PNC TN9410 96-300

公開資料

高速増殖炉の「炉心変形検討会」

平成７年度活動報告

１９９６年10月

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については，下記にお問い合わせ下さい。
〒311－13　茨城県東茨城郡大洗町成田町４００２
動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター　システム開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to:Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-chō, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-Ken, 311-13, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)1996

Ⓐ

公　開　資　料
PNC TN9410 96-300
1 9 9 6 年 1 0 月

高速増殖炉の「炉心変形検討会」平成7年度活動報告

大洗工学センター
炉心変形検討会

要　旨

炉心変形は核－熱－構造が連成する複合現象であるため、実炉データの分析、炉外実験への要望事項の検討、解析コード開発・整備計画の検討などへの取り組みの一体化を図り、研究開発の効率的な推進に資することを目的として、大洗工学センターの12関連課室で炉心変形検討会を開催し、技術情報の収集と共有化を行っている。本報告書は、各課室の研究開発現状の把握及び研究ニーズと課題の明確化を目標とした平成7年度の炉心変形検討会の活動状況及び成果を報告するものである。

PNC TN9410 96-300
October, 1996

Report of FBR Core Deformation Task Force in 1995 Fiscal Year

O-arai Engineering Center
Core Deformation Task Force

A core deformation in an FBR is a very complex phenomenon in which core physics, thermohydraulics and structural response couples each other. To promote the R&D works related to the core deformation phenomenon, a task force composed of twelve sections in the O-arai engineering center was organized to conduct the technical discussion and information exchange of reactor data, demands to out-pile experiments, the development of analysis codes, and so on. This report presents the results of the core deformation task force in the 1995 fiscal year's activity concerning the clarification of research needs and R&D issues.

炉心変形検討会委員リスト

主査　：　前田安全工学部長代理

副主査：　佐藤熱流体室長

委員　：　システム開発推進部

プラント工学室	赤津副主研
	戸澤
実証炉炉心Gr.	池上主幹
	川島

基盤技術開発部

熱流体技術開発室	大島副主研
構造・材料技術開発室	月森担当役
	根岸副主研
燃料技術室	水野副主研
	上羽研究員
炉心技術開発室	若林室長
	石川室長代理
	日向野

安全工学部

原子炉工学室	上出副主研
機器・構造安全工学室	青砥室長代理
	堀切主査
	西浦研究員

燃料材料開発部

照射燃料集合体試験室	小泉研究員

実験炉部

技術課	福家研究員

	鳥丸
原子炉第一課	伊東主査

事務局： システム開発推進部

研究管理室	井上研究員
	小井副主研
	長谷部副主研

目 次

第1章 緒 言 …… 1

第2章 解析コード開発の現状と計画 …… 4
2．1 熱流動解析コード …… 4
2．1．1 全炉心熱流動解析コード（ACT） …… 4
2．1．2 単相多次元熱流動解析コード（AQUA） …… 5
2．1．3 ラッパ管群温度解析コード（TETRAS） …… 6
2．1．4 プラント動特性安全解析コード（SSC） …… 7
2．2 構造解析コード …… 8
2．2．1 炉心機械挙動解析コード（PRECISE） …… 8
2．2．2 汎用非線形構造解析コード（FINAS） …… 11
2．2．3 三次元炉心湾曲解析コード（BEACON） …… 12
2．2．4 バンドル変形解析コード（BAMBOO） …… 13
2．3 核特性解析コード …… 14
2．3．1 拡散コード（CITATION） …… 14
2．3．2 摂動コード（PERKY） …… 14
2．3．3 輸送コード（NSHEX） …… 15

第3章 実験データ取得の現状と計画 …… 18
3．1 インターラッパーフロー試験 …… 18
3．2 炉外炉心変形試験 …… 19
3．3 炉心材料の照射特性 …… 21
3．4 「常陽」燃料集合体の照射後変形量測定試験 …… 23
3．5 「常陽」を用いた炉心湾曲評価システムの検証 …… 24
3．6 炉心湾曲挙動の測定手法の開発 …… 25
3．7 「常陽」燃料集合体の引抜荷重試験 …… 26
3．8 炉外バンドル圧縮試験 …… 27

第４章　炉心変形挙動の分析と評価手法の開発計画 …… 29

４．１　炉心変形挙動の分析 …… 29

４．２　解析コードの体系化と実験検証データの必要性 …… 30

４．３　評価手法の高度化 …… 32

４．４　実証炉の炉心燃料設計への対応 …… 34

４．５　実用炉への展開 …… 35

第５章　まとめ …… 41

参考文献 …… 42

付　録

A-1　技術会議報告資料 …… 79

A-2　炉心特性計算コード入出力データ一覧表 …… 136

表リスト

表2-1　実効増倍率及び制御棒価値計算結果の比較 …… 44
表2-2　領域平均中性子束計算結果の比較 …… 44
表4-1　熱的支配因子に関連する試験 …… 45
表4-2　機械的支配因子に関連する試験 …… 46
表4-3　核的支配因子に関連する試験 …… 47
表4-4　ダクトレス炉心の構造解析実施上の課題 …… 48

図リスト

図2-1　全炉心解析コードによるプラント概念図 …… 49
図2-2　AQUAコードによる解析モデルのメッシュ分割 …… 50
図2-3　AQUAコードによる炉心部の温度及び流速場の解析結果 …… 51
図2-4　TETRASコードの計算フロー …… 52
図2-5　SSCによる30%出力からのULOF条件におけるFFTF炉の反応度変化予測解析結果 …… 53
図2-6　炉心機械挙動解析コード（PRECISE)の入力 …… 54
図2-7　炉心湾曲解析処理の流れと前処理・後処理プログラムの関係 …… 55
図2-8　BAMBOOコードでの燃料ピンモデル＝2節点円筒管断面の梁要素 …… 56
図2-9　BAMBOOコードでのピン扁平化（弾性変形）の取扱い …… 56
図2-10　BAMBOOコードによる圧縮試験解析結果 …… 57
図3-1　インターラッパーフロー水試験（TRIF)の概要 …… 58
図3-2　ラッパー管変形試験装置 …… 59
図3-3　FMF集合体寸法測定装置 …… 60
図3-4　照射後集合体曲がり量 …… 61
図3-5　炉心湾曲解析システムフロー …… 62
図3-6　定格出力運転時の炉心構成要素の湾曲形状 …… 63
図3-7　集合体頂部変位検査装置の概念図 …… 64

図3-8　圧縮試験前後のカバー付荷重測定素子外観 …… 65
図3-9　カバー付荷重測定素子の炉外試験結果 …… 66
図3-10　新燃料交換機概略図 …… 67
図3-11　X線CT画像 …… 68
図4-1　起動・停止を含む通常運転時の炉心変形挙動 …… 69
図4-2　過渡時の炉心変形挙動 …… 70
図4-3　既存解析コードの組合せによる炉心変形解析システム …… 71
図4-4　炉心変形統合解析システム …… 72
図4-5　ダクトレス・ノズルレス炉心燃料集合体 …… 73
図4-6　隣接する２体のダクトレス集合体を対象とした熱流動解析結果の一例 …… 74
図4-7　炉心槽内熱流動解析の一例　流速ベクトル分布 …… 75
図4-8　燃料集合体単体での炉心変形解析結果の比較 …… 76
図4-9　ダクトレス燃料集合体配置 …… 77
図4-10　ダクトレス炉心課題と開発手順 …… 78

第1章　緒　言

高速増殖炉（以下、FBRとする）の炉心変形挙動は、熱膨張または中性子照射によるスエリングで炉心構成要素（燃料集合体、ブランケット燃料集合体、遮蔽体等）が湾曲することにより、集合体や炉心支持構造物が相互に干渉し合い、その結果発生するクリープ等の挙動を含む広い範囲の現象である。

炉心構成要素の湾曲が進むと、炉心構成要素相互間の接触荷重が増大し、炉心構成要素の構造健全性に影響を及ぼすとともに、燃料交換時の引き抜きまたは挿入荷重が過大となり燃料交換に支障が生じる。また、大きな残留変形が生じた炉心構成要素は、使用済燃料施設におけるそれらの取り扱いを困難にする。さらに、炉心変形が発生すると、ラッパ管内に収納されている炉心燃料要素の位置が移動し、炉心に反応度影響を与える。

FBRの経済性向上の方策のため燃料の高燃焼度化を目指しているが、その際、材料に対する中性子照射量が増大することから、スエリングによる炉心変形挙動が燃焼度を制限する重要因子の一つとなる。また、炉心変形が燃料取扱設備の設計条件を制限となる可能性もある。したがって、合理的な燃料設計を追求する観点から、炉心変形挙動を正確に把握し、予測精度の向上を図ることが必要とされている。

反応度効果については、FBR開発の初期に炉心変形挙動に起因した反応度異常を経験していることから、正の反応度係数とならないよう配慮する必要がある。また、近年は出力変動時における冷却材の温度変化を積極的に活用した受動的な安全特性に関する許認可性を確保すべく、炉心変形挙動を正確に把握し、予測精度の向上を図ることが期待されている。

起動・停止を含む通常運転時及び過渡時の炉心変形は、中性子束分布や温度分布並びにそれらに対応した構造変形が連成した複雑な現象であるため、大洗工学センターの数多くの関連課室（技術課、原子炉一課（原一課）、照射燃料集合体試験室（FMS）、照射材料試験室（MMS）、原子炉工学室（炉工室）、機器構造安全工学室（機安室）、構造材料技術開発室（構材室）、炉心技術開発室（炉心室）、燃料技術開発室（燃料室）、熱流体技術開発室（熱流体室）、プラント工学室（プラント室）、実証炉炉心グループ（実証炉Gr）など）において、種々の炉内及び炉外試験研究並びに解析手法の開発・整備が行われている。

炉内試験研究としては照射後集合体変形量測定試験（FMS）、燃料集合体引き抜き荷重測定試験（原一課）、炉外試験研究としては炉外炉心変形試験（機安室）、インターラッパーフロー試験（炉

工室）などがある。解析手法の開発・整備としては三次元輸送核特性解析コード（NSHEX：炉心室）、炉心構造応答挙動解析コード（PRECISE：構材室）、全炉心熱流動解析コード（ACT：熱流体室）などがある。また、技術課においてはTETRAS/BEACON/CITATIONを組み合わせた静的な炉心変形解析コードシステムの検証が実施されている。照射スウェリングや高温クリープなどの材料データについては、MMS、燃料室、機安室及び構材室においてデータベースの充実並びに評価式や評価基準の作成が行われている。プラント室においては、実用炉に向けたダクトレス炉心についての炉心変形の評価検討が行われている。

炉心変形検討会（以下、検討会）は、炉心変形挙動の要因である複合的な現象に対し、情報交換を密にして研究開発を円滑に推進することを目的に発足したものであり、平成7年度は5回、平成8年度は4回の計7回の検討会が開催された。

第1回　平成7年6月20日

検討会の進め方について議論するとともに、各課室（炉工室、機安室、熱流体室、構材室、炉心室、原一課、技術課、プラント室）の業務進捗状況を報告した。

第2回　平成7年7月28日

FMS、燃料室、技術課の業務進捗状況を報告した。

第3回　平成7年8月24日

機安室が実施しているラッパ管変形試験の概要説明と試験装置の見学を行った。

第4回　平成8年2月19日

炉心変形挙動の要因について議論し、各要因を評価する手法として各課室が整備している解析コードと実験データの十分性について議論した。

第5回　平成8年3月14日

熱流体室、構材室、技術課が所掌する関連解析コードについて、それらの特徴や開発計画を報告した。

第6回　平成8年4月2日

炉工室と炉心室が所掌する関連解析コードについて、それらの特徴や開発計画を報告した。

第7回　平成8年4月23日

炉工室がインターラッパーフロー試験について、FMSが「常陽」集合体の残留湾曲量と硬さ測定データの取得について、原一課が「常陽」新型燃料交換機による引抜荷重測定について、技術課が炉内検査装置による炉心構造物の変位測定及び集合体引抜き荷重評価についての現状と今後の計画を報告した。また、「炉心変形検討会平成7年度活動報告書」の目次（案）について議論した。さらに、熱流体室から実証炉の安全性評価における炉心変形に関するニーズの紹介を行った。

第8回　平成8年4月23日

機安室がラッパ管変形試験の現状と今後の計画を、燃料室が燃料開発における炉心変形評価の課題について報告した。また、実証炉Grから実証炉炉心設計研究における炉心変形評価の現状と評価手法開発への要望を報告した。

第9回　平成8年5月28日

報告書ドラフトについて各執筆担当者から説明を行い、それぞれに対してコメント等を出し合い討議した。

平成8年度の第3回技術会議において、平成7年度の上記検討会の活動内容と今後の計画を報告した。技術会議では、引き続き検討会活動を継続し、情報の共有化と効率的な研究開発の推進に努力してほしいとのコメントがあった。

第２章　解析コード開発の現状と計画

２．１　熱流動解析コード

２．１．１　全炉心熱流動解析コード（ACT）

全炉心熱流動解析コード（ACT : Analysis of whole Core Thermal hydraulics）は、燃料集合体と炉心槽との熱的相互作用を含む炉心全体の熱流動現象を詳細に解く解析コードである。対象とする炉心部は、多次元でモデル化された上部プレナム部及び一次冷却系と結合しているため、強制循環運転時のみならず、自然循環崩壊熱除去時のインターラッパーフロー（集合体間ギャップ流れ）やDRACS（直接炉心冷却系）作動時の炉心－プレナム相互作用の影響を含む全炉心の熱流動挙動を精度良く評価することが可能である。

高線出力・高燃焼度を目指した高性能炉心に対しては、燃料ピンのスウェリングなどによる燃料集合体内の冷却材流路変形による熱流力特性の変化や、集合体の炉内滞在長期化によるラッパ管の照射及び熱変形の影響を考慮して、燃料ピンやラッパ管の温度を評価することが可能である。また、冷却材流量低下時の炉停止失敗事象などを想定した場合の急激な過渡変化に対しては、炉心の径方向膨張及び変形量の評価に重要な径方向の熱移行効果やラッパ管ギャップ冷却材の熱容量を考慮して、炉心温度（冷却材、燃料ピン、ラッパ管などの温度）上昇を評価することが可能である。この時の炉心温度は、構造変形計算を介して核計算にフィードバックされ、最終的には炉心の反応度変化に反映される。

これらにより、通常運転時、過渡時、自然循環崩壊熱除去時などの種々の運転モードにおける炉心温度を、径方向熱移行やインターラッパーフローなど、従来、予測が困難であった現象を図2-1に示すように一次系とのカップリングも考慮して、炉心全体の温度挙動として精度良く評価することが可能となる。ACTコードに関する具体的な開発項目及び内容を以下に示す。

(1) インターラッパフロー解析部

サブチャンネル解析手法（ASFRE-IIIコード）をベースとして、炉心槽における燃料集合体ギャップ部の熱流動解析を行う。

(2) 燃料集合体内解析部

解析で注目する現象に応じて詳細度を選択する燃料集合体内熱流動解析部である。詳細版はASFRE-IIIコードをベースとしたサブチャンネル解析手法を、簡易版は二次元リングモデルを用いる。

(3) 炉心内熱流動解析部

上記のインターラッパーフロー解析部と燃料集合体内解析部とを熱的に結合し、フルセクターから1/12セクターまでの解析体系を選択して、炉心全体の熱流動特性を解析する。

(4) 上部プレナム内及び一次系ループ解析部

DRACSモデルを含む二次元／三次元上部プレナムの熱流動解析を行う。また、中間熱交換器（IHX）等で境界条件を設定することとし、炉容器の上部プレナムから下部プレナムまでを結合した簡易的な一次系ループモデルを用いる。

(5) その他

並列計算機の使用を前提とし、並列処理アルゴリズムを用いて上述の全ての解析部を統合して解析する。また、グラフィックを用いたプリ・ポストプロセッサシステムで、大規模解析における入力データ作成負荷の軽減及び解析結果のビジュアル化を行う。さらに、インターフェースをプログラムを用いて、炉心変形解析において重要な核計算及び構造変形計算との入出力データの受け渡しを行う。

ACTコードの検証については、各解析部の体系に対応したこれまで得られている実験データを用いて各部の検証解析を実施する。インターラッパー部については、炉工室で実施したPLANDTL-DHX試験データ及び３．１節のインターラッパーフロー試験のデータを用いて検証を行う。また、総合検証として動燃や独のカールスルーエ研究所（FZK、旧KfK）で実施した自然循環崩壊熱除去試験や、今後実施予定の大型ナトリウム試験施設による原子炉冷却系総合試験のデータを活用する。

２．１．２　単相多次元熱流動解析コード（AQUA）

炉心部の温度分布を精度良く評価するには、炉心を構成する各集合体内の出力や流量条件に加えて、集合体間ギャップ部のナトリウムの流れ（インターラッパーフロー）や径方向反射体部でのγ発熱などの影響を考慮する必要がある。ここではインターラッパーフローをモデル化した解析手法として、AQUAコードを用いた定格運転時の解析について述べる。

定格運転時のインターラッパーフローとしては、集合体と炉心支持板との隙間を通る集合体間ギャップ領域の漏洩流量がある。炉心熱流力設計では、炉心流量配分の観点から集合体流量への余裕を考慮して、この漏洩流量を1%程度とする設計例がある。これは集合体間ギャップの軸方向流速で数cm/sec程度となる。また、炉心燃料集合体出口からの流れは炉心上部機構（UIS）に当た

り、横方向に向きを変え上部プレナムに流出するが、この過程で炉心出口とUIS下面との間の領域の圧力がこの流路間の流動抵抗により、集合体間ギャップ領域よりも高くなる。この圧力差を駆動力として高温ナトリウムがUIS下部から集合体間ギャップ領域に侵入する流れが形成される。UIS下部にスカートを設けるなど、設計によってはこの圧力差が大きくなると、強いインターラッパーフローが生じる場合がある。前述の炉心支持板からの漏洩流は炉心入口温度相当の低温の流れであり、UIS下部からの高温の流れとの合流部で成層界面を形成するなど、浮力の影響を含んだ複雑な流れとなる。UIS下部から炉心部に侵入した流れは最終的に径方向反射体領域など、圧力が低い領域を通って上部プレナムに戻る。

AQUAコードは単相三次元熱流動解析コード[1]で、これまでに自然循環時のインターラッパーフローを対象とした実験解析が実施されている[2]。図2-2にAQUAコードを定格運転時のインターラッパーフローに適用した一例として、出力60万kWのFBR炉心部と上部プレナムの1/12セクターをモデル化した解析体系を示す。各集合体は矩形の領域としてモデル化され、そのまわりの集合体間ギャップ領域と同じの解析体系としている。このモデルでは、集合体とギャップ領域との伝熱面積に当たる集合体の周の長さが六角形と同じになるように、集合体を上下に押しつぶすように変形させている。また、上部プレナム、集合体及び集合体間ギャップの3つの領域は多次元メッシュ領域の中で連続して取り扱われており、プレナムから集合体間ギャップへ入り込む流れ、流出する流れが解析できる。

入力データは集合体の形状、流動抵抗係数、集合体間ギャップ部の流動抵抗係数、各集合体の出力、流量等である。本解析ではモデル化されていないが、炉心支持板からの漏洩流を取り扱う場合には、当該部分の流動抵抗係数も必要となる。なお、集合体間ギャップ幅を保つスペーサパッドについては本解析ではモデル化していない。炉心変形に関連する出力データとしては、炉心部各集合体のラッパー管温度分布を評価することができる。

解析結果を図2-3に示す。集合体間ギャップ部にはUIS下部から流入する流れが形成されており、この高温の流れが低温の径方向反射体を暖めながら外側に向かって流れ上部プレナムへ戻る。本解析手法により、このようなインターラッパーフローによる熱の輸送と、これによる炉心部の温度分布への影響を評価できる。

2．1．3　ラッパ管群温度解析コード（TETRAS）

TETRASコードは、核熱計算コードと三次元炉心湾曲解析コード（BEACON）のインター

フェースコードとして開発されたラッパ管群温度解析コードであり、ラッパ管壁温度の軸方向分布をBEACONコードの入力フォーマットに合わせて出力する機能を有している。主な入力データは、核熱計算コードで計算された各集合体の出力、中性子束及び冷却材流量である。

図2-4にTETRASコードにおける計算の流れを示す。TETRASコードは熱流動解析にPorous Body Model[3]を採用し、集合体断面を2つの領域に分割して、それぞれの領域の冷却材流速をあらかじめ実験あるいは解析に基づいて集合体内の全流量に対する比として与えている。これにより、エネルギー方程式のみを解いて集合体内の温度分布を求めている。また、当該集合体とその隣接する集合体を含む7体の集合体の中性子束を、仮想分点を用いて内挿（Askewの方法[4]）することにより、集合体内の中性子束分布を計算する。以下、①～④にその他の特徴を示す。

① 集合体はその流路断面形状の違いに応じて分類され、「常陽」では炉心燃料集合体、制御棒（下部案内管を含む）、内側反射体、外側反射体(A)、外側反射体(B)及び中性子源に分類

② 上記各集合体に対して、軸方向位置毎に流路断面モデルを設定し、「常陽」の燃料集合体では、燃料バンドル部とハンドリングヘッド部に分類

③ 制御棒は挿入部分と引抜領域（下部案内管+Na）に断面形状を区分し、制御棒毎に挿入位置を指定することにより多様な制御棒挿入パターンに対応

④ 集合体間の熱移動を取り扱う際に、集合体間ギャップ部の冷却材熱容量を考慮

なお、TETRASコードはBEACONコードの入力データ作成のために開発されたもので、コードの開発は終了している。

2．1．4 プラント動特性安全解析コード（SSC）

SSCコード（Super System Code）は、FBRの炉心から水・蒸気系に至るプラントシステム全体の熱流動特性を解析するプラント動特性安全解析コードである。解析対象事象は、通常の過渡事象から設計基準を越える厳しい事故事象（制御棒誤引抜、ポンプ軸固着、自然循環崩壊熱除去、配管破損事故など）までの広い範囲をカバーしている。また、プラント構成のモデル化に柔軟性があるため、実験炉のような小規模なプラントシステムから実用炉のような大規模なものまで解析可能である。

SSCコードは1976年から米国のブルックヘブン国立研究所（BNL）で開発が開始された。1981年に動燃に導入され、その後、「常陽」や「もんじゅ」を対象とした改良が行われている。最近

の改良項目としては、1987年の炉心径方向熱移行モデル、1990年の原子炉上部プレナム二次元モデル、1995年の二次系ループ非対称モデル及び自然循環時パラレル流路モデルなどが挙げられる。1993年には米国のFFTF炉を対象として、炉停止系不作動事象（ATWS）時のプラント挙動評価解析に適用され、図2-5に示すような炉心変形を考慮した反応度変化の予測に基づき、受動的安全性試験計画の具体的な試験条件を提案した。

SSCコードの今後の開発・整備計画としては、短期的には炉心部やプレナム部（炉心多チャンネル化、プレナム三次元モデル、インターラッパーフローモデルなど）及び水蒸気系（MINETモジュール）の改良を進め、自然循環崩壊熱除去解析や受動的安全特性解析の精度向上を図ることが挙げられる。また、中長期的には蒸気発生器の多次元多チャンネル解析モジュールとカップリングさせて、種々の水蒸気系の運用条件に対するプラント動特性評価に対する精度向上を図るとともに、沸騰凝縮モデルや炉心変形モデルを高度化する。

炉心多チャンネル化は炉心を集合体1体当たり1チャンネルで表現し、炉心内集合体毎の出力及び温度の空間分布をプラント応答解析に取り込むモデルである。沸騰凝縮モデルは、炉心のボイド化時における反応度フィードバックを考慮して空間的温度分布を詳細に評価する。プレナム三次元モデルは、炉心多チャンネル化や炉内熱交換器（DHX）が設置された炉容器上部プレナムのように流れの流速場及び温度場の空間分布を考慮する必要がある体系に対応したモデルである。また、炉心多チャンネルモデルの高速処理などには、数値解析に並列アルゴリズムを採用することも重要であり、領域分割法による数値解析の並列化も進めている。

インターラッパーフローは長時間での一巡自然循環が低下した際にその効果が顕在化し、炉心冷却パスの多様化及び複雑化により、炉心内温度分布へ影響する。自然循環解析にはインターラッパーフローを考慮することが必要であるため、炉心多チャンネル化とともに、インタラッパーフローによる炉心除熱を取り入れた炉心モデルを開発している。

水・蒸気系モジュール（MINETの最新バージョン）は米国NRCより入手済みであり、今後、SSCへ組み込まれる予定である。

2．2　構造解析コード

2．2．1　炉心機械挙動解析コード（PRECISE）

PRECISEコードは、並列計算技術を用いた全炉心体系での詳細炉心変形挙動解析コードである。従来、計算機容量及び速度の制約上ビーム（梁）要素等の簡易なモデルにより解析・評価されて

きた燃料集合体に、燃料ピンバンドルの影響も考慮できるシェル要素、ギャップと摩擦を考慮できる支持体要素及び部分接触を扱えるパッド部接触要素等を適用し、より詳細な炉心変形挙動の解析を行う。PRECISEコードの入出力ファイルの流れを図2-6に示す。

FBR炉心構造の特徴を考慮した解析アルゴリズムを並列計算機に適用することにより、大規模かつ高速な解析を実現する。燃料集合体の変形形状、永久変形量、パッドの接触反力、引抜き荷重等の解析結果は、炉心構造設計法の開発及び改良に反映される。また、過渡時における炉心の変形形状については、受動的安全評価に係る反応度フィードバック解析に反映される。以下に、PRECISEコードの特徴、機能、開発スケジュール及び主な入出力を示す。

(1) 解析コードの機能及び体系

① 解析範囲（全周、単列、任意）

・燃料集合体等の構造解析（弾性・弾塑性解析、クリープ解析、スウェリング解析）

・地震時における動的応答解析（開発検討中）

② 解析原理及び数値解法

・変位法による有限要素法

・行列解法は完全LU分解と共役勾配法（SCG）を併用

・完全LU分解はリオーダリングにより並列化を図ったBBD及びSSD法を使用

③ 荷重範囲

・機械的荷重（変位、自重、内圧等）

・熱的荷重（温度変化による荷重）

・環境荷重（照射スウェリングによる荷重）

④ 材料範囲

・弾性体（Hooke材）

・弾塑性体（Mises、Tresca等の降伏条件）

・クリープ（Misesのクリープポテンシャル、流れ則）

・スウェリング

⑤ 解析要素

・ダクト（梁要素、シェル要素）

・パッド（三次元接触要素）

・支持体（三次元支持体要素）

⑥ プリ・ポストプロセッサー

・専用プリプロセッサー

(2) 開発スケジュール

○1994年度　開発開始（調査及び設計）

○1995年度　炉心変形挙動解析プログラムの枠組み構築

・127本体系（7周）の線形解析の基本機能（梁要素）

・並列計算技術を利用した直接法によるソルバーの作成

・簡易プリプロセッサーの作成

○1996年度　解析機能の拡張

・非線形解析機能の組込み

・接触及び支持体要素の開発

・引抜き荷重、拘束解除後の残留変形計算機能追加

・VPP300への移植

○1997年度　解析機能の拡張及び計算効率の向上

・領域分割法の導入

・SCG法の導入

・解析要素の拡張（シェル、内包物モデル等）

・並列化チューニング及び検証解析

・専用プリプロセッサーの作成

・ポストプロセッサーの導入

○1998年度　解析機能の追加・拡張、計算効率の向上、解析規模の拡張

・地震時における動的応答解析機能追加

(3) 入力

① 燃料集合体等の形状・寸法（長さ、板厚、ピッチ等）

② パッド部の特性（パッド位置、初期ギャップ、摩擦係数、面間及びすべり方向剛性）

③ エントランスノズルの特性（形状、初期ギャップ及び摩擦係数）

④ 材料特性（弾塑性特性、クリープ特性及びスウェリング特性）

⑤ 温度履歴／分布（外部ファイル入力）

⑥ 中性子束分布（外部ファイル入力）

(4) 出力（FINASポストテープフォーマット形式）

① 燃料集合体等の変形形状（変位、角度、モーメント、応力、ひずみ等）

② パッド部のギャップ幅、すべり量、接触反力及び固着力

③ 燃料集合体等の永久変形量（変位、永久ひずみ及び残留応力）

④ 引抜き荷重

2．2．2　汎用非線形構造解析コード（FINAS）

FINASコードはFBRの構造設計並びに構造強度評価上のために開発された有限要素法による汎用非線形構造解析コードである。ここでは、FINASコードを炉心変形解析に適用するための前処理（プリプロセッサー）及び後処理（ポストプロセッサー）プログラムについて述べる。図2-7に炉心変形解析におけるプリ及びポストプロセッサーの処理の流れを示す。なお、FINASについては別途ユーザーズマニュアル等を参照されたい[5]。

(1) 炉心変形解析プリプロセッサー

全炉心を対象とした炉心変形解析では、モデルデータや積分点に付加する温度データ等が膨大となり、入力データを作成することが非常に困難である。プリプロセッサーは燃料集合体形状や寸法（長さ、板厚、ピッチ等）、パッド部の特性（パッド位置、初期ギャップ、摩擦係数）、材料特性等を入力することにより、FINASによる炉心変形解析のための全炉心体系入力データを作成する。また、炉心出口側のラッパ管温度分布データより、最小二乗法を用いて炉心からの距離と温度の関係式の係数を求め、全積分における温度入力データを作成する（なお、ユーザが係数を任意に設定することも可能）。

(2) 炉心変形解析ポストプロセッサー

全炉心体系の解析は解析結果が膨大となり、その取扱いは非常に困難となる。ポストプロセッサーは、FINASの解析結果（ポストテープ）から必要なデータを抽出する機能及びそのデータからグラフを作成する機能を有する。

データ抽出部は、FINASのポストテープから任意のステップで1/6炉心のデータを抽出し、相対変位（最大値、最小値、平均値）、軸力、曲げモーメント等を算出し、変位、ギャップ反力と合わせてCSV形式で各ファイルに出力する機能を有する。グラフ作成部はEXCELのマクロ

機能を用いて、データ抽出部により出力された変位、相対変位、軸力、曲げモーメントデータ等の各ファイルをEXCELのブック形式に変換し、ワークシートのグラフシートに各項目のステップ別のグラフを作成する機能を有する。

(3) 開発スケジュール

・1995年度　プロトタイププログラム作成

・1996年度　機能拡張

2．2．3　三次元炉心湾曲解析コード（BEACON）

三次元炉心湾曲解析コード（BEACON）は、前述のTETRASコードで求めたラッパ管六面の温度分布及び中性子束分布を入力し、ラッパ管の軸方向への非均一な熱膨張、中性子照射によるスエリング及びクリープ歪に起因する集合体の湾曲挙動を三次元的に解析するコードである。集合体は異方性断面を有する真直ビームで近似され、集合体の相互作用にはビーム理論、ラッパ管に作用する応力の解析には有限要素法を適用している。以下にBEACONコードの主な特徴を示す。

① 集合体の膨張としてラッパ管の軸方向への不均等な熱膨張、スエリング及びクリープ歪を考慮し、ラッパ管径方向については冷却材内圧によるラッパ管のクリープ変形を考慮

② 原子炉運転パターンを入力することにより任意の運転状態の炉心湾曲状態を計算するとともに、原子炉停止時には、炉心拘束を解除したときの炉心湾曲状態を計算

③ 炉外に取り出した集合体の残留変位を計算

④ 前サイクルまでの残留変位を用いて、次の運転サイクルにおける炉心湾曲を解析

⑤ 各集合体はその曲げ剛性の違いによって最大6種類に分類可能

⑥ 計算モデルは全炉心、1/3炉心あるいは1/6炉心を選択

⑦ 集合体間の接触位置は、計算コード内で自動的に探索し、スペーサパッド位置以外で接触した場合も解析

⑧ 集合体間のスペーサパッドの数は最大3個まで考慮可能で、スペーサパッドの軸方向位置及びパッド肉厚は各スペーサパッドごとに指定

⑨ 外部拘束は軸方向に最大3ヶ所まで設定し、拘束位置及び拘束距離（最外周の集合体と外側剛性壁との距離）は各拘束ごとに指定

⑩ エントランスノズル部支持方法に関しては、完全固定支持モデルと連結管内上下2点 支持

モデルが選択可能

BEACONコードの開発はほぼ終了しており、現在、「常陽」の照射後試験（PIE）データ等との比較により、計算モデルや入力条件の検討を行っている。

2．2．4　バンドル変形解析コード（BAMBOO）

BAMBOO（Behavior Analysis code for Mechanical interaction of fuel Bundle under On-power Operation）は、ワイヤスペーサ型燃料ピン束（バンドル）変形解析コードである。図2-8に示すように本コードでは燃料ピンを1/6ワイヤピッチ長2節点梁要素の連結によりモデル化し、各節点での隣接ピンとダクトとの接触を取り扱う三次元の有限要素法により燃料ピン束の機械的釣り合いを解析する。また、被覆管は荷重により偏平化するので、荷重・変形解析上はこれを図2-9に示すような等方変形モデルで簡易にモデル化している。また、熱膨張歪、スエリング歪を考慮し、弾性変形及びクリープ変形を解析する。図2-10は、BAMBOOコードによる炉外圧縮試験時バンドル変形解析結果の例を示した。

BAMBOOコードでは、バンドルの寸法と照射条件あるいは炉外変形試験条件を入力してバンドルの変形を解析し、接触点荷重、ピン－ダクト間距離、ピン－ピン間距離、被覆管の偏平化量等を解析結果として得る。コードはBDIによる流路変形、ピン－ダクト直接接触時期の予測解析に用いることを主眼としているが、炉心変形評価の観点からは、コードより得られる燃料ピンとダクトとの接触荷重等を、燃料ピンバンドルが集合体湾曲剛性等に与える影響の評価に反映できる。現状の適用可能範囲を以下に示す。

・スペーサワイヤ巻き付け燃料ピン三角配列バンドル

・169本長尺ピンバンドルもしくは271 本短尺ピンバンドルまでが実用範囲

・ピン変形モデル上はピン－ダクト直接接触が発生しない範囲

・ワイヤ巻ずれが小さい範囲

・照射変形解析及びバンドル圧縮試験解析

BAMBOOコードについては、以下の2点の改良を行う。

① 271 本長尺バンドルの解析機能の拡充

② ピン－ダクト直接接触以後の変形モデル導入

①については、実証炉クラスの大型バンドル（217本ピンバンドルで短ワイヤピッチのためバンドル内接触点が多い）について解析可能とするため、プログラムサイズの拡張、接触分離解析の高速化を行う。また、②については、ピン-ダクト直接接触以後の接触範囲、荷重分布の変化とそれにともなうバンドル及び冷却材流路変形を記述するモデルの開発・導入を図る。

コードの検証は炉外バンドル圧縮試験結果を用いて、バンドル変形によるピンーダクト間距離、ピンーピン間距離の変化及び被覆管の偏平化量を検証するとともに、照射試験データを用いて、ピン湾曲量、被覆管の偏平化量（ピンーダクト接触時を含む）を検証する。これらの概略工程を以下に示す。

① 1999年度：　実証炉クラスの大型バンドルへの解析機能拡大

② 1999年度：　ピンーダクト接触発生後の変形解析モデルの検討及び導入

③ 2003年度：　ピンーダクト接触発生後の解析に対する検証・改良

2．3　核特性解析コード

2．3．1　拡散コード（CITATION）

CITATIONコード[6]は、米国オークリッジ国立研究所で開発された炉心解析用の汎用コードであり、有限差分拡散理論により多次元体系の中性子拡散問題を解くことができる。本コードは固有値問題を計算する機能の他に、燃焼計算、一次摂動計算も解くことができ、断面積としてはマクロ及びミクロの両者が使える。FBR炉心解析では、オリジナルのCITATIONコードの他に、原研が非等方拡散係数を扱えるように入出力部などを改訂したCITATION-FBRコード[7]も用いられている。JUPITER解析では、主にこのCITATION-FBRコードの三次元XYZ体系または二次元RZ体系を用いて、実験解析の基準拡散計算としており、その後、輸送・メッシュ補正などの詳細計算モデルによる補正を施して最確解析値としている。

2．3．2　摂動コード（PERKY）

PERKYコード[8]は、拡散近似の摂動論を用いて物質反応度価値、反応度変化及び動特性パラメータを二次元及び三次元体系で計算するものであり、日本原子力研究所により1970年代後半に開発された。摂動計算に用いる中性子束及び随伴中性子束は、CITATIONコードの論理機番34のデータである。動燃に導入された際に、JOINTシステムと結合するように整備された（その後、JUPITER解析作業の中で、領域数の拡張や六角・三角メッシュ用ルーチンの追加など幾つかの修正

及び改良が加えられた）。以前より二次元及び三次元拡散摂動計算PERKYコードのバージョンとしてPNC版とFCA版があり、同一プログラムでありながら計算結果に違いが出る場合もあった。これを解消するために、PNC版をベースとしてコードを一本化し標準版が作成された。

2．3．3　輸送コード（NSHEX）

NSHEXコード[9),10)]はFBR体系、すなわち三次元六角体系の高精度な計算を目的として、動燃事業団と大阪大学の協力の下に開発を行っている計算コードである。六角格子体系に対応しているため、格子間の中性子バランスを正確に取り扱うことができ、さらにノード法を用いていることから、有限要素法と比較して計算機記憶容量及び計算時間の効率化を図ることができる。以下、基礎理論であるノード法、NSHEXコードの特徴及び検証計算結果について述べる。

(1) ノード法について

ノード法とは、比較的大きな領域、例えば1燃料集合体の空間分布を関数形（多項式展開）で取り扱う方法である。したがって、ノード法を適用することにより、有限要素法と比較して少ない計算機記憶容量及び計算時間で炉心計算を行うことができ、さらにメッシュ誤差も許容範囲に低減できる。

基本的には多次元の空間分布を方向毎（例えばx,y,z方向）に分割して各方向毎に一次元の詳細解析を行い、多方向の解析結果を組み合わせることにより、最終的な多次元空間分布を得るというものである。有限差分法では1つの空間メッシュ（単位計算要素）に対して、1つの代表的な値（例えば平均値）のみが情報として与えられていたが、ノード法では有限差分法のメッシュに対応してノードと呼ばれる空間領域をとり、ノード内の一次元空間分布を多項式展開によって取り扱い、それを多方向にわたって組み合わせることにより多次元分布を解析的に取り扱う。有限差分法で用いられるメッシュよりも大きな空間を単位計算要素とすることができ、計算要素数が少なくなるため、計算機記憶容量の低減及び計算時間の短縮を図ることができる。

具体的手法として、まず、二次元または三次元の中性子輸送方程式を注目する1つの方向に対し、ノード内で横方向（直交方向）に空間的に積分をすることにより、一次元の輸送方程式に変換する。NSHEXコードは六角体系に対応しているため、径方向に3方向と軸方向の計4方向の計算が必要である。そして、その一次元輸送方程式を各ノード各方向にわたって解析的に解き、4つの方向の結果を組み合わせることにより、最終的な三次元中性子束分布が得られる。

(2) NSHEXコードの特徴

六角体系用輸送ノード法は形状効果による誤差がないこと、計算時間短縮と計算機記憶容量低減が図れることから有効であることが知られており、NSHEXコードの開発以前には、六角体系用の輸送ノード法としてWagnerによりHEXNODコード[11]が開発された。しかし、計算精度上の課題があったため、動燃事業団は1991年に大阪大学の協力の下にNSHEXコードの開発を開始した。NSHEXコードは基本的には、XYZ体系用の輸送ノード法としてLawrenceとDorningらによって開発された手法[12]を六角体系用に変換することにより作成されたもので、それに計算精度の向上及び計算の効率化のために種々の改良を行ってきた。

NSHEXコードでは、ノード内中性子束の角度分布はTRITACコード[13]やHEXNODコード等と同じ離散化座標法（SN法）、すなわち、角度空間をメッシュ分割することにより離散的に取り扱う。また、ノード内中性子束分布は解析的に二次の多項式展開により取り扱う。先行して開発されたHEXNODコードに対するNSHEXコードの特徴としては、以下に示す中性子束及び横方向漏れの角度分布取り扱い手法が挙げられる。

① ノード内中性子束：注目方向に対する仰角方向成分のみの取り扱い（一次元SN法）に対し、全立体角方向成分にわたる取り扱い（二次元SN法）

② ノード境界中性子束：一方のノードからみた流出・流入それぞれに関する1次のルジャンドル多項式による取り扱い（Double P1近似）に対し、2次元SN法による取り扱い

③ 横方向漏れ：等方近似に対し、二次元SN法による取り扱い

NSHEXコードで用いているこれら3つの取り扱いは、計算精度の向上に対して有効である。

(3) NSHEXコードのベンチマーク炉心体系への適用

① 計算体系

NSHEXコードの適用例として、国際三次元中性子輸送ベンチマーク問題[14]における検証計算を示す。国際三次元中性子輸送ベンチマークは、1991年に大阪大学主催で行われ、提案されたXYZ系や六角体系の各炉心モデルに対し、世界各国の研究施設が所有する様々な決定論的輸送計算コードあるいはモンテカルロ計算コードを用いて体系計算を行った結果を比較したものである。あらかじめ計算体系毎に群定数が与えられていたので、各コードにより得られた計算結果には炉心各領域毎の格子計算モデルの差は含まれず、純粋に輸送計算コードの計算モデルの比較を行うことができる。

NSHEXコードの検証に用いた体系はモデル4の小型FBRモデル（KNK-II炉心モデル）である。この炉心は、小型炉であるから体系からの中性子の漏れが多く、また、燃料と反射材の一部に減速材が混入されているために非均質性が強く、炉心計算を行うと計算コード上のモデルの違いが現れる体系となっている。

② 計算結果

NSHEXコードを用いた結果と他の輸送計算コードを用いた結果との比較を実効増倍率については表2-1に、領域平均中性子束については表2-2にそれぞれ示す。これらの表はモンテカルロ法（GMVPコード）計算結果を参照解として、NSHEXコードの結果と従来のノード法計算コードHEXNODコードの結果とを比較したものである。

まず、実効増倍率の計算結果を見ると、HEXNODコードではモンテカルロ法の結果に対し約0.6%Δk/kの誤差が見られ、十分な計算精度が得られていないことが分かる。それに対しNSHEXコードでは、いずれの制御棒挿入状態においても、モンテカルロ法の結果に対し約0.1%Δk/k以内の一致が見られ、HEXNODコードに対して誤差が約6分の1に低減されていることが分かる。制御棒価値に関してもNSHEXコードによる結果の方が良く一致している。

次に、領域平均中性子束については、制御棒全引き抜き体系ではHEXNODコードの結果は1%を越える誤差が見られるのに対し、NSHEXコードの結果は1%以内でモンテカルロ法の結果と一致している。また、制御棒全挿入体系については、両コードとも誤差が大きくなる傾向にある。NSHEXコードではテスト領域の最も低いエネルギー群において1%を越える誤差があるが、それを除けば1%以内で一致している。それに対し、HEXNODコードではNSHEXコードで見られた以外の領域平均中性子束にも1%を超える誤差がみられ、特に、制御棒領域の低エネルギー群において5%の誤差がある。これらの結果から、NSHEXコードで用いている中性子束、横方向漏れの角度分布取り扱いの詳細化は、計算精度向上の観点から非常に有効であることが分かる。

第３章　実験データ取得の現状と計画

３．１　インターラッパーフロー試験

自然循環時のインターラッパーフローに着目した水を作動流体とする試験装置の概要を図3-1に示す。インターラッパーフロー試験では、透明アクリル製の試験容器及び模擬集合体を用いて、集合体ラッパ管のギャップ部流れの可視化、圧力測定、粒子画像法を用いた速度場測定、超音波流速分布計測装置を用いた鉛直方向流速分布測定を実施する。模擬集合体にはガラス表面に導体薄膜を焼き付けた透明ヒーターを張り付け、集合体の発熱を模擬する。集合体内部には、集合体間ギャップ部の流れが可視化できるようにビデオカメラを挿入する。

本試験装置を用いて、強制循環で直交流に関する圧力損失、流況、周方向流れ依存性（ギャップと集合体との配置でインライン方向とスタッガード方向）について実験データを得る。炉心部での温度成層化現象については、強制循環流量を低下させ、模擬集合体表面の平面状ヒーターを発熱させ、ギャップの上部を高温滞留領域、下部を低温の強制循環流が流れる状況で試験を行うことにより、コードの検証のための基礎的な実験データを得る。インターラッパーフロー試験の試験項目は以下の通りである。

① 強制循環によるラッパー管間ギャップ部流動特性試験

分岐合流を含むラッパー管間ギャップ部の流動抵抗の把握、インライン方向とスタッガード方向での流動抵抗の違いによる周方向流動特性の把握などを行う。

② 自然循環によるラッパー管間ギャップ部対流特性試験

炉内冷却器とラッパー管表面の発熱によりラッパー管間ギャップ部に自然対流を発生させ、その流動特性を把握する。集合体間パッド、炉心槽と炉心部集合体要素との隙間を埋めるコアフォーマーの形状（流路）のインターラッパーフローに与える影響を把握する。

③ 混合対流によるラッパー管間ギャップ部流動特性試験

ラッパー管間ギャップに強制循環で水平流を与え、かつラッパー管表面を発熱させることにより定格運転時のインターラッパーフローの特性を模擬する。強制循環流量、発熱量をパラメータとして温度成層化の発生など混合対流特性を把握する。

また、試験スケジュールの概略を以下に示す。

① 1996年12月～1997年3月：強制循環によるラッパー管間ギャップ部流動特性試験

② 1997年4月～1999年3月： 自然循環によるラッパー管間ギャップ部対流特性試験

③ 1997年8月～1997年12月：混合対流によるラッパー管間ギャップ部流動特性試験

3．2 炉外炉心変形試験

炉心集合体の変形挙動の評価においては、以下の3つの現象に着目する必要がある。

① ラッパ管群の接触・摩擦等の機械的荷重相互作用下で、ラッパ管の湾曲及びラッパ管のつぶれ（断面変形）が複雑に生じる現象

② 炉内の温度分布すなわち熱的荷重相互作用下で、ラッパ管の熱湾曲及びクリープ湾曲が生じる現象

③ 炉内の中性子分布及び照射履歴によるスウェリング現象

その他、変形挙動は製造時及び照射後のラッパ管や炉心支持板の形状不整、パット部間のギャップ、エントランスノズル部のクリアランス等の不確定要因にも影響される。

炉外炉心変形試験は、炉心集合体の変形挙動を構造力学の面からその影響因子を実験的に分析・評価し、炉心構造設計法の開発に関連するデータの蓄積・整備を目的としている。本試験で実施可能な変形挙動の各種影響因子の検討項目は以下の通りであり、炉心集合体変形挙動を評価する上で定量的あるいは十分な精度を有した評価が必要な項目である。

