JAEA-Data/Code 2023-006 DOI:10.11484/jaea-data-code-2023-006



高速炉MOX燃料照射試験による 燃料挙動解析コードFEMAXI-8の検証

Validation of Fuel Behavior Analysis Code FEMAXI-8 Using Fast Reactor MOX Fuel Irradiation Tests

> 生澤 佳久 長山 政博 Yoshihisa IKUSAWA and Masahiro NAGAYAMA

核燃料・バックエンド研究開発部門 核燃料サイクル工学研究所 プルトニウム燃料技術開発センター 燃料技術部

Fuel Technology Department Plutonium Fuel Development Center Nuclear Fuel Cycle Engineering Laboratories Sector of Nuclear Fuel, Decommissioning and Waste Management Technology Development

July 2023

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。 本レポートはクリエイティブ・コモンズ表示 4.0 国際ライセンスの下に提供されています。 本レポートの成果(データを含む)に著作権が発生しない場合でも、同ライセンスと同様の 条件で利用してください。(<u>https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ja</u>) なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ウェブサイト(<u>https://www.jaea.go.jp</u>) より発信されています。本レポートに関しては下記までお問合せください。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 JAEA イノベーションハブ 研究成果利活用課 〒 319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方 2 番地 4 電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency. This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en).

Even if the results of this report (including data) are not copyrighted, they must be used under the same terms and conditions as CC-BY.

For inquiries regarding this report, please contact Institutional Repository and Utilization Section, JAEA Innovation Hub, Japan Atomic Energy Agency.

2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan

Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2023

高速炉 MOX 燃料照射試験による燃料挙動解析コード FEMAXI-8 の検証

核燃料・バックエンド研究開発部門 核燃料サイクル工学研究所 プルトニウム燃料技術開発センター 燃料技術部

生澤 佳久、長山 政博*

(2023年4月3日受理)

超臨界圧軽水冷却炉 (Supercritical Water-Cooled Reactor、SCWR) や、低減速炉 (Reduced-Moderation Water Reactor、RMWR) において、水冷却環境下でステンレス鋼製被覆管や高 Pu 含有混合酸化物 (Mixed Oxide、MOX) 燃料を採用した炉心燃料の検討がなされている。この ような炉心燃料概念の研究開発に資するため、高速実験炉「常陽」で照射された高速炉 MOX 燃料の照射後試験結果に基づき、挙動解析コード FEMAXI-8 の解析機能について検証を行っ た。FEMAXI-8 は、軽水炉燃料の通常運転時及び過渡条件下の挙動解析を目的として原子力機 構が開発・整備を進めてきた挙動解析コードで、最新バージョンのものである。この最新バー ジョンでは、事故耐性燃料等の改良型燃料についても取り扱うことが出来るようステンレス製 被覆管の物性モデルも選択できるように改良・開発されている。本報告書の目的は、軽水炉よ りも高出力、高燃焼度で照射され且つ高 Pu 含有 MOX 燃料、ステンレス鋼製被覆管を採用し た高速炉 MOX 燃料を検証データとして加え解析機能を確認することで、現在研究開発が進め られている新型の炉心燃料の照射挙動に対する FEMAXI-8 の予測精度を確認することである。

検証の結果、軽水炉の Pu 含有率、照射条件を超え、ステンレス鋼製被覆管を採用したナト リウム冷却型高速炉 MOX 燃料の照射挙動に対しても、顕著な組織変化が生じない範囲であれ ば FEMAXI-8 は十分な解析精度を有していることを確認した。今後、MOX 燃料熱伝導度の O/M 比依存性や、高温時の照射挙動評価モデルを採用することで、FEMAXI-8 の解析精度の向 上を図ることが出来ると考えられる。

核燃料サイクル工学研究所:〒319-1194 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地33 * 株式会社 NESI

JAEA-Data/Code 2023-006

Validation of Fuel Behavior Analysis Code FEMAXI-8 Using Fast Reactor MOX Fuel Irradiation Tests

Yoshihisa IKUSAWA and Masahiro NAGAYAMA*

Fuel Technology Department, Plutonium Fuel Development Center Nuclear Fuel Cycle Engineering Laboratories Sector of Nuclear Fuel, Decommissioning and Waste Management Technology Development Japan Atomic Energy Agency Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received April 3, 2023)

Core fuels with stainless steel cladding and high plutonium content mixed oxide (MOX) fuel in a water-cooled environment, such as supercritical water-cooled reactors (SCWR) and reduced-moderation water reactors (RMWR), have been studied. In order to contribute to the research and development of such a core fuel concept, the fuel performance code "FEMAXI-8" was verified based on the results of post irradiation examinations of MOX fuel irradiated in the experimental fast reactor "JOYO".

FEMAXI-8 is the latest version of the behavior analysis code developed by JAEA to analyze the behavior of light water reactor fuels under normal operation and transient conditions. This latest code has been improved and developed to allow the selection of stainless steel cladding property models to analyze improved fuels such as accident tolerant fuels. The purpose of this report is to confirm the prediction accuracy of FEMAXI-8 for the irradiation behavior of the new type of core fuel that is currently being developed.

