

目標

原子炉や格納容器における熱水力挙動に関する知見とデータベースを構築し、熱水力評価手法の検証・整備により安全規制を技術的に支援するとともに、熱水力安全に係る実験並びに評価手法についての基盤技術を整備する。

研究概要

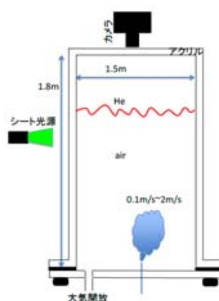
格納容器研究

目的

重大事故時の格納容器の健全性に対する脅威事象や放射性核種移行挙動に関し、工学知見と評価手法の整備を行う。

実施項目

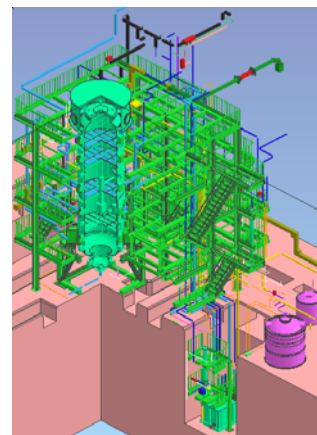
- ◆ 大型格納容器模擬試験装置を製作し、重大事故条件下の実験データベースを構築
 - ・ 局所水素集中による水素爆発を防止する観点から、気相混合過程の把握
 - ・ 格納容器の過温破損を防止する観点から、自然循環、凝縮による冷却（減圧）効果の把握
 - 多点気相成分濃度、局所流速と温度データ等の計測
- ◆ 個別効果試験
 - ・ 密度成層実験
ガスジェットによるHe密度成層侵食現象の把握
 - ・ スクラビング実験
気液二相流における放射性核種の放出防止過程のモデリング
 - ・ 蒸気凝縮計測実験
壁面蒸気凝縮現象の把握とモデリング
- ◆ 数値流体力学（CFD）コードや集中定数系（LP）コード用の解析手法の整備



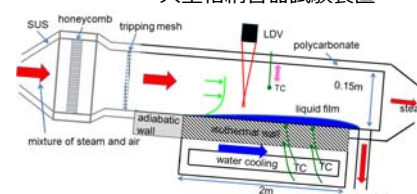
密度成層実験装置



スクラビング実験装置



大型格納容器試験装置



蒸気流動計測実験装置

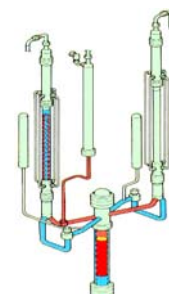
大型非定常実験装置（LSTF）熱流動研究

目的

大型非定常実験装置（LSTF）を用いて事故現象を模擬・再現し、事故現象の解明と安全対策の有効性を確認する。

実施項目

- ・ 蒸気発生器二次側減圧挙動の確認
- ・ 一次系減圧を伴う低出力での自然循環挙動の確認
- ・ 電源喪失事故時の安全対策の検討



LSTF

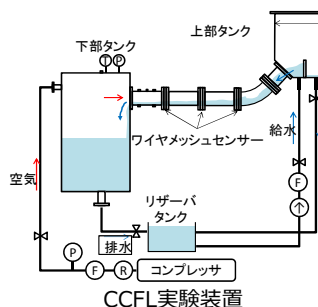
炉内個別熱流動研究

目的

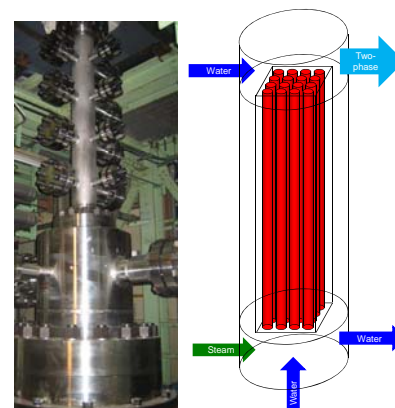
被覆管表面最高温度に強く影響する現象を中心に、熱流動現象のスケーリング（実機への適用性）の解明や、物理モデルの検証・開発・不確かさ評価を行い、国産熱水力最適評価コードの開発を支援する。

