

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 講師)

1. 研究課題

原子力発電に対する信頼を取り戻すためには着実に福島原子力発電所の廃炉を進める必要がある。このため、福島事故進展解析および他の研究開発の成果、事故時の圧力・温度等の測定データの分析、現場から得られた情報からの推定を実施し、これらの情報を俯瞰的に統合することで、炉内状況の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（特に軽水炉発電）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より一層の安全性を確保することである。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の実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、福島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）により、そもそもの原理・基本現象の理解に戻り、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）の候補概念を軽水炉燃料棒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

原子炉過酷事故解析コード（MELCOR）を用いて得られた福島第一原子力発電所 1 号機（1F1）の感度解析の結果を図 1 に示す。計算結果は、原子炉の減圧がサプレッションチェンバーを経由しないドライウェル（D/W）への蒸気（および水素等の非凝縮性ガス）の直接放出であった可能性や、原子炉圧力容器（RPV）が核計装管などの破損により早期に破損していた可能性を示唆している。

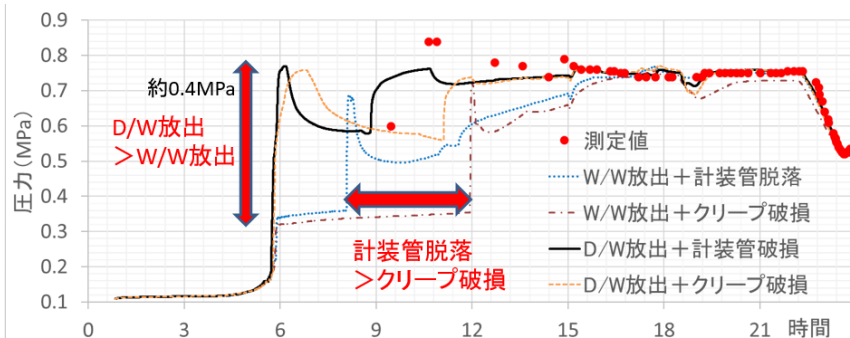


図1：1F1解析結果（格納容器圧力）

原子炉過酷事故時に格納容器床面等に放出される溶融炉心の広がり挙動 (spreading) の解明は事故進展の予測、安全評価、事故後の廃炉工程作成のために重要である。しかし、固液相変化を伴う溶融物の自由界面進展の機構論的な予測は従来のオイラー法に基づく計算メッシュを用いた解析では困難であった。ラグランジュ法に基づく MPS 法による spreading 解析結果の一例を図 2 に示す。溶融物の流動先端の冷却に伴って形成されるクラストが流動を停止させる様子の再現に成功した。これにより、spreading の慣性支配領域、粘性支配領域、クラスト支配領域の多領域にわたる spreading の機構論的な解析が可能になった。また、MPS 法の将来の抜本的な解析精度向上に向けて、MPS 法の離散化手法を検討し、非圧縮単相流れに対して解析力学と非平衡熱力学に基づいた定式化を行った。

