



Japan Atomic Energy Agency

冷却材喪失事故時及び事故後の 燃料被覆管の破損挙動に関する研究

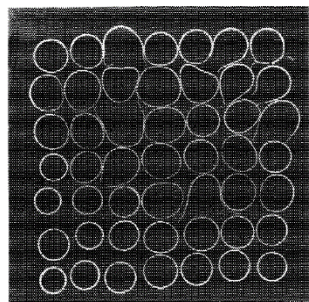
日本原子力研究開発機構
安全研究・防災支援部門
安全研究センター
原子炉安全研究ディビジョン
燃料安全研究グループ

成川 隆文

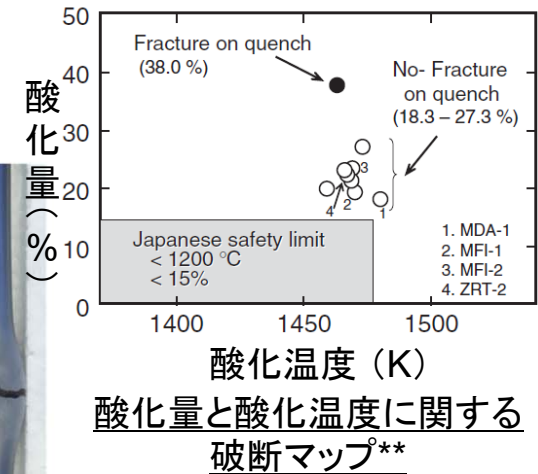
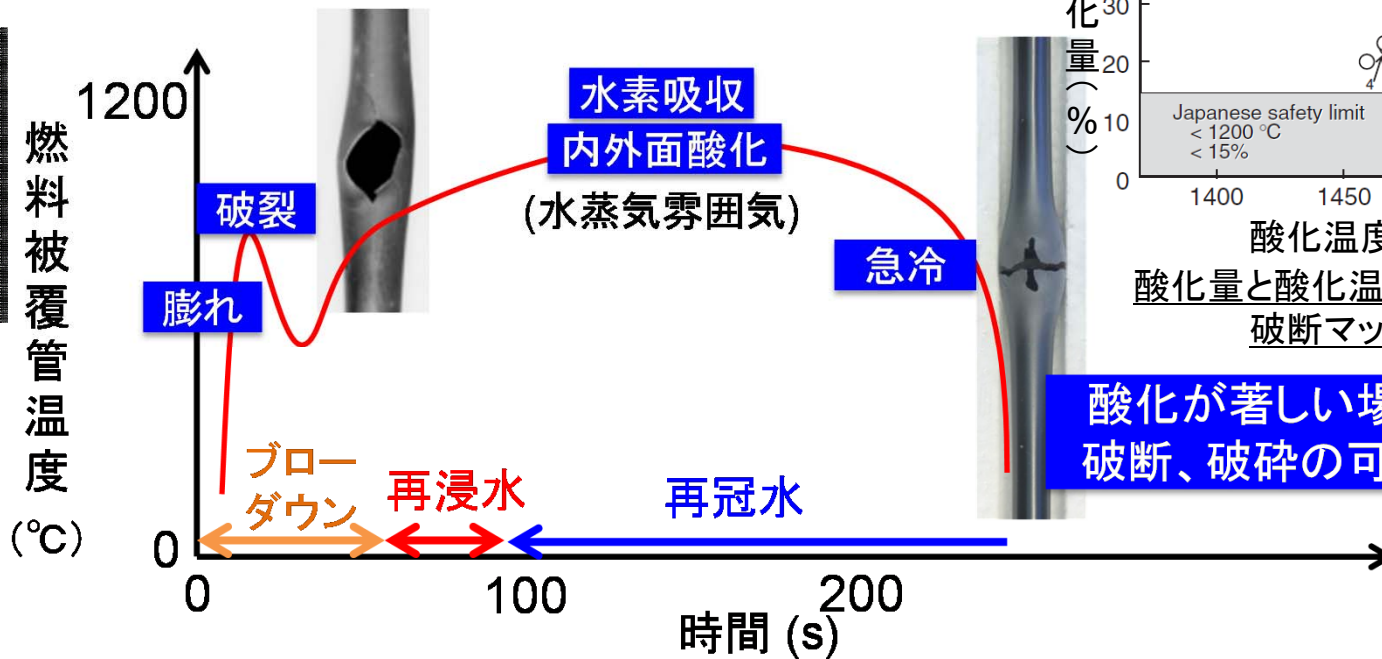
平成29年度 安全研究センター報告会
平成29年11月29日
富士ソフト アキバプラザ

