

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 9 月 28 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2014

課題番号：24561043

研究課題名(和文) 過酷事故時のデブリベッドでの崩壊熱除去性損失と圧力容器底部の熱的損傷に関する研究

研究課題名(英文) Study on decay heat removal loss in a debris bed and thermal damage of a pressure lower vessel in a severe accident

研究代表者

松元 達也 (Matsumoto, Tatsuya)

九州大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：90325514

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、原子炉の炉心溶融事故による炉心構造物の溶融、固化により形成されるデブリベッド内に混在する燃料の崩壊熱除去性の損失により生じる固化物の再溶融を局所的に再現する実験、また崩壊熱除去損失が炉容器に及ぼす熱的損傷を模擬するための実験を行うために、デブリベッドを模擬した固体粒子層内での燃料模擬物の発熱による過渡挙動観察のための可視化実験装置の製作し、粒子層内の流動挙動の可視化データと粒子層内温度分布の過渡的挙動のデータを取得した。

研究成果の概要(英文)：In this study, it was carried out an experiment to reproduce the melting of the solidification material to be produced by a decay heat removal loss of fuel mixed in a debris bed formed by the core disruptive accident of the nuclear reactor. In addition, it was intended that an experiment to simulate the thermal damage that a decay heat removal loss gave to a reactor vessel was carried out. An experimental setup for transient behavior observation due to the fever of the fuel simulant in the solid particle layer that simulated a debris bed was constructed. And data of the transient flow behavior in the particle layer and the temperature distribution in the particle layer were measured.

研究分野：伝熱

キーワード：熱流動 過酷事故 デブリベッド 可視化 溶融

### 1. 研究開始当初の背景

これまで 1979 年のアメリカ・スリーマイル島原子力発電所 2 号炉の事故、2011 年の東日本大震災に起因する東京電力・福島第一原子力発電所の事故のように炉心が溶融する過酷事故の発生確率は極めて低いものとされて来た。しかし、実際には福島のような全電源喪失などにより容易に想定を超え、放射性物質の炉外への漏出を生じるに至ったことは、我々、原子力関連従事者としてのみならず工学分野の研究者・技術者としての矜持を失する歴史的な事象となった。

これまでの原子炉の安全性評価でも想定を超える仮想的な事故時の原子炉内の熱流動現象を対象として、事象の特性を明らかにし、その後の進展を抑止するための方策を見出すための高度な技術革新を進めてきたはずであったが、それらを容易に超過する事象が生じたことを真摯に受け止め、これまでの評価手法が妥当であったのかを再度検証する必要がある。特に、日本では炉外試験や模擬物質による実験研究でさえも有効なデータが不足しているのは事実かつ問題であり、これらを補完するための実験データの蓄積や知見を得ることは必須である。

### 2. 研究の目的

本課題は、申請者がこれまでに実施した過酷事故時の原子炉内での熱流動に関する事象、特に炉心溶融により溶融、固化したデブリが形成するデブリベッド内に混在する燃料の崩壊熱による冷却材の沸騰がデブリの動的挙動を促し、ベッドの平坦化挙動を生じさせることを明らかにした研究を発展させ、さらなる過酷事象としてのベッド内の燃料の崩壊熱の熱除去性が損なわれ、燃料を含む固化物の再溶融が生じ、その後の事象進展が大きく影響されることに着目したものである。申請者の過去の研究では、ベッド内の動的挙動を中心に、これを補う形での温度分布等の熱的挙動に関する知見は得たが、崩壊熱除去性損失後のデブリの再溶融挙動やそれが及ぼす炉容器底部構造の熱的損傷への進展後の知見を得るまでには至っていない。

そこで、本課題では、自らの過去の研究を進展させて、ベッド内での崩壊熱除去が損なわれた事象の下で、まずデブリベッド内での燃料を含む固化物が再溶融する模擬実験を実施し、その蒸気、冷却材および固化物の熱的挙動及び過渡的挙動の実験データを取得する。特に挙動の微視的な可視化データに特化しての画像データの取得を実施し、事象発生の解明と機構論的モ

デルの構築に活用する。また、デブリベッドでの崩壊熱除去損失により炉容器底部構造を熱的に損傷する過程を模擬物質による実験で再現し、その過渡的挙動のデータを取得する。さらに、これらの一連の事象をシミュレーションで再現するための解析システムの開発を進める。

