

小型モジュール炉燃料の高燃焼度化に向けた燃料ふるまい解析

松浦 敬三^{*1}, 原子 愛唯^{*1}

Nuclear Fuel Behavior Analysis considering burnup extension for small modular reactor

Keizo MATSUURA^{*1} and Ai HARAKO

^{*1} Faculty of Engineering, Department of Applied Nuclear Technology

Recently, small modular reactor (SMR) has been attracting attention in many countries. This is the reason why SMR has less initial investment of building reactor and less potential risks in accidental condition than conventional large scale LWRs. One of characteristics of SMR is that their simple structure of reactor and plant system. So, the cost of operation and maintenance is low. This SMR design concept is relating with fuel management. The fuel enrichment and burnup will increase. But we have less knowledge of high burnup fuel behavior. So, in this study, we have paid attention to the SMR fuel behavior in high burnup condition. We used fuel behavior analysis code FEMAXI-8 and analyzed SMR fuel behavior in high burnup condition. The analysis result showed that SMR fuel has little problem in corrosion because of lower rod surface temperature but inner gas pressure has increased very much in 120GWd/tU twice as much as current Light Water Reactor fuel because of high Fission Gas Release (FGR) in high burnup condition.

Key Words : SMR, Fuel behavior, High burnup, FGR

1. 緒 言

近年, 世界各国で小型モジュール炉 (SMR : Small Modular Reactor) の開発が進められている⁽¹⁾. その背景には, 福島事故後を受けた, 大型炉に対する事故対策による初期投資の増大や潜在的な事故リスクの低減要求がある. 小型モジュール炉は, プラント構造を簡素化・モジュール化することで, 建設現場での作業を大幅に削減し, 建設工期やコストを低減することで初期投資を抑え, 短期間に回収を可能としている. 一方で, 建設後の出力増加の要求に対しても, 後からモジュールを追加することで容易に対応できる. また, 潜在的な事故リスクの低減要求に対しては, 小型モジュール炉は, 概ね電気出力が 30 万 kW 以下と小さいため, 事故後の崩壊熱が小さいこと, 炉心自体がプールで冷却される構造となっていること等により, 炉心が熔融するような事故が原理的に起こりえないことで応えている.

小型モジュール炉は, 上記要求に加えて, 小型化や構造の簡素化によるメンテナンスの容易さなどから, 電力網の設置が困難な遠隔地域における電源や熱源として期待されている. また, 地球温暖化防止のために再生可能エネルギーの利用が今後増大していくと予想されるが, 再生可能エネルギーは天候などの自然現象に左右されるため, 従来はこの変動分を火力発電によって調整してきた. しかし火力発電所もゼロカーボン社会への移行のため, 今後廃止されている方向である. このため, 発電量調整の役割を原子力発電が担うことが望まれるが, 大型炉の場合, 短時間に出力を低下させると, 熱中性子吸収断面積が大きいキセノンの増加による反応度低下から, しばらく出力を上げられなくなる特性がある. この問題点は, 炉心の出力を小さくすることによりキセノン増加量を抑えることにより改善されるため, この点からも小型モジュール炉の導入が期待されている.

以上のように開発が期待されている小型モジュール炉であるが, その基本的な設計理念の一つである運転やメンテナンスの容易さにより燃料の取替頻度を少なくし長期運転することが必要とされる. このためには, 燃料の

* 原稿受付 2022 年 5 月 6 日

^{*1} 工学部 原子力技術応用工学科

E-mail: matsuuura-k@fukui-ut.ac.jp

濃縮度を上げ、高燃焼度化を実現する必要がある。実際、米国においては、小型モジュール炉の開発にともない、5wt%~20wt%の中濃縮度燃料である HALEU 燃料 (High-Assay Low Enriched Uranium Fuel) の供給が要望されており、一部に試験的に中濃縮度ウランの生産が試みられている⁽²⁾。しかし、HALEU 燃料のような従来燃料に比べて濃縮度の高い燃料の高燃焼度時における燃料ふるまいについての検討は、まだ十分なされていないのが現状である。そこで、本論文では、現在米国において運用開始が最も早くなされると考えられている小型モジュール炉、NPM (NuScale Power Module) の基本となった Fig. 1 に炉心設計概念図を示す MASLWR⁽³⁾ (Multi-Application Small Light Water Reactor) を対象として、HALEU 燃料の高燃焼度時の燃料ふるまい解析を行い、その問題点および課題を明確にする。具体的には、まず現行運用されている燃料の燃料棒平均最高燃焼度程度である 60Gwd/tU の条件で PWR 燃料と SMR 燃料の燃料ふるまい解析を行い PWR 燃料に対する SMR 燃料のふるまいの特徴を明確にする。次にその特徴を踏まえた上で SMR に必要とされる高燃焼度化における課題を明確にするために 120Gwd/tU の高燃焼度時のふるまい解析を行うこととした。なお、本論文では、以降この MASLWR のことを SMR と称することとする。

