

# 熱流動 - 構造統合解析による高速炉 プラントの系統熱過渡荷重緩和法

笠原 直人 神保 雅一\* 細貝 広視\*1

大洗工学センター 要素技術開発部 <sup>\*</sup>株式会社 東芝 電力システム社 <sup>1</sup>常陽産業株式会社

Mitig ation Method of Thermal Transient Stress by a Total Analysis of Thermal Hydraulic and Structural Phenomena

Naoto KASAHARA Masakazu J INBO Hiromi HOSOGAI\*1

Advanced Technology Division, O-arai Engineering Center \* Toshiba Corporation \* Joyo Industries Limited

高速炉の機器に生じる系統熱過渡荷重を,プラント設計条件と発生熱応力の関係を把握することにより緩和す る方法を提案した。

現状の機器設計は、プラントのシステムパラメータの変動を考慮して保守的となる熱過渡条件を熱流動解析に より設定し、その条件の下で発生熱応力が許容値以下となる形状を構造解析により求めるという手順を踏む。こ こで、熱流動解析と構造解析を統合すると、プラント設計条件と発生熱応力の関係を直接把握することができる ようになる。この関係を用いると、システムパラメータから合理的に熱過渡条件を決定できる。実証炉へ適用し た例では予測熱応力が従来に比べて9%小さくなった。さらに、システムパラメータの中には安全性・性能より も熱荷重に対する影響が大きいものが存在することから、前者へ影響を及ぼさない範囲で系統熱過渡荷重の感度 が大きいシステムパラメータを調整することで、系統熱過渡荷重を緩和することができる。実証炉の例では他の 制約条件を考えなければ最大35%の応力低減の可能性があることが分かった。

This study proposes a mitigation method of thermal transient loads in fast reactor components by utilizing relationships among plant system parameters and resulting thermal stresses. Conventional design procedure against thermal transient loads has two independent steps: thermal hydraulic analysis to determine conservative thermal transient conditions considering variation of the system parameters and structural analysis to check structural integrity under given conditions. On the other hand, a total analysis procedure of thermal hydraulic and structural phenomena can grasp the relationship among system parameters and thermal stresses. It enables the mitigation of thermal transient loads by adjusting system parameters.

#### キーワード

高速炉,機器設計,系統熱過渡,流体温度,熱応力,熱流動,構造,統合解析,実験計画法,オブジェクト指向

Fast Reactor, Component Design, Thermal Transient, Fluid Temperature, Thermal Stress, Thermal Hydraulic, Structure, Total Analysis, Design of Experiments, Object-Oriented



資料番号:16-8

# 1.緒 言

高速炉の運転状態に伴い変化する冷却材温度に よって生じる熱応力は系統熱過渡荷重と呼ばれ, プラント機器にとって主要な荷重であることか ら,その緩和方法を提案する。系統熱過渡荷重は プラントの運用法とシステムパラメータの組合せ によって決まる。個々のシステムパラメータは変 動範囲を持っていることから,系統熱過渡荷重の 大きさもそれに応じて変化する。プラント機器は これらの中でも最も厳しい荷重に耐え得るように 設計する必要がある。

従来の機器設計では,熱流動設計と構造設計と を個別に実施していた。すなわち,前者ではシス テムパラメータの変動に対する冷却材温度変化 (以下,熱過渡条件と呼ぶ。)の傾向を熱流動解析 から把握し,パラメータが変動しても保守的とな る熱過渡条件を設定していた。次に,この熱過渡 条件を構造設計側に受け渡し,その条件を前提と して発生熱応力が許容値以下となる形状を構造解 析によって求めるという手順を踏んでいた。

これに対して,本研究では熱流動-構造統合解 析によりシステムパラメータと発生熱応力の関係 を直接把握する方法を提案する。これによりシス テムパラメータの変動を考慮しても,熱過渡条件 の保守的設定という過程を経ずに,パラメータの 組合せから客観的に熱過渡条件を決定することが できる。さらに,安全性や性能へ影響を及ぼさな い範囲で,系統熱過渡荷重に感度が大きいシステムパラメータを調整することによって,系統熱過 渡荷重を緩和することができるようになる。