本研究成果の一部は原子力規制委員会原子力規制庁の委託を受け実施した平成27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」の成果の一部として得られたものである。

- 冷却材喪失事故 (LOCA)
 - 地震による配管の破断等によって炉心の冷却材が喪失する事象
- これまでのLOCA時の燃料挙動評価
 - 目的: LOCA時に 炉心の冷却可能な形状を維持
 - 昇温時の被覆管の 膨れにより流路閉塞に至る条件 の評価
 - 急冷時に被覆管が 破断に至る条件 の評価



膨れ破裂した燃料集合体水平断面*



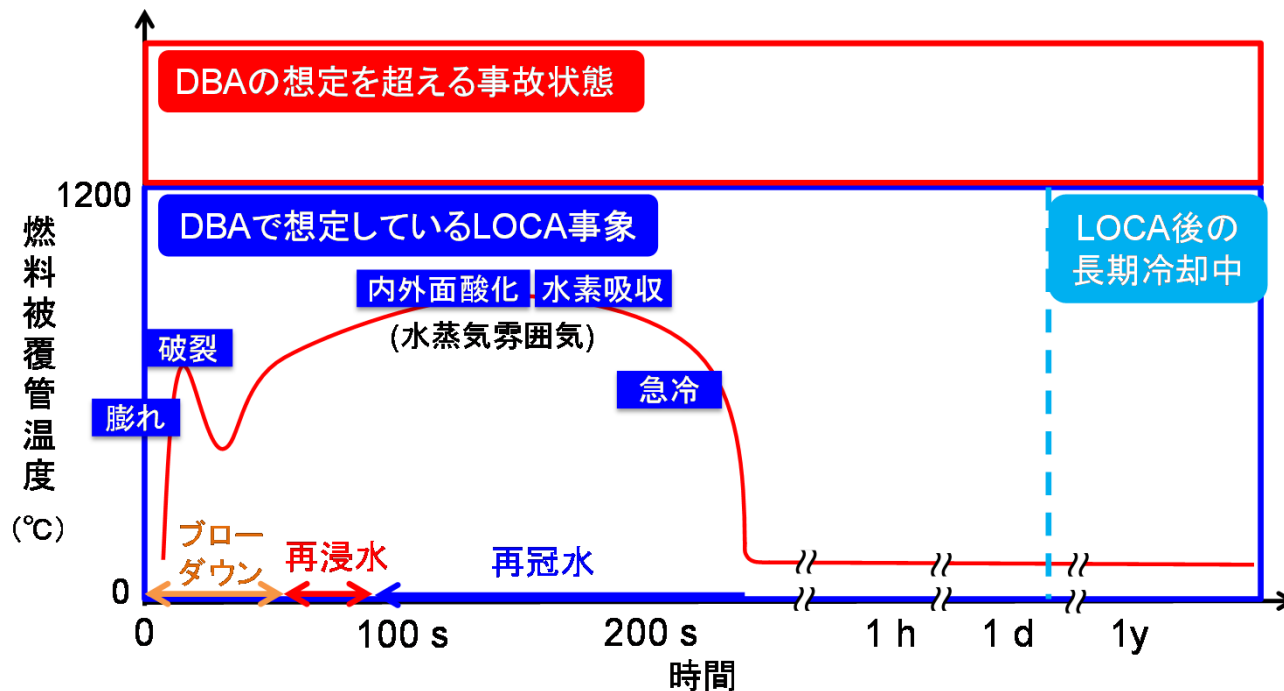
酸化が著しい場合、破断、破砕の可能性

LOCA時の燃料被覆管の温度変化と挙動の例

*JAERI-M 83-038 (1983).

** Nagase et al. JNST, 46:763-769 (2009).

- 東京電力福島第一原子力発電所事故を踏まえ、設計基準事故(DBA)としてのLOCAを超える条件下での燃料挙動、及び長期冷却中を含めて燃料棒形状維持の可否も把握する必要
- 非常に高い燃焼度の燃料を対象として最近海外の試験炉等で実施されたLOCA模擬試験におけるFFRD現象(Fuel Fragmentation, Relocation and Dispersal)の報告例*
 - 燃料ペレット細片化発生の機構、被覆管膨れ破裂部への集積状態、燃料や炉心の安全性に及ぼす影響、等に関するデータ及び知見は現時点で極めて限られている。



LOCAに係る燃料被覆管最高温度の時間推移の例



海外の試験炉のLOCA模擬試験で観察された燃料ペレットの細片化と被覆管破裂開口部への集積*

*NUREG-2121 (2012).