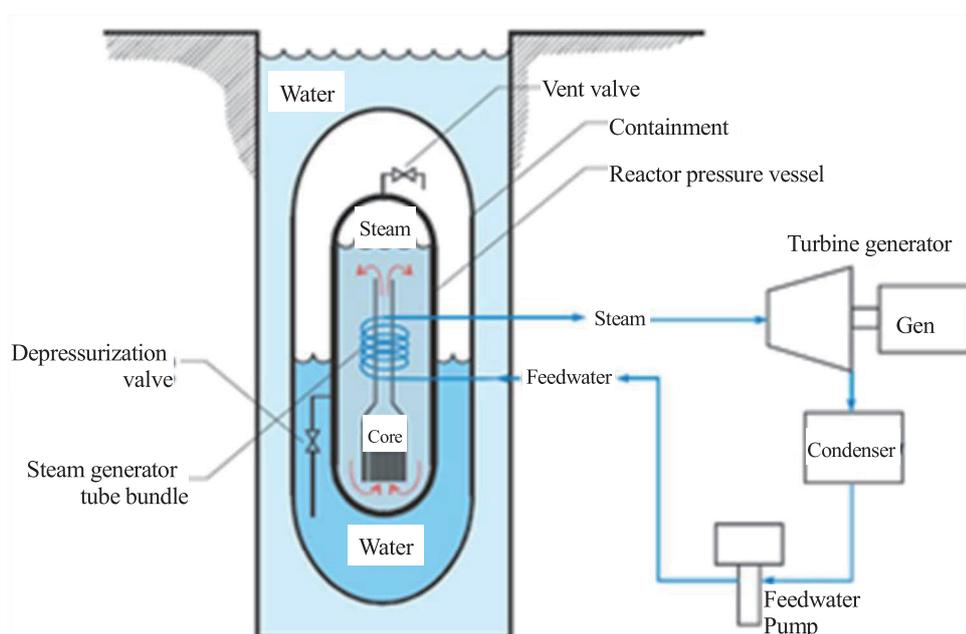


Fig. 1 The core concept of MASLWR

2. 解析方法

2.1 使用コードについて

本研究では、日本原子力研究開発機構(JAEA)で開発されている FEMAXI-8⁽⁴⁾⁽⁵⁾を用いて燃料のふるまいを計算する。FEMAXI コードは JAEA が中心となり開発したコードであり、FEMAXI-I(1974)を最初に継続的に改良がなされており、FEMAXI-8 はその最新版である。

FEMAXI-8 は Fig. 2 に解析全体の流れを示すように、熱的挙動を解析する部分と力学的挙動を解析する部分から構成されている。熱的解析部は、Fig. 3 のような燃料棒全長の各セグメントにおいて温度分布やガス圧力を径方向 1 次元軸対称 (円筒座標系) 問題として扱い、Fig. 4 のようにペレット・被覆管のギャップ幅変化、核分裂生成物 (FP: Fission Product) ガス放出モデル、軸方向ガス流動およびこれらのギャップ熱伝達へのフィードバックを考慮して解析する。

全長力学的解析部では、まず熱膨張、焼きしまり、スエリングおよび、ペレットのリロケーションによる初期ひずみを計算し、ペレットの割れ、弾塑性およびクリープを考慮して剛性方程式を作成し、接触モードに対応する境界条件を仮定して剛性方程式を解くことにより、応力やひずみを求める。

熱的解析部とこの全長力学解析部は連成しており、一つのタイムステップ内において反復繰り返し計算により温度と変形の収束値を求める。

また、燃焼計算コード PLUTON[®]を FEMAXI-8 と連携して使用することで、与えられた燃料サイズ、形状、温度、出力履歴から、燃料棒の半径方向の出力密度プロファイル、燃焼度プロファイル、高速中性子束、その他 FP 元素生成分布などを正確かつ高速に算出し、出力ファイルを生成する。

