



令和4年度  
原子力規制庁技術基盤グループ-原子力機構安全研究・防災支援部門  
合同研究成果報告会

## 燃料安全研究グループの研究概要

令和4年11月22日

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構  
安全研究・防災支援部門 安全研究センター  
燃料安全研究グループ

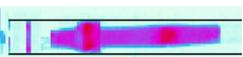
宇田川 豊

# 全体像：第4期中長期計画

SA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、NSRR及び燃料試験施設(RFEF)を用いて取得するとともに、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。

事故時挙動の新知見に係る原因究明や安全性への影響評価

**背景/外部動向** 軽水現行基準制定時に考慮され ていなかった燃料の事故時挙動



LOCA条件下で細片化・破裂開口部に集積した燃料ペレット



RIA条件下で、現行基準を下回る低い水準の破損限界や、従来と異なる形態での破損

燃料ペレット挙動評価  
細片化・リロケーション・放出 FP移行  
MOX・添加物影響  
放出燃料の冷却性

被覆管破損挙動評価  
LOCA後地震動を想定した負荷条件  
ミクロスケールの特性把握

通常運転条件から設計基準事故を超える条件までの燃料挙動に関する知見を取得



原子炉安全性研究炉を用いた照射試験



各種試験装置による事故模擬試験

適用

適用

試験技術の高度化  
FGD試験 / 実入りLOCA試験装置 / OGA / 曲げ試験 / ナノインデンテーション

炉心冷却性 ソースターム への影響評価

ATF導入が燃料破損、冷却可能形状喪失、事故進展へ及ぼす影響評価

**背景/外部動向** ATFの開発加速

材料変更の影響把握

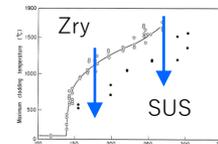
破損限界、DNB/CHF、高温酸化、変形挙動

コーティング層亀裂/剥離

共晶等反応

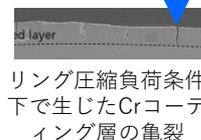
照射効果

冷却可能形状喪失条件



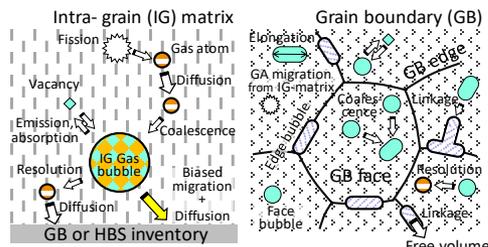
RIA条件下で生じたSUS被覆管の温度抑制効果

リング圧縮負荷条件下で生じたCrコーティング層の亀裂



Zr/Cr中間相の形成

機構論的モデルの強化/信頼性向上



FP移行挙動と燃料微細組織への影響  
→世界の燃料照射試験データにより検証

燃料挙動解析コードの開発/検証と公開

FEMAXI RANNS

評価対象拡大

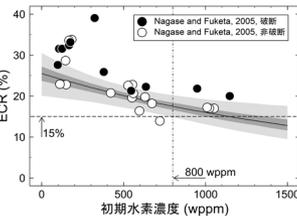
ATF解析モデル  
LOCA解析モデル  
熱水力/SAコード連携  
炉心スケールの評価

適用

適用

確率論的モデルの開発

FFRD影響やSA時FP放出挙動の最適評価に適用可能な高温下のバースト発生確率モデル等へ対象を拡大



ベイズ統計の適用により導いた予測区間付き被覆管急冷時破断限界

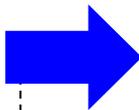
評価手法の整備と高度化・公開

**背景/外部動向** 運転サイクル長期化等燃料高度利用ニーズ

# 前計画からの方向性

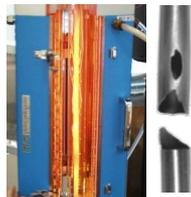
SA評価上重要となる燃料破損や燃料からの放射性核種放出といった事故時挙動に関する知見を、国際連携の強化を図りつつ、NSRR及び燃料試験施設(RFEF)を用いて取得するとともに、解析コードの性能向上及び適用範囲拡大を行い、炉心冷却性やソースタームの評価及び炉心損傷判定の考え方の検討に活用する。

