

原子炉容器下部ヘッドの溶融物挙動の機構論的研究

受託者 学校法人 早稲田大学
研究代表者 岡 芳明 (平成 24、25 年度)、師岡 慎一 (平成 26 年度) 大学院先進理工学研究科
再委託先 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

過酷事故時の原子炉容器下部ヘッドでの炉心溶融物挙動は、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 の過酷事故挙動は PWR に比べると不明な点が多い。出力密度や構造材の割合も PWR とは異なる。BWR 原子炉容器下部ヘッドはスペースが大きく大量の水が存在する。

下部ヘッドでの溶融物の層状化や構造材の破損に関わる挙動は解明されていない。その大きな理由は従来の過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、実際の炉心溶融物では行うのは困難である。

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 法で過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。

本研究は BWR 原子炉容器下部ヘッドでの炉心溶融物挙動と配管貫通部の溶融流出挙動を MPS 法と実験、過酷事故システム解析コードにより研究し、過酷事故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

昨年度開発し検証した MPS 法の内部発熱、相転移等のモデルに加えて、配管中の溶融物挙動の解析では、粘性、輻射熱伝達、表面張力のモデルを開発・検討した。既存試験 (Sienicki-4, BLOKKER-II, GEYSER-4, EPRI-3) を解析して、溶融物進入の時間経過および最大進入長さの予測値が試験結果と一致することを確認した。BWR の計装配管内溶融物挙動を解析し、内管

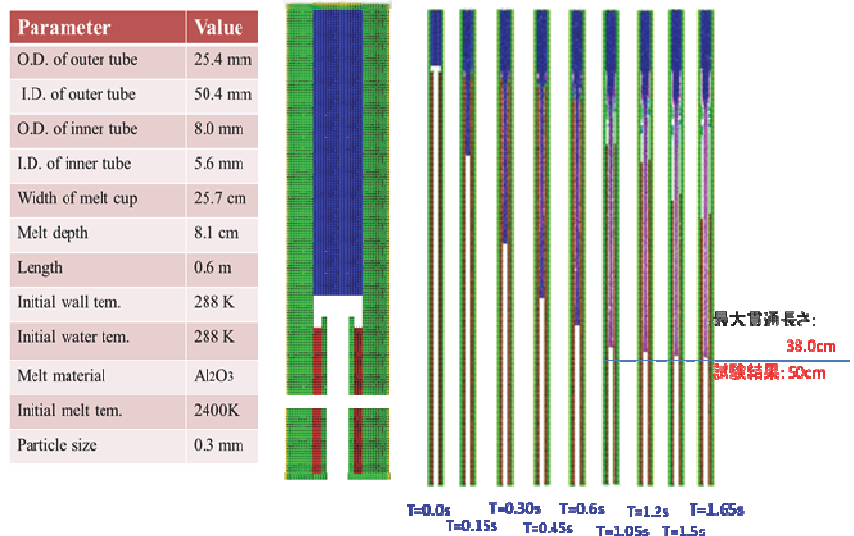


図 1. BWR 計装配管内の溶融物挙動

と外管の間に水が存在すると、溶融物が固化して閉塞することが分かった（図1）。[1]

(2) MPS 法による下部ヘッド内容融物挙動解析

重力相分離試験では、伝熱塩の上部から溶融した錫を注入した。支配因子である粘性率と流体密度差が重力分離に及ぼす影響を把握し、溶融移動過程における重力分離モデルの妥当性確認に適した実験データベースを得た。

重力層分離・凝固試験を MPS 法で解析した。実験と解析の温度分布比較結果はよく一致し、開発モデルが層化と固化を解析できることを確認した（図2）。[2]

鉛ビスマス半球容器試験の解析では、温度成層化による容器側面周辺部の上部からの流出を再現できた（図3）。

共晶反応の MPS 法による解析モデルを開発し、既存の固体（鉄）-液体系（溶融ウラン）の実験結果（TREAT, CAFE）と一致する結果を得た。[3]