### 3. 研究の方法

本課題は、原子炉の炉心溶融事故による炉心構造物の溶融、固化により形成されるデブリベッド内に混在する燃料の崩壊熱除去性の損失により生じる固化物の再溶融を局所的に再現する実験、崩壊熱除去損失が炉容器に及ぼす熱的損傷を模擬するための実験を行い、微視的可視化データの取得を中心に実施し、これらの発生機構を明らかにするためのモデル開発を行うとともに、事象解析ツールの開発を行う予定で研究期間は、平成 24 年度から平成 26 年度の 3 カ年とした。

実験的な研究方法として、図 1 の実験装置概略図に示すデブリベッドを模擬した固体粒子層内での燃料模擬物の加熱による過渡挙動観察のための可視化実験装置の製作を行った。

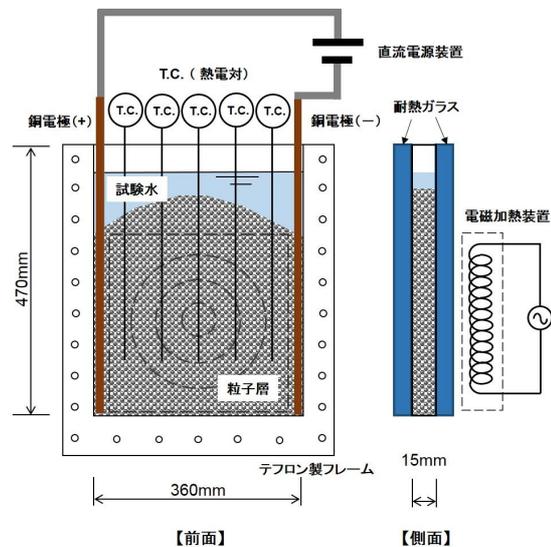


図 1 実験装置概略図

実験装置は内部を観察可能な水槽で前面および背面には耐熱ガラス板（厚さ 10mm および 5mm）を用い、通電加熱に対応するために電気絶縁性の高いテフロン樹脂にてフレームを製作した。水槽の体系は、縦 470mm、幅 360mm、奥行き 15mm であり、粒子層内部を観察可能とするようにしている。粒子層には、燃料模擬物としてのステンレスビーズ（直径 2mm ~ 6mm）を用いた。また、燃料以外の溶融固化物の模擬物としてガラスビーズ（直径 4mm）を用いた。ステンレスビーズは水槽背面の電磁誘導加熱装置、または水槽内両端に

設置した銅電極への直流電流の通電加熱による発熱によりデブリベッド内の燃料の崩壊熱を模擬している。試験水として純水を用いた。

実験では、粒子層内における水蒸気、水および粒子の混相流動挙動をデジタルビデオカメラおよび高速度カメラで撮影し、可視化データを取得した。また、粒子層内での熱的挙動を温度分布として取得するために直径1mmのK型熱電対(5本)を横方向に60mm間隔で、底部より150mmの位置に設置し、データロガーを通じて計測用パソコンに取得した。また、上記の実験による定量データの取得とともに、熱流動解析のためのオープンソースであるOpenFOAMを用いた数値解析による粒子層内の固体間の熱伝導解析も試みた。

#### 4. 研究成果

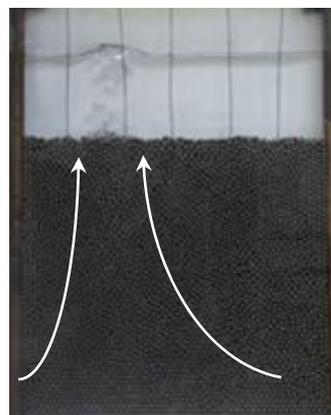
##### (1) 流動挙動の観察と考察について

実験の一例として、試験水の水位を400mmとし、粒子層の構成粒子をステンレスビーズ(直径6mm)、粒子かさ体積(空隙を含む、2,000ml)すなわち、粒子層体積率100%の場合に、印加電圧を24V、電流を30Aとした電力720W(加熱量)の場合の結果を示す。

