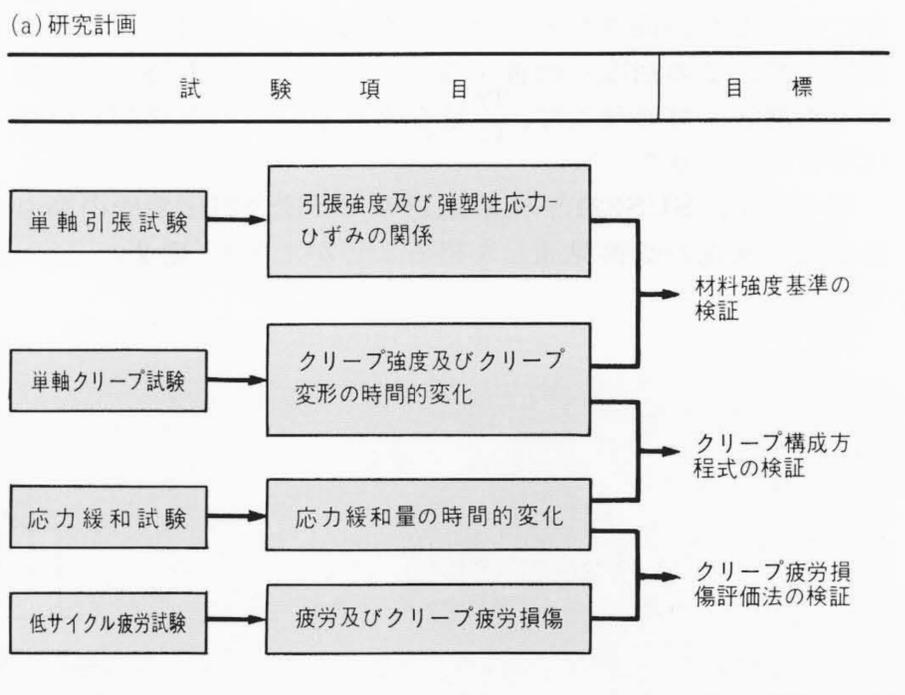
### 2 材料に関する研究開発

#### 2.1 高温構造材料強度基準

高速増殖炉の材料に関する研究開発は、  
 (1) 構造設計用高温材料強度基準の確立  
 (2) 非線形構造解析用材料特性データの取得、クリープ構成方程式など基礎特性式の検証  
 (3) クリープ損傷、クリープ疲労損傷などの構造健全性評価モデルの検証  
 などを目的として進めている。これらの研究開発は、大気中での基本特性のほかに、高速増殖炉特有の高温ナトリウムを含めた環境効果なども含んでいる。これらの研究開発方針及び方法を表1に示す。

原型炉を主な対象として、動力炉・核燃料開発事業団を中心に、「FBR金属材料試験」が進められており、その成果は、「高速原型炉高温構造設計方針材料強度基準等」として取りま

表1 高温構造材料計画 昭和51年度から動力炉・核燃料開発事業団を中心に実施中であり、日立製作所は共同研究としてこれに参加し、原型炉設計に有効なデータを取得している。



(b) 試験項目

対 象 材 料	SUS304,316,321,2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼 母材, 溶接継手, 溶接金属	
試 験 項 目	引 張 試 験	室温~600°C
	ク リ ー プ 試 験	470°C, 500°C, 520°C, 550°C, 600°C, ~10 <sup>4</sup> 時間
	疲 勞 試 験	470°C, 500°C, 520°C, 550°C, 600°C, ~10 <sup>4</sup> 回
	応 力 緩 和 試 験	500°C, 550°C, 600°C, ~300時間

とめられている。この一連の試験は、原型炉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 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼の母材・溶接部について、その材料仕様及び試験方法などを統一した画期的なプロジェクトである。

\* 日立製作所日立工場 工学博士 \*\* 日立製作所日立研究所 工学博士  
 \*\*\* 日立製作所機械研究所 \*\*\*\* 日立製作所エネルギー研究所  
 \*\*\*\*\* パブコック日立株式会社呉研究所