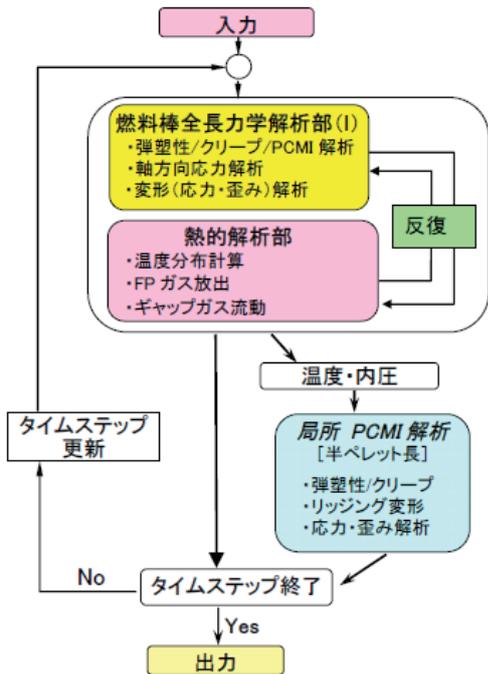


Fig. 2 FEMAXI code analysis flow⁽⁵⁾

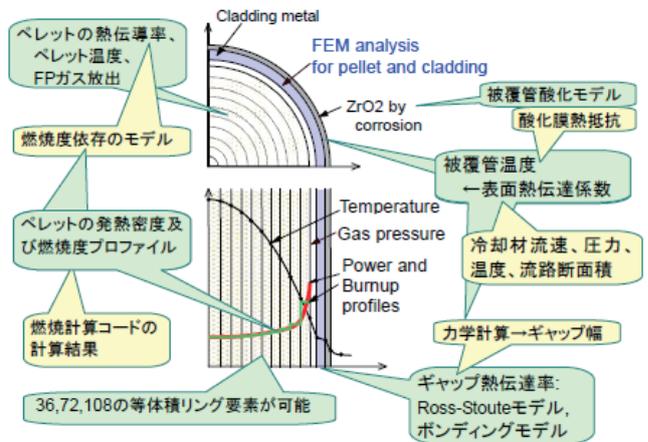


Fig. 3 FEMAXI code model interrelationship⁽⁵⁾

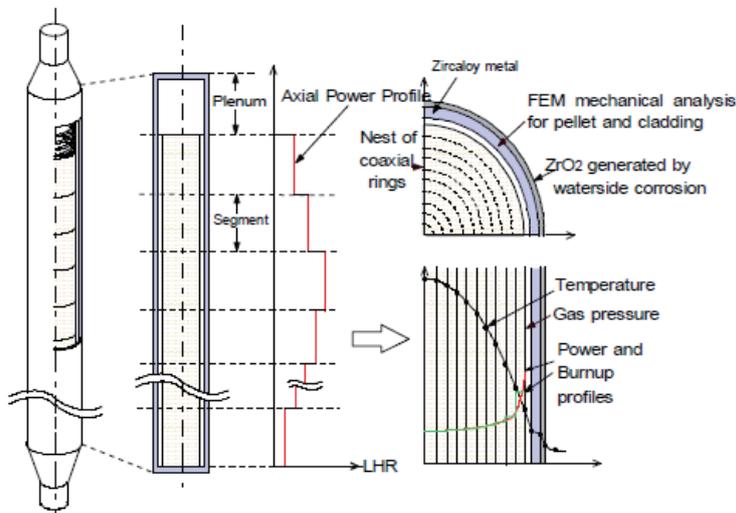


Fig. 4 FEMAXI code analysis system⁽⁵⁾

2.2 現行 PWR 燃料と SMR 燃料のふるまいの比較

本節では、現行加圧水型炉（PWR：Pressurized Water Reactor）燃料と SMR 燃料のふるまいの比較を行うために用いる FEMAXI-8 コードの入力値の設定について述べる。Table 1 に現行 PWR 燃料の入力データ及びその設定根拠について示す。入力データの設定については、主に国内原子炉の設置許可変更申請書⁽⁷⁾および燃料メーカーの燃料体設計認可申請書⁽⁸⁾を参考に設定した。また、これらの文献で記載されていないプレナム初期圧力等の入力データについては、燃料寿命末期まで燃料健全性評価項目の値が問題とならないよう調整するなどして設定した。Table 2 には SMR 燃料の入力データ及びその設定根拠について示す。SMR 燃料の場合、MASLWR の概念設計報告書⁽³⁾及び NuScale 社が米国原子力規制委員会（NRC：Nuclear Regulatory Commission）に提出した NuScale Power Module の設計審査資料⁽⁹⁾を参考に設定した。

2.3 SMR 燃料高燃焼度時のふるまい

SMR を現行 PWR 燃料棒平均制限燃焼度の約 2 倍である燃焼度 120GWd/tU まで燃焼させ、高燃焼度化における SMR 燃料の問題及びふるまい解析におけるモデルの課題を明確化する。2.2 で設定した入力データの内、計算燃焼度のみを変更する。

Table 1 FEMAXI-8 input data for current PWR fuel

Input item	Input data	Reason or Reference
Axial segment number	21	Maximum number which can be calculated stable
Cladding material	Zry-4 (low Sn)	Ref. (8)
Cladding outer diameter [mm]	9.50	Ref. (8)
Cladding inner diameter [mm]	8.36	Ref. (8)
Active length [mm]	3648	Ref. (8)
Pellet diameter[mm]	8.19	Ref. (8)
Pellet length[mm]	9.5	Ref. (8)
Enrichment [%]	4.8	Ref. (8)
Theoretical density [%TD]	97.0	Ref. (8)
Dish diameter[cm]	0.6734	Ref. (4)
Dish depth [cm]	0.0343	Ref. (4)
Dish bottom diameter [cm]	0	Ref. (4)
Chamfer width [cm]	0.0001	Ref. (4)
Chamfer depth [cm]	0.0001	Ref. (4)
Plenum volume [mm ³]	10.978	Calculated using inner cladding diameter and 200mm plenum length assumed by total fuel rod length, active fuel length and end plug length in reference to ref. (8)
Initial plenum pressure [MPa]	3	Decided by the calculated EOL inner pressure which is less than primary coolant pressure
Analysis burnup [MWd/tU]	60000	Decided in reference to the maximum fuel burnup of ref. (8)
Fuel rod LHR [W/cm]	171	Ref. (8)
Fast neutron flux [$n / (cm^2 \cdot s)$]	5×10^{13}	Decided in reference to PWR fast neutron flux
Inlet coolant temperature [°C]	289	Ref. (7)
Primary coolant pressure [MPa]	15.5	Ref. (7)
Core coolant velocity [m/s]	4.7	Ref. (7)
Relative axial power distribution	Uniform	—
Radial power distribution	—	Calculated by PLUTON program

