

軽水炉燃料ふるまい解析コードFEMAXI-6の開発 Development of LWR Fuel Performance Code FEMAXI-6

日本原子力研究開発機構 安全研究センター
燃料安全評価研究グループ

鈴木 元衛

軽水炉燃料ふるまい解析コードFEMAXI-6は、30年以前に原型が開発され、その後多くの人の努力によって機能が向上された、日本の代表的燃料解析コードである。

FEMAXIコードは、燃料ふるまいを構成する多くの現象とその相互作用をモデル化することにより、燃料ふるまいの定量的評価や予測を可能にする。FEMAXIコードの目的は、実験解析のみならず、安全解析、事故直前状態の予測、モデル評価など多岐にわたり、モデルは燃料の熱的、力学的変化を特徴づける現象に対応している。本論では、燃料コードが必要とされる背景と、FEMAXIコードにおけるモデルの持つ意義と性格についてのべ、いくつかの具体的な解析例を説明する。さらにコードの今後の課題と展望を述べる。

1. はじめに

燃料ふるまい解析コードFEMAXI-6の最初のバージョンFEMAXIは市川によって30年以上前に開発された¹⁾。それ以来、多くの人の尽力によって機能が向上・拡張され、世界的にも知名度の高い、日本の代表的な燃料ふるまい解析コードとなっている^{2),3)}。本稿では、まず燃料コードの一般論をやや相対化した視点から論じ、そののちにFEMAXIコードの開発の歴史、背景、設計思想、モデルの特徴、今後の展望などを端的に紹介する。

2. 軽水炉燃料ふるまいの特徴と解析コード

燃料棒は、炉心において放射性物質が桁違いの濃度で集積している物体である。その熱的、力学的ふるまいは、温度、中性子flux、核分裂(発熱)、核分裂生成物(FP)蓄積など原子論的ミクロレベルの現象から工学的に操作可能なマクロスケールの現象にまたがる多くの要因の複雑な相互作用の結果である。ま

た、燃料集合体は、プラントの運転においては設計燃焼度(寿命末期)まで被覆管の健全性を保って放射性物質を閉じこめつつ設計出力を維持するという、安全性と発電効率の二つの要求を同時にかなえねばならない。この実現には、経験をふまえた多くの技術開発と研究努力が必要である。ここに、燃料ふるまいを工学研究・安全性研究の対象にする根本的な理由がある。

一方、燃料ふるまいが複雑な相互作用の結果であることは、実際の照射経験が大きな意味を持つ世界であることを意味する。すなわち、理論的・決定論的モデルで予測できない部分が大きく、炉物理のような理論モデルに乗らない、数式・物理的理論式では明確に定義されない性質や、冶金学的構造敏感性、製造履歴依存性、その他の不明要因がある世界である。また、多くの要因がからむため単純な計算では各要因の全体ふるまいへの寄与を評価するのが困難である。したがって設計や

ふるまい把握にとっては照射経験が不可欠な要素となる。

しかし、燃料棒の照射(照射試験と照射後試験)は一般に大きな費用と長時間を要し、データの質と量は限られる。燃料棒の内部に関する欲しいデータがすべて得られるわけではなく、ある特定の計測可能な物理量、それも、間接的に計測した物理量に依存して燃料ふるまいの全体を把握しなければならない場合がある。

こうした状況では、燃料解析コードによっていわば「逆問題」を解いて、燃料内部の要素の連関構造を認識・再現し、ふるまいを制御するパラメータを把握し、ふるまい予測を行うことが重要な手段となる。燃料解析コード FEMAXIは、このための工学ツールである。すなわち、燃料コードの開発とは、限られた照射データや照射経験に基づき、燃料ふるまいを構成する個々の要素間の相互作用の構造のモデルを、逆問題を解く手段として構築し、予測能力の検証を行うプロセスのことである。

【注】「燃料ふるまい」より「燃料挙動」という言葉を好む人もいる。

しかし、「ふるまい」は、故・三島良績名誉教授(東大原子力工学科)ご提案以来、旧日本原子力研究所(原研)OBの市川達生氏をはじめとする多くの燃料研究者に使われてきた緒正しきやまとことばであり、orthodox technical termである。

3. モデルとは何か

コードは解析対象の個々の現象に対応したモデルをその構成要素とする。ところでモデルとは何であろうか。ここで、モデル開発の目的は現象を正確に模写することであると答えたとしたら不十分である。なぜなら、「では、なぜ正確に模写しなければならないのか、

あるいはその場合の正確さとはどの様なものか」に答えていないからである。そもそも、対象に関する知識が十分でない状況においてモデル開発が行われるのであるから、正確にと言っても、半分は無い物ねだりになる。