以下の主な課題に係るデータ及び知見を取得拡充し、LOCA時及びLOCA後の燃料及び炉心の安全性の評価及び技術的判断に反映

主な課題	燃料及び炉心の安全性に係る評価及び技術的判断の際に必要なデータ及び知見
LOCA時のFFRD発生抑制	発生のしきい値、実機での発生の有無、及び発生時に燃料や炉心の安全性に及ぼす影響、等
LOCA後長期冷却中に発生する外力(地震等)に対する燃料形状維持	燃料や炉心の冷却可能形状が維持されるか否か、LOCA時の被覆管変形と破断し易さとの関係、等
DBAとしてのLOCA条件及びこれを超える事故条件における燃料形状維持	燃料破断のしきい値、破断発生確率、等

本発表の内容

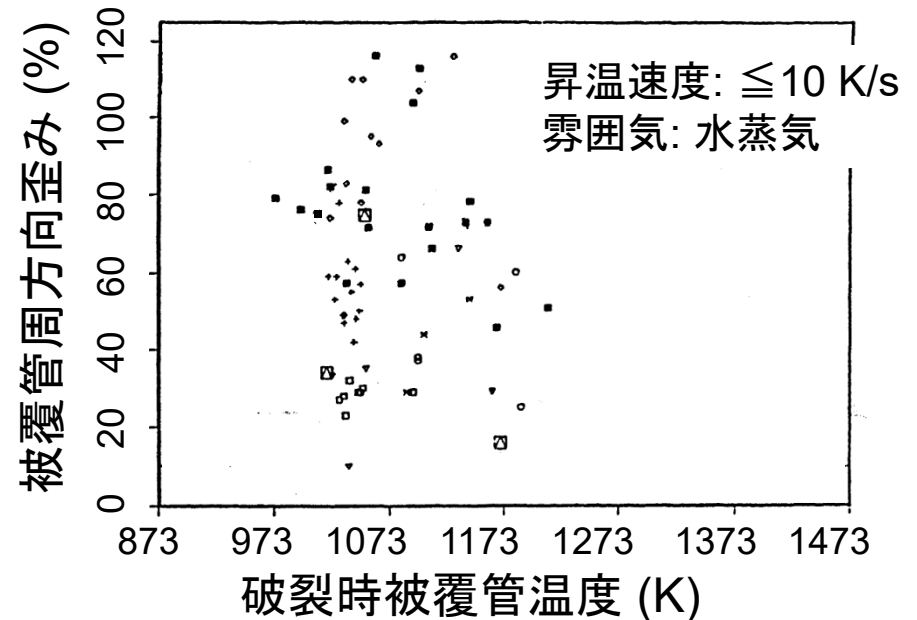
- LOCA時のFFRD
 - － 燃料棒内での燃料ペレットの拘束及び集積状態に影響を及ぼす被覆管最大周方向歪みの評価式の提案、並びに燃料ペレットの放出挙動に影響を及ぼす破裂開口面積の評価
- LOCA後長期冷却中の地震等により発生する外力に対する燃料形状維持
 - － 長期冷却中に作用する可能性が最も高いと考えられる「曲げ」に対して、LOCA後の燃料棒が有する強度(最大曲げモーメント)の評価

LOCA時の燃料被覆管の膨れ破裂挙動評価

- 膨れ破裂挙動評価の重要性
 - FFRD現象における燃料ペレットの細片化及び細片化ペレットの燃料棒内外の移行挙動は被覆管の破裂部の変形や破裂開口状態の影響を受けると考えられる。
- 膨れ破裂挙動に関する先行研究
 - 周方向歪みの不確かさが大きい。
 - 破裂開口サイズに関するデータが不足