実施項目

- ・ 実機条件での炉心伝熱実験
炉心の過渡的な伝熱流動特性の把握
- ・ 気液対向流制限（CCFL）実験
PWRホットレグにおけるCCFL現象に係る、スケーリングを考慮した物理モデルに基づく相関式の構築
- ・ 大口径垂直円管内気液二相流実験
気液二相流モデリングの高度化



CCFL実験装置



炉心伝熱実験装置

今後の予定

- ・ 大型格納容器実験と炉心伝熱実験装置の製作を継続する。
- ・ 個別効果試験において、計測データベースを基に、物理モデルを構築する。

熱水力安全研究

日本原子力研究開発機構 安全研究センター熱水力安全研究グループ

本研究グループの研究目的は、原子炉や格納容器における熱水力挙動に関する知見とデータベースを構築し、熱水力評価手法の検証・整備により安全規制を技術的に支援するとともに、熱水力安全に係る実験並びに評価手法についての基盤技術を整備することである。主な研究対象は、格納容器研究、大型非定常実験装置（LSTF）熱流動研究、炉内個別熱流動研究である。

格納容器研究

福島原発事故を踏まえ、本研究グループでは実験と解析を両輪とする ROSA-SA(Rig Of Safety Assessment -Severe Accident)計画を昨年度より開始している。本計画では、重大事故時の格納容器の健全性に対する脅威事象や放射性核種移行挙動について、工学知見と評価手法の整備を行う。ここで、格納容器の健全性に対する脅威事象としては、水素爆発・燃焼と過温破損挙動について着目する。実験では、重大事故時の事象を模擬するための大型格納容器模擬試験装置 (Containment InteGral Measurement Apparatus: CIGMA)を製作し、格納容器内での総合的な熱水力挙動に係る実験を実施し、詳細な計測データベースを構築する。また、詳細な物理モデルを構築するために、気体混合過程を把握するための密度成層実験、放射性核種の放出防止過程を把握するためのスクラッピング実験、壁面蒸気凝縮現象を把握するための蒸気凝縮計測実験等の個別効果試験を実施している。これらの実験データベースをもって、数値流体力学コードや集中定数系コード用の解析手法を整備する。

大型非定常実験装置（LSTF）熱流動研究

事故時、原子炉系統（一次系や二次系等）内の熱水力挙動は連動し、現象が非常に複雑である。事故現象を模擬・再現し、事故現象の解明と安全対策の有効性を確認することは重要である。本研究グループでは、大型非定常実験装置（LSTF）を用いて、事故時の蒸気発生器二次側減圧挙動、一次系減圧を伴う低出力での自然循環挙動を確認するとともに、電源喪失事故時の安全対策を検討する。

炉内個別熱流動研究

本研究分野では、被覆管表面最高温度に強く影響する熱流動現象のスケーリング（実機への適用性）の解明や、物理モデルの検証・開発・不確かさ評価を行う。現段階では、炉心の過渡的な伝熱流動特性を把握するための炉心伝熱実験、PWR ホットレグにおける気液対向流制限（CCFL）挙動についての解析手法を高度化するための CCFL 実験と、基礎的な気液二相流モデリングの高度化のための大口径垂直円管内気液二相流実験を行い、国産熱水力最適評価コードの開発等に役立てる計画である。

原子炉格納容器内多成分気体密度成層に係る OECD/NEA PSI CFDベンチマークテスト



安全研究センター 熱水力安全研究グループ

背景

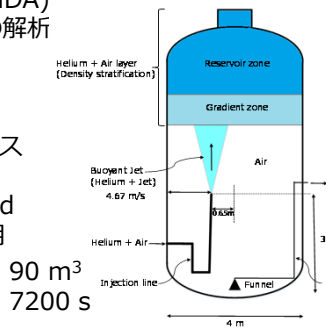
2013年度よりシビアアクシデント時における原子炉格納容器内熱水力挙動把握を目的としてROSA-SA (Rig of Safety Assessment- Severe Accident)プロジェクトを開始した。そのプロジェクトの一環として、シビアアクシデント時の密度成層挙動解析に係るOECD/NEA CFDベンチマークテストに参加した。