## 第3期中長期計画 (H27~R3)



## 第4期中長期計画 (R4~R10)

通常運転条件から設計基準事故を超える条件までの燃料挙動に関する知見を取得



原子炉安全性研究炉を用いた照射試験

各種試験装置による事故模擬試験

従来材/改良合金被覆管の通常時・事故時挙動評価

- ・破損限界
- ・高温酸化
- ・腐食
- ・照射成長

### 燃料ペレットの挙動評価

- ・細片化・リロケーション・放出
- ・FP移行
- ・放出燃料の冷却性
- ・MOX・添加物影響

### ATFの事故時挙動評価

- ・破損限界/破損モード
- ・冷却可能形状喪失条件=>ST影響

重点項目

外部動向

軽水現行基準制定時に考慮されていなかった燃料の事故時挙動

運転サイクル長期化等燃料高度利用のニーズ

ATFの開発加速

対応

### 知見の集約モデル化

燃料挙動解析コードへの反映を進めその性能を向上

- ・燃料挙動モデルの構築
- ・国産燃料挙動解析コードの開発/検証と公開

FEMAXI

RANNS

通常時/異常過渡時解析モデルの整備

⇒**検証・公開**(FEMAXI-8)

RIA解析モデルの整備

⇒検証

機構論的モデルの強化

確率論的モデルの開発

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)

⇒公開(RANNS)

重点項目

⇒コード統合  
検証・公開

解析/  
評価へ  
適用

事故時挙動の新知見に係る原因究明や安全性への影響評価

燃料の運用条件範囲拡大が照射/事故時挙動に及ぼす影響評価

ATF導入が燃料破損、冷却可能形状喪失、事故進展へ及ぼす影響評価

前中長計で注力

取り組み継続

今期中長計で重点化

# 前計画からの方向性

SA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、NSRR及び燃料試験施設(RFEF)を用いて取得するとともに、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。

## 第3期中長期計画 (H27~R3)

通常運転条件から設計基準事故を超える条件までの燃料挙動に関する知見を取得



原子炉安全性研究炉を用いた照射試験  
各種試験装置による事故模擬試験

- 従来材/改良合金被覆管の通常時・事故時挙動評価
- ・破損限界
  - ・高温酸化
  - ・腐食
  - ・照射成長

知見の

燃料挙動解析コードへの反映を進めその性能を向上

- ・燃料挙動モデルの構築
- ・国産燃料挙動解析コードの開発/検証と公開

**FEMAXI**  
**RANNS**

通常時/異常過渡時解析モデルの整備  
⇒**検証・公開**(FEMAXI-8)