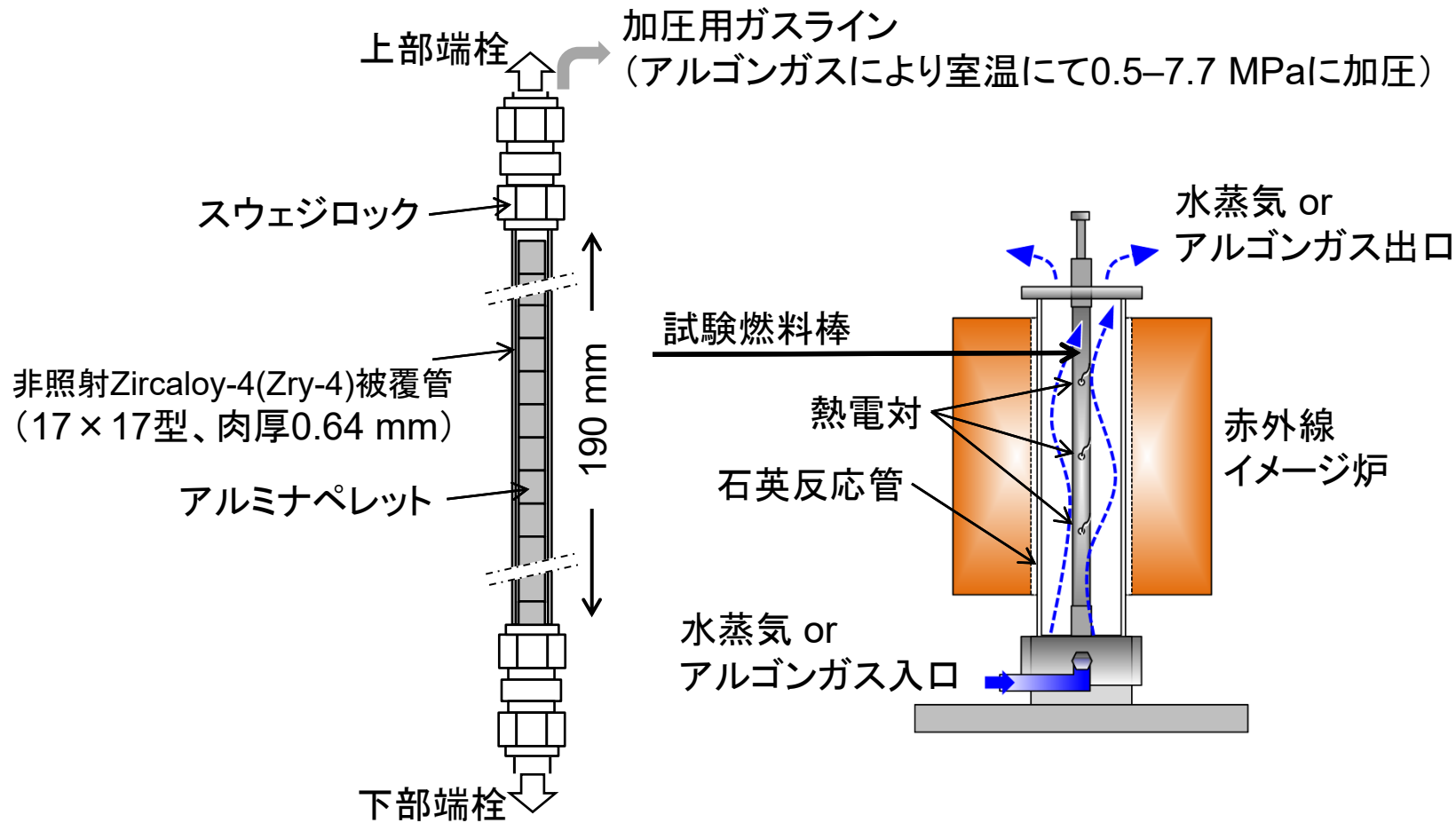
研究の目的

- FFRD現象に関し、発生のしきい値、実機での発生の有無、及び発生時に燃料や炉心の安全性に及ぼす影響、等の評価の一環として、まずLOCA時の被覆管膨れ破裂挙動に着目
- LOCA時の被覆管の最大周方向歪み及び破裂開口サイズに関するデータ及び知見を取得・拡充