Table 2 FEMAXI-8 input data for SMR fuel

Input item	Input data	Reason or Reference
Axial segment number	21	Maximum number which can be calculated stable
Cladding material	Zry-4	Ref. (3)
Cladding outer diameter [mm]	9.522	Ref. (3)
Cladding inner diameter [mm]	8.379	Ref. (3)
Active length [mm]	1350	Ref. (3)
Pellet diameter[mm]	8.153	Ref. (9)
Pellet length[mm]	10.36	Ref. (9)
Enrichment [%]	8	Ref. (3)
Theoretical density [%TD]	96	Ref. (9)
Dish diameter[cm]	0.6734	Ref. (4)
Dish depth [cm]	0.0343	Ref. (4)
Dish bottom diameter [cm]	0	Ref. (4)
Chamfer width [cm]	0.0001	Ref. (4)
Chamfer depth [cm]	0.0001	Ref. (4)
Plenum volume [mm ³]	3.659	Decided in reference to PWR plenum volume
Initial plenum pressure [MPa]	0.5	Decided by the calculated EOL inner pressure
Analysis burnup [MWd/tU]	120000	Decide in reference to PWR maximum fuel rod burnup
Fuel rod LHR [W/cm]	175	Decided in reference to NuScale, NPM application for design approval
Fast neutron flux [n / (cm ² · s)]	5.0×10^{13}	Decided in reference to PWR fast neutron flux
Inlet coolant temperature [°C]	216.6	Decided in reference to NuScale, NPM application for design approval
Primary coolant pressure [MPa]	8.6	Decided in reference to NuScale, NPM application for design approval
Core coolant velocity [m/s]	0.825	Decided in reference to NuScale, NPM application for design approval
Relative axial power distribution	Uniform distribution	—
Radial power distribution	—	Calculated by PLUTON program

3. 解析結果

3.1 現行 PWR 燃料との SMR 燃料のふるまい比較

燃料のふるまいを表す主要な物理量として、FP ガス放出率、燃料棒内圧、被覆管外面温度、ペレット中心温度、被覆管外面酸化膜厚さ、ペレット外径と被覆管内径、被覆管相当応力、被覆管降伏応力の 60GWd/tU までのふるまいについて以下に図示する。

燃料棒内圧、ペレット中心温度、酸化膜厚さ、被覆管相当応力・被覆管降伏応力については燃料健全性評価の項目として燃料寿命末期 (EOL : End of Life) の値を PWR と SMR をそれぞれ比較し、Table 3 として示す。

表の値は、燃料を 21 分割した際の 21 セグメント(燃料上部)での値を示しており、Fig. 8 では第 11 セグメント(燃料中部)を抽出して図示している。

Fig. 5 に FP ガス放出率を示す。燃焼末期において、現行 PWR 燃料と SMR 燃料両者ともに約 0.03% の FP ガス放出率を示している。Fig. 6 に燃料棒内圧を示す。燃焼末期において現行 PWR が 6MPa であるのに対して、SMR 燃料は 2MPa と低い値となっている。Fig. 7 に被覆管表面温度を示す。燃焼末期において SMR 燃料の被覆

管表面温度は、現行 PWR 燃料と比べると約 20°C低い結果となっている。Fig. 8 にペレット中心温度を示す。現行 PWR 及び SMR 燃料ともに燃焼初期に約 750°Cから徐々に増加して、両者ともに燃焼末期において約 900°Cとなっている。Fig. 9 に被覆管外面酸化膜厚さを示す。燃焼末期において、両者のふるまいは大きく異なり、現行 PWR 燃料が約 70 μm を示し、SMR 燃料は 7 μm と大きく異なっている。Fig. 10 に被覆管内径とペレット外径の変化を示す。両者のふるまいは異なり、現行 PWR 燃料は燃焼中期に被覆管とペレットは接触しているものの、SMR 燃料は燃焼末期に被覆管とペレットが接触しているのがわかる。Fig. 11 に被覆管相当応力と被覆管降伏応力を示す。両者は燃焼中似たふるまいを示しているものの、現行 PWR 燃料については、ペレットと被覆管が接触した後に一旦被覆管相当応力の低下が見られる。ペレットと被覆管の接触した後に応力低下が起こっている。

Table 3 Comparison of EOL (61GWd/tU) analysis results between SMR and PWR

Analysis items	SMR	PWR
Inner pressure (MPa)	2	6
Pellet center temperature(°C)	900	901
Oxide thickness (μm)	7	74
Cladding equivalent stress (MPa)	60	55
Cladding yield strength (MPa)	339	328
FGR(%)	0.029	0.26
Cladding surface temperature(°C)	302	324
Cladding inner diameter [mm]	8.34	8.36
Cladding outer diameter [mm]	8.34	8.36