熱流動 - 構造統合解析を設計へ適用する上での 課題は,膨大な解析ケースと計算時間の削減であ る。本研究では実験計画法と熱流動 - 構造統合解 析コードを使用してこの問題の解決を図った。こ れらの手法の有効性を,実証炉の中間熱交換器の 系統熱過渡荷重解析への適用を通して示す。

#### 2. 高速炉の系統熱過渡荷重

2.1 系統熱過渡荷重の発生要因と種類

原子力プラントに負荷される荷重には,圧力, 自重及び地震力に加えて,冷却材の温度変化によって生じる荷重がある。冷却材温度変化が構造材 に伝わり内部に温度差が生じると,膨張と収縮す る部材のせめぎ合いで熱応力が発生する。

高速炉では、冷却材として使用されるナトリウ ムの比熱が水の1/3以下であるため軽水炉に比べ て炉心出入口温度差が200 程度拡大され、系統の 温度変化幅が大きくなると共に運転温度が高くな る。さらに、ナトリウムの構造材への熱伝達特性 が良いことから、系統温度変化が機器に与える熱 応力すなわち系統熱過渡荷重が厳しくなる。

系統熱過渡荷重には運転中に生じる事象の数だ け種類がある。図1に示す高速炉の系統図により それらを説明する。高速炉は,炉心で発生する熱



図1 高速炉の系統構成とシステムパラメータの例

研究報告

を安全に蒸気タービンに伝えるために燃料棒の隙 間に熱伝導の良い液体ナトリウム(1次ナトリウ ムと呼んでいる。)を流して熱を取り出し、その熱 を中間熱交換器で別の液体ナトリウム(2次ナト リウムと呼んでいる)に受け渡し,2次ナトリウ ムの熱が蒸気発生器内を流れる水を加熱する構成 となっている。ここで,起動又は停止により炉心 の発熱量が変化すると、1次と2次のナトリウム の温度が順次変化するため、プラント内に温度差 ができる。このため,それぞれの事象で系統熱過 渡荷重が発生する。仮に何らかの原因によって, 原子炉を緊急停止した場合、炉心の発熱は急激に 低下するため、より厳しい系統熱過渡荷重が発生 する。このように運転中には通常時から故障時ま で様々の事象があり,それらによる熱過渡条件も 種々に想定される。

22 系統熱過渡荷重の大きさに影響する因子

系統熱過渡荷重の発生機構は冷却材温度変化に 対する構造の温度と応力の応答であることから, その大きさは,冷却材温度変化の要因と構造応答 側の要因との両者の影響を受ける。

まず冷却材温度の要因について説明する。冷却 材の温度はプラント中の単位時間当たりの発熱量 と除熱量のバランスで決まる。発熱と除熱に関与 する因子を取り上げると,図1の例ではA~Hに 示すシステムパラメータである。したがって,こ れらはすべて系統熱過渡荷重の大きさに影響を与 える。これらのシステムパラメータは製作誤差や 評価誤差により変動する可能性があることから, プラントの基本的な系統と運用を決めるシステム 設計からはアウトプットとしてその変動範囲が示 される。

次は構造応答側の要因であり,これには温度の 応答と応力の応答の2種類がある。構造の温度応 答は部材の熱容量と熱伝達係数に依存する。熱容 量は主として材料と板厚に依存し,熱伝達係数は 冷却材の流速の関数である。その流速は図1中の A,C,D,E,Fの因子の影響を受ける。構造 の応力の応答は,温度応答の違いによって部材間 に生じた温度差と熱膨張変形の拘束の程度に応じ て生じるものである。したがって応力応答特性は 形状に依存する。