モデルは現実の近似であり、現実の観念的な、しかしある程度以上の定量性を帯びた反映であるからこそモデルなのである。したがってモデル開発の意義は、以下のように段階を経て高度化していく。

- ①まず第一に、モデルを通して現象を見ると、現象がどう見えてくるか、何が見えてくるかという、現象のメカニズムに関する洞察を与える手段として重要な段階。
- ②モデルをコードに組み込んで計算を実行することにより、現象の背後の機構が浮かび上がってくる。解明手段としての性格を帯びる段階。
- ③モデルを動かすことによる予測手段としての性格、逆問題を解く手段として利用できる段階。

しかし、あくまで①の、観念への反映と、観念から独立した現実との相互媒介による洞察の深化こそがモデルの本質役割である。

4. FEMAXI開発の歴史

FEMAXIの最新バージョンまでの開発の歴史をごく簡単に振り返ってみる(敬称略)。ただし、細部まで事実をきちんとトレースしたわけではないので、多少曖昧な部分も含まれている。特徴的なことは、FEMAXI-6に至るまで、多くの人が関わり、多くの人の知恵と努力と経験が集積されたコードであることである。いわば、日本の燃料関係の技術者研究者の知恵を結集したベースに立つコードと言ってよい。

- (1) FEMAXI-I 市川がHalden Projectにおいて開発。二次元弾塑性PCMI解

析。(1974)

- (2) FEMAXI-II 木下(電中研)がクリープモデルを付加。(1977)
- (3) FEMAXI-III 原研、大学、日立東芝NFD、電中研、CRCが大規模に共同開発、日本原子力学会技術賞、国際ベンチマークで優秀な成績。→NEA-Data Bankへ公開。(1984)
- (4) FEMAXI-IV 中島らが改良→NUPEC((財)原子力発電技術機構)で利用。→鈴木が引き継ぎ、Ver. 2 開発。→NEA-DataBankへ公開。(1996)
- (5) FEMAXI-V 鈴木らが高燃焼度用へ改良。(2001) →NUPEC, NEA-Data Bank。
- (6) FEMAXI-6 鈴木らが更なる改良、高度化。→JNES((独)原子力安全基盤機構)、NEA-DataBank。超高燃焼水冷却高速炉燃料用バージョンも開発。(2003-)

5. FEMAXIコードの利用

最新バージョンFEMAXI-6は、高燃焼度燃料の通常運転・異常過渡時ふるまい(事故時ふるまいを除く)を照射初期から末期まで解析するコードである。その利用目的は以下のようにまとめられる。

①安全審査

JNESにおいて用いられている燃料安全審査用クロスチェックコードの主要部分はFEMAXI-6と同一である。

②公開

コードパッケージ(ソース及び詳細マニュアル)をRISTを通じて国内ユーザー(主に電力、大学、電中研)へ公開している。また日本の代表的燃料コードとしてNEA(The Nuclear Energy Agency, OECD)Data Bankに登録され、海外ユーザーへ無償公開されている。旧バージョンFEMAXI-VIおよび

FEMAXI-VもNEA Data Bankから海外ユーザーへ配布されているが、その総数は30件以上である。外部ユーザーを積極的に得て、問い合わせにもできる限り答えている。日本の燃料コードのDe-facto-Standard(事実上の標準)となっている。

③実験解析の手段、実験計画における予測tool、ふるまい理解のtraining tool

照射試験データの解析や、照射済み燃料で事故模擬実験を行った場合の解析における事故直前状態の解析などに用いられる。また照射試験の立案や、燃料設計の妥当性を評価する予測toolとして利用できる。さらに、燃料ふるまいを理解するために、様々な入力条件を与えてsimulationをすることにより、training toolとしても利用できる。

④照射データ・新モデルを評価するプラットフォーム

新たに得られた照射データや物性値は、それ自体では燃料のふるまい変化や性能向上にどの程度寄与しているかはっきり判断できない。しかしそれをコードに組み込み、モデル化されている多くの要因の相互作用の中に投げ込んでsimulationをすることにより、燃料ふるまい全体への寄与がより定量的に評価できる。FEMAXIコードはこうした目的のためのplatformとしての機能を果たす。

6. FEMAXI-6のモデル

6.1 燃料モデリングとは何か

燃料モデリングについては、発熱・熱伝導・冷却、FPガス放出、PCMI(Pellet-Clad Mechanical Interaction;ペレット被覆管機械的相互作用)等、ふるまいを規定する主要な現象の個々のモデル化という意味で論じられることが普通である。しかし、高燃焼度燃料のふるまいでは要因間の相互作用が強くなるので、個々の現象のモデル化と同時に、それら

