

# 軽水炉燃料の高燃焼度化に対応した安全評価

安全研究センター  
原子炉施設安全評価研究ユニット  
燃料安全評価研究グループ

# 研究の位置付け

安全審査のための基準等の高度化に貢献するため、事故時燃料挙動模擬実験を実施するとともに、高燃焼度燃料特有の現象を解明することにより、燃料挙動解析手法を高精度化する。

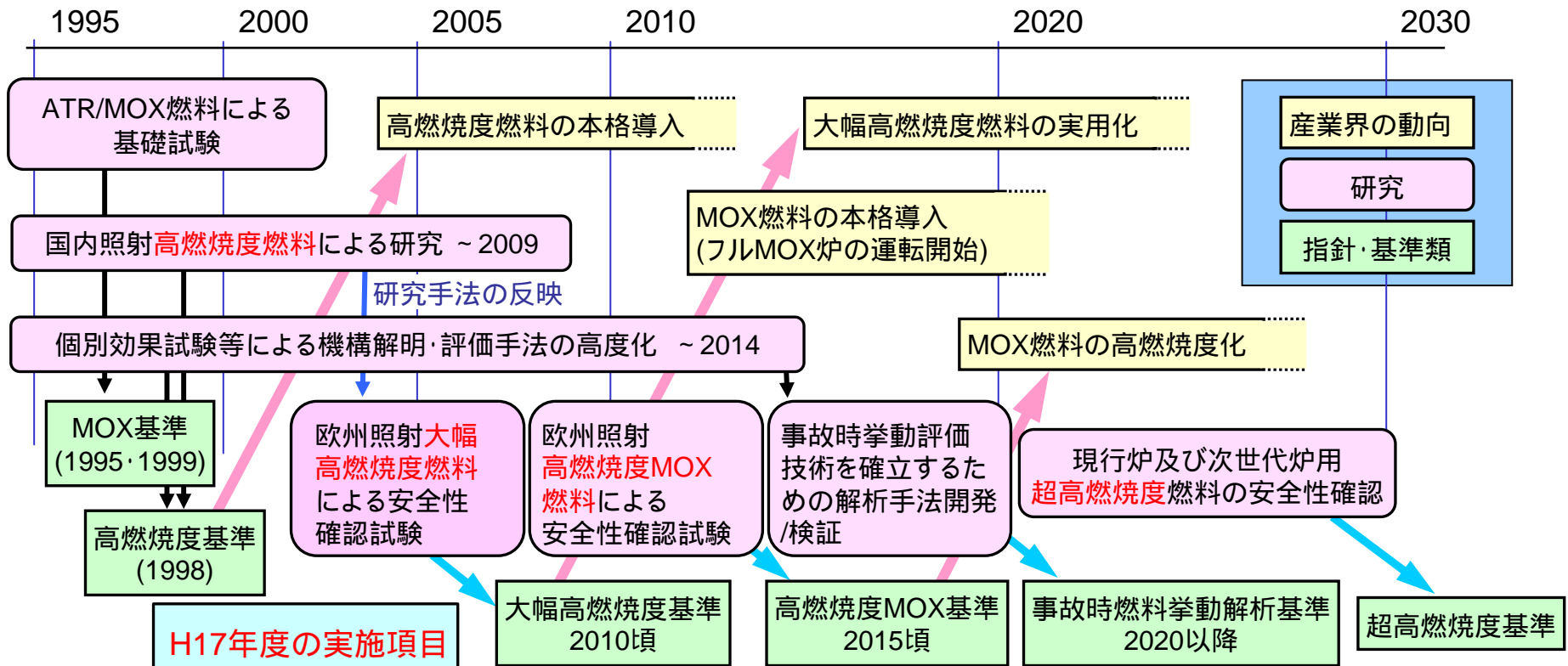
# 設定目標

次段階の高燃焼度化やプルサーマルの本格化に対応した安全審査など、安全規制における行政判断等に供するため、

- ・ 実験データベースを拡充し、
- ・ 事故時燃料挙動評価を高精度化するためのモデルを開発、整備する。

# 研究の進め方

**実施体制:** 安全研究センター 燃料安全評価研究グループ  
 研究炉加速器管理部(NSRR)、ホット試験施設管理部(燃料試験施設)



**H17年度の実施項目**

- ✓ 反応度事故時燃料挙動: 欧州照射大幅高燃焼度燃料を対象とした4回のNSRR実験
- ✓ 冷却材喪失事故時燃料挙動: 破断限界データベースの大幅な拡充
- ✓ 事故時燃料挙動解析手法の高精度化: 燃料ペレット/被覆管機械的相互作用に関する2次元モデルの開発

