

平成 30 年 6 月 11 日現在

機関番号：32689

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K18319

研究課題名(和文) 事故耐性燃料棒のふるまいと溶融時の挙動解析研究

研究課題名(英文) Behavior of accident tolerant fuel and molten fuel

研究代表者

山路 哲史(Yamaji, Akifumi)

早稲田大学・理工学術院・准教授

研究者番号：00571704

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：原子炉過酷事故の防止・抑制を目標に、燃料被覆管に炭化ケイ素(SiC)等を用いる事故耐性燃料(ATF)が検討されている。本研究では沸騰水型軽水炉(BWR)にこれら候補ATFを導入した場合の通常運転時、異常な過渡変化時、溶融事故時のふるまいを明らかにし、ATFが取りえる主要な状態(通常時、異常な過渡変化時、溶融事故時)のマルチスケールな挙動理解からATF導入のための要求や課題を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Accident Tolerant Fuel is being developed, such as SiC clad fuel rods, in order to increase the grace time of light water reactors in anticipated loss of core cooling accidents. This study aims to reveal behaviors and issues for introduction of such ATF by simulating its behavior in normal operation condition as well as in severe accident condition through multi-scale modeling.

研究分野：原子力学

キーワード：原子炉過酷事故 事故耐性燃料 燃料ふるまい解析 FEMAXI-7 溶融物挙動 MPS法

1. 研究開始当初の背景

軽水炉発電技術は、2011年の福島事故を機に原子炉過酷事故（以降、過酷事故）に対する懸念に直面していた。この喫緊の課題を克服するために事故耐性燃料棒（Accident Tolerant Fuel: ATF）の研究開発が始まっていた。これらは主に、福島で事故終息を困難にした水素ガス発生を防止・抑制する新しい燃料被覆管（例：炭化ケイ素被覆管、改良ステンレス鋼被覆管）の開発と、従来の二酸化ウラン（ UO_2 ）ペレットよりも密度や熱伝導率を高める等により核分裂生成ガス（FPガス）の閉じ込め能力向上を図る新しい燃料マトリックス（例：窒化ウラン）の開発に大別されたが、ATFが導入された場合の燃料棒ふるまい及び炉心特性への影響や、ATFが溶融した場合の溶融物挙動は未解明であった。

ATFは過酷事故の防止・抑制への貢献が期待されていたが、通常運転時や異常な過渡変化時においても、既存軽水炉燃料棒と同等以上の安全性と性能が求められていた。このため、ATFを導入するためには、ミクロな物性変更を考慮し、通常運転時から異常な過渡変化時におけるマクロなATFふるまいを精度よく予測し、ATF導入のための要求や課題を明らかにする必要がある。

一方、ATFは過酷事故を完全に防止できるものではない。このため、ATF溶融事故を想定し、溶融事故時の進展特性は従来の軽水炉と同等又は優れている必要がある。特にATF導入が期待される沸騰水型軽水炉（BWR）では、原子炉圧力容器（RPV）下部ヘッドの構造が複雑で、貫通する多数の配管周辺における溶融物挙動が重要であるが、候補ATFのBWR過酷事故を模擬した溶融実験は容易でない。そこで、基本的物理現象のモデルで構成された機構論的解析法を用いてATF溶融物挙動の計算機実験により燃料の変更が溶融物挙動に及ぼす影響を明らかにする必要がある。

以上のように、ATFの主要な状態（通常運転時、異常な過渡変化時、溶融事故時）におけるふるまいを解明することがATF導入のための要求や課題を明らかにするために必要であったが、従来は新しい被覆管材料の開発等が主に研究されており、これらの燃料ふるまいについての知見が乏しかった。

2. 研究の目的

本研究ではATFの主要な状態（通常運転時、異常な過渡変化時、溶融事故時）におけるふるまいを解明することでATF導入のための要求や課題を明らかにすることを目的とした。そのために、以下に取り組んだ通常運転時及び異常な過渡変化時におけるATFふるまい解析、BWRのRPV下部ヘッド等における溶融ATF挙動のMPS法による機構論的解析による計算機実験。

3. 研究の方法

本研究が捕らえるATFふるまいと解析法を図1に示す。通常運転時から異常な過渡変化時のふるまい解析には有限要素法（FEM）と機構論的なモデルに経験モデルを加えることで高い予測精度を誇る日本原子力研究開発機構（JAEA）のFEMAXI-7コードを用いた。