RIA解析モデルの整備  
⇒**検証**

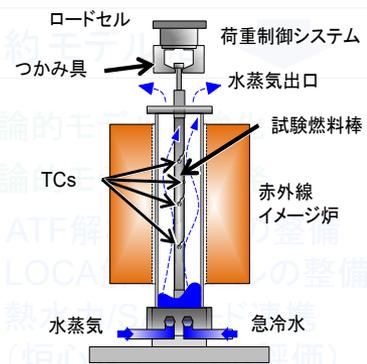
前中長計で注力 **取り**

軽水炉燃料の安全性/経済性向上を目的とした被覆管合金組成の変更や高燃焼度化が事故時の挙動に及ぼす影響を評価し、現行基準への適合性を検証

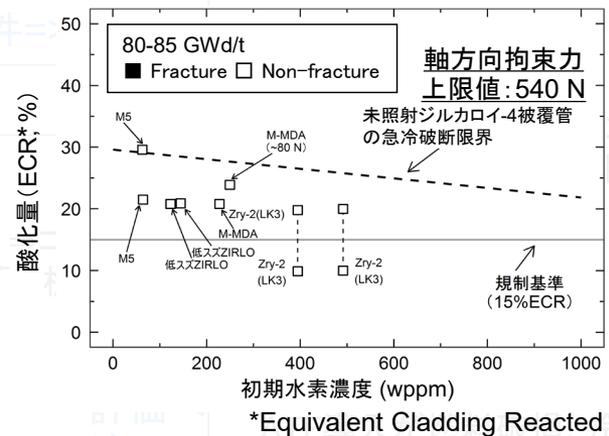
### 冷却材喪失事故(LOCA)時の燃料破損限界

#### 【アプローチ及び成果】

✓ 高燃焼度改良型燃料(~85GWd/t)を対象としたLOCA模擬急冷破断試験により、被覆管の急冷破断条件を評価



LOCA模擬急冷破断試験装置(燃料試験施設)



高燃焼度改良型燃料被覆管のLOCA模擬急冷時の破断マップ

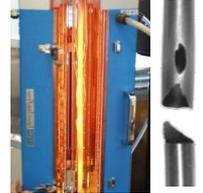
➡ 現行基準相当の酸化条件を超えても急冷破断せず

# 前計画からの方向性

SA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、NSRR及び燃料試験施設(RFEF)を用いて取得するとともに、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。

## 第3期中長期計画 (H27~R3)

通常運転条件から設計基準事故を超える条件までの燃料挙動に関する知見を取得



原子炉安全性研究炉を用いた照射試験

各種試験装置による事故模擬試験

従来材/改良合金被覆管の通常時・事故時挙動評価

- ・破損限界
- ・高温酸化
- ・腐食
- ・照射成長

知見の

燃料挙動解析コードへの反映を進めその性能を向上

- ・燃料挙動モデルの構築
- ・国産燃料挙動解析コードの開発/検証と公開

**FEMAXI**  
**RANNS**

通常時/異常過渡時解析モデルの整備

⇒**検証・公開**(FEMAXI-8)

RIA解析モデルの整備 ⇒**検証**

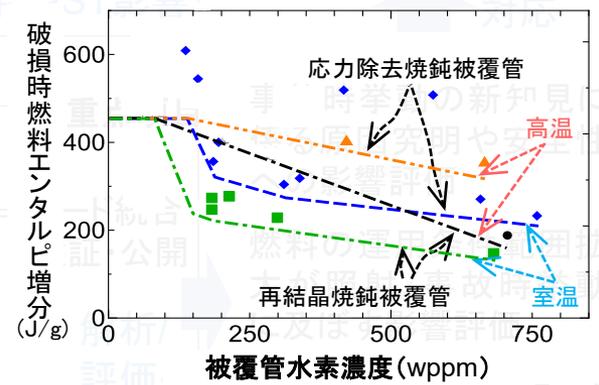
前中長計で注力 **取り**

軽水炉燃料の安全性/経済性向上を目的とした被覆管合金組成の変更や高燃焼度化が事故時の挙動に及ぼす影響を評価し、現行基準への適合性を検証

### 反応度投入事故(RIA)時の燃料破損限界

#### 【アプローチ及び成果】

- ✓ 原子炉安全性研究炉NSRRを用いたRIA模擬試験により高燃焼度改良型燃料(~84GWd/t)のPCMI破損限界を評価
- ✓ 被覆管状態、温度、応力等破損の支配因子の影響を個別に定量評価
- ✓ 設計/照射条件により変動する破損リスクを適切に評価可能な破損しきい値を提案



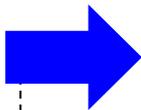
PCMI破損マップと破損しきい値改定案

➡ 破損限界は改良合金の耐食性向上に対応して上昇

# 前計画からの方向性

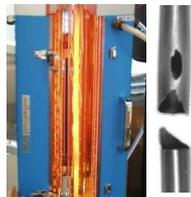
SA評価上重要となる燃料破損や燃料からの放射性核種放出といった事故時挙動に関する知見を、国際連携の強化を図りつつ、NSRR及び燃料試験施設(RFEF)を用いて取得するとともに、解析コードの性能向上及び適用範囲拡大を行い、炉心冷却性やソースタームの評価及び炉心損傷判定の考え方の検討に活用する。