As a result of the verification, it was confirmed that FEMAXI-8 has sufficient analysis accuracy for the irradiation behavior of sodium-cooled fast reactor MOX fuel with stainless steel cladding, which exceeds the plutonium content and irradiation conditions of light water reactors. In the future, the analysis accuracy of FEMAXI-8 could be improved by adopting the O/M ratio dependence of MOX fuel thermal conductivity and the irradiation behavior evaluation model at high temperature.

Keywords: Fuel Performance Code, Light Water Reactor, LWR Fuel, MOX, Fast Reactor

^{*} NESI Inc.

目 次

1.	序詞	淪1			
2.	照	村データと解析モデル2			
2	2.1	照射データ2			
2	2.2	解析モデル2			
3.	検討	证解析結果3			
3	3.1	燃料中心温度(燃料温度)3			
g	3.2	FP ガス放出率及び燃料要素内圧4			
g	3.3	被覆管外径変化(被覆管応力)4			
4.	結	論6			
謝辞					
参考文献					
付銷	录 1	HBWR IFA529 Rod-12 の燃料中心温度(燃料温度)データの取り扱いについて17			
付銷	m & 2	推奨 Namelist 一覧19			

Contents

1. Introduction1			
2. Irradiation Data and Analysis Model2			
2.1 Irradiation Data2			
2.2 Analysis Model2			
3. Verification Analysis Results			
3.1 Fuel Center Temperature3			
3.2 Fission Gas Release and Rod Inner Pressure4			
3.3 Cladding Diameter Change4			
4. Conclusion6			
Acknowledgements6			
References 7			
Appendix1 Pellet Center Temperature Data of HBWR IFA529 Rod-1217			
Appendix2 Recommended "Namelist" List19			

表リスト

Table 2.1-1 Outline of validation data	9
Table 2.2-1 Analysis model	10

図リスト

Figure 2.1-1 Burnup and Pu content1	1
Figure 2.1-2 Rod average burnup and maximum linear heat rate1	1
Figure 3.1-1 Comparison between calculation results and measurements (Pellet center	
temperature)1	2
Figure 3.1-2 Comparison between calculation results and measurements (Pellet center	
temperature on B5D2 irradiation test)11	2
Figure 3.1-3 Temperature dependence of MOX pellet thermal conductivity1	3
Figure 3.2-1 Comparison between calculation results and measurements (Fission gas	
release)1	4
Figure 3.2-2 Burnup change of the ratio of calculated and measured (Fission gas release)
1	4
Figure 3.2-3 Comparison between calculation results and measurements (Plenum	
pressure)1	5
Figure 3.2-4 Burnup change of the ratio of calculated and measured (Plenum pressure)	
1	5
Figure 3.3-1 Fast neutron fluence and swelling of CMIR-irradiated material	6
Figure 3.3-2 Comparison between calculation results and measurements (Cladding outer	r
diameter change)1	6
Figure A-1 Comparison between calculation results and measurements (Pellet center	
temperature)12	8
Figure A-2 Pellet-cladding diameter gap and cladding inner diameter11	8

1. 序論

軽水冷却高速炉として、第4世代原子炉として提唱されている超臨界圧軽水冷却炉 (Supercritical Water-Cooled Reactor、以下 SCWR)^{1),2),3)}や、低減速炉(Reduced-Moderation Water Reactor、以下 RMWR)⁴⁾の研究開発が進められている。これら新型炉の燃料概念の一 つとしてステンレス鋼製被覆管、高 Pu 含有の混合酸化物(Mixed Oxide、以下 MOX)燃料の 採用が検討されている。一方、既存の軽水炉においては事故時の安全性を高めた事故耐性燃料 (Accident Tolerant Fuel、以下 ATF)の概念の一つとして、被覆管に酸化物分散強化型(Oxide

Dispersion Strengthened、以下 ODS)フェライト鋼を採用した燃料の開発が進められている ⁵⁾。この ODS 鋼製被覆管を採用した ATF 燃料は、UO2燃料を対象に開発が進められているが、 MOX 燃料についても一部検討されている⁶⁾。このように、昨今、水冷却環境下でステンレス鋼 製被覆管と MOX 燃料を採用した炉心燃料の概念検討がなされている。

これら炉心燃料は、既存軽水炉の運転条件や燃料仕様を超えることとなる。そのため、これ ら炉心燃料の概念検討には挙動解析コードを用いた照射挙動の把握が有効である。そこで本報 告書では、これら新型の炉心燃料の研究開発に資するため、高速実験炉「常陽」で照射された 高速炉用 MOX 燃料の照射後試験結果を用いた挙動解析コード FEMAXI-8⁷⁰の燃料中心温度(燃 料温度)、FPガス放出率(燃料要素内圧)及び被覆管外径変化(被覆管応力)の解析機能の検 証結果について報告する。FEMAXI-8 は、軽水炉燃料の通常運転時及び過渡条件下の挙動解析 を目的として日本原子力研究開発機構(以下、原子力機構)が開発・整備を進めてきた挙動解 析コードで、最新バージョンのものである。この最新バージョンでは、事故耐性燃料等の改良 型燃料についても取り扱うことが出来るようステンレス製被覆管の物性モデルも選択できるよ うに改良・開発されている。SCWR、RMWR はナトリウム冷却高速炉である高速実験炉「常 陽」の運転条件、燃料仕様と完全に合致するものでは無いため本成果のみで、これら炉心燃料 の照射挙動の予測を完全に確保するものではない。しかしながら、軽水炉よりも高出力、高燃 焼度で照射され、且つ、高 Pu 含有 MOX 燃料、ステンレス鋼製被覆管を採用した高速実験炉 「常陽」の MOX 燃料を検証データとして加え解析機能を確認することで、FEMAXI-8 の適用 条件の拡張により、新型の炉心燃料の概念検討のための照射挙動の予測精度の確認が可能と考 える。