を統合する連関構造もモデリングの対象といえる。つまり、個々のモデルの連関構造自体がコード設計で必要となる。これは、要素間の相互作用をどこまで意識的にモデル化するか、を意味する。

たとえば、温度計算と力学計算の連成、FPガスバブル成長と変形(スエリング)計算・熱伝導率低下との連関をどう扱うか、などである。ただし連関構造自体は、最初から複雑にはできないので、簡易的な仮定やモデルから出発する。たとえばガスバブルによるポロシティ増加はペレットの熱伝導率低下に追加的な効果を持たせるが、機械的性質とは無関係とする、などである。

一方、核計算は熱・力学ふるまいとの相互作用が弱いので、相対的に独立させることが可能である。すなわち、ペレット半径方向の発熱密度プロファイルや、線出力レベルに対応した高速中性子束レベルなどは、燃焼計算コードの出力を利用する。この意味で、FEMAXI-6に結果を与える燃焼計算コード^{4),5)}は重要である。

6.2 FEMAXIモデルの特徴

FEMAXIコードのモデルの特徴は、以下のようによまとめられる。

- ①解析対象を1本の燃料棒とその周囲の冷却材に限定し、集合体内の燃料棒間および炉心全体との熱的・力学的・核的相互作用からは切り離して考える。
- ②モデル設計においては、工学toolとしての性能、すなわちふるまいの予測性能を最優先目標とする立場に立つ。したがって、この意味で、個々のモデルを物理的な考察・原理に基づかせることを優先課題とはしない。機構論的モデルと経験モデルを組み合わせているが、機構論モデルが設計できない場合は経験モデルから出発する。
- ③計算速度向上を求めているが、炉心内の多数の燃料棒に関する統計的解析を目的とした短時間計算のためのモデル上の工夫については、低い優先順位を与える。

6.3 モデルの説明

図1に示すように、1本の燃料棒は軸方向

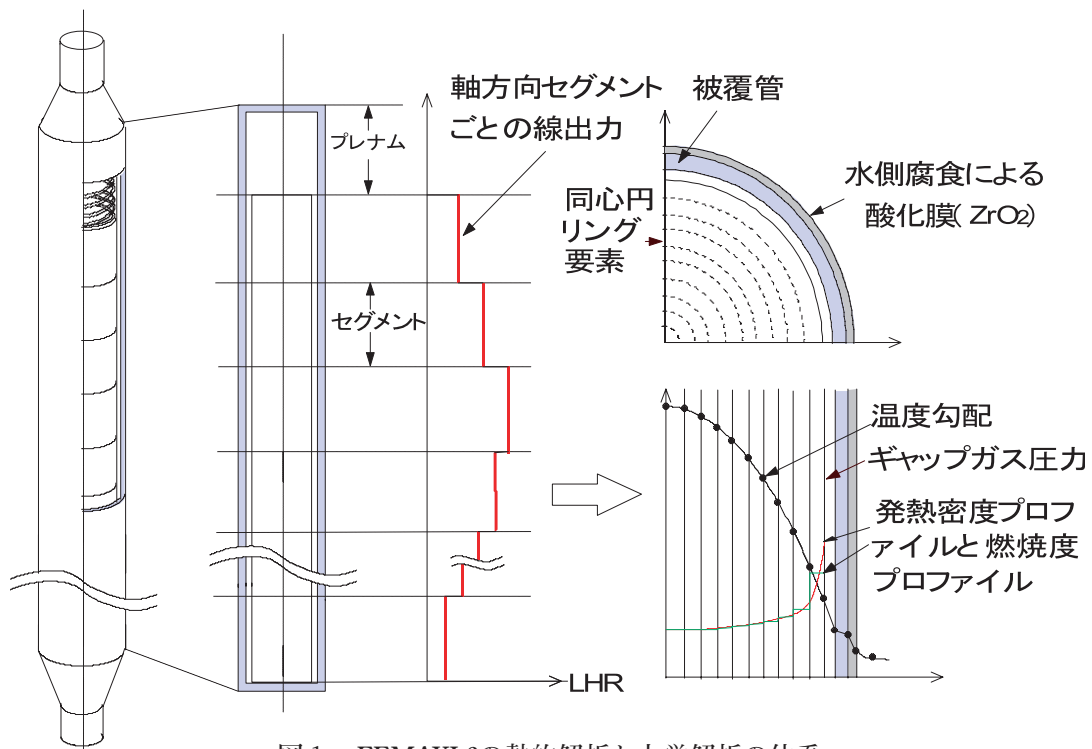


図1 FEMAXI-6の熱的解析と力学解析の体系

に複数のセグメントに分割され、その各々のセグメントは同心円のリング要素に分割される。すなわち一次元軸対称円筒体系である。(FEMAXI=Finite Element Method in AXIs-symmetric system)

