

シビアアクシデントにおける炉心構造物移行の高精度数値シミュレーション

(受託者) 国立大学法人 東京大学

(研究代表者) 岡本孝司 大学院工学研究科

(共同研究相手) インペリアルカレッジ・ロンドン

(研究期間) 平成26年度～28年度

1. 研究の背景とねらい

シビアアクシデントマネジメントを適切に実施するために、様々な条件下での炉心損傷の検討が望まれる。過去に行われた過酷事故研究は主に加圧水型原子炉を対象としたものであり、沸騰水型原子炉 (BWR) に関する過酷事故研究は少なく、福島第一原発の事故原因の解明に至っていなかった。また、現状のシビアアクシデントに係る数値解析技術は、熱水力学的に事象全体を対象とするものがほとんどであり、例えば、制御棒の共晶反応のような素課程は、事象進展に強い影響を与える (流路閉塞や臨界、など) にも関わらず、単純なモデル化にとどまっていた。特に、ステンレス鋼とボロンカーバイド (B₄C) の共晶反応による制御棒の熔融落下は過酷事故の早期に生じると考えられており、その後の過酷事故進展を決定する大きな要因となりうるため、事故解明につながる重要な現象である。シビアアクシデントの進展をよりよく理解するにはこのような制御棒の熔融挙動を評価するためのシミュレーション技術を開発することが望まれている。制御棒の熔融を模擬するには、熔融した流体の大変形を精度よく模擬する必要がある。このような体系を実行するための最先端のシミュレーション技術には、メッシュフリー粒子法およびアダプティブメッシュを導入した有限要素法などがある。本事業では、東京大学と英国 Imperial College London が協力して、制御棒の熔融過程および再配置を模擬するために必要となる数値解析の要素技術を開発する。さらに、B₄C と鉄の共晶反応に係る実験データを取得する。

2. これまでの研究成果

(1) 調査研究及び検証実験

BWR 制御棒材料を対象とした超高温環境下の共晶反応可視化手法を開発して、境界条件を測定した。非常に高い共晶点温度を有するステンレス鋼とボロンカーバイド (B₄C) の熔融進展と熔融物落下挙動を可視化するには、乗り越えなければならない様々な課題がある。なかでも、シミュレーションの妥当性検証に必要な境界条件の提供、詳細な実験データ取得につながるクリアな可視化を損なわない加熱方法、温度測定精度を可能な限り維持した可視化、といった条件を同時に満たすことが困難である。これらの既存の実験に関する問題を解決するために、図1のような共晶反応可視化装置を開発・改良した。本装置によって、試験片を左右から輻射伝熱で加熱し、正面から試験片をリアルタイムに可視化することができる。熱電対とデータロガーを用いて高精度に試験片の温度を測定する。さらに、測定した電気抵抗率からヒーター温度を評価することで、大規模な試験片形状の変化が生じても境界条件が得られるようにした。試験片と電極部の間にセラミックスを挿入することにより、試験片からの熱損失抑制および電極と試験片間の絶縁を可能とした。下部電極に引張機構を設置して、実験中にヒーターが熱膨張で歪まないようにした。試験中は実験装置内を高純度アルゴンガスで満たして、酸化物の発生を抑制した。可視化実験では、粉末 B₄C と SUS304 を使用した。粉末 B₄C は粒子径が平均で約 20-30 μm のものを用いた。