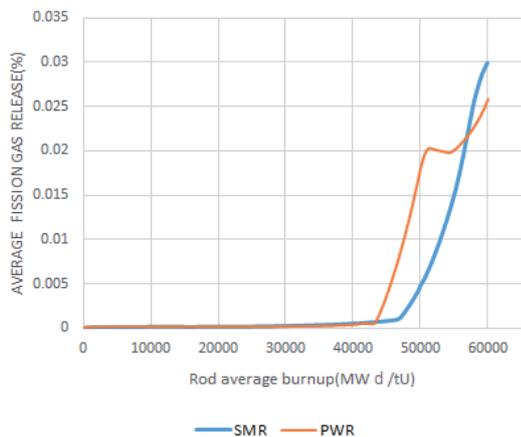


Fig. 5 FP gas release rate

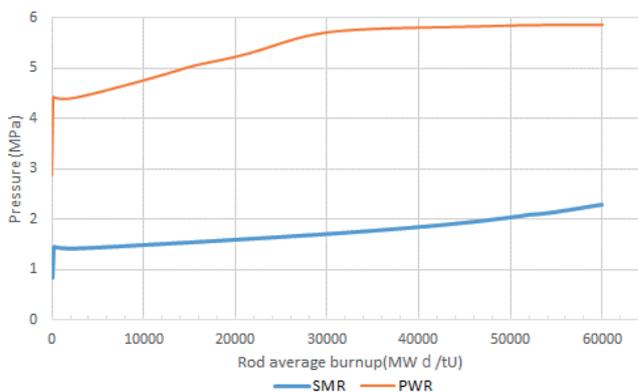


Fig. 6 Rod inner pressure

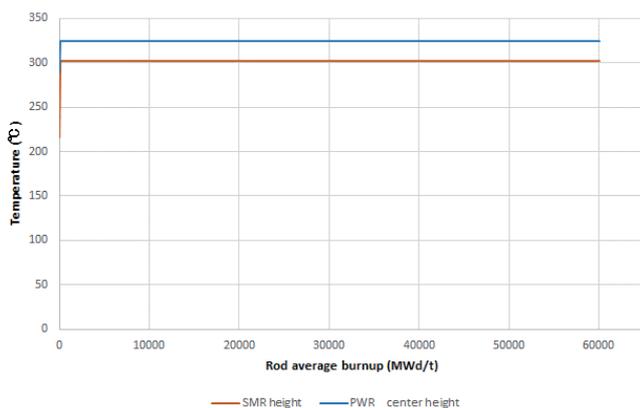


Fig. 7 Rod surface temperature

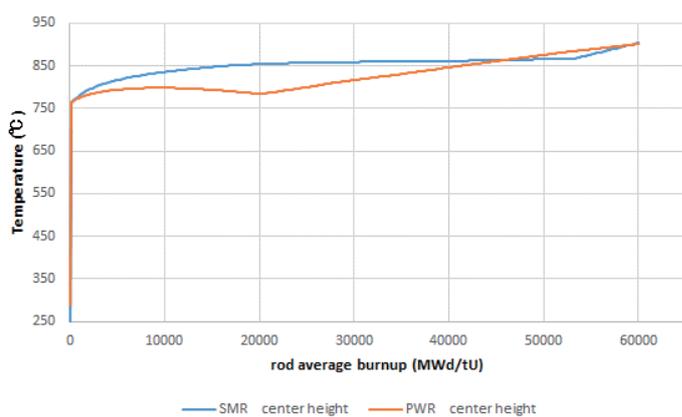


Fig. 8 Pellet center temperature

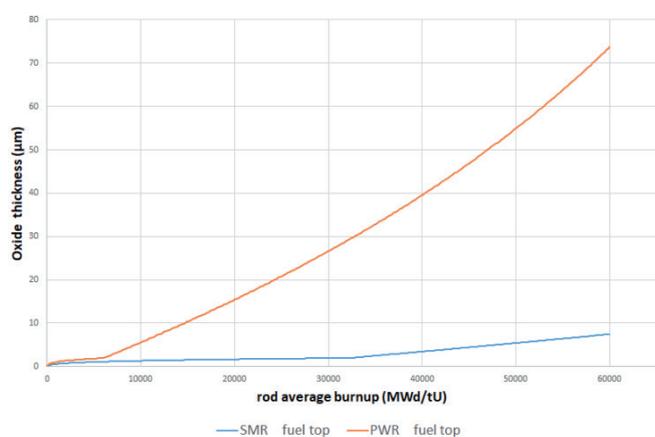


Fig. 9 Rod oxide thickness



Fig. 10 Rod and pellet diameter

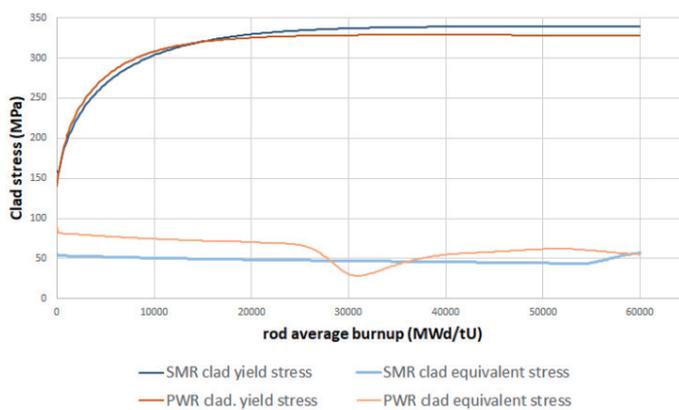


Fig. 11 Rod stress

3.2 SMR 燃料の高燃焼度時のふるまい

燃焼末期（120GWd/tU）における健全性評価の項目の解析結果について Table 4 に示す。また、燃料のふるまいとして、FP ガス放出率、燃料棒内圧、被覆管外面温度、ペレット中心温度、被覆管外面酸化膜厚さ、ペレット外径と被覆管内径、被覆管相当応力・被覆管降伏応力について 120GWd/tU まで燃焼させたふるまいを図示する。