① ラッパ管の湾曲に対する断面変形の影響

② ラッパ複数体の接触及びノズル部のクリアランスの影響

③ 初期不整の影響

④ ラッパ管、ノズル、パット等の構造不連続部の力学特性

⑤ ピンバンドルの影響

⑥ 温度分布に対する熱湾曲が拘束される複雑な荷重相互作用下の変形挙動

⑦ 複雑な荷重相互作用下の非弾性挙動（弾塑性及びクリープ）

以上の検討項目は、将来的に受動的安全性を有する炉心概念の構築のための炉心構造設計法を確立する基礎的データにもなるものと考えられる。

大規模な炉心集合体のCHARDIS試験[16]においては、現象の複雑さのため分析が十分にできなかった例があることから、本試験は変形挙動の詳細な分析に重点をおく観点から、単体試験体か

ら始めて、その後徐々に試験体数を増加させる。試験では現象を単純化するため、まず変形挙動の分析が比較的容易な機械荷重による変形試験を行い、その後により実炉条件に近い熱変形試験を実施する。主な試験としては、基本特性試験（単体）、機械荷重変形試験（2～19体）及び熱変形試験の3つが挙げられる。

基本特性試験は、ラッパ管の湾曲及び断面変形挙動を評価する上で基礎となるラッパ管及び剛性の異なるバット部やエントランスノズル部等の各要素の初期寸法、曲げ剛性、面間圧縮剛性、材料定数及び摩擦係数などの力学特性の把握を目的とする。基本特性試験で得られた力学特性は、機械荷重変形試験及び熱変形試験データの分析に反映される。

機械荷重変形試験は、熱変形試験の予備試験的な位置付けのもので、機械荷重によるラッパ管の変形挙動の把握を目的とし、図3-2に示すラッパ管変形試験装置を用いて実施する。この試験結果は、特に、ラッパ管複数体の接触及び摩擦の複雑な荷重伝達を含むので、PRECISEコードあるいはFINASコードの境界条件のモデル化や特殊要素開発等に反映させる。

熱変形試験は、熱荷重と機械荷重が重畳した場合の集合体の変形挙動の把握を目的とする。本試験では、ラッパ管断面内に温度分布がある場合に生ずる熱湾曲挙動を分析し、機械荷重変形試験との差異を評価し、変形挙動に対する熱変形の寄与を定量的に評価する。その後、バット部の拘束や機械的相互作用力を模擬した機械荷重を重畳させて、熱クリープ変形もしくは照射後の残留変形を考慮した体系での変形挙動を分析し、PRECISEコード検証のためのデータとして用いられる。試験の現状及び課題としては、以下の4項目が挙げられる。

① 初期不整検討：初期形状及び変形形状計測装置を製作するとともに、FINASコードによる解析モデルを作成した。ラッパ管の形状パラメータ（面間及び頂点間距離、板厚、R部形状、曲がり、ねじれ）を計測して、初期形状不整及び試験後の変形形状を確認し、FINASコードの解析結果との比較を実施している。

② 曲げ剛性試験：三点曲げによる剛性はFINASコードの解析結果とほぼ良い一致を示した。荷重負荷面と支持面の拘束条件をパラメータとして剛性の影響を確認するとともに、ラッパ管のつぶれ（断面変形）の影響を把握した。

③ 面間圧縮剛性試験：荷重負荷面と支持面の拘束条件をパラメータとした面間圧縮剛性を確認し、試験結果とFINASコードの解析結果との比較を実施している。

④ 変形試験：複数集合体の相互作用を対象とした機械荷重変形試験及び熱変形試験試験の基本データとして、集合体単体の挙動を確認し、試験結果とFINASコードの解析結果との比較

を実施している。

概略の試験スケジュールは以下の通りである。

○1993年度：ラッパ管変形試験装置設計、初期形状及び変形形状計測装置設計及び曲げ剛性試験装置製作

○1994年度：ラッパ管変形試験装置製作、初期形状及び変形形状計測装置製作、「常陽」タイプのラッパ管曲げ剛性試験実施及び断面変形計測装置設計・製作

○1995年度：「常陽」タイプのラッパ管曲げ剛性と面間圧縮剛性試験及び「常陽」タイプのラッパ管単体変形試験の実施

○1996年度：「常陽」Mark-IIタイプのラッパ管曲げ剛性試験と面間圧縮剛性試験、「もんじゅ」タイプのラッパ管曲げ剛性試験と面間圧縮剛性試験、「常陽」タイプのラッパ管複数体（2～3本）変形試験、摩擦（作用荷重及び当たり角度）パラメータ試験、「常陽」タイプの材料試験及び「もんじゅ」タイプに対する同様な試験の検討

○1997年度：「常陽」Mark-IIタイプのラッパ管複数体（2～3本）変形試験、「常陽」Mark-IIタイプのラッパ管複数体（5～7本）変形試験、「もんじゅ」タイプのラッパ管（1～2本）変形試験、ギャップ（エントランスノズル、パッド部）パラメータ試験及び摩擦（作用荷重及び当たり角度）パラメータ試験、等価剛性試験の検討及び熱変形試験装置設計

○1998年度：「常陽」Mark-IIタイプのラッパ管複数体（19本）変形試験、熱変形試験装置製作及び温度分布予備試験

○1999年度：熱湾曲試験

○2000年度：引抜き力及び挿入力パラメータ試験

3．3　炉心材料の照射特性

「もんじゅ」の炉心材料として開発したPNC316鋼及び実証炉クラスの炉心材料候補材として開発したPNC1520鋼は、チタン（Ti）、ニオブ（Nb）に加え微量添加しているケイ素（Si）とリン（P）等によって、高温クリープ強度と耐スエリング性を向上させた材料である。これらの材料については、材料照射及び燃料集合体照射を行い、材料の照射データを解析して設計用物性式を整備する予定である。

材料照射はCMIR（炉心材料照射用反射体）、FFTF/MOTA（材料照射用計測線付集合体）及びMARICO-1（制御型材料照射装置）によって、燃料集合体照射はC3M（C型特殊燃料集合体）及び

MFA-1,2（FFTF炉の照射燃料集合体）によって行われている。以下にその概要を示す。

(1) CMIR（炉心材料照射用反射体）

CMIRはMMSで中間検査を行い照射の段階を追って照射挙動を評価するとともに、試料をより高い中性子照射量まで照射する目的で実施されており、「常陽」の定期検査期間内に中間検査を実施し再装荷される。CMIR照射では、これまでCMIR-1からCMIR-4まで4回の中間検査が実施されており、現在CMIR-5の照射を実施中である。CMIR-5にはPNC316鋼、PNC1520鋼等の試験片が装荷されており、「常陽」第34サイクル照射試験終了後に中間検査が行われ、CMIR-6として再装荷される。

(2) FFTF/MOTA（材料照射用計測線付集合体）

FFTF/MOTAは米国FFTF炉の照射リグで、試料の照射温度をコントロールでき、さらに熱電対により照射温度の連続測定が可能である。また、中間検査を行い再装荷できる構造となっている。MOTAにはPNC316鋼、PNC1520鋼等の試験片が装荷されていたが、FFTF炉が停止されたため、試験片を日本に返送し、スエリング試料の一部は「常陽」の制御型材料照射装置（MARICO-2）において、さらに高照射量までの継続照射を実施する予定である。

(3) MARICO-1（制御型材料照射装置）

MARICO-1は、「常陽」に装荷され主に被覆管材料の中性子照射下でのクリープ破断強度試験を目的としており、照射キャプセルの温度を一定に制御することができるように開発された照射装置である。MARICO-1にはPNC316鋼、PNC1520 鋼等の試験片（主にクリープ破断強度試験片）が装荷されており、「常陽」第33サイクル照射試験終了後に中間検査を行い、MARICO-2として再装荷し照射量を蓄積する予定である。

(4) C3M（C型特殊燃料集合体）

C3Mは、PNC316鋼の燃料集合体として「常陽」で高燃焼度まで照射されたものであり、現在照射後試験を実施中である。

(5) MFA-1,2（FFTF炉の照射燃料集合体）

MFA-1,2はFFTF炉で高燃焼度まで照射された燃料集合体であり、MFA-1にはPNC316鋼、MFA-2には準PNC1520鋼が使用されている。これらの集合体については、米国において照射後試験が進められているが、MFA-1のラッパ管とワイヤ試料については日本に返送しMMSで照射後試験を実施している。

3．4　「常陽」燃料集合体の照射後変形量測定試験

燃料集合体等の炉心構成要素の照射後寸法データ（全長、対面間距離、曲がり等）は、それら炉心構成要素の照射中における挙動評価に重要である。FMSでは、「常陽」燃料集合体等の健全性及び設計性能を確認するための照射後試験の一項目として、照射済集合体の寸法測定を実施している。

図3-3に示すFMF集合体寸法測定装置は、昭和50年5月にFMFセル内に据え付けられ、昭和53年11月のFMFホット運転開始以降、現在まで「常陽」MK-I及びMK-IIの燃料集合体等について寸法測定が実施されている。装置は「常陽」で照射された炉心構成要素の照射後寸法（測定対象物の全長、対面間距離（直径）、曲がり、ねじれ及び表面温度の5項目を同時に測定）を遠隔操作により測定できる。寸法測定関係には接触式渦電流変位検出計とエンコーダを用い、表面温度測定には接触型熱電対を用いている。

装置は図3-3に示したように、本体、下部チャック、上部支持部及び測定部から構成されている。本体は鋳造ベースにコラムが直立固定され、コラム前面には集合体保持用、サブテーブル上下駆動用の各スライドレールが取り付けられて固定されている。下部チャックは集合体のエントランスノズルを把持し集合体を直立させるもので、回転機構を有している。上部支持部は下部チャックに集合体を把持させた後、下降させて集合体のハンドリングヘッドを押さえ、測定中に集合体の曲がりが矯正されないような構造になっている。測定部は曲がり追従機構、開閉機構、測定子及び温度計から構成され、測定部全体は上下駆動する。測定子には3組の渦電流変位計が取り付けられており、センサの先端の形状は球形をしている。3組の測定子は、六角のラッパ管の対面間距離を同じ軸方向位置の3箇所について測定する。曲がり追従と開閉はパルスモータとエンコーダによって行われる。

測定は集合体を直立にセットさせた後、測定部を上昇させることによって行う。六対面について測定を行い軸方向測定ピッチ10mmで対面間距離、曲がり等のデータを得る。パッド部の外径については、5mmのピッチで測定する。また全長については、測定部の軸方向測定長さに集合体上下の補正寸法を加算してデータを得る。照射後の集合体曲がり量に関する測定結果は以下のとおりである。

(1) 「常陽」MK-I炉心燃料集合体

ほとんど曲がりは認められない。

(2) 「常陽」MK-II炉心燃料集合体

MK-Iに比べて曲がりは大きい。この曲がりは照射クリープ及びスエリングによるものと考えられ、曲がり量としては最大10mm程度である。図3-4に「常陽」MK-II炉心燃料集合体の上部パッド部における曲がり量を示す。

これらの照射後集合体変形データ（曲がり量、変形モード等）は炉心変形解析コードの検証データとして利用される。また、「常陽」がMK-II炉心からMK-III炉心へ移行するのにともない、炉心から取り出されるMK-II炉心構成要素について、炉心規模での集合体変形データの取得を検討している。

3．5　「常陽」を用いた炉心湾曲評価システムの検証

「常陽」では、MK-II炉心監視コードシステム（MAGI）を用い、全炉心構成要素の詳細な照射履歴を計算・記録している。このMAGIとTETRAS及びBEACONコードを連動させることにより、「常陽」MK-II炉心第0～29サイクルにおける炉心湾曲挙動を全炉心体系で計算した[17]。この計算システムのフローチャートを図3-5に、炉心湾曲形状の解析例を図3-6にそれぞれ示す。

(1) 内側反射体残留変位

第5列の内側反射体は炉心構成要素の中では最も残留変位が大きい。これまで2体の反射体について、PIE結果と計算結果を比較した。これらの集合体上部パッド部の残留変位の実測値は計算値の6～9倍であり、湾曲方向については実測値と計算値とでいずれも約180°異なっていた。

湾曲挙動のずれの要因の1つとしてクリープによる湾曲量の取り扱いが考えられる。そこで、照射変形式を従来の設計式から「もんじゅ」の高燃焼度設計のために作成したノミナル式に変更した。しかし、変位計算結果は変更前と同様かそれ以下であり、湾曲方向は改善されなかった。次に、反射体のラッパ管温度をTETRASコードの計算値から実測値に変更して湾曲計算を行った。実測値には、MMSが照射ラッパ管の硬さ測定結果から評価したラッパ管の照射中温度を用い、以下のケースのMK-II炉心の湾曲挙動計算を実施した。

① ケース1：内側反射体のラッパ管対面間温度勾配を1/2とした場合

② ケース2：ケース1に加え、燃料スタック上端より上の領域では温度勾配がないとした

場合

その結果、湾曲方向は 測定値と一致し、変位の差は3倍程度まで縮小した。

(2) 集合体引抜荷重

「常陽」の燃料交換時に測定している集合体引抜荷重と解析結果との比較を行った。その結果、5列の内側反射体引抜荷重の計算値は、測定値を約3倍過大評価していた。そこで、集合体パッド部の接触数を六面から二面にし、圧縮剛性をパラメータとして引抜荷重を計算した。その結果、引抜荷重計算結果は集合体パッド部の圧縮剛性にほぼ比例した。また、設計データに基づき、エントランスノズル部と下部案内管の勘合部を完全固定片持ち梁モデルから上部0.25mm、下部0.1mmのギャップのある片持ち梁モデルに変更して引抜荷重を計算した結果、引抜荷重は減少した。これより、引抜荷重解析 においては集合体パッド部圧縮剛性及びエントランスノズル部と下部案内管とのギャップの感度が大きいことが確認できた。

内側反射体ラッパ管の残留変位に影響するものとして、ラッパ管対面内の中性子束 勾配が挙げられことから、今後、入力に用いる中性子束データを検討する。また、BEACONコードの湾曲データを基に反応度変化を解析するAURORAコードの整備を実施する予定である。

3．6　炉心湾曲挙動の測定手法の開発

FBRの炉内環境下における集合体の頂部変位とパッド部に加わる荷重を測定する手法の開発を進めている。以下にそれらの開発状況を述べる。

(1) 超音波センサを用いた炉内検査装置の開発

国内外の炉内検査装置の調査を行い、それらの技術の「常陽」への適用性を検討した結果、超音波センサを利用する技術が有望であるとの結論に達した。そこで、センサの広範囲な仕様調査を行い、「常陽」集合体頂部変位を0.1mm程度の精度で検出できるシステムの概念設計を行った。その結果、開発課題として超音波センサの耐高温性及び中性子照射によるセンサ機能の低下が摘出された。

これまで照射試験用に超音波センサの試作体を製作し、それを用いて高温特性試験（室温～500℃）を行った。また、検査装置の構造を具体化し、構成部品の仕様検討を行うとともに、「常陽」で試作体の照射試験を行う場合の装荷位置、照射条件等の検討を行っ た。図3-7に検

査装置の概念図を示す。

今後は、高温特性向上を目的としたセンサの開発研究、センサや配線コード等の耐照射特性を調べるための照射試験の実施、「常陽」に適用する場合の各種制約条件を考慮したシステム設計を行う。また、高温水中でのモックアップ試験を行い、温度ゆらぎによる測定誤差を評価する。

(2) オフライン荷重センサの開発

炉内で照射中の集合体に加わる荷重測定を目的とし、オフライン荷重測定センサ の開発を行っている。これは荷重に追従した変形特性を有するセンサを集合体のスペーサパッド部等に設置し、運転終了後のセンサ変形量からセンサ取付位置での隣接集合体や炉内構造物からの最大荷重を評価するものである。

センサ材の特性には、弾性域がほとんどなく、かつ、荷重と塑性変形量がほぼ線形関係にあることが要求される。また、炉内で使用するため、センサ材の欠落防止機能が必要である。これまでに、SUS316鋼の粉体をプレスして焼き固めたものをセンサ材として選定し、その基本特性を調べ、製造時の初期密度を制御することによって、焼結体素子形状によらない安定した荷重ー変形特性が得られることを確認した。

ルースパーツ対策として、カバーを取り付けた測定素子の圧縮試験を行った結果を図3-8に示す。これより、カバー付き荷重測定素子は従来の裸の荷重素子と同様、圧縮特性は良好であり、荷重測定素子として十分に利用可能であることが確認できた。また、図3-9に示す荷重ー圧縮歪の相関関係式を作成した。

さらに、「常陽」への適用のため、設置対象集合体のPIEによる寸法測定法及び照射特性試験用カプセルの検討を行った。今後は、センサの荷重ー変位挙動に及ぼす照射の影響を調べるための照射試験を実施する。

3．7　「常陽」燃料集合体の引抜荷重試験

「常陽」の燃料集合体の引抜荷重測定においては、燃料交換機のグリッパ軸の軸封部に付着したナトリウムによる摺動抵抗の変動が大きく、引抜荷重を評価する上で大きな誤差要因となっていた。そこで、「常陽」のMK-III計画における炉心の二領域化に対応するため、新たな燃料交換機を製作する機会に引抜荷重測定精度の向上を図ることとした。以下に、新型燃料交換機の調整運転から得られた引抜荷重記録に基づき、その精度を確認した結果を示す。

新燃料交換機は、図3-10の概略構造に示すように、燃料交換機の軸封において発生する摺動抵抗の変動をホールドダウン軸ロードセルにおいて検出し、燃料交換機グリッパ軸のロードセルにおいて測定される荷重を補正する構造とした。集合体が上昇開始する時にこのロードセルによって計測される荷重ピークには、炉心変形、集合体曲がりによる引抜き抵抗の他に、①集合体の重量、②集合体の浮力、③センシング軸重量及び④グリッパ軸の浮力変化が含まれる。

新燃料交換機における引抜荷重測定試験の記録から、上記の項目を評価した値は、測定記録の荷重ピークの山に相当する部分とほぼ一致することが確認され、その差異は記録からの読み取りに対して最大で4kgであり、その標準偏差も1.5kgと安定している。この程度の差異は、荷重値を記録紙から読み取っているので誤差の範囲内であり、記録計から得られる荷重測定値は、集合体の引抜抵抗を誤差5kg程度で測定可能と考えられる。

今後は、細部の荷重の読み取り誤差を低減するため専用の記録計を設置して、荷重記録データの蓄積及び評価を実施する。また、これまで実施してきた引抜荷重記録の蓄積・整理（炉心構成要素種類別、列別、燃焼度別、照射量別）を継続して、炉心湾曲評価システムの検証及び引抜荷重の評価精度向上に反映する。

3．8　炉外バンドル圧縮試験

FBR燃料の高燃焼度化にともない、燃料ピン束（バンドル）とラッパ管（ダクト）のスエリング差等に起因するバンドル－ダクト機械的相互作用（BDI）が発生することが知られている。高BDI条件下ではワイヤに沿ったバンドル湾曲の発生も予想され、冷却材流路断面積の減少にともなう被覆管表面の局部的な温度上昇及び被覆管接触荷重の増大により、燃料ピンの健全性に影響を及ぼす可能性がある。このためBDI挙動を精度良く予測する手法の確立は、FBRの実用化に向けた燃料設計における課題の1つとして重要視されている。

炉外バンドル圧縮試験は、模擬バンドルに対し外部より荷重を加えることによりBDIの挙動を模擬するもので、比較的簡便に詳細なデータが取得できる手法である。

バンドル変形挙動評価の精度向上を目的として、炉外バンドル圧縮試験を実施した。また、大型照射後試験施設（FMF増設）に設置されたX線CT検査装置を用いて、圧縮試験中のCT画像撮影を行った。炉外バンドル圧縮試験装置は以下の要素で構成されている。

(1) 圧縮試験装置

圧縮試験装置はケーシング内に模擬バンドルを設置し、圧縮板で圧縮を行う構造となってい

る。圧縮板形状は平板タイプとバルジングタイプ（圧縮板中央部が凹んだ形状のもの）の二種用意し、BDIに及ぼす圧縮板形状の影響の比較を行った。

(2) 模擬ピン

圧縮試験に用いた模擬ピンの全長は圧縮試験装置に合わせて短くなっており、下部端栓をピン取付ベースに固定することでバンドルを形成する構造となっている。模擬ピンのワイヤピッチは約150mm及び約300mmの二種類とした。

(3) X線CT検査装置

X線はライナック加速器（最大電子エネルギー12MeV、出力1,750cGy/min-m）により発生する。図3-11にX線CT画像を示すが、画像上の最小識別単位は0.3mmである。

(4) ピン試験装置

燃料ピンの寸法をレーザにより非接触で測定する機能を有する。

試験は圧縮板でバンドル試験体の六面を同時圧縮することによって行い、ピンと圧縮板の接触は圧縮板表面に塗布した塗料の状況とCT画像から確認した。また、ピン試験装置を用いて、圧縮後の模擬ピンのワイヤピッチ、曲がり、外径の測定を行った。

第４章　炉心変形挙動の分析と評価手法の開発計画

４．１　炉心変形挙動の分析

(1) 起動・停止を含む通常運転時の炉心変形

図4-1に起動・停止を含む通常運転時における炉心変形挙動の流れを示す。原子炉を起動し出力上昇すると、冷却材やラッパ管等の炉内構造物の温度が上昇し、炉心が径方向に熱膨張するとともに、燃料集合体に熱膨張湾曲が生じる。熱膨張量や湾曲量がある一定限度を超えると、集合体パッドの接触による相互干渉で集合体の湾曲または炉心変形はより複雑な様相を呈する。定格運転条件下においては、照射スエリング湾曲／膨張及び内圧クリープによるラッパ管の膨張並びに照射クリープによる応力緩和等により、炉心変形の様相は集合体の炉内滞在期間（または燃焼度）の経過により変化する。このため、原子炉運転中における炉心変形の評価には、集合体の膨張または変位が炉心の出力分布や温度分布に及ぼす影響を考慮する必要がある。

原子炉が停止されると冷却材の温度低下により集合体の熱膨張湾曲は解除されるが、残留変形により集合体パッド部には接触反力が作用し、燃料交換時の引き抜き荷重の増大要因となる。集合体の残留変形は、次の運転サイクルにおける炉心初期変形の評価に用いられる。

上記の炉心変形挙動に関連する炉外・炉内試験研究を図中右側の太い実線枠に示している。炉外試験研究では比較的単純な試験体を用いて、熱流動や構造変形応答に係る現象のモデル化のための基礎的な知見や、解析に不可欠な流動抵抗や摩擦係数などの入力データが得られる。炉内試験ではスウェリングやクリープに関する照射データが得られるとともに、反応度や集合体変位等に関する炉内状況の監視が行われる。また、燃料交換時やその後の集合体の検査では、引き抜き力や残留変形が測定される。これらの炉内試験データは、炉心変形に関する貴重な解析評価手法の検証データとなる。

(2) 過渡時の炉心変形

図4-2に過渡時における炉心変形挙動評価の流れを示す。過渡時の炉心変形は現象が数10秒から数100秒の短時間であること、核－熱流動－構造変形の連成が強いことが特徴的である。このため、プラント動特性解析により、原子炉出力や冷却材流量などの境界条件を設定して、炉心の温度分布－変形－反応度をカップリングした解析が必要となる。これ以外の部分の基本的な解析モデルは、上記の通常運転時の手法がそのまま適用できるので、解析コード間の計算

情報のインターフェースの検討が過渡解析における重要課題である。

核ー熱流動ー構造変形の連成が強いため、過渡時の炉心変形解析に関する検証データを炉外試験で取得することは、技術的観点から困難であり、炉内試験による確認に対する期待が大きい。なお、起動・停止時の炉心変形挙動については、核的フィードバック効果が相対的に小さいと考えられることから、大規模ナトリウム試験施設を用いて実験検証データを取得することも可能と考えられる。

4．2　解析コードの体系化と実験検証データの必要性

(1) 既存解析コードの組合せ

既存解析コードの組合せによる炉心変形解析システムを図4-3に示す。静的解析では各領域の解析コード：TETRAS（炉内熱流動計算）、BEACON（炉心変形計算）及びCITATION（炉心核計算）を用いて、基本的には定常状態の解析を行う。コード間の入出力データのやり取りはオフラインで行なわれる。静的解析は、基本的には、前述の起動・停止を含む通常運転時の炉心変形に関する解析評価手法をそのまま適用する。

動的解析では、炉心変形に対する反応度応答マップを静的解析のパラメータ計算であらかじめ求めておき、プラント動特性計算の反応度効果モデルの中に組み込むことにより、炉心変形の効果を簡易的に考慮する。なお、この時の集合体変形は単純なビームモデルまたは冷却材の温度上昇から推定・評価される。

(2) 将来の統合解析システム

前述の既存解析コードの組合せでは、核計算ー熱流動計算ー構造変形計算の結合度が比較的弱いが、将来の統合解析システムでは、図4-4に示すように解析コード間の結合度が強化され、コード間の入出力データはインターフェースプログラムを介して自動的に行なわれる。簡易解析は実証炉体系の解析などの近い将来を対象とし、計算速度及びメモリー容量を数年後の計算機システムの性能で、動的解析を実用的な計算時間内で実現できる解析モデルを用いている。詳細解析では、将来の計算機性能の飛躍的な向上を前提とし、各コード間の連繋を取りつつ、三次元の詳細解析モデルを使用して、できるだけ現象を忠実にシミュレーションすることを目指している。詳細解析は、当面の間、静的解析への適用や簡易解析モデルの妥当性確認などに利用される。

(3) 実験検証データ

炉心変形に関する統合解析システムにおいては、熱的支配因子、機械的支配因子及び核的支配因子のそれぞれの解析評価手法に対する実験検証データが必要である。表4-1、4-2及び4-3にそれぞれの支配因子に対する評価手法の現状と課題、並びに関連する試験や反映先などを示す。

通常運転時及び過渡時における炉内温度分布に関する熱的支配因子としては、集合体間熱移行、集合体内流量再配分及びインターラッパフローがある。これらの支配因子に関連する部分要素試験は、自然循環崩壊熱除去に関連する炉心部熱流動ナトリウム試験（3集合体のCCTL-CFR試験及び7集合体のPLANDTL-DHX試験）として既に実施済みである。インターラッパフローについては、モデル化及び機能検証のための基礎試験を水を作動流体として実施している。炉心部全体の複合現象については、現在計画中の大型ナトリウム試験施設による原子炉冷却系総合試験と、実験炉での照射中のラッパ管温度評価データによる確認が期待される。

炉心構造の変形を引き起こす外的要因としては、温度（熱）、中性子束、静的及び動的な流体力、地震動などが考えられる。地震動に対しては、集合体が座屈などの損傷を生じて制御棒の挿入が困難にならないよう配慮される。過渡的な事象における反応度変化や通常の運転サイクルの中での燃料引抜きや制御棒挿入において問題となる集合体自身の湾曲をともなう炉心変形については、主に温度と中性子束の分布及びその時間的変化が外的要因となる。

[過渡的な事象における炉心変形]

この場合は、事象が短期であるので炉心内の温度分布の変化が炉心の変形を引き起こす。もっとも厳密には、炉心の初期形状としてはそれまでの運転履歴から、ある程度変形したものを想定しなければならない。材料の面からいうと、基本的には熱膨張による変形であり、比較的単純であるが、構造応答の面からいうと、多くの集合体が変形によって接触、離脱を生じる体系を扱うものであり、数値解析に要する計算時間も多大でありかなり複雑である。集合体を 1本のはりと見做した専用の解析ソフトは既にいくつか開発されているが、ダクト面をシェルとして扱った全炉心レベルの解析例は未だないと思われる。

解析手法に関しては、現在、集合体断面の力学的特性等を考慮してはりモデルの改良を検討する一方、シェルレベルでの詳細解析の障害である計算規模の問題を並列計算機を駆使して克服すべくプログラム開発を行っている。試験に関しては、曲げ剛性、面間圧縮剛性など集合体単体レベルでの基本的な特性試験については終了しており、解析とも合うことを確認

している。今後、複数の集合体の変形、接触・摩擦など相互干渉を中心とした試験に進む予定である。

[運転履歴にしたがって進行する長期的な炉心変形]

この場合は、温度分布、履歴のみならず、中性子束分布、流体圧が炉心の変形を引き起こす。時間的な変化はマイルドであるが、集合体変形のメカニズムは前者よりも複雑である。材料の面からいうと、熱膨張のみならず、中性子照射によるスエリング、照射クリープ、さらに高温で長時間晒されることによる熱クリープが問題となる。炉心構成材料のスエリング、照射クリープ等の記述の精度が炉心変形解析の精度を決定する重要な鍵のひとつを握っている。構造応答の面からいうと、前者と同じであるが材料の構成関係式が複雑になり、対象とする時間領域も長くなることから、計算に要する労力はさらに増す。解析ソフトについては、照射による長時間の材料の構成式と効率的な計算アルゴリズムが必要となることを除けば、基本的には前者と同じ構造である。試験データについては、炉内データが必要となるが、多くのデータを期待するのは難しいことから、既存のデータを含めてそれらの確度の分析と解析による照合を行っていく必要がある。

核的支配因子としては、境界摂動効果、制御棒による中性子減少効果、中性子ストリーミング効果、中性子輸送効果及び組成非均質効果がある。これら各因子に対する課題解決のためには、いままでの各種臨界実験データを活用するとともに、FCA等の臨界実験装置を用いて、炉心径方向の変形を模擬し、炉心径方向変形反応度を測定して、解析コードの精度確認を行うことが必要であると考える。

4．3　評価手法の高度化

(1) 経済性向上のための合理的な設計手法

実用化段階の高速炉においては、軽水炉に匹敵するレベルまで経済性の向上を図ることが必要とされている。炉心・燃料に関する設計研究の観点からは、炉心を大型化してスケールメリットを活用するとともに、出口温度の高温化による熱効率の改善や高燃焼度化による燃料寿命の長期化が検討されている。

炉心燃料設計における炉心変形に関連する評価項目としては、運転中における集合体頂部変位（制御棒挿入性の確保）、燃料交換時における引抜き荷重（燃料交換機の引抜力制限）、引

抜き後の集合体残留変形量（燃料取扱い時の変形制限）が挙げられる。高燃焼度炉心では、照射量が増大することから、熱変形よりは照射スエリングによる変形が相対的に重要になる。これらについて合理的な設計手法を確立するには、炉心材料照射変形特性の精度向上（スエリング特性評価）、並びにパッド部の表面性状の安定性（摩擦係数評価）が重要である。

(2) 適切な裕度設定による安全性の確保

プラント運転中の異常な過渡変化時に、独立に設置されている二系統の原子炉停止系の両方が不作動という極めて過酷な条件を想定しても、動力源を必要としない受動的な安全機能で大規模な炉心損傷が防止され、プラントを安定な状態に維持して、環境への放射性物質の放出を回避することは、一般公衆が理解し易い高速炉の安全性を示す上で重要である。

このため実証炉の設計研究においては、キュリー点方式自己作動型炉停止機構（SASS）やガス膨張モジュール（GEM）等の受動的な安全設備の設置が検討されている。このような受動的安全設備が機能した時のプラント応答特性を評価するには、ドップラー効果、冷却材密度、燃料膨張、炉心変形などの即効性を有する他の反応度効果も合わせて考慮する必要がある。

特に、炉心変形時の反応度効果は、フィードバックされる応答時定数が短く、比較的大きな負の反応度（数10セント程度）が入る可能性があることから、高速炉の固有な安全性特性として注目されている。したがって、GEM等の受動的な負の反応度投入機構を適切な安全裕度を持って設計するには、炉心温度が高温化したときの熱膨張による炉心変形反応度を精度良く評価できる核－熱流動－構造応答をカップリングした炉心変形解析手法の開発・検証が必要である。なお、上記（1）の通常運転時における炉心変形形態の把握は、過渡時の炉心変形評価のための初期条件を設定するために不可欠であり、過渡時の炉心変形形態を評価する1つのパラメータとして極めて重要である。

GEM作動時のような過酷な炉心状態においては、炉心温度が1000℃近傍に達するため、それを実験的に模擬することは炉内試験だけでなく炉外試験でも困難である。このため、プラント全体挙動の総合的な予測には、部分要素毎のモデル実験やある制限温度までの機能検証実験を通して検証された物理モデルを計算機上で組み合わせる方法が取られる。このような高性能の大型計算機を活用した複雑な現象のシミュレーションには、個々の物理モデルの妥当性を実験的に確認することと、多次元化や空間分解能を高めて、可能な限り一般性の高い物理モデルに基づいて評価手法の高度化を図ることが不可欠である。

4．4　実証炉の炉心燃料設計への対応

(1) 実証炉の炉心変形に係る設計方針

① 燃料要素設計

被覆管の歪を燃料集合体の機能を健全に保持し得る範囲に制限する。特に、被覆管相互または被覆管とラッパ管との接触を防止する観点から、実証炉の炉心燃料設計ではBDI量を被覆管歪制限の観点から、BDI量≦3dw（ここで、dw：スペーサワイヤ直径）のように制限している。

② 燃料集合体設計

燃料集合体については、通常時と過渡時の種々の荷重に基づく応力及び変形を制限してその健全性を確保するとともに、また集合体が他の構成部品やシステムの機能を阻害することのないようにする。

・ラッパ管の膨れ量制限：DDI量≦0

・炉心変形（照射、地震による）時の制御棒挿入性の確保

・集合体に変形が生じた場合も燃料交換が可能であること

③ 炉心変形反応度

起動時から100％出力までの炉心変形反応度は、実証炉のような拘束型炉心の場合、一般にわずかに正値であるが、出力係数にはほとんど影響を与えない。また、通常運転時の炉心変形反応度は燃焼反応度に比べ小さく、制御棒ワースへの影響は無視できる。

制御棒不作動を想定した炉心流量低下事象（ULOF）等における炉心変形反応度については、GEM（Gas Expansion Module）機能時に大きな正の炉心変形反応度が入らない設計とする必要がある。

(2) 炉心・燃料設計への対応

実証炉の炉心燃料設計への対応においては、既存の核、熱及び機械的挙動解析コード（TETRAS、BEACON等）に対して下記に示すような検証が必要である。

① 燃料要素設計

・「常陽」照射燃料データ及び炉外集合体バンドル圧縮試験データを活用してBDI挙動解析コードを検証する。

② 燃料集合体設計

・ ラッパ管の膨れ量については、PNC1520材の照射特性データを取得しDDI量の評価精度向上を図る。

・ 照射や地震による炉心変形時の制御棒挿入性については、炉外試験データ、「常陽」及び「もんじゅ」のPIEによる集合体変形データ等を用い、通常照射下及び地震時の炉心（集合体）変形量と制御棒挿入性の評価精度向上を図る。

・ 集合体変形時の燃料交換性については、炉外試験データ、「常陽」及び「もんじゅ」の燃料交換時の引抜荷重、PIEによる集合体変形データ等を用い、寿命末期の集合体変形量及び集合体変形時の引抜き力に関する予測精度向上を図る。

③ 炉心変形反応度

・ 通常運転時については、炉心変形による反応度は小さいので、簡易手法による評価を行う。

・ 過渡時については、GEM作動時に大きな正反応度が入らないことを静的評価により確認する（炉心径方向膨張反応度がピークとなる出力／流量比≦1.0の確認など）。

・ 炉心変形反応度の詳細評価のためには、主要な熱的及び機械的支配因子に係る炉外試験及び「常陽」を用いた安全性試験により解析コードを検証しておく必要がある。解析コードの検証に必要な試験データの取得に際しては、現象を支配する核－熱－機械的因子の摘出及び各々の支配因子に係る要求精度の明確化の観点からの検討が重要である。

4．5 実用炉への展開

(1) ダクトレス炉心概念

マイナーアクチニドも含めたアクチニドのリサイクルが想定されるFBR実用化時期に備え、炉心の固有の安全性を強化すると同時に、環境負荷低減あるいは核拡散抵抗性強化の観点からマイナーアクチニド及びプルトニウムの燃焼自由度を拡大し、かつ、経済性にも優れたリサイクル大型炉の概念検討を進めている。

リサイクル大型炉では上述の設計基本方針に適合し、自らの固体廃棄物を削減する炉心構成要素概念として、ダクトレス・ノズルレス炉心燃料集合体を検討している。図4-5にダクトレス・ノズルレス炉心燃料集合体の概念図を示す。

ダクトレス炉心燃料集合体では、ラッパ管削除による燃料体積比の向上で長期運転サイクル

を実現し、燃料サイクルコスト低減及び稼働率向上が実現できる。また、ダクト型燃料の寿命制限因子の1つであるバンドルーダクト相互作用（BDI）がなく、燃料の長寿命化が容易となり、経済性向上につながる。さらに、使用済燃料の再処理工程の簡素化及びラッパ管自体の廃棄物量低減が実現できる。一方で、ラッパ管削除により燃料交換時における隣接集合体との燃料ピン相互干渉防止、ダクト型に比べ剛性が低下することによる地震時の衝突挙動の差異等、ダクトレス特有の炉内変形挙動に対する配慮が必要となる。

冷却材流路を構成するラッパ管を削除することで、集合体間ギャップへのバイパス流が発生し除熱性能の低下が起こるため、燃料交換性を維持しながらできるだけ集合体間ギャップを縮めるなど、バイパス流抑制への配慮が必要となる。また、炉心全体からみても、炉心最外周部間隙へのバイパス流が生ずるため、炉心構成要素と炉心槽間の流動抵抗を増す構造対応が必要となる。

この炉心では、既存燃料集合体におけるエントランスノズルと下部遮蔽体を集合体から分離独立させ（ここでは「ノズルレス」とする）、これを炉内下部構造側に交換可能な状態で設置する（「流量調節モジュール」と称す）。この流量調節モジュール概念は、炉心構成要素の組み替えが自由にでき、プルトニウム燃焼等の核拡散抵抗性強化に適合する。さらに、このモジュールを再使用することで、燃料取り出し時に発生する下部遮蔽体及びエントランスノズルの固体廃棄物量を大幅に削減できる。

一方で、ダクトレス炉心ではハイドローリックホールドダウンによる集合体支持が困難となり、燃料集合体を機械的に支持する概念（メカニカルホールドダウン ：MHD）が必要となる。MHD方式の一例として、集合体と炉内上部構造物をバネで結合し押さえ込む方式が考えられるが、この場合、集合体上下端の2点支持となる。したがって、ダクト型炉心と比べ、炉心変形挙動や地震時の変形モードが大きく異なり、ダクトレス固有の炉心変形挙動を把握する必要がある。

(2) ダクトレス炉心の熱流動解析の現状及び今後の課題

① ダクトレス炉心の熱流動解析

ダクトレス炉心における熱流動挙動の特徴を把握すること、及び熱流動評価のための研究開発項目を摘出することを目的として定常熱流動解析を実施した。解析対象とした炉心は「リサイクル炉心」とし、集合体熱流動解析及び炉心槽内熱流動解析を実施した。

集合体熱流動解析は、スタガードハーフピンメッシュ手法を用い、隣接する2体の集合体に

ついて実施した。解析結果の一例を図4-6に示す。この解析から集合体内のピーク温度、ギャップ内の流動状況、集合体間での流量再配分現象等の流動挙動を評価した。

炉心槽内熱流動解析は二次元R-Zのポーラス体系で各部位の流動抵抗モデルを入力した。解析結果の一例を図4-7に示す。この解析により、炉心内温度分布、炉心から外周部への冷却材流出による炉心冷却無効流量等を評価した。

② ダクトレス炉心での熱流動挙動の特徴

ダクトレス炉心の解析で得られた熱流動挙動の特徴を以下に示す。

- 集合体周辺流れ：ラッパー管付き集合体に比較して集合体の外周ギャップ流路が広いため、集合体ピーク温度が高くなる。
- 集合体間クロスフロー：集合体の下端部約50cmの範囲で、集合体間の流量差に応じて流量再配分が起こる。また、それより上の領域では、ギャップ部を流れる高速流の影響で集合体間のクロスフローやミキシングは起こり難い。
- 炉心外周部への無効流れ：定格運転程度の高流量では、炉心集合体から炉心外周部ギャップを経由して上部プレナムに流出する流れが発生する。この冷却材流は炉心をバイパスするため、炉心冷却には寄与しない。解析結果から、このバイパス流量は総炉心流量の数%程度になると予測された.

③ 熱流動解明のために必要なR&D

ダクトレス炉心の熱流動挙動を把握するために、今後必要と考えられる研究項目を以下に示す。

- 集合体間ギャップ流れに関するデータ収集及び解析モデルの構築：ダクトレス炉心では集合体間ギャップの流速が大きくなり、かつ、グリッドスペーサ等の効果で流速勾配及び分布ともに複雑となる。この流れを精度良くモデル化するためには、水流動試験等による実験的知見が不可欠である。
- 炉心から外周部への漏洩流：炉心外周部への炉心冷却無効流れは、炉心外周部の流動抵抗とダクトレス集合体群の径方向流動特性の影響を受ける。ダクトレス集合体群を横切る流れについては、ピンバンドルとギャップが混在する複雑な流動場であり、実験的研究による解明及びモデル化が必要である。

・ グリッドスペーサの流動に及ぼす影響：グリッドスペーサのサブチャンネル間の冷却材ミキシング効果と、その流動抵抗による集合体ギャップ間の冷却材混合効果について、実験的研究による解明及びモデル化が必要である。

(3) ダクトレス炉心の構造解析の課題

ダクトレス炉心では、剛性の高いダクトを削除し、集合体コーナ部に設置された6本のタイロッドとグリッドスペーサにより、燃料ピンバンドルを支持する複雑な構造のため集合体自身の曲げ、ねじれ等の剛性が低下し、変形し易くなっており、従来、無視してきたピンバンドル剛性の考慮が必要である。この場合には各ピン毎にグリッドとの接触点を有するため、そのモデル化の取扱いが重要となる。また、浮き上がり防止のため、燃料集合体上端にばねを設けて炉心上部機構により押さえるMHD方式を検討しており、この場合にはタイロッドの軸方向に圧縮荷重が常に加わった状態となる。以上から、構造解析を実施する上の課題をまとめると以下の通りである。

① ダクトレス燃料集合体の構造モデル化

② 燃料集合体間の接触状態のモデル化

③ ダクトレス集合体剛性の二次元及び三次元でのモデル化

①についてはダクトレス集合体全体のFEMモデルを作成し、解析することは不可能ではないが、接触要素が多く複雑である。このため、現状の計算機の能力、炉心全体モデルへの拡張を考慮すれば、ダクトレス集合体の変形挙動を把握した上で、モデルを簡略化することが必要である。簡素化した解析の例を図4-8に示す。同図に示すようにスケルトンと剛性等価なビームモデル、タイロッド／グリッドスペーサのみのスケルトンモデル及び等価的燃料ピンを含んだ燃料集合体モデルの3つで大きく異なった変形挙動を示すため、簡素化の手法についても検討が必要である。燃料ピンバンドル等価燃料ピンで置き換えた集合体モデルが単体挙動では最も現実の変形挙動に近いと考えるが、このモデルは後述するように炉心全体への拡張に課題がある。

②のダクトレス炉心では、グリッドのみでなくタイロッド部でも炉心変形時の干渉が発生する可能性がある。このため、膨大な接触点を有する体系となることに対して、収束性の確保を含めてモデル化の検討が重要である。

③は上記の単体燃料集合体モデルを二次元及び三次元モデルに適用する際には計算機能力を

考慮すると、収束性、計算時間の観点から、スケルトンモデルと等価な変形挙動を表現できるビームモデル（パイプ要素）の開発が必要である。なお、今後の計算機の性能向上による大規模解析にも期待する必要がある。これらの課題を解決する上で、ダクトレス炉心の変形挙動を解明してゆくためには、ダクトレス燃料集合体の機械特性（曲げ剛性、ねじり剛性、圧縮剛性等）、ダクトレス燃料集合体照射変形データ、評価手法高度化のための炉内温度分布データ、照射フラックス分布データを取得する必要がある、表4-4に現状の課題と取得必要データをまとめて示す。

(4) ダクトレス炉心の核特性解析

燃料をダクト付集合体からダクトレス集合体に変更したとしても、炉心核計算上の評価手法は従来法と基本的に変更する必要はないと思われるが、今後確認が必要と考えられる項目として、燃料中のタイロッドによる非均質効果及びネスト配列集合体の核計算が挙げられる。

ダクトレス炉心では図4-9に示す通り、炉心内にタイロッド群が島状に規則的に分布する構成となる。そのため、集合体単位でスミアした評価では、タイロッド部の中性子束低下による微妙な出力分布の歪みを考慮できない。この非均質性による効果は、炉心核特性を検討する上で問題となるほど大きくないと予想されるが、MVP等を用いて燃料中のタイロッドによる非均質効果を定量的に確認しておく必要がある。

燃料体積比のさらなる向上を目指して、ネスト配列（集合体の境界で、燃料ピンを体面配列からずらす配列）を採用した炉心では、計算メッシュが六角体系からずれるため、補正の必要が生ずると考えられる。このネスト配列集合体の核計算については、CITATIONコードで基本計算を行い、MVP等を用い補正係数を求めるという方法で対応できるが、この妥当性について定量的に確認しておく必要があると考えられる。

以上ダクトレス炉心を採用することで、若干の検討・確認項目は指摘されるものの、いずれも従来の解析コードで対応が可能であり、ダクトレス炉心の核特性解析のために、新たに専用コードを開発する必要性はない。

(5) ダクトレス炉心開発計画

ダクトレス炉心の技術課題は、従来炉心においてラッパ管に係わった問題がその削除によって設計的な困難さに直面する場合と、逆に有利になる場合がある。これらの課題の解決には、新しい概念であることから燃料集合体構造開発はもとより、炉心熱流動挙動（定常及び過

渡）、炉心構造挙動（耐震、湾曲）、炉心局所事故の影響評価が必要である。また、この特性及び設計改善は原子炉構造設計、炉内計装設計、冷却系設計、燃取系設計等と相互に関連するため、これらと協調した対応が必要である。

炉心湾曲はダクトの剛性が期待できず、ダクトによる物理的壁がないことから、燃料ピンの変形と炉心湾曲との相互干渉が大きく、場合によっては炉心湾曲が直接燃料ピンの健全性に影響する可能性も考えられるしたがって、炉心湾曲の評価には従来の反応度効果、燃料交換性、燃料集合体健全性に加え、燃料ピン健全性評価に直接係わるという観点から従来にも増して高精度な解析技術が求められる。

以上の考え方で具体的な開発項目を整理すると以下のようになる。なお、課題及び開発手順については図4-10に示す。

① 炉外試験（ダクトレス炉心解析技術の高度化）

・ ダクトレス集合体単体機械特性・ダクトレス集合体単体流動特性・ダクトレス炉心熱・流動特性・ダクトレス炉心流力振動特性・ダクトレス炉心湾曲特性・ダクトレス炉心耐震特性・ダクトレス炉心局所閉塞挙動

② ダクトレス集合体照射試験（集合体設計及び解析技術の実証）

・ グリッド・燃料ピン相互作用・スケルトン・グリッド健全性・燃料交換性

第5章　まとめ

平成7年度の炉心変形検討会の活動成果を以下に示す。

(1) 炉心変形挙動の分析を行い、炉心内の核ー熱ー構造が相互作用する複合現象を把握するには実炉データの取得が重要であることを指摘するとともに、個々の現象に対する解析コード開発及び実験研究の位置付けを明確にし、研究開発におけるそれらの関連性を整理した。

(2) 関連各課室における研究開発の現状を把握し、技術情報の共有化を図ることにより、研究開発内容に関する相互理解を深め、今後の調整のための土台を築いた。

(3) 実証炉の燃料設計及び安全評価におけるニーズを明確化するとともに、実用炉段階のダクトレス炉心に対する課題を摘出した。

(4) 検討会の今後の展開として、炉心変形評価のためのデータベースの整備、クリープやスエリング評価式を策定するための照射材料データの充実、解析コード間の入出力データに係るインターフェースプログラム仕様の具体化を図る必要がある。

本検討会は平成8年度も活動を継続し、今後の展開に述べた項目を中心に、各課室間の情報交換による研究開発の効率的な遂行に資することとする。

参考文献

1) I. Maekawa, "Numerical Diffusion in Single-Phase Multi-Dimensional Thermal-Hydraulic Analysis," Nucl. Eng. & Des., Vol.120., pp.323-339 (1990).