これらの結果,冷却材温度変化が同じであって も,応力の応答特性は構造ごとに大きく異なるこ とになる。図2にその例として,炉心出口の冷却 材温度変化に対する配管構造とYピース構造の応 答の違いを示す。配管は板厚の内面と外面の応答 の差に起因する板厚方向温度差が熱応力の要因と なる。この場合,温度変化速度が大きいほど,温 度差がつきやすいことから,冷却材の温度変化速 度に敏感な応答特性を有する。一方,Yピース構 造では冷却材に接する容器壁と接しない支持部の 温度差が応力の要因である。時間が経過すると容



図2 形状に依存する熱応力の応答特性

器壁の温度は冷却材の温度に追従することから, 冷却材の温度変化速度よりは温度変化巾に敏感な 応答特性を有することになる。

#### 3. 従来の熱流動・構造個別設計法

系統熱過渡荷重に対する機器構造設計の目的 は,系統設計側から運転中に考慮するべき事象と システムパラメータの変動範囲を受け取り,これ に耐えうる構造形状を設計することである。従来 の設計は,図3に示すようにシステムパラメータ の変動を考慮して厳し目になる熱過渡条件を設定 する熱流動設計と,設定した熱過渡条件の下で成 立する形状を求めるという,熱流動と構造の個別 の設計手順が採られていた。

熱流動設計の目的である厳し目の熱過渡条件設 定には二つの課題がある。一つは、冷却材の温度 変化は発熱と除熱に係るシステムパラメータの複 雑な相互関係で決まるため、システムパラメータ の値を比較しただけでは熱過渡条件への影響度が 予想できないことである。もう一つは、同一温度 に対する各機器ごとの応力の応答が異なることか ら、プラント全体に対して安全側となる熱過渡条 件を設定することが難しい点である。そこで、前 者に対してはシステムパラメータの変動による流 体温度の振れ幅を把握するため、パラメトリック な熱流動解析が実施される。後者に関しては、熱



流動解析の結果に対して安全係数を考慮した多直 線処理を施し,実際より厳しい熱過渡条件を設定 するようにしている。具体的には,図4に示すよ うに,熱流動解析の結果を時間領域でプレークポ



図4 従来の熱流動・構造個別設計法で得られた実証炉中間熱交換器の熱過渡条件

サイクル機構技報 No.16 2002.9

研究報告

85

イントを設けて区分し,各領域の最急勾配で接続 した多直線による温度変化図を作る。さらに各線 分に温度変化幅を拡幅する係数と温度変化速度を 速くする係数を掛け,接続することによって最終 的な熱過渡条件をつくる。ここで,温度変化幅と 勾配に対する係数は熱流動解析によって得られた 流体温度の振れ幅に工学的判断を加えて設定する。

次の段階の構造設計では,冷却材温度変化を前 提条件として,その条件の下での健全性の確認作 業が行われる。つまり,形状を設定して与えられ た熱過渡条件に対する構造解析を実施して熱応力 を求める。応力が制限値を超えている場合は,そ れが許容値以下となるまで形状の変更と構造解析 を繰り返す。ここでの課題は,発生応力が厳しい 場合でも原則として熱過渡条件を決めている設計 の上流には戻れないことである。

例として,実証炉の中間熱交換器の内部構造で ある水平多孔板の手動トリップに対する熱過渡荷 重評価(図1)を取り上げると,冷却材の温度変 化に影響するシステムパラメータとその変動範囲 が表1のように与えられた場合の水平多孔板の手 動トリップに対する熱応力を評価することが課題 である。表中のノミナル条件(NOM)に対する熱 流動解析の結果と多直線化によって得られた熱過 渡条件を図4に示す。設定した熱過渡条件に対す る中間熱交換器水平多孔板に生じる最大熱応力は 462 MPa であった。

- 4.熱流動-構造統合解析によるシステムパラ メータと発生熱応力の関係把握
- 4.1 膨大な計算量 本章では,システムパラメータの組合せに対す る冷却材温度と熱応力の両者の応答を解析するこ

とによって,システムパラメータと発生熱応力の 関係を直接把握する熱流動 - 構造統合設計法(図 5)を提案する<sup>1)</sup>。この方法により,次章以降で述 べる系統熱過渡荷重の緩和設計が可能となる。