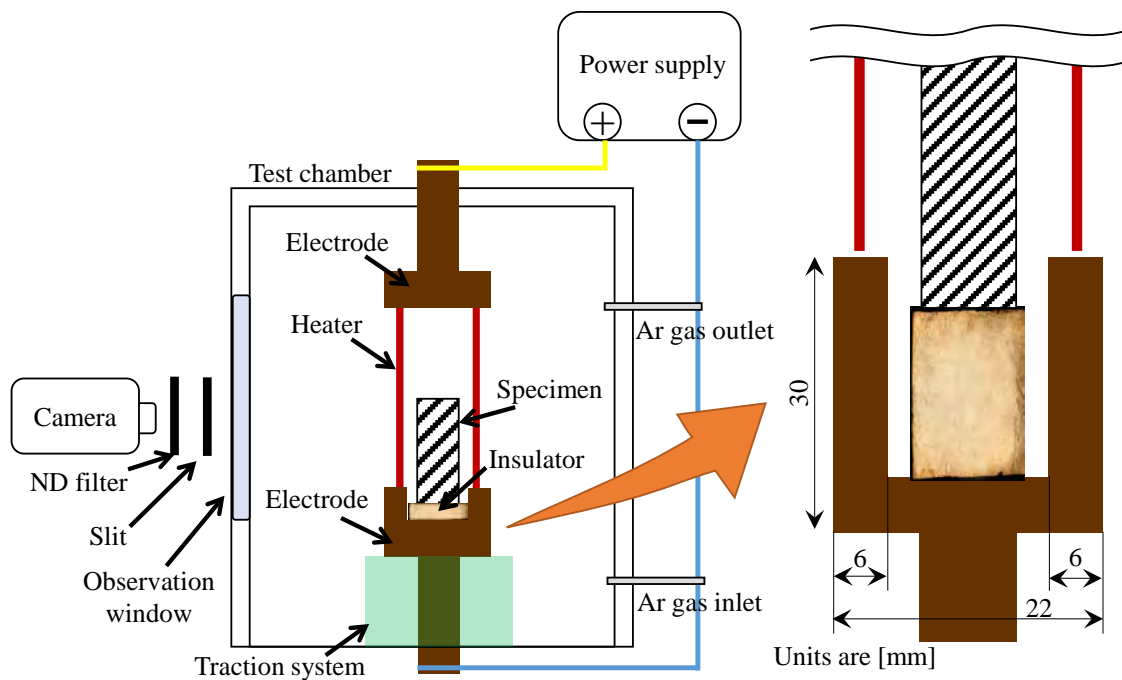


図1 共晶反応可視化装置概略図

本年度は、溶融移行（リロケーション）挙動可視化実験を行った。リロケーション挙動可視化実験では、共晶反応によって生じる共晶溶融物が重力によって下方へ移行する際の挙動に着目した。図2に本実験で使用した管状試験片の概念図を示す。SS管（灰色）に粉末 B_4C （黒色）を充填して作製した。粉末 B_4C の充填率は約50%であった。実験中は、試験片の上部と中間部における温度を熱電対によって直接測定した。管状試験片は制御棒を模擬しており、その寸法は実際の原子炉における制御棒の寸法を参考に設定した。SS管の外径と厚さ、 B_4C とSSの質量比および試験片温度を変化させて実験を行った。図3にリロケーション挙動可視化結果の一部を時間ごとに示す。実験中、試験片下部に微量の酸化物が見られたが、鮮明な可視化画像を得ることができた。リロケーション挙動も鮮明に捉えることができた。Case 1では、外径=4.20 mm、厚さ=0.28 mm、 B_4C :SS=31.8:68.2、上部位置平均温度=1225 °Cとし、Case 2では、外径=6.00 mm、厚さ=1.00 mm、 B_4C :SS=14.2:85.8、上部位置平均温度=1267 °Cとした。Case 1では溶融物が液膜状に試験片を覆った（433 s）。大部分の粉末 B_4C が未反応のまま残り、雰囲気中に露出した（1487 s）。また、試験片は崩落することなく、その形状を維持した。一方、Case 2では溶融物が大きな液滴を形成し、試験片は大きく崩落した（1250 s）。液滴は回転しながら大部分の粉末 B_4C を巻き込み、下方へと移行した。溶融物と固体部分の界面における質量輸送のバランス、動的な粘性変化および溶融物にかかる表面張力と重力のバランスがこれらの異なる挙動を引き起こしたと考えられる。本実験により、試験片の断面寸法と B_4C /SSの質量比に依存して、リロケーション挙動が大きく変化する可能性が示唆された。

