



パソコン版対話型もんじゅ炉心特性解析システムの開発

北野 彰洋 照山 英彦 西 裕士
山岡 光明* 森木 保幸* 中川 雅俊*¹

敦賀本部 国際技術センター
*株式会社東芝
*¹アイテル技術サービス株式会社

Development of Monju Easy to Introduce System for Total Evaluation of Reactor Core

Akihiro KITANO Hidehiko TERUYAMA Hiroshi NISHI
Mitsuki YAMAOKA* Yasuyuki MORIKI* Masatoshi NAKAGAWA*¹

International Cooperation and Technology Development Center, Tsuruga Head Office
* TOSHIBA Corporation
*¹ AITEL Corporation

将来の「もんじゅ」炉心において、燃料の最大活用を目指した柔軟な炉心運用計画の可能性を探るため、簡便でより精確に核・熱・炉心構成要素強度特性の各種炉心特性を解析評価できるパソコン版対話型もんじゅ炉心特性解析システム（MEISTER: Monju Easy-to Introduce System for Total Evaluation of Reactor Core）を開発した。MEISTERでは入力データ作成、計算コード間のデータ授受や計算結果出力などを、グラフィカル・ユーザ・インターフェイスにて視覚的・統一的に行うことができる。これを用いて「もんじゅ」性能試験を対象とした解析を行い、システムの実機適用性を検証した。

An interactive core analysis tool for use on a PC MEISTER (Monju Easy-to-Introduce System for Total Evaluation of Reactor Core) has been developed, enabling evaluation of the overall core characteristics, including core physics, thermal hydraulics and structural integrity, in an easy but accurate manner. Data processing, such as the preparation of input data, data transfer from one code to another or display of output data, can be achieved in a systematic manner by graphical user interfaces. MEISTER has been verified by the analysis of core criticality, control rod worth and the maximum linear heat rate measured in the Monju start-up tests.

キーワード

高速増殖炉，もんじゅ，炉心解析，解析コードシステム，炉心運用計画，可視化，対話型システム，グラフィカル・ユーザ・インターフェイス，詳細モデル

FBR, Monju, Core Calculation, Analysis Code System, Scheme of Loading Fuel, Visualization, Written in Dialogue System, GUI, Detailed Model



北野 彰洋

炉心技術開発グループ所属
研究員
「もんじゅ」の炉心概念研究
と特性解析に従事



照山 英彦

炉心技術開発グループ所属
「もんじゅ」の炉心概念研
究、速報解析業務に従事



西 裕士

炉心技術開発グループ所属
グループリーダー
「もんじゅ」の炉心設計解
析、速報設計解析業務とそ
の高度化研究に従事



山岡 光明

電力・産業システム技術開
発センター所属 主査
新型炉の炉心概念・リサイ
クル概念の開発及び炉心解
析コード開発に従事



森木 保幸

電力・産業システム技術開
発センター所属 主務
新型炉の炉心概念・リサイ
クル概念の開発及び炉心解
析コード開発に従事



中川 雅俊

新型炉サイクルグループ所
属 技術主幹
FBR炉心解析コードの開
発に従事
工学博士
日本原子力学会論文賞受賞

1. はじめに

高速増殖原型炉「もんじゅ」は、その長期的使命として、今次原子力開発利用長期計画にもあるように、高速中性子を提供する場として有効に活用していくこととされている。このような将来の「もんじゅ」炉心の運用計画効率化や有効活用を考えると、そのため仮に炉心運用方法をより柔軟化するものとするれば、候補として想定される多種多様な炉心概念や炉心移行・運用計画案について、広範なサーベイ計算を迅速、かつ効率的に実施し得る炉心特性解析ツールが実用上必要となる。事実、従来の解析計算では、計算対象となる体系を、その都度手作業でモデル化して入力データ作成を行っており、多数の複雑な体系を逐一模擬するには膨大な作業が必要であった。また、各計算コード間のデータ授受についても、それぞれの計算コードに対応したデータ形式への書式変換などが必要であり、計算コードごとに同一データを再入力するなど、非効率な面も多かった。

また、例えば炉心運用計画の最適化のためには、既に軽水炉では開発されつつあるように、燃料交換パターンの最適化戦略とそれを具現化した最適化関数・最適化手法などが必要となる。そのような最適化のためのベース・ツールとしても、迅速、かつ効率的な炉心特性解析ツールが必要となる。

そこで、パソコン版対話型もんじゅ炉心特性解析システム MEISTER (Monju Easy to Introduce System for Total Evaluation of Reactor Core) を開発・整備することとした。

本システムは、各種概念検討をはじめ、炉心運用計画の策定、炉心管理や炉心設計、あるいは研究開発などにも幅広く適用できる、汎用性の高い解析システムとして整備を進めている。しかも、入力形式は簡便でありながら迅速かつ精度良く特性予測のできるシステムを目指しているものである。現在、その基本的部分がほぼ完成している。なお、本システムは、単なる効率的解析システムというだけでなく、過去30年間にわたり開発されてきた高速炉炉心解析技術の技術継承にも利用し得る発展的システムという側面も持っている。すなわち、例えば、技術者の教育・研修に用いるなど、各種計算コードの入力データ作成方法などの知識がなくとも、パソコンを利用することで、炉心特性解析技術の基本を習得するためのツールとしても活用できる可能性がある。

本報告では MEISTER の機能と特徴、システム構成、解析モデル、そして「もんじゅ」性能試験解析への適用結果について述べる。従来煩雑であった一連の解析計算業務が、本システムの構築により効率化したので、その適用性を「もんじゅ」性能試験結果により検証した。特に、従来入力データ作成やコード間のデータ授受が煩雑過ぎて、実際問題としては実用的でなかった体系非均質モデル（制御棒体系非均質モデル）が、本システムの整備により実用的な範囲内で実行可能となったので、これについても適用性を検証した。

2. 開発の背景

高速増殖炉の実用化を考えた場合、炉心燃料の取出平均燃焼度向上は、基本的要請の一つとされている。現在、サイクル機構が推進している「高速増殖炉サイクル実用化戦略調査研究 (FS)」においても、平均燃焼度として約15万 MWd/t を達成することが、実用化のための経済性確保の目安とされている¹⁾。これは、現行「もんじゅ」炉心の取出平均燃焼度約8万 MWd/t に比べ、実に倍近い達成目標である。

炉心燃料の取出平均燃焼度を向上させるには、高温クリープ強度に優れ、かつ、中性子照射によるスエリングを起こしにくい、いわゆる耐高温・耐中性子照射性能の高い構造材料を開発・使用することが基本となる（クリープ：燃料被覆管構造材などに応力が発生した場合、塑性変形により応力が緩和されると同時に材料の損傷が進む現象のこと、スエリング：炉内の中性子照射により構造材料が膨張する現象のこと）。これにより、炉心燃料の機械的強度限界が拡大され、最大燃焼度を高く取れるので、平均燃焼度の向上が可能となるからである。

ただし、最大燃焼度が同一であっても、炉心運用を工夫することで、平均燃焼度を向上させることは、原理的に可能である。

例えば、現行の「もんじゅ」炉心では、燃料交換方法は固定パッチ方式でシャフリングも実施しないこととしている。この場合、取出平均燃焼度は約8万 MWd/t であるが、集合体最大燃焼度は約9万4千 MWd/t である。これは、同じ炉心内でも、炉心中心近傍と外周部とでは、燃料の燃焼速度に違いがあるためである。

したがって、炉心外周部の燃料だけ炉内滞在期

間を延長する可変バッチ方式を採用したり、あるいは炉内滞在中に装荷位置を変更するシャフリングを実施するなど、炉心運用計画の最適化を図ることで、理論上の潜在的可能性としては、最大18%近い燃料の有効活用ができることになる。

しかし、そのためには、燃料集合体ごとにその照射履歴に応じた機械的強度評価を実施し、候補として想定される各種燃料交換計画・炉心運用計画を逐一詳細に比較検討していくことが必要となる。

また、このような検討は、「もんじゅ」を高速中性子を提供する場として、最大限有効活用していくことを考えると、そのための炉心移行計画策定などにも必須のものである。以上のことから、当国際技術センターでは、本MEISTERシステムの開発を進めることとしたものである。

3. MEISTERのシステム構成

3.1 動作環境

まず、MEISTERのベースとすべき計算機であるが、MEISTERの趣旨から考えれば、単に処理能力に優れるだけでなく、できるだけユーザ・フレンドリなもの望ましい。現行の計算機としては、大型計算機、エンジニアリングワークステーション(EWS)、パソコン(PC)が代表的であるが、ユーザ・インターフェイスの利便性を考えるなら、大型計算機よりもEWS、更にはPCが適切である。

特にPCはハードの価格も安く、アプリケーション・ソフトウェアも圧倒的に豊富で、なおかつ安価である。また、オペレーティング・システム(OS)の更新に際しても、EWSとは異なり、上位互換性が確保されるのが通例である。しかも、ベンチマーク計算の結果によれば計算速度の点でもEWSを数倍凌駕しており、これらすべての点でEWSを上回っている。以上のことから、MEISTERはPC上に構築することとした。MEISTERの動作環境を表1に示す。