Fig.12 に FP ガス放出率について示す。燃焼度が 80GWd/tU 以上において FP ガス放出率の急激な増加が見られ、寿命末期において約 11% となっている。Fig.13 に燃料棒内圧を示す。FP ガス放出率の増加に伴って、燃料棒内圧が燃焼度後期に増大しており、120GWd/tU 時点で 1 次冷却材圧力より高い 18MPa に達している。Fig.14 に被覆管表面温度を示す。寿命中大きな変化はない。Fig.15 にペレット中心温度を示す。ペレットの被覆管が接触したと考えられる時期にペレット中心温度が増加の方向に転じている。Fig.16 に酸化膜厚さを示す。30GWd/tU 付近に腐食の遷移点があり、それ以降腐食速度が増加しているが、120GWd/tU においても約 21 μ m であり、現行軽水炉燃料の腐食量と比べても十分小さい。Fig.17 に被覆管内径とペレット外径変化を示す。60GWd/tU 付近で被覆管とペレットは接触しているが、120GWd/tU まで接触が維持されておりサーマルフィードバックは発生していないと考える。Fig.18 に被覆管相当応力を示す。60GWd/tU 以降に被覆管相当応力の増加が見られるものの EOL においても 200Pa 程度であり被覆管降伏応力に比べて十分小さい。

Table 4 SMR fuel behavior in EOL

Analysis item	Analysis result
Rod inner pressure (MPa)	18
Pellet center temperature(°C)	1139
Cladding oxide thickness (μ m)	21
Cladding equivalent stress (MPa)	339
Cladding yield stress (MPa)	191
FP gas release rate (%)	11
Cladding surface temperature (°C)	302