このように、これまでに超高温環境下共晶反応可視化手法を開発し、本手法を応用してBWRの制御棒材料における溶融進展の様子とリロケーション挙動を詳細に可視化した。可視化結果を元に、制御棒溶融移行挙動に関する新たな知見が得られた。実際のシビアアクシデントにおいても、

制御棒の寸法や B_4C /SS の質量比の違いにより、それぞれの原子炉の型式で異なるリロケーション挙動が生じる可能性があると考えられる。

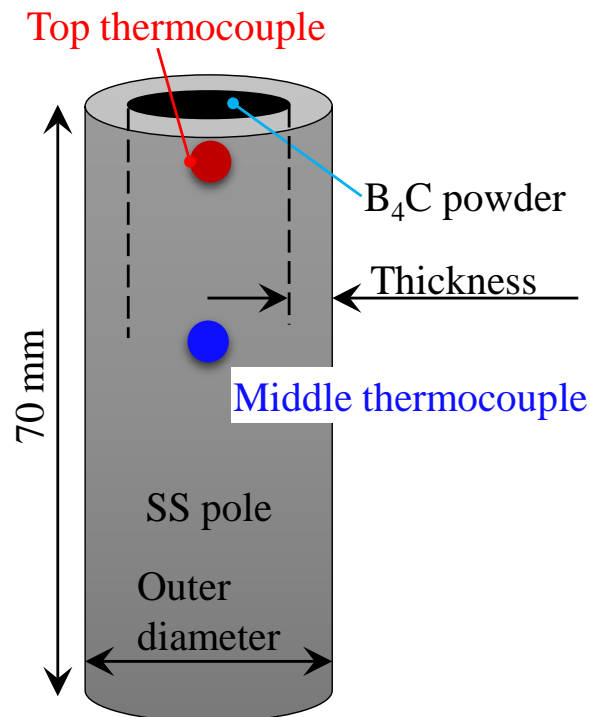


図2 管状試験片の概念図

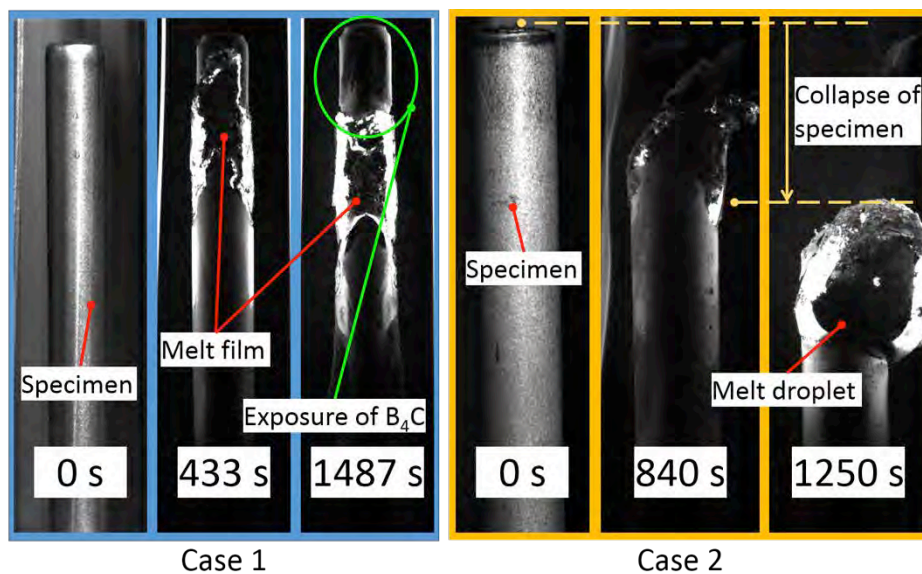


図3 リロケーション挙動可視化結果

(2) 熱流動シミュレーション

本年度は、シビアアクシデント発生時の燃料棒溶融現象をより詳細に模擬するため、MPS 法において新たに共晶反応のモデルを導入し、2 種類の異なる物性間における溶融シミュレーションを実行する。