CFDベンチマークテスト

- PSI所有の儀格納容器(PANDA)を用いた実験に関するCFD解析
- 巨大空間かつ長時間解析

本研究グループの解析

- OpenFOAM(オープンソースコード)による解析
- RANS(Reynolds-averaged Navier Stokes)解析を適用
- 乱流モデルを改良



乱流モデル改良

- Kato-Launderの修正を適用
- よどみ点付近での乱流エネルギー生成を適切に評価

$$P_k = \mu_t S S \rightarrow \mu_t S \Omega$$

$$S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}, S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial[u_i]}{\partial x_j} + \frac{\partial[u_j]}{\partial x_i} \right)$$

$$\Omega = \sqrt{2\Omega_{ij}\Omega_{ij}}, \Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial[u_i]}{\partial x_j} - \frac{\partial[u_j]}{\partial x_i} \right)$$

Kato, M. and B. E. Launder, *Proceedings of 9th Symposium on Turbulent Shear Flows, Kyoto, August, pp. 10.4.1-10.4.6 (1993)*

- Katsuki model

- 大気境界層研究で開発されたモデル
- 安定成層内での乱流減衰効果を考慮

$$\mu_t = C_\mu f_\mu (1 - R_i) \frac{k^2}{\varepsilon}, R_i = -\frac{G_k}{P_k}$$

$$G_k = -\frac{\mu_t g}{S_{ct} \langle \rho \rangle} \frac{\partial \langle \rho \rangle}{\partial z}$$

香月ら, 日本建築学会環境系論文集, Vol. 74, No. 640, pp. 735-743, (2009)

解析結果

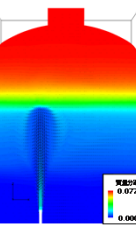
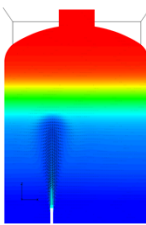
乱流モデル改良なし



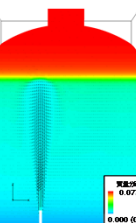
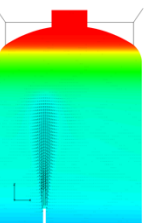
乱流モデル改良適用



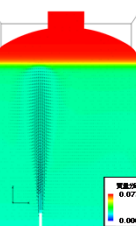
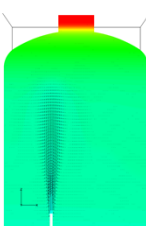
- 初期条件
格納容器上部にヘリウム濃度が高い安定成層を形勢



