

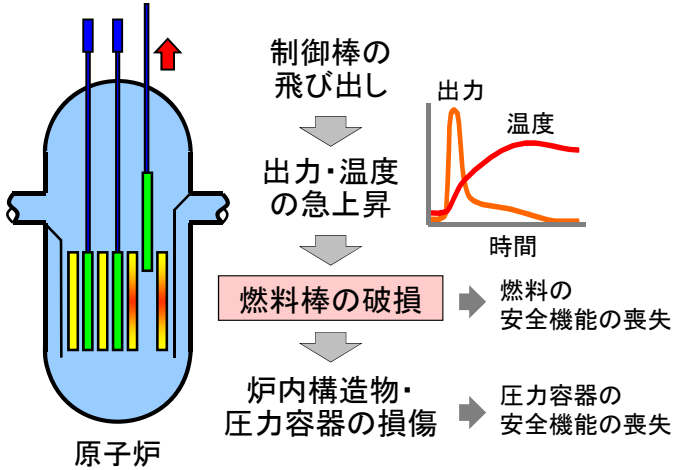
# 軽水炉燃料の事故時挙動に関する研究

日本原子力研究開発機構 安全研究センター 燃料安全研究グループ

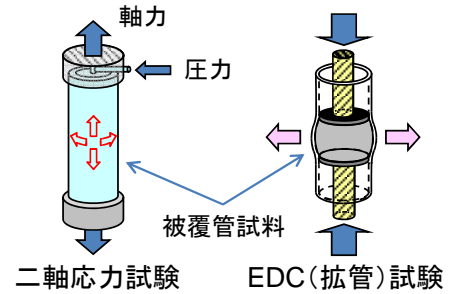
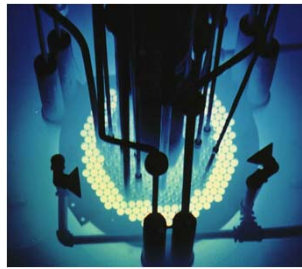
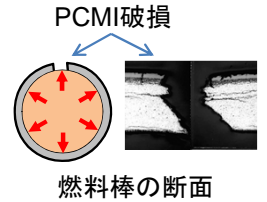
## 研究の目的

軽水炉燃料には「放射性物質の閉じ込め」、「冷却可能形状の維持」、「制御棒挿入性の維持」という安全上の役割が求められる。事故時にこれらの安全機能が失われる条件を定量化し、正しい現象理解に基づく適切な安全評価手法を開発するとともに、得られた知見を燃料挙動解析コードに反映する。これらを通して安全規制を支援する。

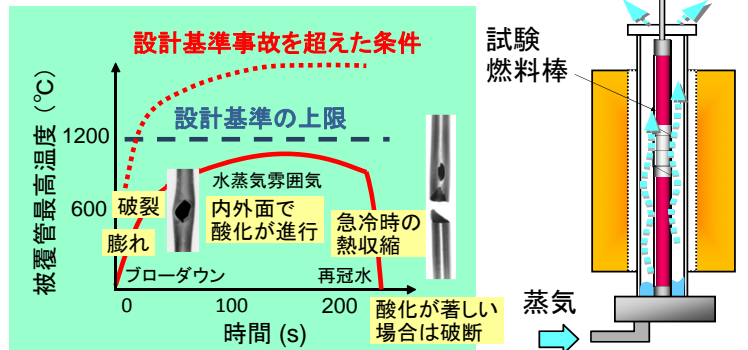
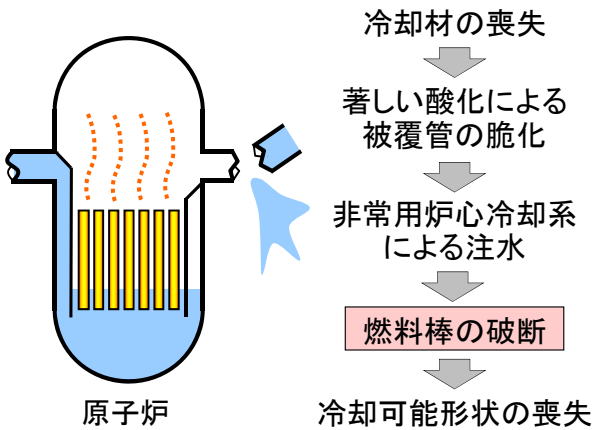
## 反応度事故(RIA)時の燃料挙動



- ・ 燃焼が進んだ燃料では被覆管が酸化及び水素化物析出により脆くなっている。
- ・ RIA時のペレット熱膨張による負荷(ペレット被覆管機械的相互作用; PCMI)により被覆管が破損する可能性がある。
- ・ 種々の試験により、材料や応力条件が被覆管の破損限界に及ぼす影響を評価。