表2 SUS321鍛造材の高温特性の改善 原型炉蒸気発生器過熱器管板材料として、強度・延性を改善し、実機設計への適用を準備中である。

項目	従来材	改良材
550℃での引張強度 (kg/mm <sup>2</sup> )	35.0~37.0	38.0~40.0
550℃, 10 <sup>3</sup> hでのクリープ強度 (kg/mm <sup>2</sup> )	27.5~28.5	28.0~29.0
550℃, 10 <sup>3</sup> hでのクリープ延性 (%)	24~26	37~46

日立製作所は共同研究として積極的に取り組み、昭和51年以来現在も着実なデータ取得に努めている。また、実証炉及び商用炉で要求される実用運転時での高信頼性を確保する目的で、主要構造部材の研究開発に取り組んでいる。

また、環境効果試験の一部として、中間熱交換器及び蒸気発生器伝熱管支持構造部の高温ナトリウム中での自己融着、摩耗試験などを社内研究として実施中である。

### 2.2 SUS321鋼の高温特性の改善

原型炉過熱器伝熱管及び管板材料としてSUS321鋼を候補材としているが、従来火力プラントなどで使用されている材料では、原型炉運転温度範囲での高温強度及び延性に裕度が少ないことが指摘されていた。日立製作所は材料メーカーと共同して、この裕度を改善する目的で材料の基本特性を支配する溶解法、熱処理条件、 $\frac{T_i}{C}$ 量などに着目した基礎開発研究に取り組んできた。

その結果、SUS321厚板鍛造材及びSUS321伝熱管の高温強度及び延性の改善見通しを得ることができた(表2)。

### 3 強度に関する研究開発

高温強度に関する研究開発は、(1)強度解析・評価技術の開発・整備、(2)基本構造モデルによる強度評価法の検証、(3)模型試験による構造健全性の検証、に大きく分類することができる。既に弾性・非弾性構造解析プログラム“HI-EPIC”シリーズ及び高温構造解析評価プログラム“HITEP”シリーズを開発・整備して設計に適用している<sup>2)</sup>。また、配管エルボ要素によるシェル構造体のクリープ挙動試験など基礎的試験研究によって、有益な高温構造評価データを取得している<sup>3), 4)</sup>。

ここでは、これらの研究開発のうち、平板の曲げクリープ変形挙動試験及び熱交換器管板の熱過渡試験について述べる。

#### 3.1 平板の曲げクリープ変形挙動試験

高温強度評価法の確立には、高速増殖炉の主要構造部材が受ける断面に平均的に発生する膜応力と、断面に分布して発生する曲げ応力下でのクリープ挙動など荷重条件を単純化したモデル試験によって、その変形挙動を詳細に解明することが有効である。

動力炉・核燃料開発事業団の委託研究として、高温構造安全技術研究組合を中心に高温構造物の挙動試験を実施した<sup>5)</sup>。日立製作所は、600℃までの高温で板に膜力と曲げモーメントを任意の組合せで負荷できる試験装置(図1)を製作し、一定モーメントによる均一曲げクリープ試験、一定変位曲げによるリラクセーション試験及び一定変位繰返し変形挙動試験を担当した。その結果、高温構造強度評価の重要な係数であるクリープ形状係数 $K_t$ 及び弾性追従パラメータ $q$ の妥当性を明らかにした。試験で測定された弾性追従ひずみと弾性追従パラメータの考え方を図2に示す。高温構造設計指針で採用されている $q=3$ は安全側の評価を与えることが分かる。