(3) MAAP 等による溶融物挙動解析と炉心溶融物データ作成

過酷事故システム解析コード MELCOR を用いて、福島第一1号機の溶融進展におけるデブリ挙動を解析した（図4）。

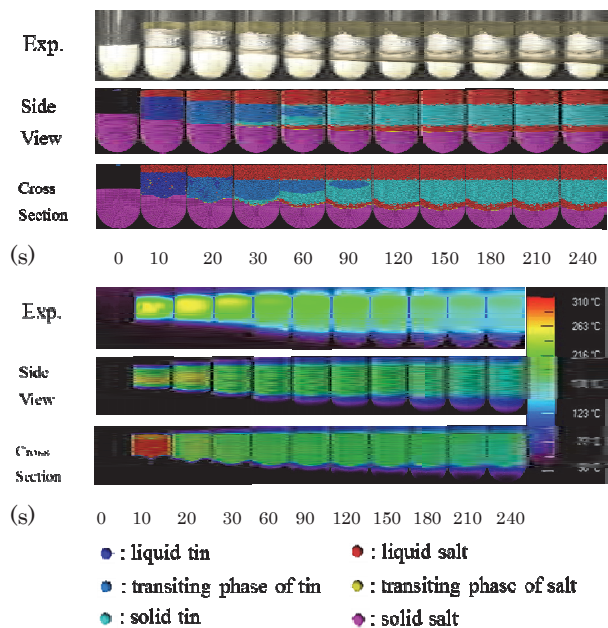


図2. 重力相分離試験と MPS 法解析

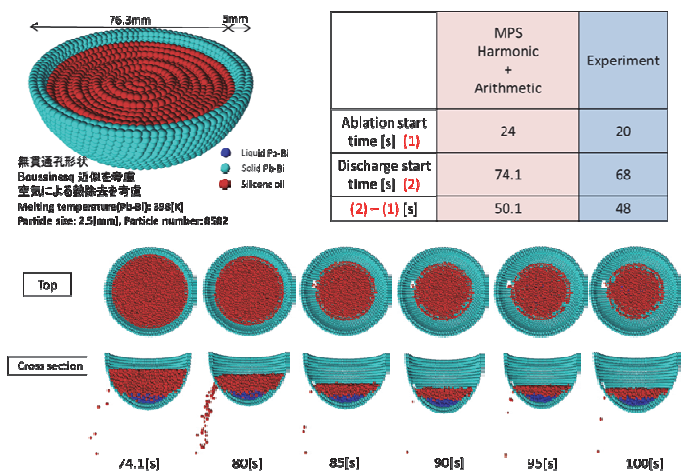


図3. 鉛ビスマス半球容器試験の解析

下部プレナムの物質構成 (produced by MELCOR for 1F1) [kg]

	Level1	Level2	Level3	Total
Zr	13913	7175	144	21233
SS	5902	4278	2361	12542
B4C	244	233	7	483
ZrO2	6956	10072	346	17375
UO2	23997	51307	2020	77324

MELCOR ノード構成 (for 1F1)

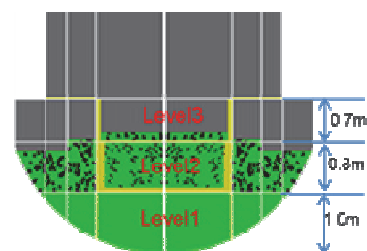


図4. MELCOR 解析による福島第一1号機の下部ヘッド溶融物組成

共晶反応が溶融物の種類・温度、溶融流出時刻に与える影響を把握するために、BWR-4 型炉について電源喪失事故や配管破断事故を対象として、過酷事故システム解析コード MAAP による共晶反応モデルの感度解析を実施した。代表的な事故シナリオである全交流電源喪失事故と大・小破断冷却材喪失事故を解析した。全交流電源喪失結果を図 5 に示す。最も量が多いのは酸化物デブリプールで、内部構造物は酸化物デブリプールが形成されるとまもなく溶融して消滅する。共晶モデルを考慮しないと酸化物デブリプール形成後早く流出する。共晶モデルを考慮すると、溶融は低温で発生するため周囲を溶融させ炉容器下部へと移動する時間が遅くなることにより、炉容器破損時間も遅くなったと考えられる。