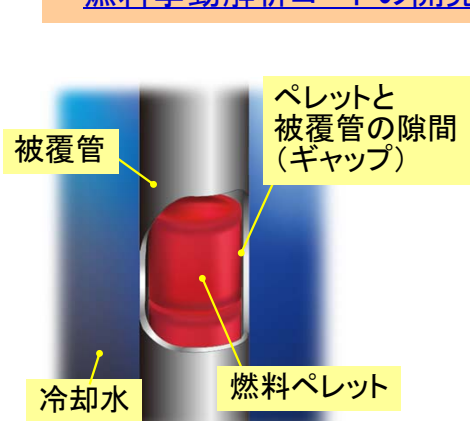


## 冷却材喪失事故(LOCA)時の燃料挙動



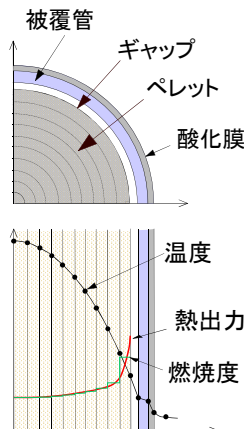
- ・ LOCA条件を模擬し、被覆管の高温酸化挙動や耐破断特性を解明。
- ・ LOCA後の燃料棒の形状維持可能性を評価。  
**被覆管機械強度、被覆管の膨れ・破裂挙動**
- ・ 従来の想定(設計基準事故)より厳しい条件における挙動を解明。  
**LOCA後再昇温及び水蒸気以外を含む雰囲気下での高温酸化挙動**

## 燃料挙動解析コードの開発



### モデル化

- リング要素
- ペレット・被覆管熱物性モデル
- ペレット・被覆管機械特性モデル
- 被覆管表面熱伝達モデル
- FPガス放出モデル、etc...



### 2種類の解析コードを開発

**FEMAXI-7** → 通常運転時

**RANNS** → 事故時

- ・ 様々な条件下に置かれた燃料について、  
**温度変化**  
**変形量(伸び、膨れ)**  
**FPガス放出量**  
等々を評価

- ・ 様々な冷却水条件のRIAに対応した被覆管表面熱伝達モデル
- ・ 被覆管の腐食の影響を考慮したPCMI破損予測モデル

# LOCA時の被覆管挙動に関する研究

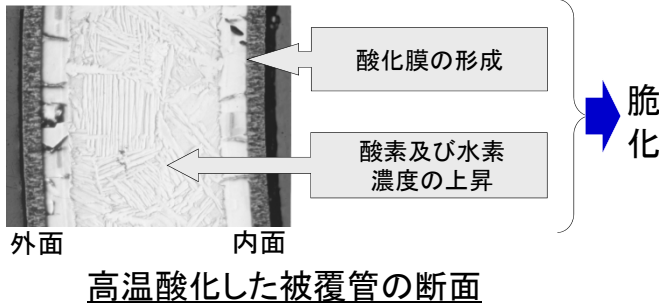
日本原子力研究開発機構 安全研究センター 燃料安全研究グループ

## 被覆管の脆化に関する規制基準

**目的**  
被覆管の著しい脆化を防ぎ、炉心の冷却が可能な形状を維持する。(広範な燃料棒の破断や破砕を防止する)

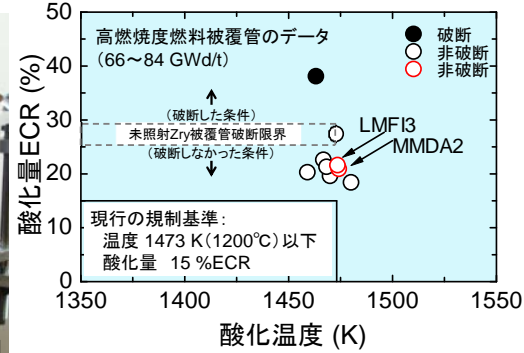
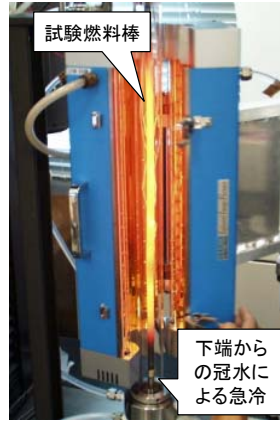
- 基準値**
- 燃料被覆最高温度は、1200℃以下
  - 酸化割合は、被覆管厚さの15%以下

**根拠**  
急冷によっても被覆管が破断しない酸化条件



## 被覆管の急冷破断試験\*1

試験燃料棒をLOCAを模擬した温度履歴で加熱した後、支持格子による軸方向拘束力を模擬した状態で下端から冠水、急冷することにより、LOCA時の被覆管の破断限界を調べた。