2) 上出英樹, 林謙二他," 高速炉の自然循環除熱時におけるインターラッパーフロー現象の評価－PLANDTL-DHXを用いた7集合体ナトリウム試験－," 日本原子力学会95年秋の大会 (1995) .

3) E. U. Khan, et al.," A Porous Body Model for Predicting Temperature Distribution in Wire・Wrapped Fuel Rod Assemblies," Nucl. Eng. Design, 35 (1975).

4) J. R. Askew," Methods for three・Dimensional Fuel Management Studies on High Temperature Reactors," CONF-72090 (1972).

5) FINAS version 13.0 ユーザーズマニュアル, PNC ZN9520 95-014 (1995).

6) T.B.Fowler, et al.," Nuclear Reactor Analysis Code: CITATION," ORNL-TM-2496.Rev.2, Oak Ridge National Laboratory (1971).

7) 中川正幸, 阿部純一, 佐藤若英," 高速炉の核特性解析コードシステム," JAERI-M 83-066, 日本原子力研究所（1983年4月）.

8) 飯島進, 吉田弘幸, 桜木廣隆," 高速炉設計計算プログラム・2（二次元／三次元拡散摂動理論計算コード：PERKY）," JAERI-M-6993, 日本原子力研究所（1977年2月）.

9) H. Ikeda and T. Takeda," A New Nodal SN Transport Method for Three-Dimensional Hexagonal Geometry," J. Nucl. Sci. Technol., Vol. 31, No. (6), 497 (1994).

10) K. Sugino and T. Takeda," An Improvement of the Transverse Leakage Treatment for Nodal SN Transport Calculation Method in Hexagonal-Z Geometry," J. Nucl. Sci. Technol., to be published.

11) M. R. Wagner," Three-Dimensional Nodal Diffusion and Transport Theory Methods for Hexagonal-z Geometry," Nucl. Sci. Eng., 103, 377 (1989).

12) R. D. Lawrence and J. J. Dorning," A Discrete Nodal Integral Transport Theory Method for Multidimensional Analysis and Shielding Computations," Proc. Topcl. Mtg. on Advances in Reactor Physics and Shielding, Sun Valley, 840 (1980).

13) T. Yamamoto and T. Takeda," Present Status of 'TRITAC' Code Development and its Application to Fast Reactor Calculations," Proc. Int. Conf. on Mathematics and Computations, Reactor Physics, and Environmental Analyses, Oregon, Vol. 1, 470 (1995).

14) T. Takeda and H. Ikeda," Three-Dimensional Neutron Transport Benchmarks," NEACRP-L-330 (1991).

15) Edwards,J.A and Jones,C.J," Analysis of data from the core mechanics rig CHARDIS 1 using the program CRAMP.Paper E1/1," 9th International Conferece on SMiRT, Lausanne (1987).

16) P. J. Bramah, et al.," CHARDIS - European Collaboration on Core Mechanics." Proc. of FR'91, Vol. I, pp. 9.7-1 - 9.7-10, Oct. 28 - Nov. 1, Kyoto, Japan, 1991.

17) 福家　賢, 有井祥夫," 炉心構成履歴を考慮した「常陽」炉心の機械的挙動評価," 日本原子力学会「1995年秋の大会」要旨集, 296 (1995)

表2-1　実効増倍率及び制御棒価値計算結果の比較

	GMVP	NSHEX	HEXNOD
制御棒全引き抜き	1.0955 ±0.0004	1.0966 (+0.10)*1	1.0889 (-0.60)*1
制御棒全挿入	0.8802 ±0.0004	0.8804 (+0.02)*1	0.8748 (-0.61)*1
制御棒価値	22.33 ±0.06*2	22.39*2 (+0.06)*3	22.48*2 (+0.15)*3

*1:GMVP計算結果に対する相対誤差（単位:%Δk/k)

*2:（単位:%ρ(Δk/kk'))

*3:GMVP計算結果に対する絶対誤差（単位:%Δρ)

表2-2　領域平均中性子束計算結果の比較

－制御棒全引き抜き－

領域	上部群境界エネルギー	GMVP	NSHEX	HEXNOD
テスト領域	10.0MeV	1.34E-04 (0.15)	+0.17	-0.79
	1.35MeV	1.09E-04 (0.17)	+0.17	-1.01
	86.5keV	3.09E-05 (0.23)	-0.22	-0.08
	961eV	3.87E-06 (0.37)	-0.76	+2.98

－制御棒全挿入－

領域	上部群境界エネルギー	GMVP	NSHEX	HEXNOD
テスト領域	10.0MeV	1.66E-04 (0.15)	+0.06	-0.52
	1.35MeV	1.17E-04 (0.17)	+0.31	-0.34
	86.5keV	2.18E-05 (0.30)	-0.15	+0.17
	961eV	1.18E-06 (0.62)	-3.67	+1.07
制御棒領域	10.0MeV	9.53E-05 (0.14)	+0.24	+1.25
	1.35MeV	6.92E-05 (0.12)	+0.37	+0.80
	86.5keV	1.34E-05 (0.21)	+0.24	+1.56
	961eV	9.55E-07 (0.36)	+0.54	+5.00

※それぞれの計算コードの値は

GMVP　:中性子束の値（標準偏差(%)）

NSHEX,HEXNOD　:GMVPに対する相対誤差（単位:%）

を表す。

表4-1　熱的支配因子に関連する試験

項　目	影響評価の現状	課　題	試　験	反映先
集合体間熱移行	間隙ナトリウムの熱容量を考慮した熱伝導解析	集合体内温度分布を考慮した熱移行モデル	・CCTL-CFR試験(終了)	・ラッパ管温度評価
集合体内熱移行	考慮せず			
インターラッパフロー	考慮せず	現象のモデル化及び集合体との熱的結合	・PLANDTL-DHX試験（定常試験終了、過渡試験実施中） ・インターラッパフロー基礎試験（実施中） ・原子炉冷却系総合試験（大型Na試験施設で計画中）	・モデル化 ・ラッパ管間隙の熱伝達及び流動抵抗 ・相互干渉効果の影響評価
複合現象	考慮せず	集合体／インターラッパ／プレナム領域の結合		
炉内の炉心構成要素温度	材料の硬さから相対的温度差を評価中	測定データの信頼性向上	・「常陽」で実施中	・ラッパ管温度評価

表4-2　機械的支配因子に関連する試験

項　目	影響評価の現状	課　題	試　験	反映先
ラッパ管及びパッド部剛性	一定値	接触状況や方向への依存性評価	・集合体単体炉外変形試験	・モデル化及び計算入力データ ・集合体変形量評価
集合体下部かん合条件	集合体入口ノズルの曲げ剛性及びかん合部間隙	かん合部間隙の影響		
パッド部摩擦	一定値	パッド部摩擦モデルの高度化とナトリウム中摩擦係数評価	・ナトリウム中パッド部摩擦係数測定試験 ・集合体群炉外変形試験	・モデル化及び計算入力データ ・集合体変形及び引抜荷重評価
ラッパ管及びパッド部間隙	疑似三次元モデルによる評価	三次元詳細モデルの開発	・集合体群炉外変形試験	
炉心拘束条件		拘束枠間隙の影響評価		
集合体熱変形		熱源及び熱流動評価		・熱変形量評価
集合体照射変形（スエリング及びクリープ）		スエリング及びクリープ評価式	・集合体材料照射試験	・照射変形量評価
引抜荷重		パッド部の性状安定性及び摩擦係数	・「常陽」燃料交換時引抜荷重測定試験	・集合体引抜荷重
集合体残留変形量		三次元詳細モデルの開発及び境界条件や入力データの整備	・集合体残留変形量測定試験	・集合体残留変形量

表4-3　核的支配因子に関連する試験

項　目	影響評価の現状	課　題	試　験	反映先
境界摂動効果	中性子束分布の移動による反応度効果を評価	均質及び非均質膨張時の反応度評価	・模擬炉心臨界実験（原研FCA施設等を利用）	・径方向膨張反応度評価 ・上記データによる三次元輸送計算コードの検証
制御棒による中性子束減少効果	考慮せず	制御棒挿入状態の影響評価		
中性子ストリーミング効果	考慮せず	集合体間ギャップの影響評価		
中性子輸送効果	拡散計算を輸送補正	炉心構成要素間境界部に対する輸送理論の適用		
組成非均質効果	考慮せず	組成に対応した集合体反応度ワース評価		

表4-4　ダクトレス炉心の構造解析実施上の課題

解析体系	現状解析ｺｰﾄﾞ	項目	課題の内容	開発の方向性	取得必要データ	備考
燃料単体解析	FINAS	ダクトレス燃料集合体の構造モデル化	ダクトあり燃料に比べ、タイロッドとグリッドスペーサのスケルトンでは燃料剛性が弱く、燃料ピンバンドルを含めた場合には体系が複雑になる。メカニカルホールドダウンを採用した場合には軸方向荷重が加わり変形が助長される。	燃料集合体剛性評価上、燃料ピンバンドル剛性を含めた燃料集合体モデルにより評価する必要がある。	ダクトレス燃料の機械特性（曲げ剛性、ねじり剛性、圧縮剛性等）	解析結果の例：図4.5-4（モデルによる照射変形の違い）
2次元解析	FINAS（ビームモデルのみ）	燃料集合体間の接触状態のモデル化	ダクトレス燃料集合体ではダクト有り集合体と異なり、ギャップの漏れ流れを防止するため、燃料パッドのない構造を狙っており、それにより燃料集合体間の接触位置がパッド部に特定できない	グリッド部のみでなく、ピンバンドル部にも接触要素を考慮したモデル化必要。	ダクトレス燃料の機械特性、ダクトレス燃料照射変形データ、炉内温度分布、照射フラックス分布データ	
		ダクトレス燃料集合体の剛性の2次元モデル化	スケルトンモデルでは2次元の列群解析は計算機の能力を超えるため、構造解析が困難	スケルトンモデルと等価な変形挙動を示すビームモデルの開発。計算機性能向上による大規模解析。	同上	
3次元解析	(PRECISE：未実施)	ダクトレス燃料集合体の剛性の3次元モデル化	スケルトンモデルでは3次元解析は計算機の能力を超えるため、構造解析が困難	同上	同上	

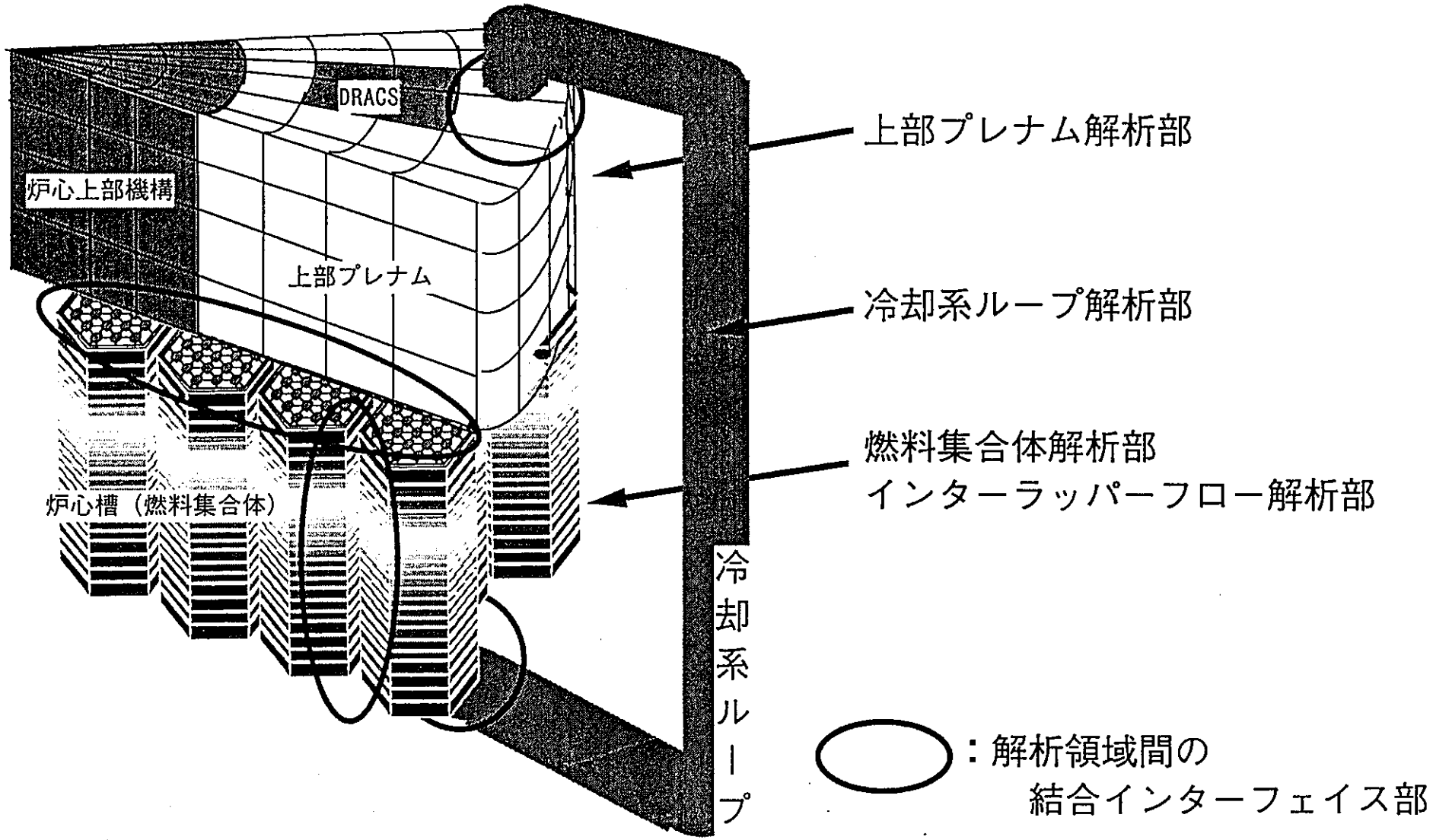


図2-1　全炉心解析コードによるプラント概念図

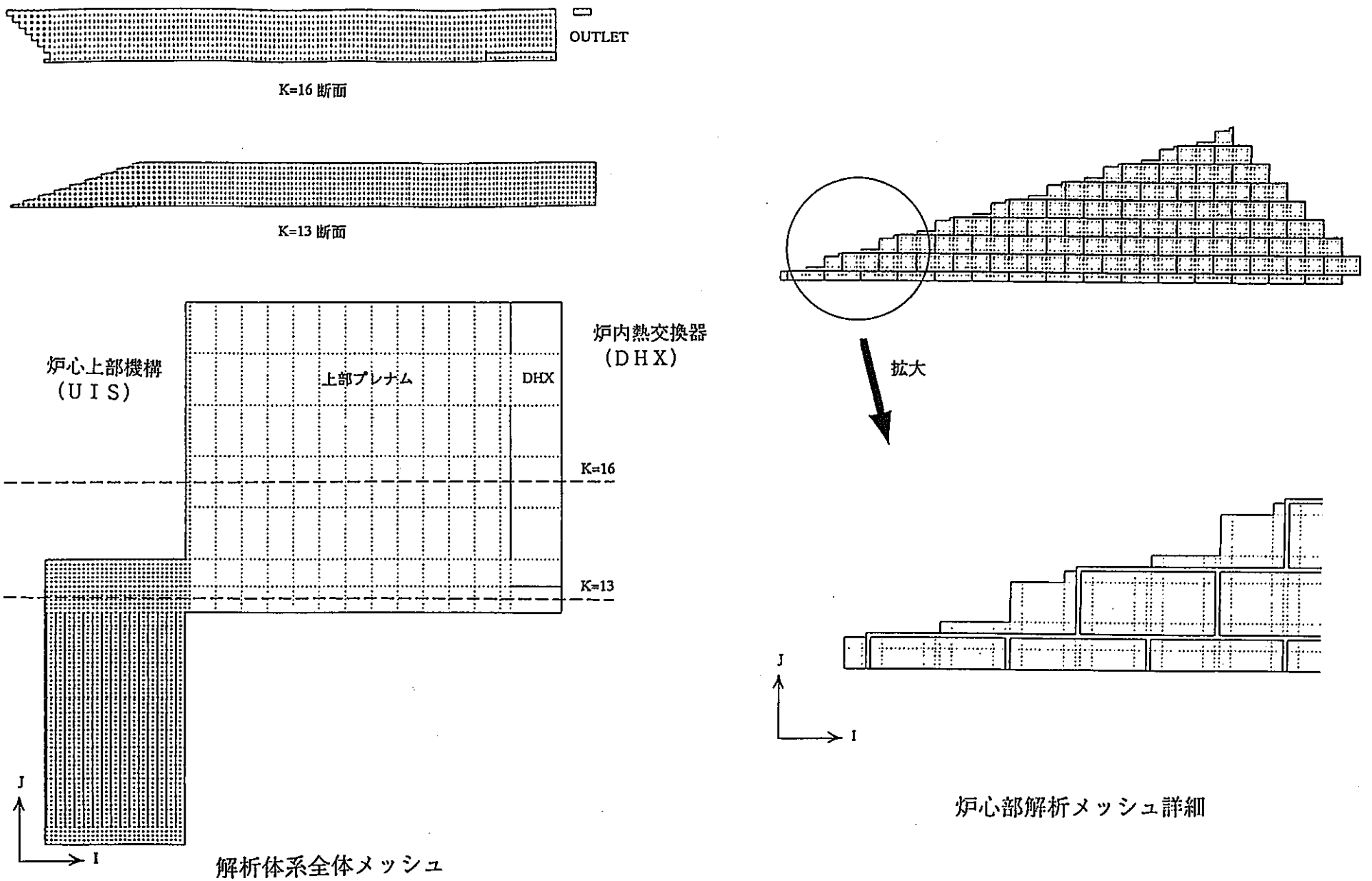
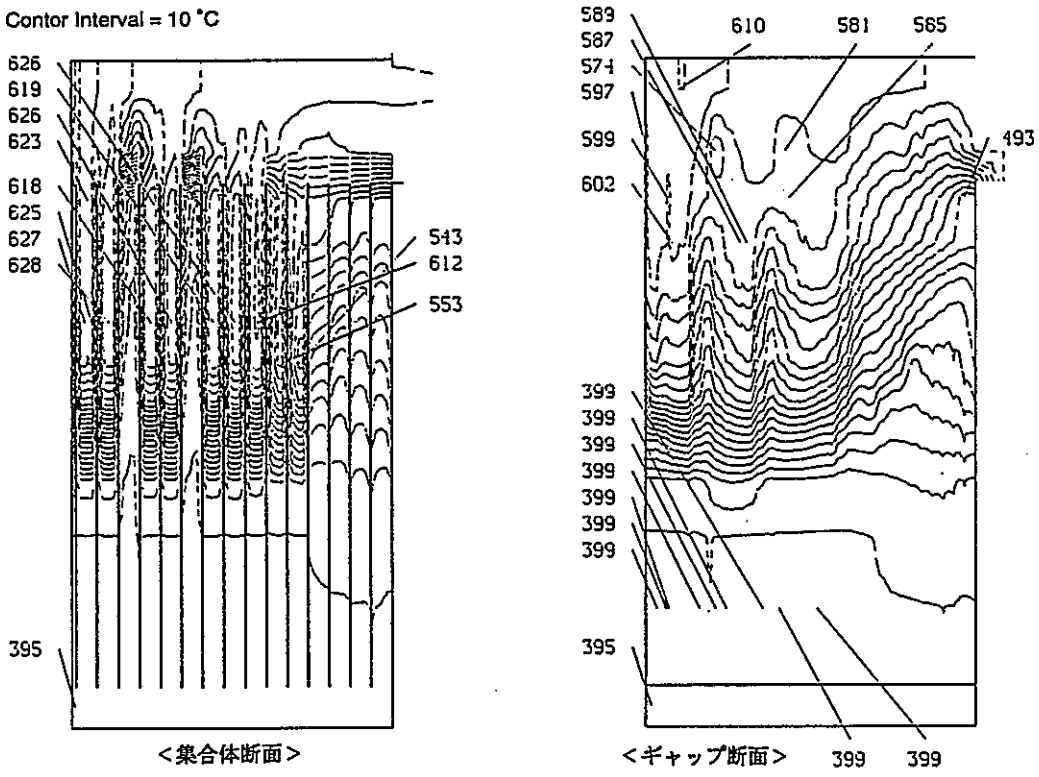
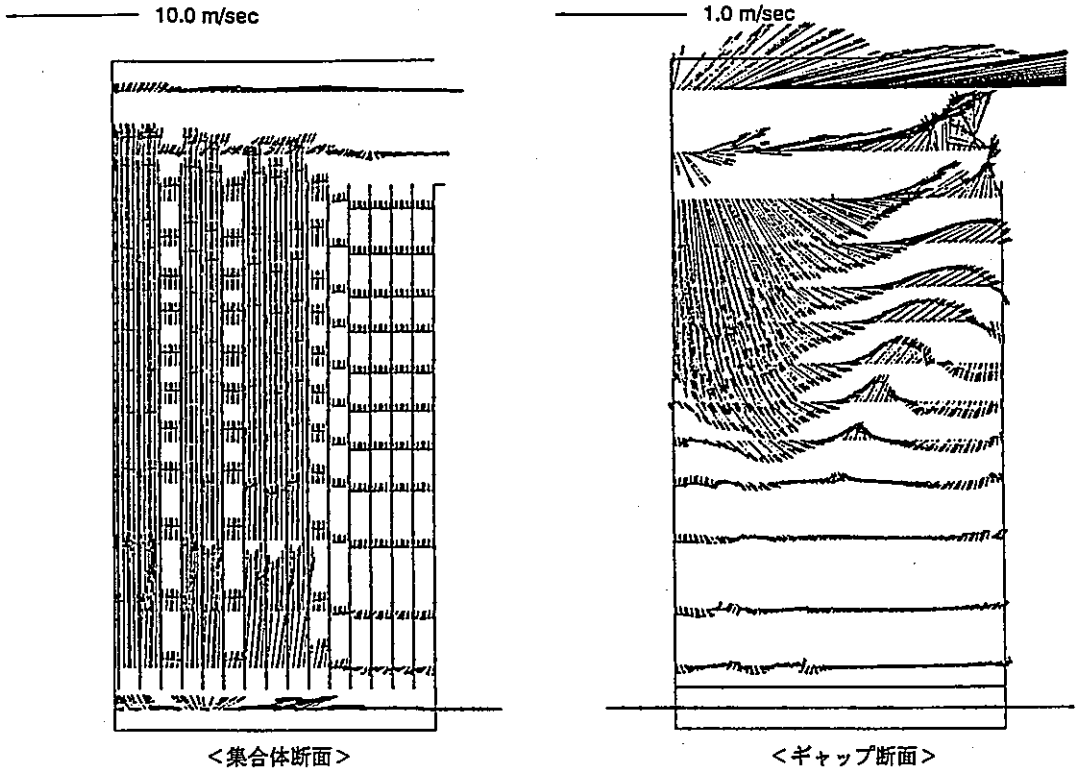


図2-2　AQUAコードによる解析モデルのメッシュ分割



炉心部温度分布



炉心部流速場

図2-3　AQUAコードによる炉心部の温度及び流速場の解析結果

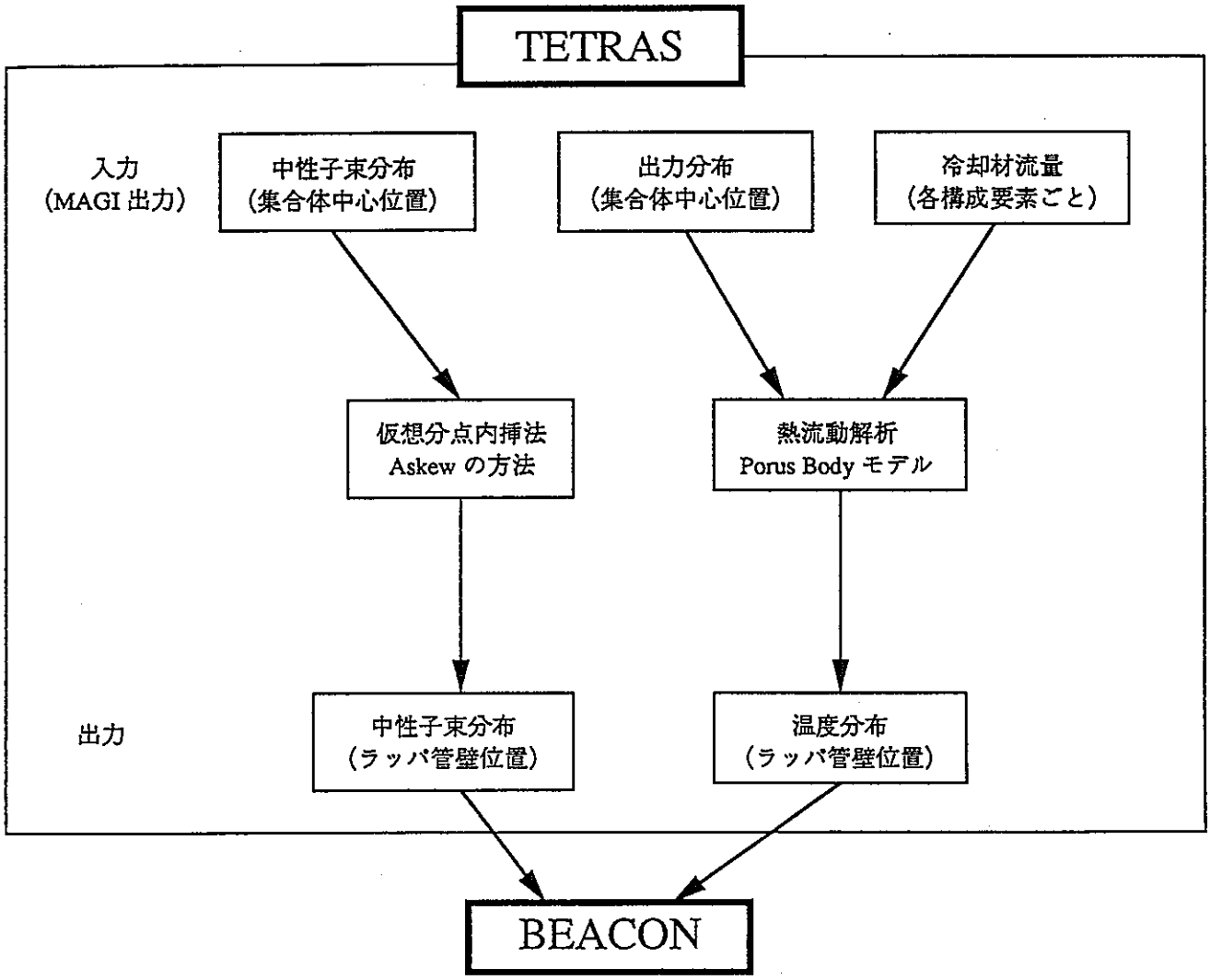


図2-4　TETRASコードの計算フロー

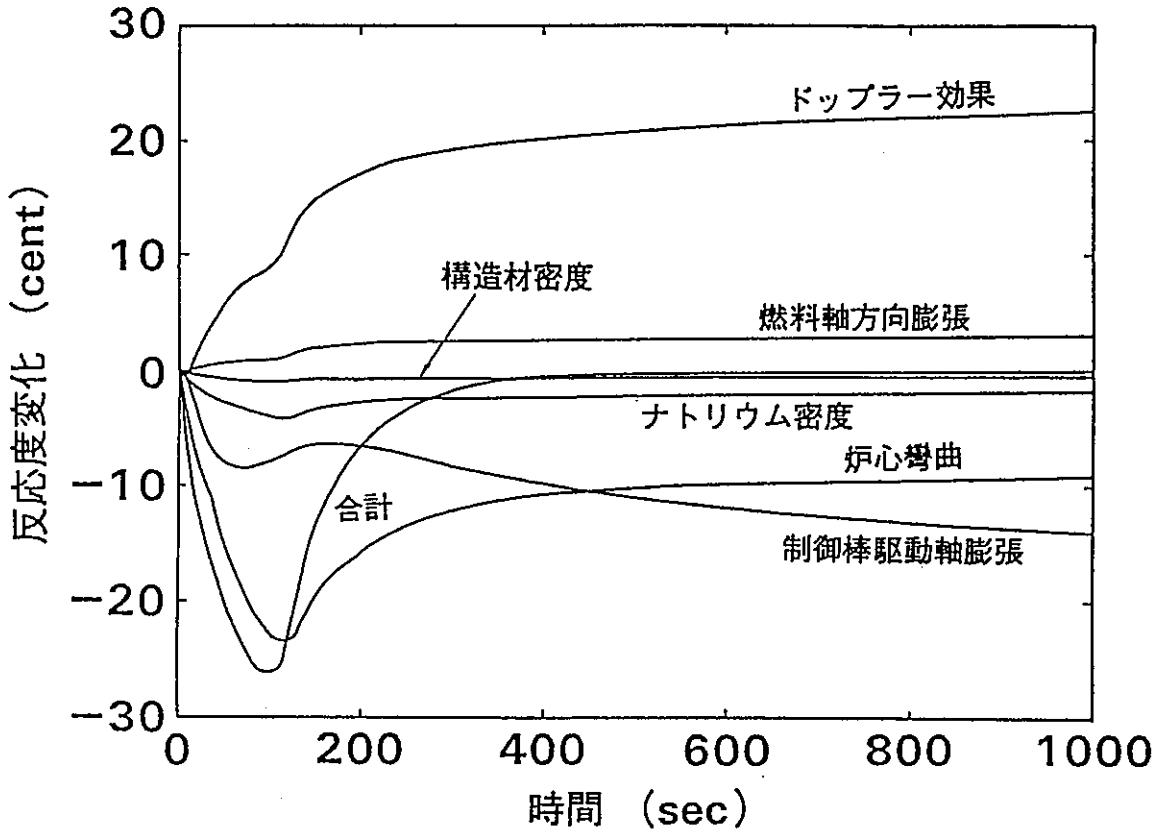


図2-5　SSCによる30%出力からのULOF条件におけるFFTF炉の反応度変化予測解析結果

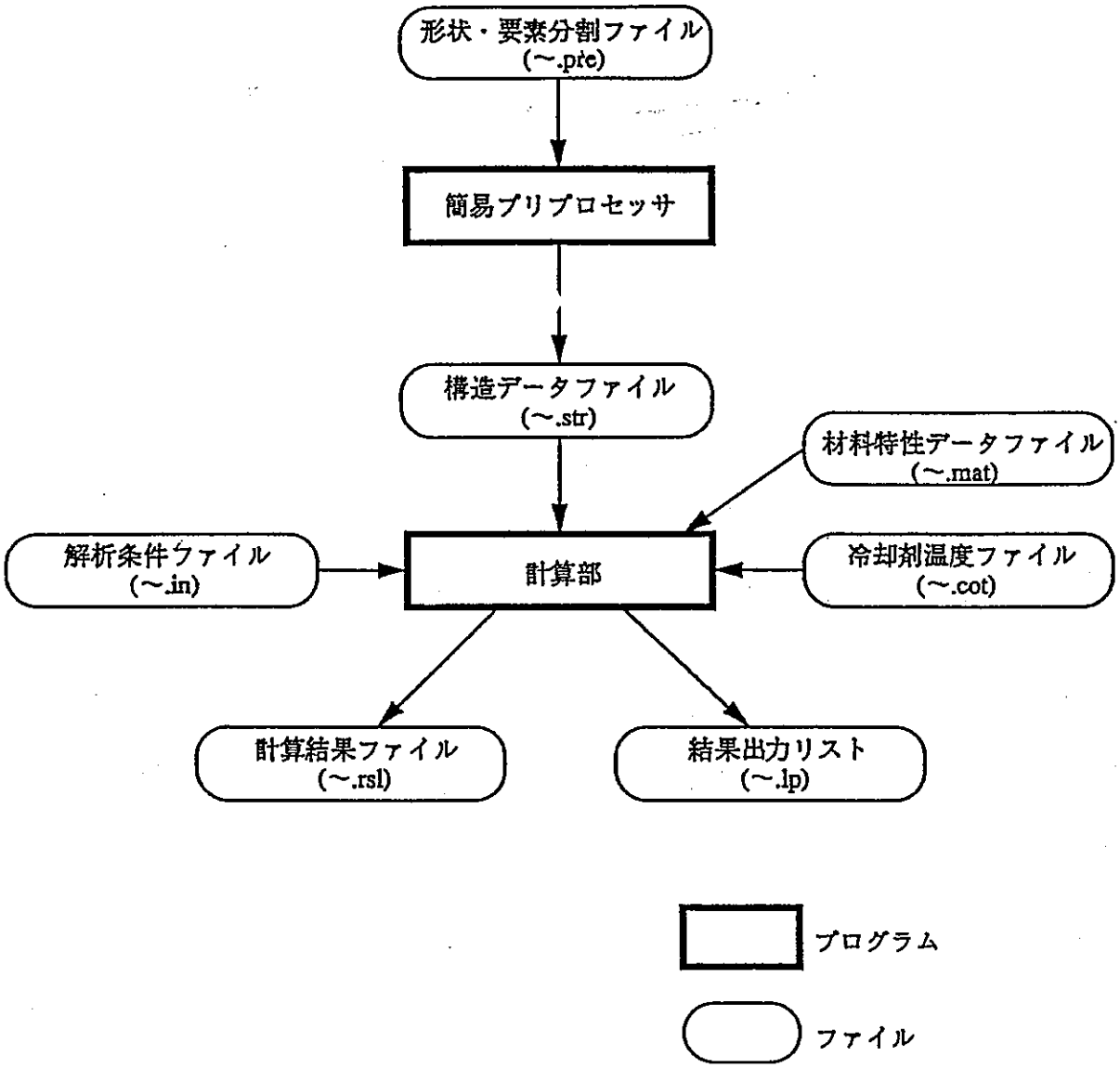


図2-6　炉心機械挙動解析コード（PRECISE)の入力

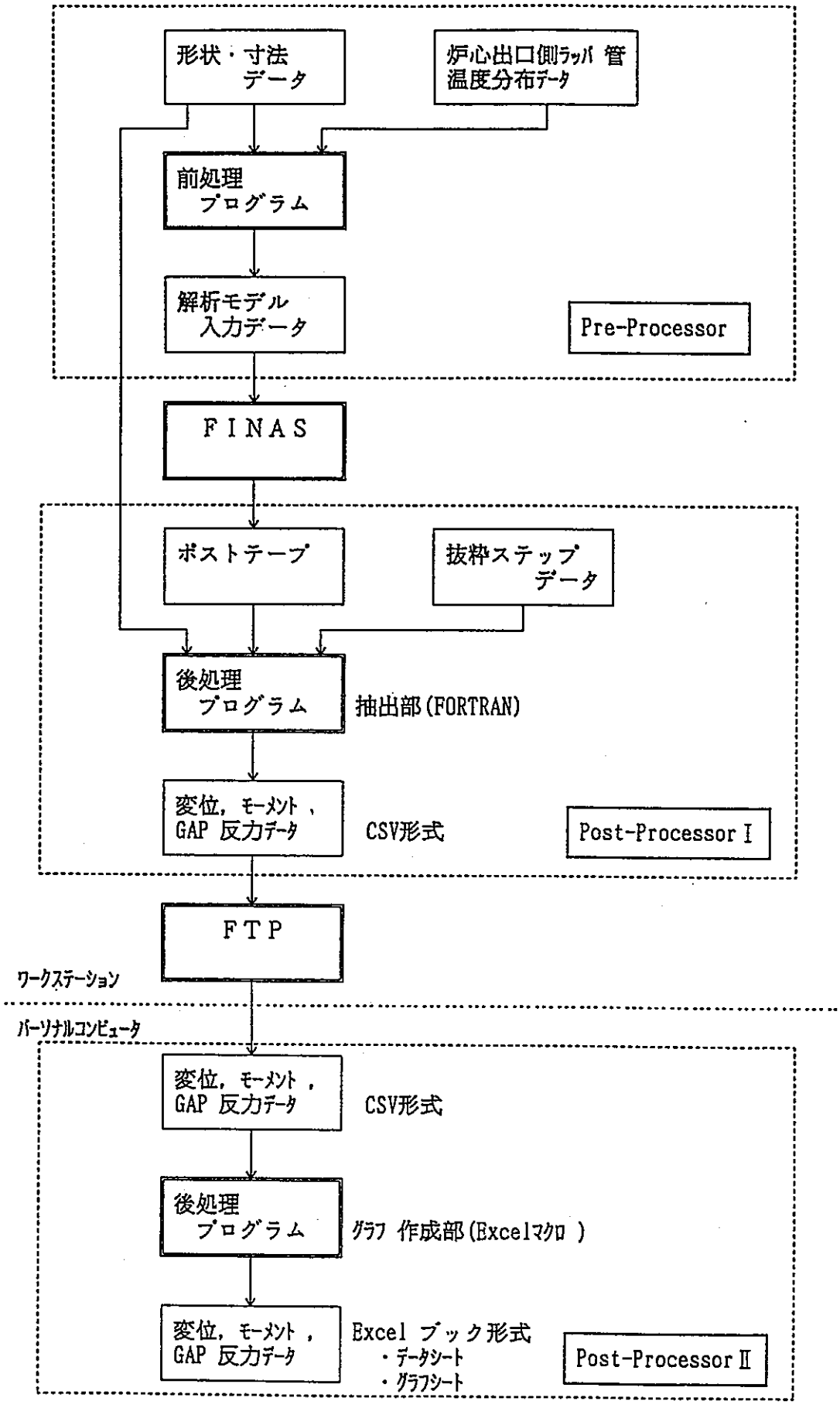


図2-7　炉心湾曲解析処理の流れと前処理・後処理プログラムの関係

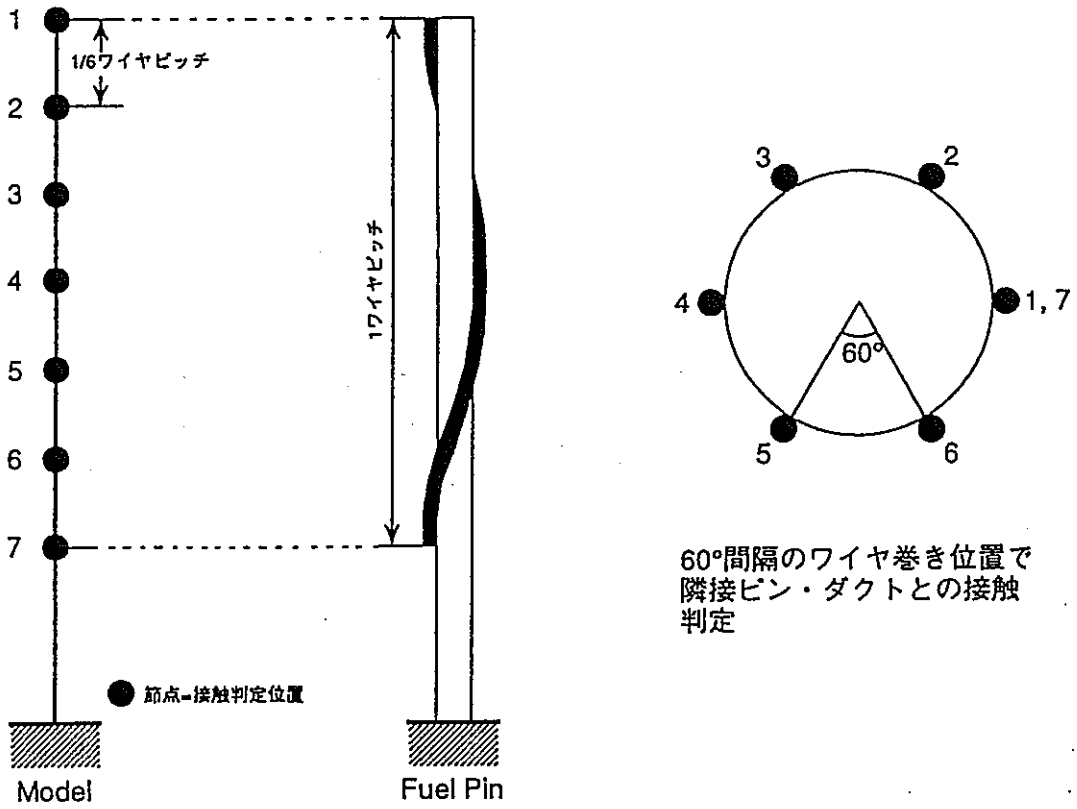


図2-8　BAMBOOコードでの燃料ピンモデル＝2節点円筒管断面の梁要素

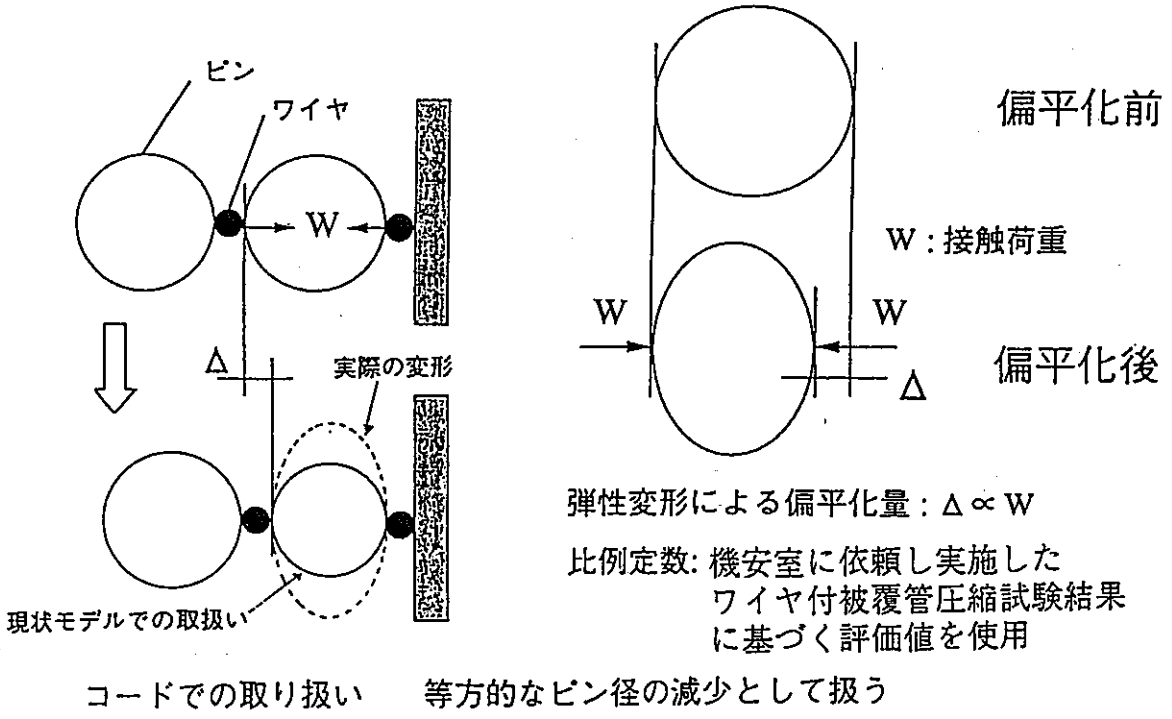
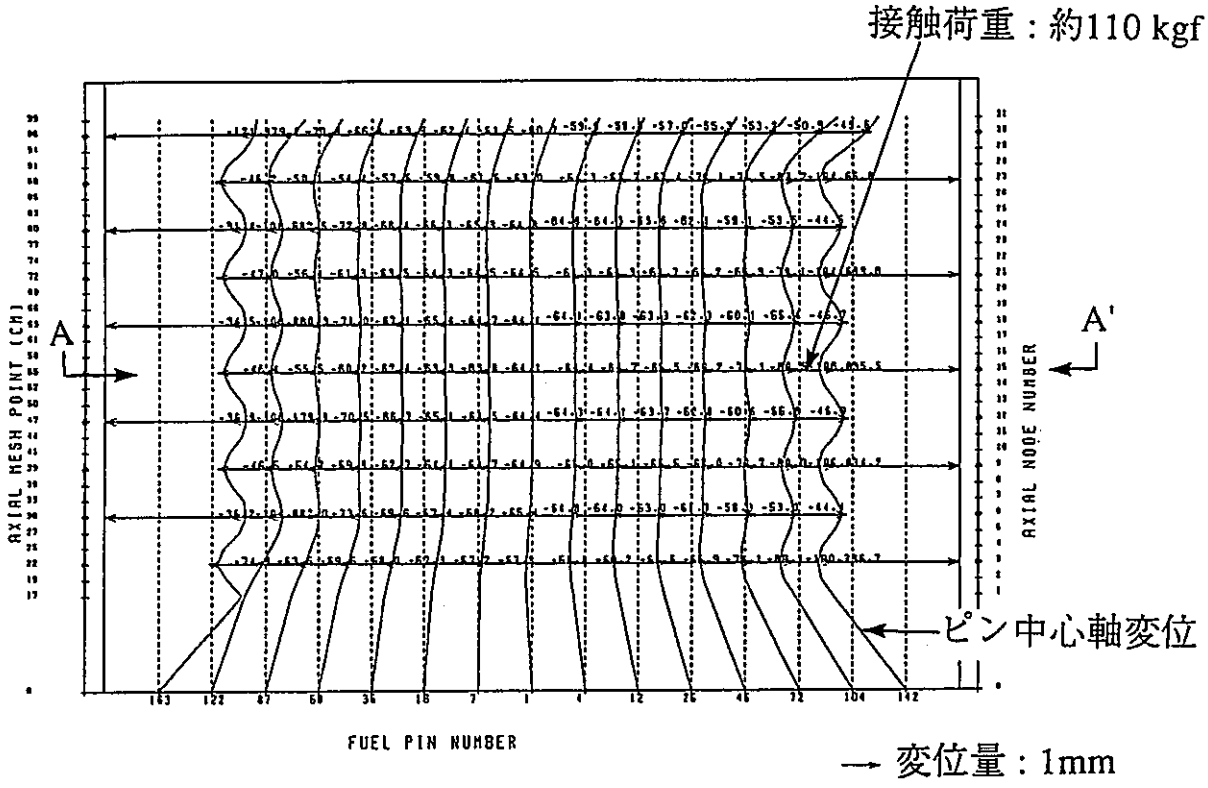
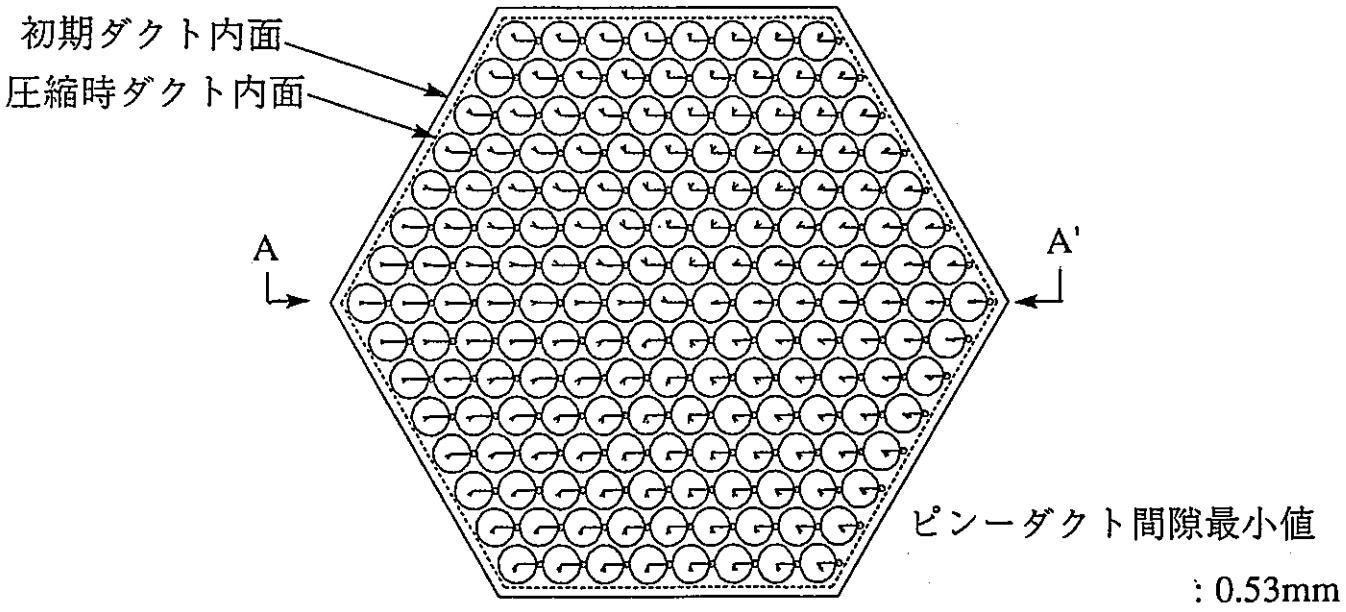


