

# 原子炉容器下部ヘッドの溶融物挙動の機構論的研究

研究代表者 岡 芳明 学校法人早稲田大学大学院先進理工学研究科共同原子力専攻  
参画機関 学校法人早稲田大学、一般財団法人電力中央研究所  
研究開発期間 平成24年度～26年度

## 1. 研究開発の背景とねらい

苛酷事故時の原子炉容器下部ヘッドでの炉心溶融物の層状化と原子炉容器下部ヘッドからの溶融物の流出は、コリウムの格納容器への移行量、ベースマットや格納容器壁の浸食に伴うその健全性、さらには環境放出放射能を支配する重要事象である。BWRの苛酷事故挙動はPWRに比べると不明な点が多い。特にBWR原子炉炉心下部のスペースが大きく大量の水が存在する。

下部ヘッドにたまった酸化物と金属層の層状化を含む挙動は原子炉容器壁の熱流束分布とその後の事象進展を支配する現象である。さらに下部ヘッド貫通孔部の破損により炉心溶融物が格納容器に流出する可能性も高いと考えられる。その場合に配管壁や貫通部は溶融や高温により変化する。層状化や破損の様子は解明されておらず、実際の現象や流出量を定量的に予測するのは困難である。

その大きい理由は従来の苛酷事故システム解析コードが用いている計算法ではこれらの現象を基礎的物理現象から機構論的に解析できないことにある。実験は限られた条件と体系であり、実際の放射能もある実際の炉心溶融物では行えない。

MPS法は実用上重要な非圧縮性連続体を扱える世界最初の粒子法である。計算格子ではなく計算点を用いて物理の基礎現象を表す微分方程式を離散化する。計算点を用いるので大変形や分裂飛散、溶融凝固などの相変化を計算できる。MPS法で苛酷事故システム解析を抜本的に改良できると考えられる。

本事業では、沸騰水型軽水炉の原子炉容器下部ヘッドでの炉心溶融物の層状化挙動の解析と配管貫通部の溶融流出挙動解析を対象に研究する。炉心溶融物の様々な条件でMPS法で解析し、下部ヘッドでの溶融物挙動や配管部の流出挙動の理解を進める。これらの結果から苛酷事故システム解析コードが用いているモデルやパラメータの妥当性を検討し、その改良に資する。これにより、苛酷事故挙動の予測性を向上する。

## 2. 研究開発成果

### 2. 1. 原子炉容器下部ヘッド溶融物挙動解析

#### (1) MPS法による下部ヘッド配管部溶融流出解析

下部ヘッド配管部溶融流出解析を行うためのMPS法のモデルを検討し、試解析を行った。

MPS法のモデルの検討では、MPS法の基本コード(波浪解析用)をもとに、早稲田大学での溶融物床面拡がり研究で開発したモデルを含む計算コードに、2種類の粒子に独立の物理量を与えるモデル、熱伝導率および比熱の温度依存性を導入した。

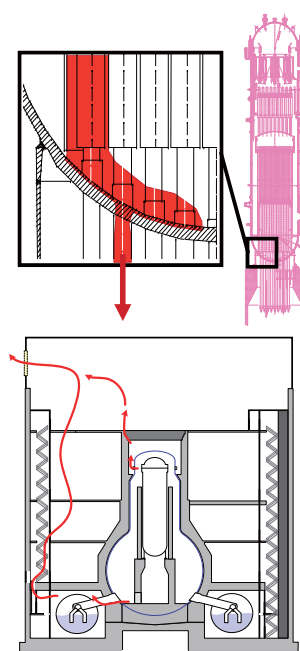


図1 苛酷事故時の挙動 (BWR)

試解析では、压力容器貫通部の配管内壁に溶融浸食が生じ、溶融物流路が拡大して流出量が増加することを確認した（図2）。[1]