本研究では、輻射伝熱のように熱流束境界条件によって金属が溶ける様子を、MPS 法を用いて模擬する。著者らの調査によって、既存の MPS 法における伝熱境界条件は Dirichlet 境界条件に限られており、熱流束のような Neumann 境界条件を扱うことができないことがわかった。そこで、まず、MPS 法における新たな Neumann 境界条件モデルの開発を行った。図 4 に数値シミュレーションの初期状態を示す。MPS 粒子を直方体状に配置した。計算領域内部には直方体の長軸に平行で鉛直下向きの熱流束場を設定した。構造物内部に形成される温度勾配を理論解と比較するため、底部壁面には 300 K の温度固定境界を設定した。その他の壁面は全て断熱境界条件を設定した。MPS 粒子の物性について、密度、動粘度、比熱および熱伝導率は、 $1,000 \text{ kg/m}^3$ 、 $10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ 、 10 J/kg K および 50 W/m K である。初期温度は 300 K とした。熱流束の大きさは $25,000 \text{ W/m}^2$ とした。

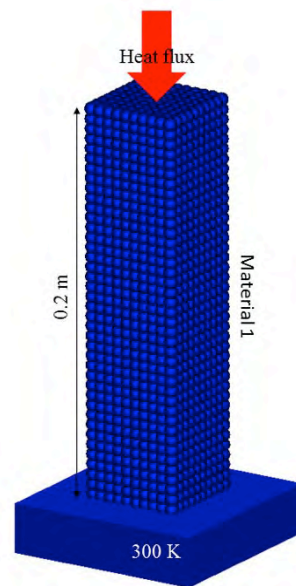


図 4 初期状態

図 5 に数値シミュレーション結果を示す。数値解析を実行したところ、上面より構造物の温度が上昇し、滑らかな温度勾配が形成されている様子が確認できた。図 6 は MPS 法による解析結果を差分法と比較したときのグラフである。定常状態および非定常状態のいずれにおいても、本研究で開発したモデルは差分法と非常によく一致しており、妥当性が確認できた。

次に、本研究で開発した Neumann 境界条件モデルを用いて、熱流束場内部における共晶反応を模擬する。図 7 に数値シミュレーションの初期状態を示す。MPS 粒子を立方体状に配置した。本シミュレーションでは 2 種類の物質を用いた。計算領域内部には鉛直下向きの熱流束場を設定した。壁面における境界条件はいずれも 300 K の温度固定境界とした。Material1 の密度、動粘度、比熱、熱伝導率、融点および潜熱は、 $1,000 \text{ kg/m}^3$ 、 $10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ 、 10 J/kg K 、 50 W/m K 、 $10,000 \text{ K}$ および $10,000 \text{ J/kg}$ である。Material2 の密度、動粘度、比熱、熱伝導率、融点および潜熱は、 $1,000 \text{ kg/m}^3$ 、 $10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ 、 50 J/kg K 、 50 W/m K 、 $10,000 \text{ K}$ および $10,000 \text{ J/kg}$ である。初期温度はいずれも 300 K とした。また、熱流束の大きさは $40,000 \text{ W/m}^2$ とした。MPS 法では、微分演算子の離散化の際、影響半径内部における近傍粒子で重み付け平均を計算している。影響半径内部に