第2章では検証に用いた照射データ、解析モデルの概要を、第3章では検証結果について述べる。

2. 照射データと解析モデル

2.1 照射データ^{8),9),10),11)12),13),14)}

本検証では原子力機構が実施した新型転換炉「ふげん」、ハルデン沸騰水型炉(Halden Boiling Water Reactor、以下、HBWR)照射試験及び高速実験炉「常陽」で照射された MOX 燃料を 対象とした。検証計算の対象とした燃料の仕様及びプラント運転条件を Table 2.1-1 に示す。 Table 2.1-1 に示すように、常陽燃料のうち燃料中心温度(燃料温度)の検証に用いた燃料は、 計装線付照射試験である常陽 INTA-1,2 試験燃料及び、溶融限界線出力試験(Power-To-Melt 試験、以下 PTM 試験)である B5D 試験燃料を対象とした。一方、FP ガス放出率(燃料要素 内圧)及び被覆管外径変化(被覆管応力)の検証には、比較的線出力が低い常陽ドライバ燃料 (PFD010、PFD 029、PFD 153)を対象とした。これは以下のような理由による。一般に高 速炉 MOX 燃料は組織変化による中心空孔形成が燃料温度へ影響を与え、FP ガス放出挙動へ 影響を与える。後述するように現状の FEMAXI-8 は組織変化モデルを採用しておらず、組織変

影響を与える。後述するように現状の FEMAXI-8 は組織変化モデルを採用しておらず、組織変 化が生じている燃料については燃料中心温度(燃料温度)を過大評価する。そのような燃料の FP ガス放出率(燃料要素内圧)については解析精度が低下するものと考えられ、被覆管外径変 化(被覆管応力)の解析結果にも影響を与えると考えられる。そこで、FP ガス放出率(燃料要 素内圧)及び被覆管外径変化(被覆管応力)の検証対象燃料は、比較的線出力が低く組織変化 が顕著に生じていないと考えられる常陽ドライバ燃料(PFD010、PFD 029、PFD 153)を対 象とした。

Figure 2.1-1 に燃焼度と Pu 含有率の関係、Figure 2.1-2 に燃焼度と線出力の関係を示す。 Figure 2.1-1 に示すように Pu 含有率は、「ふげん」燃料、HBWR 試験燃料が約 1~10wt%の範 囲であるのに対して、常陽燃料は約 20~30wt%となっている。また、Figure 2.1-2 に示すよう に常陽照射データのうち B5D 燃料は PTM 試験のため 60kW/m 以上の高出力で照射されてい る。なお、HBWR 試験燃料の一部の燃料棒のデータ(IFA529 Rod12)については、今回の作 業において対象外とした(付録 1 参照)。

2.2 解析モデル

解析モデルは、コードの配布時に最新の推奨モデル(Namelist)として格納されているデー タの中の「ファイル名:info-modelset-00029wpbvhZ」を用いた。Table 2.2-1 に主な解析モデ ルを示す。また、付録 2 に本解析で用いた推奨モデル一覧を示す。推奨モデルで設定されてい る Namelist データは各種の解析・物性モデルのほか、計算の収束、安定性に関する項目も含 まれており、これまでの開発、実績が反映されたものとなっている。なお、推奨モデルは被覆 管の物性モデルが Zry 材用であるため常陽燃料の解析についてはコード内蔵の SUS 材用を設 定した。

3. 検証解析結果

燃料中心温度(燃料温度)、FPガス放出率(燃料要素内圧)、被覆管外径変化(被覆管応力)の検証結果を以下に示す。

3.1 燃料中心温度(燃料温度)

Figure 3.1-1 に HBWR 炉照射試験及び高速実験炉「常陽」で照射された MOX 燃料のうち、 計装線付照射試験及び PTM 試験で取得された燃料中心温度の実測値と計算値の比較を示す。

計装線付照射試験である常陽 INTA-1,2 試験燃料は、約 1,600℃までの燃料中心温度のオン ラインの測定結果であり、計算値は相対誤差±10%以内の精度で良い一致を示した。これは、 HBWR 試験燃料のデータの範囲内であった。