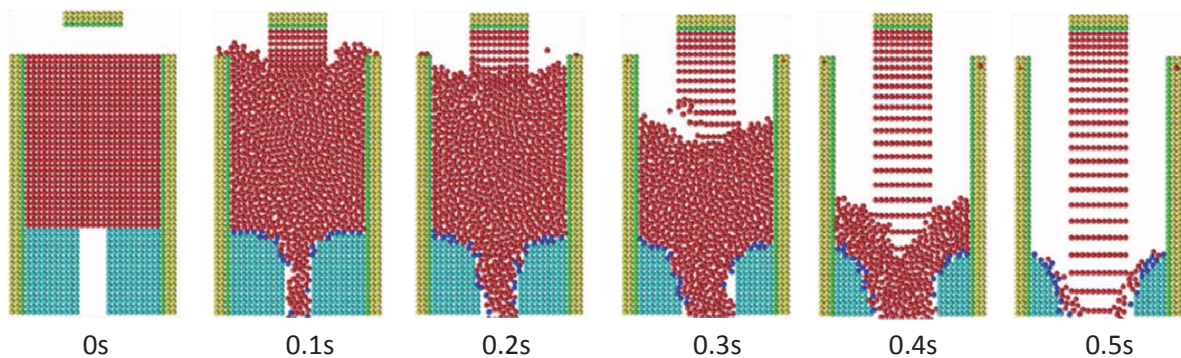


図2 計装配管部アブレーション試解析結果（溶融物●と炭素鋼●）

### (2) MPS法による下部ヘッド内容融物挙動解析

MPS法で下部ヘッドでの層状化を解析する解析モデルの開発と検討を行った。

解析モデルの開発では、内部発熱による自然対流の計算、自然対流による相転移（凝固）計算、圧力振動を抑止する安定性の改善、を実施した。解析モデルの検討では、電力中央研究所で実施した重力相分離試験の結果と比較した。試験と解析の結果はよく一致し、開発したモデルが検証された（図3）。[2, 3, 4]

### (3) MAAP等による溶融物挙動解析と

#### 炉心溶融物データ作成

MAAP等の苛酷事故システム解析コードを用いて、沸騰水型軽水炉の溶融進展を解析するための事象を検討した。炉心溶融物データ作成のための試解析を行った。

代表プラントとして、福島第一原子力発電所2～5号機と同型のBWR4 Mark IのプラントであるPeach Bottom 2号機を選定した。代表事象として、炉心溶融確率が高いとされている交流電源喪失(SBO)、大破断冷却材喪失(LBLOCA)、小破断冷却材喪失(SBLOCA)の三事象を解析した（表1）。