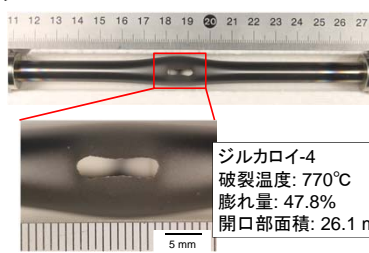


現行の規制基準は84Gwd/tまでの  
燃焼度範囲で妥当であることを確認

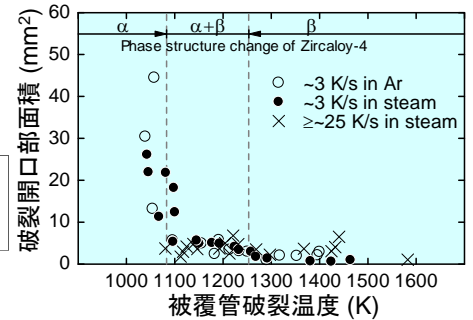
\*1 M. Amaya et al., Proc. WRFPM 2014, Paper No. 100086, Sep. 14-17, Sendai, Japan (2014).

## LOCA時の被覆管の膨れ・破裂挙動\*2

- LOCA時に被覆管が破裂した際に燃料ペレットが燃料棒外に放出される現象が、高燃焼度燃料を対象とした海外のLOCA模擬試験で報告されている。
- 燃料ペレットの放出量や放出挙動は、破裂部の変形や開口状態の影響を受けると考えられる。



破裂した被覆管の外観



被覆管の破裂開口部面積は、破裂時の温度と結晶相状態に依存

\*2 T. Narukawa and M. Amaya, Proc. WRFPM 2014, Paper No. 100034, Sep. 14-17, Sendai, Japan (2014).

## 窒素を含む雰囲気下におけるジルカロイ被覆管の酸化挙動\*3

シビアアクシデントや使用済燃料プールにおける冷却材喪失時には、燃料が水蒸気だけではなく空気等の窒素を含む雰囲気さらされる可能性がある。こうした雰囲気下でのジルカロイ被覆管の酸化挙動を調べた。

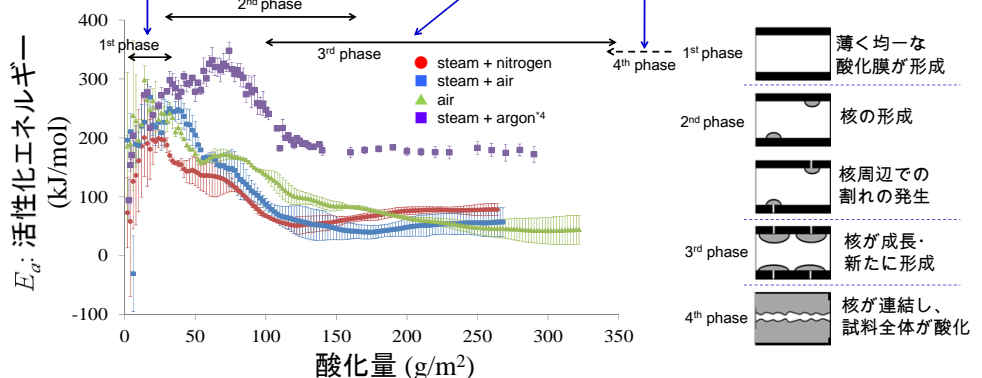
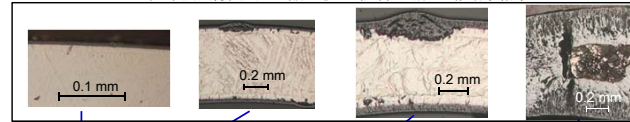
$$\frac{dw}{dt} = k \cdot g(w) \quad k = A \cdot \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right)$$

$$\rightarrow \frac{dw}{dt} = A \cdot \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \cdot g(w)$$

$$\rightarrow \ln\left(\frac{dw}{dt}\right) = -\left(\frac{E_a}{RT}\right) + \ln(A \cdot g(w))$$

$g(w)$ : 任意関数  
 $w$ : 試料の酸化量  
 $t$ : 時間  
 $k$ : 酸化速度定数  
 $A$ : 頻度因子  
 $E_a$ : 活性化エネルギー  
 $R$ : ガス定数  
 $T$ : 試料温度

窒素-水蒸気雰囲気下で酸化させた試料の断面金相観察結果



窒素を含む雰囲気下で活性化エネルギーが低下  
→ 酸化を促進

窒素を含む雰囲気下で酸化が加速するメカニズム

\*3 A. Sawada and M. Amaya, Proc. WRFPM 2014, Paper No. 100064, Sep. 14-17, Sendai, Japan (2014).

