

# 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、福島第一原子力発電所の事故原因の解明には、様々な課題がある。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過程は、溶融によって引き起こされる流路閉塞や臨界などによって、事象進展に非線形な強い影響を与えるにも関わらず、単純なモデル化にとどまっていた。BWRの制御棒に用いられている、ステンレス鋼とボロンカーバイド ( $B_4C$ ) の共晶反応による制御棒の溶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溶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。制御棒の溶融を模擬するには、溶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、制御棒の溶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。また、これらのシミュレーションのV&V (検証と妥当性確認) に資するために、共晶反応に関する可視化実験を行い、基礎データを取得する。

## 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 ( $B_4C$ ) の溶融進展と溶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となる境界条件の提供、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  $B_4C$  と SUS304 を使用した。粉末  $B_4C$  は粒子径が平均で約 20-30  $\mu m$  のものを用いた。

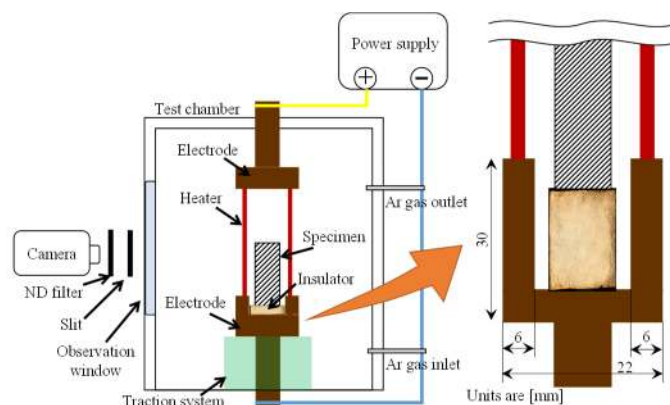


図 1 共晶反応可視化装置概略図

本研究では、界面共晶反応可視化実験と熔融移行（リロケーション）挙動可視化実験を行った。

界面共晶反応可視化実験では、図 2 に示す試験片を用いた。ステンレスで構成されるフレーム（灰色）内に、 $B_4C$  粉末（黒色）を充填した。 $B_4C$  粉末の空隙率は 53% であり、充填した空間の断面は、幅 4.0mm、高さ 35.0mm である。温度測定には、4 か所に直径 0.5mm の K 型熱電対を 4 本使用した。中央の温度計指示値を約 1200 度となるように保持する。

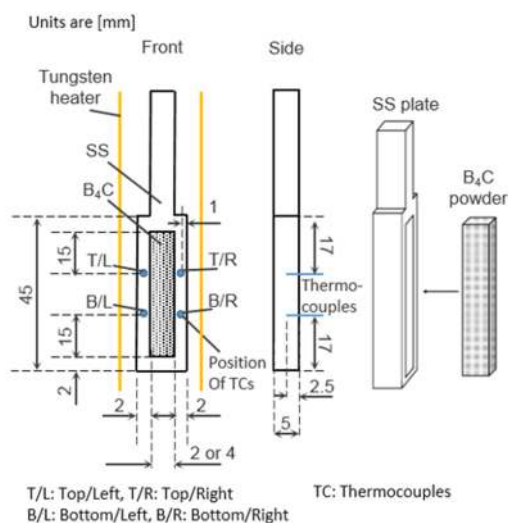


図 2 界面共晶反応可視化試験片

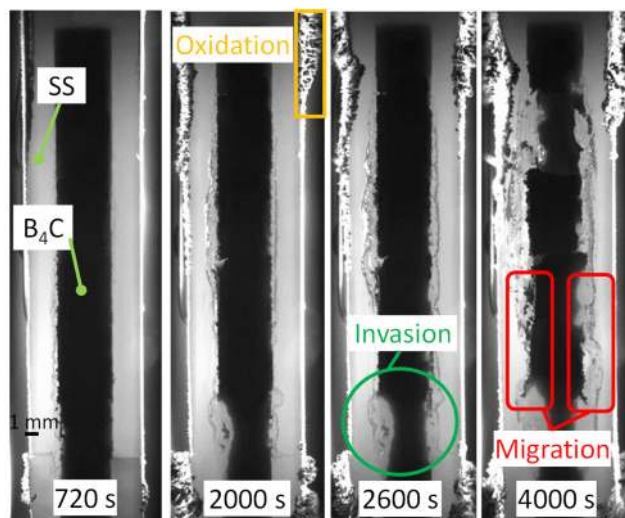


図 3 界面共晶反応進展状況

可視化画像を図 3 に示すが、共晶反応は 700 秒で開始した。液化共晶材料の粘度は約 1.0～20mPa-s であるが、共晶した流体の上部から下部への再配置は見られなかった。画像より、共晶領域の進展を計測する事で、共晶反応速度を求めた。なお、画像からは、一部の  $B_4C$  粒子が溶けずに流体中を動く様相も観察された。このような反応の非均一性により、共晶反応速度は移流の影響を受けることが分かった。得られた共晶反応速度は、恒温槽などを用いた過去の実験では得ることが困難な温度領域のデータである。可視化試験により直接反応速度をアレニウスプロットにより求めることができた。

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熔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4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5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。

