

# 計算科学による原子炉過酷事故メカニズムの解明と安全性の向上研究

研究代表者 山路 哲史  
(先進理工学研究科 共同原子力専攻 教授)

## 1. 研究課題

原子力発電に対する社会の信頼を取り戻すためには着実に東京電力福島原子力発電所（1F）の廃炉を進める必要がある。このため、1Fのプラント内部調査、試料分析、事故時プラントデータ分析、事故進展解析等の情報を統合し、炉内状況を総合的に把握に資することが求められている。一方で、同様な事故を繰り返さぬよう、原子力発電（特に軽水炉）技術の安全性を向上させる必要がある。本研究の目的は最先端の計算科学技術を駆使・発展させ、原子炉過酷事故メカニズムを解明し（理解の深化を図り）、万が一の事故時における原子力発電所の安全性向上に資することである。そのために、以下を実施する：

- （1）原子炉過酷事故解析プログラム（SA 解析コード）による炉心崩壊過程の感度解析により福島各号機プラントデータとの整合性を評価し、炉心崩壊メカニズムの理解を深め、1F各号機の炉内状況の把握に関わる不確かさを低減する。
- （2）伝熱・流動・相変化を機構論的にモデル化できるMPS法（粒子法的一种）により、現象と原理の理解に立ち戻り、原子炉過酷事故メカニズムを解明し、SA解析コードの高度化に資する知見を得る。
- （3）炉心冷却機能喪失時の炉心崩壊までの裕度（grace time）を向上する事故耐性燃料（Accident Tolerant Fuel: ATF）の候補を軽水炉燃料ふるまい解析により検討し、実機導入に向けた課題を明らかにする。

## 2. 主な研究成果

前年度に引き続き、原子炉過酷事故解析コード（MELCOR-2.2）を用いて1Fの事故時プラント挙動を解析した。2022年度は1F2号機の炉心崩壊過程における炉心・燃料の酸化反応と原子炉圧力容器（RPV）から格納容器ドライウエル（D/W）へのガスリークの可能性に着目し、この間の炉内熱状態を推定した。1F2号機の原子炉スクラム後75～83hのRPV圧力・D/W圧力の計算値と測定値を図1に示す。標準的な解析モデルを用いると原子炉スクラム後約80時間までの炉心崩壊以前のD/W圧力が過大評価されたため（ケースA）、炉心健全部の酸化反応を停止した感度解析を実施した（ケースB）。また、先行研究ではRPV第二圧力ピーク期間中（80-81h）のD/W圧力上昇をガスリークで説明することが試みられたが、本研究の解析ではそれだけでは十分にこの間のD/W圧力上昇を再現出来なかったため、熔融金属のcandlingモデルを無効にして炉心高温部に留まるZr金属インベントリを増大させた。その結果、D/W圧力上昇を再現出来た（ケースC）。これらの解析により、1F2号機の炉心損傷・崩壊時のRPV及びD/W圧力データを共に再現する事故進展シナリオを導出した。その結果、酸化物燃料の大部分は炉心崩壊のタイミングでは熔融していなかったと推定した。ただし、本解析では炉心崩壊速度を仮想的に小さくしたため、RPV第三圧力ピーク中も炉心崩壊が継続しており、RPV第三圧力ピーク以降、RPV下部プレナムのドライアウトまでのデブリ冷却過程の熱

状態の推定は今後の課題である。これらの成果をまとめて原子炉工学の分野を代表する国際会議 (ICONE29, Augst 8-12 2022) にて査読付国際会議 Proceeding を発表した。

