

軽水炉燃料の事故時挙動に関する研究



日本原子力研究開発機構 原子力安全・防災研究所 安全研究センター 燃料安全研究グループ

燃料安全研究の全体像(第4期中長期計画)

- シビアアクシデント評価上重要となる燃料破損や燃料からの放射性核種放出といった事故時挙動に関する知見を、国際連携の強化を図りつつ、原子炉安全性研究炉(NSRR)及び燃料試験施設(RFEF)を用いて取得する。
- ▶ 解析コードの性能向上及び適用範囲拡大を行い、炉心冷却性やソースタームの評価及び炉心損傷判定の考え方の検討に活用する。

軽水炉現行基準で考慮されていない 事故時の燃料挙動

被覆管

- ✓ 反応度事故(RIA)模擬試験において従来観測 されていなかった内圧による破損モード
- ✓ 冷却材喪失事故 (LOCA) 後の機械特性 (Ex.地震時の破損形態)
- ⁄ 微細組織が機械特性に与える影響

燃料ペレット

- ✓ 事故時FPガス放出挙動
- ✓ 細片化・リロケーション・燃料棒外放出
- √ 放出燃料の冷却性
- ∕添加物燃料、MOXとUO₂燃料の特性差異

LOCA模擬試験で生じるFFRD(Fuel Fragmentation, Relocation, and Dispersal)挙動 (例) [NUREG-2121]



通常運転や設計基準事故条件下における 燃料挙動に関する知見取得



NSRRを用いた 照射試験



FGD(Fission Gas

Dynamics)試験

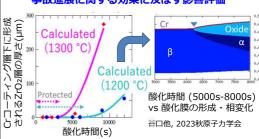
FPガス過渡放出挙動

評価用カプセル

LVDT式FGD チャンパ内圧計

RFEFの試験装置を用いた LOCA模擬試験(左)及びアウトガス分析試験(右)

事故耐性燃料(ATF)導入が冷却可能形状維持、 事故進展に関する効果に及ぼす影響評価



Cr-coated Zr基合金被覆管の高温酸化挙動を解析評価 した例

⇒酸化温度により高温酸化の抑制効果が異なる

ATFの特性の把握が必要

高温酸化、破損限界、DNB/CHF、変形挙動 コーティング層亀裂/剥離、共晶等反応 冷却可能形状の喪失条件、照射効果

集約

適用

炉心冷却性・ソースターム影響評価



燃料挙動解析コードの整備

FEMAXI RANNS

- ✓ 新知見反映
- ✓ 機構論的モデル
- ✓ 確率論的モデル

コード統合・V&V・公開

- ✓ ATF解析モデルの整備
- ✓ LOCA解析モデルの整備✓ 熱水力/SAコード連携
- * 熱水刀/SAコート連携 (炉心スケールの評価)

連携 国際プロジェクト

- ✓ Framework for Irradiation Experiments(FIDES-II)
- QUENCH-ATF Project
- ✓ Cabri International Project(CIP)

燃料挙動解析コードパッケージFEMAXI/RANNS(FEMAXI-8.1)の開発とRIA検証

● 照射中の燃料では様々な現象が複雑に相互作用するため、限られた測定データのみを用いて、事故時特有の現象が燃料挙動全体に及ぼす影響を把握し、モデリングに係る洞察を得ることは困難である。その結果、安全評価ツールに集約される知見は限定的となり、それに基づいて策定される安全評価基準の実効性は十分に確保されないおそれがある。したがって、実験データの分析や実炉条件への変換に資する、信頼性の高い事故時燃料挙動解析コードの開発が重要である。

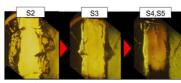
信頼性確認のための大規模検証解析に係る課題

1. 通常時及び事故時解析で2種のコードの操作を前提。

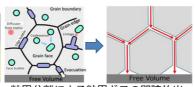
分岐

- 2. 計算安定性の不足。
- 3. 事故時挙動モデル及び照射済み燃料を対象とした試験データ の不足。 …など

コード改良・環境整備



<u>遷移沸騰⇒膜沸騰⇒冷却過程</u> の熱伝達挙動



粒界分離による粒界ガスの即時放出

再統合 (モジュール化) 2018 2024

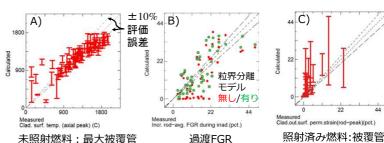
大量の照射データ (商用炉, NSRR試験など) FFDB (V&V DB)

RANNS

(DBA-SA)

検証解析結果(RIA模擬試験時の燃料挙動評価を提示)

- ▶試験燃料棒の出力は最大10%程度の不確かさが見込まれるため、 出力を10%増減させた条件で解析を実施。⇒エラーバー
- ▶最適評価を旨としつつ過小評価はなるべく避けるパラメータ調整。



A) 評価の不確かさは小さく、優れた予測が可能である。

B)評価の不確かさの低減が必要。一方、粒界分離モデルにより低FGR側の評価性能が大きく改善。

残存歪み

C)主に内圧の影響で残存歪みに大きな不確かさが生じる。歪み 挙動解析の妥当性評価が困難。

成果と活用、今後の展開

FEMAXI

● 開発したFEMAXI-8.1を用いてATF特有の燃料挙動の把握が可能である。現在、Cr-coated Zr基合金被覆燃料のRIA模擬試験を実施しており、例えば非コーティング材との被覆管表面熱伝達の違いをFEMAXI-8.1を用いて明らかにする。

(NO-AOO & DBA)

表面温度

- ガス挙動評価に係る不確かさ低減は今後の課題であり、詳細な不確かさ評価や実験データの拡充に取り組む。これにより全体的な燃料挙動評価の不確かさ低減や、高燃焼度及び添加物燃料特有の挙動の理解が進むことが期待される。
- 高温酸化時の被覆管内に拡散する酸素・水素の挙動やZryの相変化に係る詳細なモデリングと実入りLOCA試験を進め、検証解析を通してFEMAXI-8.1の照射条件の適用可能範囲をLOCAの領域まで拡張する。
- FEMAXI-8.1はJAEAが運営するPRODASから公開されており、産官学によるATF開発、新型炉開発、安全評価等に利用可能である。 このとき、ユーザは上記検証解析により一定の性能が確認されたモデルパラメータセットを適用して解析を行うことができる。