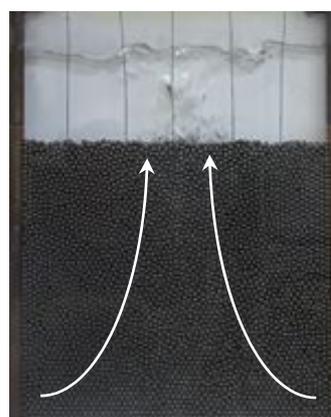
初期水槽内温度は平均24℃で一様であり、その初期状態に通電加熱を開始し、水槽内および粒子層内の挙動観察を行った。図2に本実験で実施した熱流動挙動の一例を示す。それぞれの図中に示された矢印付きの白線は水蒸気泡群の外縁を示し、矢印は流れの方向を示している。

加熱開始後は水槽および粒子層内は過冷却状態であるために、加熱量は粒子の発熱および水槽内試験水の温度上昇に消費される。次第に水槽および粒子層内の温度が上昇し始めると、試験領域下端の粒子層内の粒子からの沸騰による発泡挙動が見られた。

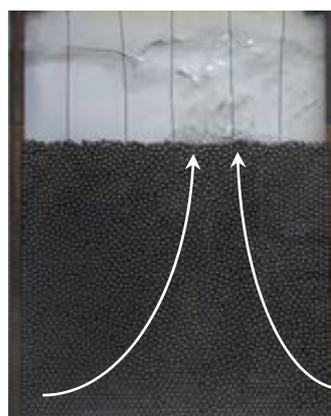
図2(a)は加熱開始36分後の様子を示す。粒子層下部で生じた水蒸気群は、図中の白線で示したように水槽に向かって左側から水槽上部へ流出する。しかし、時間経過とともに図2(b)の加熱開始37分後の挙動に見られるように水蒸気群は水槽中央部から水槽上部に流出するようになる。これらの粒子層内を水蒸気群が移動しながらうねるような様子は、2次元体系での気液二相流に見られる気泡気柱の時系列的な揺動挙動と似た特性があるものと理解できる。その後、加熱開始39分後の図2(c)で見られるように、体系内の温度上昇とともに発生する蒸気量が増大し、強い蒸気泡群の流れが生じながら、次第に水槽に向かって右側に移動する様子が見られた。図2(d)で示す加熱開始42分後では、水槽に向かって右端から流出する様子が見られ、この後の実験が終了するまでの間では大きく変化し、再び左側に遷移する様子は見られなかった。これは、粒子層の充填状態にも依存するものであり、再現性のある実験を実施することは課題点として残る。