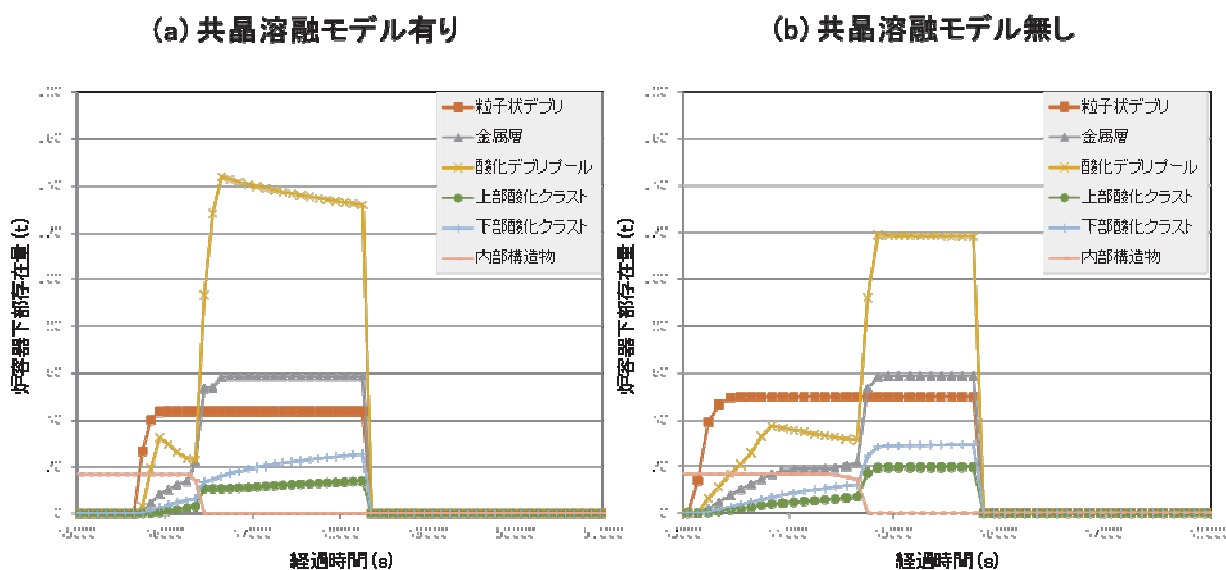


図 5. MAAP による全交流電源喪失時 BWR 下部ヘッド溶融物挙動解析

(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結果を踏まえ、MPS 法の解析結果を参考に下部ヘッド配管部の溶融流出解析モデルの改良検討を行った。[4]

薄板アブレーション解析および配管貫通部アブレーション解析で検証した MPS 法を用いて、既存コード MELCOR の配管部溶融流出解析モデルを検討した。MPS 解析では破損口径増加率が大きい。MELCOR のモデルでは容器壁への熱伝導を考慮していないためであると考えられる。

2. 2. 原子炉容器下部ヘッド溶融物挙動試験

重力相分離試験、溶融流出試験、および共晶反応誘起混合試験を実施した。

溶融流出試験では、鉛ビスマス半球容器にシリコン油を注入して溶融貫通の状況を観察すると共に、薄板アブレーション試験を実施した。重量と体積を同時計測することで、密度の異なる流体の流出量を連続的に計測した。半球容器アブレーション試験を行った結果、粘性が小さい場合には温度成層化により容器壁が液面近傍で減肉し容器が周方向に断裂する現象を、粘性が大き