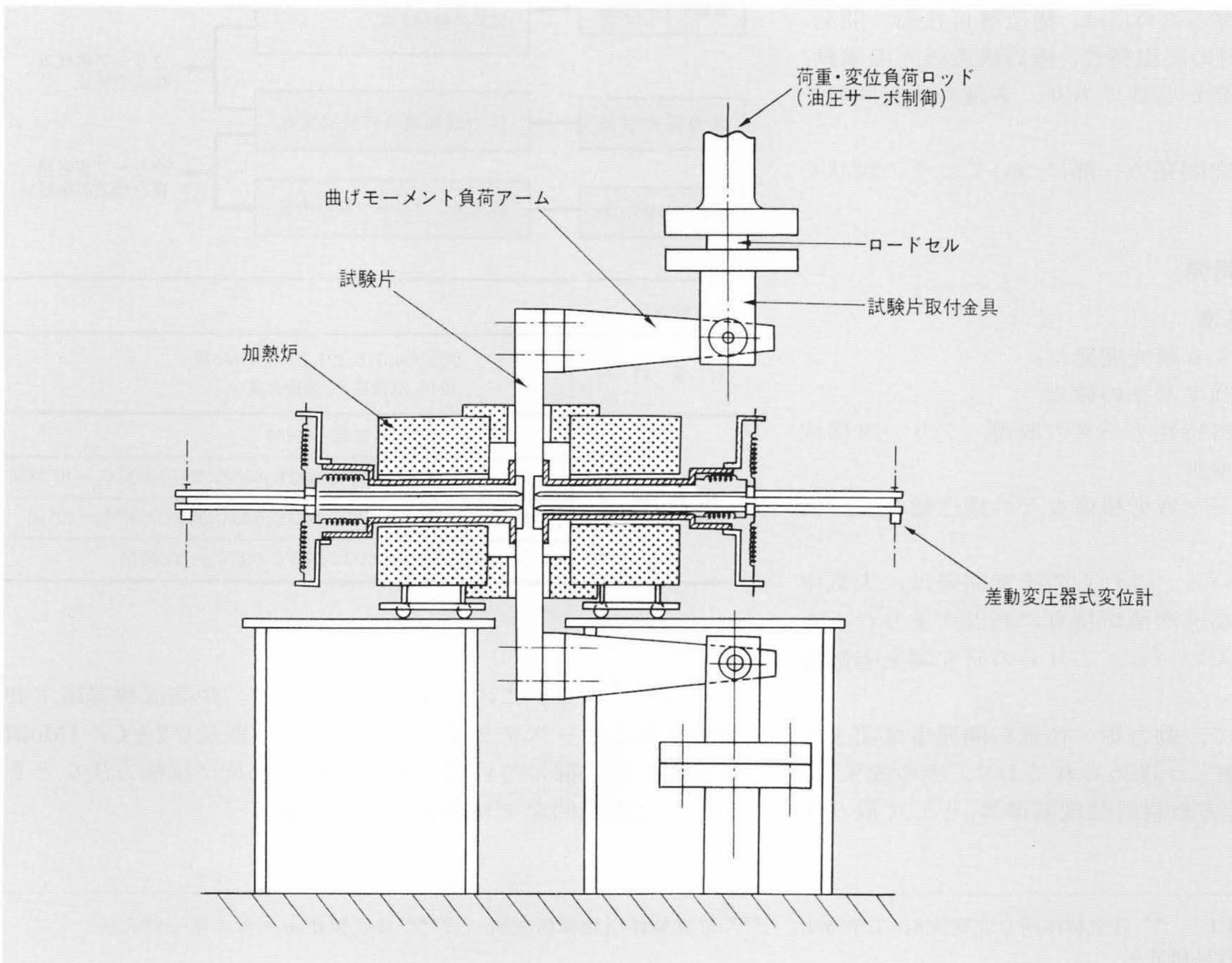


図1 平板の曲げクリープ変形挙動試験装置  
膜力と曲げモーメントの任意の組合せ荷重下で、クリープ試験が可能な油圧サーボ試験装置であり、高温構造設計法の検証に活用されている。