# 成 果

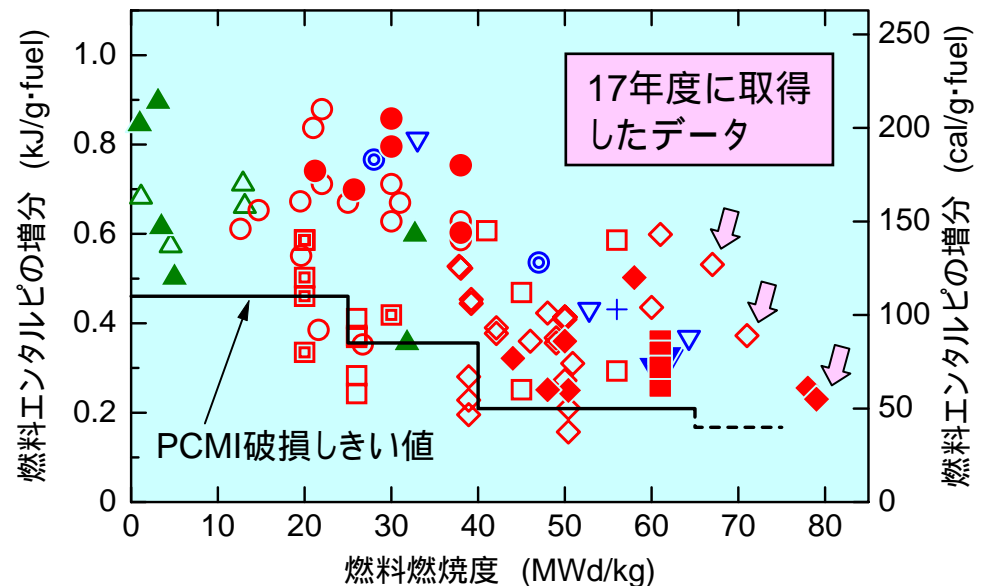
- ✓ **反応度事故**条件における燃料破損限界データを拡充し、より高い燃焼度範囲における基準の安全余裕を確認
- ✓ **冷却材喪失事故**時燃料破断限界データを大幅に拡充
- ✓ 反応度事故時の燃料挙動を予測するための**解析コードの開発**に着手し、燃料ペレット/被覆管機械的相互作用に関する2次元モデルを開発

# 反応度事故(RIA)時燃料挙動研究

- 高燃焼度  $UO_2$  燃料を対象とした NSRR 実験を4回実施し、RIA時の燃料破損しきい値に関する高燃焼度域のデータを拡充  
(PWR燃料:3回、BWR燃料:1回)
- 燃焼度  $79\text{GWd/t}$  の改良被覆PWR燃料を用いた実験では、燃料エンタルピが約  $55\text{cal/g}$  に達した時点で燃料がPCMI(ペレット/被覆管機械的相互作用)により破損

現行の安全評価基準において燃焼度  $65 \sim 75\text{GWd/t}$  に対して定められているPCMI破損しきい値の安全余裕を確認した。

実験シリーズ		破損せず	破損	実験シリーズ		破損せず	破損
NSRR	PWR	◇	◆	SPERT, PBF	△	▲	
	BWR	□	■	CABRI $UO_2$	▽	▼	
	ATR/MOX	◻	—	CABRI MOX	⊙	+	
	JMTR	○	●	—	—	—	



上側

下側

NSRR実験で破損した燃料棒 (ZIRLO被覆PWR- $UO_2$ ,  $79\text{GWd/t}$ )