図2-9　BAMBOOコードでのピン扁平化（弾性変形）の取扱い



(a) バンドル対角縦断面ピン変位図 [(b) A-A' 方向]



(b) バンドル横断面ピン変位図 [(a) A-A' 位置]

図2-10　BAMBOOコードによる圧縮試験解析結果 [Case 4, BDI量 =3.1 dw]
(ピン直径：8.5 mm, ワイヤピッチ165 mm, 169 本バンドル)

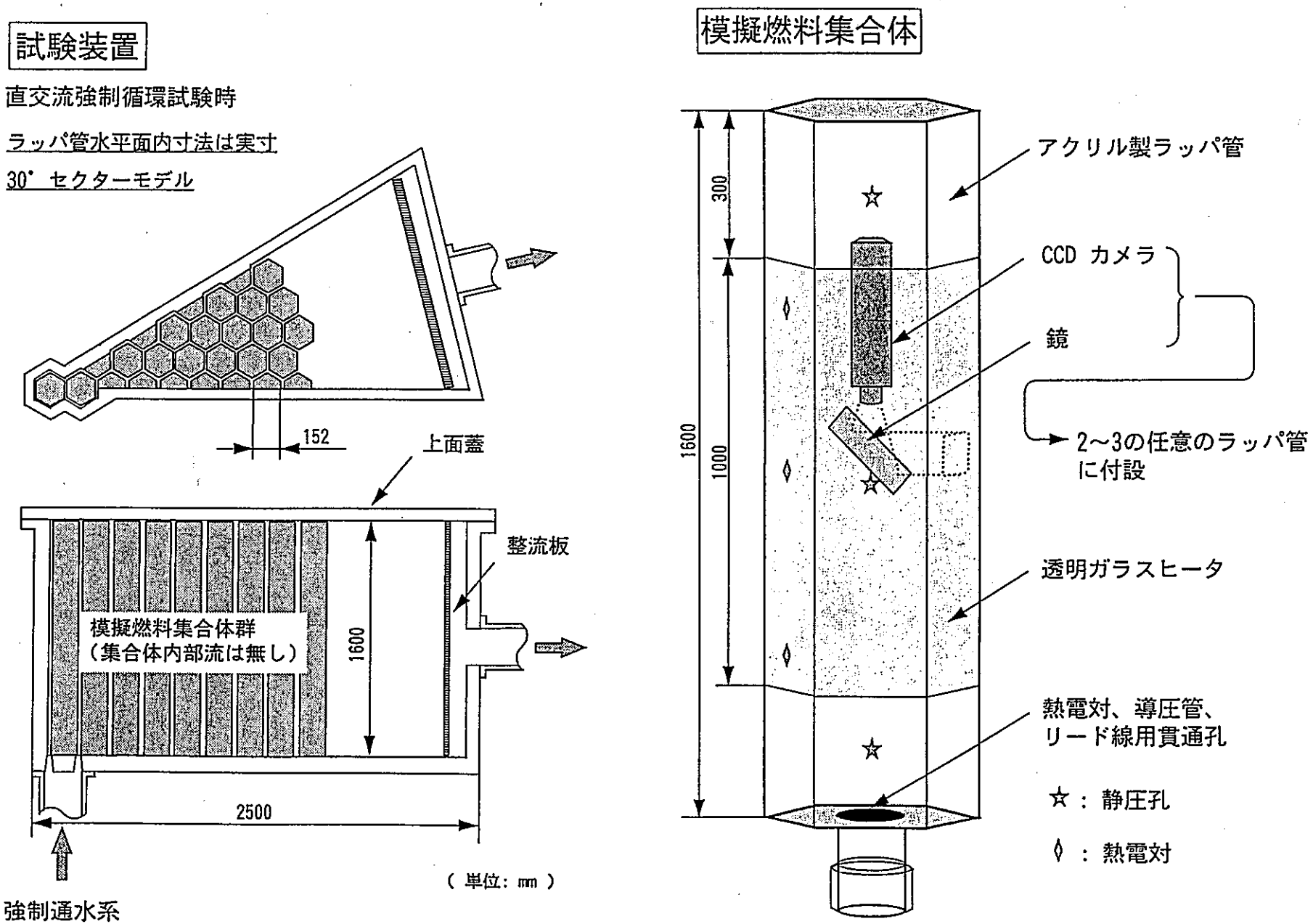


図3-1　インターラッパーフロー水試験（TRIF)の概要

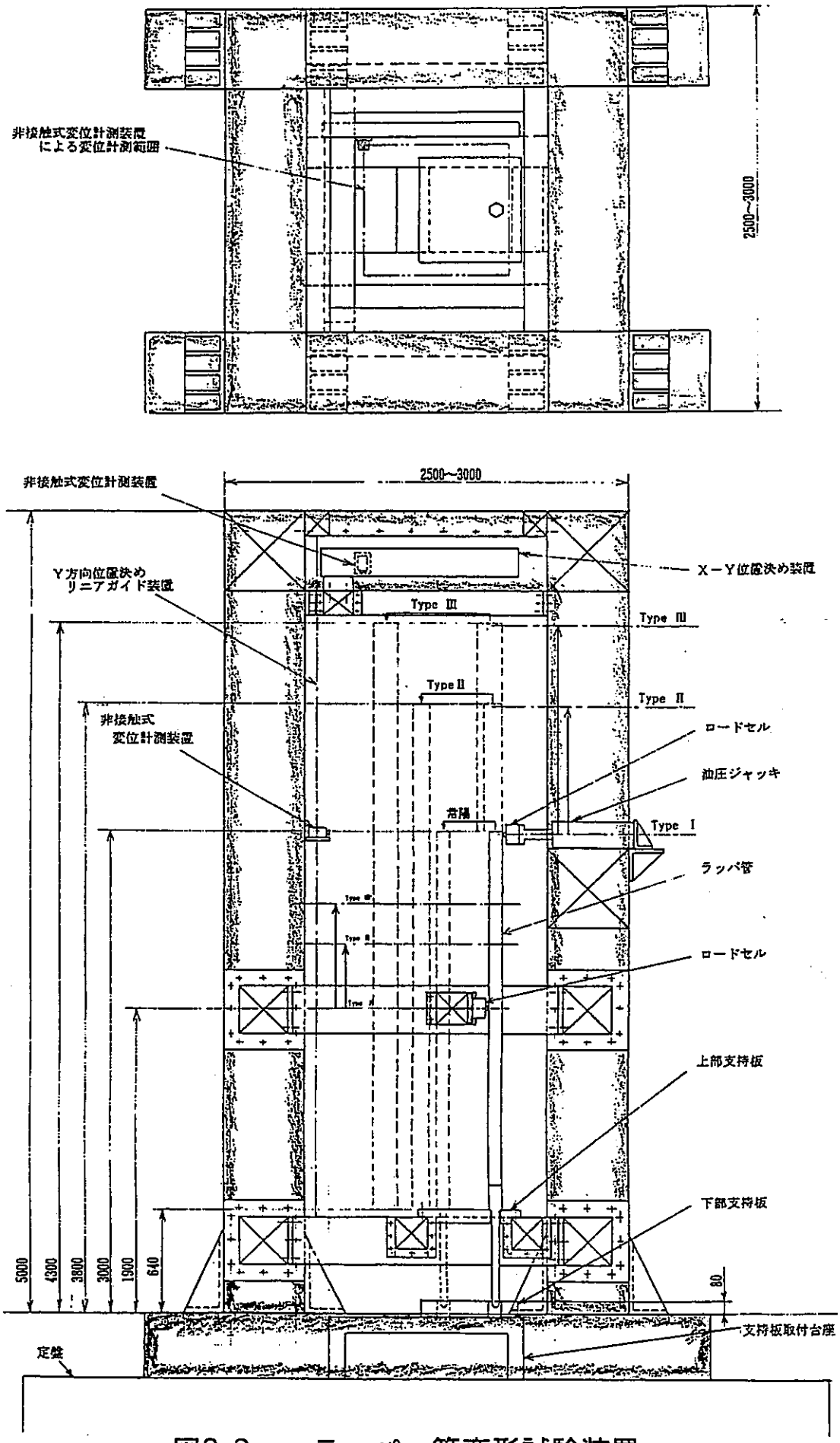


図3-2　ラッパー管変形試験装置

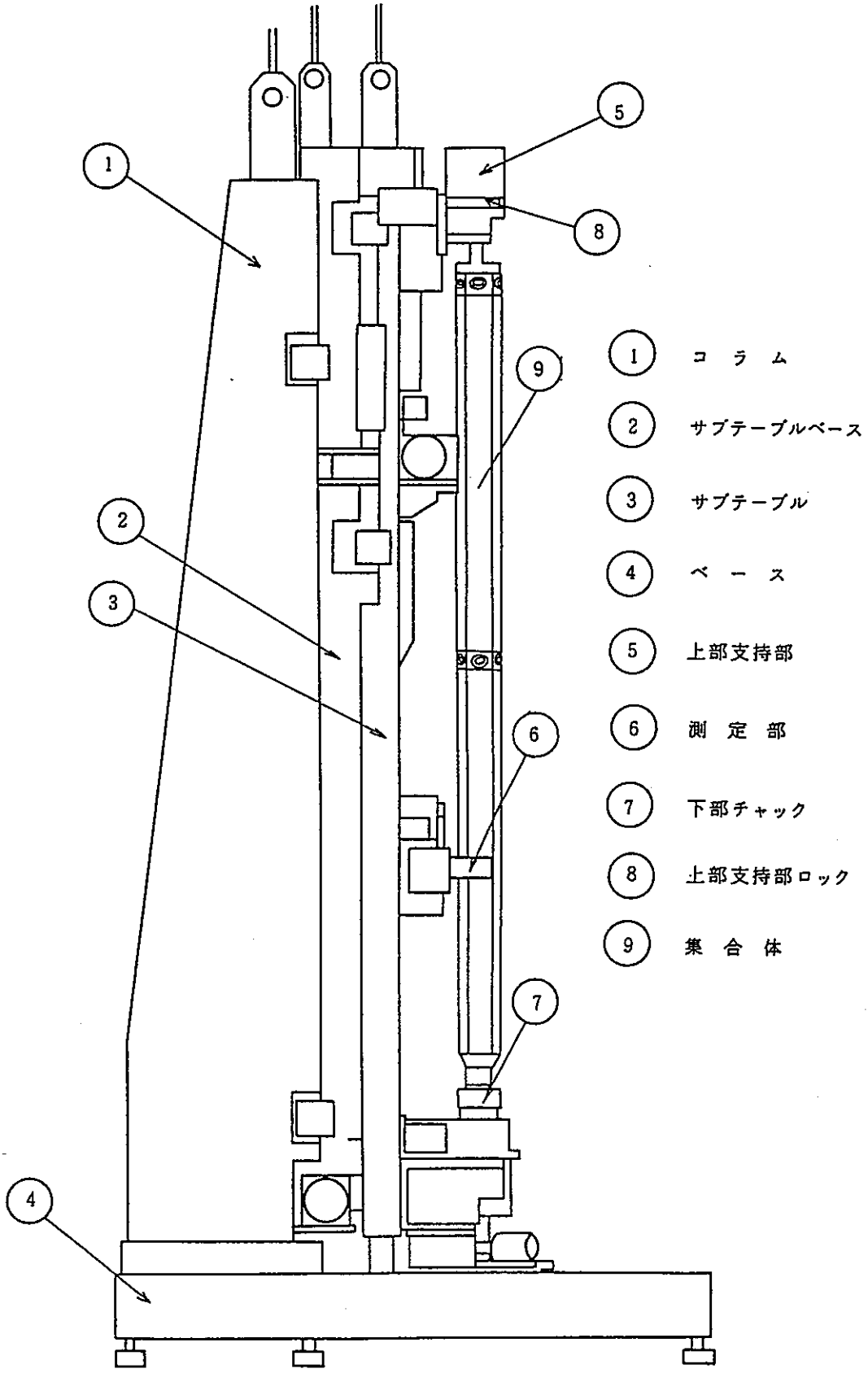


図3-3　FMF集合体寸法測定装置

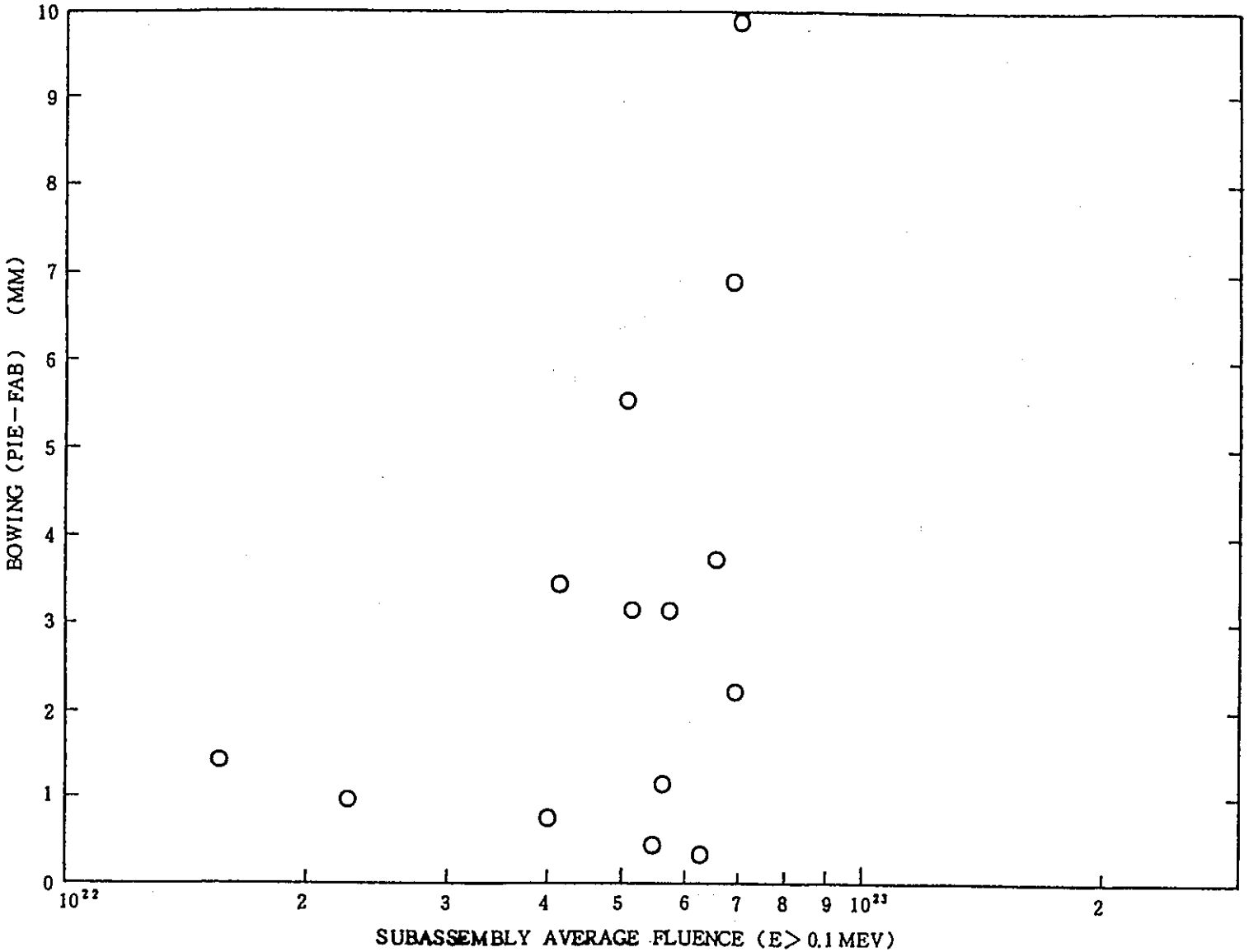


図3-4　照射後集合体曲がり量

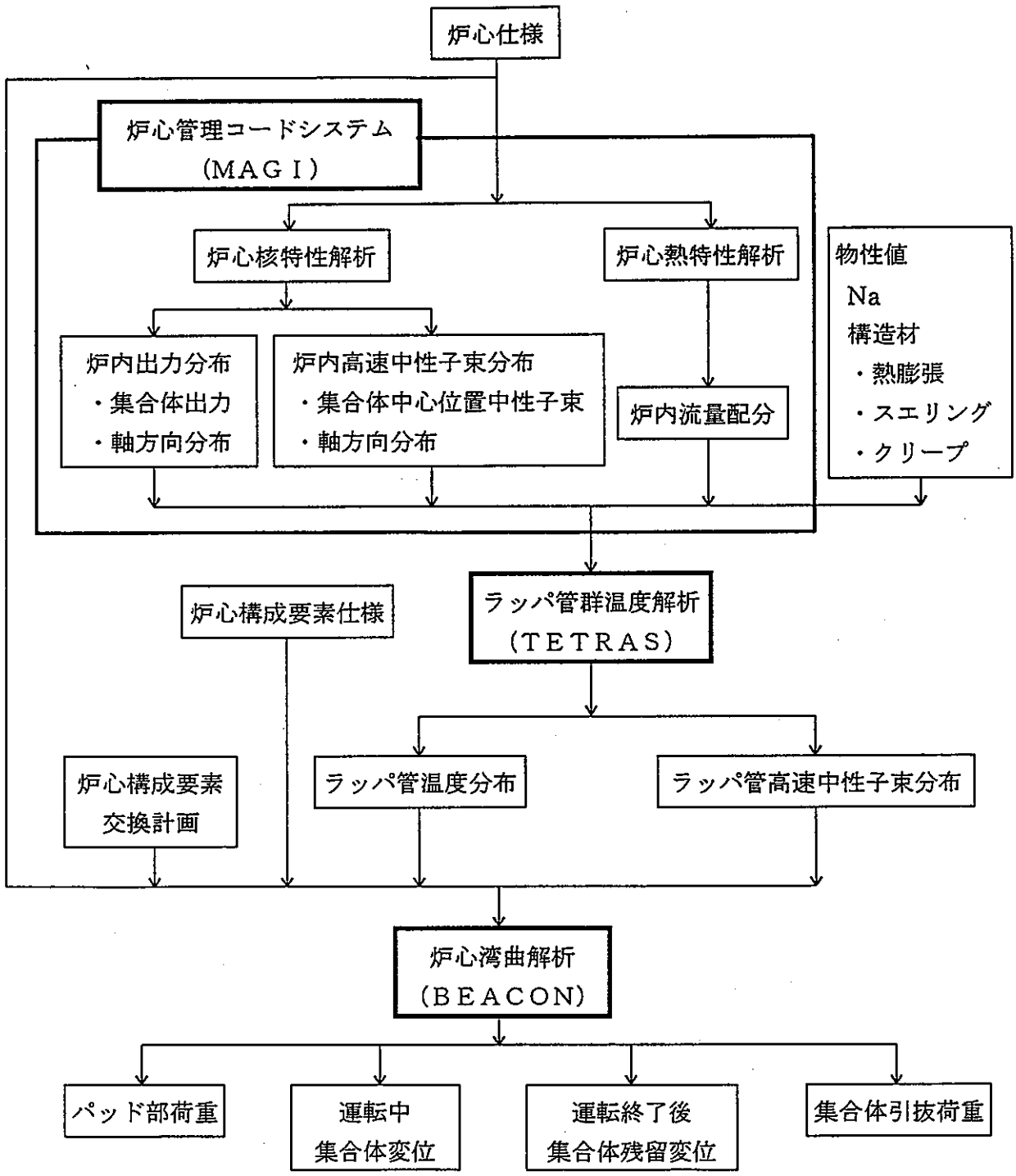


図3-5　炉心湾曲解析システムフロー

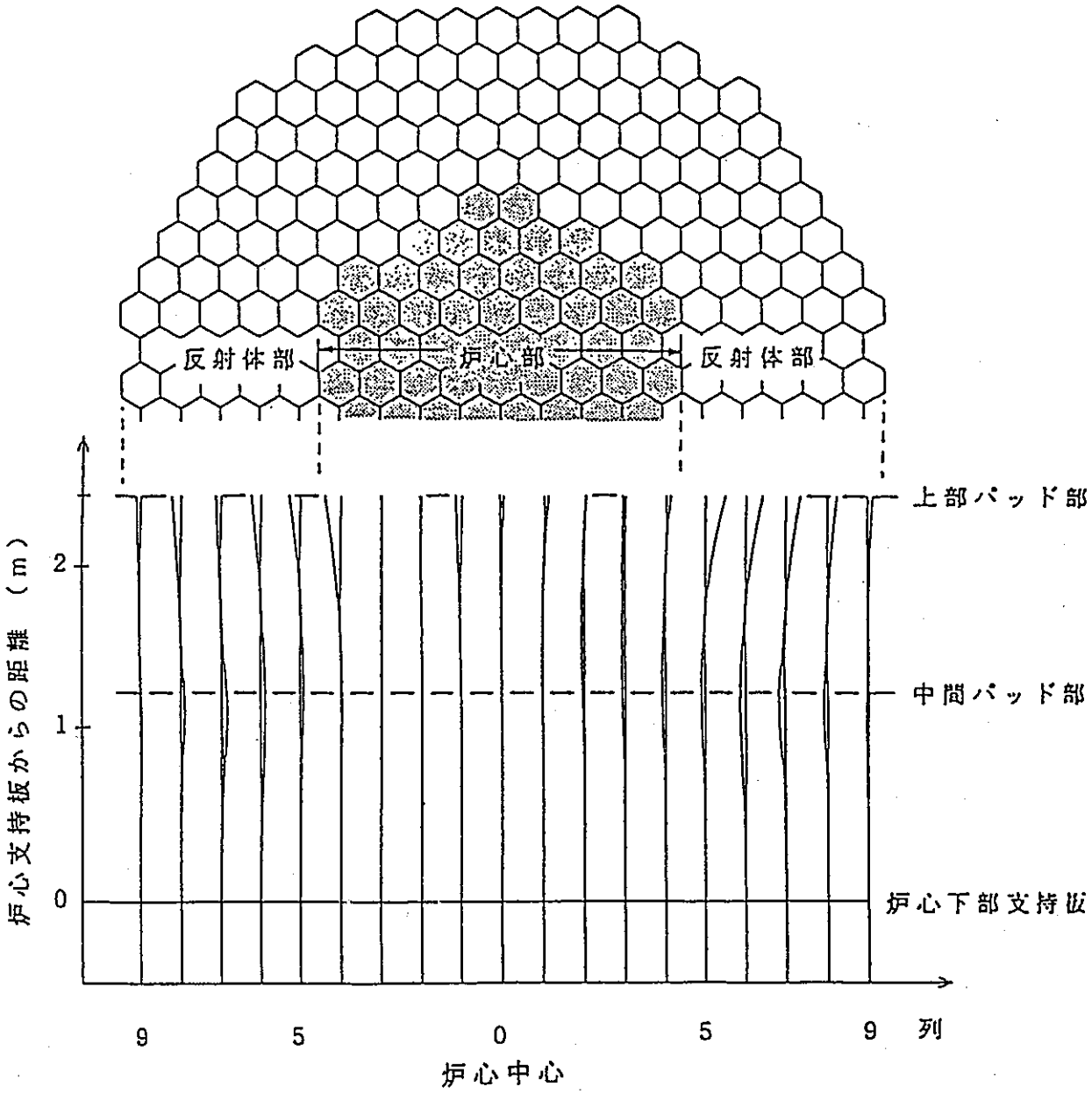


図3-6　定格出力運転時の炉心構成要素の湾曲形状

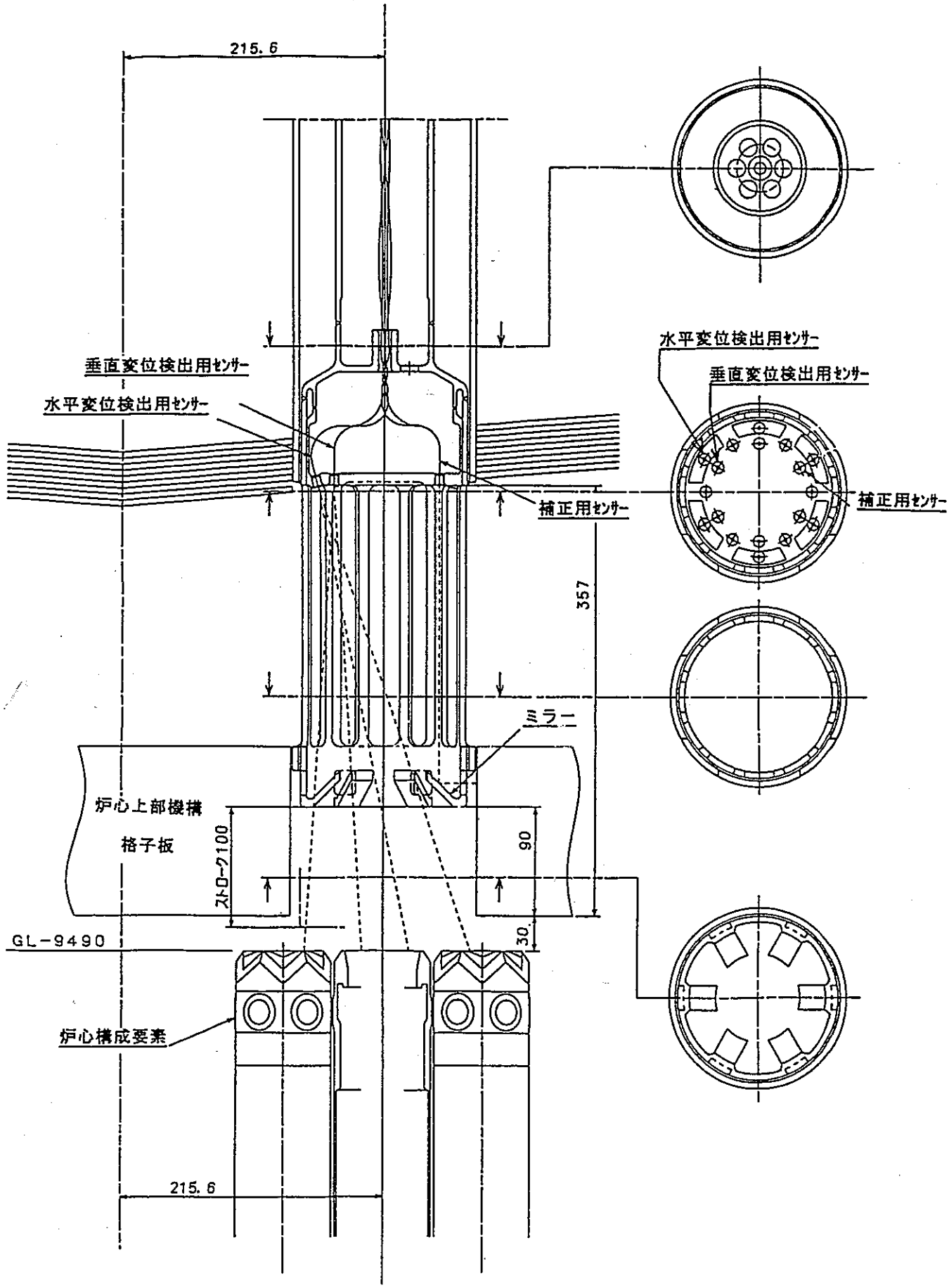
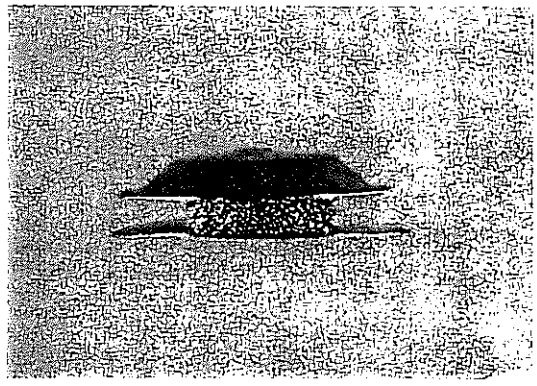
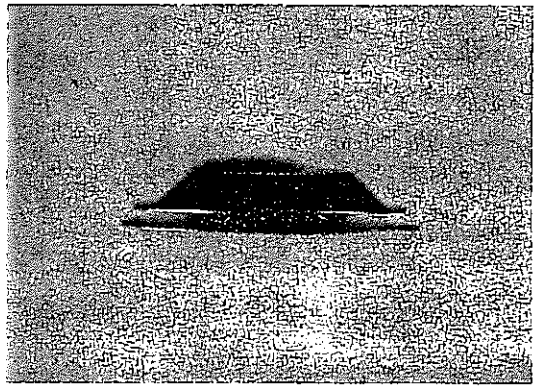


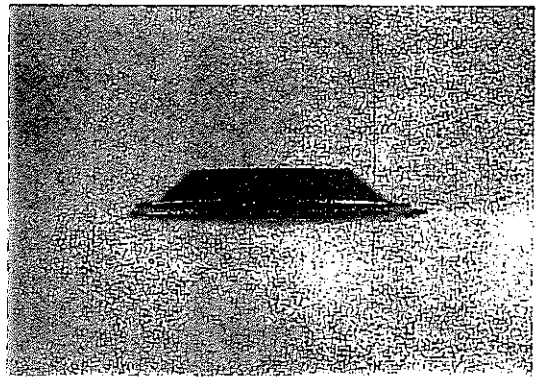
図3-7　集合体頂部変位検査装置の概念図



試験前

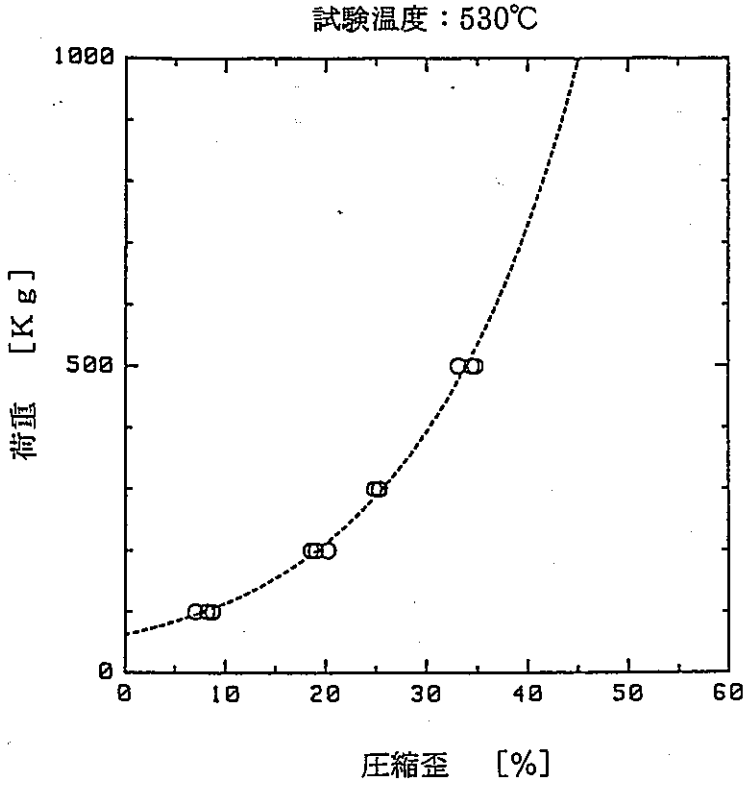


３００kg



５００kg

図3-8　　圧縮試験前後のカバー付荷重測定素子外観



（注１）相関曲線；荷重[Kg]＝61.73・exp(0.06169・歪[%])