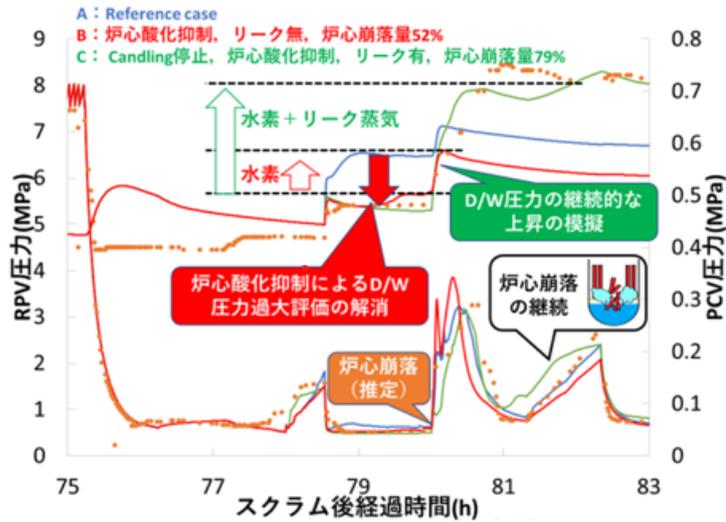


図1：原子炉圧力容器及び格納容器の圧力解析結果

前年度までに改良したラグランジュ法に基づく MPS 法を用いて、2022 年度は 1F3 号機のペDESTAL 燃料デブリの局所的な性状推定に資する知見を取得するために、界面形状を明示的に求めることやモデル中のパラメーターを恣意的に調節する必要がない MPS 法の新たな界面張力モデルを開発した。一般的な界面張力モデルは界面形状を明示的に求める必要がある上に壁面の濡れ性が考慮できないため、1F3 号機ペDESTAL の深部に生じていた可能性のあるコア・コンクリート反応 (MCCI) の解析には適さない。従来の MPS 法のポテンシャルモデルは全ての粒子間に引力を作用させ、異成分粒子間の引力の差を利用して界面形状を求めずに界面張力や壁面の濡れ性を模擬できる。しかし、粒子が不自然に凝集し、圧力が過大評価されたり流動が阻害されたりする問題や、界面張力を恣意的に決める必要があった。そこで、異成分粒子間にのみ斥力を作用させ、新たな界面形成に伴う仕事量から界面張力を導出する新界面張力モデル (Cohesion-Free Potential (CFP) モデル) とその濡れモデルを開発した。そして、図 2 に示すように Laplace 圧力を求めるベンチマーク解析によりその妥当性を確認し、これらの成果を査読付学術論文誌 (Progress in Nuclear Energy 150 (2022) 104311) に発表した。

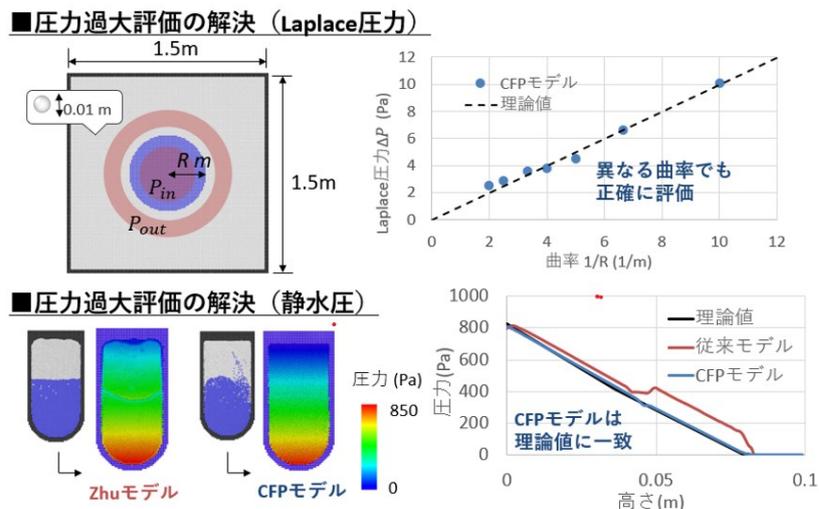


図2：MPS法の新たな界面張力モデル (CFPモデル) の妥当性確認結果

事故耐性燃料（ATF）の被覆管候補材として Cr コーティング材や炭化ケイ素（SiC）多層材が研究開発されている。これらの ATF 被覆管候補材はその機械特性や燃料棒の設計仕様、照射・出力履歴が過渡時の燃料ふるまいに及ぼす影響感度が高いと考えられる。本研究では、燃料ふるまい解析コード FEMAXI を改良し、従来のジルカロイ（Zry）被覆管を Cr コーティングした燃料（Cr-Zry 被覆燃料）や、SiC 被覆燃料の燃料ふるまいを解析評価した。また、SiC 被覆燃料は、従来の Zry 被覆燃料と異なり、冷却材喪失事故（LOCA）時に被覆管がバルーニングすることなく、ペレット-被覆管機械的相互作用（PCMI）が厳しくなる可能性があることを示した。このとき、SiC は定常運転時にほとんどクリープ変形しないため、必ずしも高出力・高燃焼度の燃料において LOCA 時 PCMI が最も厳しくなるとは限らないことも明らかにし、原子炉燃料の分野で代表的な国際会議（Topfuel2022, October 11, 2022, Raleigh, USA）で査読付 Proceeding を発表した。

### 3. 共同研究者

山下 拓哉 （招聘研究員）（日本原子力研究開発機構）  
LI, Xin （招聘研究員）（日本原子力研究開発機構）

### 4. 研究業績

#### 4.1 学術論文

- (1) Takanari Fukuda, Xin Li, Akifumi Yamaji "A new potential interface tension model for MPS method avoiding unphysical particle cohesion", Progress in Nuclear Energy 150 (2022) 104311

