

# 反応度事故模擬実験で観察された 添加物入りBWR燃料の低破損限界と原因分析

日本原子力研究開発機構 安全研究センター 燃料安全研究グループ

本研究は、原子力規制庁の平成29年度原子力施設等防災対策等委託費（燃料等安全高度化対策）事業、平成30年度原子力施設等防災対策等委託費（燃料設計審査分野の規制研究）事業、及び平成31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。

## 背景及び目的

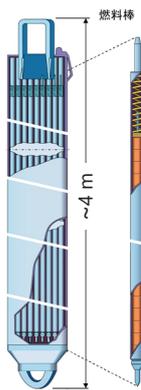
原子力機構では、平成30年度まで、導入が見込まれる改良型軽水炉燃料の審査に備えて、高燃焼度まで照射された改良型燃料の事故時挙動データ及び知見の取得を進めてきた。

改良型燃料の一つで、FPガスの放出を抑制するために結晶粒を大粒径化させた添加物入り燃料ペレットを用いた高燃焼度BWR燃料について、平成30年度に反応度事故（RIA）模擬実験を実施し、事故時の挙動を調べた。

## 実験方法

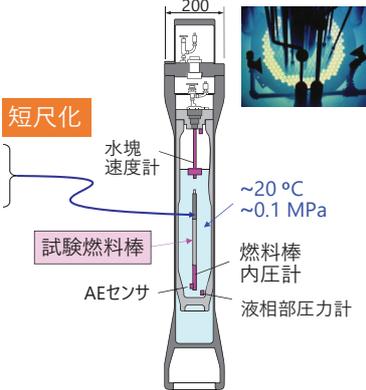


原子力発電所<sup>[1]</sup>



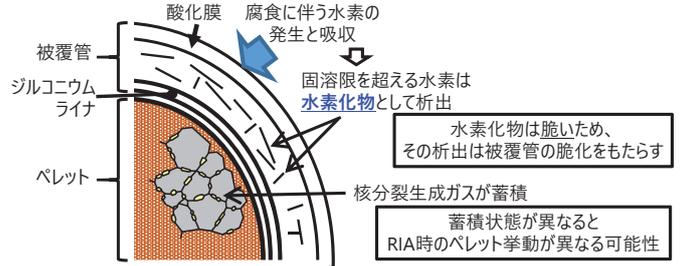
発電炉燃料

## NSRRパルス照射によるRIA模擬実験



室温実験カプセル及び主な計装項目

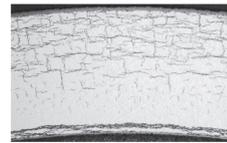
## 炉内での燃焼に伴うペレット及び被覆管の変化



## OS-1の実験条件

	OS-1
ペレット	BWR 10x10 UO <sub>2</sub> ADOPT (Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )
被覆管	Zircaloy-2 + ライナ
燃焼度 (GWd/t)	64
被覆管酸化膜厚さ (μm)	24
被覆管水素吸収量 (wtppm)	245
ピーク燃料エンタルピー増分 (J/g)	287

