

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

適切にシビアアクシデントマネジメントを実施するために、様々な条件下での炉心損傷を模擬できるようにすることは極めて重要である。現状の数値シミュレーション技術は、熱水力学的にシビアアクシデント事象全体を対象とするものが主であり、例えば、制御棒の共晶反応のような素課程は、時空間的に非線形性が高く、流路閉塞や臨界など、事象進展に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る。本事業では、制御棒の溶融過程および再配置を模擬するための数値解析技術を開発する。

福島第一原子力発電所(1F)をはじめとする沸騰水型原子炉(BWR)における制御棒は、B4Cを用いている。ホウ素と鉄は1200度程度で共晶反応を起こすことが知られており、炉心溶融を起こすシビアアクシデント時には、最初に制御棒が溶融落下すると考えられている。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。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。東京大学では、Moving Particle Semi-implicit (MPS)法と呼ばれるメッシュフリー粒子法を開発しており、Imperial College Londonでは、アダプティブメッシュを導入した有限要素法技術を駆使したシミュレータのFETCHが開発されている。東京大学とインペリアルカレッジの共同研究により、それぞれ別の手法を用いて非線形な溶融挙動の評価を行う。さらに、シミュレーションのV&V(検証と妥当性評価)を目的として、超高温環境下共晶反応可視化手法を開発するとともに、BWRの制御棒材料における溶融進展および溶融物落下挙動データベースを構築する。

BWRにおける制御棒の溶融進展および溶融物落下挙動の評価は、BWR安全性向上と福島第一原子力発電所の廃炉作業において非常に重要である。沸騰水型原子炉に関する過酷事故研究は少なく、1F事故の解明には至っていない。特に、ステンレス鋼とボロンカーバイド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。円滑で安全な廃炉作業のために炉内構造溶融物の分布を詳細に把握することが重要であるため、実験による現象理解とシミュレーションによる高精度な溶融物分布の予測が必須となる。しかし、炉内構造物の高精度シミュレーションの妥当性検証に必要である溶融落下現象のリアルタイムな実験データはこれまで作成されてこなかった。超高温環境下の共晶反応可視化手法を構築することができれば、制御棒の溶融落下現象を理解するとともに、バリデーション用の詳細な実験データを取得することが可能となる。

2. これまでの研究成果

(1) 調査研究及び検証実験

まず、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) の熔融進展と熔融物落下挙動を可視化するには様々な課題がある。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した。試験片は、ステンレス鋼製フレーム ($W8.0 \times D5.0 \times H40$ mm) に粉末 B_4C を充填したものであり、タングステンヒータによって加熱できる。本装置により、共晶反応中も試験片を均一に加熱することができるため、境界条件を得ることができる。また、試験片の左右から輻射伝熱で加熱するため、試験片を可視化することができる。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が可能となる。試験中は実験装置内をアルゴンガスで満たして、酸化物の発生を抑制した。試験片の温度は、4本の熱電対で直接測定し、小さな試験片を使うことで温度勾配を抑制した。図 2 および図 3 に、試験片温度を 1200 °C としたときの実験結果の一例を示す。図 2 は、実験中に測定した試験片温度である。4本の熱電対より得られた温度から、大きな温度勾配が生じていないことが示された。図 3 は、可視化実験の結果を時間ごとに示したデータである。一部で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。共晶反応も鮮明に捉えることができ、熔融物内を粉末 B_4C が移流していく様子も確認することができた。熔融物が B_4C 領域へ侵入する様子もリアルタイムに観察することができた。また、生成された熔融物は試験片内にとどまっており、試験片外へ流れ出すことはなかった。これは、熔融物のステンレス鋼における濡れ性と熔融物の大きな表面張力によるものだと考えられる。