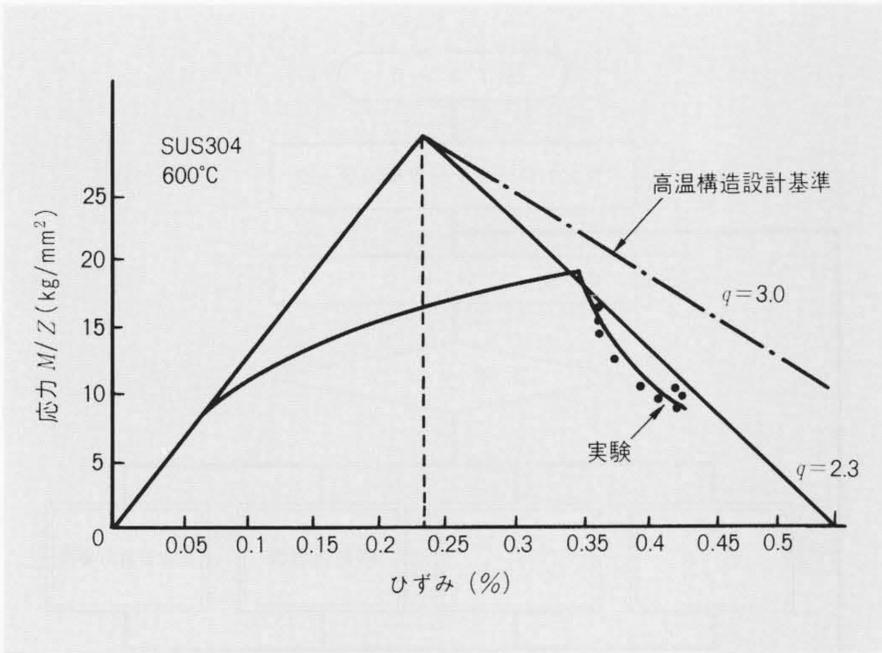


図2 弾性追従パラメータの検証 高温構造設計での弾性追従ひずみ評価でパラメータ $q=3.0$ を採用することにより、安全側評価となることが検証され、実機構造設計に反映されている。