図5のフローを実現させる上での課題は,すべ てのシステムパラメータの組合せに対して熱流動 解析と構造解析を実施するとなると,膨大な計算 量が発生することである。

これを現実的な計算時間内で実効的に達成する ための方法として,実験計画法と熱流動-構造統 合解析コードとを組合せた方法を提案する。



図5 提案する熱流動・構造統合設計法

	パラメータ			
	MIN*	NOM * *	MAX * * *	
A.ポンプトリップ遅れ時間		0.3秒	2 秒	
B.炉心崩壊熱	- 44%	NOM	+ 12%	
C.1次ポンプ流量半減時間	5 5秒	6 5秒	7.1秒	
D . 2次ポンプ流量半減時間	5 5秒	6 5秒	7.5秒	
E . 1次ポンプポニーモータ流量	13%	15%	17%	
F . 2次ポンプポニーモータ流量	7 %	8 %	9 %	
G.トリップ後のSG給水流量	22%	25%	25%	
H.トリップ後のSG給水温度	- 3	トリップ時温度	+ 3	

表1 実証炉中間熱交換器の熱過渡条件に影響するシステムパラメータ

\*設計最小值 \*\*設計最確值 \*\*\*設計最大值

# 42 実験計画法による解析ケースの削減と感度 評価

品質管理の著名な手法である田口メソッド<sup>2</sup>に 採用されている直交表を用いた実験計画法を適用 すると、システムパラメータの組合せによって生 じる膨大な解析ケースを大幅に削減した上で、パ ラメータに対する感度を得ることができる。実験 計画法とは、条件割付の直交性を利用し、複数の 因子が結果に与える影響を少ない試行回数で合理 的に評価する手法である。また、同時に要因効果 分析の機能により因子が結果に与える影響度も定 量評価できる。ここでは、その考え方を簡単に述 べる。

最小構成の例として 結果に影響する因子がA, B, Cの三つの問題を考える。実験計画法ではそ れぞれの因子の変動範囲を水準と呼ばれる離散値 で表す必要があるため,ここでは水準が最小の2 つの場合を考える。これらすべての因子の組合せ について実験を行うとすると,2<sup>3</sup>=8通りの実験 が必要だが,表2に示す直交表L4を用いると,表 中に示す4通りで済む。たとえば実験1はA1(A が水準1), B1, C1という組合せで実施する。こ こで,2つの列を見ると,いずれも1と2という 水準の組合せであり,4通りの組合せは(1,1), (1,2),(2,1),(2,2)が同じ回数で現れ ている。この2列を「直交」していると呼ぶ。直 交表ではすべての列が直交している。直交表を見 ると, Aが1の実験(上2段)では, Bは1と2 が1回ずつ, Aが2の時の実験(下2段)でもB は1と2が1回ずつである。上2段と下2段を比 べると,上2段も下2段もBは1,2が1回ずつ 出てきており,相違点はAが1か2であるかとい う点だけである。したがって,上2段と下2段の 平均を比べると, Bの影響は等しく入っており, Aの効果だけを評価できる。厳密な説明は文献<sup>2)</sup>を 参照いただきたい。

表1に示した実証炉中間熱交換器の熱過渡条件 に影響するシステムパラメータは,因子が8種類

表2	直交表	L4 (	(2³)	の例
----	-----	------	------	----

	A	В	С
実験 1	水準 1	水準 1	水準 1
実験 2	水準 1	水準 2	水準 2
実験 3	水準 2	水準 1	水準 2
実験 4	水準 2	水準 2	水準 1

で水準は3又は2であるため,これに対応するに はL18の直交表を利用する。表1のパラメータの すべての組合せは4,374通りとなるが,L18の直交 表によってこれを18通りに削減できる。

# 4.3 熱流動 - 構造統合解析コードによる計算時 間の削減

熱流動 - 構造統合解析コードPARTS (Program for Arbitrary Real Time Simulation)を開発<sup>3)</sup> する ことにより,種々のシステムパラメータの入力か ら熱応力の応答計算を短時間で実行できるように した。