## 第3期中長期計画 (H27~R3)



## 第4期中長期計画 (R4~R10)

通常運転条件から設計基準事故を超える条件までの燃料挙動に関する知見を取得



原子炉安全性研究炉を用いた照射試験

各種試験装置による事故模擬試験

従来材/改良合金被覆管の通常時・事故時挙動評価

- ・破損限界
- ・高温酸化
- ・腐食
- ・照射成長

### 燃料ペレットの挙動評価

- ・細片化・リロケーション・放出
- ・FP移行
- ・放出燃料の冷却性
- ・MOX・添加物影響

### ATFの事故時挙動評価

- ・破損限界/破損モード
- ・冷却可能形状喪失条件=>ST影響

重点項目

外部動向

軽水現行基準制定時に考慮されていなかった燃料の事故時挙動

運転サイクル長期化等燃料高度利用のニーズ

ATFの開発加速

↑ 対応

### 知見の集約モデル化

燃料挙動解析コードへの反映を進めその性能を向上

- ・燃料挙動モデルの構築
- ・国産燃料挙動解析コードの開発/検証と公開

FEMAXI

RANNS

通常時/異常過渡時解析モデルの整備

⇒**検証・公開**(FEMAXI-8)

RIA解析モデルの整備

⇒検証

機構論的モデルの強化

確率論的モデルの開発

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)

⇒公開(RANNS)

重点項目

⇒コード統合  
検証・公開

解析/  
評価へ  
適用

事故時挙動の新知見に係る原因究明や安全性への影響評価

燃料の運用条件範囲拡大が照射/事故時挙動に及ぼす影響評価

ATF導入が燃料破損、冷却可能形状喪失、事故進展へ及ぼす影響評価

前中長計で注力

取り組み継続

今期中長計で重点化

# 前計画からの方向性

SA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、NSRR及び燃料試験施設(RFEF)を用いて取得するとともに、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。

## 燃料ペレット細片化・リロケーション・放出挙動データ及び知見の取得

- ✓ ペレットを除去しない状態で照射済み燃料のLOCA模擬試験を実施
- ✓ 対応装置を前計画下で開発



実燃料入りLOCA試験装置



アウトガス分析装置 (OGA)

## 第4期中長期計画 (R4~R10)

**燃料ペレットの挙動評価**

- ・細片化・リロケーション・放出
- ・FP移行 ・放出燃料の冷却性
- ・MOX・添加物影響

**ATFの事故時挙動評価**

- ・破損限界/破損モード
- ・冷却可能形状喪失条件=>ST影響

**集約モデル化**

**構論的モデルの強化**

**率論的モデルの開発**

- 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)
- =>公開(RANNS)

⇒コード統合 検証・公開

**解析/評価へ適用**

取り組み継続 今期中長計で重点化

**外部動向**

軽水現行基準制定時に考慮されていなかった燃料の事故時挙動

運転サイクル長期化等燃料高度利用のニーズ

**ATFの開発加速**



**対応**

事故時挙動の新知見に係る原因究明や安全性への影響評価

燃料の運用条件範囲拡大が照射/事故時挙動に及ぼす影響評価

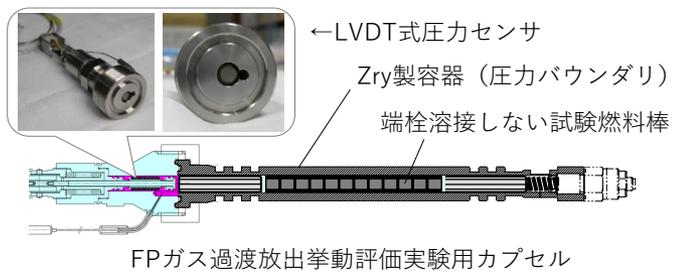
ATF導入が燃料破損、冷却可能形状喪失、事故進展へ及ぼす影響評価

# 前計画からの方向性

SA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、NSRR及び燃料試験施設(RFEF)を用いて取得するとともに、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。