3.2 機能と特徴

本MEISTERシステムでは、パソコン上で動作する一連の炉心特性解析計算コード群をベースとして、各計算コードへの入力データを、パソコン上のグラフィカル・ユーザ・インターフェイス(GUI): データなどが視覚的に容易に認識できる形式でユーザに提示され、また、機能の選択などもメニュー形式で視覚的に実行できる計算機上の表示

表1 MEISTERシステムの動作環境

項目	内容
オペレーティング・システム	Windows®2000(注)
ハードウェア (1)機種 (2)ハードディスクドライブ容量 (3)メモリー (4)CPUクロック	DOS/V型Windows®パソコン 実行環境(実行ファイルなど): 200MB 一回の計算で生成されるデータ: 1.5GB以上 512MB以上推奨 400MHz以上推奨

(注)Windowsは、米国Microsoft Corporationの米国およびその他の国における登録商標または商標です。

形式)により、容易に作成することができる。また、出力データもGUIにより簡便、かつ視覚的に提供されるシステムとしている。各計算コード間のデータ授受については、ユーザが逐次指定せずとも自動的に設定されるが、必要であればユーザが指定することもできる。これらの機能により、ユーザは各計算コードのマニュアルを逐一参照せずとも、パソコン上で簡便に一連の炉心特性解析計算を行うことができる。

MEISTERの構成と特徴を図1に、解析の流れを図2に示す。

本システムは、大別すると「解析モジュール」部、「データベース」部、「ユーザ・インターフェイス」部の三つのモジュールから構成される。

「解析モジュール」部には核特性解析、熱流力特性解析、炉心構成要素強度特性解析からなる計算コード群が組み込まれている。これら計算コードは、従来から高速増殖炉の炉心特性解析に広く利用されてきたものであるが、新たに開発された計算コード、あるいは今後開発されるであろう計算コードも、本システムの入出力データのインターフェイス部分を修正することで、容易にシステムに組み込むことができるようにしている。

「データベース」部には、炉心配置、集合体仕様、核データライブラリ(JENDL 3.2ベースの高速炉用核定数JFS3 J3.2²⁾³⁾燃料、冷却材、構造材物性値などの解析の根幹となるデータが収められており、入力データ作成や計算実行の際に呼び出されて使用される。また、炉内における燃焼履歴を考慮した全燃料集合体の燃料組成データも、このデータベース部に格納されており、入力で指定した燃料交換パターンに応じて利用される。

なお、核データライブラリとしては、JFS3タイ

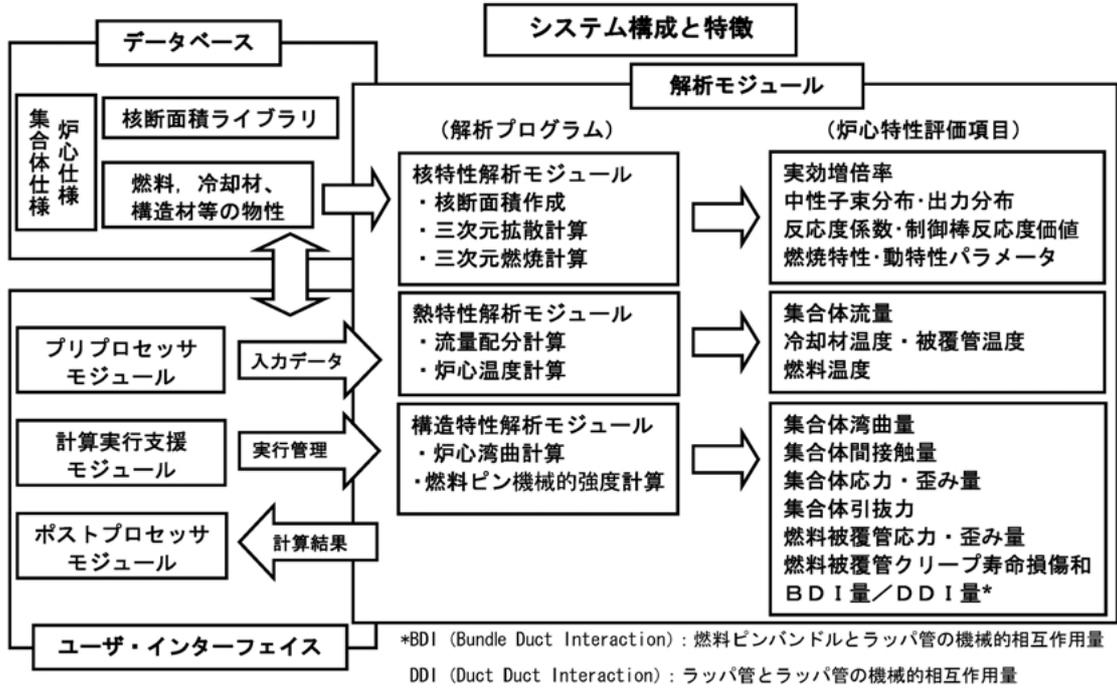


図1 炉心特性解析システムMEISTERのシステム構成と特徴

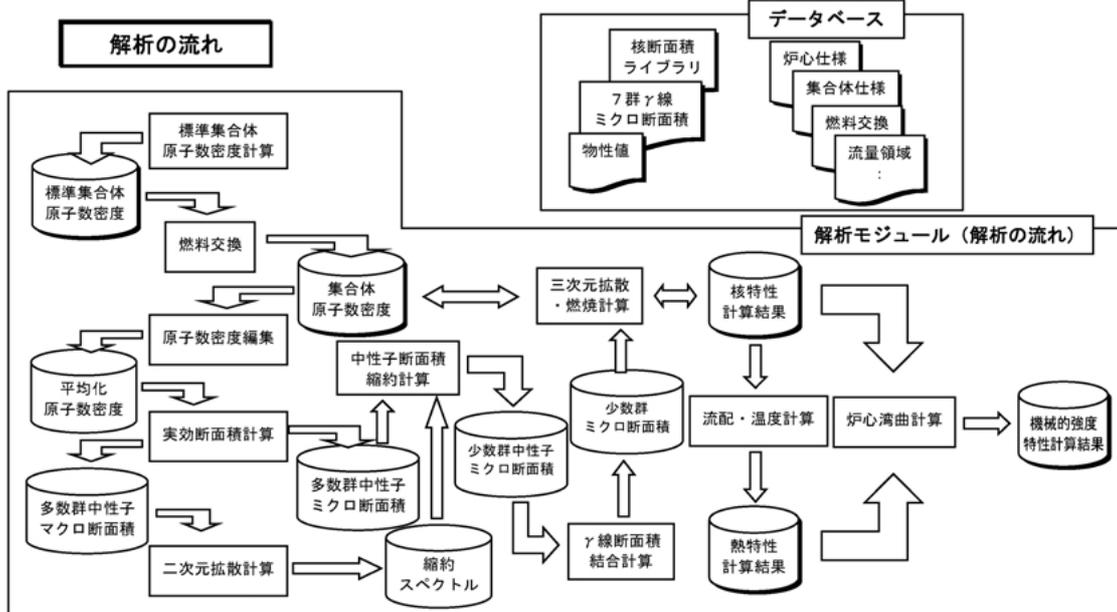


図2 炉心特性解析システムMEISTERの解析の流れ

プの核定数であれば任意のライブラリを利用することが可能であり、大洗工学センターにて整備された最新の統合炉定数ADJ 2000⁴⁾なども適用可能である。

「ユーザ・インターフェイス」部は、プリプロセッサ、ポストプロセッサ、計算実行支援モジュールから成り、プリプロセッサは、対話型画面により各計算コードの入力データを視覚的に、また、統一的に作成できる。ポストプロセッサは、これも対話型画面により解析結果を可視化表示することができる。計算実行支援モジュールは、計算コードの入出力ファイルの割り当てや計算コード間のデータの受け渡しを対話型画面で制御するもので、基本的にはシステムが自動で制御を行う。したがって、特別な場合でなければ、ユーザが手を加えずとも、一通りの計算が実行できるようになっている。

3.3 プリプロセッサ

プリプロセッサは、前述のように、対話型画面

により各計算コードの入力データ式を作成するものである。本プリプロセッサの特長は、単純な人的ケアレスミスを排除し、短時間に、簡便に入力データを作成できるよう、GUIを活用した対話型インターフェイスにより入力データ式の作成が可能にある。

プリプロセッサでのデータ入力画面の例として、炉心仕様入力画面を図3に示す。

MEISTERでは、データ入力の手順として、まず初めに基本的炉心仕様（集集体配列数や配列ピッチ、炉心配置や運転条件など）を定義し、次に、燃料集集体や制御棒などの各集集体の仕様（集集体の形状、寸法、材質など）を軸方向ごとに定義していく。下図はそれらの設定画面の例である。

このように、基本的な炉心配置や集集体形状を入力（定義）することにより、前述のように、各計算コードのマニュアルを逐一参照せずとも、容易に一連の計算コードの入力データが計算コード間の整合性を確保しつつ一貫して自動的に作成できる。