炉容器の破損モード、貫通時刻、貫通面積、さらに炉容器下部の各種物質の存在量および温度の時系列データを得た（図4）。

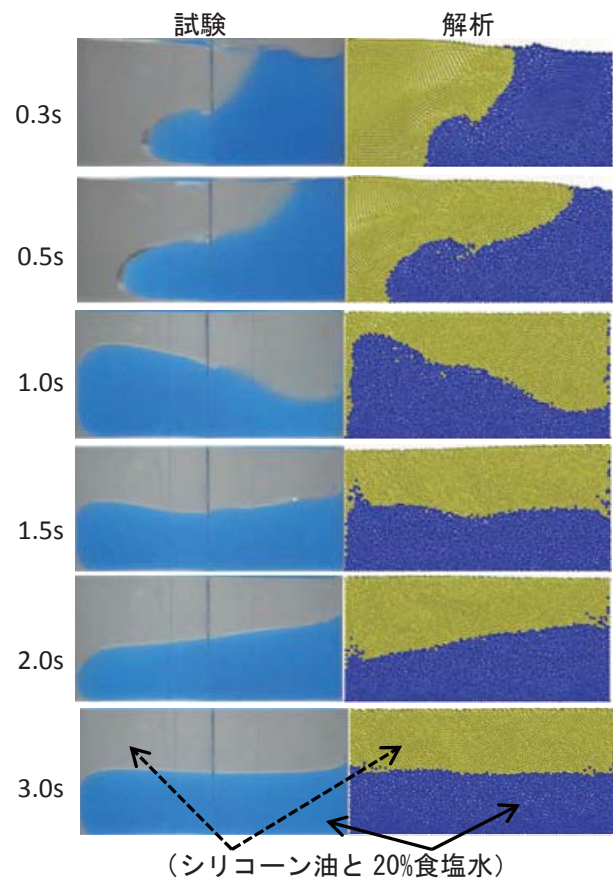
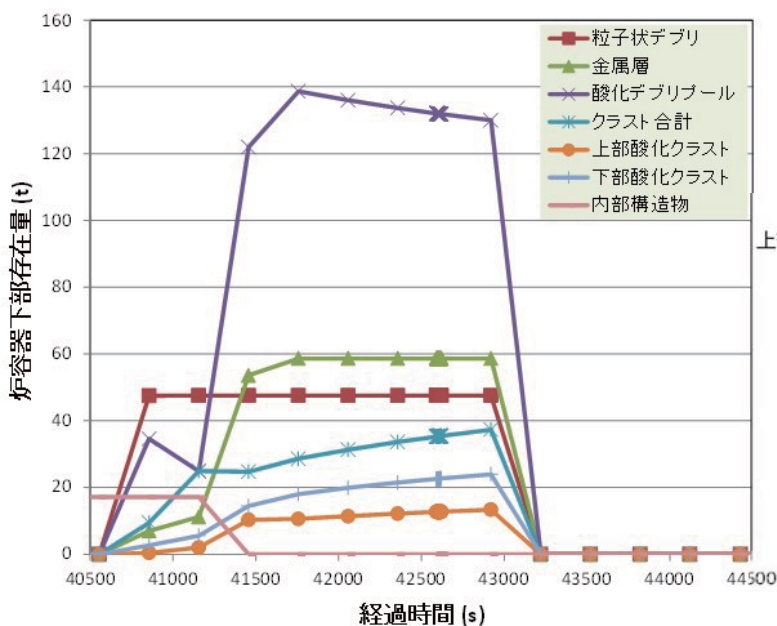


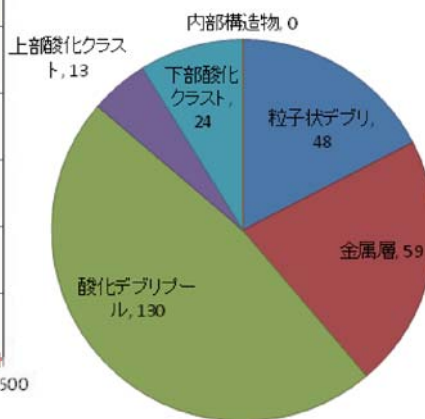
図3 重力層分離試験と層状化解析の比較

表 1 炉容器下部ヘッドの貫通時刻と貫通面積

起回事象	貫通時刻 (s)	貫通面積 (m <sup>2</sup> )
a. 交流電源喪失	42994	0.23
b. 大破断冷却材喪失	12598	0.51
c. 小破断冷却材喪失	30043	0.24



(a) 存在量の時系列



(b) 破損直前の存在量

図 4 交流電源喪失における炉容器下部ヘッド内存在量、温度の時系列

#### (4) 下部ヘッド溶融物挙動解析モデルの検討

原子炉容器下部ヘッド溶融物成層化や下部ヘッドからの溶融物流出に関して、過酷事故システム解析コードの既存解析法や既存解析モデルについて検討した。

MELCOR を構成するモデルの中で、溶融物挙動がどのように取扱われているかを検討した。苛酷事故を模擬した実験プロジェクトの報告を調査し、溶融コリウムの挙動では酸化および共晶について評価が必要であることがわかった。[5] MELCOR と SAMPSON の両コードについて、評価している物質と反応式の種類、生成量の計算モデルを検討した。

### 2. 2. 原子炉容器下部ヘッド溶融物挙動試験

#### (1) 試験装置の製作と予備試験

試験装置の製作では、電力中央研究所において、所有している溶融加熱炉と、購入した顕微レーザーラマン分光分析器を組み合わせた。予備試験としては、原子炉容器下部ヘッドの溶融物挙動に関する重力相分離試験と、容器の溶融貫通と伝熱特性試験を行った。

