

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。

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 法による計算機実験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。

本研究のねらいは、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、および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ことである。(図 1)



図 1. 研究開発目標

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

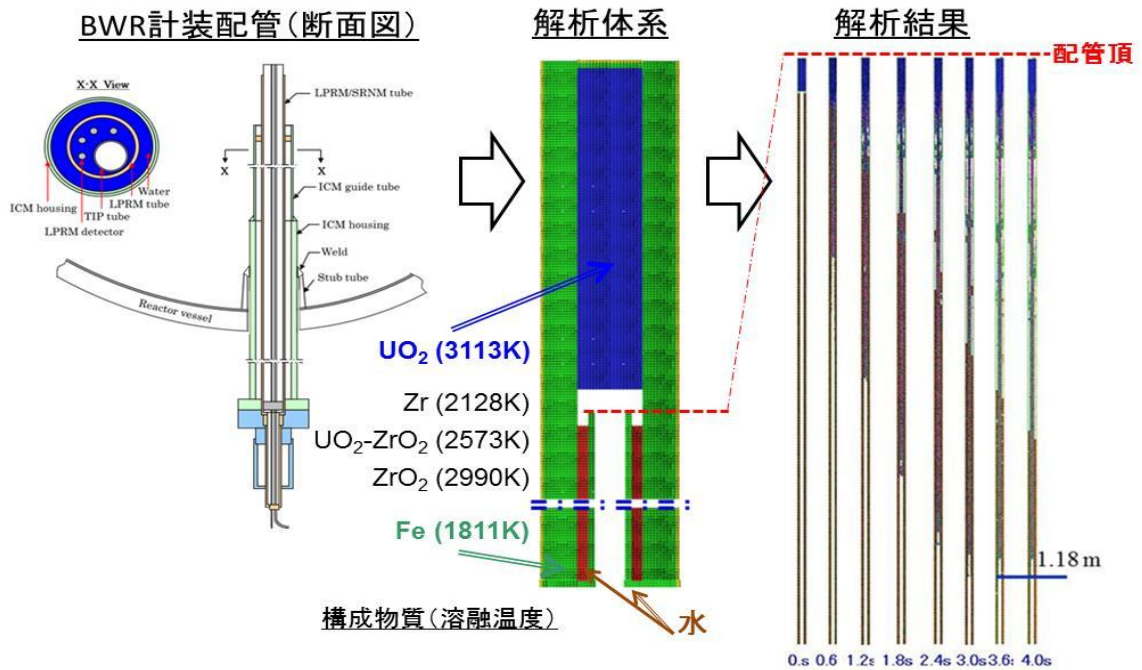
溶融凝固解析を行うための MPS 法のモデルを開発し、解析解や実験との比較により検証した。配管中の溶融物挙動を解析するために、粘性、輻射熱伝達、表面張力のモデルを開発・検討し、既存試験 (Siemicki-4, BLOKKER-II, GEYSER-4, EPRI-3) を解析して、溶融物進入の時間経過および最大進入長さの予測値が試験結果と一致することを確認した。

BWR の計装配管内溶融物挙動の計算機実験を行い、内管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。すなわち、溶融物の流出パスとして、溶融物は計装配管内を流出しないこと、制御棒案内管には抜け落ち防止機構があり抜け落ちない、案内管内には構造物あり流出しないと考えられること、計装配管のスタブチューブへの溶接部溶融による抜け落ちでできた穴からの溶融物流出パスが考えられることがわかった。(図 2)

(2) MPS 法による下部ヘッド内容融物挙動解析

下部ヘッド内のデブリ挙動および共晶反応の解析モデルを開発し、電力中央研究所で実施したシリコン油と食塩水による重力相分離試験、伝熱塩の上部から溶融した錫を注入する重力相分離試験結果と比較することにより、開発モデルが層化と固化を解析できることを確認した。

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。さらに、共晶反応モデルを固体-固体状態解析用に改良し、鉛球-錫ブロック共晶試験における高さ変化がよく一致することを確認した。