照射中の燃料中心温度のデータ取得の方法として、上記のような計装線付照射試験によるオ ンライン測定以外に、PTM 試験の結果を用いる方法がある。これは、燃料溶融が発生する線出 力で照射し照射後試験で軸方向の燃料溶融発生範囲を特定する。この燃料溶融が開始する軸方 向位置での燃料中心温度が燃料融点となるため、これを照射挙動解析コードの燃料中心温度の 検証データとして利用できる。このような PTM 試験として、高速実験炉「常陽」では B5D 試 験¹⁴⁾として実施されている。Figure 3.1-1 に示すように、B5D 試験燃料については、燃料中心 温度を過大評価する結果となっている。これは、FEMAXI-8 がペレットの組織変化モデルを採 用していないためと考えられる。B5D 試験燃料は、組織変化が進展しており中心空孔が形成さ れていることが報告されている。そこで、組織変化の挙動を模擬するため照射後試験で得られ た中心空孔径を入力し、中空ペレットとして解析を行った。Figure 3.1-2 に計算値と実測値の 比較を示すが、中空ペレットとした場合には、燃料中心温度を精度良く解析できる結果となっ ている。この結果より、FEMAXI-8 においても組織変化モデルを採用することで、燃料融点ま での燃料中心温度の解析精度を向上できるものと考えられる。なお、これらの図に示すように 現状においても、燃料が溶融する温度条件では燃料中心温度を過大評価しているため、設計評 価などの保守性を求められる解析においては有効な結果を与えることができると考えられる。

なお、常陽試験燃料の燃料中心温度は照射初期のみの取得であり、燃焼に伴う変化について は取得されていない。燃料中心温度の解析精度は、燃焼に伴い「燃料ペレットと被覆管間のギ ャップ幅の変化」、「FP ガス放出によるギャップガス熱伝達の低下」の影響を受けるため、FP ガス放出率(燃料要素内圧)や被覆管外径変化(被覆管応力)の予測精度にも影響する。これ らについては、「3.2 FP ガス放出率及び燃料要素内圧」、「3.3 被覆管外径変化(被覆管応力)」 に示すように、比較的精度よく解析できている。燃焼による燃料中心温度の変化については、 実証性の観点から今後データを拡充し検証していくことが望ましいが、これら解析結果が比較 的精度よく解析できていることから、再現性はあるものと示唆される。

3.1.1 MOX 燃料ペレットの熱伝導度モデル

本検討では、燃料ペレットの熱伝導度に FEMAXI-8の推奨モデル (Ohira and Itagaki latest model for UO₂ and MOX)^{15),16)}を用いている。一方、高速炉 MOX 燃料の挙動解析では、次式¹⁷⁾

が用いられている。

 $\lambda = \frac{1 - p}{1 + 0.5p} \left[\frac{1}{0.01595 + 2.713x + 0.3583\text{Am} + 0.06317\text{Np} + (2.493 - 2.625x) \times 10^{-4}\text{T}} + \frac{1.541 \times 10^{11}}{\text{T}^{2.5}} \cdot \exp(-\frac{15220}{\text{T}}) \right]$ (1)

- λ : 気孔率 p における熱伝導度 (W/m/K)
- p : 気孔率 (-)
- x : 2.00 O/M (-)
- T : 温度 (K)
- Am : Am 含有率 (-)
- Np : Np 含有率 (-)

この熱伝導度式は Pu 含有率 20~30wt%の MOX サンプルを用いて、レーザフラッシュ法に より測定された熱拡散率に基づき定式化したものである。特徴として、実験結果に基づき Pu 含有率が 20~30wt%の範囲では Pu 添加による熱伝導度への影響が小さい事から Pu 含有率の 依存項を設けていないが、Am、Np 及び O/M 比による影響を定式化している。また、未照射 燃料の測定結果に基づき定式化されているので照射による影響は考慮されていない。

Figure 3.1-3 に上記式で評価した熱伝導度の温度依存性を示すが、O/M 比が低下すると熱伝 導度は低下することが分かる。今回の燃料中心温度の検証では、常陽燃料の計算値は HBWR 試 験燃料の解析精度の範囲内であり、O/M 比依存性を考慮しない熱伝導度モデルにおいても十分 な解析精度を有していたが、このような MOX 燃料熱伝導度の O/M 比の依存性が実測値と計算 値の誤差の要因の一つとなっている可能性が考えられる。

今回の検証の結果、FEMAXI-8 で用いている熱伝導度の推奨モデルにおいても、高 Pu 含有 率燃料の照射挙動解析は可能であるが、燃料ペレットの熱伝導度式に O/M 比依存性を取り入 れることで、解析精度向上が図れるものと考えられる。

3.2 FP ガス放出率及び燃料要素内圧

FP ガス放出率の Figure 3.2-1 に実測値と計算値の比較、Figure 3.2-2 に(計算値/実測値) 比の燃焼度変化を示す。Figure 3.2-1 に示すように、「ふげん」燃料、HBWR 試験燃料はばら つきがあるものの偏りのない結果となっている。FP ガス放出率が約 50%と高い常陽ドライバ 燃料についても比較的良い一致を示し、特に高燃焼度領域での精度が良かった(Figure 3.2-2)。

燃料要素内圧について Figure 3.2-3 に実測値と計算値の比較、Figure 3.2-4 に(計算値/実測値)比の燃焼度変化を示すが、FP ガス放出率の結果と同様の傾向となっている。