い場合には容器内壁と下部孔がアブレーションしながら流出する現象を可視化した（図6）。

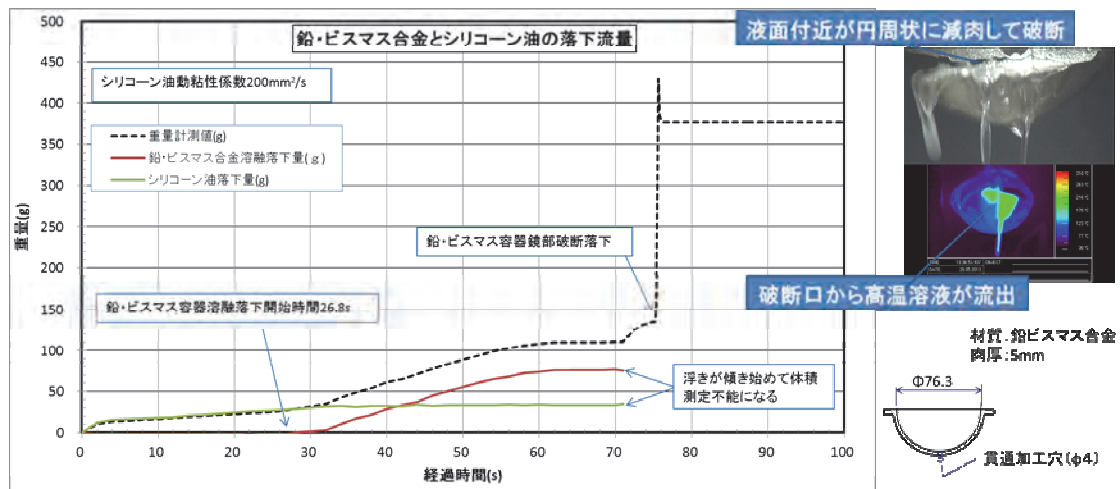


図6. 鉛ビスマス半球容器の溶融物挙動試験結果

薄板アブレーション試験では、試験片の壁面が溶融金属でアブレーションする現象を可視化した。これらの実験によりアブレーションモデルの妥当性確認に適した実験データベースを得た。

共晶反応誘起混合試験では、ラマン分光分析により混合過程の現象を観察した。酸化ビスマスと酸化銅を接触させて温度を上昇させ共晶溶融による溶融混合を可視化した。共晶生成物の三次元ラマン分光分析を行い、酸化ビスマスと酸化銅の共晶生成物が酸化ビスマスと共存して現れることなどを明らかにした。共晶溶融と混合モデルに適した実験データベースを得た。

3. 今後の展望

本課題は初年度および2年度の目標を達成し、3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溶融物挙動と原子炉容器下部ヘッド溶融貫通挙動の理解を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開発と改良検討を進める。合わせて、過酷事故システム解析コードによるBWR下部ヘッドでの溶融物挙動解析を実施する。

4. 参考文献

- [1] Ronghua Chen, Yoshiaki Oka, et al., "Numerical investigation on melt freezing behavior in a tube by MPS method," Nuclear Engineering and Design, 273, pp440-448 (2014)
 - [2] Ronghua Chen, Yoshiaki Oka, "Numerical analysis of freezing controlled penetration behavior of the molten core debris," Annals of Nuclear Energy, 71, pp322-332 (2014)
 - [3] Asril Pramutadi Andi Mustari, Yoshiaki Oka, "Molten uranium eutectic interaction on iron-alloy by MPS method," Nuclear Engineering and Design, 278, pp387-394 (2014)
 - [4] Gen Li, Yoshiaki Oka, et al., "Experimental and numerical study of stratification and solidification/melting behaviors," Nuclear Engineering and Design, 272, pp109-117 (2014)
 - [5] Gen Li, Yoshiaki Oka, "Sensitivity study of melt behavior of Fukushima unit 1 type accident with MELCOR code and MPS method," Journal of Nuclear Science and Technology, Published online (2014)
- 成果発表：論文6件、発表20件（2014年11月現在）