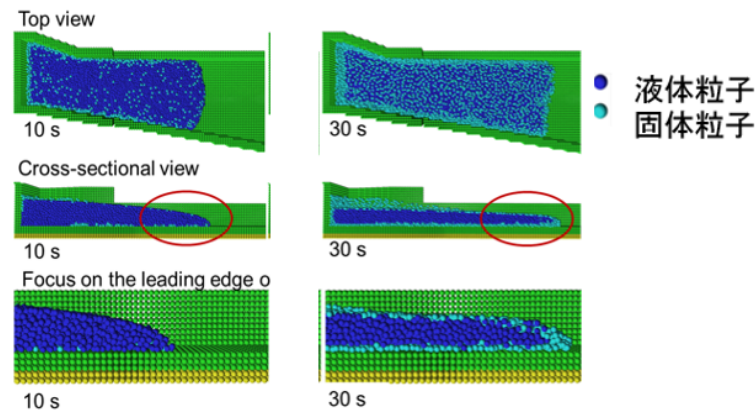


図2: MPS法によるSpreading解析結果の例

事故耐性燃料の候補被覆管材料の中には中性子照射に伴ってスエリング (体積膨張) する材料が含まれるが従来の燃料ふるまい解析コード FEMAXI-7 では被覆管の肉厚方向へのスエリングを考慮することができなかった。本研究には FEMAXI-7 に新たに被覆管スエリングモデルを導入した。スエリングモデルの有無が照射に伴う燃料棒の寸法変化におよぼす影響の評価結果例を図 3 に示す。スエリングによってペレット-被覆管ギャップ閉塞が遅れる効果が示されている。

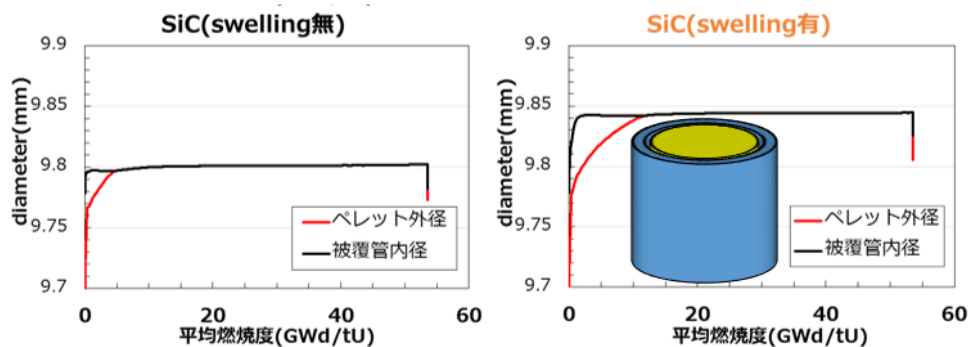


図3: 被覆管のスエリングが燃料棒寸法変化におよぼす影響の評価結果例

3. 共同研究者

松本 潔 (理工学術院・総合研究所・次席研究員)
 ドゥアン グアンタオ (理工学術院・総合研究所・次席研究員)
 柴田 良弘 (理工学術院・数学科・教授)
 鈴木 幸人 (理工学術院・数学科・主任研究員)
 及川 一誠 (理工学術院・数学科・次席研究員)

4. 研究業績

4.1 学術論文

- (1) X. Li and A. Yamaji, "A numerical study of isotropic and anisotropic ablation in MCCI by MPS method", Journal of Progress in Nuclear Energy Vol.90(2016) 46-57
- (2) Y. Suzuki, "Bracket formulations and energy- and helicity-preserving numerical methods for the three-dimensional vorticity equation," Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, VOL.317(2017), p.174-225

4.2 学会および社会的活動

- (1) 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
- (2) 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
- (3) 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
- (4) 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

5. 研究活動の課題と展望

福島第一原子力発電所の各号機の事故当時のプラントデータと整合するシナリオを解析により一つでも導出することができれば現在の炉内状況の把握にとって重要な知見となる。但し、MELCORコード等の過酷事故解析コードの解析により導出されるシナリオが唯一のシナリオとは言えない。計算結果と測定データが一致した／しなかったときに、どこまで物理現象に立ち戻って議論できるかが重要な課題となる。その上で、現実的な計算コストで巨大な発電システムの事故進展を予測するために、どのようにモデルを簡素化できるかを異なる分野の専門家で認識共有して、協力して取り組む必要がある。

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り、上述の物理現象に立ち戻った計算結果と測定データの相違の議論を可能にする。本研究の成果により、例えば大規模シミュレーションにより、MPS 法を用いて実機の熔融物挙動の推定が可能になると考えられる。あるいは、より現実的な計算コストで実機の熔融物挙動を推定するために、既存の過酷事故解析コードに用いられている近似モデルや経験式の妥当性を MPS 法による多数の計算機実験で確認することや、修正案を提案することが可能になると考えられる。

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。