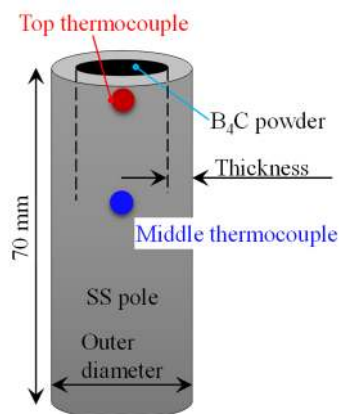


図4 管状試験片の概念図

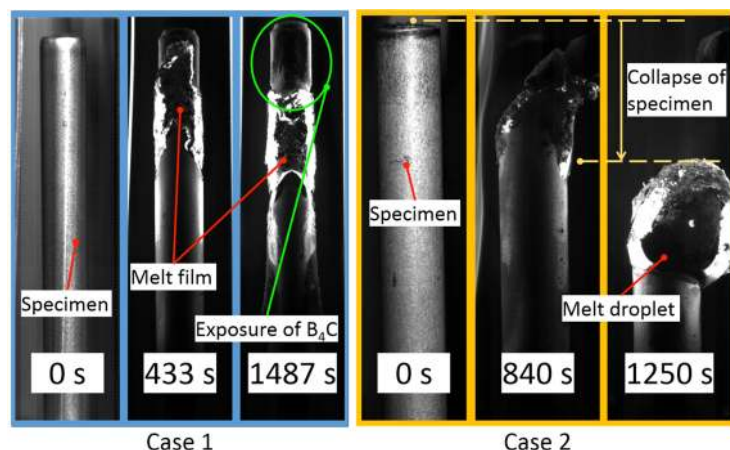


図5 リロケーション挙動可視化結果

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。

## (2) 熱流動シミュレーション

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。

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。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。新しいモデルを開発し、自由液面に直接Neumann

境界条件を設定することが可能となり、熱流束による構造物の溶融および溶融物の再凝固を模擬できた。また、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。その他のパラメータは表 1 にまとめる。

図 6 に数値シミュレーション結果を示す。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。

表 1 計算パラメータ

| Property             | Unit              | Mat. 1           | Mat. 2           |
|----------------------|-------------------|------------------|------------------|
| Density              | kg/m <sup>3</sup> | 1,000            | 1,000            |
| Kinematic viscosity  | m <sup>2</sup> /s | 10 <sup>-3</sup> | 10 <sup>-3</sup> |
| Specific heat        | J/(kg K)          | 10               | 50               |
| Thermal conductivity | W/(m K)           | 50               | 50               |
| Latent heat          | J/kg              | 10,000           | 10,000           |
| Melting point        | K                 | 10,000           | 10,000           |
| Eutectic point       | K                 | 320              | 320              |

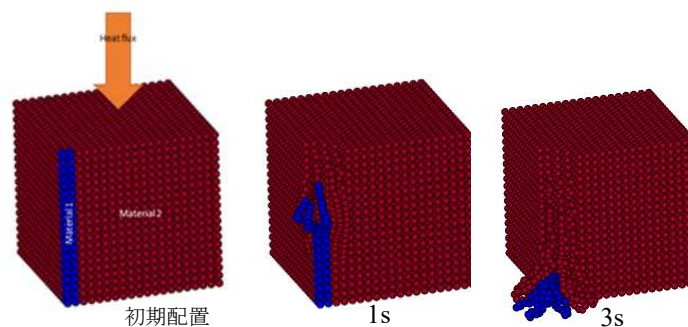


図 6 共晶シミュレーション結果

### (3) まとめ

東京大学と英国 Imperial College London の共同研究を推進し、共晶反応に関する知見を得た。超高温環境下の共晶反応可視化手法を開発して、反応挙動や移行挙動を定量データベース化した。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施した。日英共同執筆の論文をはじめ、下記に示す多くの論文を出版する事ができた。また、複数の学生が、日本原子力学会フェロー賞や、国際会議の Best Presentation Award を受賞するなど、人材育成にも大きく貢献できた。

### 3. 今後の展望

共晶反応素過程を、より精緻な実験により明らかにしていく事が重要である。また、シミュレーションコードによって、パラメータサーベイを行い、非線形な共晶反応がシビアアクシデントに与える影響を定量的に評価する。これらにより、共晶反応モデルの精緻化・高度化を図り、シビアアクシデント解析コードに組み込むことで、原子力発電所の安全に寄与する。

### 4. 参考文献(本事業成果の一部)

- K. Takabatake, X. Sun, M. Sakai, D. Pavlidis, J. Xiang, C.C. Pain, “Numerical study on a heat transfer model in a Lagrangian fluid dynamics simulation,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, **103**, 635-645 (2016)
- S. Ueda, H. Madokoro, B. Jo, M.Kondo, N. Erkan and K. Okamoto, “Time-resolved visualization technique for eutectic reaction between boron carbide and stainless steel at high temperatures,” *Mechanical Engineering Letters*, **2**, 15-00056, (2016)
- S. Ueda, H. Madokoro, B. Jo, M. Kondo, N. Erkan, K. Okamoto, “Dynamic visualization of eutectic reaction between boron carbide and stainless steel,” *J. Nuclear Sci. Technol.*, **54**, 81-88 (2017)