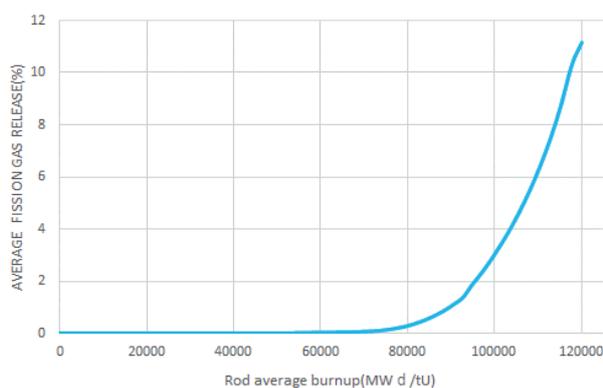


Fig.12 FP gas release rate

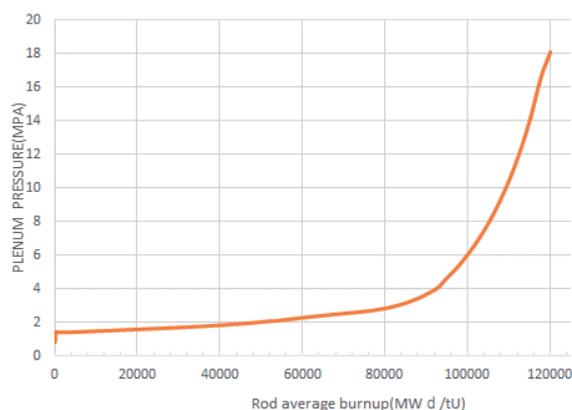


Fig.13 Rod inner pressure

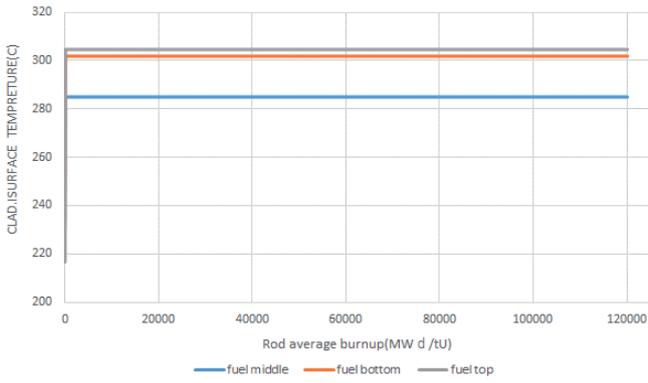


Fig.14 Rod surface temperature

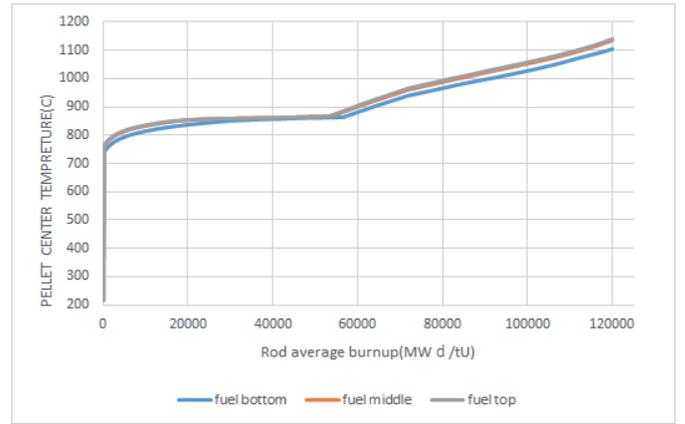


Fig.15 Pellet center temperature

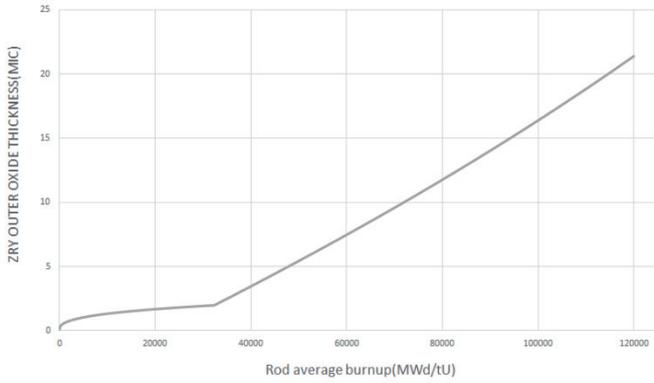


Fig.16 Rod oxide thickness

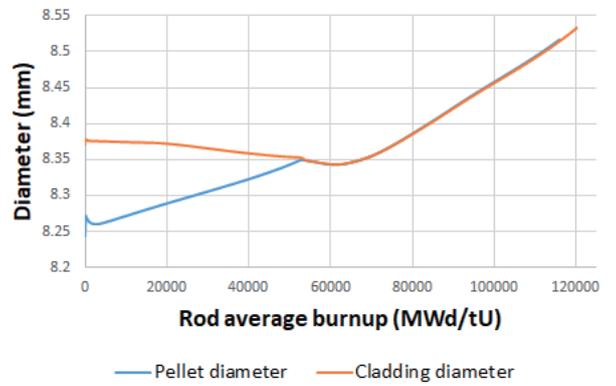


Fig.17 Rod and pellet diameter

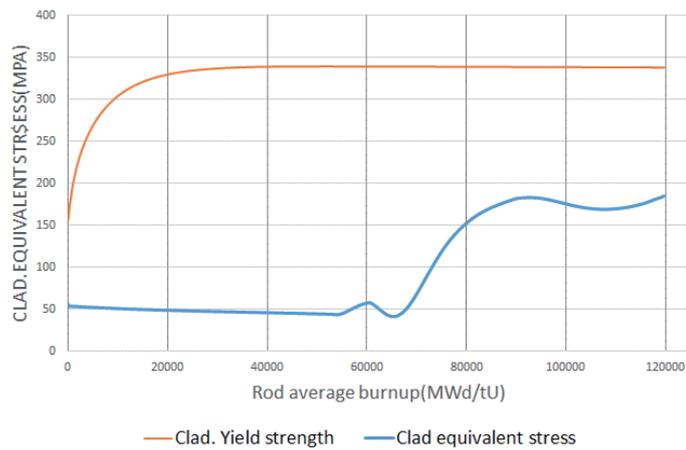


Fig. 18 Rod.stress

4. 考察

4.1 現行 PWR 燃料と SMR 燃料のふるまいの比較

FP ガス放出率は、現行 PWR と SMR とともに約 0.03% と非常に小さい値となっていること及び、燃料中心温度が燃焼末期に 900°C 程度であり、ペレット温度も高くないことから、FP ガス放出率のメカニズムとしては、反跳・はじき出しの領域と考える。燃料棒内圧は、現行 PWR 燃料が 6MPa であるのに対して SMR 燃料は 2MPa となっている。これは、現行 PWR 燃料のペレット被覆管ギャップが 170 μm であるのに対して SMR 燃料のペレット被覆管ギャップが 226 μm と大きいことによると考える。このギャップの大きさの違いにより現行 PWR 燃料におけるペレットと被覆管の接触時期が SMR より大幅に早く燃料棒内の自由体積減少が早くなったため燃料棒内圧増加が大きかったものと考えられる。被覆管表面温度は、冷却材炉心入口温度と炉心流速で考える。現行 PWR 燃料は 289°C、4.7m/s であるのに対して、SMR 燃料は 216.6°C・0.825m/s となっている。入口温度で約 70°C の差があるが、炉心流速が遅いため被覆管表面での熱伝達率は小さく被覆管表面での温度上昇は SMR 燃料の方が大きいものの、全体として入口温度の違いの影響が大きく、現行 PWR 燃料の被覆管表面温度が約 20°C 高くなった。この 20°C の違いは、腐食に対しては大きく現行 PWR 酸化膜厚さが 74 μm であるのに対して SMR 燃料は 7 μm と小さい。ペレット中心温度については、両者の違いは大きくない。これは被覆管表面温度に差異があったもののギャップコンダクタンスが SMR 燃料の方が小さいため、全体としてはペレット中心温度にあまり差異のない結果となったと考える。被覆管応力については、現行 PWR 燃料の方が大きめとなっているがペレットとの接触時期で一時的に応力が低下している。これは、接触時期におけるリロケーションのつづれにより応力の低下が起こったものと考えられる。