この体系で、一次元(1-D) 熱伝導計算及び変形計算が行われる。この場合の変形計算は図2に示す様に、1-D(一次要素)FEMである。各セグメントには、線出力が燃焼度あるいは時間の関数として入力指定される。

図3に、計算の順序を簡単に示す。各タイムステップにおいて、それ以前(タイムステップ初期)の形状を前提として、まず発熱、熱伝導、冷却(除熱)の計算により、燃料棒の温度分布が求められる。次に、この温度を用いてFPガスの拡散・放出、および内圧変化の計算が行われる。次に、この温度と内圧の条件での燃料棒の1-D力学計算がされる。

力学計算の結果求められたペレットと被覆管の間のギャップ状態は、ギャップ熱伝達、ひいては温度分布を規定する要素である。したがって、この熱解析と1-D力学解析は、一

つのタイムステップ中で数回のiterationが行われ、収束したのちに次の段階へ進む。

次の段階で、もし局所PCMI解析の実行が指定されている場合は、特定の1セグメントにおける温度と内圧を参照して、そのセグメントにおける半ペレット長の部分に対してr-Z二次元(2-D)の有限要素解析が行われる。ここでは、図4のように、対称性を利用して半ペレット長に2-D二次要素を設定する。これにより、ペレットの鼓型変形(リッジング変形)、PCMIによる応力歪みの局所的な集中などが解析可能である。