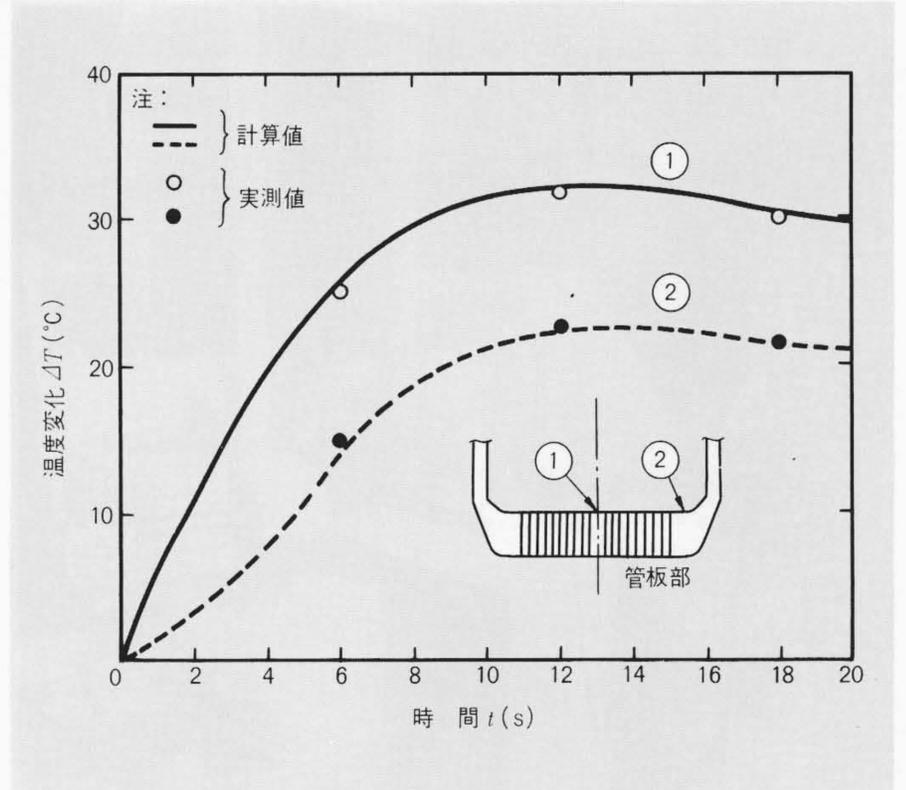


図4 管板部の非定常温度分布解析法の検証 熱過渡条件下での管板部温度分布解析手法の検証を実施し、この成果は蒸気発生器過熱器の詳細設計に反映されている。

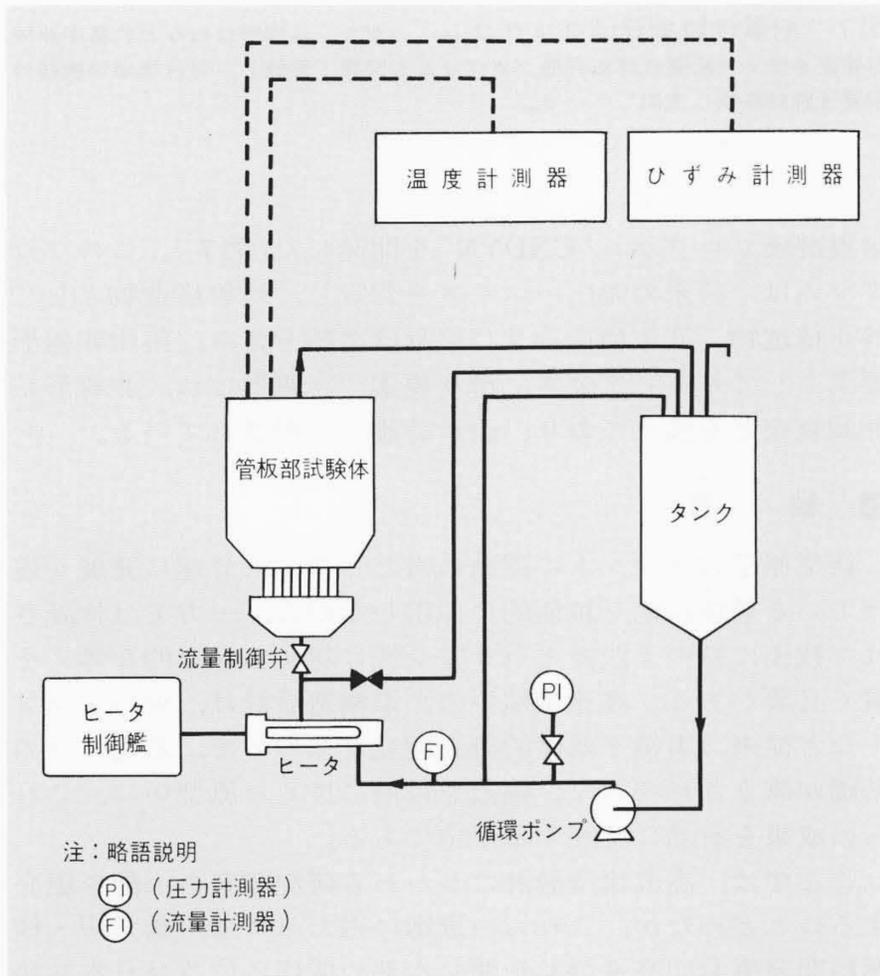


図3 熱過渡試験ループ 水蒸気温度の過渡現象下での管板挙動を、詳細に解明するために活用されている。

### 3.2 蒸気発生器管板の熱衝撃試験

厚肉多孔板である管板部は、熱過渡時に比較的大きな応力が発生する部位である。その構造健全性を詳細に評価することは、高速増殖炉の熱交換器に共通した課題であり、非定常温度分布及び熱応力解析法を確立する必要がある。

そこで自主研究として、原型炉の蒸気発生器過熱器を対象に、実寸大の管板を実機と同一材質のSUS321鍛造材で製作し、熱過渡試験を実施した。特に温度・ひずみを正確に計測するために、熱電対及びひずみゲージの精度を考慮して、約100°Cの水蒸気条件下で熱過渡試験ループ(図3)を使用した。管板多孔部内面の熱伝達率は蒸気流量で制御した。熱ひずみ

の計測精度はひずみゲージの接着法に大きく依存するため、予備試験を行ないコーティング済み及び方法を比較して慎重に選定した。図4に昇温熱過渡( $\Delta T=40^\circ\text{C}$ )の温度計測結果と、スリット法による非定常温度分布解析結果が示すとおり、解析によって十分な精度で推定できることが検証された。また、熱ひずみ・応力の解析法も同時に検証し設計に適用している。