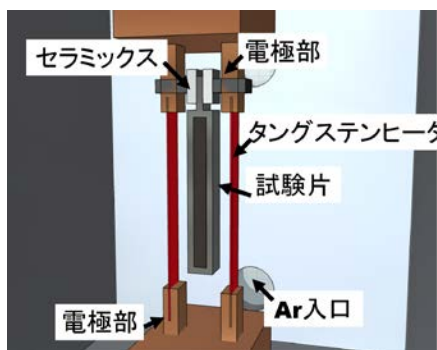


図 1 共晶反応可視化装置概略図

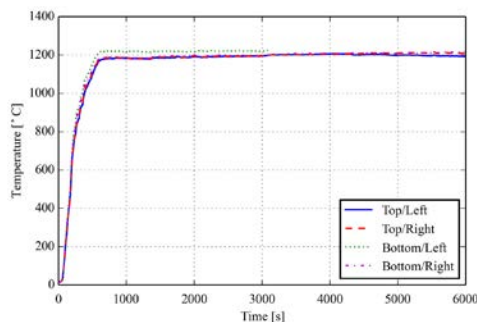


図 2 試験片温度

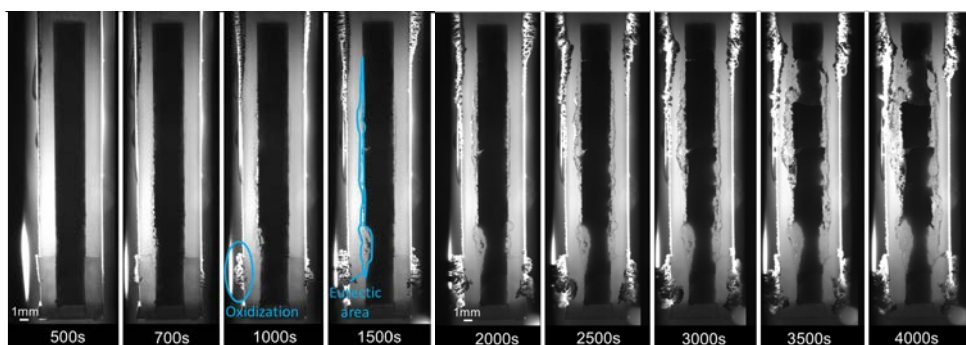


図 3 共晶反応可視化結果

(2) 熱流動シミュレーション

本事業では、ステンレス鋼とボロンカーバイドの共晶反応を伴う熔融シミュレーションを実行することが最終目的である。本年度は、基礎的な検証を行うため、2種類の異なる物性を用いた熔融シミュレーションを実行する。

本研究では、高温の液体金属が周囲の別の金属を溶かすことを想定して、MPS法を用いた数値シミュレーションを実行する。図4に数値シミュレーションの初期状態を示す。直方体の金属容器（白色）内に高温の液体金属（青色）を円柱状に配置した。金属容器の物性について、密度、動粘度、比熱および熱伝導度は、 $10,490 \text{ kg/m}^3$ 、 $1.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ 、 235 J/kg K および 407 W/m K である。液体金属の物性について、密度、動粘度、比熱および熱伝導度は、 $7,930 \text{ kg/m}^3$ 、 $1.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ 、 590 J/kg K および 16.7 W/m K である。融点については、金属容器および熔融金属において、それぞれ、 $1,235 \text{ K}$ および $1,500 \text{ K}$ とした。初期温度は、金属容器および熔融金属において、それぞれ、 $1,000 \text{ K}$ および $3,000 \text{ K}$ とした。固体状態は、粘性が極めて高い流体としてモデル化した。

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、高温の液体金属が金属容器を溶かして鉛直方向に空隙を生じさせ、そこから高温の液体金属が流出した。金属容器は融点に達していない部位もあったため、固相と液相が混合した状態になった。このように、熔融による固体の界面の大変形がシミュレーションによって模擬できることを確認した。実際のシビアアクシデントにシミュレーションを応用するに際して、制御棒を構成するステンレス鋼とボロンカーバイドの共晶反応が起こり、熔融の発生の模擬が要求される。その際、本結果と同様に、ステンレス鋼とボロンカーバイドの境界部で熔融し、流体が溶けながら流動することが知られている。従って、本研究成果に、実際の物性値（共晶反応含む）を導入すれば、実際の現象を模擬できると考えられる。