（注２）同一荷重における歪の相関曲線予測値と実測値の差についての統計分析；

データ数＝12

（実測－予測）の平均値　＝0.000%

（実測－予測）の標準誤差＝0.722%

図3-9　カバー付荷重測定素子の炉外試験結果

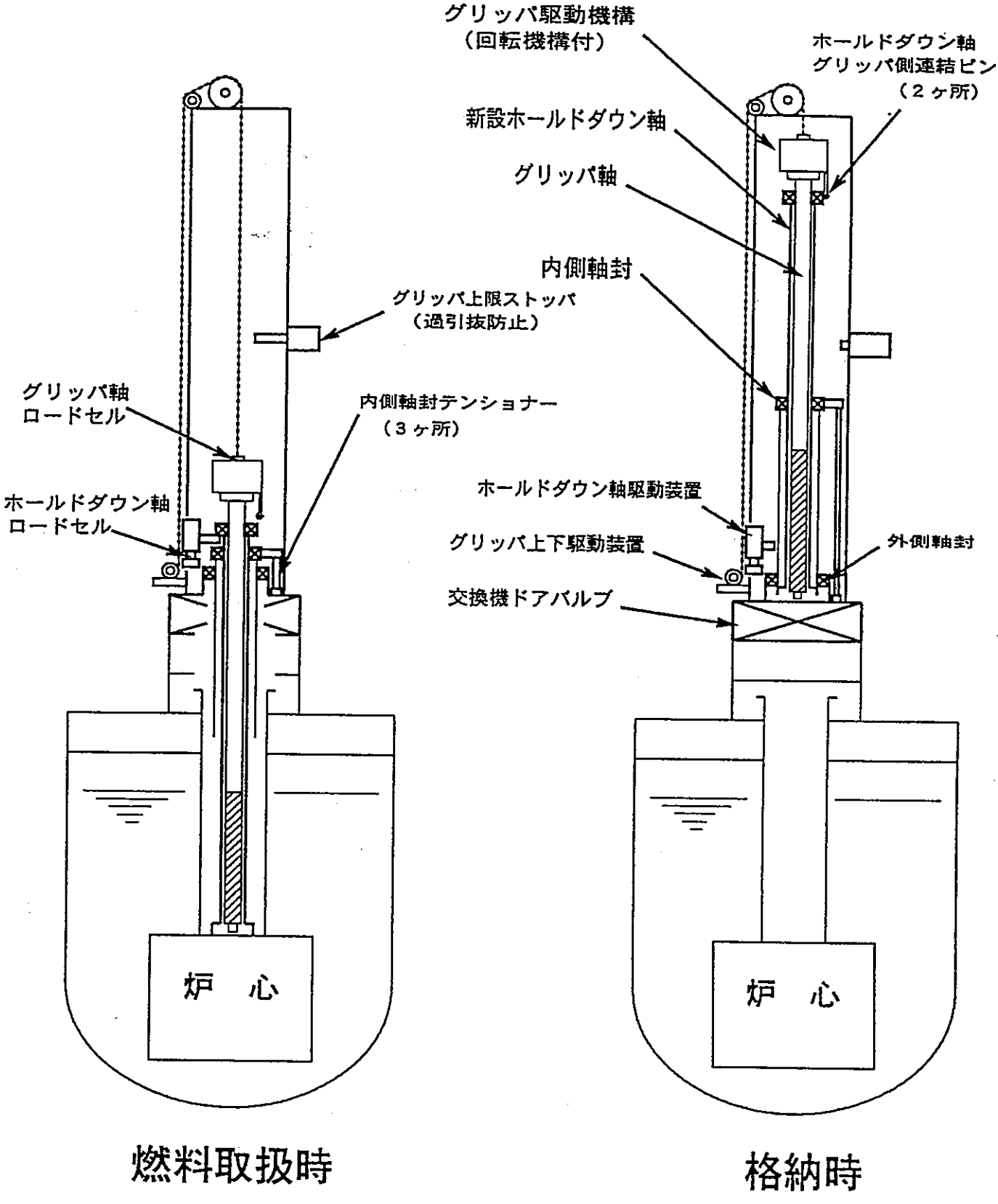


図3-10　新燃料交換機概略図

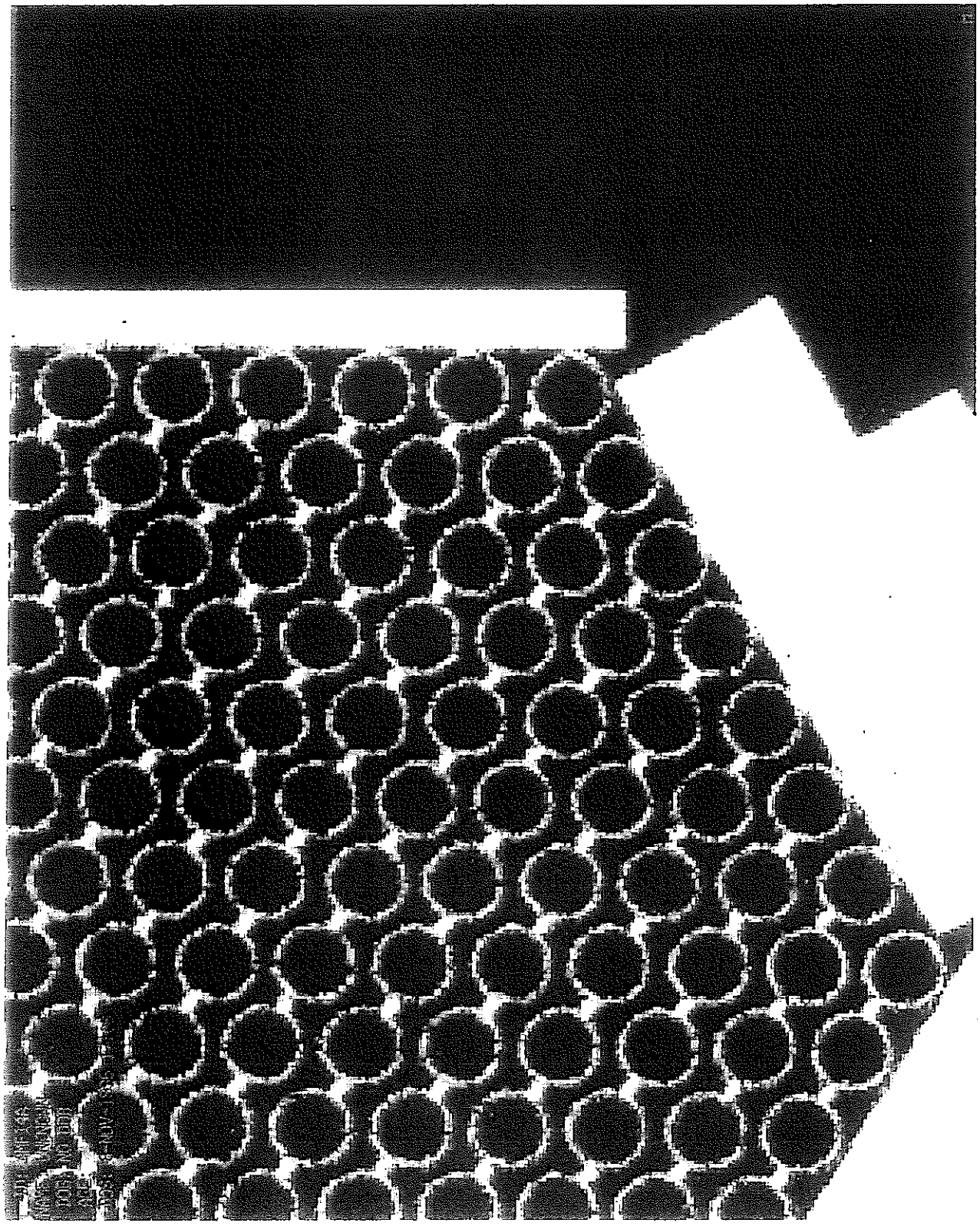


図3-11　X線CT画像

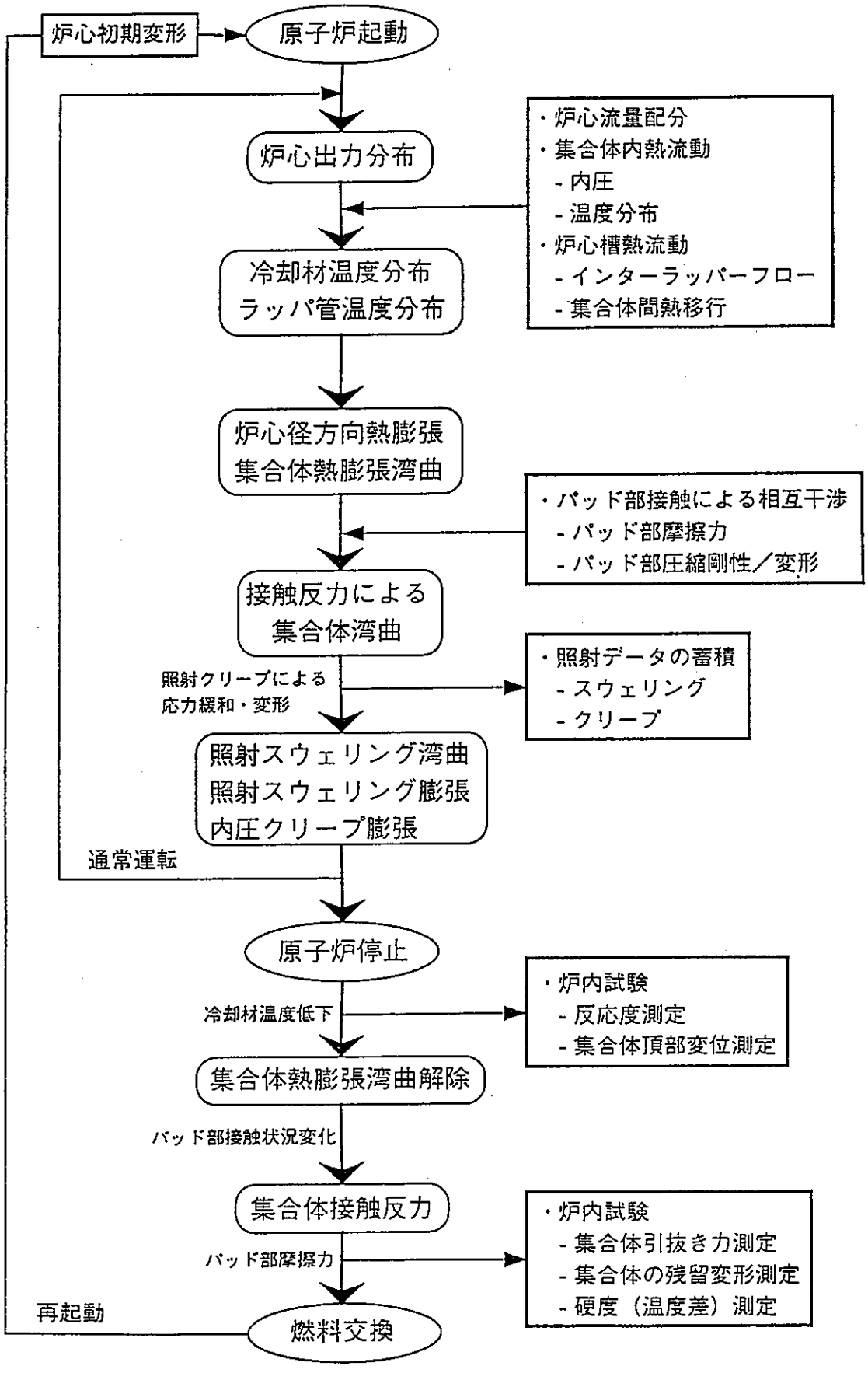


図4-1　起動・停止を含む通常運転時の炉心変形挙動

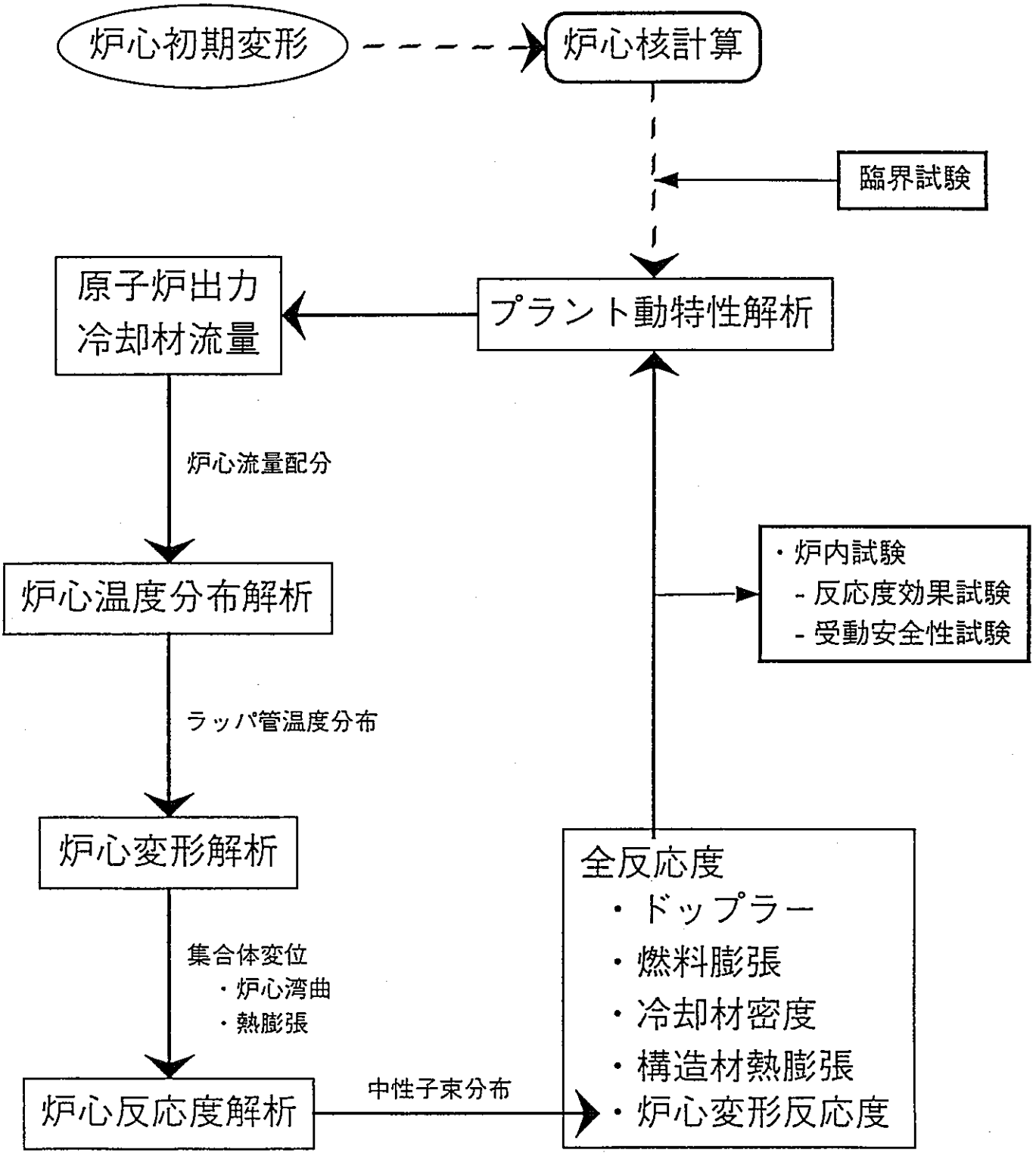
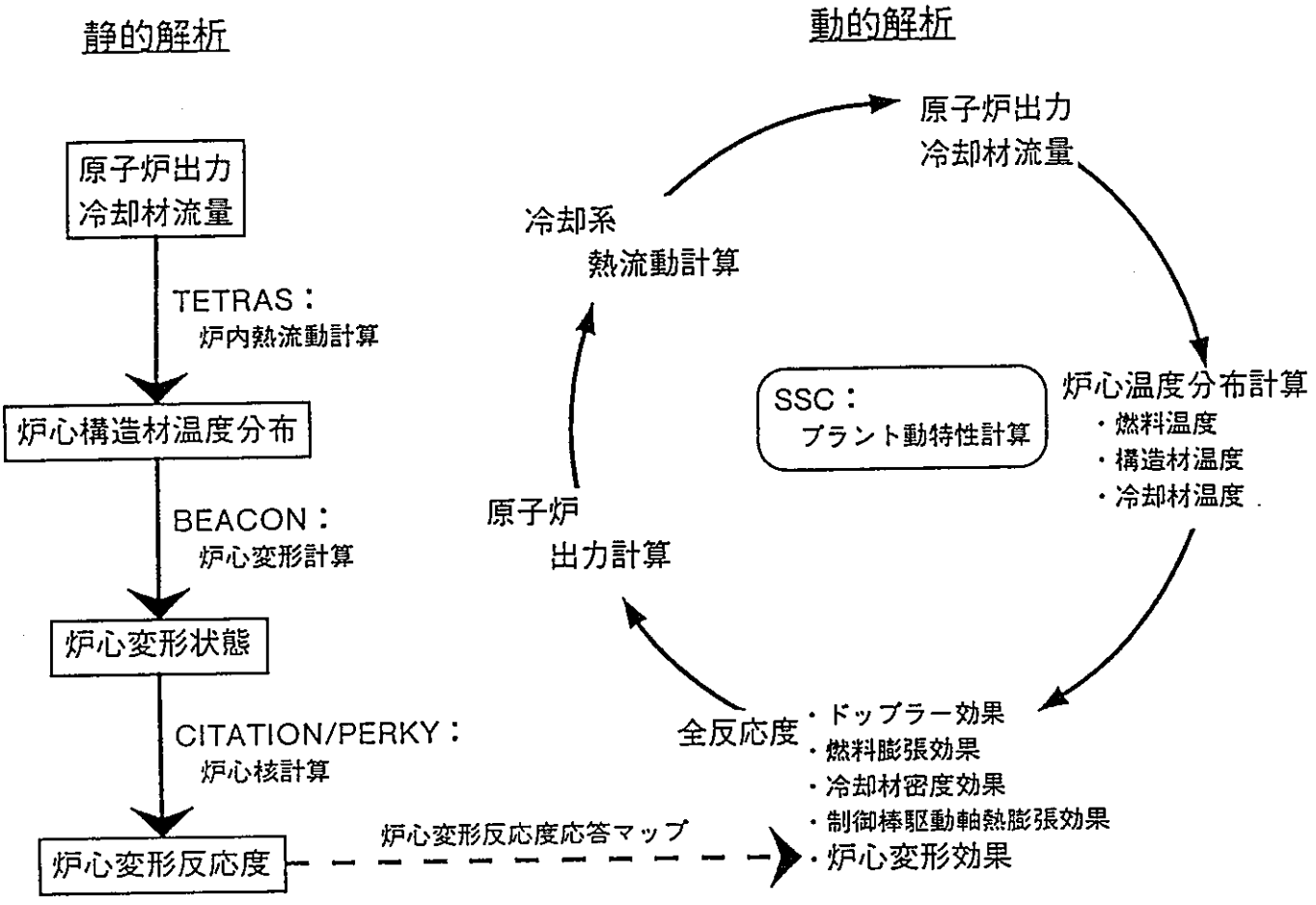


図4-2　過渡時の炉心変形挙動



炉心変形解析コードシステムの概要

計算項目	入力データ	計算内容	出力データ	解析コードとその特徴
炉心核計算	炉心形状・組成 変形状態	炉心核特性及び変形状態における反応度変化の計算	出力分布 反応度係数 反応度マップ	CITATION: 三次元拡散計算 PERKY: 摂動反応度計算
炉内熱流動計算	出力分布 流量配分 炉内温度分布	炉容器内炉内構造物等の温度分布計算	ダクトの温度分布 （軸方向、周方向）	TETRAS: 炉心サブチャンネル熱流動計算
炉心変形計算	初期炉心形状 構造温度分布 照射履歴	炉心の熱及び照射変形の計算	炉心形状 炉心熱変形状態 炉心照射変形	BEACON: 三次元ビームモデル炉心変形計算
プラント動特性計算	プラントシステムデータ	炉心及びプラント動特性の計算	炉心出力 反応度 温度、など	SSC: プラント動特性計算

図4-3　既存解析コードの組合せによる炉心変形解析システム

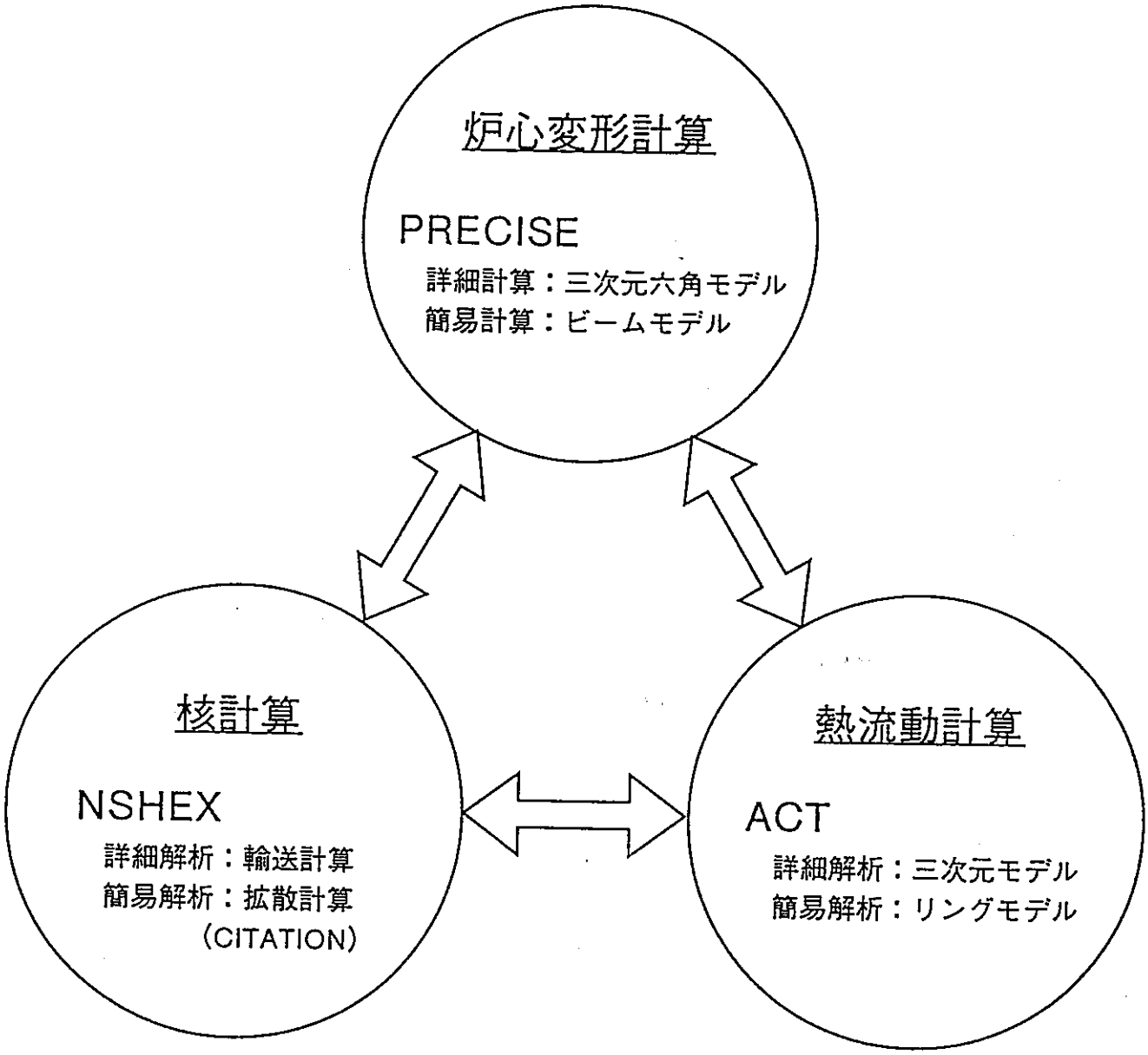


図4-4　　炉心変形統合解析システム

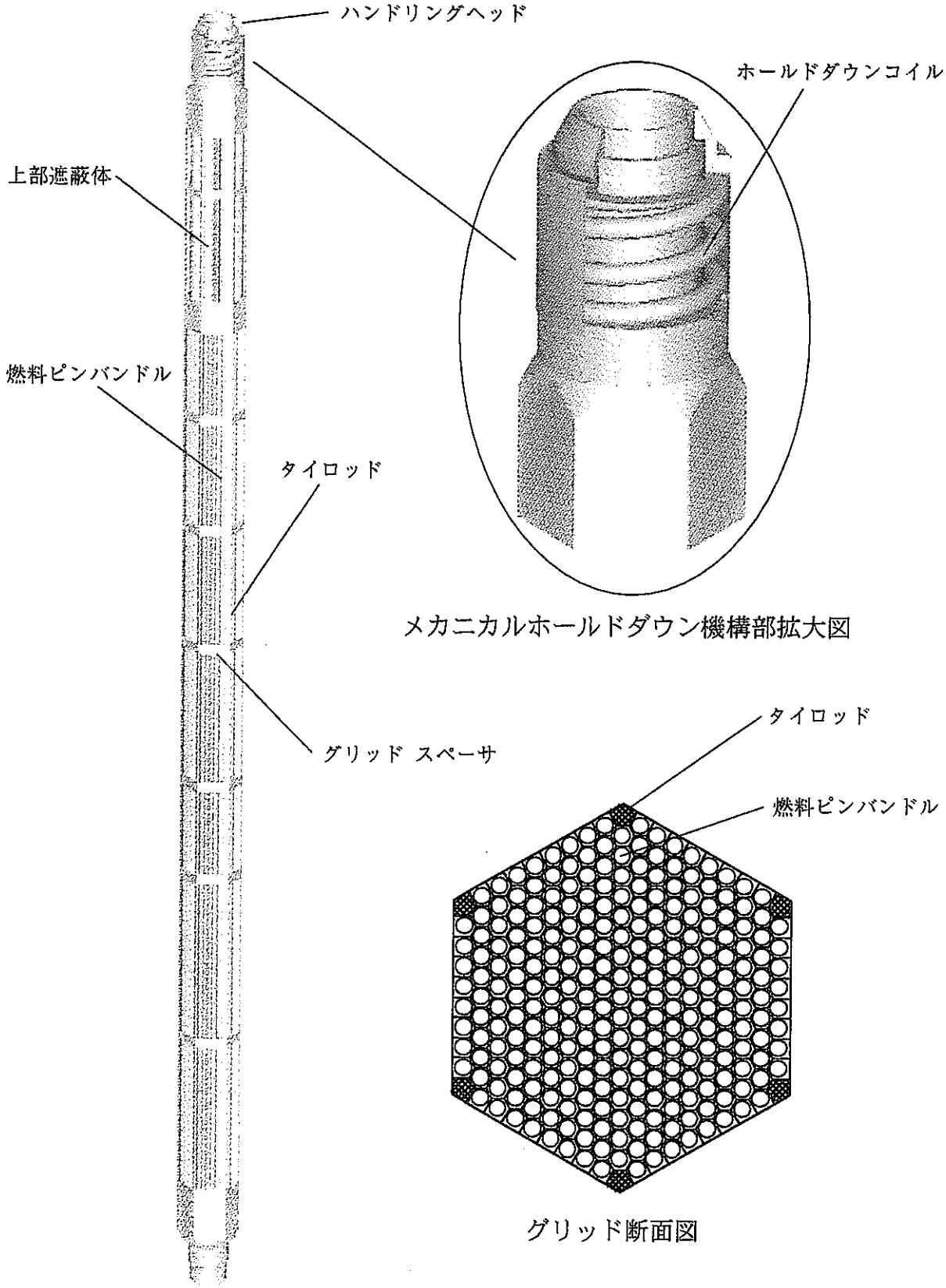


図4-5　ダクトレス・ノズルレス炉心燃料集合体

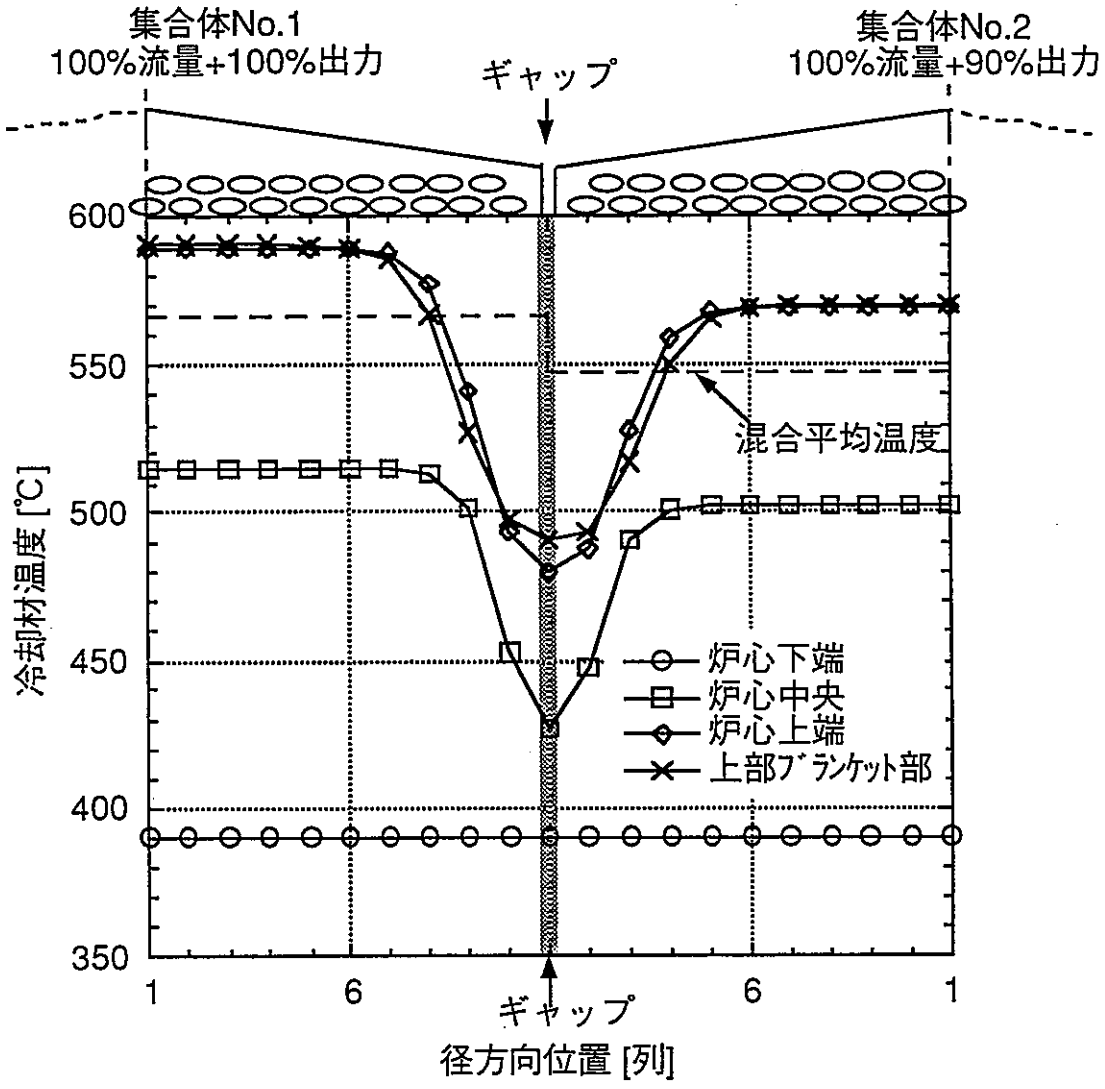


図 4-6　隣接する２体のダクトレス集合体を対象とした
熱流動解析結果の一例

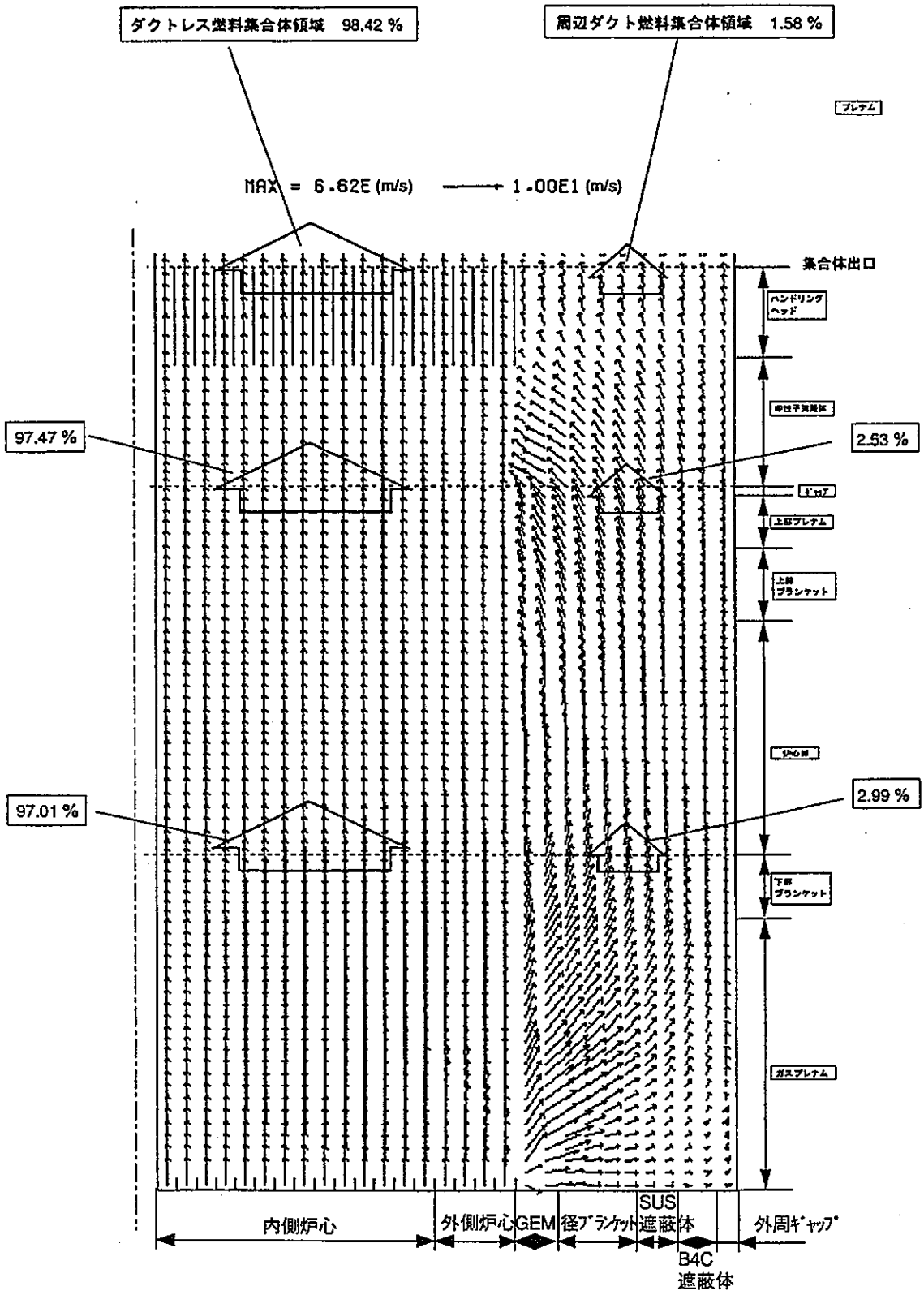


図 4-7 炉心槽内熱流動解析の一例
流速ベクトル分布

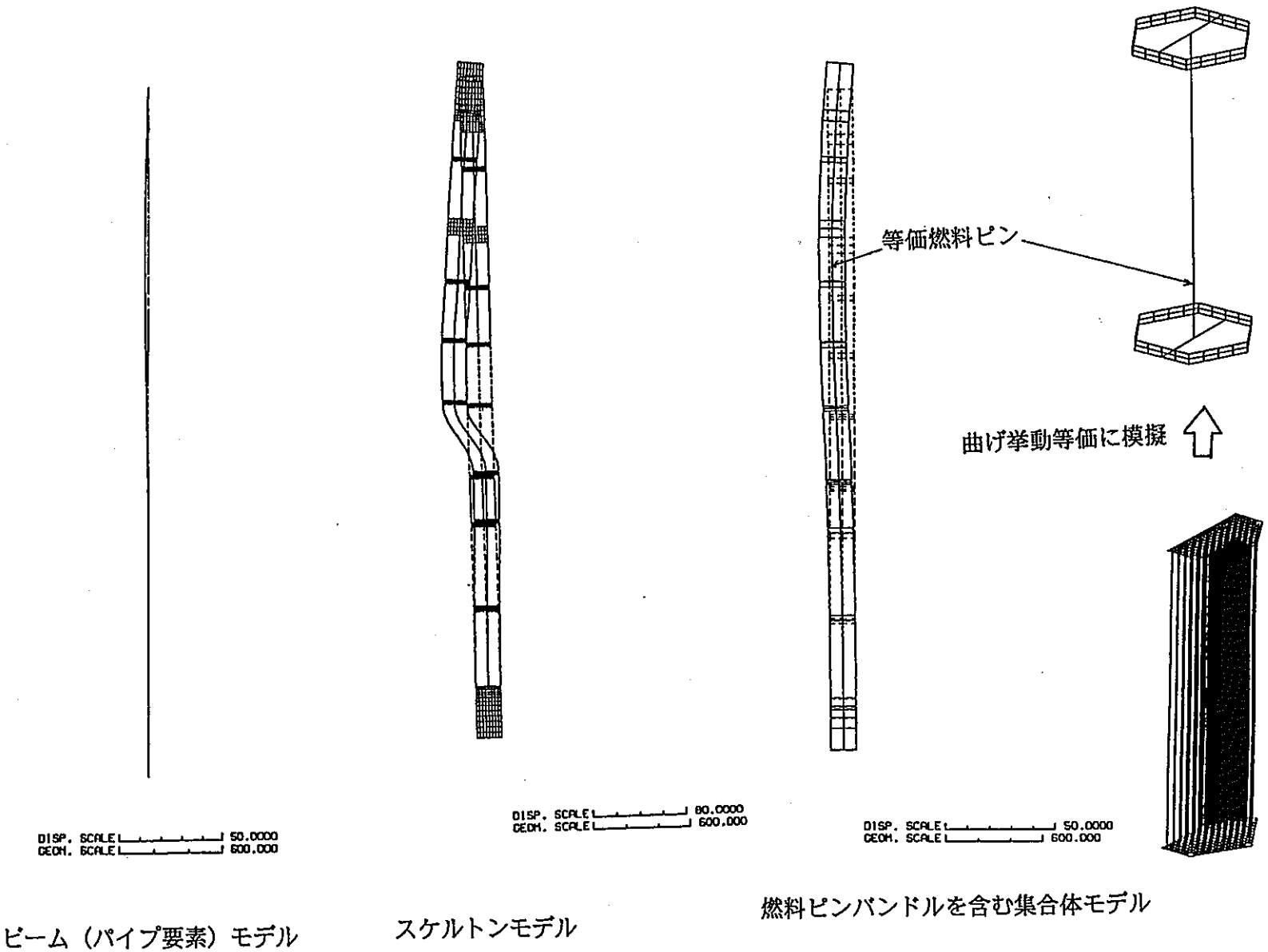


図4-8　燃料集合体単体での炉心変形解析結果の比較

燃焼度 15 万 MWD/T、燃焼末期、軸方向MHD 荷重 500kg、解析コード FINAS

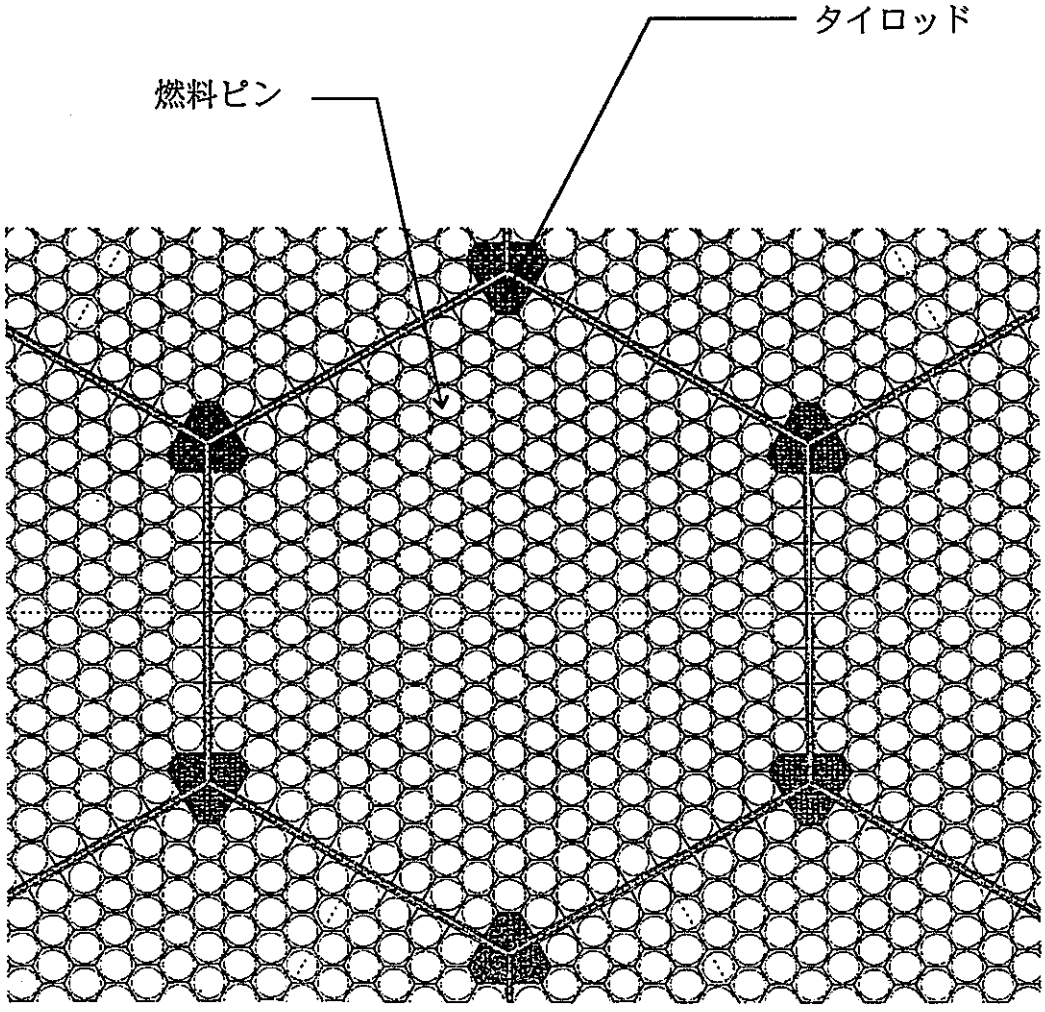
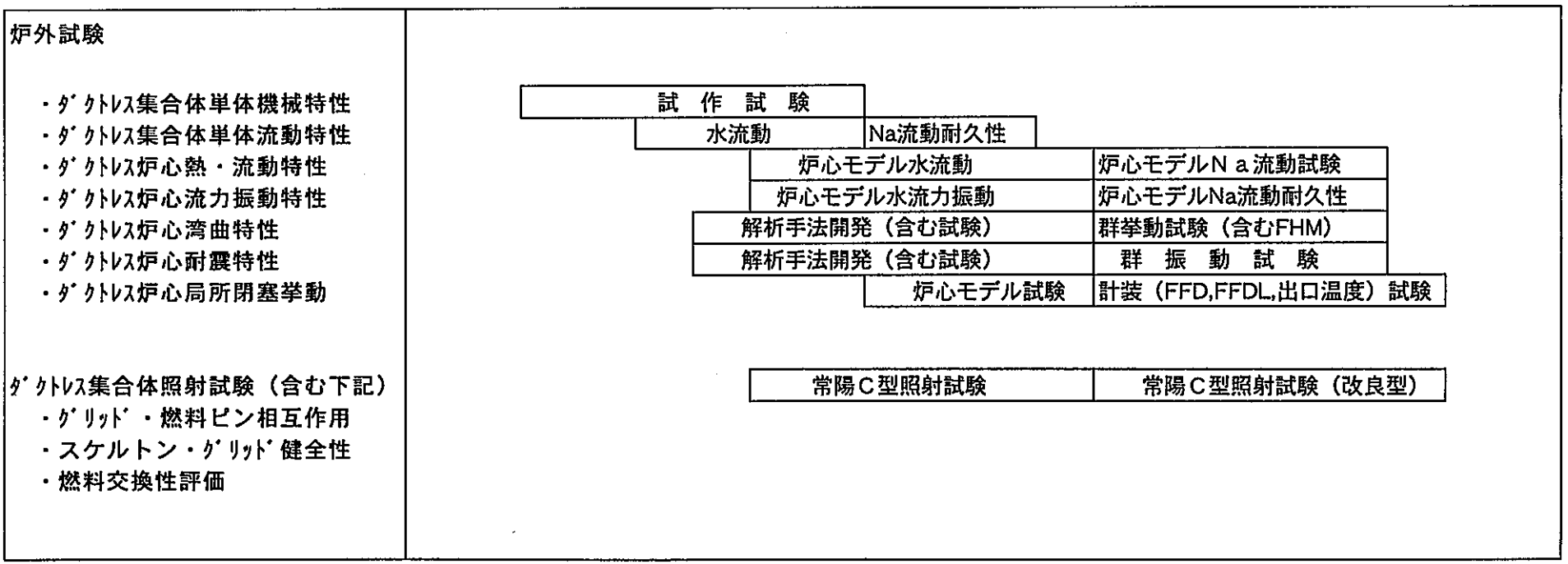


図 4-9　ダクトレス燃料集合体配置

図4-10　ダクトレス炉心開発課題と開発手順



付録　A－1　　技術会議報告資料

第3回技術会議資料

「平成７年度炉心変形検討会」活動報告

平成８年６月２７日

炉心変形検討会

炉心変形検討会メンバー

主査：前田部長代理（安全工学部）

○ システム開発推進部
研究管理室、プラント工学室、実証炉炉心グループ

○ 基盤技術開発部
熱流体技術開発室、構造・材料技術開発室、
燃料技術開発室、炉心技術開発室

○ 安全工学部
原子炉工学室、機器・構造安全工学室

○ 燃料材料開発部
照射燃料集合体試験室

○ 実験炉部
技術課、原子炉第一課

平成７年度炉心変形検討会の目的

○ 炉心変形挙動に対する取り組みの一体化
　→　実炉データの分析
　→　炉外実験への要望事項の検討
　→　解析コード開発・整備計画の検討

○ 研究開発の現状把握（情報収集と共有化）

○ 研究ニーズと課題の明確化

○ 効率的な研究開発の推進と研究開発展開の明確化

炉心変形挙動評価のニーズ

○ 高速炉炉心設計技術の高度化

☞ 従来は計算モデルや入力データに十分な保守性を設定
炉心の局所位置で何が起こっているかを知るのは困難

（炉心変形、炉心部熱流動 → 反応度異常、局所事故、残留変形など）

○ 炉心・燃料設計における課題（材料開発関連は除外）

☞ 燃料交換時の引抜荷重（高燃焼度集合体の照射変形挙動）
運転時や地震時の反応度異常、地震時の制御棒挿入性
過渡時の反応度効果（受動的安全機構に対する影響評価）
[BDIによる燃料ピン破損]

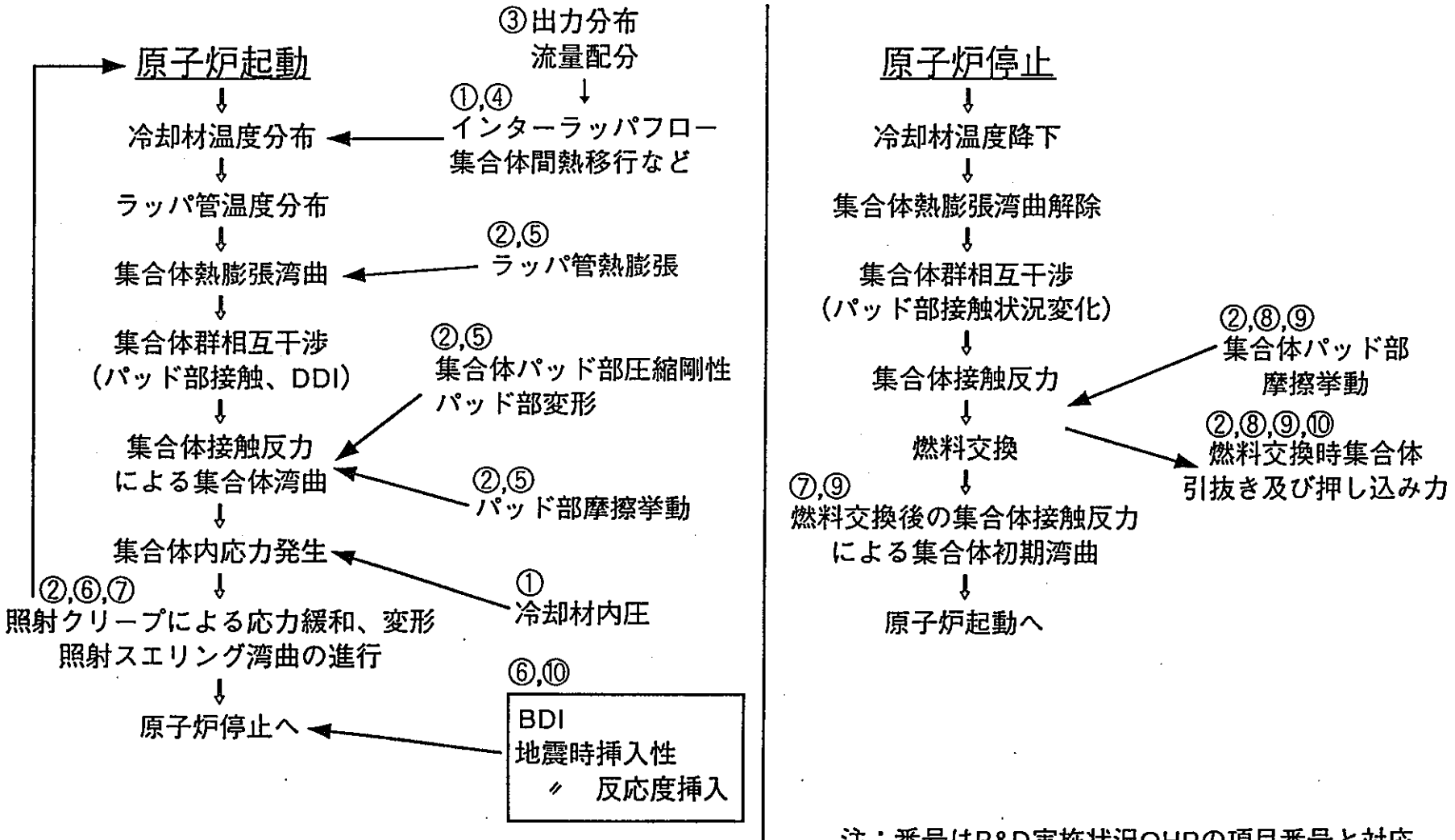
○ FBR固有技術の確立

☞ 高速炉の経済性向上 ⇒ 燃料の高燃焼度化
〃 安全性確保 ⇒ 受動的安全特性としての活用

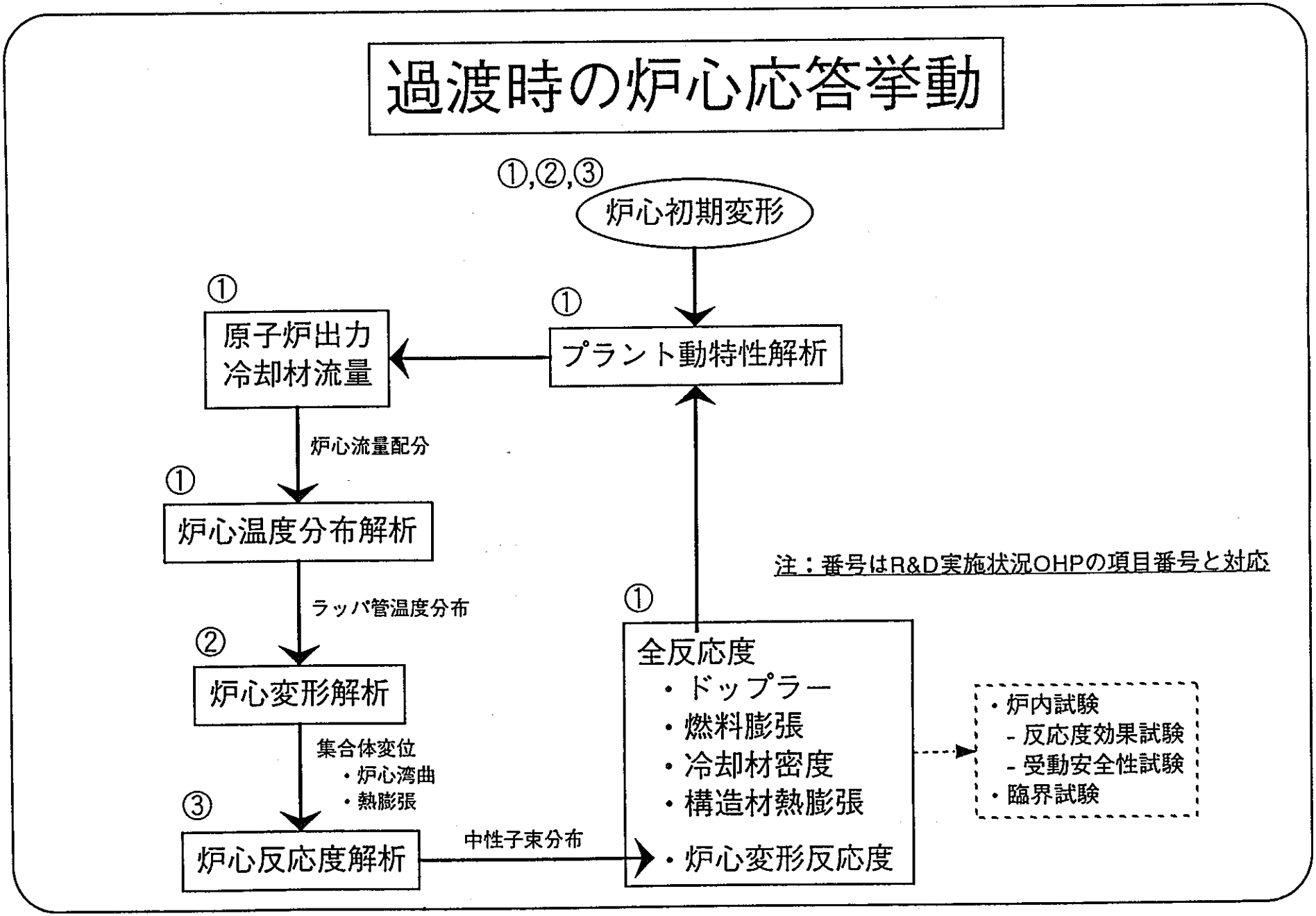
実証炉設計への対応

	課　題	対　応
燃料要素設計	①被覆管歪制限： ・最大許容 BDI 量設定 ・設計マージン合理化	● 既存解析コードで対応 ● バンドル圧縮試験・「常陽」照射データによる解析コードの検証 ● PNC1520 照射データ取得継続
集合体設計	①ラッパ管膨れ量 →DDI 量≦0 ②集合体変形量 →制御棒挿入性確保 ③燃交時の引抜き力	● 既存解析コード(TETRAS/BEACON)で対応 ● 炉外・「常陽」試験による設計マージンの確認（②,③） ● PNC1520 照射データ取得継続
炉心変形反応度	①起動・通常運転時 →小さいことを確認 ②過渡時（GEM 作動時） →大きい正値でないことを確認	● 当面、既存解析コードで対応 →簡易（静的）評価 ● 将来的には、詳細な核・熱・構造統合解析システムを構築（②） →炉外・「常陽」試験による検証