## 4 耐震に関する研究開発

高速増殖炉の機器は、高温・低圧で運転され、熱過渡応力が支配的であることから、軽水炉に比べて薄肉構造となっている。耐震設計の観点からは、剛支持条件の実現が難しく支持部の剛性及びがたの評価などを詳細に行なう必要がある。

原型炉の一次主冷却系循環ポンプ、蒸気発生器などについては、既に部分模型又は縮小模型による振動試験を実施している。

ここでは、一次主冷却系配管支持構造の振動試験及び耐震詳細評価プログラムの開発について述べる。

### 4.1 配管支持構造の振動試験

原型炉の一次主冷却系配管では、一部を除いて耐震支持構造としてバンド形クランプを使用する計画である。この配管は、格納容器内の狭い空間で高温・低圧のナトリウムを輸送するために熱荷重に対して十分なたわみ性をもつ必要から、大口径薄肉構造となっている。耐震支持構造としては、配管との適正な接触面積を確保し、かつ十分な剛性をもったバンド形クランプを設計して、その耐震性を検証する必要がある。そこで、動力炉・核燃料開発事業団の委託研究によって昭和55年度から3年計画で実寸大バンド形クランプを使用した振動試験を実施している。試験方法は、両端固定の直管部分モデル配管の中央部にバンド形クランプを設置して、クランプを加振する方法である(図5)。現在、第一段階のクランプ自身の剛性評価として、剛体モデル配管上に設置したバンド形クランプの振動試験が終了している。クランプの剛性はボルト締付トルクによって影響されるが、このトルクを適切に制御することによって必要な剛性を確保できる見通しである(図6)。

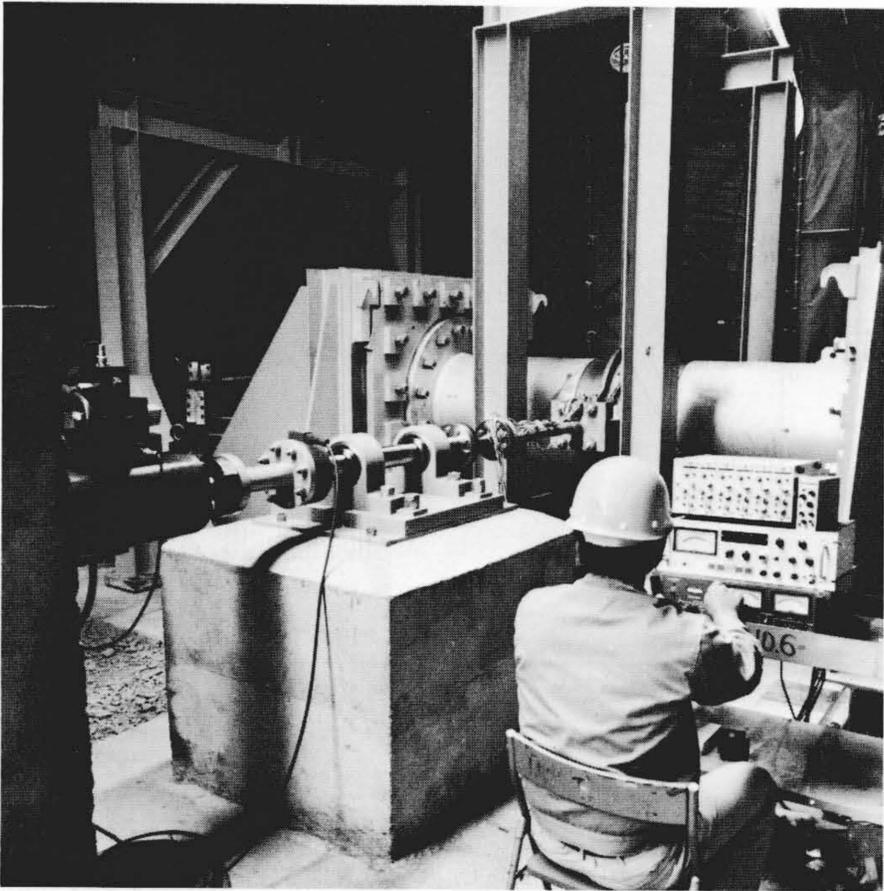


図5 大口径配管支持構造の耐震試験 高速増殖炉特有の大口径薄肉配管支持構造の耐震試験を計画的に実施中であり、この成果は実機配管支持構造設計に有効に反映されている。