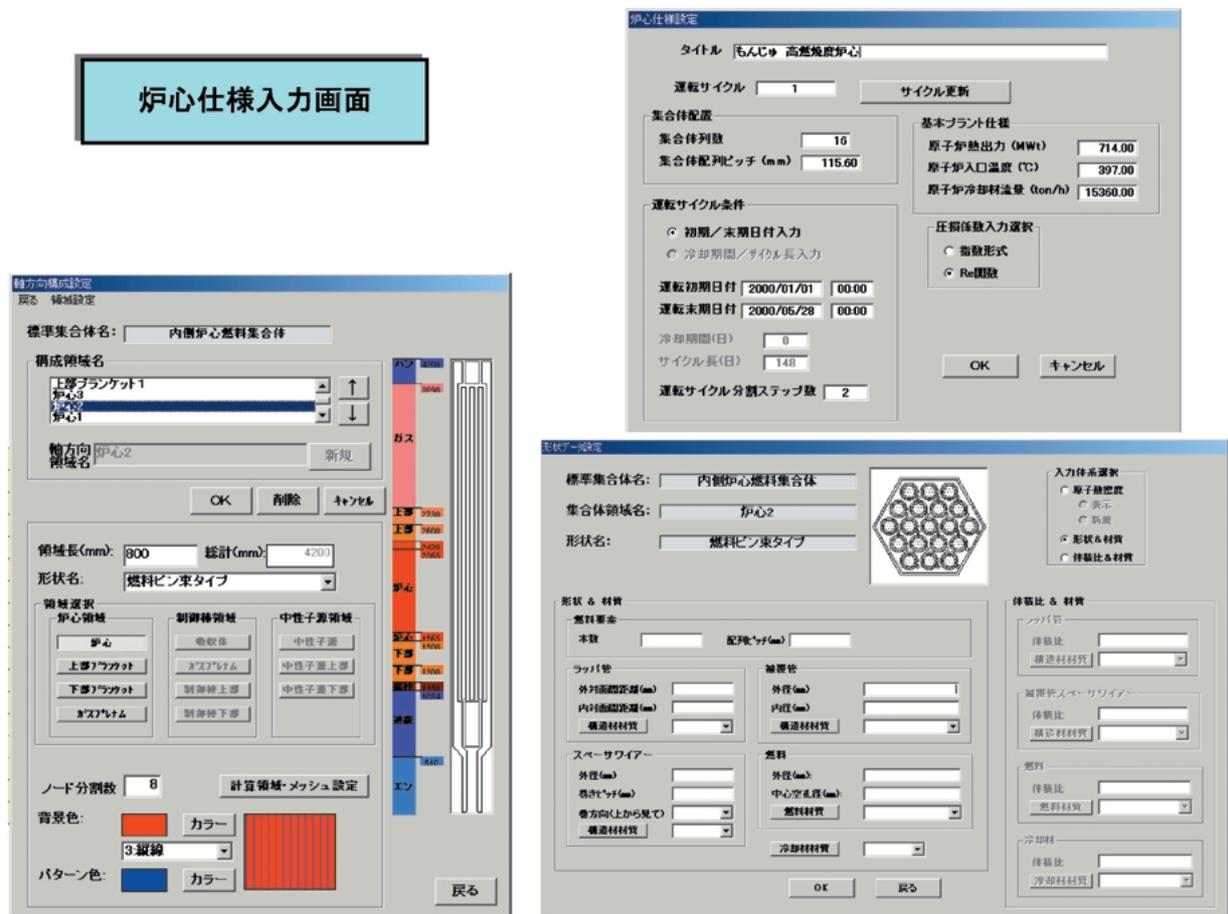


図3 プリプロセッサによる入力画面例

なお、MEISTERでは現行「もんじゅ」炉心の炉心仕様がデフォルト値として内蔵されており、現行「もんじゅ」炉心の解析を実施する場合、ユーザが手を加えることはほとんどない。

これらの機能により、これまで煩雑であった解析計算作業の効率を大幅に向上させている。

3.4 ポストプロセッサ

ポストプロセッサによる解析結果の基本的表示方法としては、これも対話型GUIを活用し、各種データについてユーザの指定する任意の径方向分布、軸方向分布などを簡便に可視化できるようにしている。

ポストプロセッサによる解析結果可視化表示例として、核特性解析結果の出力分布表示画面例を図4に、炉心湾曲計算結果の表示画面例を図5に示す。

図4に示すように、本ポストプロセッサを利用することで、全炉心内水平断面の分布や集合体内のメッシュごとの出力分布（本図は集合体内を24メッシュに分割した場合の例）軸方向の分布を図形表示させることができる。また、図5に示すように、ユーザの指定する任意の範囲を拡大表示することも可能であり、解析結果がより理解し易くなるよう工夫している。このように、様々な解析結果をユーザが逐一マニュアルを参照せずとも、パソコン画面上の視覚的なガイダンスにしたがってユーザがメニューから選択するなど、容易に可視化表示できる機能を持たせ、解析結果の迅速な把握と分析が可能となるようにしている。

3.5 計算実行支援

計算実行支援モジュールは前述のように、計算コードの入出力ファイルの割り当てや計算コード間のデータの受け渡しを対話型画面で制御するものであり、これにより一連の炉心特性解析を効率良く実施できる。

計算実行支援モジュールによる計算実行画面の例を図6に示す。

図中に示すように、解析に使用する各種計算コードの実行順、各計算コード間のデータ授受は、基本的には本モジュールにより自動的に設定され、かつ実行される。

ただし、ユーザが別途指定することもでき、コード名、入出力ファイルを対話型GUIにより容易に

指定できる。一連の解析計算は自動的に実行することができるだけでなく、あらかじめ指定された途中段階まで、あるいは途中段階からの実行も可能である。また、途中段階であるか否かに関わらず、既往の計算結果を初期条件として指定できるリスタート機能を備えている。更に、計算の実行は、開始時間の指定により自動的に開始するオプションも有する。また、本モジュールの機能により、入出力ファイルの指定や実行する計算コード群の範囲を指定することができる。すなわち、一連の解析計算コード群の中から、例えば核特性計算部分のみなど、ユーザの必要な範囲を任意に指定することができるようにしている。

これらにより、連続した運転サイクルを模擬した一連の解析計算を効率良く実行することができるようにしている。

4. 解析モデル

核特性解析計算、熱流力特性解析計算、炉心構成要素強度特性解析計算には、それぞれ、近年のパソコンの飛躍的なデータ処理能力向上を踏まえ、実用上可能な限り詳細なモデルを採用している。これら解析モデルについて以下に示す。

4.1 核特性解析モデル

一連の炉心特性解析では、まず核特性評価がその基本となる。

MEISTERシステムで解析可能な炉心核特性を表2に示す。

表中に示すように、MEISTERシステムでは、基本的炉心核特性値である実効増倍率に基づく最大過剰反応度、出力分布及び燃焼特性、各種反応度及び反応度係数、制御棒反応度収支にかかわる特性値（制御棒価値や出力補償反応度等）などが解析できる。これらの炉心核特性解析計算においては、燃料交換パターンや制御棒運用計画に応じた任意の運転サイクルを模擬することができる。すなわち、各運転サイクルにおける制御すべき反応度の評価、核燃料物質収支の評価などを可能としている。