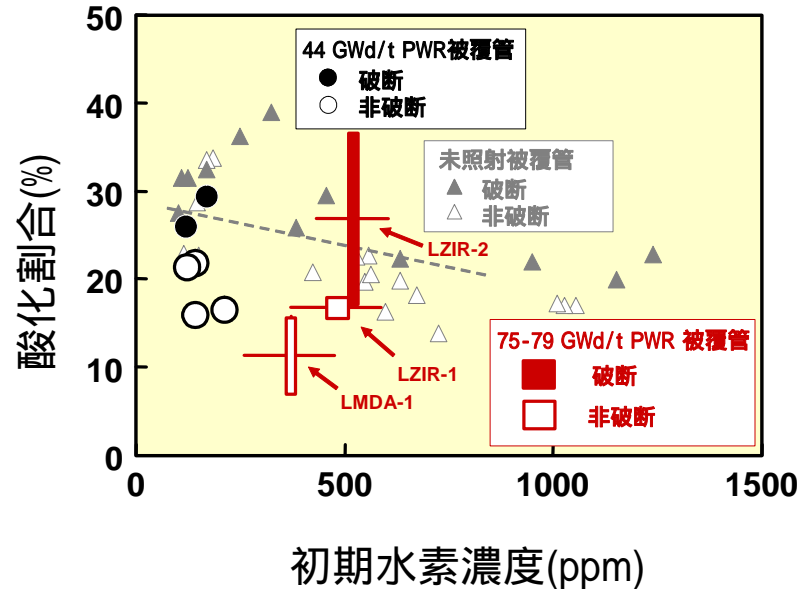
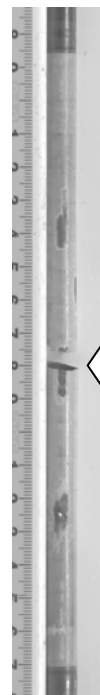
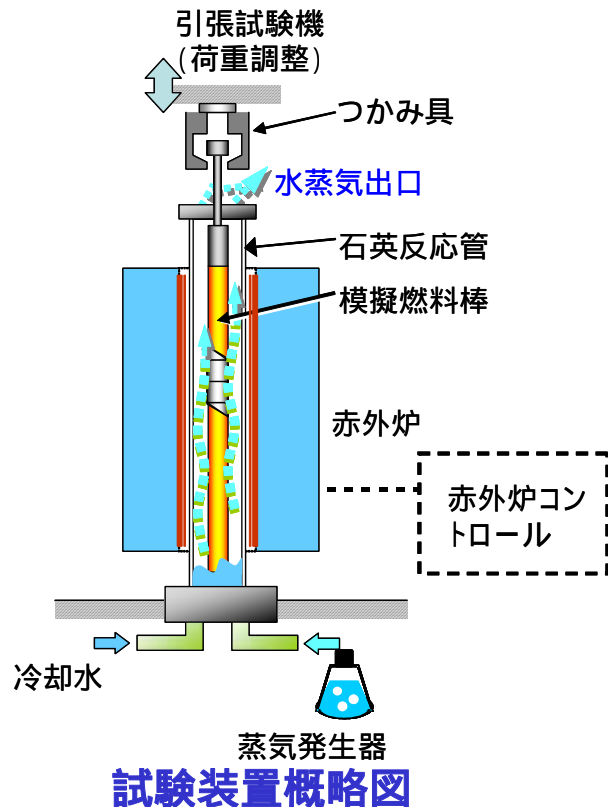
# 冷却材喪失事故(LOCA)時燃料挙動研究

ECCS性能評価指針: LOCA条件下における被覆管破断限界に依拠

## 高燃焼度被覆管に対するLOCA模擬試験の実施

従来知見:  
ジルカロイ被覆管(44GWd/t以下)

17年度の成果:  
改良合金被覆管(75~79GWd/t)



高燃焼度化による破断限界の低下は認められない。

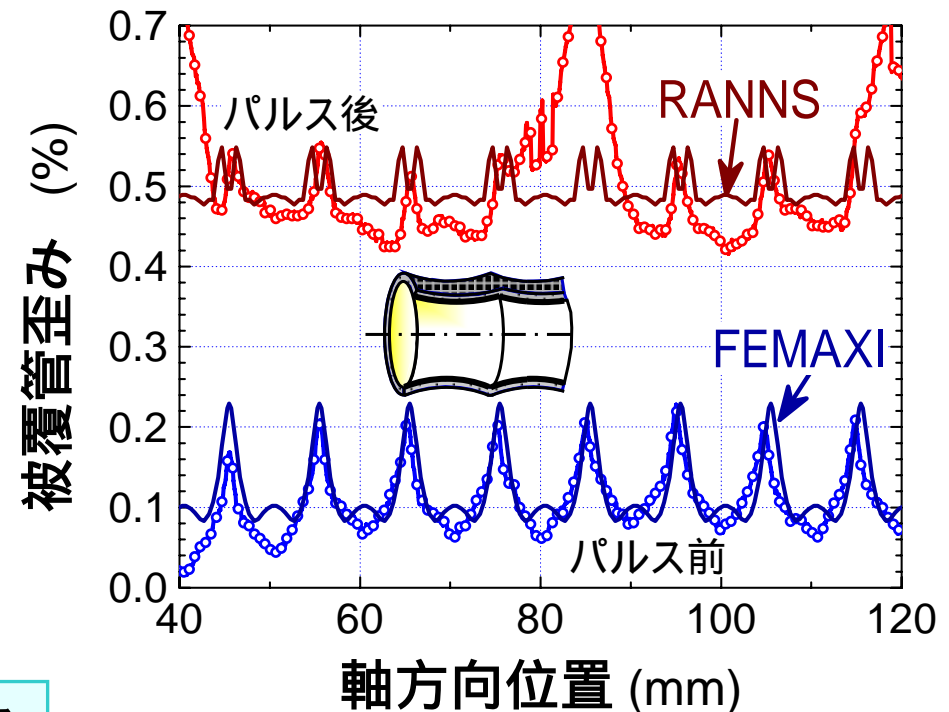
# 事故時燃料挙動解析コードの開発

高燃焼度燃料挙動解析コード  
FEMAXIをベースに、  
事故時燃料挙動解析コード  
RANNSの開発に着手

反応度事故時燃料挙動モデルを  
整備し、NSRRにおける高燃焼度  
燃料実験の解析を通じて検証

- ✓ 弾性域から塑性域までをカバーする  
PCMI解析(1-D, 2-D)に成功。
- ✓ 亀裂の成長による被覆管の破損を  
予測するモデルの開発に見通し。