\*4 M. Amaya and F. Nagase, J. Nucl. Mater. 440 (2013) 457.

## 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 安全研究センター 燃料安全研究グループ

### ■ 事故時の燃料挙動に関する研究

原子炉が安全に設計されていることを確認するため、通常時に加え、様々な事故を想定した場合についても安全評価が行われます。このように想定される事故は設計基準事故と呼ばれ、その代表例が、制御棒が急に抜けた際の出力暴走すなわち反応度事故（RIA）および配管の破断等により原子炉内の水が失われる冷却材喪失事故（LOCA）です。

原子炉の安全確保は様々な機器類によって達成されますが、燃料には「放射性物質の閉じ込め」、「冷却可能形状の維持」及び「制御棒挿入性の維持」という安全上の役割が求められます。RIA や LOCA が起こった場合でも原子炉の安全確保に必要な機能が維持されることを確認するためには、それらの事故時に燃料の安全機能が失われる条件を把握しておく必要があります。

そこで、燃料安全研究グループでは、原子炉安全性研究炉（NSRR）や燃料試験施設（RFEF）といった施設を活用して RIA や LOCA の模擬実験を行い、設計基準事故における燃料挙動や破損メカニズムに関する理解を深めるとともに、原子炉施設の安全評価に必要なデータの拡充及び燃料に関するより適切な安全評価手法の開発を行っています。また、設計基準事故を超えた条件における燃料挙動に関するデータの取得も進めており、重大事故対策の有効性評価に活用できる知見の取得に努めています。さらに、実験で得られた理解に基づいて通常時及び事故時の燃料挙動を適切に予測するための解析コードの開発を進めており、常に最新の知見を取り込むことでその予測精度の向上に努めています。

東京電力福島第一原子力発電所の事故を通して、従来の想定を超えた厳しい条件における燃料挙動を把握しておくことの重要性が明らかになりました。このため、研究対象とする想定範囲を従来より拡げてデータ及び知見の取得を行っています。また、RIA および LOCA に関する従来の規制基準が妥当であること、及び安全評価において想定する条件に抜け等のないことについても再確認を行っています。

### ■ LOCA 時の被覆管挙動に関する研究

上に挙げた LOCA では、配管の破断等による炉心水位の低下に伴い燃料棒の温度が上昇しますが、炉心に冷却材を注入する非常用炉心冷却系（ECCS）が起動するため、まもなく燃料棒の温度は低下します。燃料棒を構成する被覆管はこの事象中に炉内の高温水蒸気により酸化され、その程度が著しい場合には脆くなります。著しく脆化した被覆管が ECCS による冷却材注入によって急冷されると、その際の熱衝撃によって燃料棒の破断や破砕が起こる可能性があります。この破断や破砕が広範に起こると炉心の燃料の冷却性に大きく影響することから、被覆管の著しい脆化を防ぐための基準が決められています。この基準の妥当性は、LOCA 時の燃料温度履歴及び水蒸気雰囲気をも模擬した条件で被覆管を加熱、高温酸化した後、実機で生じる軸方向拘束力を模擬した状態で急冷したときに被覆管が破断するかどうかを調べる試験で確認されています。

試験炉等を用いた海外の LOCA 模擬試験において、LOCA 時に被覆管が破裂した際に燃料ペレットが燃料棒外に放出される現象が報告されています。この放出現象は、その後の燃料冷却性等に影響を及ぼす可能性があり、そのメカニズム等の解明が必要となっています。このため、まず燃料ペレットの放出挙動を支配すると考えられる、LOCA 時の被覆管の破裂部の変形や開口状態に着目し、模擬燃料棒を LOCA 模擬条件で加熱する実験により、LOCA 時の被覆管破裂部の変形

挙動（破裂部の変形量及び開口部サイズ）に及ぼす燃料棒の内圧及び昇温速度の影響を調べました。その結果、被覆管の破裂開口部面積は、破裂時の温度と結晶相状態に依存することを明らかにしました。

設計基準事故として想定されている LOCA 条件を超えるシビアアクシデントや使用済燃料プールにおける冷却材喪失時においては、燃料棒が水蒸気だけでなく空気等の窒素を含む雰囲気さらされる可能性があります。こうした雰囲気条件下でのジルカロイ被覆管の酸化挙動を調べました。窒素を含む雰囲気と窒素を含まない雰囲気との間で試料の酸化量に係る活性化エネルギーを比較したところ、酸化量が  $50\text{g/m}^2$  程度までは両者に大きな差は見られないものの、これ以上の酸化量になると前者が後者に比べ低下する傾向が認められました。実験後の試料断面金相観察の結果、窒素を含む雰囲気ではある酸化量を超えると酸化が不均一に進行し始めており、この酸化挙動の変化と上記の活性化エネルギーの低下との間に関係があることを明らかにしました。