核特性解析の基本的計算モデルと特徴を表3に示す。

表中に示すように、核特性解析の基本的解析モデルは3次元Tri-Z拡散・燃焼計算をベースとしており、集合体当たりのメッシュ分割や中性子エネ

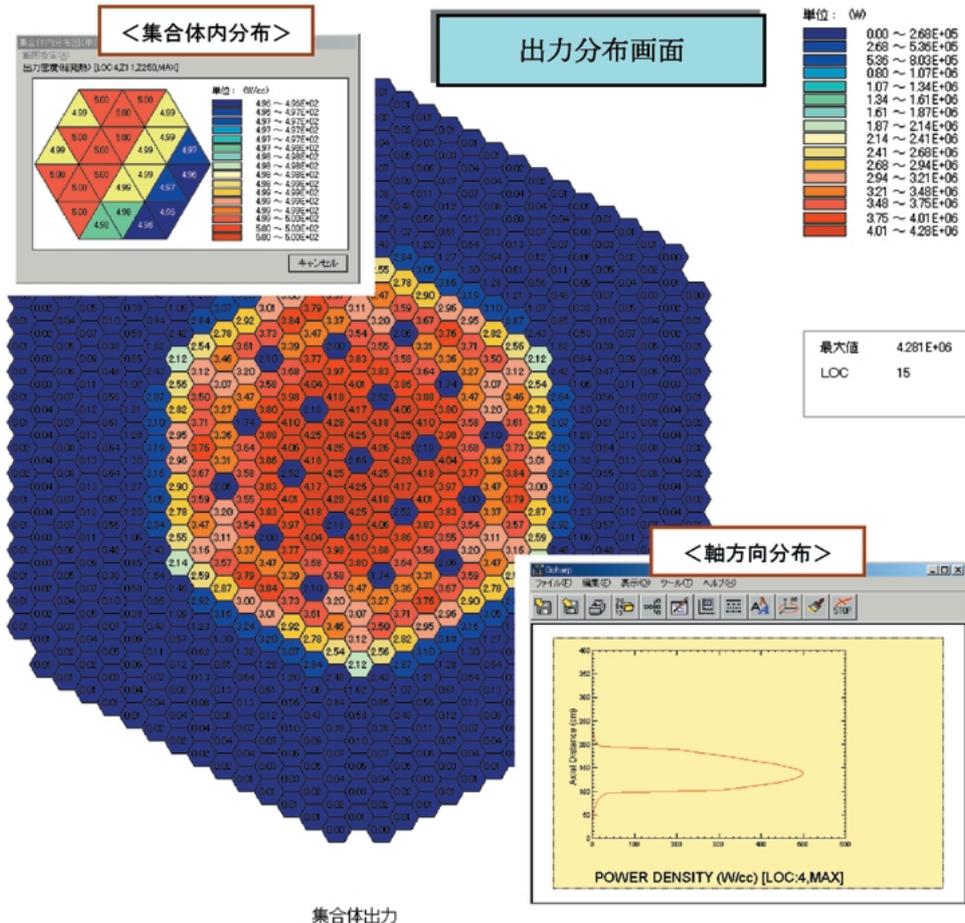


図4 ポストプロセッサによる可視化表示例(核計算結果)

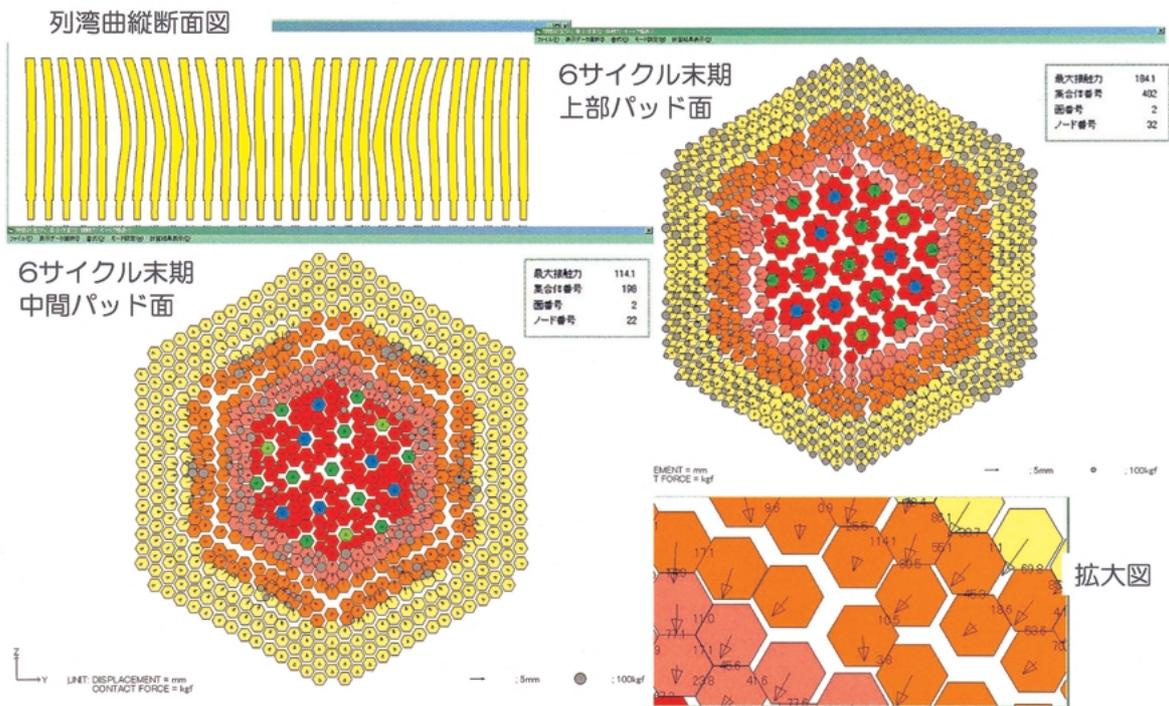


図5 ポストプロセッサによる可視化表示例(湾曲解析結果)

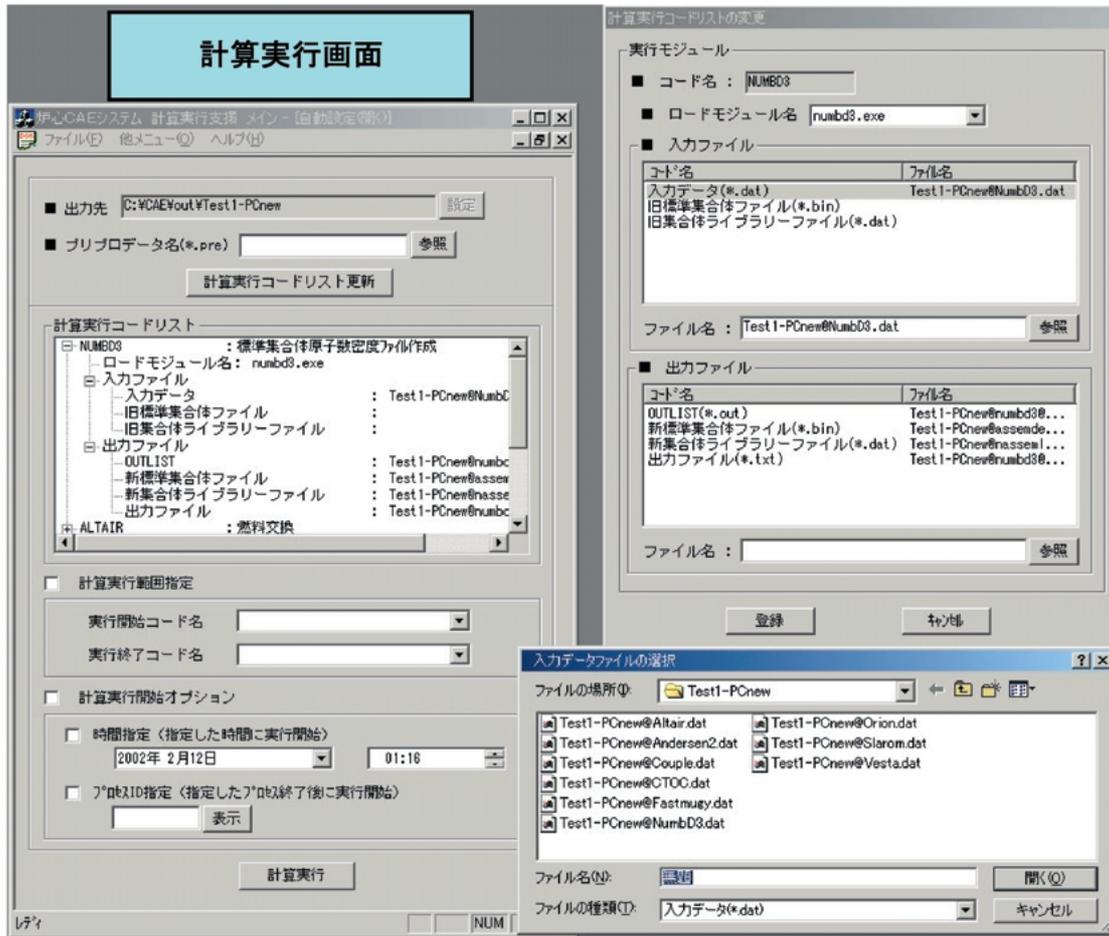


図 6 計算実行支援による計算実行画面例

表 2 MEISTER システムで解析可能な炉心核特性

解析項目	評価核特性項目
出力分布・燃焼特性解析	集合体出力分布(軸方向・径方向) 最大線出力 取出平均燃焼度, 取出最大燃焼度 炉心平均燃焼度 増殖比(増倍時間) 最大中性子束, 最大累積中性子照射量, 中性子スペクトル
反応度, 反応度係数解析	ナトリウムボイド反応度 ドブラー係数 形状係数(径方向, 軸方向) 密度係数(燃料, 構造材, 冷却材, 吸収体) 等温温度係数, 出力係数 動特性パラメータ(遅発中性子割合, 即発中性子寿命)
制御棒反応度収支解析	制御棒反応度値 最大反応度添加率 制御棒必要反応度値(出力補償, 燃焼補償など)