	マクロなATFふるまい	ミクロなモデル
通常運転時と異常な過渡変化時のATFふるまい解析（FEM+機構論+経験式）	燃料温度分布、FPガス放出、PCMIと被覆管の塑性変形	熱伝導・膨張、クリープ・塑性、照射成長・スエリング、FP蓄積と拡散
BWR下部ヘッドにおける溶融ATF挙動のMPS法による機構論的解析	制御棒案内管・計装管の貫通、RPVのクリープ破損	熱伝導、溶融・凝固、粘性・表面張力、共晶反応

図1：ATFふるまいと解析法

先ず、FEMAXI-7の整備および検証計算を行った。主要な解析モデルの検討の後、OECD/NEA Data BankのTFDB IFA-432 rod-2（8×8型燃料集合体用の燃料に近い設計）の測定データ（燃料中心温度、FPガス放出率、被覆管伸び）により解析結果の妥当性を検証した。その後、FEMAXI-7にSiC被覆管の物性データを組み込んだ。これらのデータを組み込んだATF燃料の通常運転時のふるまいを解析し、分析した。これらの解析では、特に、燃料棒ふるまいと健全性の重要な指標となる燃料中心温度、FPガス放出率、ペレット-被覆管機械的相互作用（PCMI）及びその結果生じる被覆管の塑性歪に着目した。

さらに、FEMAXI-7の高度化により、従来のFEMAXI-7では不可能であった照射に伴う被覆管のスエリング（照射による肉厚方向への膨張）を解析できるようにした。このため、被覆管の熱膨張解析モジュールを改変し、新たに中性子照射量（フルエンス）の依存項を加えた。

その後、高度化した軽水炉燃料ふるまい解析コードFEMAXI-7を用いて、照射試験炉でATFのような新型燃料を照射するための照射の新たな考え方を検討した。その結果、従来の経験則に基づく照射プランの作成が困難なため、FEMAXI-7による燃料ふるまい解析により得られる燃料温度やFPガス放出挙動に着目し、照射計画を作成するための新たな考え方を検討した。

一方、体系が複雑でシナリオに大きな不確実性を伴う過酷事故時の溶融物挙動解析にはラグランジュ法に基づく粒子法の一つであるMoving Particle Semi-implicit (MPS)法を用いて解析した。先ず、過去に電力中央研究所で実施された鉛ピスマス半球容器アブレーション実験を対象にMPS法による3次元解析を実施した。

さらに、溶融物の物性および溶融時の初期

条件に応じた、溶融物挙動を機構論的に予測するための課題を明らかにするために、過去に米国および仏国で実施された流路閉塞に関わる XR2 実験、PCV 床面の溶融物広がりに関わる VULCANO 実験、PCV 床面コンクリートの浸食に関わる SURC 実験を対象に MPS 法による解析を実施し、これらの機構論的な予測のための課題を検討した。

その後、事故時溶融燃料の原子炉格納容器 (PCV) 床面における広がり挙動、さらに床面のコンクリートとの反応 (MCCI) による床面の浸食を機構論的に予測するための課題を検討した。

4. 研究成果

改良した FEMAXI-7 を用いて SiC 被覆燃料のふるまいを解析した結果、照射スエリングを無視した従来解析の結果 (図 2a) に比べ、被覆管内径は拡大し (図 2b) これに伴って燃料温度の予測結果が上昇し、FP ガス放出率も増大した。これらの解析から、従来のジルカロイ被覆燃料では問題とならなかった被覆管のスエリングの予測が ATF ふるまい予測において重要であることが示された。

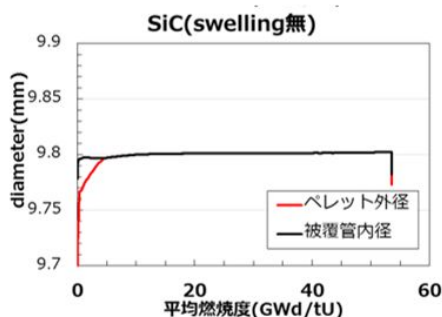


図 2a: 従来コードの解析結果 (燃料棒外径変化)

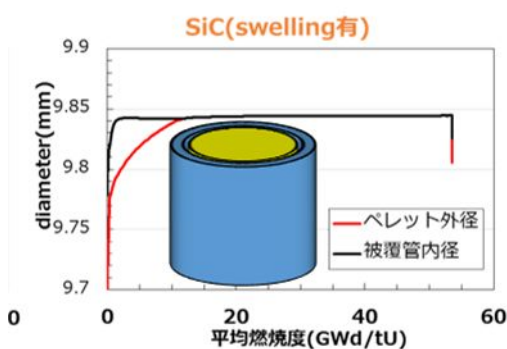


図 2b: 改良コードによる解析結果 (燃料棒外径変化)

