# 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

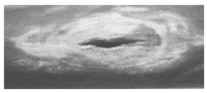
## 燃料安全研究の全体像（第4期中長期計画）

- 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。

*2024年度から設計基準事故を超える条件を対象とした試験研究を開始

### 軽水炉現行基準で考慮されていない事故時の燃料挙動

反応度事故(RIA)模擬試験における従来と異なる破損形態発生(例)



谷口本年度JAEA-NRA安全研究成果報告会で口頭発表

LOCA模擬試験におけるFFRD(Fuel Fragmentation, Relocation, and Dispersal)挙動 (例) [NUREG-2121]

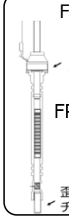
被覆管
- ✓ **冷却材喪失事故(LOCA) 後の機械特性（Ex.地震時の破損形態）**
- ✓ **微細組織が機械特性に与える影響**

燃料ペレット
- ✓ **FPガス放出**
- ✓ **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燃料とUO$_2$燃料との特性差異**

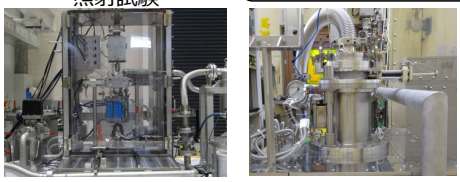
### 通常運転や設計基準事故条件下における燃料挙動に関する知見取得*

NSRRを用いた照射試験

FGD(Fission Gas Dynamics)試験

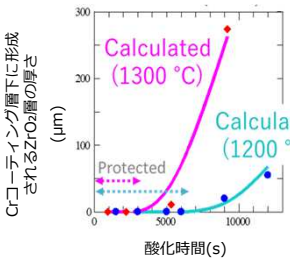



FPガス過渡放出挙動評価実験用カプセル



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コーティング層ジルカロイ被覆管の高温酸化挙動を解析した評価例
⇒酸化温度により高温酸化の抑制効果が異なる

谷口他「事故時燃料挙動解析コードRANNSの開発」2023秋原子力学会

ATFの特性把握が必要

**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**　連携

### 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（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)

## RIA試験中における過渡的な核分裂生成ガス（FPガス）圧力の測定手法の開発

**事故進展においてFPガスがどのように放出されるかを把握することは燃料被覆管の破損挙動評価のみならず、ソースターム評価の観点からも重要である。燃料ペレットからのFPガス放出タイミングをリアルタイムで測定するために、強い放射線下で使用でき、ミリ秒オーダーで応答できる圧力センサの開発を行った。**

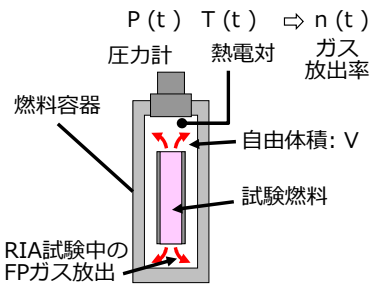



図1　核分裂ガス放出率測定

- ✓ **FPガス圧と温度を測定することでガス放出率を算出可能。(PV=nRT)**
- ✓ **SG(Strain Gauge)圧力計はNSRRパルス照射試験時に発生するガンマ線による影響を受ける。**
- ✓ **LVDT(Linear Variable Differential Transformer)により圧力を測定する。**

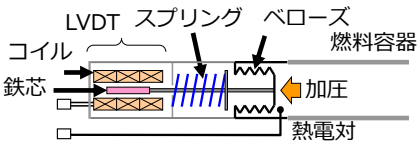



図2 LVDT圧力計

- ✓ **ベローズの変形量を電圧変化により測定している。**
- ✓ **LVDT圧力計はSG圧力計と比較し応答性が悪い。**
- ⇨ **応答遅延の確認が必要である。**

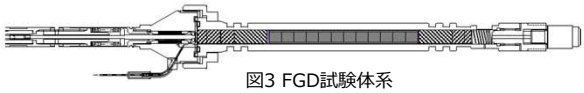


図3 FGD試験体系

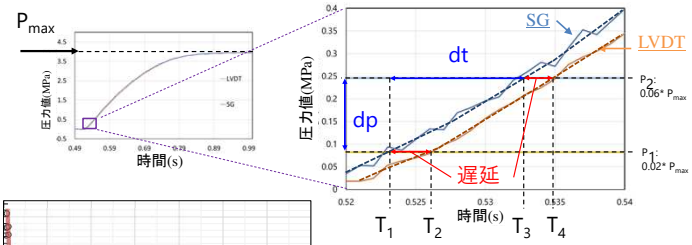



図4 SG圧力計に対するLVDT圧力計の応答遅延

- ✓ LVDTとSGの応答性を比較した。（例：図4）
- ✓ 最大圧力値を変化させて応答遅延を評価した結果、約20MPa/s以下で、応答遅延が4ms以下であった。

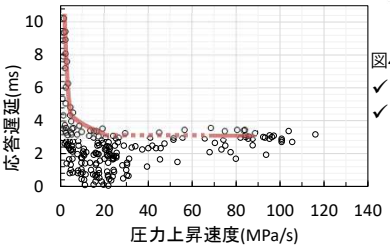



図5 SG圧力計に対するLVDT圧力計の応答遅延

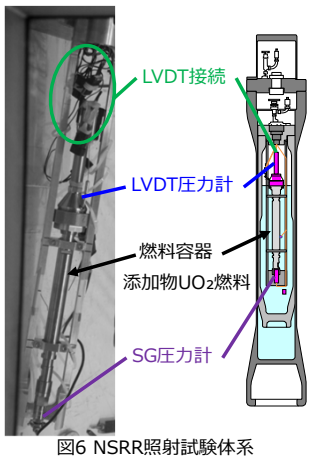



図6 NSRR照射試験体系

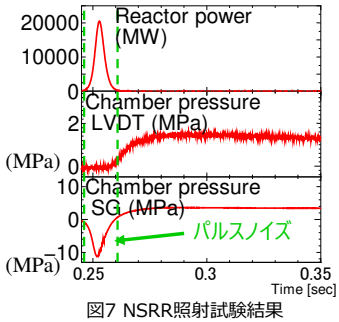



図7 NSRR照射試験結果

- ✓ **LVDTセンサにより、燃料容器内の圧力をリアルタイムで測定できた。**
- ✓ **照射後試験（燃料容器内圧測定）にて測定した圧力値とLVDT圧力計で測定した圧力値が一致した。**

**まとめ及び今後の展望**
- ✓ 反応度事故模擬試験中の容器内圧力変動をリアルタイムで捉える試験技術を確立し、照射燃料への適用に成功した。
- ✓ 本成果は事故時の燃料ふるまいや事故進展に関わる評価に活用され、安全評価の信頼性向上への貢献が期待される。
- ✓ 今後、高燃焼度MOX燃料を対象とした測定を実施予定。

本成果の一部は、原子力規制庁の令和4年度及び令和5年度原子力施設等防災対策等委託費（燃料破損に関する規制高度化研究）事業として行われたものである。