ルギ群数などについては, 集合体当たり24メッシュ, エネルギー群18群の従来に比べ詳細な分割を

内蔵オプションで選択可能としている。また, 燃焼チェーンについてもORIGENコード⁵⁾で採用されている詳細モデルを内蔵している。すなわち, 従来無視されることが多かった²³⁹Np等の短半減期核種や高次のMA核種等をすべて考慮した可能な限り厳密な扱いとしている(MA核種: UやPuに比べて組成比の少ないNp, Am, Cmなどのマイナーアクチニド核種のこと)。燃料集合体のセル非均質効果については, 従来から知られているラッパ管非均質効果と, ピン非均質効果の両方を考慮することができる⁶⁾(セル非均質効果: 燃料集合体内の燃料ピンやラッパ管などの微細構造を, 均質化してモデル化することによる計算上の近似誤差のこと)。計算は, まずピンセル体系での格子計算にて, ピン非均質効果を考慮した断面積を作成し, これを集合体セル体系でのピンバンドル部断面積として使用して, さらにラッパ管非均質を模擬した集合体セル格子計算で二重非均質効果を考慮に入れた断面積を作成する。これら一連の格

表3 核特性解析の基本的計算モデルと特徴

項目	内容	備考(特徴)
基本的計算モデル	3次元Tri z拡散・燃焼計算	
集合体当たりのメッシュ分割数	6~96メッシュ(24メッシュ標準)	従来6メッシュ以下が一般的
中性子エネルギー群数	1~18群(18群標準)	従来7群程度が一般的
セル非均質性モデル	従来の格子計算段階での非均質モデル,すなわち,燃料に対してはピンとラッパ管の二重非均質モデル,制御棒に対しては燃料とのスーパーセルによる非均質モデルに加え,新たな試みとして,体系非均質モデル(燃料集合体,制御棒)を導入	セル計算ではなく,体系計算で直接非均質性を模擬可能
少数群縮約計算モデル	2次元RZ拡散計算による70群中性子スペクトルにより縮約	体系モデルと縮約スペクトル領域の割当は自動的に生成可能
ガンマ線発熱量計算モデル	中性子拡散計算による反応率分布に基づいて,ガンマ線の線源分布計算を行い,7群拡散計算によりガンマ線束分布を計算	従来は別途補正するのが一般的
燃焼チェーン	ORIGENコードで採用されている詳細燃焼チェーンを内蔵 ²³⁹ Npの生成効果や原子炉停止中の ²⁴¹ Pu崩壊による ²⁴¹ Amの生成も考慮できるなど厳密な取扱い	従来 ²³⁹ Npの生成効果などは別途補正するのが一般的
¹⁰ Bの燃焼効果	制御棒吸収体の ¹⁰ Bの燃焼効果を直接計算で模擬	従来は別途補正するのが一般的

子計算は,本システム内蔵の計算オプションを選択することにより,自動的に実行できる。更に,体系計算で直接非均質性を模擬することも可能としている(本モデルの詳細については,別途後述する)。また,従来補正項として扱われることが通例であったガンマ発熱についても,これを直接計算で考慮している。更に,原子炉停止中の²⁴¹Pu崩壊効果や制御棒吸収材の¹⁰B燃焼効果等も補正によらず直接模擬している。

以上のように,本システムでは,実用上可能な限り近似を持ち込まない,詳細な解析モデルをオ

プションとして内蔵している。これにより,従来別途評価が必要であった各種補正の適用を,できるだけ省略できるようにしている。

4.2 熱流力特性解析モデル

MEISTERシステムで解析可能な熱流力特性と解析モデルを表4に示す。

表中に示すように,本システムによる熱流力特性解析としては,以上の核特性解析結果に基づき,炉内流量配分及び圧力損失,冷却材・被覆管・ペレットの最高温度並びに同温度履歴を計算するこ

表4 MEISTERシステムで解析可能な熱流力特性と解析モデル

解析項目	評価熱流力特性項目	内容
熱流力特性解析	炉内流量配分	「もんじゅ」炉心にて,運転サイクル初期から末期における,炉停止から定格出力までの任意の状態の計算が可能
	圧力損失	燃料集合体のバンドル部圧力損失係数については,もんじゅ設計評価式が内蔵されているが,燃料集合体の寸法・形状に基づき,内蔵されているRehmeの評価式 ⁷⁾ に基づき計算することも可能
	冷却材・被覆管・ペレットの最高温度並びに温度履歴	被覆管・ペレットの最高温度については工学的安全係数を考慮したホットスポット温度を計算可能
	燃料集合体内の冷却材流量・温度分布	ポーラス・ボディー・モデルにより全炉心を一括して全集合体につき計算(隣接集合体間の熱移動効果も考慮)周辺流れ係数,冷却材混合効果は,入力データで指定したものだけでなく,燃料集合体の寸法・形状から,内蔵のE.U. Khan等提唱の相関式 ⁸⁾ により自動的に計算可能
	燃料ペレット内温度分布	ペレットの再結晶を土井・桂川の3領域モデル ⁹⁾ により扱うことができる。また,「各再結晶領域半径は,定格出力時の温度により決定され,過出力時も再結晶の進行はない」とする現行設計と同様な保守的モデルを導入

とができる。

燃料集合体内の冷却材流量，温度分布については，従来のサブチャンネル・モデルと同等の解析精度を有するポーラス・ボディー・モデル^{8),10)}により，全炉心を一括して計算する。従来のサブチャンネル解析計算では，全炉心の集合体内温度分布を一括して計算することは，その計算時間を考えると，実用上困難であった。そのため，設計計算では被覆管最高温度や燃料最高温度は，全集合体内でも各流量領域内で集合体出力，あるいは，燃料線出力が最大となる燃料集合体について，集合体単位で実施するのが一般的であった（集合体出口温度分布は全炉心で計算）。これに対し，本システムでは，隣接集合体間の熱移動効果も考慮した温度分布を，全炉心一括して全集合体につき計算できるようにしている。

なお，これらの計算に使用する各種物性値・相関式は，現行「もんじゅ」炉心用の標準的推奨値¹¹⁾をオプションの一つとして内蔵している。また，それ以外の物性値や相関式も入力で指定することができる。

4.3 炉心構成要素強度特性解析モデル

MEISTERで解析可能な炉心構成要素強度特性と解析モデルを表5に示す。

表中に示すように，MEISTERの炉心構成要素強度特性解析では，核・熱特性解析で求められた中性子照射履歴や燃焼度分布，温度履歴などを境界条件として，最大応力やクリープ疲労累積損傷和，

熱膨張，スエリング，クリープ変形による燃料ピンバンドルとラッパ管の機械的相互作用量(BDI)やラッパ管とラッパ管の機械的相互作用量(DDI)，炉心湾曲などの燃料集合体機械強度健全性にかかわる評価計算一式を実行可能としている。

この内，炉心湾曲特性計算の解析モデルを図7に示す。炉心湾曲解析では，燃料集合体を始めとする炉心内の全炉心構成要素について，熱膨張及びスエリング・クリープによる各構成要素の変形量を評価し，それに基づいて各炉心構成要素間の相互作用を計算する。基本となるのは，ラッパ管を，それと等価な曲げ剛性を持つビームで模擬し，パッド部は，それと等価な圧縮剛性を持つバネでモデル化するビーム・バネ結合モデル¹²⁾である。この時，スペーサパッド部の隣接集合体間，並びにエントランスノズル上下端には，接触・分離を表す非線形有限要素(Joint要素)を配置することで，集合体間の相互作用を模擬している。しかも，パッド部の接触要素には，従来無視されてきた横方向の摩擦効果も考慮することができる。さらに，ラッパ管が流体内圧クリープにより膨らむ効果(Bulging Effect)も模擬可能である。これと湾曲変位効果の重量により，スペーサパッド部以外でラッパ管同士が接触する可能性がある場合には，入力で指定する任意の軸断面に，パッド面と同じく接触要素を配置することができる。

なお，接触非線形方程式を解く段階では，サブストラクチャー法による接点数の縮小を図ってい

表5 MEISTERシステムで解析可能な炉心構成要素強度特性と解析モデル

解析項目	評価炉心特性項目	内容	備考
燃料ピン機械強度特性解析	被覆管応力・歪み量 被覆管クリープ疲労累積損傷和 燃料ピンバンドルとラッパ管の機械的相互作用量(BDI) ラッパ管とラッパ管の機械的相互作用量(DDI)	核・熱特性解析で求められた中性子照射履歴や燃焼度分布，温度履歴などを境界条件として計算	
炉心湾曲特性解析	集合体間パッド部接触力 集合体応力・歪み量 集合体頂部変位量 集合体引抜き時残留頂部変位量 集合体クリープ等価歪み量 集合体ダクトスエリング歪み量	ラッパ管をそれと等価な曲げ剛性を持つビームで模擬し，パッド部はそれと等価な圧縮剛性を持つバネでモデル化するビーム・バネ結合モデルを採用(図7参照)	数値計算には，ニュートンラプソン法による非線形方程式を解く方法を採用し，計算時間を短縮
集合体引抜き力解析	集合体引抜き・挿入力 (2次引抜き力も解析可能)	燃料集合体は曲げ剛性が等価なビームでモデル化し，隣接集合体及び炉心支持構造物との間に非線形のギャップを配置(図8参照)	数値計算には，ニュートンラプソン法による非線形方程式を解く方法を採用し，計算時間を短縮