SiC の照射スエリングを考慮した場合としない場合の PCMI 接触圧力を図 3 に示す。被覆管の照射スエリングが PCMI 接触圧力の評価に重要であることが分かる。

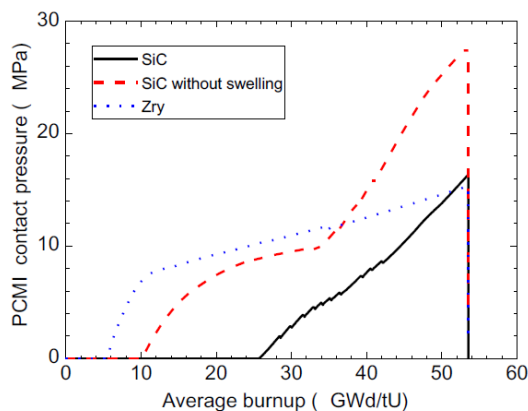


図 3: SiC 被覆燃料の PCMI 接触圧力

この改良 FEMAXI-7 コードを用いて、燃料ふるまい解析により得られる燃料温度や FP ガス放出挙動に着目し、照射 ATF の照射計画を作成するための考え方を示した。すなわち、燃料-被覆管ギャップ相互作用及び被覆管の照射変形モデルに着目し、線出力密度や初期封入ガス組成、ガス圧力を定めることが効果的であることを示すことに成功した。

MPS 法の RPV 下部ヘッドでのアブレーション現象の解析能力を検討するため、鉛ビスマス半球容器のシリコン油によるアブレーション実験を MPS 法により解析した。解析により予測された容器破損の場所や様子は実験結果と定性的には良く一致した。一方、定量的には、容器底部での液体温度を過大評価する傾向が示された (図 4)。同実験では液体から溶液壁への乱流伝熱によりアブレーションが生じたと考えられるため、MPS 法に乱流伝熱モデルを組み込む / 又は乱流を十分に解像できるだけの解像度で解析を実施することが今後の課題と考えられる。

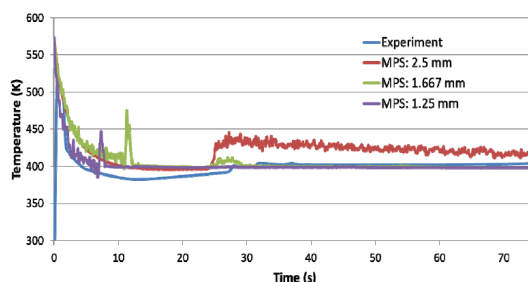


図 4: 鉛ビスマス半球容器のシリコン油によるアブレーション実験の MPS 法による解析結果 (容器底部の液体温度)

XR2 実験を模した制御棒案内管路内における溶融物の流下挙動解析の結果を図 5 に示す。解析では、粒子径を小さくすると流路閉塞が早くなった。その原因の一つに、流入境界近傍で流入が不連続になり、ほとんど全ての粒子が自由表面粒子と判定された結果、輻射伝熱量が粒子径に依存して過大評価されている可能性が考えられる。この問題を解決するには、流入境界近傍の粒子数密度を一定に保つ必要がある。

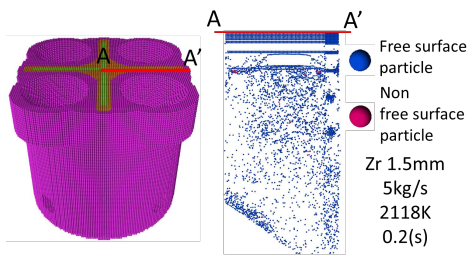


図 5：制御棒案内管流路内における溶融物の流下挙動解析の結果

そこで、定量的なデータが得られる EPRI による計装管内溶融物流下凝固実験の解析を行った。その結果、MPS 法による流路閉塞の解析では自由界面追跡が重要であることが示された。また、従来のクラストモデルは、クラスト近傍で局所的な粒子数密度の変化が生じ、圧力計算や非圧縮性の補正を困難にするが、流入境界や、溶融物界面での境界条件を適切に与えることでこれらの問題を解決できることを示した。