3.3 被覆管外径変化(被覆管応力)

本検証における実測値は、製造時、照射後試験時の外径プロファイル値(2 方向)の平均値 を用いており、計算値は、計算ノードの軸方向平均より算出した。なお、計算値における酸化 膜の取り扱いについては、常陽燃料は冷却材がナトリウムであることから「未考慮」、「ふげん」 燃料、HBWR 試験燃料は「考慮」とした。

高速中性子の照射に伴って被覆管のスエリングが生じる。FEMAXI-8 では、このような被覆 管のスエリングがオプションとして用意されている。常陽ドライバ燃料の被覆管材である PNC316 は、SUS316 ステンレス鋼をベースに高温強度特性と耐スエリング性を向上させたも のである。Figure 3.3-1 には照射量とスエリングの関係¹⁸⁾を示すが、PNC316 は高速中性子照 射量がスエリングの潜伏期間(約 19×10²⁶n/m²)を超えると増加する。今回対象とした常陽燃 料の高速中性子照射量は最大で約 15×10²⁶n/m² (Table 2.1-1 参照) であり、PNC316 のスエ リングの潜伏期間内であった。そのため、本解析では被覆管スエリングについては「未考慮」 とした。

Figure 3.3-2 に実測値と計算値の比較を示すが、常陽ドライバ燃料は実測値、計算値共に被 覆管外径変化(被覆管応力)は小さいことが分かる。一般的にナトリウム冷却型の高速炉 MOX 燃料は、燃料温度が高く燃焼度が高いため FP ガス放出量が多く内圧が高い一方で、外圧が低 くいことから被覆管はクリープによって外径が増加し、更にスエリングによる変形が生じる。 今回検証対象とした常陽ドライバ燃料の燃焼度の範囲では被覆管外径(被覆管応力)の実測値 は、スエリングが潜伏期間内であったことに加えクリープによる影響も顕著ではなく、計算値 も同様に顕著な外径増加が生じない結果となった。

なお、「ふげん」燃料は、全体的に実測値より減少量(クリープダウン)を大きく計算する傾向であるものの概ね良い一致を示し、実測値が初期外径より増加が認められる HBWR 試験燃料は PCMI によって増加した。

4. 結論

新型炉の燃料開発に資するため、高速実験炉「常陽」で照射された高速炉 MOX 燃料の照射 後試験結果を用いて、挙動解析コード FEMAXI-8 の燃料中心温度、FP ガス放出率(燃料要素 内圧)、被覆管外径変化(被覆管応力)の解析機能について検証を行った。

燃料中心温度については、Pu含有率 20wt%を超える計装線付「常陽」照射試験燃料(INTA-1, INTA-2)に対しても相対誤差±10%以内の精度で良い一致を示した。また、PTM 試験(「常 陽」B5D 試験燃料)については、燃料中心温度を過大評価する結果となった。これは、FEMAXI-8 がペレットの組織変化モデルを採用していないためと考えられた。そこで、組織変化の挙動 を模擬するため照射後試験で得られた中心空孔径を入力し、中空ペレットとして解析を行った 結果、燃料中心温度を精度良く解析することができた。この結果より、FEMAXI-8 においても ペレット組織変化モデルを採用することで、燃料融点までの燃料中心温度の解析精度を向上で きるものと考えられる。なお、融点直下の温度条件では燃料中心温度を過大評価しているため、 設計評価などの保守性が求められる解析においては、現状のバージョンにおいても有効な結果 を与えることが出来ると考えられる。

FP ガス放出率については、FP ガス放出率が約 50%と高い常陽燃料についても比較的良い一 致を示した。また、燃料要素内圧についても常陽燃料については良い一致を示しており、特に 高燃焼度領域での精度が良かった。

被覆管外径変化(被覆管応力)について、今回検証対象とした常陽ドライバ燃料の被覆管外 径は、スエリングが潜伏期間内であったことに加えクリープによる影響も少なく顕著な外径増 加が生じておらず、計算値も同様の結果となった。

以上の検証の結果、軽水炉の Pu 含有率条件、照射条件を超え、ステンレス鋼製被覆管を採 用したナトリウム冷却型高速炉 MOX 燃料の照射挙動に対しても顕著な組織変化が生じない範 囲であれば FEMAXI-8 は十分な解析精度を有していることを確認した。

MOX 燃料熱伝導度の O/M 比依存性や、高温時の照射挙動評価モデル(ペレット組織変化) を採用することで、FEMAXI-8 の解析精度の更なる向上を図ることが出来ると考えられる。

謝辞

本研究を行うにあたり、安全研究センターの宇田川 GL、垣内マネージャー、中村氏には、 FEMAXI-8の解析結果、軽水炉燃料の挙動についてご助言を頂きました。また、経営企画部 軽 水炉研究推進室の川西室長、加治研究専門官、原子力基礎工学研究センターの山下研究主幹に は、軽水炉燃料の挙動及び開発状況に関してご助言を頂きました。更に、大洗研究開発センタ ーの前田副所長には、高速炉 MOX 燃料に関してご助言を頂きました。ここに記して感謝申し 上げます。