溶融や凝固を伴わない等温系における重力相分離をシリコン油と塩化ナトリウム水溶液を用いて実施した。二種類の溶液が混合して、軽い流体が重い流体の上に積層する過程を可視化してデータベースとした。密度の大きい流体を密度の小さい流体に注入して、重力により相分離する現象を可視化した。伝熱塩の上から溶融した錫を注入し、温度をパラメータとして凝固の時間変化を観察した。

溶融貫通試験では、錫製半球容器に上部から溶融錫を注入し、温度をパラメータとして貫通に至る時間変化を観察した。

容器下部伝熱特性試験では、アルミニウム容器にシリコン油を注入し、容器底部の外面熱流束と外面温度の時間変化を測定した。



## (2) 試験片断面の組成分析と光学観察

予備試験後の試験片断面を顕微レーザーラマン分光分析器（図5）を用いて組成分析と光学観察を行った。

ステンレス鋼に酸化膜を生成させた試験片を使用して、その断面の組成分析と光学観察を行った。酸化膜の組成は可視観察では判別しにくいですが、ラマン分光分析により、ヘマタイト酸化鉄（ $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ）とマグネタイト酸化鉄（ $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ）の分布状況が確認できた（図6）。

## 3. 今後の展望

事業の初年度として初期の目標を達成し、2年目の計画を実施中である。溶融物の原子炉容器下部ヘッドでの成層化に関する挙動と原子炉容器下部ヘッド溶融貫通挙動の理解を抜本的に向上させることを目的として、溶融流出解析・溶融物挙動解析モデルの検討を進める。合わせて、苛酷事故システム解析コードによる炉心溶融物データの作成と、試験データの取得及び溶融混合状態の観測のための試験を実施する。

## 4. 参考文献（成果発表）

- [1] 榊原 玄大, 岡 芳明, “MPS 法による溶融物挙動解析 (2) 下部ヘッド配管よりの流出,” 日本原子力学会 2013 年秋の大会, H10, 八戸工業大学 (2013. 9. 3)
- [2] Gen Li, Yoshiaki Oka, et al., “Numerical simulation of stratification behavior using moving particle semi-implicit method,” 第 18 回計算工学講演会, F-12-2, 東京大学生産技術研究所 (2013. 6. 21)
- [3] 古谷 正裕, Gen Li, 岡 芳明, 他, “二流体の重力層分離過程 (1) 可視化実験, (2) MPS 法解析,” 日本機械学会 2013 年度年次大会, S083022-S083023, 岡山大学 (2013. 9. 9)
- [4] Gen Li, Yoshiaki Oka, et al., “Experiments and MPS analysis of stratification behavior of two immiscible fluids,” Nuclear Engineering and Design, **265**, pp210-221 (2013)
- [5] Asril Pramutadi Andi Mustari, Yoshiaki Oka and Masahiro Furuya, “MPS Method for eutectic phenomena analysis in BWR severe accident,” ERMSAR 2013 - 6th European Review Meeting on Severe Accident Research, Poster session, Palais des Papes, Avignon, France (2013. 10. 2-4)



図5 購入したラマン分光分析器

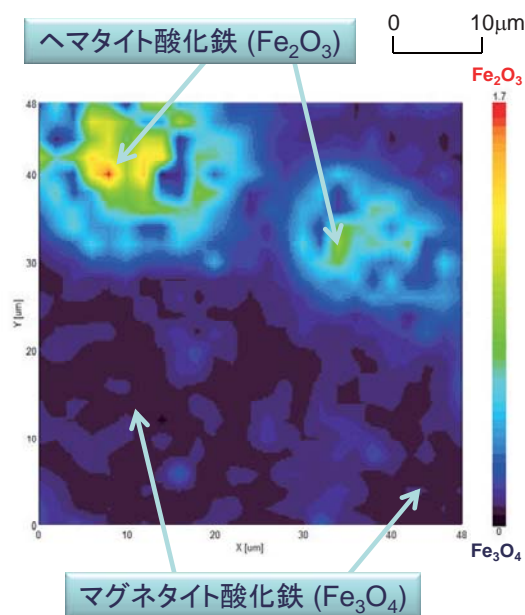


図6 試験片断面の組成分析と光学観察