## OS-1の供試燃料被覆管で見られた水素化合物析出状態の特徴



脆い水素化合物が、周及び径方向に析出している

径方向に配向した水素化合物の析出は、周方向荷重に対して壊れやすくなる

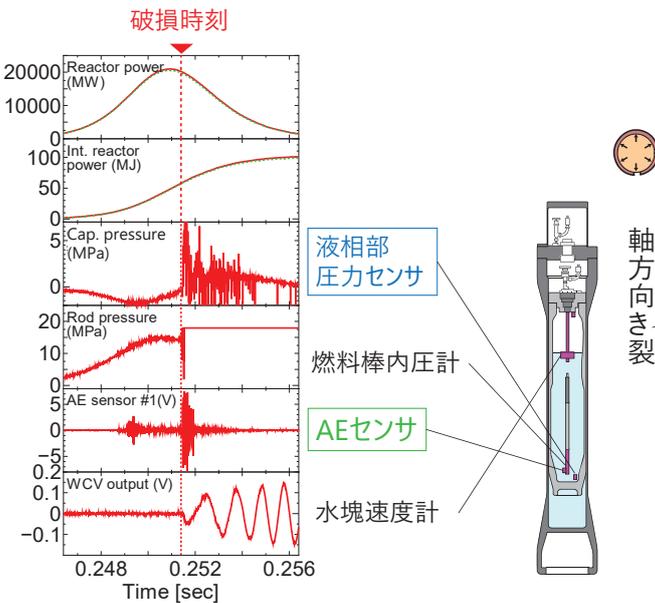
[1] <http://www.okg.se/en/Nuclear-Power/Facilities/Oskarshamn-3/>

# RIA実験(OS-1)で観察された添加物入りBWR燃料の低破損限界

## 結果

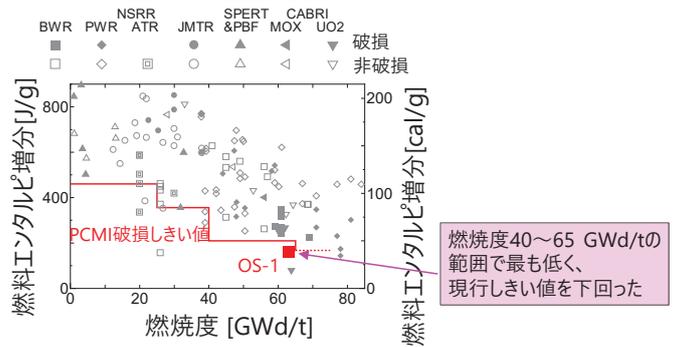
### OS-1実験のRIA時過渡変化と破損時条件

ピーク燃料エンタルピー増分,  $\Delta H_{max}$  : 287 J/g

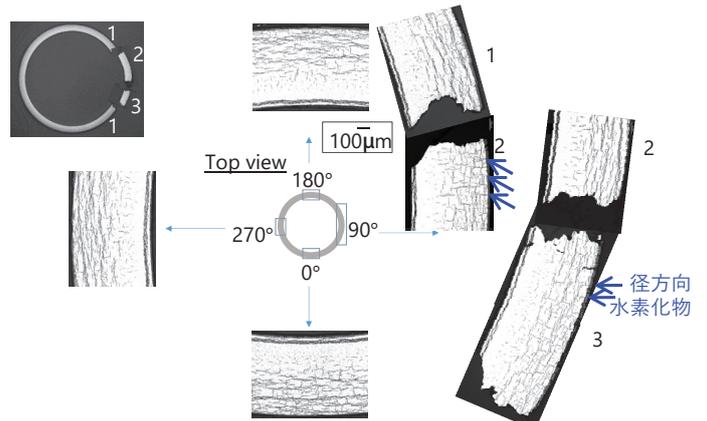


PCMI破損

## OS-1実験燃料棒の破損限界



## OS-1燃料被覆管の破損部周辺の水素化合物析出状態



✓ き裂周辺部に多くの径方向に配向した水素化合物が観察された  
径方向に配向した水素化合物が破損限界低下の原因の可能性

- ・液相部圧力センサ及びAEセンサ出力挙動より燃料が破損したと判断
- ・破損時刻における燃料エンタルピー増分を160 J/gと評価

# OS-1で観察された低燃料破損限界の原因分析

## 結果の検討/原因究明のアプローチ (令和元年度～)

- 燃焼の進んだ燃料では、被覆管内部に析出した水素化物が延性を低下させる。OS-1燃料では**径方向に配向した水素化物**が特に目立ち、従来の実験に比べて破損限界低下により大きく寄与したと推定された。
- 燃料挙動解析コードを用いた解析も、同燃料ではベース照射期間中に径方向配向が生じやすかった可能性を示唆