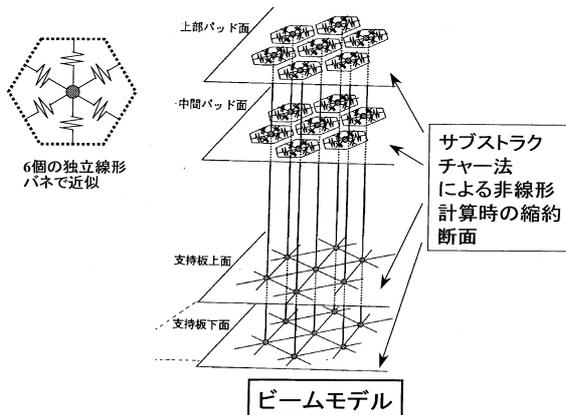


図7 炉心湾曲特性解析モデル

る。これにより、「もんじゅ」炉心の全炉心構成要素計715体から成る体系でも、実用的な計算時間の範囲内で計算が実行できるようにしている。

次に、燃料集合体引抜き力の計算モデルを図8に示す。ここでも炉心湾曲計算に同じく、燃料集合体は曲げ剛性が等価なビームでモデル化し、隣接集合体及び炉心支持構造物との間に非線形のギャップ要素を配置している。これにより、従来評価されることの少なかった2次引抜き力、すなわち、これら隣接構造物との相互作用による2次の抵抗力を評価できるようにしている。

以上のように、本システムでは、実用的な範囲内で、可能な限り厳密な解析のできる計算モデル

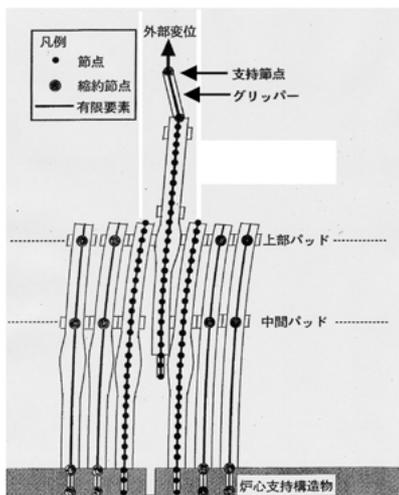


図8 燃料集合体引抜き、挿入時の計算モデル

を採用している。

5. 「もんじゅ」性能試験解析による検証

本章では、MEISTERの詳細解析計算機能の実機適用性を検証すべく、1993年10月より開始された「もんじゅ」炉物理性能試験を対象に、初臨界炉心の臨界性と制御棒価値増殖比及び出力分布特性（最大線出力）について解析を行った。

「もんじゅ」炉心の初臨界は、1994年4月5日に、炉心燃料168体（内側炉心燃料集合体108体、外側炉心燃料集合体60体）を装荷した時点において達成されている。また、1994年9月17日より、炉心燃料全数198体（内側炉心燃料集合体108体、外側炉心燃料集合体90体）を装荷した初装荷炉心において、制御棒価値測定が実施されている。また、1994年5月から同年10月にかけて、箔放射化法に基づく反応率分布測定が実施されている。さらに、この反応率測定データに基づき「もんじゅ」初期炉心の増殖比や出力分布などの炉心特性が評価されている。

各々の炉心配置を図9に示す。また、解析計算のフローを図10に示す。

解析には核データライブラリとして、既述のように、JENDL 3 2に基づく高速炉用炉定数セットJFS3 J3 2を使用した。

また、図中に示すように、まずセル計算による70群実効群定数作成では、前述のラッパ管と燃料ピンの二重非均質効果を考慮した。さらに、この群定数に基づき、2次元70群拡散計算を実施し（縮約用スペクトル計算）、これら群定数の18群へのエネルギー群縮約を行った。これより、最終的には「もんじゅ」全炉心715体を忠実に模擬した3次元18群集合体当たり24メッシュ拡散計算を実施した。なお、炉心燃料部の物質組成については、集合体1体ごとの物質組成を個別に模擬した。また、軸方向メッシュ分割は、中性子の平均自由行程を勘案して、炉心部で約50mmとした。更に、集合体の軸方向モデル化では、従来に比べより詳細に実機形状寸法を模擬したモデルを採用した。すなわち、集合体下端のエントランスノズルから同上端のハンドリングヘッドまでを、可能な限り忠実に模擬した。

5.1 初臨界炉心臨界性解析

「もんじゅ」炉心の初臨界は、模擬燃料集合体を

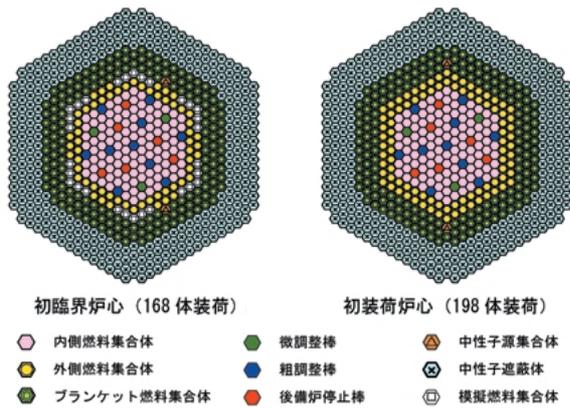


図9 集合体配置図

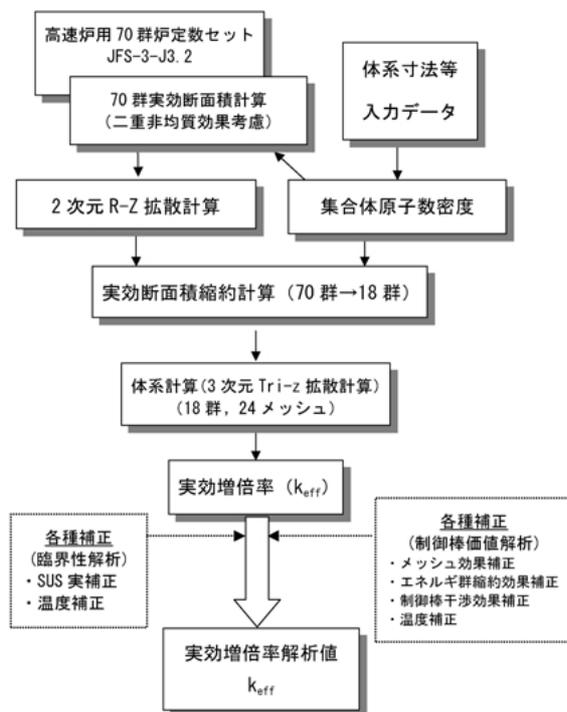


図10 解析のフロー

逐次炉心燃料集合体と置換することで達成された。今回の解析では、まずこの初臨界炉心を対象として、臨界性（実効増倍率）を解析した。

解析計算では、制御棒はすべて引き抜き状態と想定した。また、計算結果には、温度補正とSUS実組成補正を考慮した。温度補正とは、事前の想定温度と実際の測定時の体系温度の差異から生ずる密度・寸法の変化による影響を補正するものである。また、SUS実組成補正とは、構造材中の微量不純物元素の影響を補正するものである。

その結果、初臨界炉心の実効増倍率について、

計算値（C）と実測値（E）の比であるC/E値として、0.994が得られた。これは、従来評価されている各種補正済み評価値（ ~ 0.993 ）¹³⁾とほぼ同等の値となっている。一方、各種補正（エネルギー群縮約効果補正、メッシュ効果補正、輸送効果補正）を考慮した場合のC/E値は0.998とやや大きくなった（エネルギー群縮約効果：本来連続量である中性子エネルギーを少数群に離散化することによる近似誤差のこと、メッシュ効果：本来連続量である空間座標を空間メッシュに離散化することによる近似誤差のこと、輸送効果：本来解くべき中性子輸送方程式を拡散方程式で近似して解くことによる計算誤差のこと）。

本評価では、MEISTERが燃焼計算を念頭にミクロ断面積ベースの群定数を基本としていることもあって、拡散係数として等方拡散係数を用いている。そのため、軸方向へのストリーミング効果が考慮されず、また、拡散係数を縮約後のミクロ輸送断面積から改めて求めていることもあり、従来の各種補正済み評価値に比べやや大きくなったものと考えられる。また、計算時間も上記の条件で約1時間と、実用的な範囲内であった。

なお、上記補正済み計算値は、現状の解析手法としては最も厳密と考えられている連続エネルギーモンテカルロコードMVP¹⁴⁾による解析結果ともほぼ一致している（C/E値：0.997、標準偏差： $1 - 0.0001$ ）。

これより、基本的炉物理量である臨界性解析について、本システムの基本的適用性を確認した。なお、エネルギー群縮約効果やメッシュ効果、輸送効果などの各種補正に関しては、「もんじゅ」炉心設計計算書にある補正係数をMEISTERのデフォルトとして内蔵しており、基準計算で採用したモデルに応じて、入力で変更することも可能としている。これら補正については、厳密には従来から行われているように、それぞれサーベイ計算により別途評価する必要がある。しかし、これら各種補正量が、性能試験時の炉心と解析対象とした炉心とで大きく違わない、とする外挿性近似を仮定すると、これら補正を考慮しない基準計算値によっても概略評価は可能と考える。すなわち、各種補正量を含むC/E値の外挿性近似を仮定すれば、基準計算値にE/C補正を適用するだけで、各種補正済み相当の概略評価値を直接得ることができる（E/C補正：計算結果に前述のC/E値の逆数