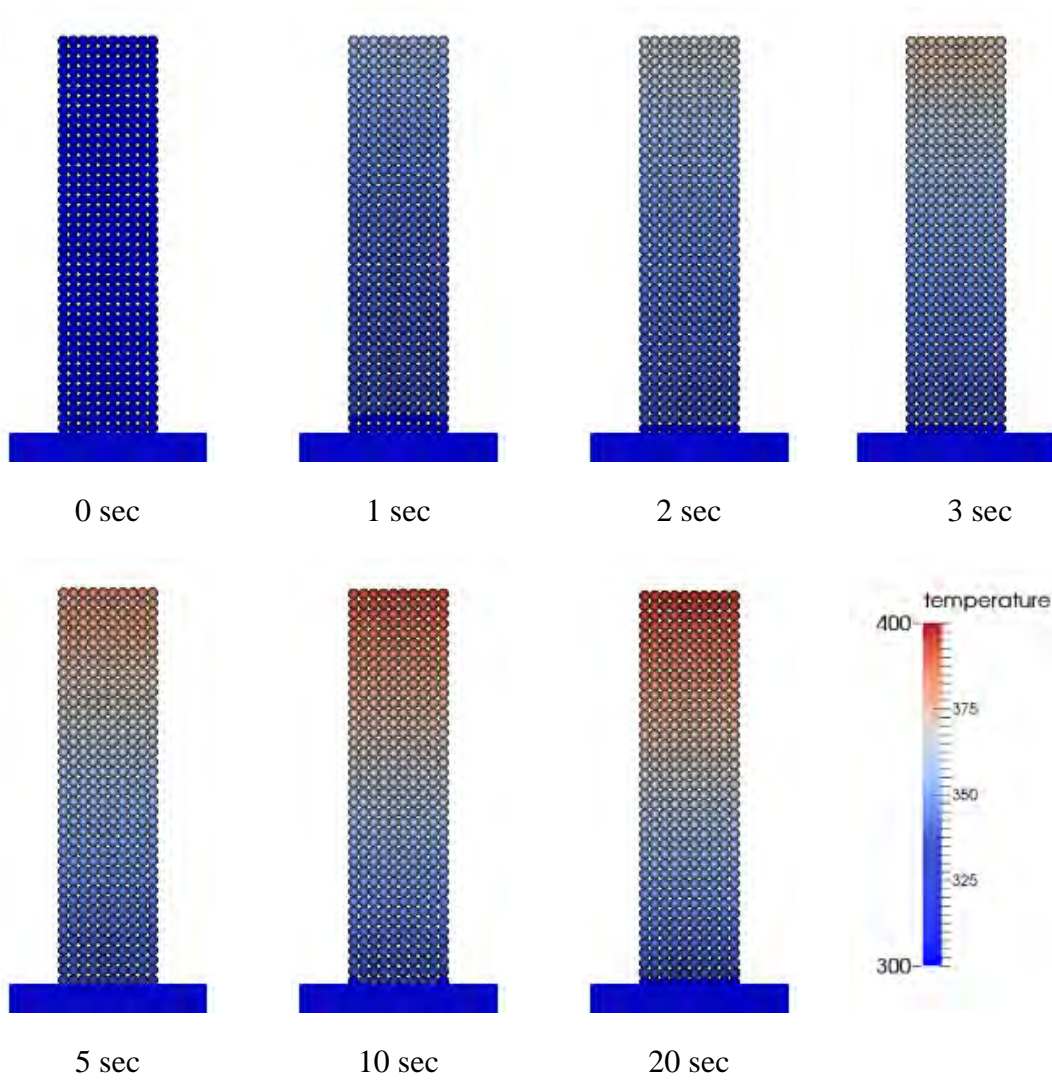


図5 シミュレーション結果

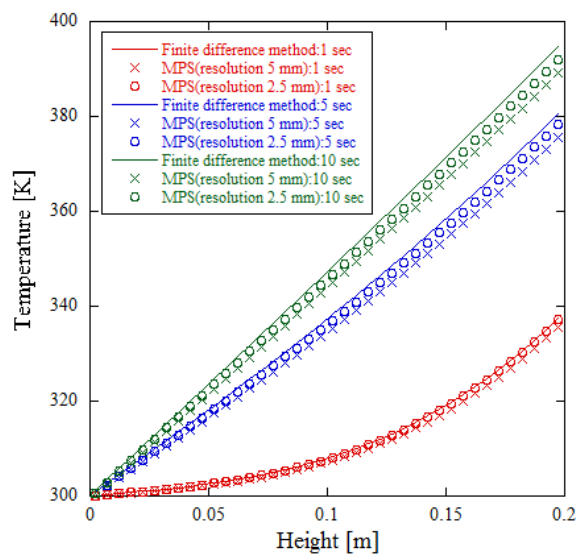


図6 差分法との比較

異なる種類の粒子が存在するときに共晶反応が起こるとして、融点が共晶点である 320 K になるようにモデル化した。

図 8 に数値シミュレーション結果を示す。数値解析を実行したところ、異なる物質の境界付近では実際の融点である 10,000 K よりも低い温度で溶融が始まっている様子が確認できた。また MPS 法における表面張力モデルを導入することによって溶融物がロウソクのように垂れて流れ落ちるキャンドリング現象も確認できた。底部壁面まで流れ落ちた溶融物は冷やされて再凝固する様子も模擬できた。これらはいずれもシビアアクシデント解析に必須の事象であり、炉内構造物の溶融及び再配置の詳細計算が可能となった。今後、実験によって得られた物性値を用いてシミュレーションを行い、その結果を比較していく予定である。