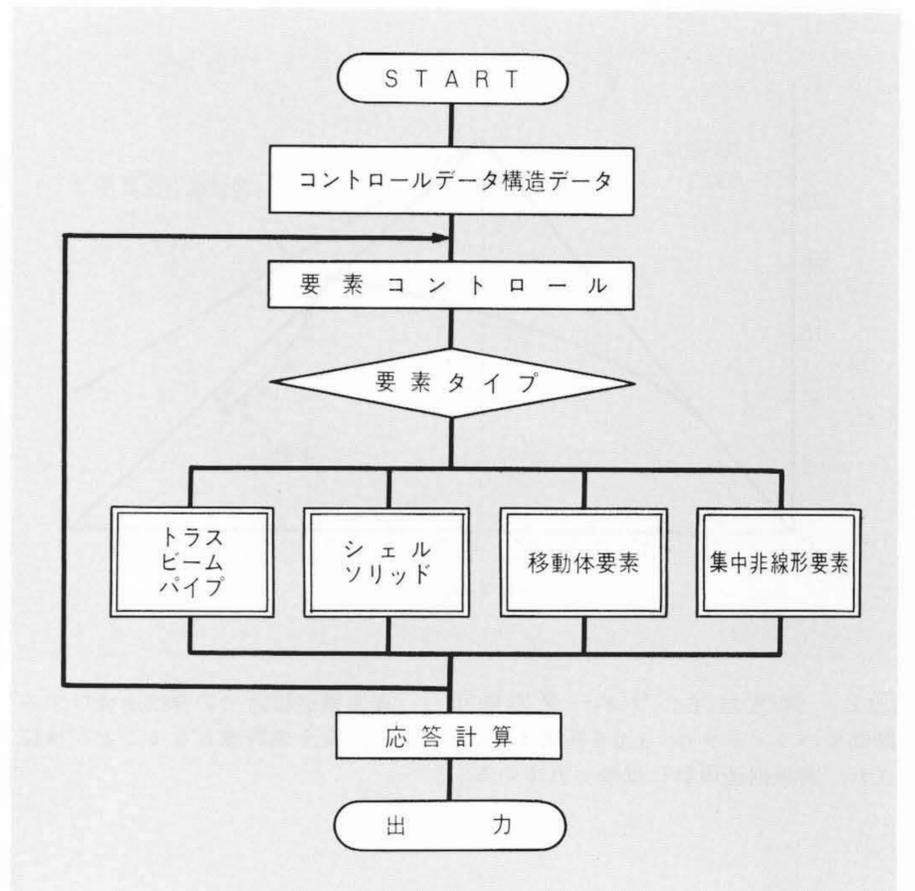


図7 耐震性詳細評価プログラム がた、非線形ばねなどの集中非線形要素を備えた耐震性詳細評価プログラムを開発・整備し、高速増殖炉機器の耐震性詳細評価に適用している。

耐震評価プログラム“CNDYN”を開発した(図7)。このプログラムは、将来の幅広いニーズを想定し、対象構造物として静止構造物、液中構造物及び移動構造物を含み、集中非線形要素としてギャップ要素、滑り要素、非線形ばね、非線形粘性減衰などを備えており、設計評価に適用されている。

### 5 結 言

新型原子力プラントの開発に当たっては、急速に発展を遂げている最新技術を積極的に採用しながら、一方では検証された技術に基づく設計という安全性に対する保守的な考えを貫く必要がある。高速増殖炉の高温構造設計は、火力プラントなど従来の実績と基礎的研究開発に基づいて、着実にその基礎が確立されてきた。建設を目前に控えた原型炉に、これらの成果を有効に反映する予定である。