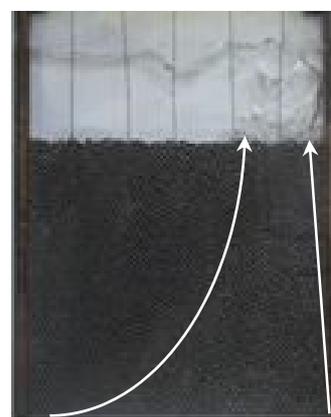
(a)加熱開始 36 分後



(b) 加熱開始 37 分後



(c) 加熱開始 39 分後



(d) 加熱開始 42 分後

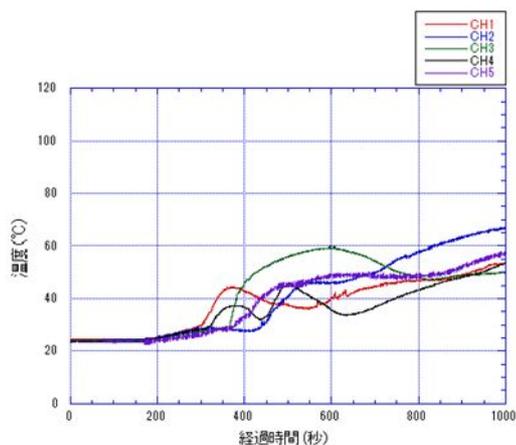
図2 熱流動挙動の時間的变化

## (2) 粒子層内の温度分布の過渡的挙動と考察について

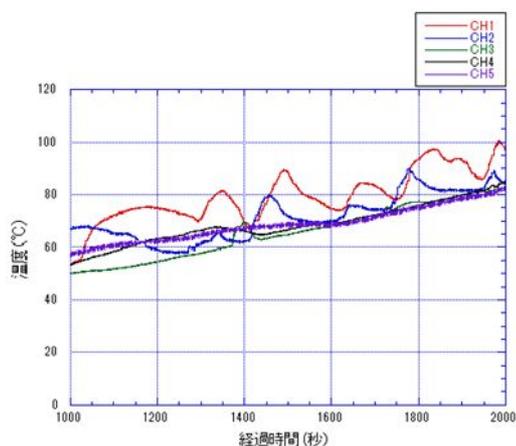
本実験では、K型熱電対を用いたが、当初、接地型の熱電対を使用したために、通電加熱や電源の接地不良によるノイズの問題が大きな課題であったが、非接地型の熱電対の使用と電源の接地の改善により、通電加熱中においても安定し、良好な温度データを得ることが出来るに至った。そこで得られたデータとして、図3(a)から(c)に先の実験条件による加熱実験の粒子層内温度の過渡的挙動を示す。図3(a)は、0秒から1,000秒間の温度の変化、図3(b)は、1,000秒から2,000秒間の温度の変化、図3(c)は、2,000秒から3,000秒間の温度の変化をそれぞれ示す。図中の実線は粒子層内に挿入した5本の熱電対をそれぞれ示し、水槽に向かって左側から右側に向かってCH1からCH5としている。

図3(a)から(c)に見られるように、CH1とCH2が時間経過とともに大きく変化していることが分かる。特に水槽の左端付近の温度変化を示すCH1は、図3(b)で示される1,000秒から2,000秒の間である周期を有するような過渡的な変化を示している。また、温度の数値も他の測定位置の温度よりも相対的に大きいことが分かる。また、この挙動とは相反して、図3(a)の0秒から1,000秒の間では、粒子層内全域での温度変化は激しい挙動を示すが、図3(a)の1,000秒から2,000秒の間、およびそれ以降になると、水槽に向かって右側の領域の温度変化を示すCH4およびCH5の値が緩やかな上昇をするようになることが分かる。これは、先の粒子層内の熱流動挙動の観察結果をもとに考察すると、温度変化の揺動的な変化は、粒子層内からの蒸気の流出と粒子層内への試験水の流入の交互した変化によるものと考えられる。従って、試験水の流入よりも蒸気の流出の頻度が著しい実験時間半ば以降では安定的に蒸気の温度が計測されているものと理解できる。

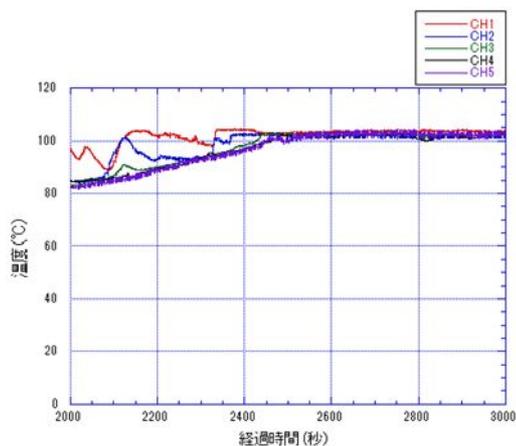
図3(c)の2,000秒から3,000秒間の温度変化を見ると2,500秒付近で水槽および粒子層内の温度は100に到達するが、その後は水の大気圧下での飽和温度100を少し超えた温度の約101から103付近で維持されていることが観測された。これは、粒子層内のステンレスビーズが直流電流による通電加熱により常に発熱状態が維持されていることにより、沸騰熱伝達における加熱面温度が飽和温度よりも過熱されている度合を示す過熱度が約1から3が存在しているものと理解できる。また、ステンレスの熱伝導率が比較的低いことからステンレスビーズの熱が容易には試験水中に移行していないことが伺える結果を示しているものと考えられる。これは、過去に行われた粒子層の一部加熱による挙動からは、把握されることの無かった特有の挙動となっているものと理解できる。



(a) 0秒から1,000秒間の温度変化



(b) 1,000秒から2,000秒間の温度変化



(c) 2,000秒から3,000秒間の温度変化

図3 粒子層内温度分布の過渡的变化

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 該当無し

〔学会発表〕 該当無し

〔図書〕 該当無し

〔産業財産権〕 該当無し

〔その他〕 該当無し

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松元 達也 ( MATSUMOTO, Tatsuya )

九州大学・大学院工学研究院・助教

研究者番号：90325514