実験結果と解析結果の比較の一例  
(PWR、OI-10実験)



二次元モデルによる解析は  
実測とほぼ一致した。

# 成果のまとめ

- 17年度計画(1) ・原子炉安全性研究炉(NSRR)及び燃料試験施設を用いて事故時燃料挙動模擬実験を実施する。
- ・ 反応度事故時燃料挙動についてはZr-Nb二元系被覆燃料に関する水冷却条件下で世界初の炉内実験データを取得する。
  - ・ 冷却材喪失事故時燃料挙動については急冷時破断限界に関して燃焼度範囲を44 から78 GWd/tまで拡張したデータを取得する。

成 果 : 反応度事故時燃料挙動、冷却材喪失事故時燃料挙動の双方について計画通りの実験を実施し、従来にない高い燃焼度範囲において基準類の策定に直接的な知見を与えるデータを取得した。

- 17年度計画(2) ・燃料挙動解析手法の高精度化に着手し、燃料ペレット/被覆管機械的相互作用(PCMI)に関する2次元モデルの開発を通じて被覆管塑性変形量の軸方向分布予測を可能にする。

成 果 : 高燃焼度燃料挙動解析コードFEMAXIをベースに、事故時燃料挙動解析コードRANNSの開発に着手し、反応度事故条件下における被覆管塑性変形量の予測モデルを開発した。実験解析を通じて、安全評価に関し重要な知見を得つつある。



# 成果の活用

- ✓ 反応度事故(RIA)時及び冷却材喪失事故(LOCA)時燃料挙動模擬実験が与えたデータは、より高い燃焼度範囲をカバーする安全基準類の策定に直接的なベースを与える。また、Zr-Nb二元系被覆燃料を対象としたRIA実験の結果は、近い将来に国内での実用化が予想される同燃料の安全審査に際し、重要な判断材料を与える。
- ✓ 事故時燃料挙動解析コードの整備は、実験的研究により得られていた推論をより定量的に検証するツールを与えるのみならず、さらに開発、検証を進めて信頼性を高めることにより、安全規制における定量性、説明性の向上に大きく資することが出来る。
- ✓ 成果の公表 (H17年度下期)
  - Nuclear Engineering and Design : 1編
  - JAEAレポート : 2編
  - 国際会議発表 : 9件
  - 保安院受託報告書 : 1件、文科省受託報告書 : 1件

# 用語解説

## ✓ 燃焼度範囲

我が国における軽水炉燃料の燃焼度(集合体平均)の上限は、以下の通りとなっている。

UO<sub>2</sub>燃料 : 55 GWd/t

MOX燃料 : 45 GWd/t (炉心の1/3までの装荷)

40 GWd/t (ABWRにおける全炉心装荷)

MOX燃料については、少なくともUO<sub>2</sub>燃料並みの高燃焼度化が当面の目標とされている。炉心内に燃焼度上限の異なる燃料が混在する状況は、燃料管理上の困難を生じることから、MOX燃料のUO<sub>2</sub>燃料並み燃焼度の達成は極めてメリットが大きい。さらに、UO<sub>2</sub>燃料には六ヶ所再処理工場の受け入れ燃焼度55 GWd/tまでなどの制限があるのに対して、MOX燃料は燃焼末期での出力低下が小さいこともあって、燃やせるだけ燃やし尽くすことが望ましいとされている。このため、MOX燃料のさらなる高燃焼度化はUO<sub>2</sub>燃料に対するよりずっと強いニーズがあるとされている。

## ✓ 燃料ペレット/被覆管機械的相互作用(PCMI)

燃料ペレットの膨張により、被覆管を内側から押し広げる機械的な作用をPCMIと呼ぶ。反応度事故条件では、燃焼の進行に伴う水素吸収などによって被覆管の延性が著しく低下している場合には、極めて早い段階で被覆管に長い縦割れなどを生じるPCMI破損に至る。

## ✓ Zr-Nb二元系被覆管

具体的には仏フラマトム社製M5™被覆管のことで、耐食性の向上が図られている。よく似た組成の被覆管材料としてロシアのE110がある。