これらの課題に共通する、溶融物とクラストの固液相互作用を MPS 法により機構論的にモデル化する新たなクラストモデルを考案した。クラストモデルを実装した MPS 法を用いて、溶融炉心とコンクリートの相互作用である、コア・コンクリート相互作用 (MCCI) の実験 (CCI-2, CCI-3) を解析し、両者の違いを検討した。その結果、側壁クラストが安定的に形成される石灰岩系コンクリートを用いた CCI-2 実験では、コンクリートの浸食が等方的になり、側壁クラストが安定的に形成されない珪質岩系コンクリートを用いた CCI-3 実験では、コンクリート浸食が非等方的 (横方向の浸食量が縦方向の浸食量を大きく上回る) になるメカニズムを示すことに成功した (図 6)。

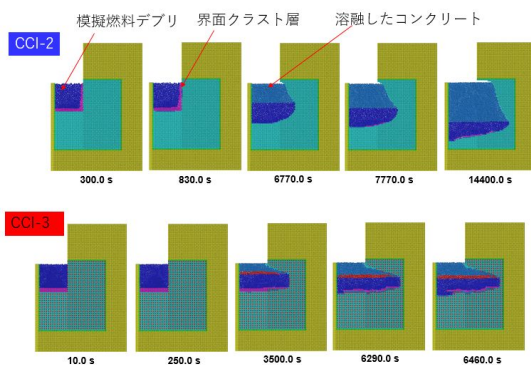


図 6：MPS 法による MCCI による等方浸食と非等方浸食の解析結果 (CCI-2, CCI-3)

また、改良 MPS 法による解析により、溶融物広がり挙動の停止機構 (溶融物の伝熱に伴う固相率の増大により生成されるクラスト固着現象) を示すことに成功した。

これらの研究から、MPS 法の解析に用いる溶融物の流入境界、解析に用いる粒子径 (解像度)、溶融物の流動停止に寄与する溶融物の凝固現象、溶融物とコンクリート等との界面に生じるガスが界面熱伝達率におよぼす影響の考慮が重要であることが明らかになった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 3 件)

Y.Yasumura, A.Yamaji, M.Furuya, Y.Ohishi, G.Duan, "Investigation on influence of crust formation on VULCANO VE-U7 corium spreading with MPS method," Annals of Nuclear Energy Vol107(2017) 119-127、査読有

Xin Li, Akifumi Yamaji, "Three-dimensional numerical study on the mechanism of anisotropic MCCI by improved MPS method", Nuclear Engineering and design Volume 314, 1 April 2017, Pages 207-216、査読有

D. Masumura, A. Yamaji and M.Furuya, "Analysis of Pb-Bi Vessel Wall Ablation Experiment with High Temperature Liquid by MPS Method", Journal of Energy and Power Engineering Vol.11(2016) 944-954、査読有

〔学会発表〕(計 5 件)

Akifumi Yamaji, Daiki Yamasaki, Tomoya Okada, Kan Sakamoto, Shinichiro Yamashita, "FEMAXI-7 PREDICTION OF THE BEHAVIOR OF BWR-TYPE ACCIDENT TOLERANT FUEL ROD WITH FECRAL-ODS STEEL CLADDING IN NORMAL CONDITION" 2017 Water Reactor Fuel Performance Meeting September 10 (Sun) ~ 14 (Thu), 2017 Ramada Plaza Jeju ? Jeju Island, Korea、査読有

Y.Goto and A.Yamaji, "Analysis of Eutectic and Metallic Melt Flow and Blockage in BWR Control Rod Guide Tube by MPS Method," TopSafe2017, February 12-16 2017, Vienna, Austria, TopSafe2017-A0013、査読有

Y.Yasumura and A.Yamaji, "Analysis of the vulcano VE-U7 corium spreading experiment using MPS method," NUTHOS-11 (Paper No. N11P0133), October 9 -13, 2016, HICO, Gyeongju, Korea、査読有

E.Kibino, X Li and A.Yamaji, "Numerical analysis of SURC-1 and SURC-3 MCCI experiments by MPS method," NUTHOS-11 (Paper No. N11P0094), October 9 -13,

2016, HICO, Gyeongju, Korea、査読有
岡田知也、山路哲史、"FEMAXI-7 による
SiC 被覆事故耐性燃料棒の通常運転時の
ふるまい解析" 日本原子力学会 2016
年春の年会、2016/3/27、講演番号 2G01、
査読無し

6 . 研究組織

(1) 研究代表者

山路 哲史 (YAMAJI, Akifumi)
早稲田大学・理工学術院・准教授
研究者番号：00571704