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に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. III, Code Interpretation Case N-47”, ASME, 1977
- 2) 住川, 外: 高速増殖炉「もんじゅ」冷却系機器の高温構造設計及び研究開発, 日立評論, 62, 10, 701~704(昭56-10)
- 3) K. Iida, et al.: Low-Cycle Fatigue Behaviours of 304 Stainless Steel Piping Elbows at Elevated Temperature, Trans. 5th SMIRT, 1979
- 4) K. Iida, et al.: Creep and Relaxation Behaviours of 304 Stainless Steel Piping Elbows, Trans. 5th SMIRT, 1979
- 5) 高温構造物の挙動試験成果報告書: 高温構造安全技術研究組合(昭和56年8月)

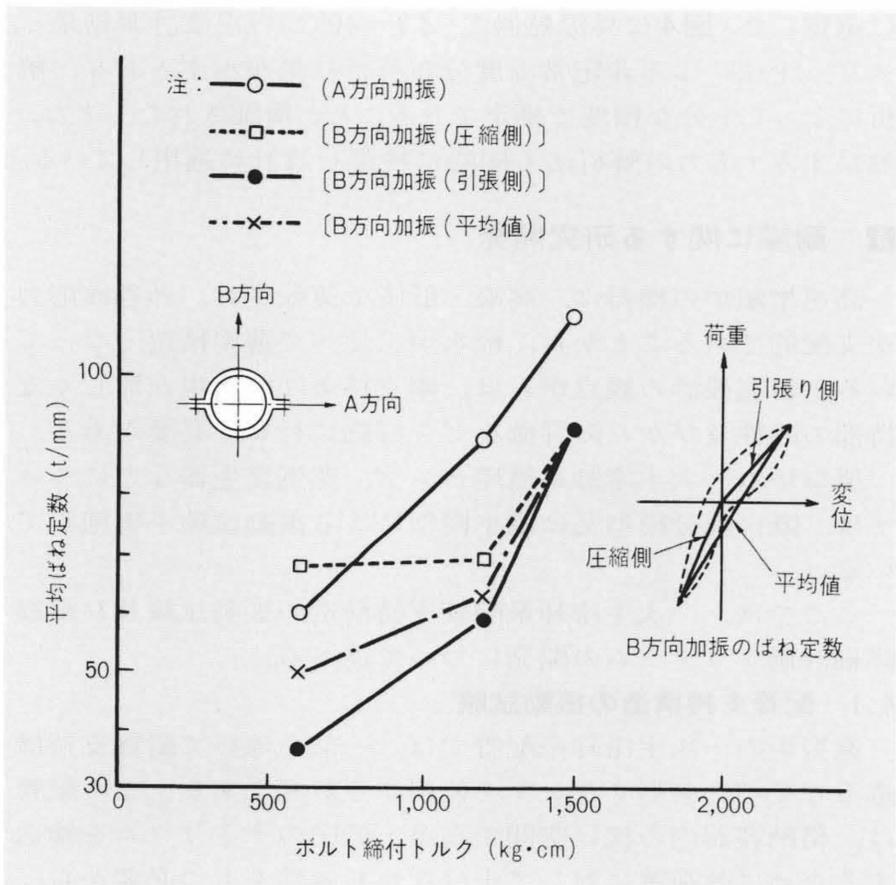


図6 配管支持構造の剛性評価 大口径薄肉配管支持構造の剛性を実験によって詳細に検討し、最適構造の選定を行なっている。

### 4.2 耐震性詳細評価プログラムの開発

薄肉構造物の耐震設計では、支持構造部の剛性を詳細に評価する必要があり、がた、非線形ばね効果などを考慮した等価線形ばねの概念が適用されている。

振動試験結果の詳細な評価及び等価線形ばねの概念を個別に検証するためには、がた、非線形ばね効果などを詳細に評価するプログラム体系の開発・整備が必要である。そこで、社内の耐震研究専門家を中心に集中非線形要素を備えた汎用