定常時の炉心変形挙動


原子炉起動
冷却材温度分布
ラッパ管温度分布
集合体熱膨張湾曲
集合体群相互干渉
（パッド部接触、DDI）
集合体接触反力
による集合体湾曲
集合体内応力発生
照射クリープによる応力緩和、変形
照射スエリング湾曲の進行
原子炉停止へ
②,⑥,⑦
③出力分布
流量配分
①,④
インターラッパフロー
集合体間熱移行など
②,⑤
ラッパ管熱膨張
②,⑤
集合体パッド部圧縮剛性
パッド部変形
②,⑤
パッド部摩擦挙動
①
冷却材内圧
⑥,⑩
BDI
地震時挿入性
〃　反応度挿入
原子炉停止
冷却材温度降下
集合体熱膨張湾曲解除
集合体群相互干渉
（パッド部接触状況変化）
集合体接触反力
燃料交換
燃料交換後の集合体接触反力
による集合体初期湾曲
原子炉起動へ
⑦,⑨
②,⑧,⑨
集合体パッド部
摩擦挙動
②,⑧,⑨,⑩
燃料交換時集合体
引抜き及び押し込み力
注：番号はR&D実施状況OHPの項目番号と対応

過渡時の炉心応答挙動


①,②,③
炉心初期変形
①
プラント動特性解析
①
原子炉出力
冷却材流量
炉心流量配分
①
炉心温度分布解析
ラッパ管温度分布
②
炉心変形解析
集合体変位
・炉心湾曲
・熱膨張
③
炉心反応度解析
中性子束分布
①
全反応度
・ドップラー
・燃料膨張
・冷却材密度
・構造材熱膨張
・炉心変形反応度
・炉内試験
- 反応度効果試験
- 受動安全性試験
・臨界試験
注：番号はR&D実施状況OHPの項目番号と対応

大洗工学センターにおけるR&D実施状況

○ 解析コード開発

①熱流動解析コード　：　熱流体技術開発室（ACT、SSC）
②構造応答解析コード　：　構造・材料技術開発室（PRECISE）
③核特性解析コード　：　炉心技術開発室（NSHEX、CITATION/PERKY）

○ 炉外試験

④インターラッパフロー試験：　原子炉工学室（AQUA）
⑤炉外炉心変形特性試験　：　機器・構造安全工学室（FINAS）
[・炉外バンドル圧縮試験　：　照射燃料集合体試験室、燃料技術開発室（BAMBOO）]

○ 炉内試験

⑥炉心材料の照射特性評価：　照射燃料集合体試験室、照射材料試験室、燃料技術開発室
⑦燃料集合体の照射後変形量測定試験　：　照射燃料集合体試験室
⑧燃料集合体の引抜荷重試験　：　原子炉第一課
⑨「常陽」炉心変形挙動解析（変位及び荷重測定）：　技術課（BEACON、TETRAS等）

○ 炉心燃料設計

⑩実証炉の炉心燃料設計　：　実証炉炉心グループ
・リサイクル試験炉の炉心燃料設計：　プラント工学室

全炉心熱流動解析コード（ＡＣＴ）

○目的

・集合体間熱移行、インターラッパフローなどを含む炉心部詳細熱流動評価手法の開発

- 高線出力、高燃焼度を目指した高性能炉心の開発
- 受動的安全特性を積極的に活用した炉心概念の構築

・定格運転及び自然循環徐熱時における炉心部温度分布評価
過渡時または異常時における炉心部ピーク温度評価

○課題

・サブチャンネル解析コードとプレナム解析コードとの結合

・計算負荷の低減（並列計算機の活用）

○開発スケジュール

・1995～1996年 ：インターラッパフロー及び集合体解析部の開発

・1997～1999年 ：プレナム及び冷却系解析部の開発と解析部全体の統合

・2000年～ ：並列化及びプリ・ポスト処理部の開発と検証解析

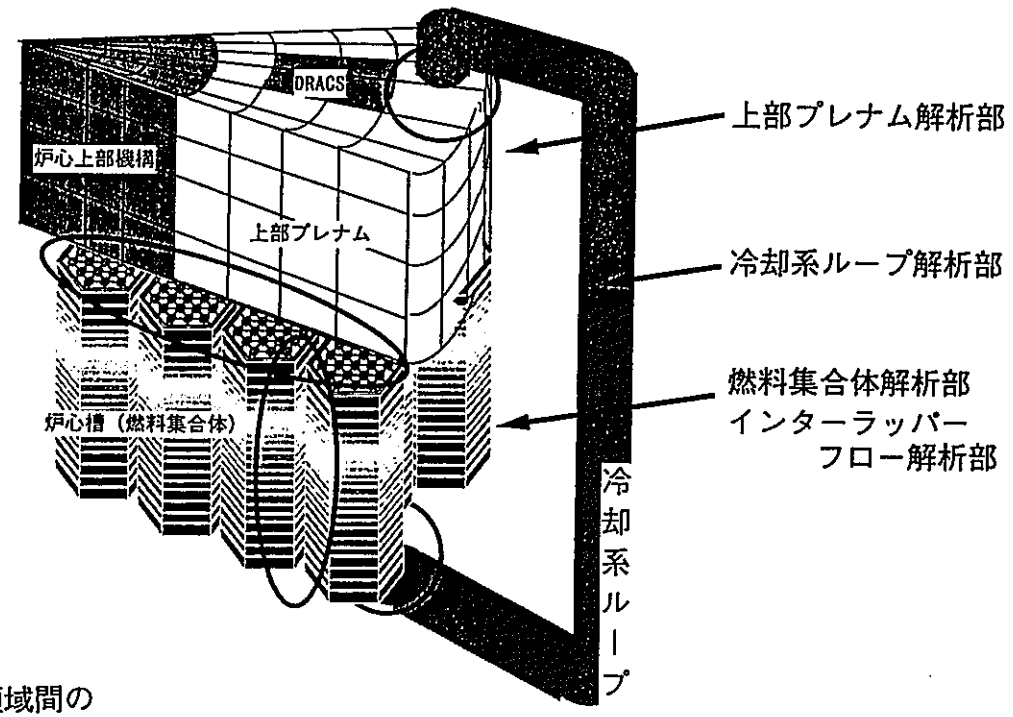
ACTの特徴と開発の現状

○ ACTの特徴

- 炉心部を対象とした詳細解析
- 個々に検証された解析部を結合
- 並列計算機アルゴリズムの採用

○ 開発の現状

- インターラッパ部の開発を終了
- 集合体部との熱的結合に着手



：解析領域間の
結合インターフェイス部

単相多次元熱流動解析コード：ＡＱＵＡ

○目的

・汎用の３次元熱流動解析コード

　主な解析対象：単相流でのプレナム内熱流動現象

・炉心部の集合体間ギャップを含めた熱流動現象の評価

○課題

・集合体間ギャップの径方向流動抵抗係数の設定

・集合体間ギャップ内混合対流場の予測精度

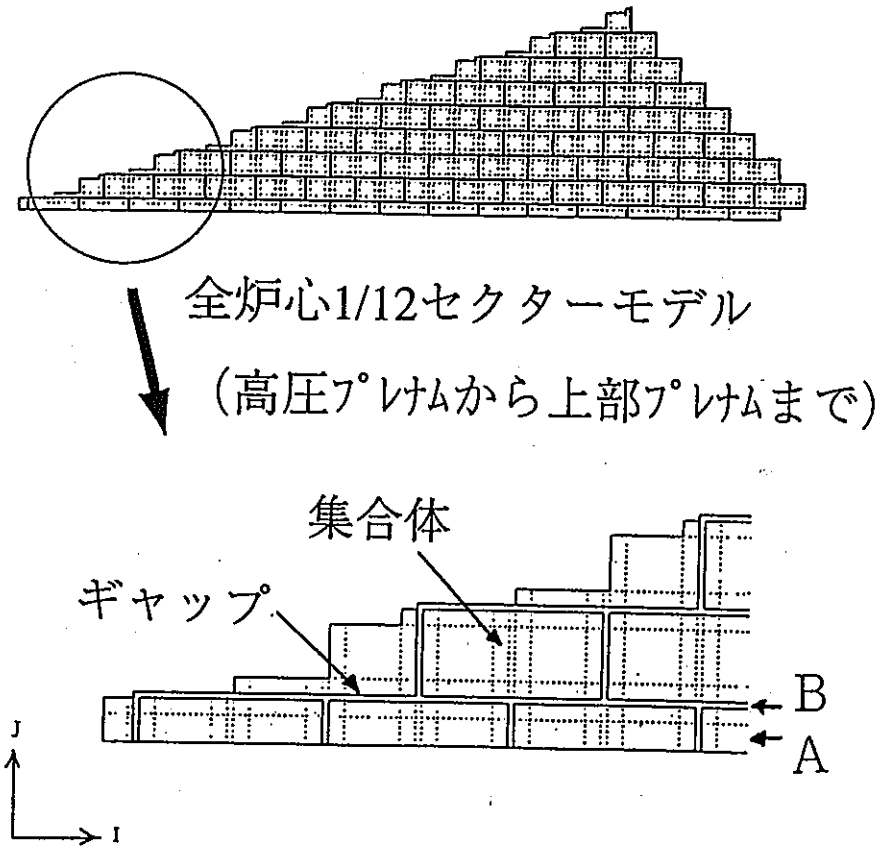
　→インターラッパーフロー水流動試験（TRIF）による検証

○スケジュール

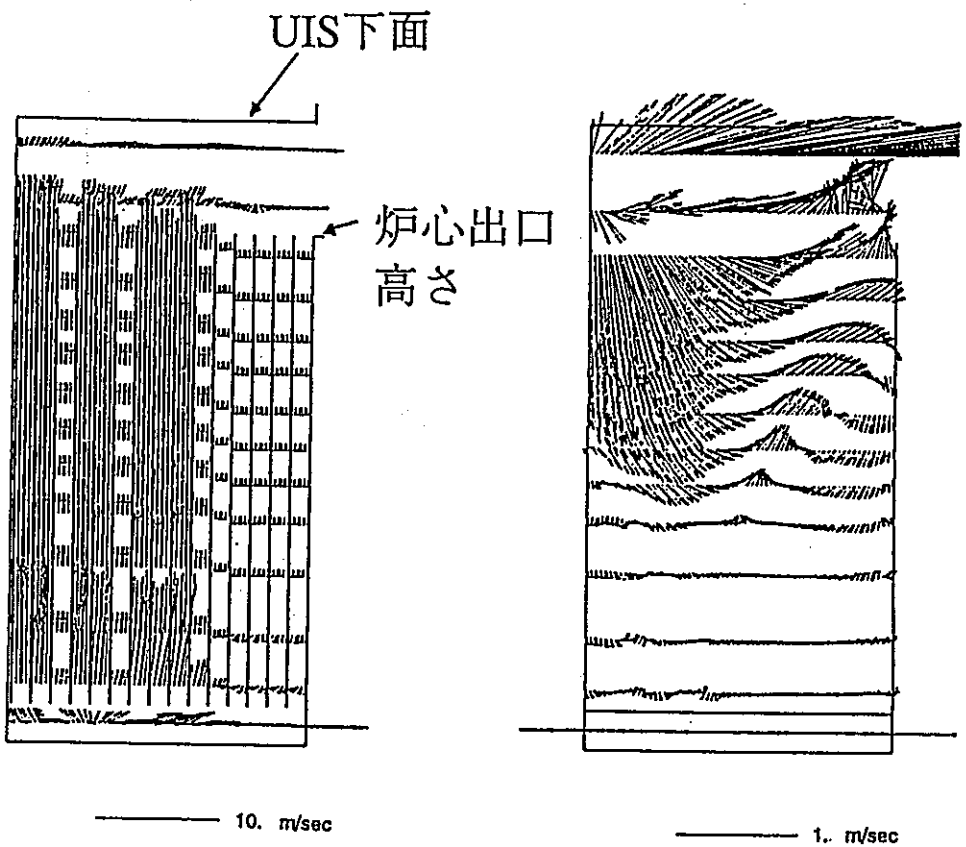
項目	８年度	９年度	１０年度	１１年度
TRIF実験解析	━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━			

○定格時インターラッパーフロー現象評価の現状

・UIS下部の高圧部からギャップ部への流れを解析で模擬可能



炉心部解析メッシュ体系



集合体内断面(A)　集合体間ギャップ断面(B)

炉心部流速分布

ラッパ管群温度解析コード（ＴＥＴＲＡＳ）

・目的：“ＢＥＡＣＯＮ”入力用ラッパ管壁位置温度・中性子束分布の計算

・特徴：

ラッパ管壁面温度分布計算

入力：集合体中心位置の中性子束・出力

手法：Porous Body モデル（集合体内２チャンネル）による簡易熱流動解析

中性子束分布計算

入力：当該集合体およびその周辺６体の中性子束（中心位置）

手法：仮想分点を用いた内挿

・今後の計画：実証炉体系への適応

プラント動特性安全解析コード（ＳＳＣ）

○目的

・炉心から水・蒸気系に至るプラントシステムの動特性評価

・高速炉プラントの合理的な設計及び安全評価

○課題

・解析モデルの高度化（受動的安全特性の評価）

- 炉心多チャンネルモデル、プレナム三次元モデル、インターラッパフローモデル
- 熱輸送系モジュール（MINET）の整備による水・蒸気系モデルの汎用化
- ナトリウム沸騰・凝縮モデルの改良

・並列計算アルゴリズムによる高速処理

○開発スケジュール

・1995～1997年：多チャンネル及びプレナム三次元モデルの組み込み、MINETの整備

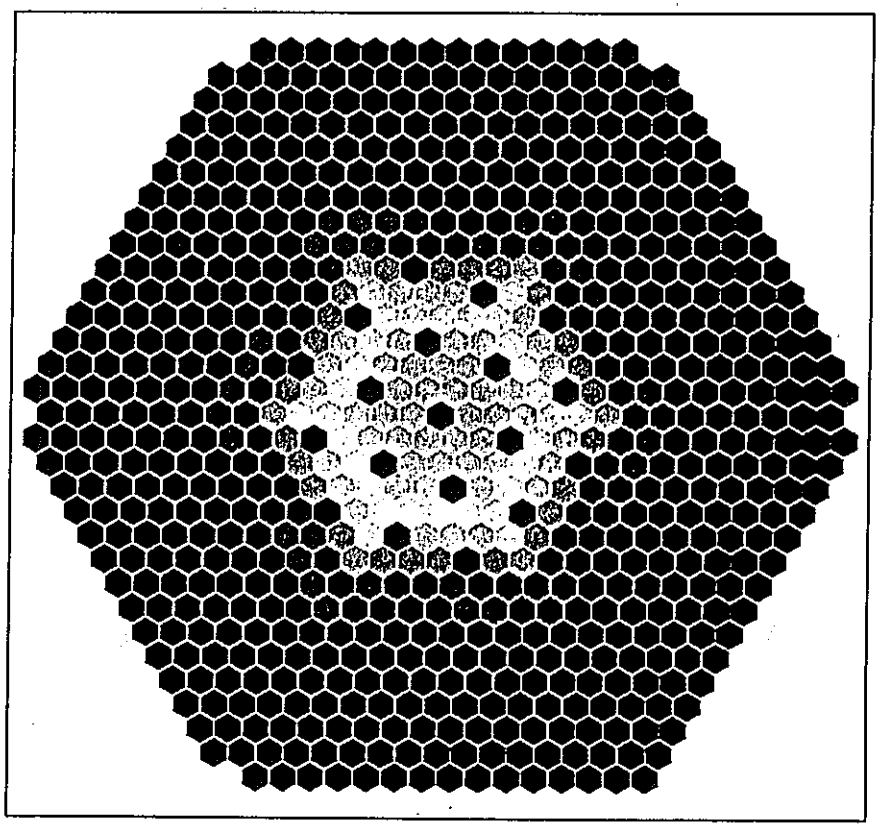
・1998～1999年：インターラッパフローモデルの組み込み、沸騰モデル改良

・2000年～　　：並列アルゴリズム導入による高速化

SSCの特徴と開発の現状

○ SSCの特徴
- 広い適用範囲
- 過渡事象から設計条件を越える厳しい事故事象の評価をカバー

○ 開発の現状
- 一次元モデルは開発完了
- プラントシミュレーションの高度化（受動安全性評価、事故管理のためのプラント挙動評価）



多チャンネル全炉心モデル

並列計算を用いた炉心機械挙動解析システム(PRECISE)の開発(1/2)

(Parallel Computing Added Reactor Core Mechanical Behavior Analysis System)

開発目的

高速炉炉心構造設計法の確立
(経済性,固有安全性,耐震設計等)
→ 過渡時を含む炉心変形挙動等を精度良く解析できるコードの開発が必要

検討課題

○パッド部の接触摩擦挙動、○ダクト断面の変形、○スウェリング特性
○燃料ピンバンドルのダクト剛性への影響、○初期不整、残留応力

開発スケジュール予定

１９９４年度ー調査・設計
１９９５年度ー炉心変形挙動解析プログラムの枠組み構築（弾性解析）
１９９６年度ー解析機能の拡張（非線形解析機能等）
１９９７年度ー計算効率の向上（共役勾配法導入等）
１９９８年度ー解析機能の追加・拡張（地震時動的応答解析機能開発）

並列計算を用いた炉心機械挙動解析システム(PRECISE)の開発(2/2)

(Parallel Computing Added Reactor Core Mechanical Behavior Analysis System)

特徴と現状

○解析体系（全周、単列、任意）
- 集合体の構造解析（現状は弾性解析）
- 地震時の動的応答解析（開発検討中）

○解析手法
- 変位法による有限要素法
- 行列解法は直接解法と反復解法の併用（現状は直接解法）

○荷重対象　ー　機械荷重、熱荷重、中性子照射

○材料特性　ー　弾性体、弾塑性体、クリープ、スウェリング

○解析要素
- ダクト（梁、シェル）　←　現状は梁のみ
- パッド（３次元接触要素）
- 支持体（３次元支持体要素）　←　開発検討中

○プリ・ポストプロセッサ　ー　専用プリプロセッサ（現状は簡易版）

ＦＩＮＡＳ炉心変形解析用前処理・後処理プログラムの製作(1/2)

目的

ＦＩＮＡＳは汎用ソフトであるために、
専用ソフトに比べて入出力データの扱いが煩雑・非効率的

↓

専用ソフトと同様のデータからＦＩＮＡＳの入力データを作成し、
炉心変形の観点から解析結果を処理する機能が必要

検討課題

○他コードからの炉内温度及び中性子束分布を入力とする場合は、別途インターフェースが必要
○ＦＩＮＡＳの実行メモリ上、要素数・積分点数に制約がある

予定

１９９５年度ープロトタイプ版製作
１９９６年度ー機能拡張（中性子束分布データ作成機能等）

ＦＩＮＡＳ炉心変形解析用前処理・後処理プログラムの製作(2/2)

機能・体系

１．前処理プログラム（ＷＳ上）

①燃料集合体等の寸法・形状等を入力し、専用ソフトと同じ感覚でＦＩＮＡＳの入力データを作成

②炉心出口側ラッパ管温度分布データより全積分点における温度生成

２．後処理プログラム

(1) データ抽出部（ＷＳ上）

①ＦＩＮＡＳポストテープから任意ステップにおける１／６炉心のデータを抽出

②相対変位、軸力、曲げモーメントを算出し、ＣＳＶ形式でファイルに出力

(2) グラフ作成部（ＥＸＣＥＬのマクロ機能）（ＰＣ上）

①データ抽出部におけるＣＳＶ形式ファイルをブック形式に変換

②グラフシートに各項目のステップ別グラフ作成

３次元炉心湾曲解析コード（ＢＥＡＣＯＮ）

・目的：熱膨張、スエリングおよびクリープ歪に起因する
　　集合体湾曲挙動を３次元的に解析

・特徴：

　入力：ラッパ管各面の温度・中性子束分布（ＴＥＴＲＡＳ計算値）

　出力：パッド部荷重、運転中変位、残留変位、引抜荷重

　手法：ラッパ管相互作用（湾曲解析）　→　３次元はり理論

・課題：引抜荷重評価時の集合体間摩擦力の取り扱い等

・今後の計画：実証炉体系への適応

バンドル変形解析コード　BAMBOO　(1/2)

目　的

高燃焼度燃料でのBDI発生時のバンドル変形、荷重評価

課　題

①271 本長尺バンドル(実証炉並大型バンドル)の解析機能の拡充
②ピン-ダクト直接接触以後の変形モデル導入
③照射変形解析結果の検証(変形データによる検証)
　→照射中の接触荷重評価
　　→集合体湾曲特性へのバンドルの影響評価(炉心変形解析上)

スケジュール(目標工程)

① 1999年度末：実証炉クラスの大型バンドルへの解析機能拡大
② 1999年度末：ピン-ダクト接触発生後解析モデルの検討・導入
③ 2003年度末：ピン-ダクト接触発生後解析の検証・改良

バンドル変形解析コード　BAMBOO　(2/2)

特　徴

(1) 三次元の有限要素法←燃料ピン束の機械的釣り合い
- 燃料ピン：1/6 ワイヤピッチ長 2節点梁要素の連結により表現
- 各節点での隣接ピン・ダクトとの接触を取り扱う

(2) 被覆管の偏平化を剛性マトリクスに導入
- 被覆管偏平化：BDI 時バンドル変形の支配挙動の一つ
- 荷重・偏平化の関係を線形一次式でモデル化

(3) 熱膨張歪、スエリング歪を考慮し、弾性変形およびクリープ変形を解析する。

現状の適用可能範囲

- スペーサワイヤ巻き付け燃料ピン三角配列バンドル
- 169 本長尺 or 271 本短尺ピンバンドルまでが実用範囲
- ピン変形モデル上はピン-ダクト直接接触が発生しない範囲

拡散計算コード（ＣＩＴＡＴＩＯＮ）

・目的：1、2、3次元体系の中性子拡散計算

・特徴：

汎用コード（固有値計算、燃焼計算、中性子束及び出力分布計算、一次摂動計算等）

高速炉解析分野：非等方拡散係数を扱えるように入出力部などを改訂した。（CITATION-FBRコード）

・課題：なし

拡散摂動理論計算コード（ＰＥＲＫＹ）

・目的：拡散近似の摂動論を用いて、物質反応度価値、反応度変化および動特性パラメータを2次元、3次元体系で計算

・特徴：

摂動計算に用いる中性子束および随伴中性子束は、CITATIONコードの論理機番34のデータを使用

六角・三角メッシュ用ルーチン追加

・課題：なし

3次元六角体系用輸送ノード法計算コード (NSHEX) (1/2)

開発目的

・高速炉体系における高精度な中性子輸送計算
・炉心特性解析、炉心設計を考慮した汎用炉心計算コード

検討課題

・計算時間の短縮（加速法の導入等による収束性の改善、並列化）
・汎用計算機能の追加（集合体内出力分布、燃焼計算、高次 P_N 計算）

開発スケジュール

・1996年度　収束性の改善
・1997年度　集合体内出力分布、高次 P_N 計算機能の追加
・1998年度　燃焼計算、並列化の検討

3次元六角体系用輸送ノード法計算コード (NSHEX) (2/2)

特徴と現状

・ノード法を用いることにより、短時間・少計算機記憶容量の輸送計算が可能

・中性子束の角度分布依存性をノード境界条件まで含めたS_N法による取り扱い
→従来輸送ノード法に対し高精度化

・大型燃料集合体を有する実証炉、商業用炉等に対しても適用可能

インターラッパーフロー水流動試験：ＴＲＩＦ

○目的

・自然循環崩壊熱除去時の炉心部熱流動現象の把握

　　インターラッパーフロー解析手法の開発・検証

・集合体間ギャップ部流動の周方向依存性の把握

　　ギャップ部流動抵抗係数モデルの実験検証

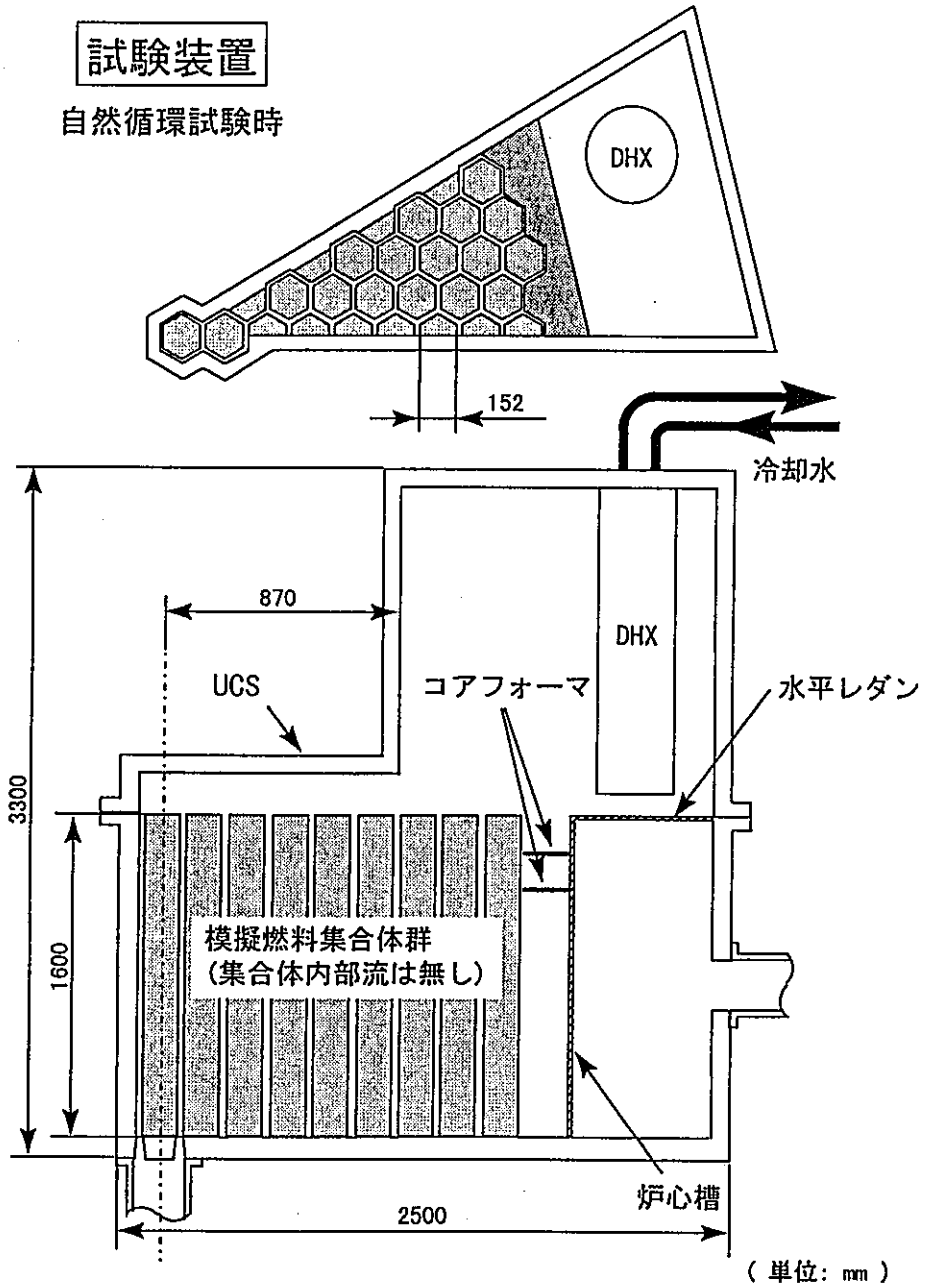
・インターラッパーフローを活用した崩壊熱除去システムの特性把握

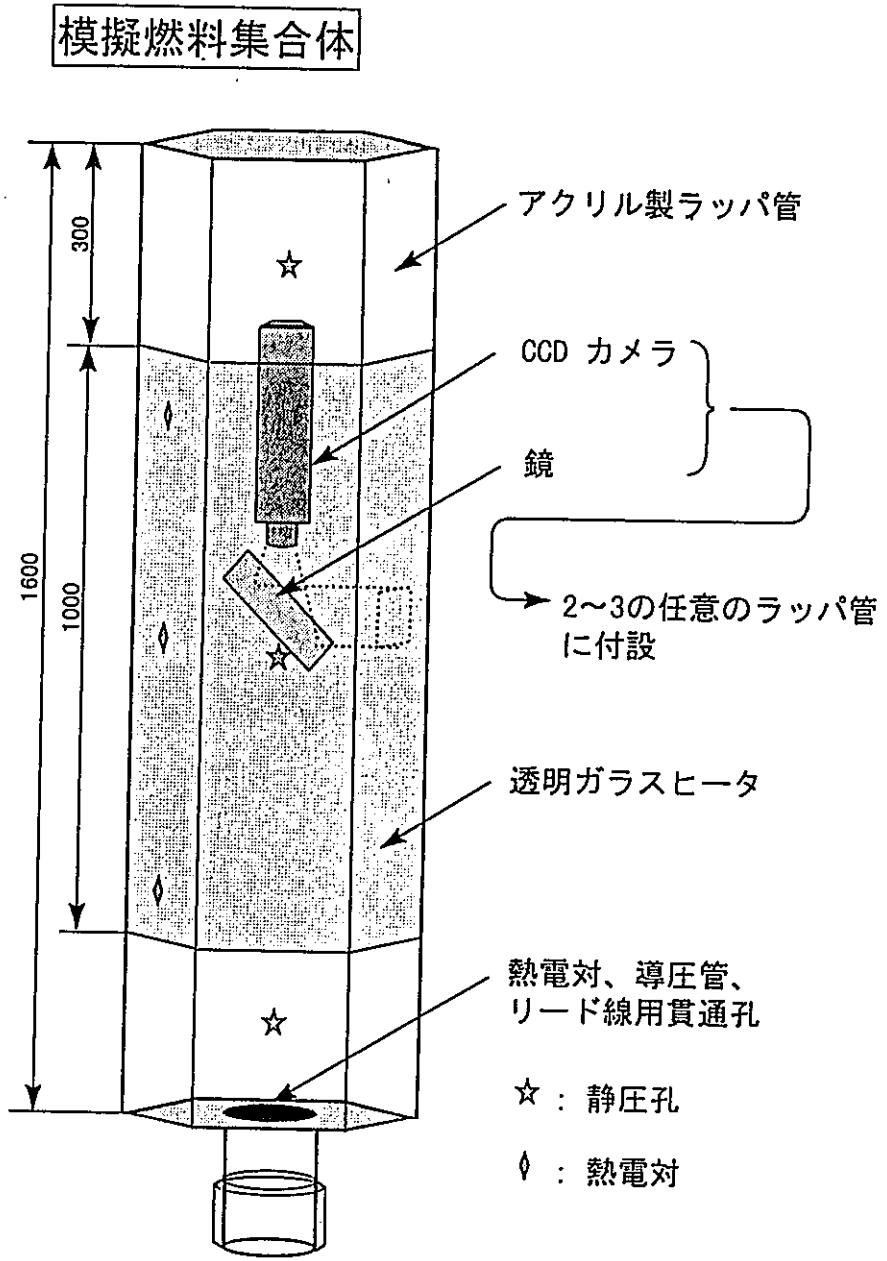
　　上部プレナムから集合体間ギャップ部への流路の形成

・定格時インターラッパーフローを模擬した混合対流特性の把握

○スケジュール

項目	８年度	９年度	１０年度	１１年度
実験				
実験解析				


試験装置
自然循環試験時
DHX
152
冷却水
870
DHX
UCS
コアフォーマ
水平レダン
3300
1600
模擬燃料集合体群
(集合体内部流は無し)
炉心槽
2500
(単位: mm)


模擬燃料集合体
300
1600
1000
アクリル製ラッパ管
CCD カメラ
鏡
2~3の任意のラッパ管
に付設
透明ガラスヒータ
熱電対、導圧管、
リード線用貫通孔
☆ : 静圧孔
◊ : 熱電対

炉外炉心変形試験

□目的

・炉心集合体の機械・熱的相互作用下の変形挙動を分析
影響因子：断面変形，バンドル，接触と摩擦の荷重伝達
パット部ギャップ，形状不整，ノズル部ガタ

⇨　反映先：FINAS，PRECISEの検証

□現状

・ラッパ管単体「常陽」タイプの基本特性試験から曲げ剛性，面間圧縮剛性のデータ取得し、FINASでの解析と比較検討

・ラッパ管単体「常陽」タイプの機械荷重変形試験と初期形状（対面，頂点間距離，板厚）寸法計測結果から形状不整，断面変形の影響をFINASでの解析と比較検討

□今後の計画

1996-1997

・ラッパ管単体「常陽」タイプ，「もんじゅ」タイプの基本特性試験(曲げ剛性，面間圧縮剛性，パット部剛性，バンドル剛性，摩擦特性，材料特性)

・等価試験体検討

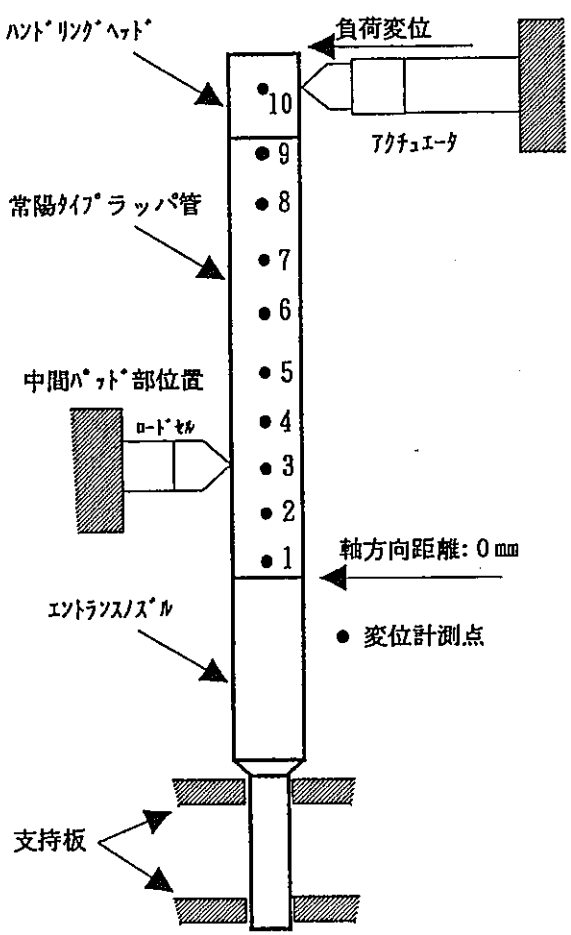
1996-1998

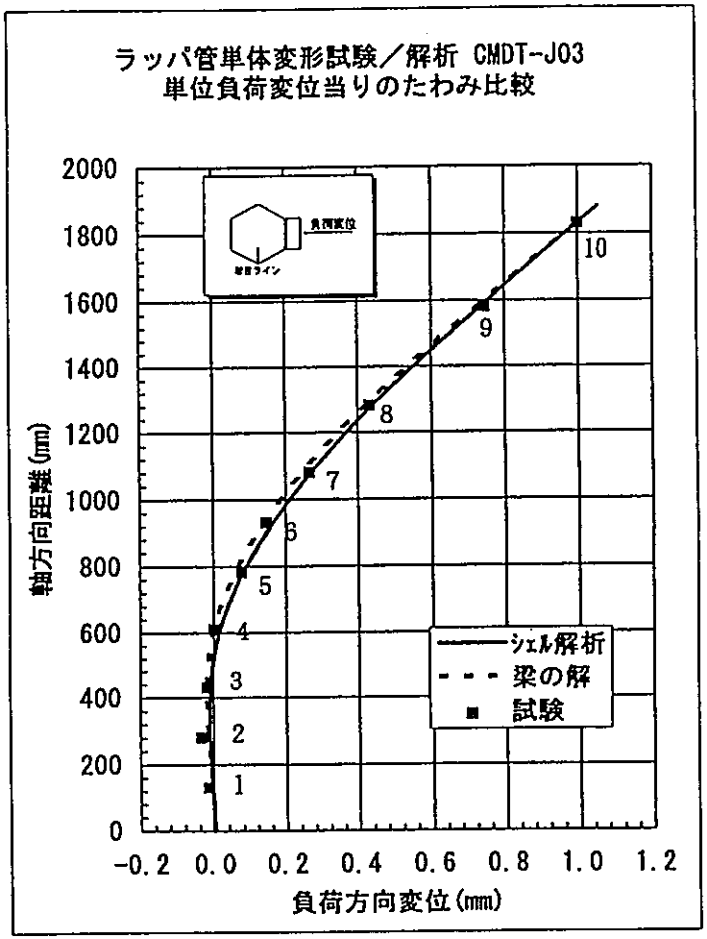
・ラッパ管複数体の機械荷重変形試験

1999-2000

・ラッパ管単体/複数体の熱荷重変形試験

・機械荷重＋永久変形重畳試験


ﾊﾝﾄﾞﾘﾝｸﾞﾍｯﾄﾞ
負荷変位
ｱｸﾁｭｴｰﾀ
常陽ﾀｲﾌﾟﾗｯﾊﾟ管
中間ﾊﾟｯﾄﾞ部位置
ﾛｰﾄﾞｾﾙ
軸方向距離: 0 mm
ｴﾝﾄﾗﾝｽﾉｽﾞﾙ
● 変位計測点
支持板
10
9
8
7
6
5
4
3
2
1


ラッパ管単体変形試験／解析 CMDT-J03
単位負荷変位当りのたわみ比較
軸方向距離(mm)
負荷方向変位(mm)
2000
1800
1600
1400
1200
1000
800
600
400
200
0
-0.2
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
1.2
シェル解析
梁の解
試験

炉心材料の照射特性

目的

・炉心材料開発における照射データからの設計用物性式整備

・ラッパ管物性式の信頼性向上による炉心変形解析の不確かさ低減

炉心材料の照射試験

①PNC316鋼
材料照射　　－CMIR-5(1998年頃中間検査)、
MARICO-1(1997年頃中間検査)、FFTF/MOTA

燃料集合体照射－C3M、MFA-1

②PNC1520鋼
材料照射　　－CMIR-5、MARICO-1、FFTF/MOTA

燃料集合体照射－MFA-2

③PNC-FMS鋼
材料照射　　－CMIR-5、MARICO-1、FFTF/MOTA

燃料集合体照射－C6D(1998年頃中間検査)

「常陽」燃料集合体の照射後変形量測定試験

目的

- 「常陽」燃料集合体等の健全性及び設計性能を確認するための照射後試験
- 炉心変形解析コードの検証用データ取得

今後の計画

- 「常陽」炉心内セクター規模のＰＩＥ実施計画検討

測定結果

１．「常陽」ＭＫ－Ⅰ炉心燃料集合体

・ほとんど曲がりは認められない

２．「常陽」ＭＫ－Ⅱ炉心燃料集合体

・炉心燃料集合体の曲がり量は最大１０mm程度

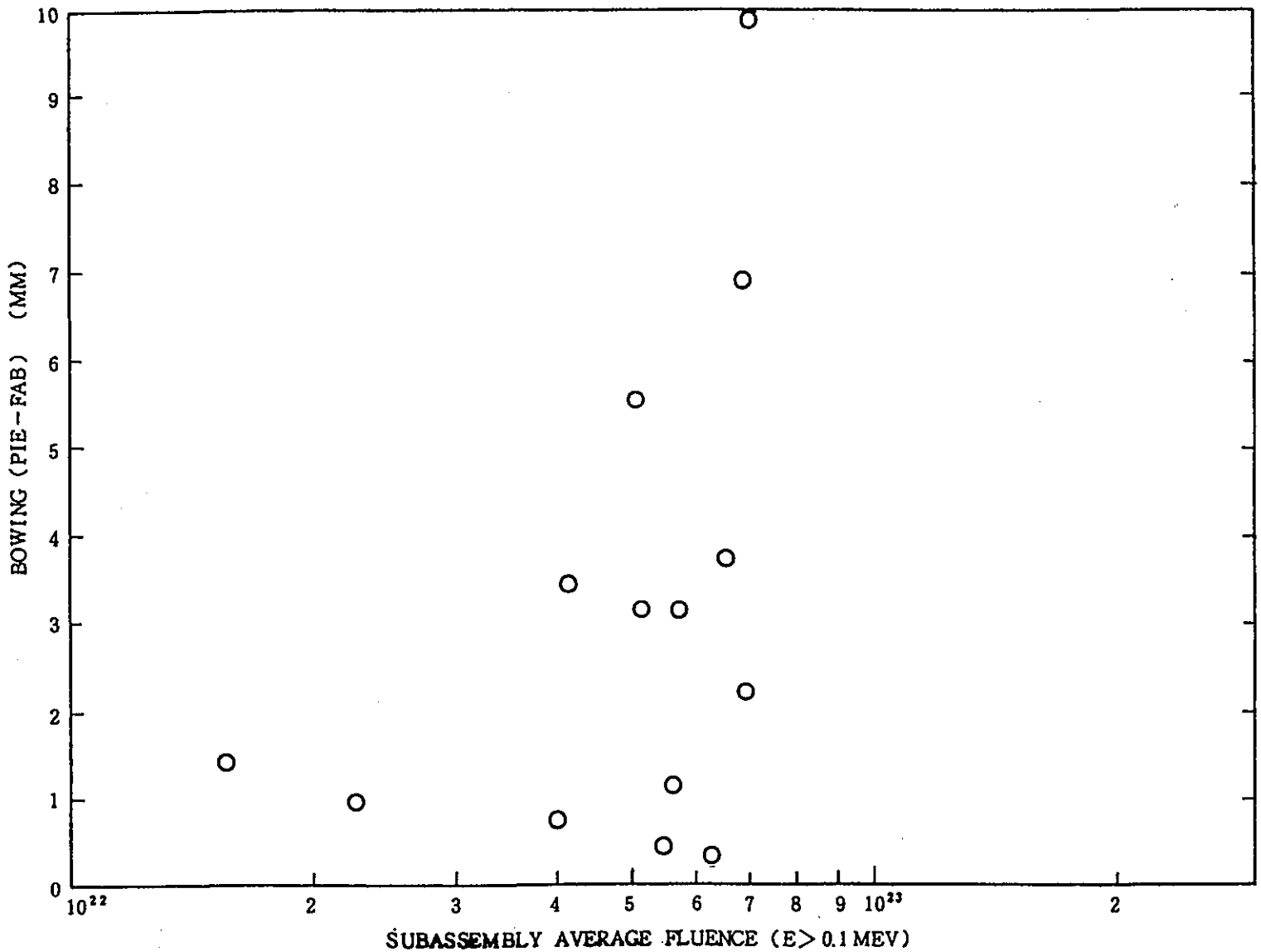


図　照射後集合体曲がり量（「常陽」ＭＫ－Ⅱ炉心燃料集合体）

「常陽」を用いた炉心湾曲評価システムの検証

・目的：炉心湾曲評価システムを実機に適用、その評価精度を確認

各種パラメータの影響調査

・内容：「常陽」全運転履歴、全燃料交換履歴を考慮し（ＭＡＧＩ）、

全炉心体系で炉心湾曲解析（ＢＥＡＣＯＮ）、ＰＩＥ結果等と比較

・課題：実証データの充実（原子炉運転中の湾曲データ等）

炉心湾曲反応度評価

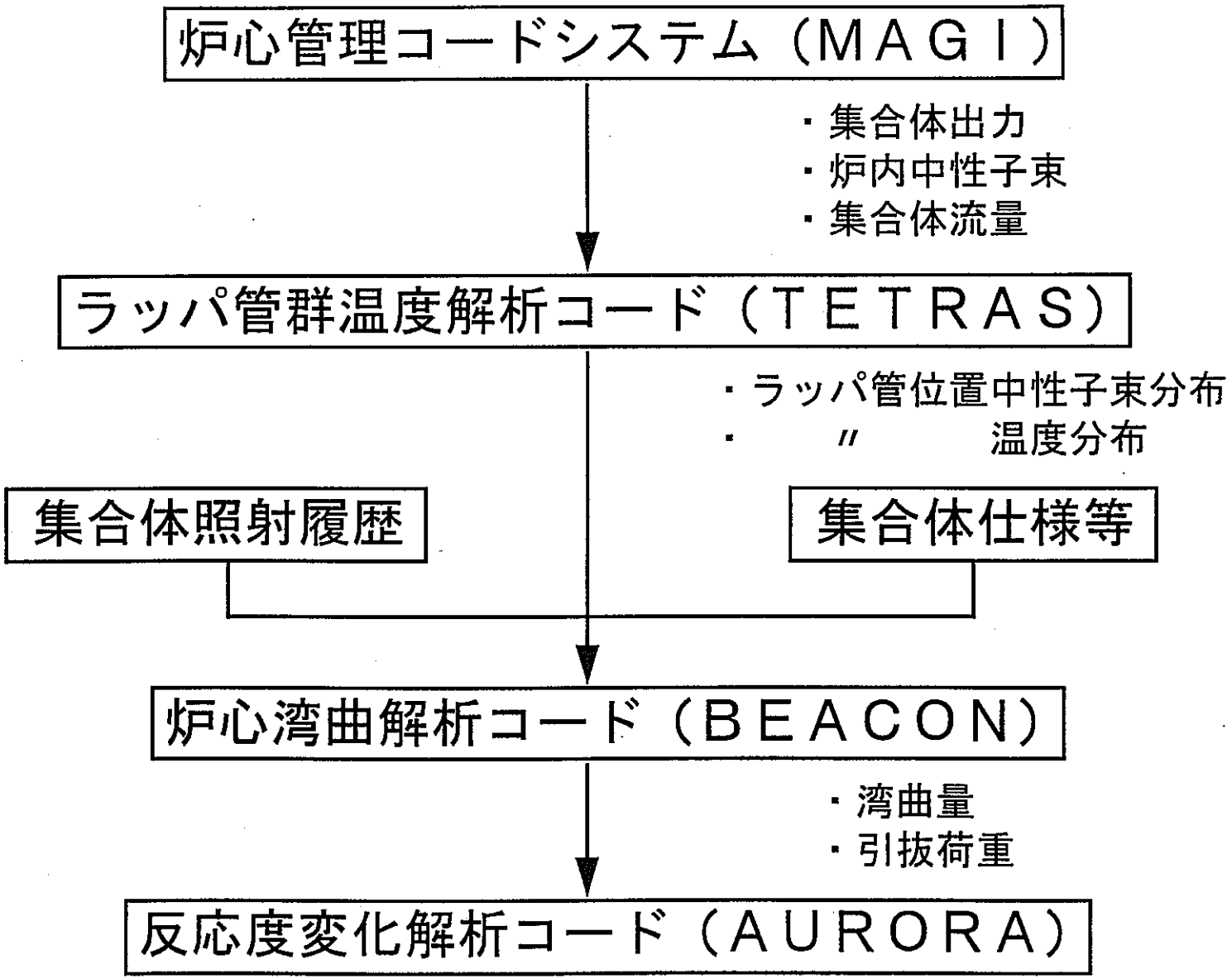
・今後の計画

～1997 年度：“ＡＵＲＯＲＡ”による反応度解析

～1999 年度：ＭＡＧＩの高度化（γ発熱・中性子フラックスの検討等）

～2007 年度：実機での熱湾曲量・荷重測定

（「常陽」での集合体頂部変位および接触荷重測定）



「常陽」における炉心湾曲解析フロー

「常陽」を用いた炉心湾曲評価システムの検証（成果）

測定結果との比較

燃料集合体に接する内側反射体

炉内滞在時間長、中性子・温度勾配大　→　湾曲量最大

残留変位の解析結果：湾曲方向 180°反対、変位量過小評価

①コードに使用される照射クリープ式の見直し

方法：設計式→ノミナル式（燃料室作成）

結果：計算結果の改善は見られず

②ラッパ管温度分布の見直し

方法：ＴＥＴＲＡＳ計算値　→　硬さ測定による推定値（ＦＭＳ）

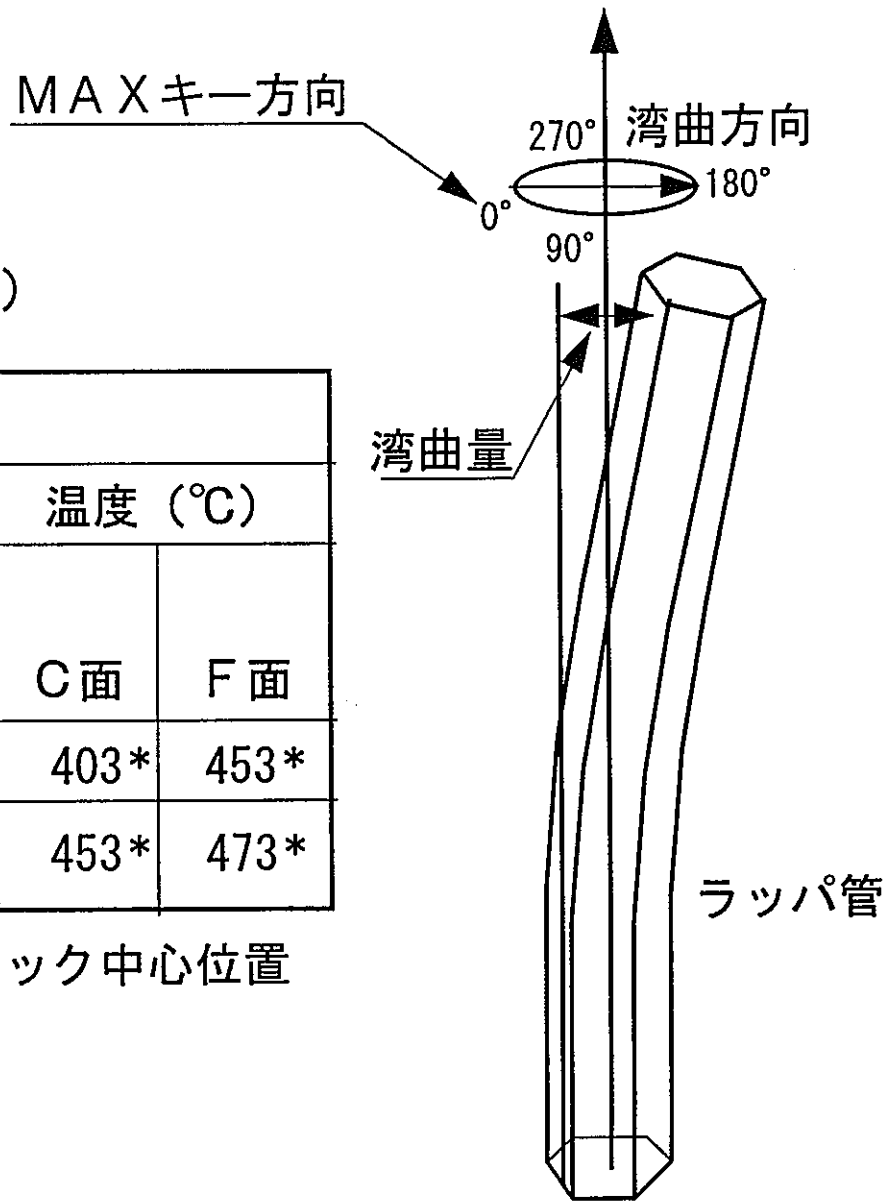
結果：計算／実測値の湾曲方向一致、湾曲量の差は３倍程度まで縮小

「常陽」を用いた炉心湾曲評価システムの検証

ラッパ管温度分布の影響（一例）

集合体番号		NFR10D			
		湾曲量(mm)	方向(deg.)	温度（℃）	
測定値		13.3	199	C面	F面
計算値	TETRAS計算値	2.2	14	403*	453*
	硬さ推定値	3.5	195	453*	473*