なお、力学解析は1-D、2-Dとも照射中に生じるすべての変形モード、すなわち弾塑性+熱膨張+クリープ+スエリング+ホットプレスを扱う。

7. 解析例の紹介

FEMAXIによる代表的な解析例を紹介する。

①PCMI

PCMIはFEMAXIの2-D力学解析によって

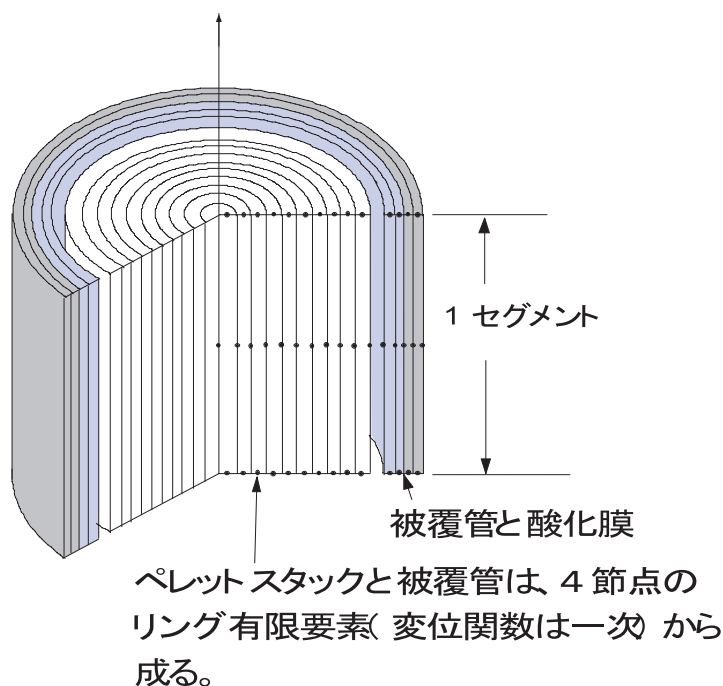


図2 一次元全長力学解析における軸方向セグメントの有限要素体系

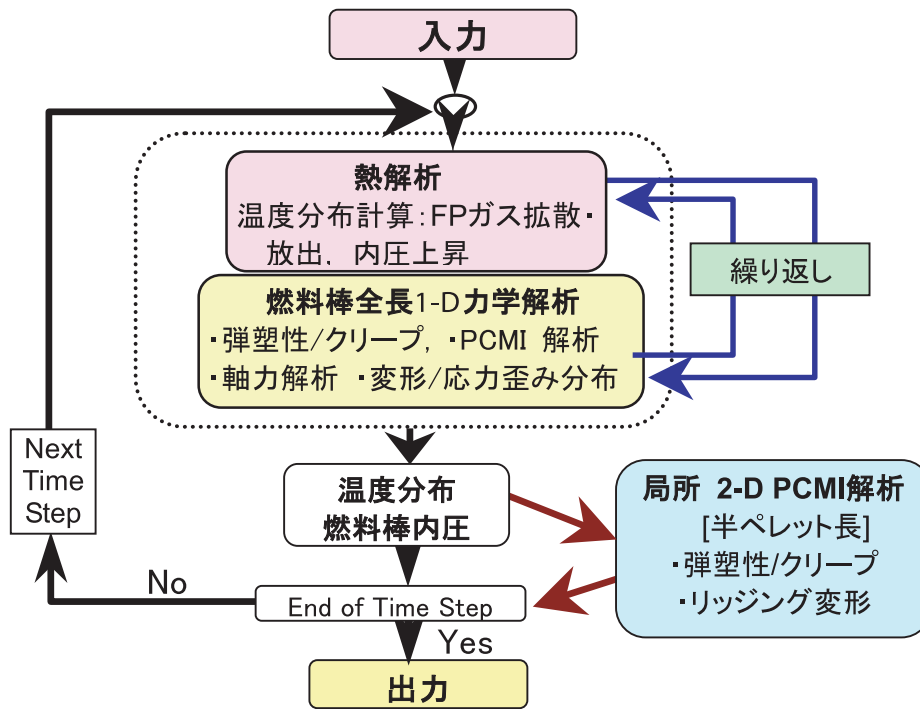


図3 FEMAX-6の1タイムステップにおける機能ブロック

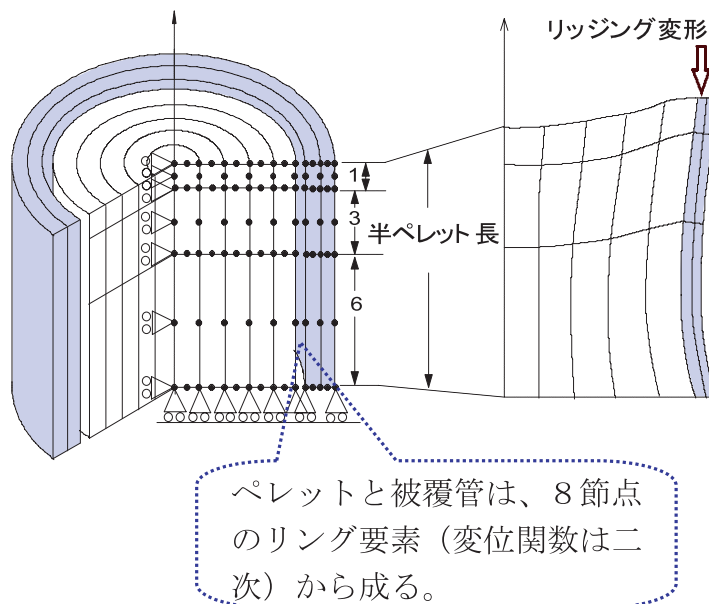


図4 二次元局所力学解析における有限要素体系

その特徴をよくつかむことができる。高出力ではペレットは熱膨張により鼓状に変形し、端面は外側にせり出して竹の節状(リッジング変形)になる。リッジングは、被覆管に局所的な歪み集中をもたらし、健全性に影響を及ぼす場合がある。このPCMI変形を精度良

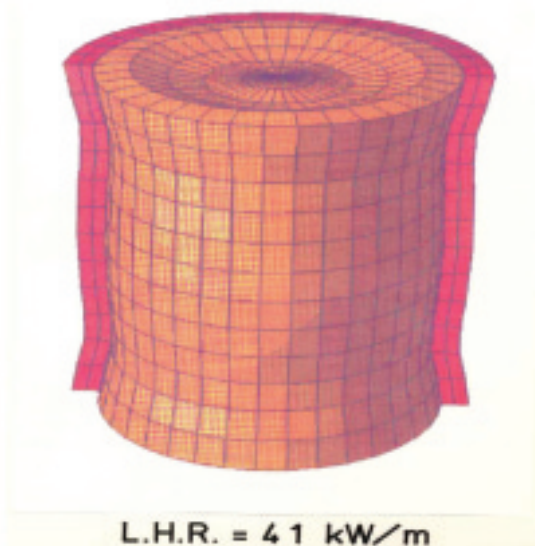


図5 局所力学モデルによるペレット及び被覆管のPCMI変形計算例。ただし図示された変形量は実際の計算値を一律に増倍して強調している。

く予測することに成功した一例を図5および図6に示す⁶⁾。

②FPガス放出(FGR ; Fission Gas Release)