## 燃料ペレット種別・条件毎のFPガス移行挙動の把握

- ✓ 事故条件下の過渡的なFPガス放出挙動、付随する燃料状態の変化に特化した分離効果NSRR実験
- ✓ 対応圧力センサ、照射用カプセルを前計画下で開発



## 第4期中長期計画 (R4~R10)

**燃料ペレットの挙動評価**  
 ・細片化・リロケーション・放出  
 ・FP移行 ・放出燃料の冷却性  
 ・MOX・添加物影響

**ATFの事故時挙動評価**  
 ・破損限界/破損モード  
 ・冷却可能形状喪失条件=>ST影響

## 集約モデル化

**構論的モデルの強化**  
**率論的モデルの開発**  
 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)  
 =>公開(RANNS)

重点項目  
 =>コード統合  
 検証・公開  
 解析/評価へ適用

外部動向  
 軽水現行基準制定時に考慮されていなかった燃料の事故時挙動  
 運転サイクル長期化等燃料高度利用のニーズ  
**ATFの開発加速**



事故時挙動の新知見に係る原因究明や安全性への影響評価  
 燃料の運用条件範囲拡大が照射/事故時挙動に及ぼす影響評価  
 ATF導入が燃料破損、冷却可能形状喪失、事故進展へ及ぼす影響評価

組み継続 今期中長計で重点化

# 前計画からの方向性

SA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、NSRR及び燃料試験施設(RFEF)を用いて取得するとともに、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。

## 第3期中長期計画 (H27~R3) → 第4期中長期計画 (R4~R10)

通常運転条件から設計基準事故を超える条件までの燃料挙動に関する知見を取得



原子炉安全性研究炉を用いた照射試験  
各種試験装置による事故模擬試験

<p>従来材/改良合金被覆管の通常時・事故時挙動評価</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・破損限界</li> <li>・高温酸化</li> <li>・腐食</li> <li>・照射成長</li> </ul>	<p><b>燃料ペレットの挙動評価</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・細片化・リロケーション・放出</li> <li>・FP移行</li> <li>・放出燃料の冷却性</li> </ul> <p><b>ATFの事故時挙動評価</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・破損限界/破損モード</li> <li>・冷却可能形状喪失条件=&gt;ST影響</li> </ul>	<p><b>重点項目</b></p>
---	---	--------------------

**外部動向**

軽水現行基準制定時に考慮されていなかった燃料の事故時挙動

運転サイクル長期化等燃料高度利用のニーズ

**ATFの開発加速**

↑ 対応

### 知見の集約モデル化

燃料挙動解析コードへの反映を進めその性能を向上

- ・燃料挙動モデルの構築
- ・国産燃料挙動解析コードの開発/検証と公開

**FEMAXI**

**RANNS**

<p>通常時/異常過渡時解析モデルの整備</p> <p>⇒ <b>検証・公開</b> (FEMAXI-8)</p>	<p><b>機構論的モデルの強化</b></p> <p><b>確率論的モデルの開発</b></p>	<p><b>重点項目</b></p>
<p>RIA解析モデルの整備</p> <p>⇒ 検証</p>	<p>ATF解析モデルの整備</p> <p>LOCA解析モデルの整備</p> <p>熱水力/SAコード連携 (炉心スケールの評価)</p> <p>⇒ <b>公開</b> (RANNS)</p>	<p>⇒ <b>コード統合 検証・公開</b></p> <p><b>解析/評価へ適用</b></p>

事故時挙動の新知見に係る原因究明や安全性への影響評価

燃料の運用条件範囲拡大が照射/事故時挙動に及ぼす影響評価

ATF導入が燃料破損、冷却可能形状喪失、事故進展へ及ぼす影響評価

前中長計で注力    **取り組み継続**    今期中長計で重点化

# ATF研究の'影響評価'への展開 :

他研究開発・継続的  
取り組みとの連続性



諸条件における'ATF影響'評価