*スタック中心位置



「常陽」での集合体頂部変位および接触荷重測定

・目的：原子炉運転中の炉心構成要素の機械的挙動データ取得

・方法：①超音波センサを用いた炉心構成要素の変位量測定システム開発

②焼結体を用いたオフライン荷重センサ開発

・課題：①照射下での超音波センサの特性変化把握

温度ゆらぎによる測定誤差の低減

②照射下での荷重センサの特性変化

荷重センサの長時間クリープ

・今後の計画：

～2002 年度：各種モックアップ試験および照射試験

～2007 年度：実機での熱湾曲量・荷重測定

炉心湾曲挙動の測定手法の開発（成果）

①超音波センサを用いた炉心構成要素の変位量測定システム

・「常陽」集合体頂部検査のためのシステム検討

・開発課題摘出（超音波センサの耐熱特性、耐放射線特性）

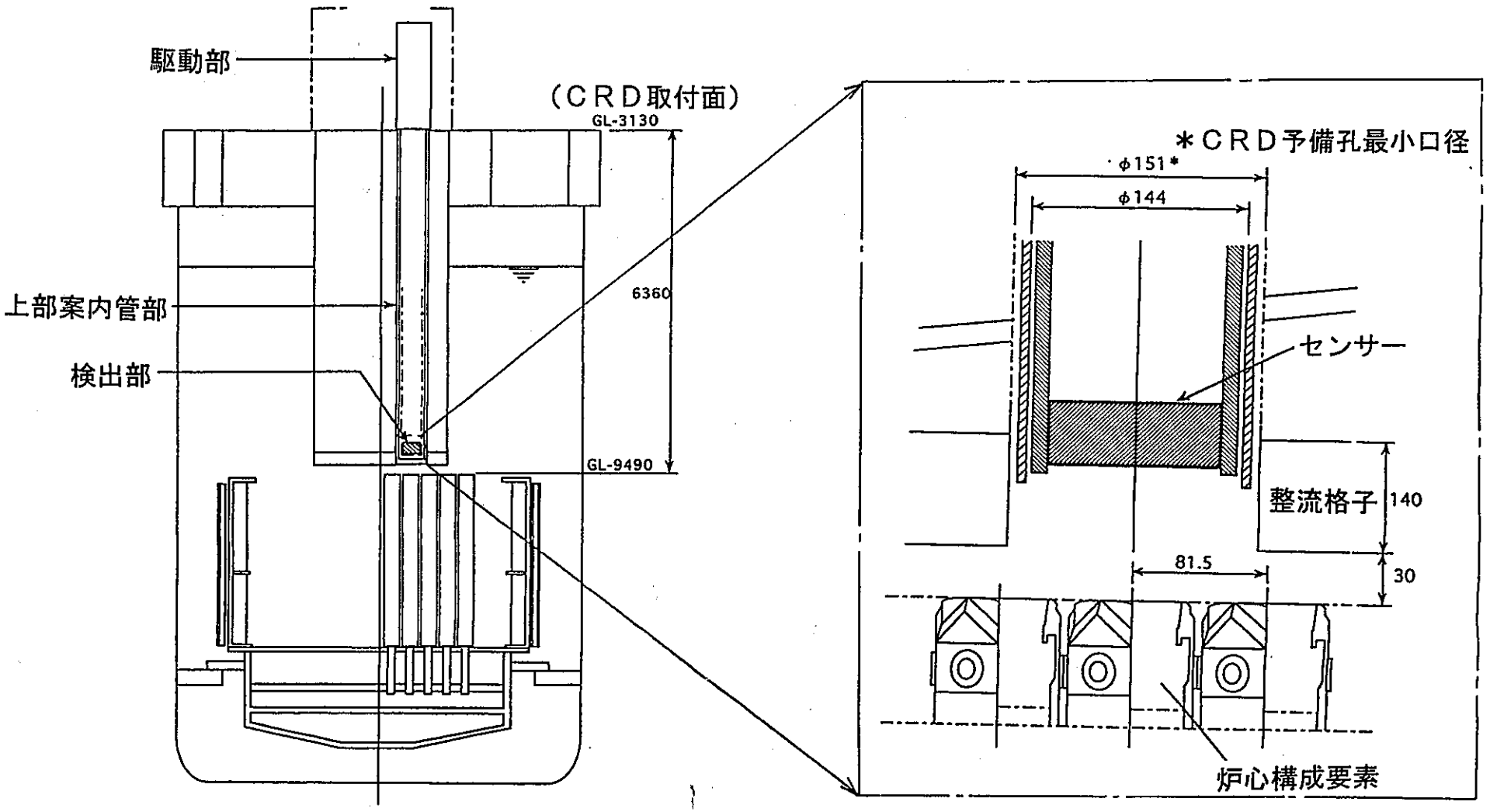
・超音波センサ試作

・常温～５００℃での超音波センサー性能確認

②オフライン荷重センサ

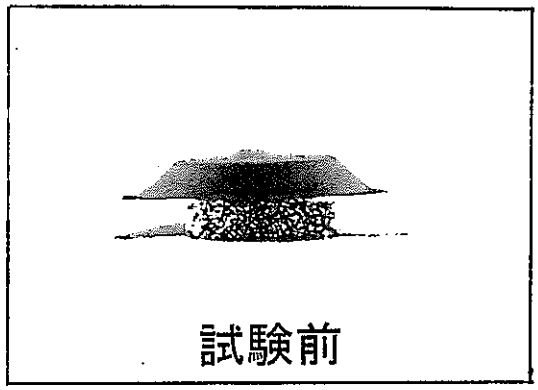
・カバー付きＳＵＳステンレス鋼焼結体開発

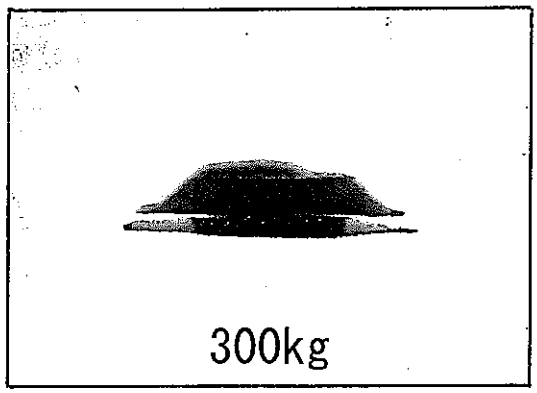
・荷重－圧縮歪（高さ縮み率）の相関関係式作成

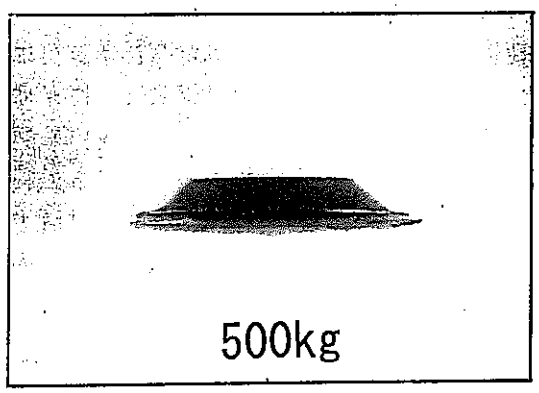


a．検査概念　　b．センサー部

炉内検査装置の検査概念







カバー付き荷重測定素子の
圧縮試験結果

「常陽」燃料集合体の引抜荷重試験

目　的

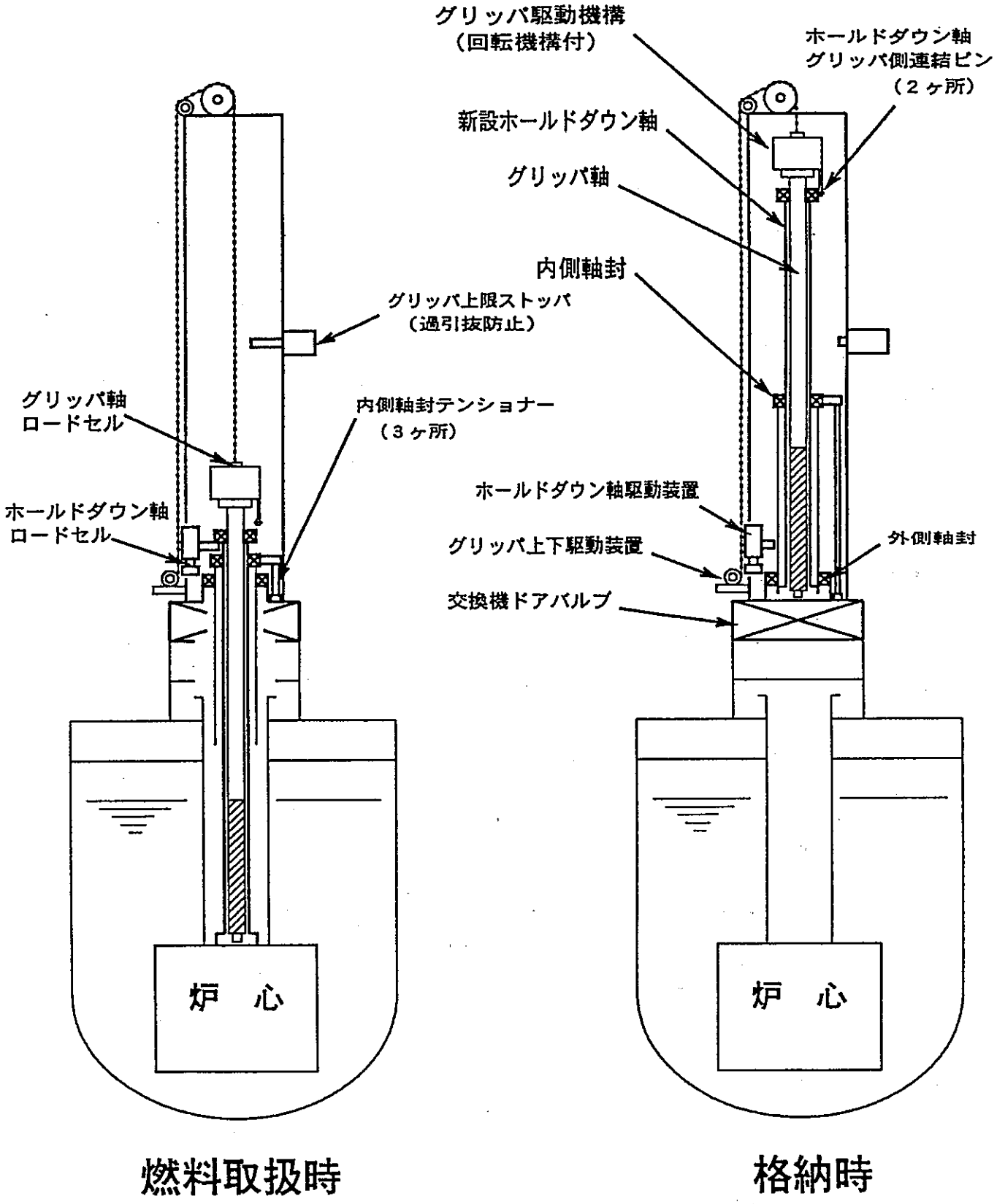
- 湾曲による引抜抵抗荷重を測定、監視
- 炉心湾曲解析コードの計算結果を検証

課題と対応

- 旧燃料交換機では測定誤差大
- 新燃料交換機により荷重測定精度向上

期待される成果

- データの蓄積による予測精度の向上
- 引抜荷重監視による使用寿命の判定


グリッパ駆動機構
（回転機構付）
ホールドダウン軸
グリッパ側連結ピン
（２ヶ所）
新設ホールドダウン軸
グリッパ軸
内側軸封
グリッパ上限ストッパ
（過引抜防止）
グリッパ軸
ロードセル
内側軸封テンショナー
（３ヶ所）
ホールドダウン軸
ロードセル
ホールドダウン軸駆動装置
グリッパ上下駆動装置
外側軸封
交換機ドアバルブ
炉　心
炉　心
燃料取扱時
格納時

新燃料交換機概略図

炉外バンドル圧縮試験

目的

・燃料の高燃焼度化に伴うＢＤＩ挙動の予測

・バンドル変形解析コード検証用データの取得

課題

・Ｘ線ＣＴ画像の高性能化

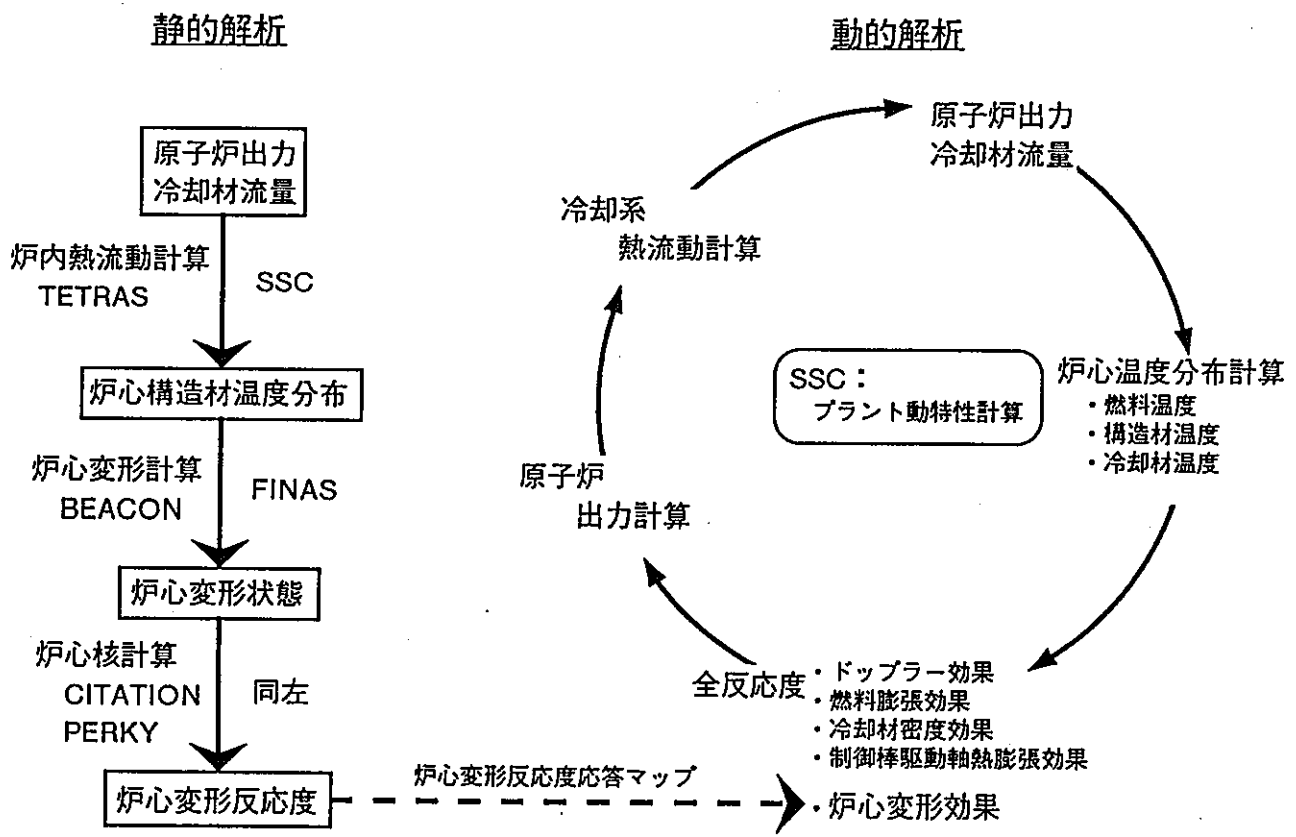
試験装置

- 圧縮試験装置（圧縮板形状：平板タイプ、バルジングタイプ）
- 模擬ピン
- Ｘ線ＣＴ検査装置
- ピン試験装置

試験方法

- バンドルを圧縮板で圧縮
- ピンと圧縮板の接触を確認（圧縮板の塗料、ＣＴ画像）
- 圧縮後の模擬ピンの寸法測定

解析コードの体系化（既存の解析システム）

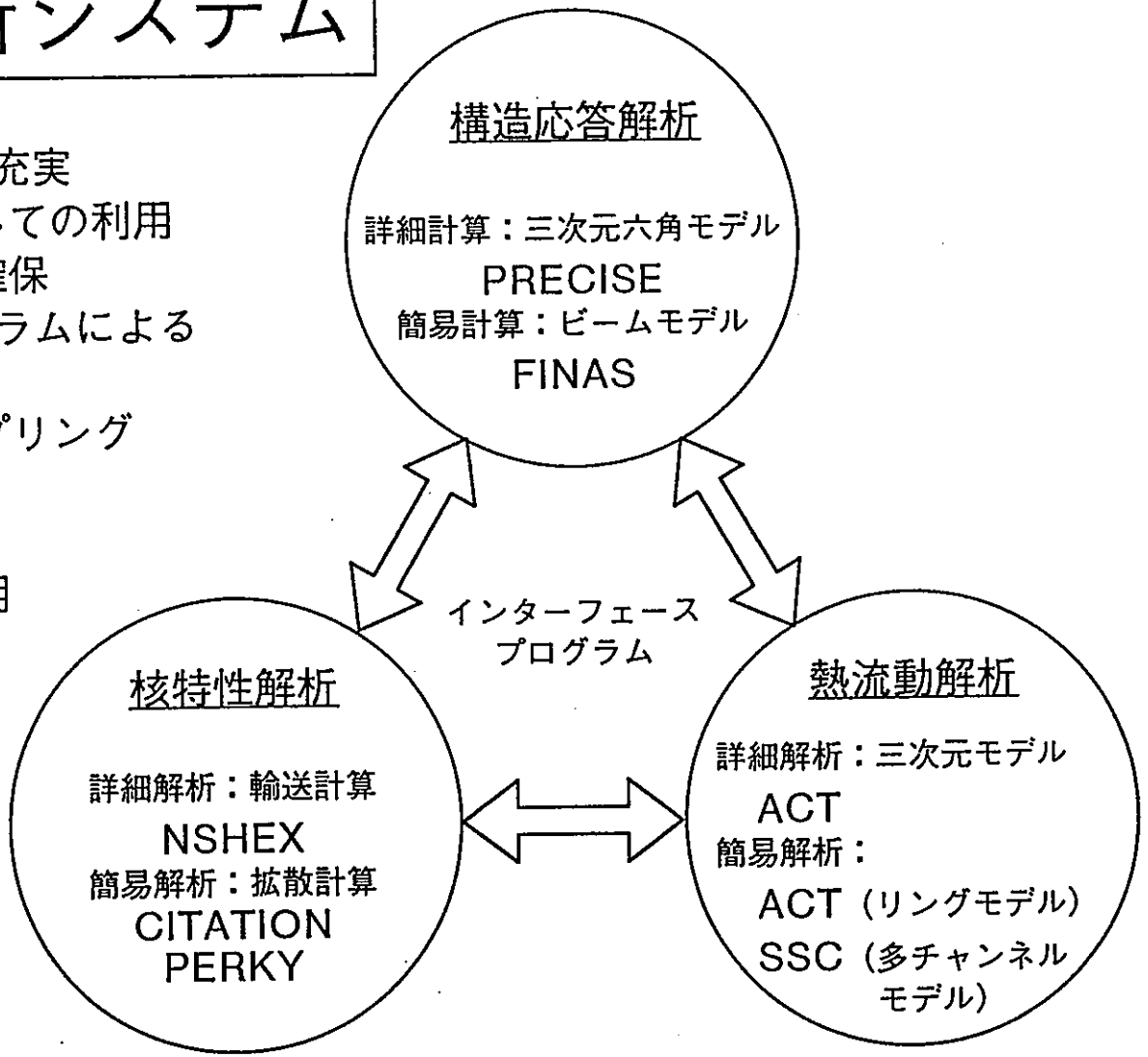


将来の統合解析システム

○ 単体コードとしての機能充実
- 標準的な設計コードとしての利用
- 実験検証による信頼性確保

○ インターフェースプログラムによるカップリング
- 解析対象に応じたカップリング

○ 計算負荷の低減
- 解析モデルの選択
- 高性能並列計算機の活用



実験検証データへの要望

炉心部熱流動解析

○ 炉外実験
- インターラッパフローに関する基礎データの蓄積
- 大規模ナトリウム実験による総合検証データの取得

○ 炉内温度分布の実測
- 炉内集合体ラッパ管温度測定
- 炉心槽温度測定

実験検証データの要求～

構造・材料の観点から

要因；*温度（熱）*、*中性子束*、*流体力*、*地震動*

過渡的な事象における炉心変形

・集合体の熱膨張変形；断面の力学的特性、単体の基本特性～（基本特性試験）

・複数集合体の相互干渉；接触力、摩擦滑り　～（相互干渉試験）

運転履歴にしたがって進行する長期的な炉心変形

・集合体の変形；熱膨張、スエリング、照射クリープ、熱クリープ

・複数集合体の相互干渉；接触力、摩擦滑り

実用炉（ダクトレス炉心）への展開

○ダクトレス炉心のねらい

ダクト削除→燃料体積比向上

・炉心特性の向上　→増殖比の向上

→運転サイクルの長期化

・再処理簡素化、固体廃棄物低減

○炉心変形解析関連の特徴

・構造解析上の着眼点

・低集合体剛性

・燃料支持形態：ﾒｶﾆｶﾙﾎｰﾙﾄﾞﾀﾞｳﾝに伴う軸方向荷重／上下端２点支持

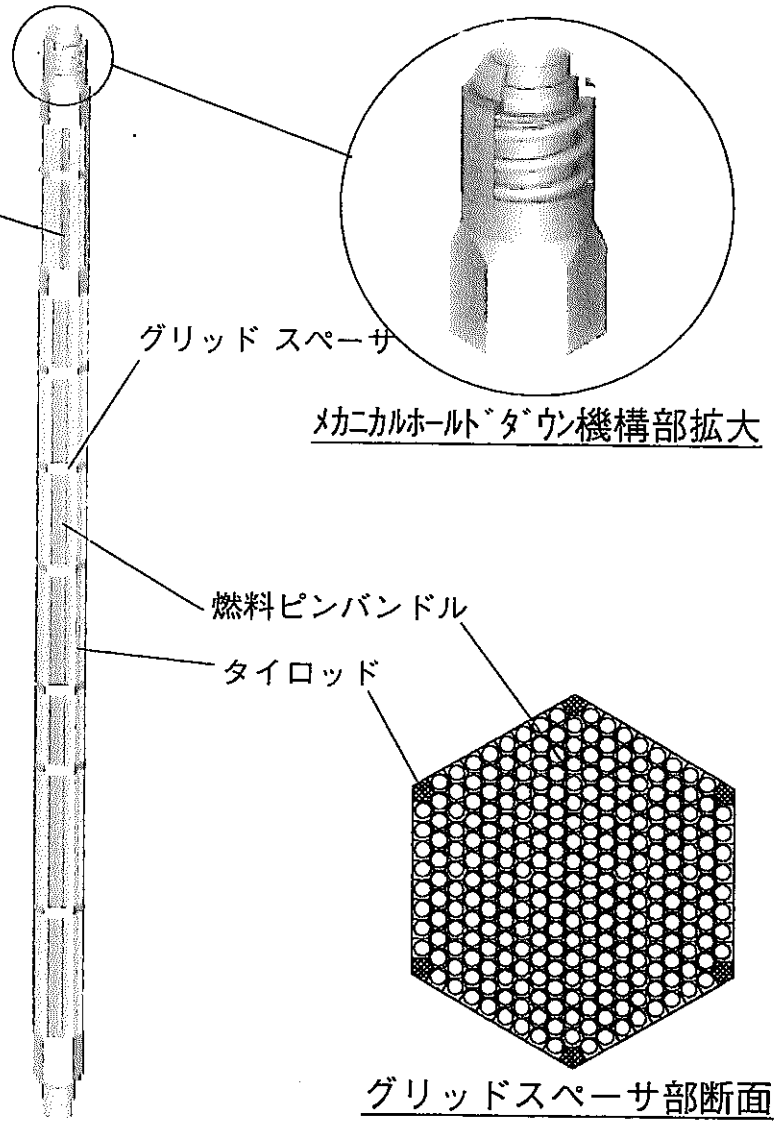
・流動解析上の着眼点

・集合体間の冷却材混合

・集合体間ギャップの流れ

・炉心槽周辺部への炉心をバイパスする流れ

・核特性解析：解析モデル上の課題小



ダクトレス・ノズルレス炉心燃料集合体

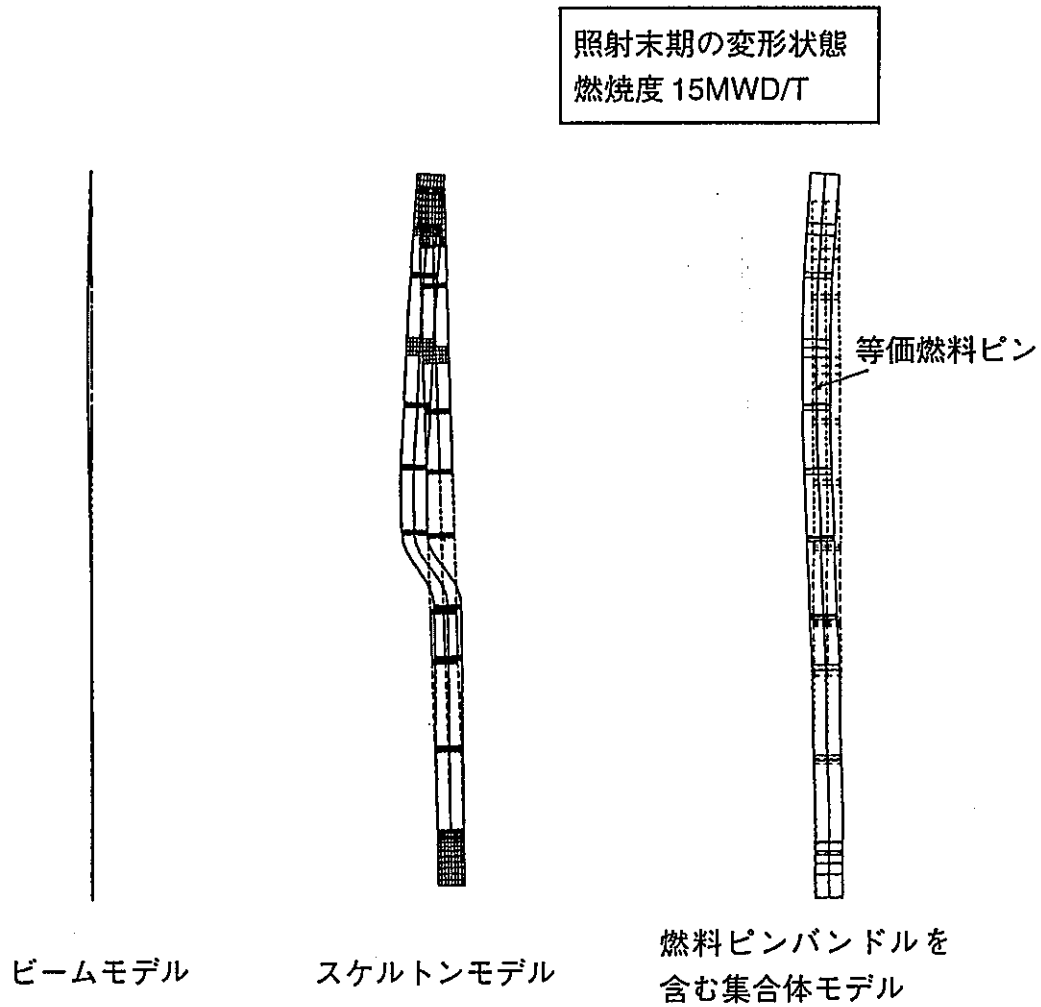
ダクトレス炉心の構造解析上の課題

○課　題

- 燃料ピンバンドルを含む集合体の構造解析モデルの確立
- 集合体間の接触状態モデル収束性
- 集合体剛性の２次元及び３次元体系でのモデル化
- 燃料ピン健全性評価

○R&Dで取得必要なデータ

- ダクトレス集合体の機械特性（曲げ剛性、ねじり剛性等）
- ダクトレス集合体の照射変形挙動
- 材料（PNC-FMS等）のスウェリング、照射クリープ特性データ
- 燃料ピンとグリッド相互作用のメカニズム（摩擦係数、磨耗特性等）



燃料集合体単体での照射炉心変形解析の例

ダクトレス炉心の熱流動解析上の課題

○課　題

・集合体周辺流れ（ギャップフロー）効果の把握

・グリッドスペーサの伝熱流動へ及ぼす影響の評価

・炉心バイパス流（炉心外周のインターラッパフロー部へ流出する流れ）の評価

・ギャップ変化に伴う流量再配分の評価

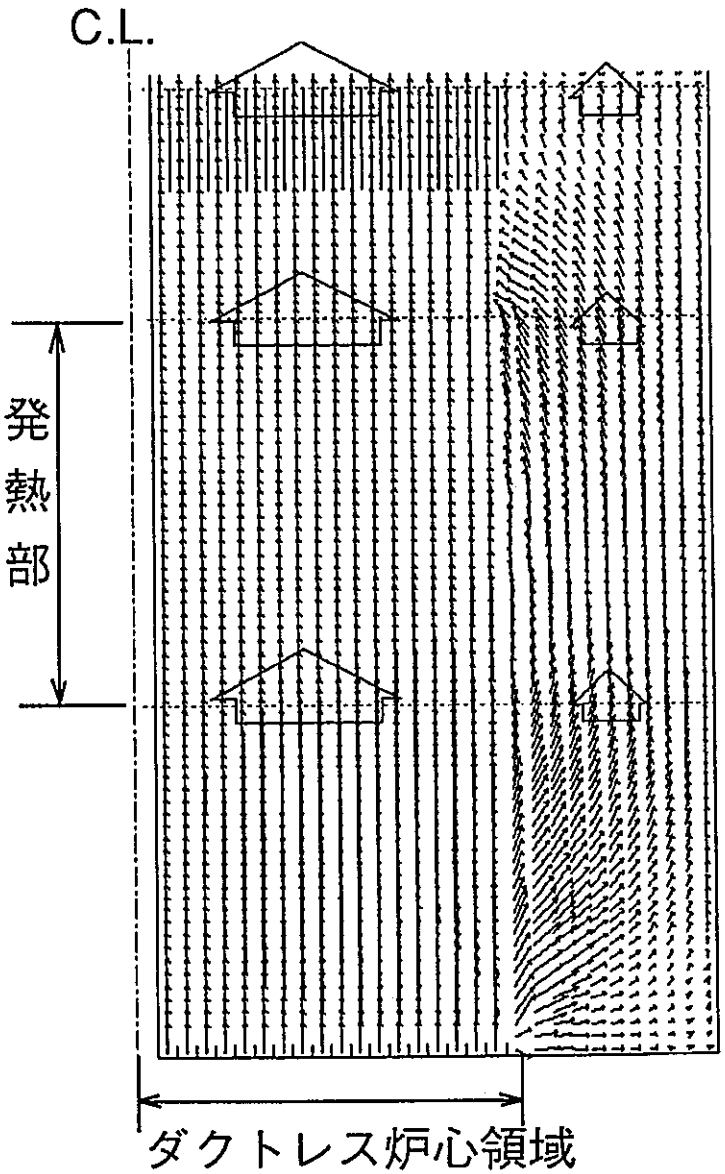
○ R&D で取得必要なデータ

水流動試験での取得必要データ

・ギャップフローの流動データ

・グリッドスペーサミキシング効果／流動抵抗（冷却材混合効果）

・炉心槽内径方向流れ／集合体間冷却材混合に関するデータ

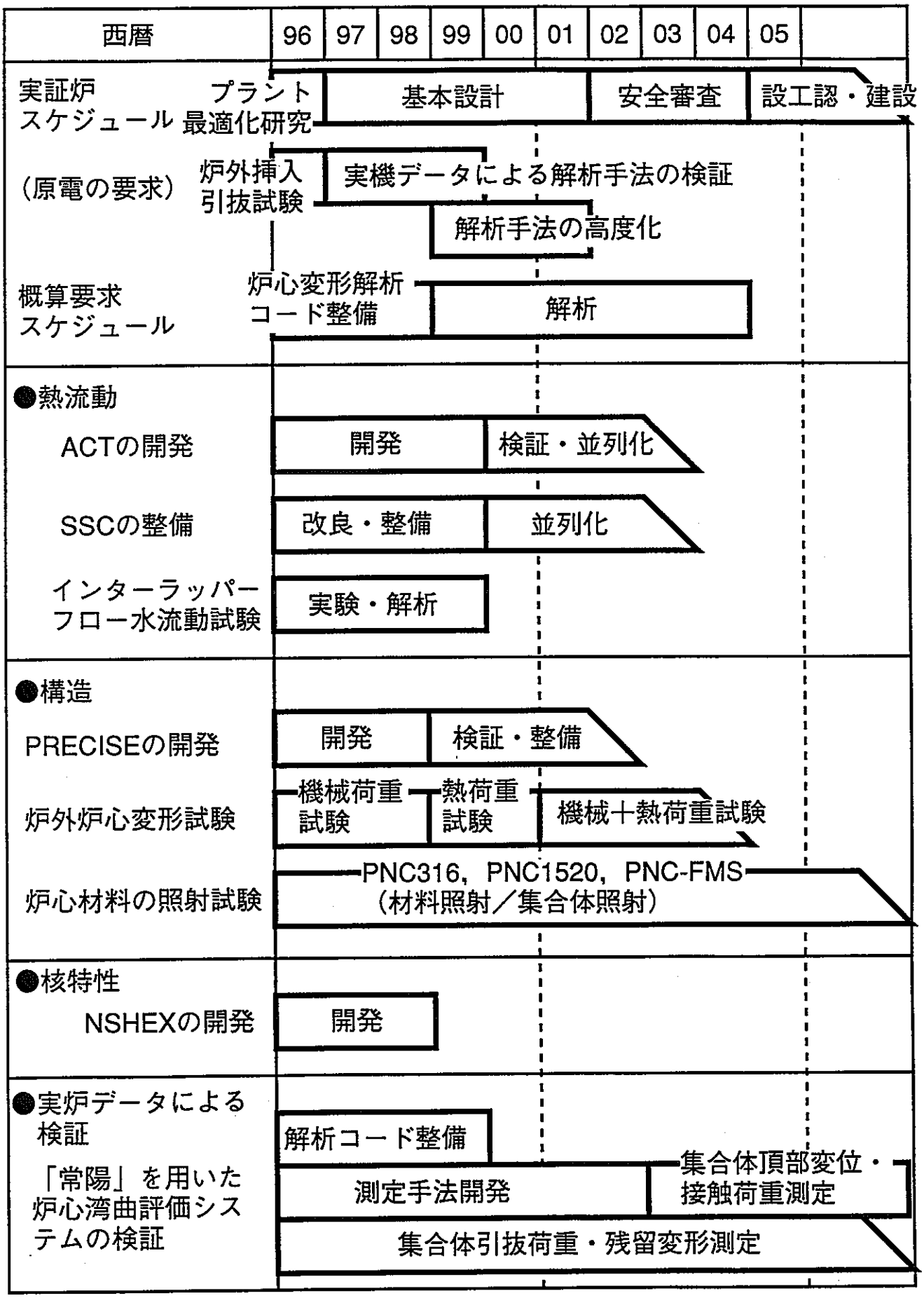


炉心槽内流動解析の例

平成７年度炉心変形検討会の成果

○ 炉心変形挙動の分析（実炉データの重要性）
　→　コード開発及び実験研究の位置付けを整理
　→　研究開発の相互関連性を確認
○ 各課室における研究開発の現状把握（情報の共有化）
　→　相互理解の促進に基づいた研究開発内容の調整
○ 実証炉ニーズの明確化と実用炉課題の摘出
　・実証炉：燃料設計及び安全評価におけるニーズの確認
　・実用炉：ダクトレス炉心における課題
○ 検討会の今後のR&D展開
　・炉心変形評価データベースの整備
　・照射材料データの充実（クリープ、スエリング評価式）
　・解析コードの統合化（インターフェースプログラム）

主な研究開発の展開


西暦
96
97
98
99
00
01
02
03
04
05
実証炉スケジュール
プラント最適化研究
基本設計
安全審査
設工認・建設
(原電の要求)
炉外挿入引抜試験
実機データによる解析手法の検証
解析手法の高度化
概算要求スケジュール
炉心変形解析コード整備
解析
●熱流動
ACTの開発
開発
検証・並列化
SSCの整備
改良・整備
並列化
インターラッパーフロー水流動試験
実験・解析
●構造
PRECISEの開発
開発
検証・整備
炉外炉心変形試験
機械荷重試験
熱荷重試験
機械十熱荷重試験
炉心材料の照射試験
PNC316, PNC1520, PNC-FMS
(材料照射／集合体照射)
●核特性
NSHEXの開発
開発
●実炉データによる検証
「常陽」を用いた炉心湾曲評価システムの検証
解析コード整備
測定手法開発
集合体頂部変位・接触荷重測定
集合体引抜荷重・残留変形測定

付録　A－2　　炉心特性計算コード入出力データ一覧票

炉心特性計算コード入出力データ一覧票

(1／)

分類	炉心熱流動解析								
担当者	部名	基盤技術開発部	課室名	熱流体技術開発室	氏名	大島 宏之	電話番号	2322	作成日 平成 8年 3月 1日
コード名称	和文名	全炉心熱流動解析コード					略称名	ACT	読み方 アクト
	英文名	Analysis of whole Core Thermal hydranlics							Version 1. 0
概要	燃料集合体内と炉心槽の熱的相互作用を含む炉心全体の熱流動現象を詳細に解く解析コードである。炉心部は上部プレナム部および一次冷却系と結合して解くことができるため、強制循環のみならず自然循環崩壊熱除去時に重要となる集合体間ギャップ流れやDRACS起動時に重要となる炉心ープレナム相互作用の影響を含む熱流動挙動を精度良く評価することが可能である。								
計算内容・機能・特徴	炉心ープレナム相互作用やインターラッパーフローを含む自然循環崩壊熱除去時における炉心全体の熱流動挙動の評価に使用する。また、集合体の炉内長期滞在化による集合体ダクトの熱的変形などの影響評価に適用する（構造材温度解析）。								
基礎方程式名・数値解法名	燃料集合体内および炉心槽熱流動は、三角座標系を用いた有限差分法によって質量、運動量、エネルギー保存式を定式化。 行列解法は、直接法および不完全LU分解双対共役勾配法を使用。ベクトル・パラレル処理が可能。								
適用計算機	VPP300 VP2600 CRAY-T3D				OS名	FACOM UNICOS	プログラム言語	FORTRAN	

関連資料	資料番号	タイトル	資料番号	タイトル

種類		変数名	型	内容	要求精度	入力値の決定方法	入出力形式	備考
入力データ								
	計算制御	LSS	I*4	0＝定常計算 1＝過渡計算		解析者	プリ・プロセッサ ファイル入力	
		EPST	R*8	定常判定値		解析者		
		ITMAX	I*4	タイムステップあたりの最大反復回数		解析者		
		ITPMAX	I*4	圧力方程式中の最大反復回数		解析者		
		EPS	R*8	タイムステップ当たりの反復計算における収束判定値		解析者		
		EPSP	R*8	圧力方程式中の反復計算の収束判定値		解析者		
		TMAX	R*8	シミュレーション時間（sec）		解析者		
		NDTIME	I*4	指定タイムステップ数		解析者		
		LITER	I*4	行列解法選択フラッグ		解析者		
	解析体系	LMAX	I*4	軸方向メッシュの総数		解析者		
		IMAX	I*4	サブチャンネルの総数		解析者		
		KMAX	I*4	ギャップの総数		解析者		
		NMAX	I*4	ロッドの総数		解析者		
		NSLMAX	I*4	ヒートスラブの総数		解析者		
		NODROD	I*4	ロッドの径方向メッシュ数		解析者		

炉心特性計算コード入出力データ一覧票

(2／)