FGRモデルは、FPガス原子の UO_2 結晶粒界への拡散、ガスバブル形成、成長、連結によるトンネル形成、外部空間への放出をモデル化している。図7は、Halden炉における試験照射燃料の解析例である⁷⁾。ガス放出はペレット温度に強く依存するので、ペレット温度を規定する熱伝導率モデルへの感度を比較するために、ガス放出による内圧上昇を熱伝導率モデルごとに計算した結果を実測値と比較し、同時に計算したFPガス放出率を示している。90GWd以上の高燃焼度域まで、実測値と計算値は良く一致している。ただし、この照射条件では、ガスバブル成長の影響はガス放出が開始する初期に強く、ガス放出開始後は、放出を律速するのはほとんど UO_2 粒内の拡散速度であるので、拡散計算の検証例という性格がある。

③ギャップボンディング

ペレットの体積膨張と被覆管のクリープダウンのため、燃焼度40GWd/t付近でPC間の

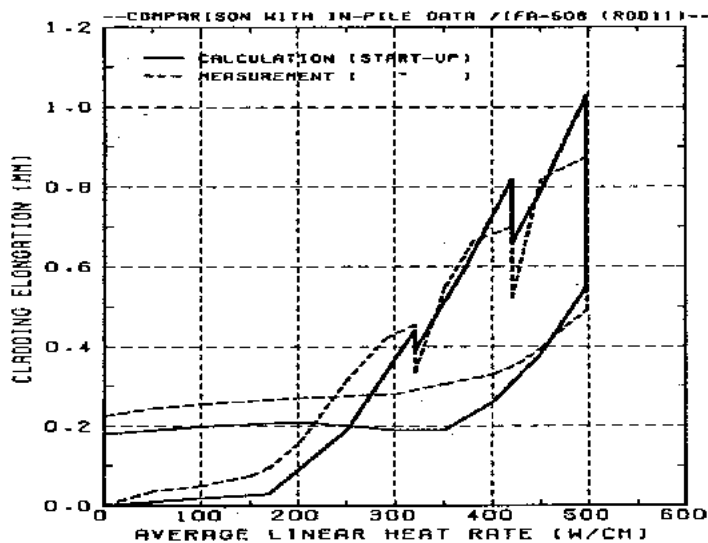


図6 FEMAXI-IIIによる出力急昇試験におけるPCMIの解析例。ペレットスタックの軸方向への熱膨張伸びがPCMIにより被覆管に伝わり、被覆管の伸びとして計測された。計算値(実線)は計測値(破線)を良く表現している。

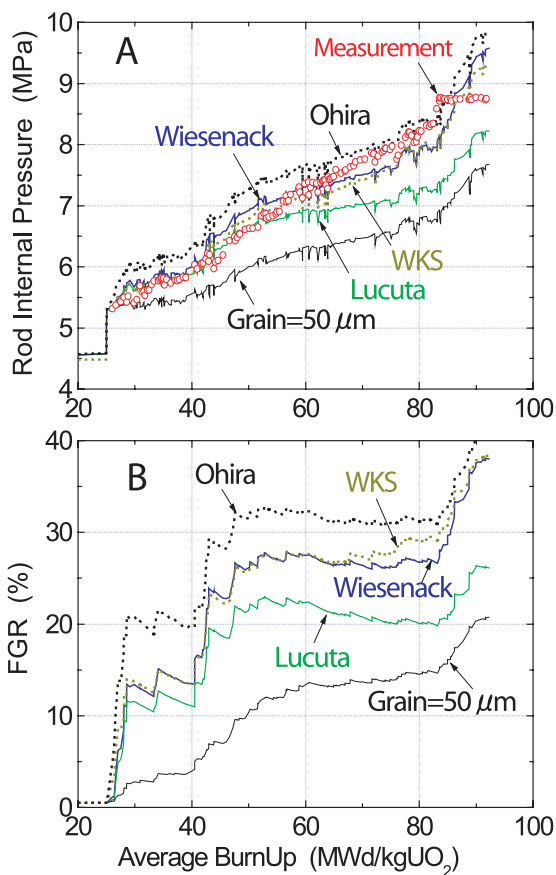


図7 FEMAXI-VによるHalden照射試験におけるFPガス放出の解析。Aはペレット熱伝導率モデルごとの内圧の実測値との比較、Bは計算されたFPガス放出率の比較。

ギャップは閉塞し、その間に化学反応層ができる。これをボンディングと言い、ギャップ熱伝達を増加させるとともに、ペレットスタックと被覆管が一体化して変形ようになる。ボンディング熱伝達は、10μm厚みのZrO₂層の熱伝達で十分良く近似される。図8は、Halden照射試験における燃料中心温度の実測値に対してボンディングモデルの有無による計算値を比較したものであり⁸⁾、ボンディング熱伝達モデルが実測の傾向を良く表現している。

