

原子炉システムの安全性評価手法に関する研究

九州大学 工学研究院 助教 松元達也

研究の概要: 福島原発事故に見られるような炉心が大きく損傷する事故での原子炉の振る舞いやその影響を把握することは、原子炉が有する安全の余裕度を評価し、万一、事故が起こった場合の拡大を防止し、影響を緩和する対策を実施する上で重要です。我々の研究では、次世代の原子炉システムを対象とし、その安全性評価手法のための要素技術の開発を行っています。そこでは、事故時に生じる複雑な熱流動現象の素過程を明らかにする検証実験や評価のための解析コードを用いた事象の再現と解析コード内の物理モデルの高度化を図っています。

最近の研究成果

一高速炉過酷事故の概要一

次世代原子炉システムである高速炉の過酷事故時(図1)の安全性の研究として、炉心損傷事故での溶融炉心や溶融固化物(デブリ)の挙動に関する研究がある。溶融炉心が速やかに炉心より流出せずに溶融炉心プールを形成するならば、プール内の燃料と溶融物の挙動により大きな動的エネルギーを生じ、炉容器にダメージを与える可能性がある。また、炉心より流出した溶融物は冷却材に急冷され、微粒化し、デブリを生じる。このデブリは炉内を落下して炉容器下部の構造物上でデブリベッドを形成するが、このデブリベッドの冷却に失敗すると、炉容器を貫通して燃料が外部に漏えいする危険性を生じる。我々はこれらの事象に関連した以下の研究を実施している。

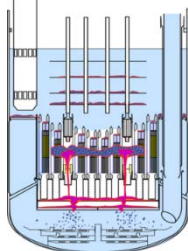


図1 原子炉過酷事故の概要

(1) 溶融炉心プールの挙動に関する研究

炉心の損傷領域の拡大により燃料を含む溶融プールが形成され、これらの運動に伴い核的な反応度が印加されると、溶融プール内の熱的作用により、燃料凝集を伴うプール運動(スロッシング、図2)を生じる。この燃料凝集は核的反応を増幅し、再臨界により炉容器を損傷する動的エネルギーを生む可能性がある。その流体力学的機構についての知見を得るための水プール流動試験を実施し、併せて安全解析コードの検証を行っている。

- 水プール内の流速分布、液面変化を画像計測(PIV・PTV)により計測した。
- スロッシングの発生、非発生の条件を明らかにした。
- スロッシングの増幅・緩和機構に関する定量的な評価を行った。

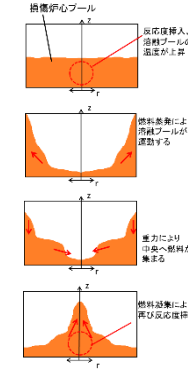


図2 溶融炉心プールのスロッシング挙動

(2) デブリベッドの挙動に関する研究

デブリベッドは、溶融固化した燃料及び構造材からなり、燃料の持つ崩壊熱は冷却材の沸騰を引き起こし、デブリを駆動する。これによるデブリベッドの自己平坦化挙動(セルフレベルリング、図3)は、ベッドの冷却性や再臨界性に影響を与える。デブリを固体粒子、冷却材を水で模擬し、冷却材の沸騰をベッド下部からの窒素ガス吹き込みにより再現した試験を実施した。

- 粒子直径や粒子密度の増加につれて、ベッドの平坦化傾向は抑制される。
- 粒子形状(球形、非球形)によりベッドの平坦化速度には差が生じる。
- ガス流量(沸騰強度)の増加につれて、ベッドの平坦化は促進される。

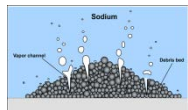


図3 デブリベッドのセルフレベルリング挙動

(3) デブリの堆積挙動に関する研究

デブリの堆積挙動は、デブリベッドの形成に影響し、冷却性や再臨界性を左右する。これらの挙動の知見を得るために水プール中に固体粒子を落下、堆積させる試験を実施した。

- 粒子直径の増加につれ、粒子は拡散し落下する傾向がある。
- ノズル内径が減少すると拡散の挙動が大きくなる。拡散挙動が大きくなると粒子は山状に堆積する傾向を示す。
- 粒子ベッドは山状の凸型と中心部が平坦化し、ベッド中央部に窪みを有する凹型の堆積形状に分類され、ノズル内径、粒子密度、落下高さの増加に伴い、凸型形状から凹型形状に推移する傾向がある。