参考文献

- 1)Generation IV International Form, GIF 2021 ANNUAL REPORT, https://www.gen-4.org/gif/(参照:2023年3月1日).
- 2)Y. Oka et al., "Plutonium breeding of light water cooled fast reactors", Journal of Nuclear Science and Technology, Vol.50, No.1, (2013) pp.15-20.
- 3)Pan Wu et al., "A review of existing SuperCritical Water reactor concepts, safety analysis codes and safety characteristics", Progress in Nuclear Energy, Vol.153, (2022) 104409.
- 4)日野哲士他,"原子力イノベーションを支える最新の新型炉開発の状況 4. 国内燃料サイクル 柔軟性拡大へ寄与する軽水冷却高速炉",日本原子力学会誌ATOMOΣ, Vol.64, No.3, (2022)
 pp.149-151.
- 5)K. Sakamoto et al., "Development of accident tolerant FeCrAl-ODS fuel cladding for BWRs in Japan", Journal of Nuclear Materials, Vol.557, (2021) 153276.
- 6)高野渉 他, "改良ステンレス鋼燃料被覆管の BWR 装荷に向けた研究開発(3)(2) MOX 炉 心の設計成立性",日本原子力学会 2018 年秋の大会 2D11, (2018).
- 7) 宇田川豊他, "燃料挙動解析コード FEMAXI-8の開発; 軽水炉燃料挙動モデルの改良と総合性能の検証" JAEA-Data/Code 2018-016, (2019), 79p.
- 8)生澤佳久 他,"Development of MOX fuel database", JAEA-Technology 2007-010, (2007), 44p.
- 9) 揃政敏 他, "高速実験炉「常陽」におけるオンライン計装照射技術", 日本原子力学会誌, Vol. 40, No.2, (1998), pp.124-134.
- 10) 吽野一郎 他, "「常陽」 MK-II 計測線付 C 型特殊燃料集合体 (PFI010) の照射後試験, 2 計測線付燃料要素の組織観察及び機器分析", PNC TN9410 89-188, (1989), 58p.
- 11) 鹿倉栄 他,"「常陽」 MK-II 炉心燃料の照射挙動",動燃技報, (86), pp.20-33, (1993).
- 12) 滑川卓志 他, "「常陽」 MK-II 炉心燃料集合体 (PFD010) の照射後試験 (2); 燃料ピン の破壊試験", PNC TN9410 86-142, (1986), 87p.
- 13) 谷賢 他, "「常陽」 MK-II 炉心燃料集合体(PFD029)の照射後試験; 燃料要素の破壊試験", PNC TN9410 88-185, (1988), 66p.
- 14)M. Inoue et al., "Power-to-Melts of Uranium-Plutonium Oxide Fuel Pins at a Beginning-of-Life Condition in the Experimental Fast Reactor JOYO", Journal of Nuclear Materials, Vol.323, (2003) pp.108-122.
- 15)K. Ohira and N. Itagaki., "Thermal Conductivity Measurements of High Burnup UO₂ Pellet and a Benchmark Calculation of Fuel Center Temperature", Proc. ANS Topical Meeting on Light Water Reactor Fuel Performance, Portland, U.S.A., (1997) pp.541-549.
- 16)J. Kamimura et al., "Thermal and Mechanical Behavior Modeling for High Burnup Fuel", Proc. of 2008 Water Reactor Fuel Performance Meeting, October, Seoul, Korea (2008) No.8118.

17)M. Kato et al., "Physical Properties and Irradiation Behavior Analysis of Np- and Am-Bearing MOX Fuels", Journal of Nuclear Science and Technology, Vol.48, No.4, (2011) pp.646-653.

18) 矢野康英 他, "CMIR-6 で照射した ODS 鋼被覆管の照射挙動評価", JAEA-Research 2013-030, (2013), 57p.

Table 2.1-1 Outline of validation data

1 Assembly No, 7 F1010,F10023,F10
 2 Assembly No ; P06,P2R
 3 Assembly No ; P06,F2R
 4 Inner diameter (E07)
 *5 UO₂ – Gd₂O₃Pellet (E09)
 *6 FEMAXI code calculated value

	Model	Јоуо	Fugen,HBWR
	Thermal conductivity	Ohira and Itagaki latest model for UO ₂ and MOX	
	Thermal expansion	Halden	
	Creep equation	MATPRO-09	
Pellet	Young's modulus	MATPRO-11	
	Poisson's ratio	MATPRO-11	
	Swelling model	Solid fission products swelling + gas bubble swelling	
	Densification	Modified Rolstad model:corrected based on Freshley's report	
	Thermal conductivity	SUS316(PNC)	MATPRO-09
	Specific heat	SUS316(PNC)	MATPRO-09
	Density	SUS316(PNC)	Zircaloy
	Thermal expansion	SUS316(PNC)	MATPRO-09
Cladding	Young's modulus	SUS316	MATPRO-A,11
	Poisson's ratio	SUS316	Fisher
	Creep equation	SUS316	FRAPCON-4.0 model, PNNL-19418
	Plasticity	SUS316	FRAPTRAN V1.4&FRAPCON3.4
	Irradiation growth equation	SUS316	MATPRO-09
Gap thermal conductance		Bonding model1(Mixture of UO ₂ +ZrO ₂ and open gapcon)	
	Gas release model	Matthew's and White's modela are combined and modified	
FP gas release	Intra-granular gas bubble model	HFPfGBM_active=T;CORTwBDRTA=T HFPfGBM_active:(T/F)(.true.:Griesmeyer-type intragranular gas bubble model,with multi bubble-size classes and dynamic time evolution:bubble number density and bubble size are fully treated as ODE variable);CORTwBDRTA:(T/F)(Bubble density update by ODE equation is stopped when bubble density is small,to stabilize ODE solver)	
	Grain growth model	Itoh(Modified Ainscough) The form of the equation is the same as in the Itou(Modified Ainscough) model, but the dose- dependent term is different.	