➤ FeとUO₂の場合について溶融貫通長さを推定

図2. BWR 計装配管内の溶融物挙動の計算機実験

燃料支持構造物のオリフィス部流路からの溶融物流出の MPS 解析を実施し、共晶反応を考慮した場合、溶融ジルコニウムが流路を閉塞しないことを明らかにした。（図3）

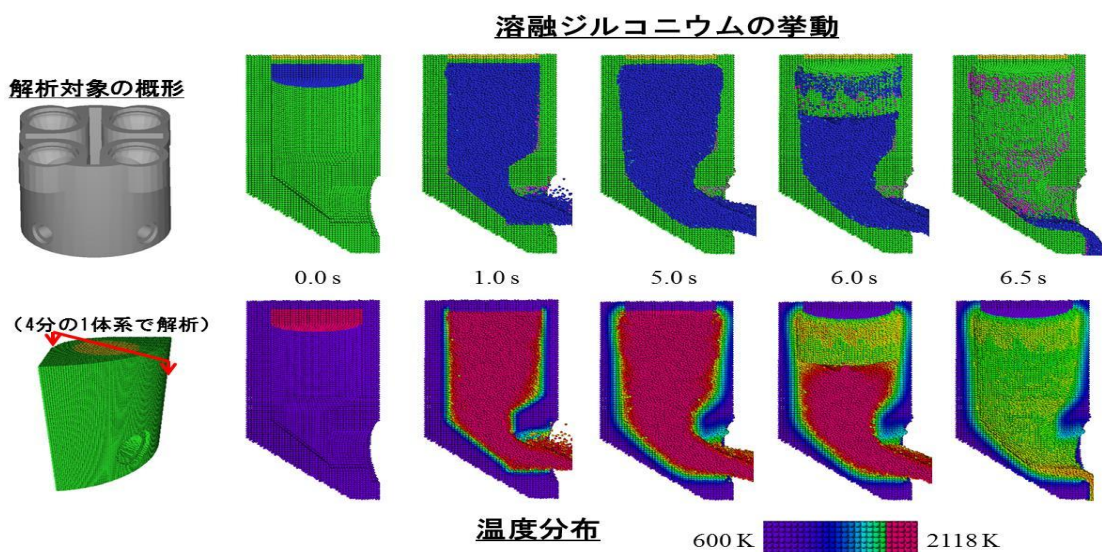


図3. MPS 解析による燃料支持構造物オリフィス部流路からの溶融物流出
（初期温度：ジルコニウム 2118K、支持構造物 600K 共晶温度 1600K）

(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 MAAP と MELCOR を用いて、BWR の溶融進展を解析することにより、炉心溶融物データを作成し、感度解析を行った。

(4) 下部ヘッド溶融物挙動解析モデルの検討

MELCOR コードにより福島第一 1 号機事故のような全電源喪失事故を感度解析した結果、計装配管を無視するとほぼ全量のデブリが原子炉容器から流出する。計装配管脱落を考慮すると脱落部からデブリが流出するが、下部ヘッドに残るデブリは UO_2 割合が小さいため崩壊熱が小さく、注水開始の 15 時間後まで溶融せず、デブリの一部は下部ヘッドに残るとの結果となった。(図 4-図 7) なお MELCOR の下部ヘッドモデルは粒子状デブリ、酸化物デブリ、金属デブリを扱い、共晶は未だ考慮できていない。しかし残ったデブリの温度は SS と Zr の共晶温度 (1210K, MELCOR のデフォルト値 1400K) を超えており、残ったデブリも共晶溶融物とともに下部ヘッドから流出する可能性がある。

原子炉容器下部ヘッドの計装配管を含む部分の溶融物挙動を MPS 法で解析し MELCOR 解析の事象進展シナリオを確認した。

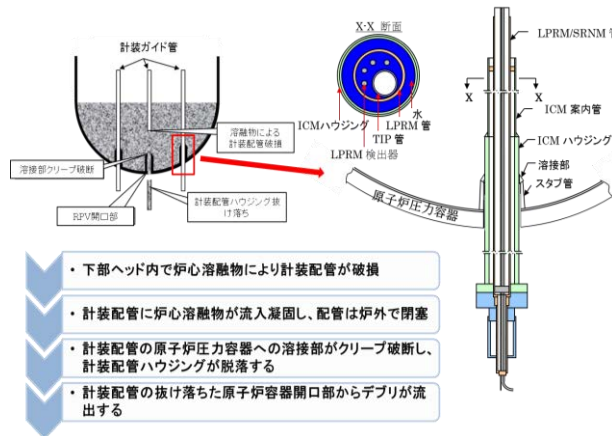
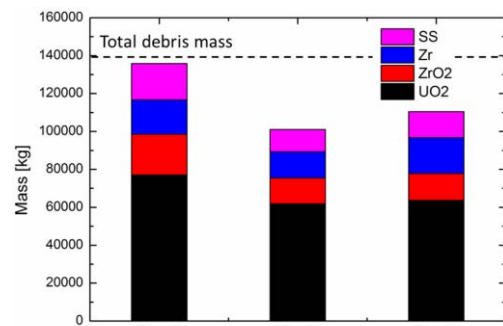
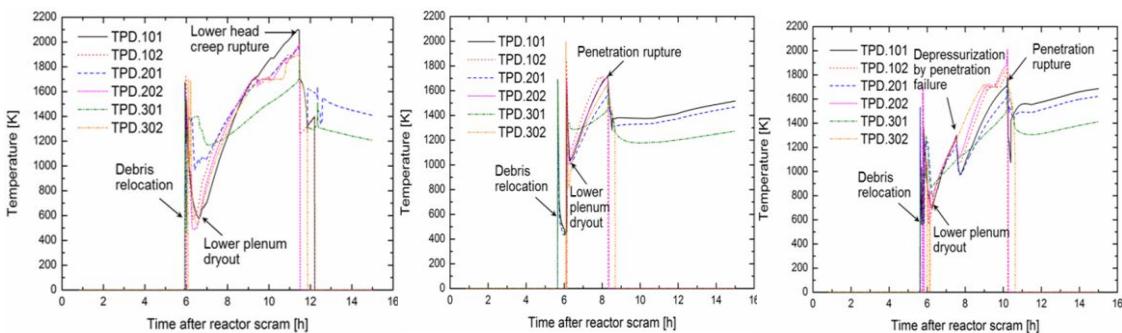