系統熱過渡は熱流動と構造の複合現象であるこ とから,その解析には現象ごとに以下の手順を踏 んだ作業が必要である。

- 系統の動特性モデルの作成とシステムパラ メータの入力
- ② 動特性解析による系統の冷却材温度変化の予 測(必要に応じて多次元熱流動解析による機器 内部の局所的温度変化の予測を実施)
- ③ 構造温度応答解析モデルの作成と冷却材温度 変化と流速から評価される熱伝達係数の入力
- ④ 非定常熱伝導解析による構造温度応答の予測
- ⑤ 構造熱応力解析モデルの作成と構造温度応答 の入力
- (a) コード間でのデータの受け渡しに必要な中間 データの蓄積と様式変換に時間がかかる。例え ば 動特性解析からはプラント全体の温度変化, 流速等が時刻歴として得られるが,これを次の 段階の構造温度応答解析モデルに受け渡すに は、場所ごとに全時刻歴データを記憶しておき, 流速から熱伝達係数への変換等の,構造解析 コードに適合する形式への変換が必要である。
- (b) プラントの動特性モデルとシステムパラ メータの設定には,ループ数や機器のレイアウ トといった系統全体のレベルから,機器ごとの 熱容量等の局所的なものまで,入力データの種 類と数が多いため,システムパラメータの組合 せを変更しつつ解析を実施する場合に入力に時 間がかかる。

(c)熱応力の解析に通常の有限要素法を使用する

と計算時間がかかる。なお,動特性解析は一般 に1次元のフローネットワークコードが使用さ れるため,応力解析に比較すると時間がかから ない。

これらの課題を解決するため, PARTS コード に以下の機能を実装した。

- (A) コード間のデータの受け渡しを省くため,必要な熱流動と構造コードを統合した。内部では計算モデル間のデータ変換と転送は自動的に行われ,中間データは特に指定しない限り記憶されない。
- (B) コードを統合すると,初期に必要な入力データの数が増え上記(b)の課題を助長することになる。そこでオブジェクト指向技術によって計算コードを大きく流体計算部品<sup>(b)</sup>と構造計算部品<sup>(b)</sup>に分けた上で,それぞれのグループをさらに配管や熱交換器といった機器単位の自律計算部品で構成し,それらをビジュアルに扱えるようにした。このようにして実現したコードの入力画面を図6に示す。ユーザはあらかじめカタログに用意された機器単位の標準部品を中央のシミュレーション台に載せマウスで連結することで解析モデルを構築できる。システムパラメー

タ等の局所的なデータは部品をクリックすると その場で入力できる。

(C)熱応力計算時間は、計算法を有限要素法から Green関数法(%RL(#))に変更することで短縮した。 Green関数法は図7下に示すように、単位ステ ップ入力に対する応答をあらかじめ用意してお き、時々刻々の入力データに対してこれを畳込 積分することによって、任意波形に対する応答 を得るものである。流体温度の単位ステップ入 力に対して構造の温度応答と応力の応答を直接 計算することができる。Green関数法の課題は 単位ステップ入力に対する応答を評価する方法 であり、有限要素法によって計算することも可 能であるが、時間短縮に反する。そこで、ここ では典型的な形状に対する応答特性をニューラ ルネットワーク(NN)<sup>%RL(T)</sup>に記憶させ、類似の 形状に対する応答を推論させるようにした<sup>6)</sup>。

## 4.4 実証炉の水平多孔板設計の例

実験計画法と熱流動 - 構造統合解析コードによ る解析法を,図1で述べた実証炉の水平多孔板の 手動トリップに対する熱過渡設計に適用した 例<sup>90011</sup>を示す。表1のパラメータを実験計画法に