④ガスバブルスエリング(Fission gas bubble swelling)

UO₂結晶の粒界におけるFPガスバブルの成長は、ペレット体積の増加、すなわちスエリングに大きく寄与する。高燃焼度燃料では、ガスバブルの成長が促進され、スエリングが増加する傾向にある。出力が短時間に上昇する過渡変化の場合、燃料温度が上昇し、FPガスバブルスエリングによってPCMIが支配されるようになる。図9は、出力過渡時のガスバブル成長モデルによってペレットが膨張し、PCMIにより被覆管の直径が増加した解析と実測を示す⁹⁾。ガスバブル成長をスエリングの大きな要因として考慮することに

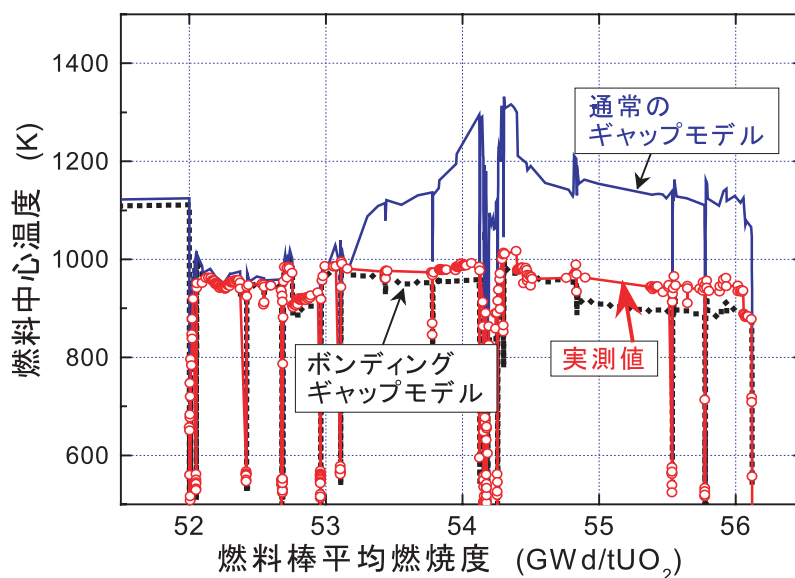


図8 Halden照射燃料中心温度の比較。

より初めて大きな変形を予測できることを示す。

8. 今後の展開

FEMAXIコードの今後の展開と課題を述べる。

8.1 新型炉燃料の解析

高富化度MOX燃料を用いた将来型軽水炉 (FLWR、低減速水冷却高速炉) の研究が進められている。FLWRでは、高富化度MOX燃料を300~400W/cmという高線出力レベルと、PWRの2倍以上という高速中性子束の照射環境で用いるので、その燃料ふるまいを予測評価することは重要な課題である¹⁰⁾。このため、FEMAXI-6をベースとしてFLWR燃料バージョンを開発し、想定照射条件における燃料ふるまいの予測・設計概念を研究している¹¹⁾。またFEMAXI-6は、新型炉の一つである超臨界圧スーパー軽水炉の燃料解析にも用いられた^{10, 12)}。今後も様々なタイプの新型炉燃料の解析に利用されることが期待される。

8.2 展望と課題

高燃焼度燃料の照射試験データによるFEMAXI-6モデルの検証から浮かび上がった課題は、粒界ガスバブル(あるいは粒界)に蓄積されたFPガス量(インベントリ)の予測精度が不十分であることである。また、リム組織のモデル化や高fluence(高速中性子照射量)被覆管の機械的性質モデル開発も課題である。

FPガスのインベントリの問題は、ペレット温度、拡散速度、ガスバブルサイズ、ガスの固体への再溶解など、多くの要因の相互作用によって決められ、その物理的全容は不明な部分が多い。限られた知見をもとに大胆なモデル化を進めるほかはない。

リム組織は、ペレットの外周部に生じるFPガスポアに富むポーラスな組織であり、その生成は、高燃焼度では不可避である。その生成量を照射履歴に沿って予測する実用的なモデルの開発が重要である。組織の生成量がわかれば、その組織に含まれるガスポアのサイズや単位体積あたりの個数などを経験式により算出して、熱伝導率低下やスエリングなど