⇒まず、**被覆管挙動の寄与を明らかにする**：

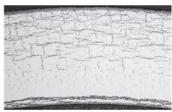
水素化物の析出配向を制御した非照射燃料被覆管を対象に炉外破壊試験を実施、及び被覆管内部水素化物の径方向への配向度合を定量化し、被覆管の破損データと径方向への配向度合の関係を導き、OS-1の実験結果と比較した。

## 実験方法

### 被覆管試料の準備

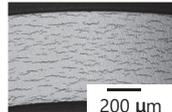
#### OS-1燃料被覆管の水素化物析出状態の模擬

OS-1燃料被覆管  
RX材、245 ppm



周・径方向に配向

通常水素吸収試料  
SR\*材、135 ppm  
\*応力除去焼鈍



200 μm  
周方向に配向

水素化物再配向試料  
SR\*材、約100 ppm  
\*照射硬化を模擬

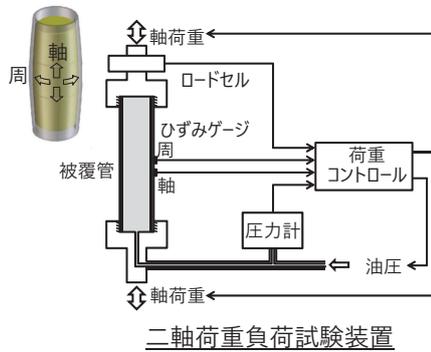


周・径方向に配向

### 炉外破壊試験

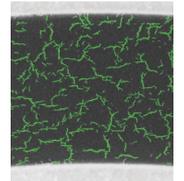
#### 被覆管試料の炉外破壊試験による破損限界の取得

RIA時に被覆管に作用する軸方向・周方向の複合応力下において**破損時周ひずみ**を取得した。

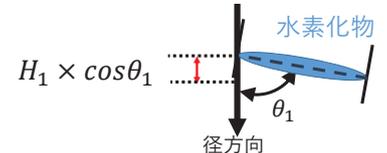


### 画像解析

#### 水素化物の配向度合の算出



水素化物形状の解析



水素化物の径方向への配向度合を**水素化物を径方向に投影した長さの最大値**により評価した。

## OS-1の水素化物配向特性の燃料破損限界への影響

## 結果

### 水素化物の径方向への配向度合による炉内/炉外試験の破損データの整理

- I 水素化物配向を制御した非照射材の破損限界及び配向データ (炉外試験)
- II OS-1燃料被覆管の破損限界及び配向データ を取得・算出し、被覆管の破損時周ひずみと配向度合の関係で整理

被覆管の破損時周ひずみ [-]

非公開

画像解析による定量化

水素化物配向を制御した非照射燃料被覆管

径方向へ投影した水素化物長さの最大値 [μm]

破損限界と水素化物配向特性の相関

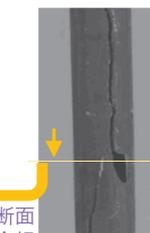
OS-1実験 (低破損限界が確認されたケース)

径方向水素化物

非公開

100mm

破損部周辺の水素化物析出形態



RIA模擬試験後の被覆管破損部外観

✓ OS-1の破損限界は水素化物配向制御管の炉外破壊試験結果と概ね整合した。

現行しきい値を下回ったOS-1燃料の低破損限界要因としての径方向水素化物寄与の重要性を、炉外機械試験データを加味した定量的な分析により裏付けた。

## まとめ

- 添加物入り燃料ペレットを使用した高燃焼度BWR改良型燃料のRIA模擬実験を実施し、その破損時燃料エンタルピ増分は現行しきい値を下回った。実験後のOS-1燃料被覆管の金相観察により、破損部周辺に径方向に配向した水素化物が多く、径方向水素化物が破損限界低下の原因である可能性を示した。
- 水素化物の径方向配向度合が被覆管の破損限界低下へ及ぼす影響を炉外破壊試験データとの比較により分析し、OS-1燃料の破損限界低下の要因としての重要性を確認した。
- 今後は、ADOPT燃料ペレット特有の振る舞いが破損挙動に与えた影響についても検討を拡大する。