#### 4.2 学会および社会的活動

- (1) Yutaka Nakao, Akifumi Yamaji, Yoshiyuki Nemoto, Shinichiro Yamashita, "PCMI Analysis of the SiC Cladded Fuel During BWR LOCA with FEMAXI-ATF", Proceedings of Topfuel2022, october 11, 2022, Raleigh, USA.
- (2) Soki Dehara, Akifumi Yamaji, Yoshiyuki Nemoto, Shinichiro Yamashita, "Fuel Performance Analysis of Cr-Coated Fuel During Startup and Normal Operation of LWRs Using FEMAXI-8", Proceedings of Topfuel2022, october 11, 2022, Raleigh, USA.
- (3) Haruki Takei, Takanari Fukuda, Xin Li, Akifumi Yamaji, "Analysis of Molten Metal Flow and Freezing in a 3-D Pin Bundle Geometry by MPS Method", 13th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal- Hydraulics Operation and Safety (NUTHOS-13), September 6-8, 2022, (online).
- (4) Sara Honda, Takanari Fukuda, Guangtao Duan, and Akifumi Yamaji, "Three-Dimensional Analyses of the FARO L-26S Melt Spreading Experiment by MPS Method", 13th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal- Hydraulics Operation and Safety (NUTHOS-13), September 6-8, 2022, (online).
- (5) Takanari Fukuda, Akifumi Yamaji, Xin Li, "Development of an Interface Tension Model of MPS Method to Avoid Particle Clumping of Inner-Particles", WCCM-APCOM, July 31-August 5, 2022 (online) .
- (6) Taisei Matsumoto, Akifumi Yamaji, Daisuke Fujiwara, "Evaluation of Thermal Load on the BWR Containment With Different Depressurization Timings During Loss of

Core Cooling Severe Accidents", 29th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE29), Augst 8-12 2022 (Online).

- (7) Shotaro Osako, Xin Li, Akifumi Yamaji, "Estimation of the 1F2 Core Thermal Status During the Core Heat-up Phase with MELCOR-2.2", 29th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE29), Augst 8-12 2022 (Online).

## 5. 研究活動の課題と展望

国家のエネルギーセキュリティの重要性が改めて見直されている。原子力は資源を持たないわが国にとって準国産のエネルギーであり、「カーボンニュートラル」達成のためにも重要な役割を果たすと期待されるが、2011年に経験した東京電力福島第一原子力発電所(1F)の事故を乗り越え、将来展望を学術的に示す必要がある。そのためには、史上最も困難とされている1Fの廃炉をやり遂げ、二度とそのような事故が起こらないような技術革新の道筋を示す必要がある。本プロジェクト研究では、そのために以下の3つの研究開発領域に取り組んでいる。

### (1) 事故進展解析

1Fの着実な廃炉及び将来の事故対策のためには1F事故がどのような事故であったのかを明らかにする必要があるが、事故当時の限られたプラントデータや、現在のプラントの状態から、各号機がどのような事故進展を辿ったのかを推定することは困難である。そこで、事故当時のプラントデータと現在のプラント状態をつなぐ事故進展解析を実施することで、どのような事故であったのかを知り、現在の炉内状況を重層的に理解することができると考えられる。従来の事故進展解析に加え、近年開発されている革新的な数値解析手法を用いることで原子炉過酷事故に伴う現象の理解を深め事故進展評価の不確かさを低減できると考えられる。

### (2) 溶融物挙動解析

上述の事故進展解析ではプラント全体の事故時挙動を現実的な解析コストでとらえるために、ある程度の解析モデルの簡略化が必要であり、過去の限られた実験データから導出された経験則も多用しているが、1F事故の条件は過去の実験等の条件を大きく超えている。流動に伴う自由界面の変化をラグランジュ法に基づいて離散化するMPS法(粒子法)は自由界面の機構論的な追跡に加え、流体の熱物性の正確な追跡と物性およびエンタルピーの変化に基づく固液相変化モデルにより、伝熱・流動・相変化を機構論的にモデル化することが可能である。このような最新の解析手法を事故進展解析と連成して用いることで、実験が困難な極限状態の炉内状況や事故進展の詳細を推定することができる。近年の計算機性能の向上やCPUマシンを超えるGPUマシンの登場等により、MPS法の適用範囲が飛躍的に広がることが期待される。

### (3) 燃料ふるまい解析

福島事故のような原子炉過酷事故に対する耐性を従来よりも高めた事故耐性燃料の開発には、プロトタイプ燃料の照射実験等に大きな費用と時間を要する。限られた開発資源と時間を有効活用するために、燃料ふるまい解析によって今後重点的に得るべきデータや取り組むべき新規研究開発要素を明確にすることで、研究開発コストと時間の大幅な削減が期待されている。特にSiC等の新材料の性能は研究開発途上にあり、それらの最新の知見を解析に取り込むことが重要である。SiC等の新たな材料挙動把握は現行軽水炉の事故耐性の向上のみならず革新的な原子炉の研究開発にも重要である。