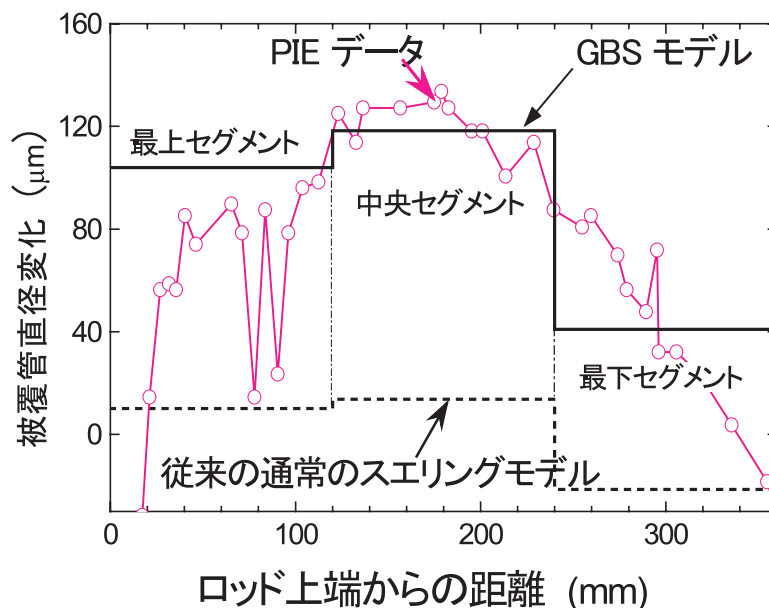


図9 高燃焼度BWR燃料の出力急昇試験における燃料棒直径変化の解析。FPガスバブルによるスエリングをモデル化したGBSモデルは実測値の傾向を良く表現している。

の予測に結びつけたモデルを開発することができる。リム組織生成の機構に関する固体物理学的な基礎研究はこれらのモデル開発には直接結びつかないと思われる。

高fluence被覆管の機械的性質(降伏応力、加工硬化率など)については、照射材の引張り試験データに基づいたモデル開発が進んでいる。

以上の課題に答えた高度化バージョンをFEMAXI-6 (Ver.2)として開発し、公開する予定である。また、コード開発の効率化のために、コードを主要構成要素ごとにモジュール化して、個別モジュールの選択と結合により、求める解析機能を発揮させるシステムを開発中である。

参考文献

- 1) M.Ichikawa, On the theory of FEMAXI, an axisymmetric finite element programme for analysis of local deformations of operating fuel rods, HIR-93 (1978).
- 2) Nakajima T., Ichikawa M., et al., FEMAXI-III : A Computer Code for the Analysis of Thermal and Mechanical Behavior of Fuel Rods, JAERI -1298 (1985).
- 3) M.Suzuki and H.Saitou, Light Water Reactor Fuel Analysis Code FEMAXI-6 (Ver.1), JAEA Data/Code 2005-003 (2005).
- 4) 内田正明, 斉藤裕明, 燃料棒内出力分布計算コード:RODBURN, JAERI-M 93-108 (1993).
- 5) S.Lemehov and M.Suzuki, PLUTON-Three Group Neutronic Code for Burnup Analysis of Isotope Generation and Depletion in Highly Irradiated LWR Fuel Rods, JAERI-Data/Code 2001-025 (2001).
- 6) T.Nakajima, H.Saito and T.Osaka, FEMAXI-IV: a computer code for the analysis of thermal and mechanical behavior of light water reactor fuel rods, Nucl.Eng.Design 148 (1994)41.
- 7) M.Suzuki, Analysis of high burnup fuel behavior in Halden reactor by FEMAXI-V code, Nucl.Eng.Design 201 (2000) 99.
- 8) M. Suzuki, K. Kusagaya, et al., Analysis on Lift-Off Experiment in Halden Reactor by FEMAXI-6 Code, J.Nucl. Mater. 335(2004)417.
- 9) M.Suzuki, H.Uetsuka and H.Saitou, Analysis of mechanical load on cladding induced by fuel swelling during power ramp in high burnup rod by fuel performance code FEMAXI-6, Nucl. Eng.Design 229 (2004) 1.
- 10) 石川信行・小林登・大久保努・内川貞夫(編), 革新的水冷却炉研究会(第9回)に関する報告書, JAEA-Review 2006-020 (2006).
- 11) M.Suzuki, H.Saitou and T.Iwamura, Analysis of MOX fuel behavior in reduced-moderation water reactor by fuel performance code FEMAXI-RM, Nucl.Eng.Design 227, pp.19-27 (2004).
- 12) A.Yamaji, Y.Oka, Y.Ishiwatari, L.JIE et al., Rationalization of the Fuel Integrity Criteria for the High Temperature Supercritical- Pressure Light Water Reactor, Proc. ICAPP05; 2005 International Congress on Advances in Nuclear Power Plants, Seoul, Korea, May 2004, Paper 5538 (2004).