図 4. 炉内中性子計装配管の破損経過



- Case I (計装配管無視) 圧力容器の外にほとんどすべてのデブリ流出
- Case II と III (計装配管考慮) 下部プレナム内にデブリの一部が留まる

図 5. 圧力容器外へのデブリ放出量



Case I (SRV開固着で減圧、下部ヘッドクリープ破損により流出)

Case II (SRV開固着で減圧、計装配管溶接部破断により流出)

Case III (計装配管炉内クリープ破損で減圧、計装配管溶接部破断により流出)

- Case I では、下部ヘッド破損により溶融物が流出
- Case II と Case III では、計装配管溶接部破断により計装配管が脱落し溶融物が流出
- 流出後の下部ヘッド内デブリの温度は低い (固体)
- Case III では、計装配管の炉内でのクリープ破損により下部プレナムのデブリが冷却され、圧力容器が減圧されるため計装配管脱落とデブリ溶出の時間は遅れる

図 6. 下部プレナムのデブリ温度

2. 2. 原子炉容器下部ヘッド溶融物挙動試験

MPS 法の検証のために、重力層分離試験、半球容器溶融流出試験を実施した。共晶反応誘起混合試験を実施し、ラマン分光分析により混合過程の現象を観察した。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。さらに、三次元プリンタで樹脂製の炉心支持板部流路を模擬した試験体を製作し、流動試験を実施した。

3. まとめ

MPS 法を用いて、BWR 計装配管中の溶融物挙動を解析し、配管中では溶融物が凝固する可能性を示した。その結果、計装配管のスタブ管

への溶接部が破損し、配管が抜け落ちて、その穴からデブリが流出するシナリオの可能性を示すことができた。なお計装配管が下部ヘッドへ直接溶接されている場合は別途検討の必要がある。

MELCOR コードによる福島第一 1 号機のような全電源喪失事故の感度解析を行った結果、計装配管を無視した場合はほぼ全量のデブリが原子炉容器から流出する。計装配管脱落を考慮した場合は下部ヘッドに一部のデブリが残る結果となった。しかしその温度は SS と Zr の共晶温度より高いので、残ったデブリも溶融物とともに流出する可能性がある。MELCOR コードの改良と共晶溶融について下部ヘッドのデブリ条件での実験が必要である。

4. 今後の展望、将来の見通し

従来の MPS 法の研究は実験解析での MPS 法検証にとどまっていたが、本研究はそれを越えて MPS 法の解析と MELCOR コードによる過酷事故解析を組み合わせることで過酷事故挙動の予測性向上に成功した。これによって新たな過酷事故研究の新展開を開いたと考えている。欧米の研究者の関心も高い。

過酷事故挙動解析において、その計算モデルの感度解析や詳細化の検討以前に、事故シナリオの物理的検討が重要であることを示したことも有用な成果と考える。過酷事故の個別の現象に注目しがちであるが、過酷事故挙動解析全体で、弱い点から研究することの重要性を明らかにしたとも考える。

MPS 法による計算機実験で予測性が向上すると考えられる過酷事故挙動は多数ある。たとえば溶融物コンクリート相互作用における非等方侵食問題、格納容器床での溶融物拡がり挙動、デブリの冷却性、原子炉容器内外の溶融物挙動、溶融物と構造材との相互作用などである。

人材育成面では研究に直接に参加する若手のみならず、早稲田大学の研究室では多くの大学院生・卒論生がさまざまな過酷事故と原子炉安全の研究を行っており、その数は 15 名を超えている。産業界との連携により、産業界のニーズや知見との相乗効果も研究面のみならず人材育成面でも効果を上げている。

成果発表：論文 7 件、発表 20 件（2015 年 9 月現在）

5. 査読付発表論文

[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)他 6 件

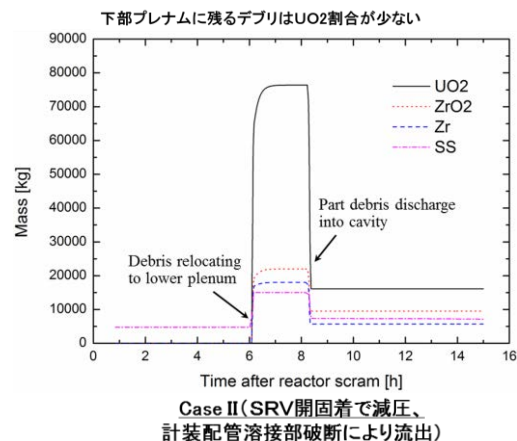


図 7. 下部プレナムデブリの主な成分