以上より、現行 PWR 燃料と SMR 燃料の設計の違いとして、ペレット被覆管ギャップと冷却材入口温度の違いがあり、SMR 燃料は現行 PWR に比べ燃焼末期において設計の余裕が大きく更なる高燃焼度化の可能性があると判断できる。

4.2 SMR の高燃焼度時のふるまい

FP ガス放出率は、80GWd/tU を超えてから急激に増加して燃焼末期において約 11% に達している。燃料中心温度に着目すると 80GWd/tU 付近から燃料中心温度は約 1000°C となり FP ガス放出率のメカニズムも反跳・はじき出しから拡散機構に変化したことと、さらなる燃料中心温度の増加により FP ガスの急激な増加になったと考える。燃料棒内圧は、燃焼末期において約 18MPa になっているが、これは先に説明した FP ガス放出率急激な増加に加えて、ペレット被覆管接触による燃料棒内自由体積の減少によると考える。一方、SMR 燃料の場合、1 次冷却材圧力は 8.6MPa に対して内圧が 18MPa となっているので被覆管のクリープアウトによりサーマルフィードバックを起こしている可能性が考えられたが、120GWd/tU においてもペレットと被覆管のギャップは閉じたままでありサーマルフィードバックは発生していないと考える。燃料中心温度は、燃焼末期において約 1150°C に達しているが、60GWd/tU 程度までは一定値で推移していたが、60GWd/tU より少し前からペレット中心温度が増加している。この少し前から被覆管酸化膜厚さの増加がある。この増加はペレット中心温度の増加につながる。また、FP ガス放出率の増加は、ギャップコンダクタンスの低下となるため、FP ガス放出率も 80GWd/tU を超えてから増えている。以上の現象が重畳して燃料中心温度の増加が見られたと考える。被覆管酸化膜厚さは、燃焼末期においても 21 μm と小さい値を維持している。被覆管酸化は酸化により被覆管金属部分が減肉し被覆管強度の低下が起こるため、元々の被覆管肉厚の 10% 減を設計の目安として考えている。現行 PWR 燃料被覆管では、この値が酸化膜厚さで 95 μm であるので酸化膜厚さについては十分小さく問題ない状況となっている。

SMR 燃料の高燃焼度時のふるまいについて総合的に判断すると、燃料中心温度、酸化膜厚さなどは問題のないレベルであったが、内圧についてはサーマルフィードバックが発生していないものの 1 次冷却材圧力と大きな圧力差があることを考えると、いつサーマルフィードバックが発生しても不思議ではないと考える。このことから、今回の設計では解析結果からみると現行設計のままでは、120GWd/tU までの高燃焼

度化は難しいと考えるが、今回の解析では、特に物理モデルの見直しをせずに解析を実施しているため、内圧に影響する FP ガス放出モデルについて精緻に検討することが必要と考える。

5. 結論

本研究の目的は、SMR 燃料の実現性を確認するため SMR 燃料と現行 PWR 燃料のふるまい解析を行い両者燃料の違いを理解するとともに、更なる高燃焼度解析を行い高燃焼度化における SMR 燃料の問題およびふるまい解析におけるモデルの課題を明確にすることであった。その結果、SMR 燃料のさらなる高燃焼度化が可能であることを確認できた。

一方で、120GWd/tU までの解析を実施することで、FP ガス放出による燃料棒内圧が燃料健全性上の問題となる可能性があることが確認された。ただし、FP ガス放出モデルについては適用範囲を超えての使用での解析であるので、今後特に FP ガス放出モデルの適用範囲の拡大、精度向上が SMR 燃料の高燃焼度化に必要であることを明確にすることができた。

参考文献

- (1) 山路哲史, “世界における SMR 開発事情の考察”, エネルギーレビュー, Vol.41, No.12(2021), pp.7-10.
- (2) 原子力産業新聞, “米規制委, セントラス社の HALEU 燃料製造で最大 20%のウラン濃縮を許可”, <https://www.jaif.or.jp/journal/oversea/8663.html> (参照日 2022 年 5 月 5 日) .
- (3) S. M. Modro, J. E. Fisher, K.D. Weaver, J. N. Reyes, Jr., J. T. Groome, P. Babka, T. M. Carlson, Multi-Application Small Light Water Reactor Final Report, (2003) p.iii, Idaho National Engineering and Environmental Laboratory and Bechtel BWXT Idaho, LLC.
- (4) Y.Udagawa, M.Amaya, "Model Updates and Performance Evaluations on Fuel Performance Code FEMAXI-8 for Light Water Reactor Fuel Analysis", Journal of Nuclear Science and Technology, Vol.56, No.6(2019), pp.461-470.
- (5) 鈴木元衛, 斎藤裕明, 宇田川豊, 天谷政樹, 軽水炉燃料解析コード FEMAXI-7 のモデルと構造[改訂版], pp.9-10, JAEA-Data/Code 2013-014 (2014).
- (6) Lemehov, S.E. and Suzuki M., 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).
- (7) 大飯発電所 3・4 号炉 原子炉設置許可申請書, 平成 22 年 7 月.
- (8) 燃料体設計認可申請書 (伊方発電所第 3 号機) (2017), 三菱原子燃料.
- (9) NuScale Standard Plant Design certification Application , Chapter Four Reactor (2020).

(2022 年 8 月 4 日受理)