図6 オブジェクト指向によってモデル化が容易なPARTS コードの入力画面



畳込積分による熱応力応答 σ(t)の計算

図7 NN と Green 関数法による高速計算

-								
ケース	A .ポンプトリ	B 岩博教	C .1 次主ポン	D.2次主ポン	E.1次ポンプ	F.2次ポンプ	G.トリップ後	H.トリップ後
No.	ップ遅れ時間		プ流量半減時間	プ流量半減時間	ポニーモータ流	ポニーモータ流	のSG給水温度	のSG給水流量
1	1 NOM	1 MIN	1 MIN	1 MIN	1 MIN	1 MIN	1 MIN	1 MIN
2	1 NOM	1 MIN	2 NOM	2 NOM	2 NOM	2 NOM	2 NOM	2 NOM
3	1 NOM	1 MIN	3 MAX	3 MAX	3 MAX	3 MAX	3 MAX	3 MAX
4	1 NOM	2 NOM	1 MIN	1 MIN	2 NOM	2 NOM	3 MAX	3 MAX
5	1 NOM	2 NOM	2 NOM	2 NOM	3 MAX	3 MAX	1 MIN	1 MIN
6	1 NOM	2 NOM	3 MAX	3 MAX	1 MIN	1 MIN	2 NOM	2 NOM
7	1 NOM	3 MAX	1 MIN	2 NOM	1 MIN	3 MAX	2 NOM	3 MAX
8	1 NOM	3 MAX	2 NOM	3 MAX	2 NOM	1 MIN	3 MAX	1 MIN
9	1 NOM	3 MAX	3 MAX	1 MIN	3 MAX	2 NOM	1 MIN	2 NOM
10	2 MAX	1 MIN	1 MIN	3 MAX	3 MAX	2 NOM	2 NOM	1 MIN
11	2 MAX	1 MIN	2 NOM	1 MIN	1 MIN	3 MAX	3 MAX	2 NOM
12	2 MAX	1 MIN	3 MAX	2 NOM	2 NOM	1 MIN	1 MIN	3 MAX
13	2 MAX	2 NOM	1 MIN	2 NOM	3 MAX	1 MIN	3 MAX	2 NOM
14	2 MAX	2 NOM	2 NOM	3 MAX	1 MIN	2 NOM	1 MIN	3 MAX
15	2 MAX	2 NOM	3 MAX	1 MIN	2 NOM	3 MAX	2 NOM	1 MIN
16	2 MAX	3 MAX	1 MIN	3 MAX	2 NOM	3 MAX	1 MIN	2 NOM
17	2 MAX	3 MAX	2 NOM	1 MIN	3 MAX	1 MIN	2 NOM	3 MAX
18	2 MAX	3 MAX	3 MAX	2 NOM	1 MIN	2 NOM	3 MAX	1 MIN

表3 システムパラメータの実験計画法による直交表L18への割り付け

よる直交表L18へ割り付けると表3のようにな る。PARTSコードで実証炉モデルを構築し,表3 に示された18ケースのシステムパラメータの組合 せに対する手動トリップ時の中間熱交換器水平多 孔部の冷却材温度変化と熱応力の応答を計算し た。PARTSコードの出力結果を図8及び図9に示 す。システムパラメータによって,温度と応力の 応答に変化が生じることが分かる。

次に実験計画法の要因効果分析の機能により評価された熱応力の最大値と最小値を与えるシステムパラメータの組合せとその時の発生応力を予測した結果を表4に示す。これらの組合せは18ケースの解析には含まれておらず,応力は推定値である。これを確かめるため,実際に最大値と最小値







図9 PARTS コードによって計算した熱応力変化

サイクル機構技報 No.16 2002.9

90

システムパラメータ	最小	最大
ポンプトリップ遅れ時間	MIN	NOM
崩壊熱	MAX	MIN
1次ポンプ流量半減時間	MAX	MIN
2 次ポンプ流量半減時間	MIN	NOM
1 次ポンプポニーモータ流量	MAX	MIN
2 次ポンプポニーモータ流量	MIN	MAX
トリップ後のSG給水温度	MAX	NOM
トリップ後のSG給水流量	MIN	MAX
実験計画法による予想応力	277 .8	420 .9
パラメータ入力計算による確認	298 .1	413 .6
従来法によって評価した応力	-	462 .0