を掛けること、ただし、この場合のC/E値としては、各種補正をしない基準計算値ベースのC/E値を使用する。この方法は、理論的厳密性には欠ける面もあるが、概略評価値を簡便に得ることができ、実用的には有効なものと考えられる（厳密には、上記外挿性近似の成立性につき検討が必要）。

これより、以上の実機適用性検討では、これら各種補正を考慮しない基準計算値も検討対象とした。MEISTERは、このE/C補正値を自動計算して表示する機能も内蔵している。なお、将来の構想としては、補正量評価の自動実行ルーチンを機能として内蔵するという方策も考えられる。

5.2 制御棒価値解析

制御棒価値に関しても、前記炉物理性能試験における制御棒価値測定を対象に、MEISTERによる解析評価を行った。

MEISTERでは、制御棒体系非均質モデルとして24メッシュ以上の詳細モデルをオプションで選択可能となっている。これは、これまでのように入力データを手作業で作成する方法では、作業量が膨大・煩雑となることから実用的ではなかったが、MEISTERでは、各種計算コードの入力データを統一的・自動的に作成し、コード間のデータ授受も自動的に実行することが可能となっており（例：格子計算から体系計算など）制御棒体系非均質モデルの適用も実用的な範囲で解析可能となっている。ここでは体系非均質モデルの適用性について検証する。

解析計算では、制御棒全引抜き状態と全挿入状態の反応度差を、制御棒価値として求めた。制御棒の非均質効果については、これも既述のように、体系計算にて直接非均質性を模擬するモデル（体系非均質モデル）にて考慮した。MEISTERでは制御棒の非均質性を、従来のスーパーセルモデルにて断面作成時に考慮するか、体系非均質モデルにて体系計算時に直接考慮するか、をオプションで選択できるようにしている。

体系非均質モデルの概念を図11に示す。

図中に示すように、体系非均質モデルとは、格子計算ではなく体系計算において、集合体セル内の最外周メッシュ領域に制御棒保護管より外側の物質（保護管を含む）を配置し、その内側のメッシュ領域に保護管より内側の物質（中性子吸収材を含む）を配置するモデルである。なお、集合体

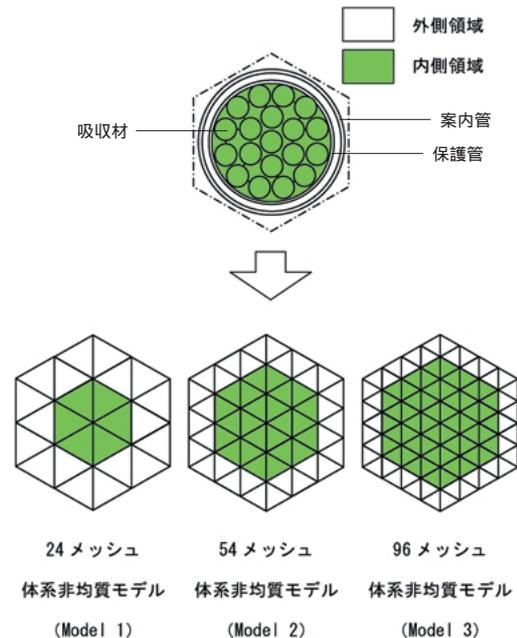


図11 体系非均質モデルの概要

当たりのメッシュ分割としては、24メッシュ、54メッシュ、96メッシュの3種類のメッシュ分割を、任意に選択できるようにしている。

今回の解析では、基準計算として集合体当たり24メッシュ分割の体系非均質モデルを適用した。なお、体系非均質モデルの各領域に使用する実効断面積としては、均質セルモデルによる格子計算で作成したものを使用した。ただし、この方法では、実効断面積への非均質効果が考慮されないため、この点はさらに、検討を継続していきたい。解析対象とした制御棒は、炉心配置の1/3対称性を考慮し、制御棒全19本の内、粗調整棒(CCR)4本、微調整棒(FCR)1本、後備炉停止棒(BCR)2本の合計7本である。基準解析値にかかわる補正値としては、温度補正、制御棒干渉効果補正を考慮した。

なお、実際の計算では、体系非均質モデルの24メッシュモデル、54メッシュモデル、96メッシュモデルのそれぞれにつき、格子計算・断面作成からその縮約、体系のモデル化と断面積、原子数密度などのメッシュごとの割り当てまでが本システムの中で自動的に処理され、実行できる。今回は、この機能を利用した。また、各種補正（メッシュ効果補正、エネルギー群縮約効果補正、制御棒干渉効果補正、温度補正）は別途サーベイ計算によって求めた値を使用した。

解析計算の結果を図12に示す。また、体系非均質モデルの比較計算の結果を図13に示す。

これらの結果より、基準とした集合体当たり24メッシュ分割の体系非均質モデル計算では、おおむねC/E値が約0.95となり、測定誤差の範囲内で実測値とほぼ一致することが明らかとなった。

また、今回集合体当たりメッシュ分割数をパラメータとした3種類の制御棒体系非均質モデルの中では、未補正基準解析値のModel 1 (24メッシュ)、補正済評価値のModel 2 (54メッシュ)の結果が測定誤差の範囲内で実測値と一致した。各種補正を考慮すると、Model 2 (54メッシュ)、Model 3 (96メッシュ)とも測定誤差範囲内にあるが、Model 2 (54メッシュ)が最も実測値との一致が良好であった。これは、図11に示すように、Model 3 (96メッシュ)に比べModel 2 (54メッシュ)の方が制御棒非均質形状の模擬性が良いためと考えられる。ただし、今回基準計算とした

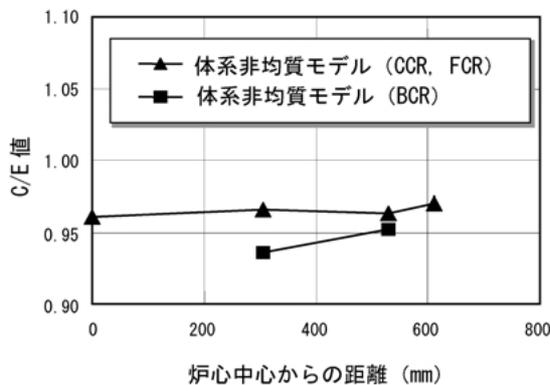


図12 制御棒価値解析結果

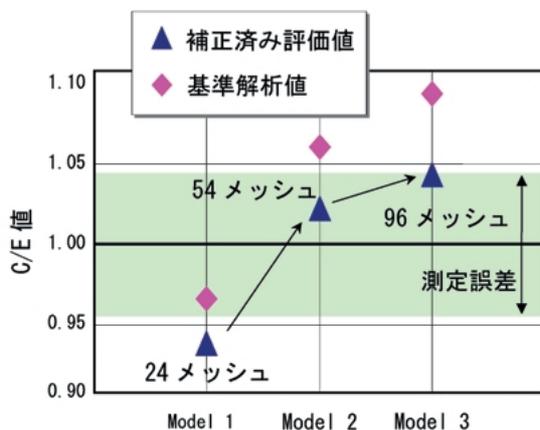


図13 体系非均質モデル解析結果

Model 1 (24メッシュ)でも、各種補正を考慮しないとすると、実測値との良好な一致が得られることが判明した。この点、厳密な評価を行うには各種補正量をそれぞれ評価する必要があるが、前述の外挿性近似を仮定すれば、基準計算とE/C補正だけで概略評価が可能となる。将来の「もんじゅ」利用計画を概略検討するような概念検討の段階などでは、必ずしも常に厳密な評価が要求される訳ではないので、MEISTERを利用した直接計算により、実用上は広範な概略検討が効率的に実行できるものと期待できる。したがって、今回の解析評価では解析条件にかかわる各種補正を考慮しない結果についても評価を行った。

いずれにせよ、従来、制御棒のセル非均質効果については、断面積作成時にスーパーセルモデルにて均質化断面積を作成し、別途均質化断面積補正を実施するのが通例であった。これに対し、今回の計算結果によれば、体系計算により制御棒非均質効果を、補正によらず直接計算で模擬できる見通しが得られた。

これらのことから、制御棒価値解析についても、本システムの基本的適用性を確認することができた。また、計算時間は集合体当たりメッシュ分割数によって変わるが、基準計算の集合体当たり24メッシュの条件では、1ケース1時間程度であり、実用面でも問題ないことを確認した。

なお、体系非均質モデルに関しては、Model 1 (24メッシュ)の解析で一部実測値と若干の乖離が見られる。これは、各種補正の相殺効果による可能性が高い。例えば、前述のように、体系非均質モデルの各領域に使用する実効断面積作成方法には検討の余地がある。この点は、今後とも検討していきたい。