Table 2.1-1 Analysis model





Figure 2.1-2 Rod average burnup and maximum linear heat rate



Figure 3.1-1 Comparison between calculation results and measurements (Pellet center temperature)



Figure 3.1-2 Comparison between Calculation results and measurements (Pellet center temperature on B5D2 irradiation test)



Figure 3.1-3 Temperature dependence of MOX pellet thermal conductivity



Burnup (GWd/t)

Figure 3.2-2 Burnup change of the ratio of calculated and measured (Fission gas release)



measurements (Plenum pressure)



Figure 3.2-4 Burnup change of the ratio of calculated and measured (Plenum pressure)



Figure 3.3-1 Fast neutron fluence and swelling of CMIR-irradiated material¹⁸⁾





付 録1

HBWR IFA529 Rod-12の燃料中心温度(燃料温度)データの取り扱いについて

Figure A-1 には、今回の検証の対象外とした HBWR IFA529 Rod-12 も含めた燃料中心温度 (燃料温度)の計算値と実測値の比較を示す。図に示すように HBWR IFA529 Rod-12 は、他 のデータと比較し燃料中心温度 (燃料温度)を過大評価している。Figure A-2 には製造時の被 覆管内径とペレット被覆管直径ギャップ幅の関係を示すが、HBWR IFA529 Rod-12 はペレッ ト被覆管直径ギャップ幅が 330 µ m である。同図には PWR 燃料、BWR 燃料の一般的な仕様 範囲 A-10も示しているが、これらと比べて HBWR IFA529 Rod-12 のペレット被覆管直径ギャ ップ幅は幅広となっている。HBWR IFA529 Rod-12 の計算値が過大評価する原因の一つに、 ワイドギャップでのギャップコンダクタンスの評価値に課題があるものと考えられる。HBWR IFA529 Rod-12 のデータは、ワイドギャップを対象としたギャップコンダクタンスモデルの開 発においては有用なデータであると考えられる。しかしながら、現行の軽水炉燃料仕様と比べ 著しく幅広であり、今後ギャップ幅が拡大するような燃料開発は無いものと考えられることか ら、ワイドギャップのギャップコンダクタンスモデルの開発の要求も低いものと考えられる。 更に、本研究のスコープは FEMAXI-8 の高 Pu 含有率燃料、ステンレス鋼製被覆管及び高燃焼 度燃料への適用性の検討であり、ギャップコンダクタンスモデルの改良を主としていないため、 HBWR IFA529 Rod-12 のデータは本検証の対象外とした。

参考文献

A-1)科学技術庁原子力安全局原子力安全調查室(監修),改訂11版原子力安全委員会安全審查指針集,大成出版(2003) p.906.



Figure A-1 Comparison between calculation results and measurements (Pellet center temperature)



Figure A-2 Pellet-cladding diameter gap and cladding inner diameter

付 録 2

推奨 Namelist 一覧(詳細は参考文献 7)を参照)

推奨 Namelist 一覧(1/6)
ADDF = 0,
AMU2 = 0.02,
APORE = 1,
BDX = 10000.,
BETAX = 0.005,
BURMXE = 68.493,
CRFAC = 1.0,
CRPEQ = 7,
$Cbub_hbs_cm3 = 1.3d11,$
DDSIGE = 3,
DTPL = 0.0,
DT_OUT = 96,
ECRAC3(1) = 2d8,
ECRAC3(2) = 2d8,
ECRAC3(3) = 2d8,
EFAC = 1.0,
EPSRLZ = 0.000000,
$Efac_{RTZ}(2) = 1.0,$
FACD = 1,
FACLNR(1) = 1.0,
FACLNR(2) = 1.0,
FACLNR(3) = 1.0,
FACLNR(4) = 1.0,
FACLNR(5) = 0.5,
FACXI(1) = 0.01,
FACXI(2) = 1.0,
FACXI(3) = 1.0,
FACXI(4) = 1.0,
FACXI(5) = 1.0,
FACXO(1) = 0.01,
FACXO(2) = 1.0,
FACXO(3) = 1.0,
FACXO(4) = 1.0,
FACXO(5) = 1.0,
FBONDG = 10,