(単位MPa)

を与えるシステムパラメータをPARTSコードに 入力して計算を実行したところ,図8及び図9に 太線に示す応答と表4下段の応力値が得られた。 PARTSコードの計算結果413.6MPaは実験計画法 の推定値420.9MPaとほぼ近い値であったことか ら,実験計画法が妥当な応力推定を行うことが確 認できた。

最後に,実験計画法の要因効果分析機能で評価 した熱応力のシステムパラメータに対する感度を 図10に示す。この結果から,最も感度の高いシス テムパラメータは熱応力を約60 MPa変動させる 2次ポニーモータ流量であることが分かる。 5.系統熱過渡荷重の緩和

5.1 系統熱過渡荷重の合理的設定

システムパラメータと発生熱応力の関係が把握 されると、発生熱応力が最大となる熱過渡条件を システムパラメータの組合せから客観的に決定す ることができる。このようにして求めた熱過渡条 件の例である図8の流体温度変化を、同じ問題に 対して従来の熱流動・構造個別評価法で得られた 熱過渡条件である図4と比較すると、温度変化率 が緩和されていることが分かる。さらに、発生応 力を比較すると表4に示すように、従来法による 462 0MPaから提案法による応力は420 9MPaに 割合にして約9%緩和されている。このことから、 従来法の工学的判断で決められた安全係数には過 剰な裕度が含まれていたものと考えられる。

# 52 システムパラメータ調整による系統熱過渡 荷重の緩和

表4中の予想応力の最小値277 8MPaは,シス テムパラメータを与えられた変動巾の中で組合せ た場合に実現される最小の発生応力を意味してい る。これは割合にすると35%の応力低減となる。 したがって,システムパラメータの誤差を小さく して応力最小となる値に近づけることによって, 理想的にはこのレベルまでの荷重緩和が可能であ る。



図10 実験計画法で評価した熱応力のシステムパラメータに対する感度

91

また,システムパラメータの中にはプラントの 性能への影響よりも熱荷重に対する影響が大きい ものが存在する。したがって,安全性や性能へ影 響を与えない範囲で系統熱過渡荷重に感度が大き いシステムパラメータを積極的に調整すること で,系統熱過渡荷重を緩和することができる。

例えば,ポンプコーストダウン特性やポニー モータ流量は,プラントの性能を左右する定常運 転には無関係であることから,安全性に影響のな い範囲で調整可能である。実際に, Super Phenix 等では,建設後にトリップ後のポンプ流量が変更 された例がある。実証炉の水平多孔板の例では、 図10に示すように発生熱応力に最も大きな影響を 与えるのは2次ポンプポニーモータ流量であり, これを調整することで発生応力を約60MPa(約 18%)変化させることができる。ポニーモータ流 量は原子炉停止時に補助的に使用するモータによ る流量であり,発熱部と冷却部の熱の仲立ちに間 接的に関与する。炉心の崩壊熱の除去性能に影響 するため,安全性の観点からの許容範囲を定めた 上で調整することによって応力を低減することが 可能である。

# 6.結論

実験計画法と熱流動 - 構造統合解析コードを組合 せることによりシステムパラメータと発生熱応力 の関係を直接把握する方法を提案した。

本方法により,従来の熱流動・構造個別設計法 による条件より緩和された系統熱過渡条件をシス テムパラメータの組合せから客観的に決定するこ とができる。さらに,安全性や性能への影響の無 い範囲で,系統熱過渡荷重に感度が大きいシステ ムパラメータを調整することで,系統熱過渡荷重 を緩和することも可能である。