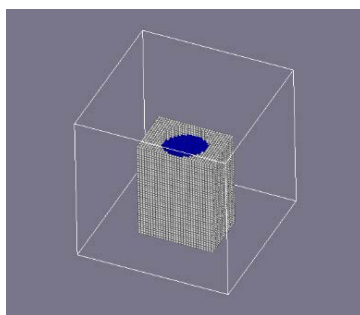


図4 初期条件（白色粒子：金属容器、青色粒子：熔融金属）

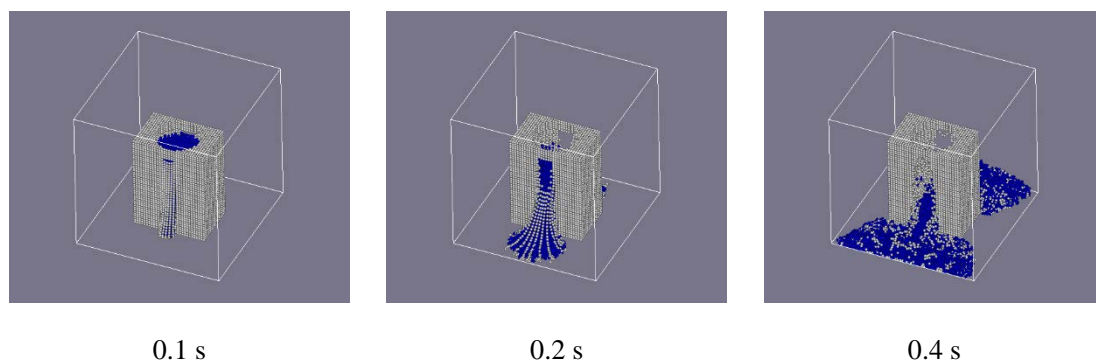


図5 数値シミュレーション結果

また、本研究では、MPS法において熱流束を与えるための壁面モデルを開発した。これまでのMPS法では、壁面に温度境界しか与えることができなかった。シビアアクシデントでは、壁面における熱流束境界を与える必要があるため、このようなモデリングは極めて有効である。

熱流速モデルの妥当性を定性的に検証するため、上下で熱伝導率の異なる材料を用いて、上側および下側において、熱流束により入熱および冷却させるようなシミュレーションを実行した(図6)。底部において、再凝固も確認され、定性的に妥当な結果が得られた。

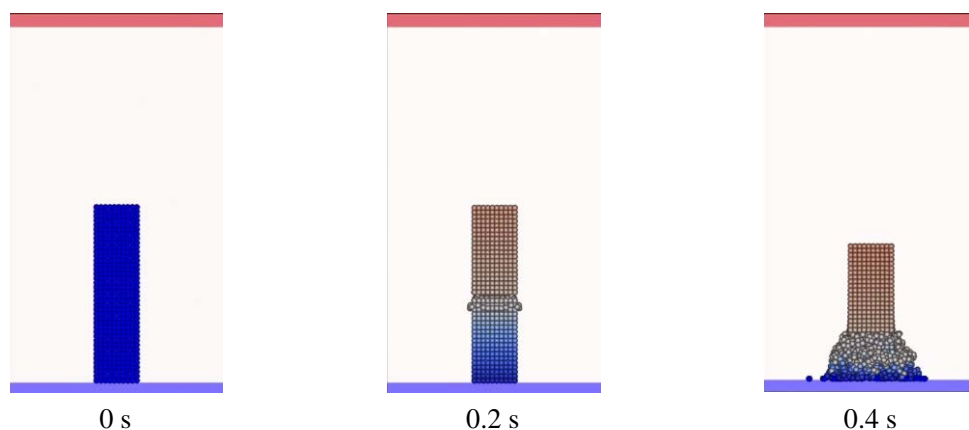


図6 数値シミュレーション結果

3. 今後の展望

これまでの研究成果と今後の研究展開を図7に示す。実験について、共晶反応可視化装置と実験結果の評価手法を改良し、熔融物落下挙動データベースの構築を進めていく。実際の制御棒を模擬した試験片を作成し、温度や寸法などのパラメータを変化させながら可視化実験を行なうことで熔融物落下挙動に関する定性的・定量的データを取得する予定である。数値シミュレーションについては、Imperial College London が実行した有限要素法の数値シミュレーション結果と東京大学で実行したMPS法のシミュレーション結果を比較して、両者の手法の特徴を考察する予定である。また、本事業で取得した実験結果に基づいた共晶反応モデルを導入して、実際のシビアアクシデントの現象を模擬できるような数値シミュレーション技術を構築する予定である。

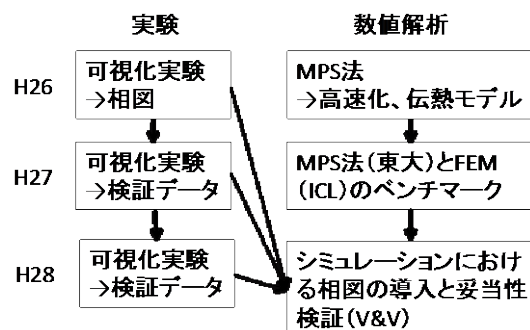


図7 これまでの研究成果と今後の研究展開