推奨 Namelist 一覧 (2/6)

```
FCRFAC = 1.0,
FPINF = 0.25,
FRELOC = -3.010,
FRMIN = 0,
FSIGM = 1.0,
F_{disl_punch} = 0.70,
GBFIS = 41,
GEN1 = 0.0146,
GEN2 = 0.0584,
GGIDCbugfix = 1,
GRWF = 1.0,
HBS = 14,
HER = 1,
IBOND = 2,
ICAGRW = 1,
ICATHX = 0,
ICFL = 1,
ICONP = 3,
ICRP = 1,
IDCNST = 13,
IDENSF = 11,
IDSELM = 1,
IELAST = 4,
IFEMOP = 2,
IFEMRD = 1,
IFSWEL = 16,
IGAPCN = 5,
IGASP = 3,
IGRAIN = 6,
IHOT = 1,
IPCRP = 2,
IPEXT = 20,
IPLOPT = -1,
IPLYG = 2,
IPOIS = 30,
IPRO = 3,
IPTHCN = 91,
```

推奨 Namelist 一覧 (3/6)

```
IPTHEX = 1,
IPUGH = 1,
ISHAPE = 1,
ISIGE = 14,
ISIGE2 = 0,
ISPH = 1,
IST = 1,
I HOLD AX EMOD TENSILE = 1,
K1 = 2,
KON1 = 2.0d-11,
MATLNR = 1,
MATXI = 1,
MATXO = 1,
NL DCGAC(1) = 1.0d+1,
NL DCGAC(2) = 4.7,
NL DCGAC(3) = 1.0d-20,
NL DCGAC(4) = 0.6,
NL DCGAC(5) = 1.0d-21,
NL DCGAC(6) = 0.3,
NL DGC bu eff 1 = 1.3,
NL DGC bu eff 2 = 0.0008,
NL DGC cutoff CTE um = 0.5,
NL DIRECT OUTPUT TO CSV = 2,
NL FCRate UL s = 300.0d0,
NL F DP rate(1) = 1.0d-7,
NL F DP rate(2) = 1,
NL F DP rate(3) = 3.5d7,
NL_F_DP_rate(4) = 0.2d0,
NL F DP rate(5) = 1.1d-10,
NL F ITBT(1) = -2000,
NL F ITBT(2) = 3.0,
NL F ITBT(3) = 1.0,
NL GBGS ANIS PARAM(1) = 1d-20,
NL GBMT I PARAM(1) = 43,
NL GBMT I PARAM(2) = 3,
NL GBMT I PARAM(3) = 4,
NL GBMT PARAM(1) = 0.7,
```

推奨 Namelist 一覧 (4/6)

推奨 Namelist 一覧(5/6)

NL ITRG PARAM(16) = 2.0d7, NL ITRG PARAM(17) = 0.0, NL ITRG PARAM(25) = 20.0, NL ITRG PARAM(3) = 1023, NL ITRG PARAM(4) = 1903, NL ITRG PARAM(5) = 0.068, NL ITRG PARAM(6) = 0.06, NL ITRG PARAM(7) = 0.35, NL ITRG PARAM(8) = 0.40, NL ITRG PARAM(9) = 1.0, NL LHR ICG W cm = 200, NL MCRLC ORDER = 10, NL MR frac as internal crack = 0.4, NL PCFD BR = 40, NL SDFV(1) = 85.0d0, NL SDFV(2) = 1.0d2, NL SLCF Tactive K = 1273.15, NL SOBcutoff Pa = 1d6, NL STTD(3) = 15d6, NL TAGCMC = 1, NL Tbound2 K = 1300, NL check consistency fric eff = 1, NL crack level = 1, NL dishmodel option = 12, NL f above Tbound2 = 4.5, NL f str creep ref = 1.0, NL fcrp param(6) = 0.503271, NL friccoef max = 0.4, NL i str creep ref = 2, NL mcrlc recov = 1, NL mechcalc at convergence = -1, NL stress low cutoff fcreep MPa(1) = 50.0, NL stress low cutoff fcreep MPa(2) = 100.0, NL tilt angle rad = 0, NODEG = 2, NRCOX2 = 0, PX = 99.0,

```
推奨 Namelist 一覧 (6/6)
```

```
R1 = 0.1,
R2 = 0.5,
RFGFAC = 1.0,
RF cm = 0.00005,
RIMSWL = 1,
RMOGR = 2,
RMPST = -1,
R FS cm = 1.0d-7,
SBONDG = 0.01,
TCS = 1773.15,
TSTD = 750,
XKSU = 1500.0,
bufsp = 0.1,
dt redo Llim hr = 0.000000003,
f_BRF_reduc(2) = 5000,
f rel param(1) = 0.00016,
f rel param(10) = 0.14,
f rel param(12) = 1120,
f rel param(13) = 200,
f rel param(2) = 0.0012,
f rel param(3) = 0.0025,
f rel param(4) = 270,
f rel param(5) = 1.0,
f rel param(6) = 0.12,
f rel param(7) = 0,
f rel param(8) = 1.1,
f rel param(9) = 0.0005,
gbthick_fgr_model = 0,
i_stoich_crct = 1,
iyng = 13,
izyg_oxygen_effect = 0,
mesh = 11,
```