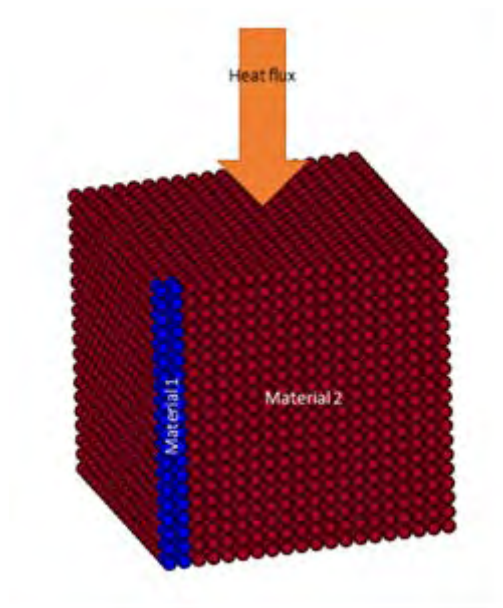
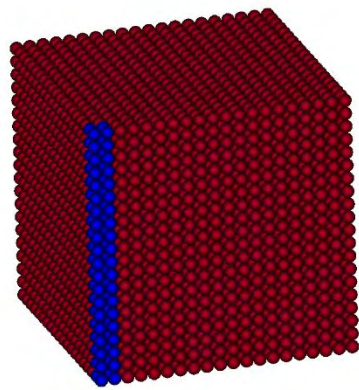


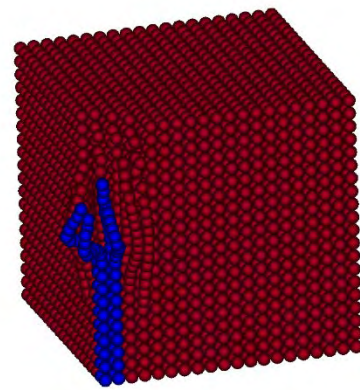
図 7 粒子初期配置

3. まとめ

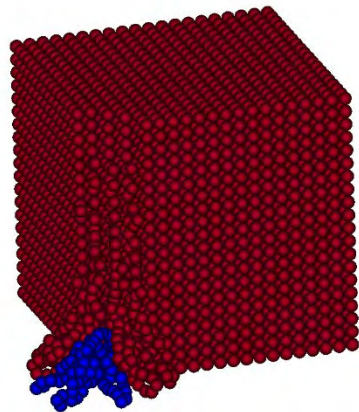
超高温環境下の共晶反応可視化手法を開発して、境界条件を測定した。シビアアクシデント発生時の燃料棒溶融現象をより詳細に模擬するため、MPS 法において新たに共晶反応のモデルを導入し、2 種類の異なる物性間における溶融シミュレーションを実行した。



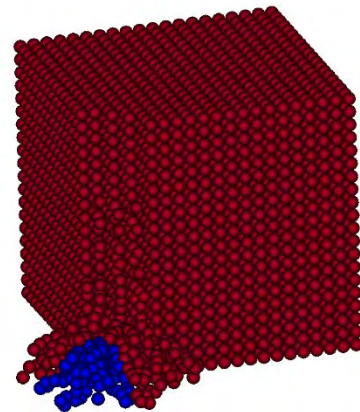
0 sec



1 sec



3 sec



5 sec

図8 シミュレーション結果