種類		変数名	型	内容	要求精度	入力値の決定方法	入出力形式	備考
入力データ								
	解析体系	NODSLB	I*4	ヒートスラブの径方向メッシュ		解析者	プリ・プロセッサ ファイル入力	
		DPIN	R*4	ピンの直径（外径）（m）		設計値		
		PITCH	R*4	ピンのピッチ（m）		設計値		
		DWGAP	R*4	最外周部ピンとラッパ管の間隔（m）		設計値		
		DWIRE	R*8	ラッピングワイヤの直径（m）		設計値		
		HLEAD	R*8	ワイヤラップのリード長さ（m）		設計値		
	物性値	RHOST (M)	R*8	密度ρ（kg／m³）		解析者		
		CPST (M)	R*8	比熱（J／kg K）		解析者		
		TKST (M)	R*8	熱伝導度κ（W/m K）		解析者		
		PUFRC (M)	R*8	Pu比		設計値		
		PORE (M)	R*8	ポロシティ		設計値		
	モデル	CFMIX	R*8	エネルギー乱流ミキシング係数（通常0.02～0.1）	○	実験ベース		
		CDRM	R*8	ワイヤーに垂直方向のDrag Force係数　通常1.3	○	実験ベース		
		CDRER	R*8	軸方向Drag Force Factor (default=1.0)	○	実験ベース		
		CDRML	R*8	横方向Drag Force Factor (default=1.0)	○	実験ベース		
		CTURB	R*8	軸方向momentum乱流拡散係数 Factor (default=1.0)	○	実験ベース		
		LFWI (N)	I*4	軸方向ブロックNの摩擦係数（フラッグ）		解析者		
		LHTR (N)	I*4	熱の移動係数（フラッグ）		解析者		
		GAPCON (J)	R*8	ギャップコンダクタンス（W/m² K）	◎	実験ベース		
	境界条件	PRSIN	R*8	入口境界圧力(Pa)		設計値		
		TLINP	R*8	入口境界液体温度(K)		設計値		
		WTLIN	R*8	入口境界液体質量流量割合（kg/sec）	△	設計値		
		PRSEX	R*8	出口境界圧力(Pa)		設計値		
		TLEXT	R*8	出口境界液体温度(K)		解析者		
		WTLEX	R*8	出口境界液体質量流量割合（kg/sec）		解析者		
		QTIME(K)	R*8	パワー変動指定時間		解析者		
		AQ2Q3(K)	R*8	平均ロッドヒートラックス（W/m²）	△	解析者		
		AQ2SLB(K)	R*8	ヒートスラブのヒートフラックス（W/m²）		解析者		

炉心特性計算コード入出力データ一覧票 (出力データ)

(3／)

種類		変数名	型	内容	出力形式	備考
出力データ						
	制御	NSTEP	I*4	タイムステップ数		
		TIME(NSTEP)	R*8	時刻		
		IDCHAN	I*4	サブチャンネル数		
		KMAX	I*4	ギャップ数		
		NMAX	I*4	ロッド数		
		LMAX	I*4	軸方向メッシュ分割数		
	流動場	P(K)	R*8	圧力 (Pa)		
		TL(K)	R*8	液体温度(K)		
		RHL(K)	R*8	液体の密度 (kg／m³)		
		EL(K)	R*8	液体の内部エネルギー (J/kg)		
		UL(K)	R*8	横方向流速(m/sec)		
		VL(K)	R*8	軸方向流速(m/sec)		
	構造材	TROP(K)	R*8	燃料ピン温度(K)		
		TCLAD(K)	R*8	被覆管温度(K)		
		TSLB(K)	R*8	ラッパー管温度(K)		

炉心特性計算コード入出力データ一覧票

(1／3)

分類	炉心・上部プレナム熱流動解析								
担当者	部名	安全工学部	課室名	原子炉工学室	氏名	上出 英樹	電話番号	2814	作成日 平成 8年 3月13日
コード名称	和文名	単相多次元熱流動解析コード AQUA					略称名	AQUA	読み方 アクア
	英文名	Single-Phase Multi-Dimensional Thermal-Hydraulic Analysis Code : AQUA							Version 1. 0
概要	汎用のx-y-z or r-θ-z 3次元熱流動解析コード。メッシュ中に入り込んだオブスタクルについてはポーラスボディ近似で取り扱う。								
計算内容 機能 特徴	炉心の集合体内，集合体間ギャップナトリウム，上部プレナムの熱流動を同時に解析する。								
基礎方程式名	エネルギー方程式，ナビエストークス方程式，連続の式（非圧縮）を差分法で解く。行列はＩＣＣＧ法で解く。								
数値解法名	乱流モデルは用いず、１次図上差分で解く。								
適用計算機	大型計算機，ワークステーション				ＯＳ名	FACOM-OS，UNIX	プログラム言語	FORTRAN	

関連資料	資料番号	タイトル	資料番号	タイトル
	N9520 87-011	単相多次元熱流動解析コードＡＱＵＡ入力マニュアル		
	ZN9410 95-100	自然循環時のインターラッパーフローによる集合体除熱効果		

種類		変数名	型	内容	要求精度	入力値の決定方法	入出力形式	備考
入力データ			ネームリスト					
	制御	ISTATE	I	定常／過渡フラッグ		解析者	アスキーファイル	
		IDTIME	I	時間ステップ規定方法		〃		
	形状	DX，DY	R	メッシュ巾　例えば集合体間ギャップ巾と対応		〃		集合体の変形による炉心形状の部分的歪みは形状
		NFORCE	I	流動抵抗要素の数		〃		として考慮できない。流動抵抗を部分的に変える
		ICOR	I	流動抵抗要素の関係式オプション		〃		ことにより流れ易さを制御することは可能。
		ISTRUC	I	伝熱要素の数		〃		ピンの発熱，ラッパー管の肉厚，熱容量等を設定
	境界条件	KFLOW	I	速度境界条件の型		〃		可能。
		KTEMP	I	温度境界条件の型		〃		
		KPRES	I	圧力境界条件の型		〃		
	出力	NTSMRY	I	時間ステップによる出力インターバル		〃		
								汎用コードであり、詳細な記述は割愛する。

炉心特性計算コード入出力データ一覧票(出力データ)

(2／3)

種類		変数名	型	内容	出力形式	備考
出力データ						
	制御	NSTEP	I*4	タイムステップ数		
		TIME(NSTEP)	R*8	時刻		
		IDCHAN	I*4	サブチャンネル数		
		KMAX	I*4	ギャップ数		
		NMAX	I*4	ロッド数		
		LMAX	I*4	軸方向メッシュ分割数		
	流動場	P(K)	R*8	圧力(Pa)		
		TL(K)	R*8	液体温度(K)		
		RHL(K)	R*8	液体の密度(kg／m³)		
		EL(K)	R*8	液体の内部エネルギー(J/kg)		
		UL(K)	R*8	横方向流速(m/sec)		
		VL(K)	R*8	軸方向流速(m/sec)		
	構造材	TROP(K)	R*8	燃料ピン温度(K)		
		TCLAD(K)	R*8	被覆管温度(K)		
		TSLB(K)	R*8	ラッパー管温度(K)		

炉心特性計算コード入出力データ一覧票(出力データ)

(3／3)

種類	変数名	型	内容	出力形式	備考
出力データ					
	UL	R	各セル境界のU方向速度成分	バイナリー	
	VL	R	各セル境界のV方向速度成分	〃	
	WL	R	各セル境界のW方向速度成分	〃	
	TL	R	各セルの温度	〃	
	TLB	R	各伝熱要素の表面温度	〃	

炉心特性計算コード入出力データ一覧票

(1／)

分類									
担当者	部名	実験炉部	課室名	技術課	氏名		電話番号		作成日	平成　年　月　日
コード名称	和文名						略称名	TETRAS	読み方	
	英文名								Version	
概要										
計算内容 機能 特徴										
基礎方程式名・数値解法名										
適用計算機	FACOM M1800／10				OS名	OS Ⅳ／F4 MSP		プログラム言語	FORTRAN	
関連資料	資料番号	タイトル			資料番号	タイトル				
	PNC PJ9124 91-002	炉心湾曲解析コードの改良（平成2年度作業）								

種類		変数名	型	内容	要求精度	入力値の決定方法	入出力形式	備考
入力データ								
	解析制御	M¥NTAS		炉心構成要素最大数				
		M¥NDMX		軸方向ノード最大数				
		M¥LDMX		BEACON用軸方向ノード最大数				
		M¥MXGP		炉心構成要素間ギャップの最大数				
		M¥MXKC		制御棒要素の最大種類数				
		M¥MXAX		軸方向出力分布種類及び高速中性子束分布種類の最大数				
		M¥MXGF		ギャップ流量種類の最大数				
		M¥MXMT		νΣf，Σa，D規定用物質種類の最大数				
		M¥NONO		ブロッタ出力用軸方向ノード最大数				
		M¥NELM		ブロッタ出力用炉心構成要素最大数				
	タイトル	ITITLE		解析タイトル				
	解析モデルコントロール	IOPT		オプションフラグ				
		ITURN		燃料集合体の冷却材旋回流の方向				
		EPS1		ラッパ管温度計算における収束判定条件				
		EPS2		ラッパ管温度計算における収束判定条件				

炉心特性計算コード入出力データ一覧票

(2/5)

種類		変数名	型	内容	要求精度	入力値の決定方法	入出力形式	備考
入力データ								
		IOPT2		オプションフラグ				
		IBOPT		出力オプションフラグ				
	解析炉心体系関連データ	NTAS		炉心構成要素の総数				
		LDMAX		BEACON用軸方向ノードの総数				
		TL		上部支持板から上側の炉心構成要素の長さ				
		PITCH		炉心構成要素の配列ピッチ				
		DFLATO		ラッパ管外側対辺間距離				
		IOPT3		炉心形状				
		LAYER		炉心層数				
		IBREAK		炉心最外層の上下炉心構成要素の欠け数				
		TINLET		原子炉入口温度				
		MXKC		制御棒要素の種類				
		NODEFA		燃料集合体のセクションⅡの最初の軸方向ノード				
		NODERF		中性子遮蔽体のセクションⅡの最初の軸方向ノード				
		NODENS		中性子源要素のセクションⅡ，Ⅲの最初の軸方向ノード				
		NODECR		制御棒のセクションⅡ，Ⅲの最初の軸方向ノード				
		KCNO		Ⅰ番目の種類に属する制御棒である炉心構成要素番号				
		BAX		BEACON用軸方向ノードⅠの長さ				
	炉心構成要素仕様	MAS		Ⅰ番目の炉心構成要素の属性				
		PINP		燃料要素の配列ピッチ				
		DDPIN		燃料被覆管肉厚				
		IASTY		ラッパ管に沿って並んだ燃料要素数				
		DWRAP		ラッパ管の肉厚				
		DPIN		燃料要素外径				
		WIREP		ワイヤスペーサ巻ピッチ				
	出力分布関連データ	MIDZ		Axial Peaking が最大となる軸方向ノード番号				
		MXAX		軸方向出力分布の種類				
		NODEMX		軸方向ノードの総数				

炉心特性計算コード入出力データ一覧票

種　類		変数名	型	内　容	要求精度	入力値の決定方法	入出力形式	備　考
入力データ								
		KAXPW		炉心構成要素Ｉの属性				
		TPOWER		炉心構成要素Ｉの発熱量				
		POAX		軸方向ノードNでの軸方向ピーキングファクタ				
		AX		軸方向ノードNの長さ				
		CPW		制御棒要素における各部全体の出力割合				
		SNPW		中性子源要素における各部全体の出力割合				
		FLAX		軸方向ノードNでの軸方向高速中性子束分布				
	Control Volume 関連データ	FAREA		燃料集合体における１体あたりの流路面積				
		CRAD		制御棒要素における各部の半径				
		CAREA		制御棒要素における１体あたりの流路面積				
		RFRAD		中性子遮蔽体における各部の半径				
		SMDR		中性子源要素における各部の半径				
		SNAREA		中性子源要素の全体の流路面積				
		SHAREA		燃料集合体のセクションⅡの流路面積				
		RDAREA		制御棒要素のセクションⅢの流路面積				
		SBAREA		中性子源要素のセクションⅢの流路面積				
	冷却材流量関連データ	CFLOW		制御棒要素における各部全体の流量割合				
		RFFLOW		中性子遮蔽体における各部全体の流量割合				
		SNFLOW		中性子源要素における各部全体の流量割合				
		TFLOW		炉心構成要素Ｉの冷却材流量				
		MXGAP		炉心構成要素間ギャップの最大番号				
		MXGPFL		ギャップ流量の種類				
		KGPFL		ギャップＩのギャップ流量属性				
		GPFLOW		ｎ番目の種類のギャップ流量				
	核データ関連データ	MXMAT		核物質の総数				
		NATNO		炉心構成要素と核物質の対応番号				
		EFK		実効増倍率				
		SIGF		物質番号Mの生成断面積				

炉心特性計算コード入出力データ一覧票

(4/5)

種類		変数名	型	内容	要求精度	入力値の決定方法	入出力形式	備考
入力データ								
		SIGA		物質番号Mの吸収断面積				
		DIFS		物質番号Mの拡散係数				
		FSIGF		物質番号Mの高速群生成断面積				
		FSIGA		物質番号Mの高速群吸収断面積				
		FDIFS		物質番号Mの高速群拡散係数				
	中性子束分布データ	TFLUX		炉心構成要素の軸方向中心における中性子束				
		FSFLUX		炉心構成要素の軸方向中心における高速中性子束				
	出力コントロールデータ	NONON		出力用軸方向ノード総数と軸方向ノード番号				
		NNNO		要素及びギャップの温度出力オプション				
		NELM		炉心構成要素の総数及び要素番号のプロットオプション				
		NELMT		プロットオプション				
		NCV		プロットオプション				
		NOGAP		炉心構成要素間のギャップ番号のプロットオプション				
		ELS		炉心構成要素の幅のプロットオプション				
		MELM2		プロットオプション				
		NANTAS		プロットオプション				
		NANODE		出力オプション				
		NAELM		出力オプション				
		NANCV		出力オプション				
		NOWRAP		ラッパ管6面温度の出力オプション				
	物性値データ	CP		ナトリウム定圧比熱				
		ROU		ナトリウム密度				
		CONDNA		ナトリウム熱伝導率				
		CONDSS		構造材の熱伝導率				
		CONDBE		ベリリウムペレットの熱伝導率				
		GAPCON		ベリリウム被覆管のギャップコンダクタンス				
	「常陽」用反射体のデータ	RFRAP		反射体のラッパ管肉厚				
		RFIARA		内側反射体の1 Volumeあたりの流路面積				

炉心特性計算コード入出力データ一覧票

種　類	変数名	型	内　容	要求精度	入力値の決定方法	入出力形式	備　考
入力データ							
	NODRFI		内側反射体のセクションⅡの最初の軸方向ノード番号				
	RFARAD		外側反射体(A) における各部の半径				
	RFAFLW		外側反射体(A) における各部全体の流量割合				
	RFAPW		外側反射体(A) における各部全体の出力割合				
	NODRFA		外側反射体(A) のセクションⅡの最初の軸方向ノード番号				
	RFBRAD		外側反射体(B) における遮蔽ブロック内半径				
	NODRFB		外側反射体(B) のセクションⅡの最初の軸方向ノード番号				

炉心特性計算コード入出力データ一覧票

(1／)

分類	炉心変形解析								
担当者	部名	基盤技術開発部	課室名	構造・材料技術開発室	氏名	根岸　仁	電話番号	2380	作成日 平成 8年 3月13日
コード名称	和文名	並列計算を用いた炉心機械挙動解析システム　(開発中)					略称名	PRECISE	読み方 プリサイス
	英文名	Parallel Computing added Reactor Core Mechanical Behavior Analysis System							Version 1.0 (開発中)
概要	並列計算機技術を用いた全炉心体系での高精度炉心変形挙動解析コード。従来、計算機資源の制約上簡易なモデルにより評価されてきた燃料集合体に特化要素等の適用により詳細な炉心変形挙動を解析する。また炉心構造の特徴を考慮して開発した解析アルゴリズムを並列計算機に適用することにより大規模かつ高速な解析を実現する。								
計算内容 機能 特徴	ダクト内容物およびダクト間の相互作用等を考慮した、過渡事象を含んだ全炉心体系での高精度な炉心変形挙動解析（湾曲形状、パッド部の接触荷重、引抜き荷重等の算出）が可能。 （構造解析、温度解析、動的応答解析）								
基礎方程式名・数値解法名	変位法による有限要素法。行列解法は完全ＬＵ分解及び共益勾配法（ＳＣＧ）を併用。 完全ＬＵ分解はリオーダリングにより並列化を図ったＢＢＤ及びＳＳＤ法を使用。								
適用計算機	CRAY－T3D				ＯＳ名	UNICOS(8.0), MAX(1.1)	プログラム言語	FORTRAN	

関連資料	資料番号	タイトル	資料番号	タイトル
		並列計算技術を用いた炉心湾曲解析システムの設計（作成予定）		

種類		変数名	型	内容	要求精度	入力値の決定方法	入出力形式	備考
入力データ								
	解析制御	TITLE	C*70	タイトル	－	解析者	解析条件ファイル入力	
		DATEID	C*20	日付	－	解析者		
		TIMEID	C*20	時間	－	解析者		
		NSTEP	I*4	計算ステップ	－	解析者		
		NOUT	I*4	出力ステップ数	－	解析者		
		ISTEP	I*4	出力ステップ	－	解析者		
		NCMAX	I*4	非線形ループの最大収束計算回数	－	解析者		
		ESPA	R*8	非線形ループの収束判定絶対誤差	－	解析者		
		TREF	R*8	リファレンス温度	－	解析者		
		GRAV(3)	R*8	重力	－	解析者		
		LPOUT	I*4	結果リスト出力の指定(1:ON ,2:OFF)	－	解析者		
	モデル	IREACT	I*4	解析体系（1:任意、2:列、3:周）	－	解析者	プリ・プロセッサ ファイル入力	
		NASSEM	I*4	集合体数又は周数	－	解析者		IREACT=3の時は解析する周数を入力
		ICENT	I*4	中心集合体番号	－	解析者		IREACT=2の時、中心集合体の番号を入力。
		NBLOCK	I*4	領域数（プロセッサ数）	－	解析者		２の巾乗

炉心特性計算コード入出力データ一覧票

(2／)

種類		変数名	型	内容	要求精度	入力値の決定方法	入出力形式	備考
入力データ								
	モデル	PITCH	R*8	集合体配列ピッチ	−	設計値／実測値	プリ・プロセッサ	
		DUCTL	R*8	集合体等形状（長さ）	−	設計値／実測値	ファイル入力	
		DUCT2W	R*8	集合体等形状（対面間距離）	−	設計値／実測値		
		DUCTT	R*8	集合体等形状（板厚）	−	設計値／実測値		
		IMAT	I*4	材料番号	−	設計		
		NPAD	I*4	パッド数（ NPAD ≦ 3）	−	設計値		
		ZPAD(NPAD)	R*8	パッド位置（支持点からの距離）	−	設計値		
		VERTI(NPAD)	R*8	パッド部垂直方向剛性	○	解析・実験等		パッド面間方向の剛性
		HORIZ(NPAD)	R*8	パッド部水平方向剛性	○	解析・実験等		すべり方向の剛性
		GAPO(NPAD)	R*8	パッド間初期ギャップ幅	○	設計値		
		FRIC(NPAD)	R*8	パッド部摩擦係数	○	実験ベース		
		ENTL	R*8	エントランスノズル長さ	−	設計値		
		ENTD	R*8	エントランスノズル直径	−	設計値		
		ENTT	R*8	エントランスノズル部の板厚	−	設計値		
		ENGAPU	R*8	エントランスノズル部ギャップ（上部）	△	設計値		現時点では未考慮
		ENGAPL	R*8	エントランスノズル部ギャップ（下部）	△	設計値		
		ENMUU	R*8	エントランスノズル部摩擦係数（上部）	○	実験ベース		
		ENMUL	R*8	エントランスノズル部摩擦係数（下部）	○	実験ベース		
		NR	I*4	ラッパ管縦方向分割数		解析者		縦（軸）方向要素分割数の指定
		NC	I*4	接続管縦方向分割数		解析者		縦（軸）方向要素分割数の指定
		NE	I*4	エントランスノズル縦方向分割数		解析者		縦（軸）方向要素分割数の指定
	境界条件	NBCOND	I*4	境界条件の指定数	−	解析者	プリ・プロセッサ	
		NSTART	I*4	初期変位等を与える始めの接点番号	−	解析者	ファイル入力	
		NEND	I*4	初期変位等を与える終わり接点番号	−	解析者		
		NDELTA	I*4	初期変位等を与える接点番号の刻み（増分）	−	解析者		
		DISPL	R*8	変位	○	解析者		未記入の場合は設計形状で解析。明らかな初期変位や荷重がある場合に入力する。将来的には前サイクルの形状等をファイル入力する予定。
		FORCE	R*8	集中外力	○	解析者		
		IBIND	I*4	拘束枠設定(0: 拘束枠無し，1 ～3:拘束枠あり)	−	設計		

炉心特性計算コード入出力データ一覧票

(3／)

種　類		変数名	型	内　容	要求精度	入力値の決定方法	入出力形式	備　考
入力データ								
	材料特性	YOUNG	R*8	縦弾性係数E	○	基準値／実態	コード内にデータ	現時点では弾性解析のみ。
		POISS	R*8	ポアソン比ν	○	基準値／実態	ライブラリとして格納	
		BXPAN	R*8	線膨張係数α	○	基準値／実態		
		RHO	R*8	密度ρ	○	基準値／実態		
				クリープ特性式	◎	既存式・新規作成式	コード内組み込み・ユーザーサブルーチン	現時点では未対応
				スウェリング特性式	◎			現時点では未対応
	温度履歴／分布	TEMP	R*8	全積分点温度（ステップ毎）	◎	解析結果	外部ファイル入力	
							FINAS の入力データフォーマット	
	中性子束	NEUT	R*8	全積分点の中性子束（ステップ毎）	◎			現時点では未対応
	時　間	RTIME	R*8	実時間		解析者	解析条件ファイル入力	現時点では未対応
		CTIME	R*8	クリープ時間		設計値／解析者		現時点では未対応
		STIME	R*8	中性子照射時間		設計値／解析者		現時点では未対応

炉心特性計算コード入出力データ一覧票(出力データ)

(4/)

種類		変数名	型	内容	出力形式	備考
出力データ						解析結果はテキストファイルで出力。
	制御	TITLE	C*70	タイトル	FINAS ポストテープ	
		DATEID	C*20	日付		
		TIMEID	C*20	時間		
		NSTEP	I*4	解析ステップ		
	節点	DPLACE	R*8	節点変位	FINAS ポストテープ フォーマット	
		DDPLAC	R*8	節点変位増分		
		THETA	R*8	角度		
		DTHETA	R*8	角度増分		
		FORCE	R*8	節点反力		
		TMOMEN	R*8	モーメント		
	要素	EPSIL	R*8	全ひずみ（積分点の数だけ出力）	FINAS ポストテープ フォーマット	
		EE	R*8	弾性ひずみ（積分点の数だけ出力）		
		EP	R*8	塑性ひずみ（積分点の数だけ出力）		
		EC	R*8	クリープひずみ（積分点の数だけ出力）		
		ES	R*8	スウェリングひずみ（積分点の数だけ出力）		
		STRS	R*8	応力成分（積分点の数だけ出力）		
		VMS	R*8	Mises の相当応力（積分点の数だけ出力）		
		TRES	R*8	Trescaの相当応力（積分点の数だけ出力）		
	時間	RTIME(NSTEP)	R*8	実時間（入力データのエコーバック）	FINAS ポストテープ フォーマット	現時点では未対応
		CTIME(NSTEP)	R*8	クリープ時間（入力データのエコーバック）		現時点では未対応
		STIME(NSTEP)	R*8	中性子照射時間（入力データのエコーバック）		現時点では未対応
	パッド部	GAP(NCTCT)	R*8	パッド間ギャップ幅	FINAS ポストテープ フォーマット	
		SLIP(2,NCTCT)	R*8	パッド部すべり量		
		FNCT(3,NCTCT)	R*8	パッド部接触反力		
		FSTICK	R*8	パッド部固着力		
		ICTCT	I*4	接触状態（接触、未接触）		

炉心特性計算コード入出力データ一覧票(出力データ)

(5／)

種類		変数名	型	内容	出力形式	備考
出力データ						
	永久変形量(拘束枠をはずした状態)	PDISP(6,NNODE)	R*8	節点変位		現時点では未対応
		PEPSI(6,NELEM)	R*8	永久ひずみ		
		PSTRS(6,NELEM)	R*8	残留応力		
	荷重	WDLOAD	R*8	引抜き荷重		現時点では未対応

炉心特性計算コード入出力データ一覧票

(1／)

分類	炉心変形解析								
担当者	部名	基盤技術開発部	課室名	構造・材料技術開発室	氏名	根岸　仁	電話番号	2380	作成日 平成 8年 3月13日
コード名称	和文名	ＦＩＮＡＳによる炉心変形解析のための前処理プログラム					略称名		読み方
	英文名								Version 1. 0
概要	6角要素の集合体で構成される炉心変形解析用ＦＩＮＡＳの入力データを形状・寸法データと炉心出入口側の温度分布データにより簡易に生成する。 （現時点では弾性熱応力解析のみに対応。クリープ及びスウェリング解析等を行う場合はＦＩＮＡＳの入力データを修正する必要がある。）								
計算内容 機能 特徴	炉心の形状・寸法データよりＦＩＡＮＳの入力データを作成する。また、温度データはＦＩＮＡＳ入力データとは分けて必要に応じて作成できるようになっている。 温度データの設定で「自動」が選択されている場合は、炉心出口側のラッパ管温度分布データより最小2乗法を用いて3次式の係数を求める。								
基礎方程式名・数値解法名									
適用計算機	ＩＮＤＩＧＯ等のワークステーション				ＯＳ名	ＵＮＩＸ	プログラム言語	ＦＯＲＴＲＡＮ	
関連資料	資料番号	タイトル			資料番号	タイトル			
		暫定資料（マニュアル，説明書）							

種類	変数名	型	内容	要求精度	入力値の決定方法	入出力形式	備考
入力データ							
形状・寸法	CAS	C*6	解析ケース名	－	解析者	形状・寸法データ ファイル入力	
	WLL	R*8	燃料集合体全長	－	設計値／実態		
	WLW	R*8	ラッパ管長さ	－	設計値／実態		
	WLC	R*8	接続管長さ	－	設計値／実態		
	WLE	R*8	エントランスノズル長さ	－	設計値／実態		
	DW	R*8	ラッパ管対面間距離（板厚中心）	－	設計値／実態		
	TW	R*8	ラッパ管板厚	－	設計値／実態		
	DC	R*8	接続管対面間距離（板厚中心）	－	設計値／実態		
	TC	R*8	接続管板厚	－	設計値／実態		
	DE	R*8	エントランスノズル直径（板厚中心）	－	設計値／実態		
	TE	R*8	エントランスノズル板厚	－	設計値／実態		
	ZPU	R*8	上部パッド位置（エントランスノズル上部支持点基準）	－	設計値／実態		
	ZPL	R*8	下部パッド位置（エントランスノズル上部支持点基準）	－	設計値／実態		
	PIT	R*8	ラッパ管配列ピッチ	－	設計値／実態		
	GAP	R*8	パッド間ギャップ	○	設計値／実態		

炉心特性計算コード入出力データ一覧票

(2／)

種類		変数名	型	内容	要求精度	入力値の決定方法	入出力形式	備考
入力データ								
	形状・寸法	NSO	I*4	ラッパ管径方向層数	−	解析者（設計）	形状・寸法データ ファイル入力	
		GOS	R*8	面間圧縮剛性	○	解析・実験等		
		AMYU	R*8	摩擦係数	○	実験ベース		
		NBW	I*5	ラッパ管長手方向分割数	−	解析者		軸方向要素分割数
		NBC	I*5	接続管長手方向分割数	−	解析者		軸方向要素分割数
		NBB	I*5	エントランスノズル長手方向分割数	−	解析者		軸方向要素分割数
		NSBK	I*5	周方向積分点数（≦２４，６の倍数）	−	解析者		
		ISBK	I*5	軸方向積分点数（３ 又は ５）	−	解析者		
		Z1	R*8	温度勾配開始位置	○	解析者／解析結果		
		Z2	R*8	温度勾配終了位置	○	解析者／解析結果		
		BBST	R*8	ベース（最低）温度 （リファレンス温度は含まない）	○	解析者／解析結果		＝（炉心入口温度－ﾘﾌｧﾚﾝｽ温度）
		REFT	R*8	リファレンス温度	−	解析者		
		IWFLAG	I*5	温度データの生成（１：しない，２：する）	−	解析者		
		ITFLAG	I*5	温度式の係数設定（０：自動，１：マニュアル）	−	解析者		
		A	R*8	温度式の３乗項の係数(ITFLAG=1 の場合)	−	解析者		
		B	R*8	温度式の２乗項の係数(ITFLAG=1 の場合)	−	解析者		
		C	R*8	温度式の定数項(ITFLAG=1 の場合)	−	解析者		
	炉心出口側ﾗｯﾊﾟ管温度分布	ICNO	I*5	ロッドの周方向番号（集合体番号）	−	解析結果	外部ファイル入力 FORMAT(I5,F10.0)	ファイル名『distan.dat』で入力する。
		TEMP	R*8	炉心出口温度 （リファレンス温度を含む）	◎			

炉心特性計算コード入出力データ一覧票(出力データ)

(3／)

種　類		変数名	型	内　容	出力形式	備　考
出力データ						
	FINAS 入力データ			解析をコントロールするデータ（サンプル）	ＦＩＮＡＳ入力データ フォーマット	・ファイル名『ケース名.dat』に出力される。
				モデルデータ		・現時点では、ＦＩＮＡＳの解析をコントロールするデータ及び出力をコントロールするデータは雛形であるので、解析者は設定し直す必要がある。今後、本プログラムで全て設定できるように改良する予定。
				出力をコントロールするデータ（サンプル）		
	温度データ	TT	R*8	ＦＩＮＡＳ入力データの温度データ（全積分点）　（リファレンス温度は含まない）		・ファイル名『wraptmp.dat 』に出力される。

炉心特性計算コード入出力データ一覧票

(1／)

分類	炉心変形解析								
担当者	部名	基盤技術開発部	課室名	構造・材料技術開発室	氏名	根岸　仁	電話番号	2380	作成日 平成 8年 3月13日
コード名称	和文名	ＦＩＮＡＳによる炉心変形解析のための後処理プログラム					略称名		読み方
	英文名								Version 1．0
概要	ＦＩＮＡＳの解析結果の評価を容易にするためポストテープより必要なデータ（1／6セクター）を抽出する。また、抽出されたデータからグラフを作成する。								
計算内容 機能 特徴	・ＦＩＮＡＳのポストテープより抜粋ステップデータに基づき、変位，相対変位、軸力、モーメント、ギャップ反力データを抽出しＣＳＶ形式でステップ毎に出力する。 ・ＣＳＶ形式で抽出されたデータをＥＸＣＥＬのブック形式に変換し、グラフを作成する。								
基礎方程式名・数値解法名									
適用計算機	ＩＮＤＩＧＯ等のＷＳ及びパソコン（ＤＯＳ－Ｖ）				ＯＳ名	ＵＮＩＸ，ＷＩＮＤＯＷＳ	プログラム言語	ＦＯＲＴＲＡＮ，ＥＸＣＥＬ マクロ	
関連資料	資料番号	タイトル			資料番号	タイトル			
		暫定資料（マニュアル，説明書）							

種類	変数名	型	内容	要求精度	入力値の決定方法	入出力形式	備考
入力データ							
データ抽出部	N	I*5	抜粋ステップデータ（抜粋ステップ総数）	－	評価者	format(i10)	ファイル名『chstep.dat』
	NSTEP	I*5	抜粋ステップデータ（ステップ番号）	－	評価者	format(16i5)	
			炉心変形解析前処理プログラム入力データ	－			前処理プログラム参照　ﾌｧｲﾙ名『wrapinp.dat 』
			ＦＩＮＡＳポストテープ（炉心変形解析結果）	－		FIANS ﾎﾟｽﾄﾃｰﾌﾟﾌｫｰﾏｯﾄ	ファイル名『ケース名.fpo 』　⇦ ﾊﾞｲﾅﾘｰ
グラフ作成部			変位データ	－		ＣＳＶ形式	ファイル名『モデル名+d.csv』
			相対変位データ	－			ファイル名『モデル名+r.csv』
			軸力データ	－			ファイル名『モデル名+s1.csv 』
			Ｙ軸回転モーメントデータ	－			ファイル名『モデル名+s2.csv 』
			Ｚ軸回転モーメントデータ	－			ファイル名『モデル名+s3.csv 』
			回転モーメントデータ	－			ファイル名『モデル名+s4.csv 』
			ギャップ反力データ	－			ファイル名『モデル名+g.csv』

炉心特性計算コード入出力データ一覧票(出力データ)

(2／)

種　類	変数名	型	内　容	出力形式	備　考
出力データ					
データ抽出部			変位データ（変位データ，最大値，最小値，平均値）	ＣＳＶ形式	ファイル名『モデル名+d.csv』に出力される。
			相対変位データ（相対変位データ，最大値，最小値，平均値）		ファイル名『モデル名+r.csv』に出力される。
			軸力データ		ファイル名『モデル名+s1.csv 』に出力される。
			Ｙ軸回転モーメントデータ		ファイル名『モデル名+s2.csv 』に出力される。
			Ｚ軸回転モーメントデータ		ファイル名『モデル名+s3.csv 』に出力される。
			回転モーメントデータ		ファイル名『モデル名+s4.csv 』に出力される。
			ギャップ反力データ		ファイル名『モデル名+g.csv』に出力される。
グラフ作成部			ＥＸＣＥＬブックファイル（データシート）	EXCEL ブック形式	ファイル名『モデル名.xls』に出力される。
			ＥＸＣＥＬブックファイル（グラフシート）		

炉心特性計算コード入出力データ一覧票

(1／)

分類									
担当者	部名	実験炉部	課室名	技術課	氏名		電話番号		作成日	平成　年　月　日
コード名称	和文名						略称名	BEACON	読み方	
	英文名								Version	
概要										
計算内容 機能 特徴										
基礎方程式名・数値解法名										
適用計算機	FACOM M1800／10				OS名	OS Ⅳ／F4 MSP		プログラム言語	FORTRAN	
関連資料	資料番号	タイトル			資料番号	タイトル				
	PNC PJ9124 91-002	炉心湾曲解析コードの改良（平成2年度作業）								

種類		変数名	型	内容	要求精度	入力値の決定方法	入出力形式	備考
入力データ								
	解析制御	M¥NTAS		炉心構成要素最大数				
		M¥LDMX		軸方向ノード最大数				
		M¥NLY		1列内炉心構成要素最大数				
		M¥MMAX		炉心構成要素種類最大数				
		M¥LMAS		炉心構成要素断面形状タイプ最大数				
		M¥TIME		タイムステップ最大数				
		M¥PUP		出力上昇時分割ステップ最大数				
		M¥PDM		出力下降時分割ステップ最大数				
		M¥CRP		応力，クリープ計算を行う炉心構成要素最大数				
		M¥PAD		パッド位置最大数				
		M¥OCP		外部クランピング位置最大数				
		M¥MSYN		対称条件設定用データエリア最大数				
		M¥PLT1		プロッタ出力する列最大数				
		M¥PLT2		プロッタ出力用炉心構成要素最大数				
		M¥PLT3		プロッタ出力用軸方向ノード最大数				

炉心特性計算コード入出力データ一覧票

(2/5)

種類		変数名	型	内容	要求精度	入力値の決定方法	入出力形式	備考
入力データ								
	タイトル	ITITLE		解析タイトル				
	計算回数	NRUN		連続計算の回数				
	入力コントロールデータ	INTCRP		連続計算オプション（クリープ歪み）				
		INTSWL		連続計算オプション（スエリング歪み）				
		LITOPT		ラッパ管温度の入力フラグ				
		LIFOPT		ラッパ管高中性子束の入力フラグ				
		LIGAPT		ｴﾝﾄﾗﾝｽﾉｽﾞﾙ部変位量，変位方向，変位量3方向成分フラグ				
		ISTART		カード入力データの入力フラグ				
		INDATA		カード入力データの入力オプション				
		IBLKD		プログラム内蔵デフォルト値選択オプション				
	出力コントロールデータ	IFNCRP		出力オプション（クリープ歪み）				
		IFNSWL		出力オプション（スエリング歪み）				
		LOGAPT		ｴﾝﾄﾗﾝｽﾉｽﾞﾙ部変位量，変位方向，変位量3方向成分フラグ				
		ISTOP		カード入力データの出力コントロールフラグ				
		IFDATA		カード入力データの出力オプション				
		NWTIME		ラッパ管外側対辺間距離，炉心構成要素変位量，変位方向1				
		NWPUP		ラッパ管外側対辺間距離，炉心構成要素変位量，変位方向2				
		MASFLG		炉心構成要素の変位量，変位方向の出力オプション				
		IASBOX		変位量，変位方向を出力する炉心構成要素番号				
		MXTOUT		炉心断面における集合体の変位量と荷重の出力オプション				
		ITOUT		炉心断面における集合体の変位量と荷重の出力オプション1				
		MXPOUT		〃				
		IPOUP		炉心断面における集合体の変位量と荷重の出力オプション2				
		MXDOUT		〃				
		IDOUT		炉心断面における集合体の変位量と荷重の出力オプション3				
		IXYPRT		湾曲形状のプリントとプロット表示番号				
		IRWOT		炉心構成要素の中心軸の変位成分を出力する列番号				
		XM		プロットオプション（構成要素中心軸間の距離）				

炉心特性計算コード入出力データ一覧票

(3/5)

種類		変数名	型	内容	要求精度	入力値の決定方法	入出力形式	備考
入力データ								
		YDL		プロットオプション（縦軸長さ）				
		XFACT		プロットオプション（作図の倍率）				
		PRATIO		炉心断面の縮尺率				
		ZRATIO		炉心構成要素の変位量の倍率				
		IPLMX		炉心構成要素の総数及び要素番号				
		IPLOT		〃				
		LDPMX		軸方向ノードの総数及びノード番号				
		LDPLOT		〃				
		NCENT		図面中心に位置する炉心構成要素番号（A4）				
		NOPLT		接触荷重のプロットオプション				
		MAXXY		炉心断面における集合体の変位量と荷重のPLOTオプション				
		ITXY		炉心断面における集合体の変位量と荷重のPLOTオプション1				
		MPXXY		〃				
		IPXY		炉心断面における集合体の変位量と荷重のPLOTオプション2				
		MDXXY		〃				
		IDXY		炉心断面における集合体の変位量と荷重のPLOTオプション3				
		NPTYPE		接触荷重プロット形式オプション				
		NTANI		接触荷重プロット時の単位オプション				
		MPTYPE		変位ベクトル図の変位量出力オプション				
		IOPFG		断面膨張状態の出力オプション				
		IPRINT		リスト出力フラグ				
	解析モデルコントロール	IOPLB		炉心構成要素下部支持モデル選択オプション				
		ILPMX		Outer Iteration の最大数				
		CFACT		炉心構成要素の湾曲形状の重なりに対する最大許容誤差				
		MITER		接触位置及び反力計算のためのIteration 数				
		JCENTR		炉心構成要素1の位置方向の適用選択オプション				
		MXGAP		ｴﾝﾄﾗﾝｽﾉｽﾞﾙ 部のｸﾘｱﾗﾝｽ効果を計算する際の繰返し回数				
		MAXCRP		応力・クリープを計算する炉心構成要素の最大種類				

炉心特性計算コード入出力データ一覧票

(4／5)

種類		変数名	型	内容	要求精度	入力値の決定方法	入出力形式	備考
入力データ								
		MCHOOS		応力・クリープを計算する炉心構成要素の順位指定				
		ITNO		応力・クリープ計算のために分割された燃焼期間の分割数				
		MXTIME		燃料交換サイクルのステップ分割数				
		MXPUP		出力上昇時の温度上昇幅のステップ分割数				
		IDSNT		出力降下実施の選択オプション				
		MXPDN		出力降下時の温度降下幅のステップ分割数				
		ICRUMP		拘束解除実施の選択オプション				
		JFRIC		摩擦力実施の選択オプション				
		ISTMAX		せん断増分繰返し計算部の最大繰返し計算回数				
		IFRMAX		せん断／摩擦力計算部の最大繰返し計算回数				
		AFACT		摩擦力計算時のDamping Factor（外部拘束枠未接触時）				
		AFSCT2		摩擦力計算時のDamping Factor（外部拘束枠接触時）				
		SFACT		せん断力計算時変位収束判定条件				
		FFACT		せん断力及び摩擦力収束判定条件				
		EFACT		StickingからSliding への変化判定条件				
		EFACT2		せん断力増分を考慮するかどうかの判定条件				
		IMON		ラッパ管温度と中性子束データの設定オプション				
		REPS		ラッパ管部外部荷重によるモーメントの判定条件				
		DGAP		ギャップループ計算のギャップ増分量				
		GFACT		ｴﾝﾄﾗﾝｽﾌﾞﾙ変位増分のDamping Factor				
		CONVFA		ギャップ計算時のE／N変位収束判定条件				
	解析炉心体系関連データ	NTAS		炉心構成要素の総数				
		LDMAX		軸方向ノードの総数				
		TMANIF		上部支持板における炉心構成要素の温度				
		TL		上部支持板より上側の炉心構成要素の長さ				
		DISGRP		上部及び下部支持板間の距離				
		PITCH		炉心構成要素の配列ピッチ				
		DALATO		ラッパ管外側対辺間距離				

炉心特性計算コード入出力データ一覧票

種　類	変数名	型	内　容	要求精度	入力値の決定方法	入出力形式	備　考
入力データ							
	MAXOCP		外部クランピングの軸方向位置の数				
	OUTCRP		最外周の炉心構成要素と炉心拘束枠との距離				
	LOCP		〃　軸方向ノード				
	MAXPAD		炉心構成要素のスペーサパッド位置数				
	PAD		スペーサパッドの肉厚（片側）				
	LPAD		〃　軸方向ノード				
	NOCRMP		外部拘束が直接、影響しない列の設定フラグ				
	EGAPU		ｴﾝﾄﾗﾝｽﾉｽﾞﾙ部上部のｸﾘｱﾗﾝｽ（片側）				
	EGAPL		ｴﾝﾄﾗﾝｽﾉｽﾞﾙ部下部のｸﾘｱﾗﾝｽ（片側）				
	CTEMP		瞬間冷却後の一定温度				
	UNCRP		拘束解除した時の最外周要素と拘束枠間の距離				
	NSYM		炉心形状設定オプション				
	NLAY		炉心層数				
	IBREAK		炉心最外層の上下の炉心構成要素の欠け数				
	STEMP		炉心構成要素の室温時温度				
	DMESH		軸方向ノード長さ				
	NMAX		炉心構成要素の種類の数				
	MAS		炉心構成要素の番号と種類の対応				
	MEQT		形状タイプの断面２次モーメントの計算指定オプション				
	DWRAP		ラッパ管肉厚				
	MOMIN		炉心構成要素のラッパ管の断面２次モーメント				
	BENMON		ラッパ管の曲げモーメント計算のための係数ｇｋ				
	NOPIN		燃料集合体の燃料要素の総数				
	PINP		燃料要素の配列ピッチ				
	DPIN		燃料要素の外径				
	DWIRE		ワイヤスペーサ径				
	WIREP		ワイヤスペーサ巻きピッチ				
	TLEN		燃料要素の全長				

炉心特性計算コード入出力データ一覧票

(5／5)

種　類	変数名	型	内　容	要求精度	入力値の決定方法	入出力形式	備　考
入力データ							
	DNOUP		燃料要素最下端と炉心上部支持板との距離				
	STIFF		パッド部断面圧縮剛性				
	BMOMIN		ｴﾝﾄﾗﾝｽﾉｽﾞﾙ部の断面２次モーメント				
	DOUTNZ		ｴﾝﾄﾗﾝｽﾉｽﾞﾙ部断面の外径				
	DINNZ		ｴﾝﾄﾗﾝｽﾉｽﾞﾙ部断面の内径				
	LMAS		炉心構成要素の形状タイプの数				
	MASLD		炉心構成要素の各軸方向ノードと形状タイプの対応				
	LENT		ｴﾝﾄﾗﾝｽﾉｽﾞﾙ部の断面２次モーメントの計算指定オプション				
	ISPR		支持部回転バネ剛性入力オプション				
	TSPR		回転バネ剛性				
冷却材	VLCTY		燃料集合体内の燃料要素束部における冷却材平均流速				
物性値	NSWELL		スエリング評価式番号				
	COEF1		ラッパ管の熱膨張率を計算するための係数				
	COEF2		〃				
	COEF3		〃　ALPHA=COEF1+COEF2*T+COEF3*T^2+COEF4*T^3				
	COEF4		〃　T=温度				
	EYNG		ラッパ管のヤング率				
	EYNG0		ｴﾝﾄﾗﾝｽﾉｽﾞﾙのヤング率				
	NCREEP		クリープ評価式番号				
	ALPHAC		ラッパ管の平均熱膨張率				
	SDUM		ナトリウム動粘性係数				
	SDROU		ナトリウム密度				
	CMU		ポアソン比				
	FRICS		ラッパ管パッド部静止摩擦係数（接触部摩擦モデル用）				
	FRICD		ラッパ管パッド部動摩擦係数　（接触部摩擦モデル用）				
	FRICR		ラッパ管パッド部静止摩擦係数（集合体引抜力計算用）				
	FRICE		ｴﾝﾄﾗﾝｽﾉｽﾞﾙ部静止摩擦係数（集合体引抜力計算用）				
	SCOF1		炉心支持板の熱膨張率を計算するための係数１				

炉心特性計算コード入出力データ一覧票

種類	変数名	型	内容	要求精度	入力値の決定方法	入出力形式	備考
入力データ							
	SCOF2		炉心支持板の熱膨張率を計算するための係数2				
	SCOF3		〃 ALPHA=SCOF1+SCOF2*T+SCOF3*T^2+SCOF4*T^3				
	SCOF4		〃 T=温度				
滞在日数データ	DEXDAY		分割された燃焼期間のうちのステップ期間				
	BFDAY		着目している燃料交換サイクル以前の照射日数				
永久変形量評価用データ	NXREF		サイクル末期に炉心から取り出す炉心構成要素の総数				
	NOREF		サイクル末期に炉心から取り出す炉心構成要素番号				
温度・中性子束分布データ	TEMP		炉心構成要素のラッパ管壁の軸方向ノードでの温度				
	FLUX		ラッパ管壁の高速中性子束				