# 7.おわりに

系統熱荷重を与える事象には運転状態に応じた 多くの種類があり,最も厳しい条件を与える事象 が構造部位によって異なることから,プラント全 体を評価するには,相当数の事象に対する熱過渡 解析が必要となる。そのすべてに対してここで提 案した方法を適用することは現実的ではないこと から,プラント設計上クリティカルとなる熱過渡 条件と構造部位の組合せを絞る必要がでてくる。 もんじゅと実証炉で熱過渡荷重が設計上クリティ カルとなったのは,起動時の原子炉容器液面の応 力,1次主循環ポンプ軸固着時の中間熱交換器管 板等の限られた組合せであったことから,絞り込 みは可能と考えられる。現在そのためのスクリー ニング手法の開発に着手しており,ここでは考え 方だけを述べる。流体温度変化に対する構造の応 答はある時定数を持っており,流体温度の変化速 度が時定数に近いと発生応力は温度変化に敏感と なり,温度変化が時定数より遅いと発生応力は小 さくなる。この性質を定量化して,発生応力が熱 過渡条件に敏感になる組合せを選定する方法を研 究している。

概念設計用に開発した熱流動解析 - 構造統合解 析コードPARTSは,詳細設計に適用するには解析 精度の改善が必要である。機器の内部熱流動を考 慮するための多次元熱流動解析モジュールとの接 続,Green関数の精度が低下する複雑境界条件問 題へのFEM解析の部分使用等を,改善策の候補と して考えている。

### 謝辞

本研究を進めるに当たり,株式会社東芝の井上 正明氏にはPARTSコードを使用した解析モデル 作成でご助力頂きましたことに 謝意を表します。 また,日本原子力発電(株)の田中良彦氏,CRC ソ リューションズ(株)の古橋一郎氏には有益な助言 を頂きましたことを御礼申し上げます。

さらに,電力9社,電源開発(株)及び日本原子 力発電(株)による電力共研「高速増殖実証炉の開 発に関する研究」の成果を引用させて頂きました。 ここに深く感謝の意を表します。

#### 参考文献

- N.Kasahara, M.Inoue," Object Oriented Design Procedure for Nuclear Components Against Thermal Transient Stress ", ASME, PVP Vol.360, Pressure Vessel and Piping Codes and Standards (1998)
- 2 ) W.Y.Fowlkes, C.M.Creveling," Engineering Methods for Robust Product Design: Using Taguchi Methods in Technology and Product Development ", Prentice Hall PTR( 1995)
- 3) 笠原直人,井上正明, オプジェクト指向過渡熱応力 リアルタイムシミュレーションコードPARTS(1)プ ロトタイプの設計 機械学会,第8回計算力学講演会 講演論文集",516(1995)
- 4)井上正明、笠原直人、オブジェクト指向過渡熱応力 リアルタイムシミュレーションコードPARTSの開 発(2)熱流動計算サブシステムの開発 機械学会"第

サイクル機構技報 No.16 2002.9

- 9回熱工学シンポジウム講演論文集(1996)
- 5) 笠原直人 井上正明 (オプジェクト指向過渡熱カリ アルタイムシミュレーションコードPARTSの開発 (3)構造計算サプシステムの開発 "機械学会 第9回 熱工学シンポジウム講演論文集(1996)
- 6 ) G.L.Steeevens, S.Ranganath," Use on on line fatigue monitoring of nuclear reactor components as atool for plant life extension ", PVP Vol.171, ASME (1989)
- 7) 吉村 忍 ; 材料・構造問題におけるニューラルネッ トアプローチ ", 機会学会材力講演会論文集 500, (1993)
- 8) 笠原直人,吉川信治, ニューラルネットワークと Green 関数法による過渡熱応力高速計算法"機械学 会計算力学講演会講演論文集,114 (1996)
- 9) 井上正明 平山 浩 他 "系統熱過渡荷重への影響因子の調査" JNC TJ9440 99 017(1999)
- 10) 井上正明,神保雅一.他;熱流動-構造統合解析コー ドの系統熱過渡解析への適用性調査",JNC TJ1420 2001 001(1999)
- 11) 神保雅一,井上正明,他;統計的手法を用いた熱流動 - 構造統合設計手法の開発"原子力学会 秋の大会, J28(2001)