その一環として、ここでも前述の連続エネルギーモンテカルロコードMVP¹⁴⁾を使用した解析計算を実施した。本解析では、炉心中心の粗調整棒の制御棒価値を対象とし、体系の寸法形状等は可能な限り実体系を忠実に模擬した。なお、モンテカルロ法による解析評価では、一般に統計誤差が問題となるが、評価対象が制御棒一本分の反応度価値という微小な反応度差であることにかんがみ、1億ヒストリーのモンテカルロシミュレーションを実施した。

その結果、MVPコードによる中心制御棒の制御棒価値のC/E値は0.964 (標準偏差: $1\sigma = 0.009$)

となり、MEISTERでの未補正基準解析値であるModel 1(24メッシュ)による解析結果と1%以内の差で一致した。このことは、各種補正量が互いに相殺されているにせよ、MEISTERの解析結果が解析計算上の厳密解にほぼ一致することを意味しており、その基本的適用性を確認することができた。

5.3 反応率分布に基づく出力分布特性解析

「もんじゅ」炉物理性能試験の反応率分布測定に基づく増殖比や出力分布特性評価を対象に、MEISTERによる「もんじゅ」初装荷炉心初期の集合体最大線出力の評価を行った。

解析計算における制御棒挿入深度は、測定時の均等挿入状態(CCR, FCRは均等挿入, BCRは全引抜き)を模擬した。

その結果、初装荷炉心初期の増殖比は、測定評価値(JENDL 3.2ベース)⁵⁾の1.18₈に対し、MEISTERによる解析値は1.19₈となり、1%以下の差異で一致した。

なお、「もんじゅ」炉心の増殖比については、上記測定評価値とは別に、測定データをより直接的に利用したスペクトルインデックス法による半実験式的評価値⁶⁾も提示されている。それによると、同増殖比は、従来手法のJENDL 3.2ライブラリによる評価値に比べ、約3%程度大きくなることが示されている。ただし、両者の差異は、主として半径方向ブランケット領域における増殖比の違いに起因しており、この点は以上のような従来解析手法に共通の検討課題である。したがって、今回の解析結果については、従来手法ベースでの評価値との比較により、その適用性を検証できると考える。

また、「もんじゅ」初装荷炉心初期の集合体最大線出力については、測定評価値(JENDL 3.2ベース)⁵⁾の内側炉心燃料集合体330W/cm、外側炉心燃料集合体334W/cmに対し、MEISTERによる解析値は内側炉心燃料集合体327W/cm、外側炉心燃料集合体334W/cmであり、こちらも1%以下の差異で一致した。

以上のことから、MEISTERは基本的な炉物理量である臨界性だけでなく、局所的特性である出力分布等についても、適用性のあることを確認した。

6. おわりに

当国際技術センターでは、将来の「もんじゅ」炉心のより効率的な運用や高速増殖炉実用化に向けた有効活用に資するべく、その炉心特性をより精確で迅速に、かつ簡便で効率的に解析評価できるパソコン版対話型もんじゅ炉心特性解析システムMEISTERの開発・整備を進めている。

本システムは、可能な限りユーザ・フレンドリなシステムとすべくPC上に構築している。また、GUIを用いたプリプロセッサやポストプロセッサ機能により、入力データの作成や解析結果の表示などを、視覚的、かつ統一的に行うことができるようにしている。すなわち、解析計算だけのために専門家に過度な負担を課すことのない効率的システムとして確立することを目指している。これにより、炉心特性解析作業の大幅な効率化を図り、将来の炉心概念の検討や炉心移行計画の具体化、あるいは炉心運用計画の検討策定などを、簡便かつ迅速に実施できるようにしようとしている。

その一環として、本MEISTERシステムを「もんじゅ」性能試験解析に適用して検証した。その結果、本システムで採用した、従来より詳細な核特性計算モデルでも、最新のパソコンによれば、実用的な範囲内の計算時間で効率良く解析計算が実行できることが確認できた。また、解析精度についても、ほぼ満足すべき精度の得られることが判明した。しかも特筆すべきは、これらの結果が別途補正を施さずとも、直接計算により得られたことである。これは、各種補正効果の相殺による可能性が高いが、同時に、詳細解析モデルを採用することにより補正量自体が低減され、補正計算が省略できる可能性を示唆している。この点は、本来ならサーベイ計算により、各種補正量をそれぞれ厳密に評価して適用する必要がある。ただし、前述のように、各種補正量の外挿性近似を前提とすれば、実用的には基準計算とE/C補正だけの評価でも、概略評価は可能と考える。今回の結果により、この点の適用性に見通しが得られた点は、実用的には意味があるものと考えられる。

7. 今後の展開

現状、MEISTERは基本的部分が完成した段階にあり、炉心設計解析技術全般を包含するには更に追加すべき機能がある。主な今後の課題としては、以下のような機能追加が考えられる。

(1) 燃料ピンバンドルの変形湾曲解析計算や、炉物理特性計算における輸送計算、摂動計算、あるいは崩壊熱計算などの機能追加

(2) 取替燃料のPu富化度や運転中の制御棒挿入深度の自動調整機能などの追加 (Pu富化度調整: 運転サイクル末期の実効増倍率が、現行設計と同様に運転余裕やバイト分に相当する所要の過剰反応度を考慮して丁度臨界となるように、取替燃料のPu富化度を調整すること、制御棒挿入深度調整: 運転中の制御棒挿入深度が、同様に運転余裕やバイト分相当の過剰反応度を考慮して丁度臨界となるように、制御棒の挿入深度を調整すること)。

(3) 各種補正量自動計算機能の追加など

今後とも、システムの機能充実・高度化を図り、より汎用性と自由度のあるシステムとして完成させたい。

また、MEISTERは、冒頭にも述べたように、単なる効率的解析システムというだけでなく、過去30年間にわたり開発されてきた高速炉炉心解析技術の技術継承にも利用し得る発展的システムとすることを目指している。この点は、炉心解析技術に関連する各種ノウハウやデータベースを、本システムにリンクさせることで実現できる可能性がある。今後ともその可能性を追究していきたい。

本システムの紹介は以上であるが、今回の「もんじゅ」炉物理試験解析に際しては、同試験に関係された多くの方々から詳細データなどにつきご協力を頂いた。本誌上をお借りして、改めて感謝の意を表したい。

参考文献

- 1) 鈎孝幸, 佐藤和二郎, 他: “高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究の概要”, サイクル機構技報 No.12 別冊12別冊-1, JNC TN1340 2001 008(2001).
- 2) 高野秀機, 他: “速中性子エネルギー領域群定数作成

コードシステム:TIMS PGG”, JAERI M82 072 (1984).

- 3) H.Takano, Y.Ishiguro: “Production and Benchmark Tests of Fast Reactor Group Constant Set JFS-3-J2”, JAERI M82 135(1982).
- 4) 石川真, 沼田一幸, 他: “高速炉用統合炉定数ADJ2000の作成”, JNC TN9400 2001-071(2001).
- 5) “ORIGEN2.1 Isotope Generation Depletion Code, Matrix Exponential Method”, Radiation Shielding Information Center CCC 371(1991).
- 6) T.Takeda, H.Unesaki, “Evaluation of Neutron Streaming in Fast Breeder Reactor Fuel Subassembly by Double Heterogeneous Modeling”, Nucl. Sci. Eng., 101, 179 184 (1989).
- 7) Rehme K: “Pressure Drop Correlation for Fuel Element Spacer”, Nucl. Tech. 17,15(1973).
- 8) E. U. Khan, W. M. Rohsenow, et al.: “A Porous Body Model for Predicting Temperature Distribution in Wire Wrapped Fuel Rod Assemblies”, Nucl. Eng. and Des., Vol.35, (1975).
- 9) 動力炉・核燃料開発事業団: “設計及び工事の方法の認可申請書(第五回申請)”, 添付書類 熱出力計算書 (1997).
- 10) 堀雅夫監修: “基礎高速炉工学”, 日刊工業新聞社, p.88 (1993).
- 11) 動力炉・核燃料開発事業団: “高速増殖原型炉「もんじゅ」発電所 原子炉設置許可申請書”, 添付書類 (八) (1980).
- 12) M.Nakagawa al.: “Development of the core bowing reactivity analysis code system ATLAS and its application to a large FBR core”, Nucl. Eng. And Design, Vol.157, pp.15 26(1995).
- 13) 板垣善彦, 鈴木隆之, 他: “JENDL 3.2によるもんじゅ臨界性解析”, 日本原子力学会「1996秋の大会」予稿集, A53, p.237(1996).
- 14) 森貴正, 中川正幸: “MVP/GMVP 連続エネルギー法および多群法に基づく汎用中性子・光子輸送計算モンテカルロコード”, JAERI Code/Data 94-007,(1994).
- 15) S.Usami, Z.Suzuoki, et al.: “REACTION RATE DISTRIBUTION MEASUREMENT AND THE CORE PERFORMANCE EVALUATION IN THE PROTOTYPE FBR MONJU”, icone9(2001).
- 16) 西裕士, 山岡光明: “高速増殖炉「もんじゅ」の増殖性能評価”, サイクル機構技報, No.4, pp.65-74(1999).