- 100 s
ジェット成層への貫入と下方への跳ね返り流れが確認できる



- 1000 s
成層侵食・崩壊が進行
乱流モデルを改良した場合、成層崩壊が遅く、ジェット到達位置よりも上部で高濃度を維持

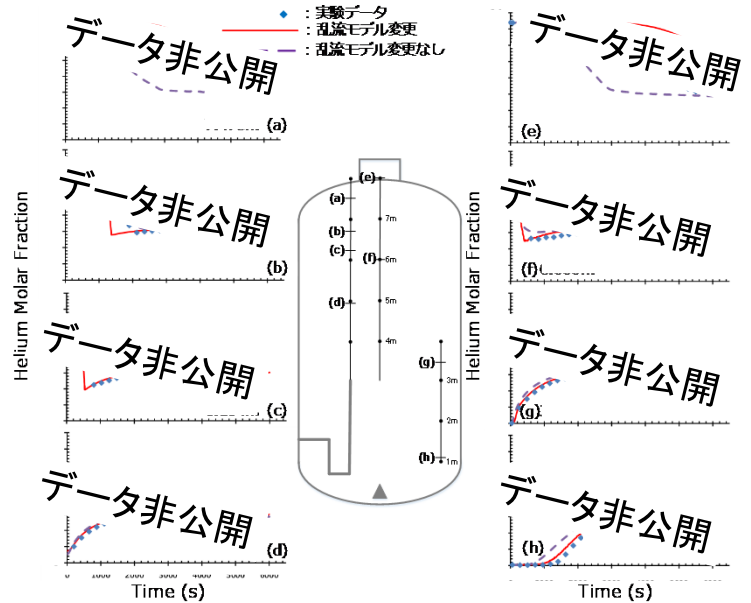


- 2000 s
乱流モデル改良なしの場合、成層崩壊がほぼ完了
乱流モデルを改良した場合、ジェット到達位置よりも上部で高濃度を維持

実験結果との比較

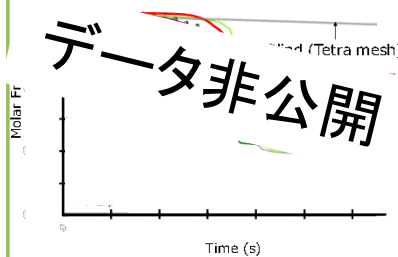
- ヘリウム濃度時系列データ

- 乱流モデルを改良した場合、実験データと良く一致



他機関の解析結果との比較

- Post-test解析
解析結果を提出した19機関中上位5位の結果よりも実験値を良く再現。
- Blind解析
Tetrahedralメッシュを用いたために、実験結果から大きく乖離
→格子依存性に関する詳細な調査を行い、実機のような複雑形状でも解析ができるようになることが必要



Andreani M et al., *Synthesis of The OECD/NEA-PSI CFD benchmark exercise, CFD4NRS-5; 2014 Sept. 9-11; Zurich*

今後の計画

- 小型実験と解析(RANS & LES)による密度成層侵食・崩壊に関する詳細な調査
- 本ベンチマークテストに関する解析を継続し、計算メッシュ依存性などを調査
- 大型模擬格納容器(@JAEA)実験とその解析

原子炉格納容器内多成分気体密度成層に係る

OECD/NEA PSI CFD ベンチマークテスト

日本原子力研究開発機構 安全研究センター熱水力安全研究グループ

シビアアクシデント時には、原子炉格納容器内に水素爆轟・燃焼が生じ、その健全性が脅かされる可能性がある。これを把握するには、格納容器内の水素挙動を把握する必要がある。本研究グループは、2013 年度よりシビアアクシデント時における原子炉格納容器内熱水力挙動把握を目的として ROSA-SA (Rig of Safety Assessment Severe Accident) プロジェクトを開始した。そのプロジェクトの一環として、シビアアクシデント時の多成分気体密度成層挙動解析に係る OECD/NEA PSI CFD ベンチマークテストに参加した。

1. CFD ベンチマークテスト

CFD ベンチマークテストでは、スイス Paul Scherrer 研究所(PSI)が所有する模擬格納容器 PANDA を用いた大規模実験に関する CFD 解析を行った。この PANDA 実験の目的は、鉛直ジェットにより、模擬格納容器上方に形成された安定成層(空気+ヘリウム)の混合気体が侵食・崩壊される様子を探ることである。本研究グループでは、オープンソースコード OpenFOAM を用いて RANS(Reynolds-averaged Navier-Stokes)手法により解析を行った。解析メッシュは Blind 解析では Tetrahedral メッシュ(約 200 万)を用い、Post-test 解析では Hexahedral メッシュ(76 万)を用いた。

2. 乱流モデルの改良

RANS 解析で用いた乱流モデルは、Launder-Sharma 型の低レイノルズ数 $k-\varepsilon$ モデルをベースとした以下のような 2 つの改良を施したモデルを用いた。

- ✓ Kato-Launder 型修正：密度成層に鉛直ジェットが貫入した際に形成されるよどみ点付近での、乱流エネルギー生成の過大評価を抑えるために導入。
- ✓ Katsuki モデル：安定成層内での乱流減衰効果を適切に再現するために、浮力効果を考慮できるように導入。

3. 解析結果

テトラメッシュを用いた Blind 解析では、実験結果から大きく乖離する結果となってしまう。以下では、ヘキサメッシュを用いた Post-test 解析の結果について述べる。

上述のような乱流モデルの改良を行った場合、乱流モデルの改良を施さなかった解析結果と比べて、乱流によるミキシング効果が抑制されて密度成層侵食・崩壊の進行が遅くなった。また、PANDA 実験と比較すると、改良モデルによる解析は良く実験結果を再現し、他のベンチマークテスト参加機関による解析(上位 5 位との比較)よりも良好な結果を少ない計算メッシュ数で得ることに成功した。