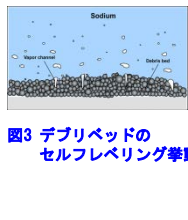


図4 デブリの堆積試験装置概略図

水プール流動試験

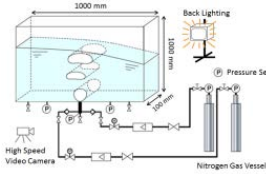


図4 水プール流動試験装置概略図

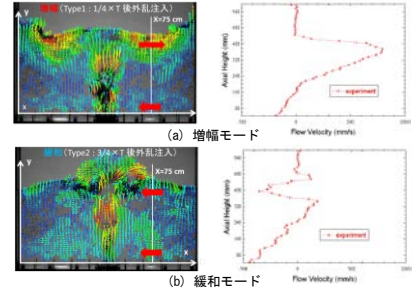


図5 水プール内流速分布(増幅モード、緩和モード)

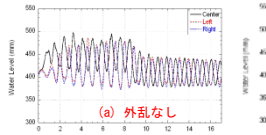


図6 水プール液面変動(外乱なし、増幅モード、緩和モード)

粒子ベッド挙動・粒子堆積試験

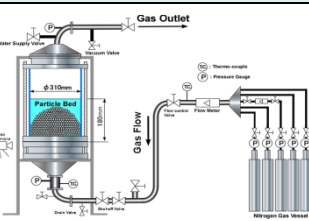


図7 粒子ベッド挙動試験装置概略図

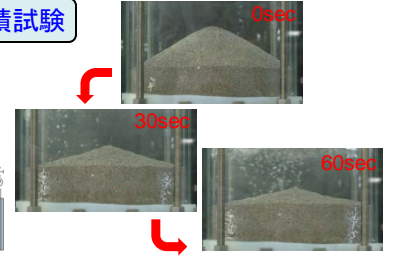


図8 粒子ベッド形状の時間的変化

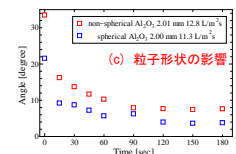
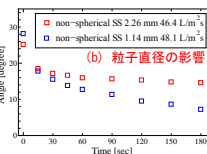
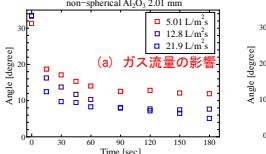


図9 粒子ベッド傾斜角の時間的変化(ガス流量、粒子直径、形状の影響)

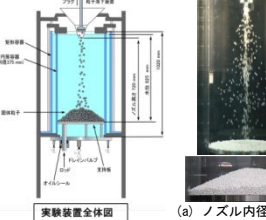


図10 粒子堆積試験装置概略図

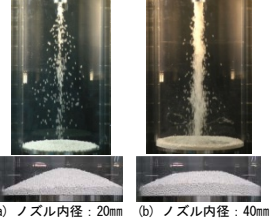


図11 粒子の堆積及びベッド形成の様子(ノズル内径の影響)

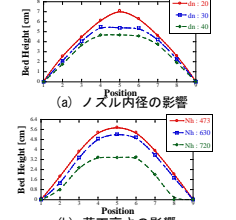


図12 粒子ベッド形成の比較

◆ 発表論文 ◆

Md. Shamsuzzaman, Tatsuhiro Horie, Fusata Fuke, Takayuki Kai, Bin Zhang, **Tatsuya Matsumoto**, Koji Morita, Hirotaka Tagami, Tohru Suzuki, Yoshiharu Tobita, 'Experimental Evaluation of Debris Bed Characteristics in Particulate Debris Sedimentation Behaviour', 2013 21th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE21), ICONE21-15693, 2013.07.

Songbai Cheng, Hidemasa Yamano, Tohru Suzuki, Yoshiharu Tobita, Yuya Nakamura, Syohei Taketa, Sinpei Nishi, Bin Zhang, **Tatsuya Matsumoto**, Koji Morita, 'Recent Knowledge from an Experimental Investigation on Self-Leveling Behavior of Debris Bed', 2013 21th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE21), ICONE21-15595, 2013.07.

《問合せ先》

九州大学 工学研究院 エネルギー量子工学部門 助教 松元 達也

Phone: 092-802-3499

mail: matumoto@nucl.kyushu-u.ac.jp