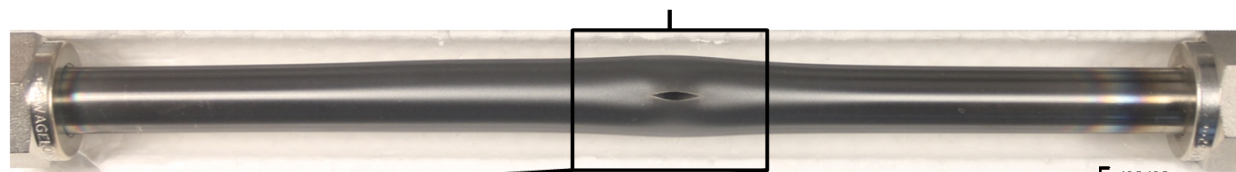
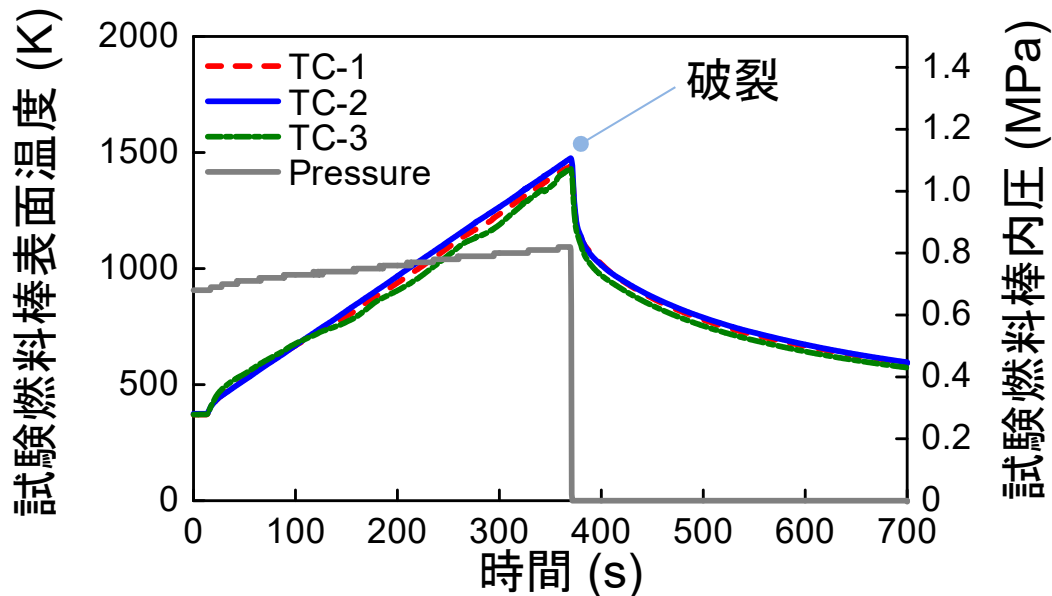
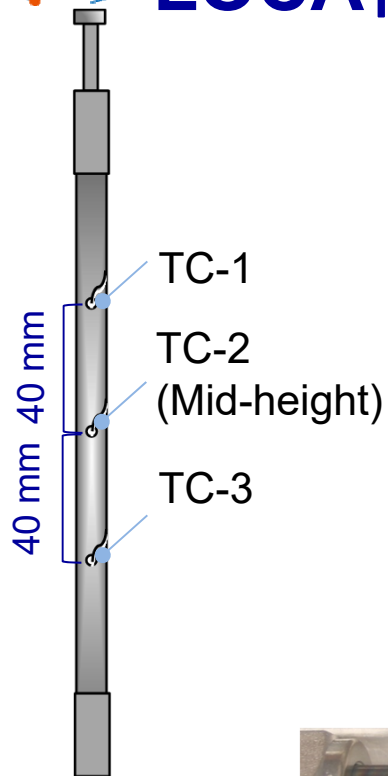
周方向歪みと破裂時被覆管温度の関係*

*NUREG-0630 (1980).

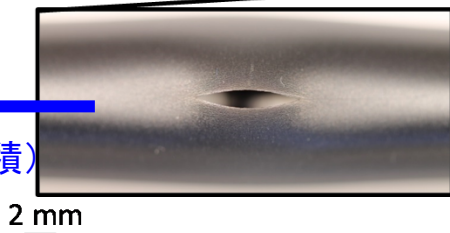


試験燃料棒及び試験装置の概要

LOCA模擬破裂試験時の被覆管温度及び内圧履歴 ⁷



破裂開口面積
(破裂開口の正射影面積)
を評価



最大膨れ部
(破裂開口中央)の
周方向平均歪みを
最大周方向歪みとして
評価



試験後の試料外観と膨れ部断面

- 破裂時の試験燃料棒内圧の影響を排除するため、膨れ破裂直前に被覆管周方向に生じていた公称応力で最大周方向歪みを除した:

$$k = \frac{\varepsilon}{\sigma}$$

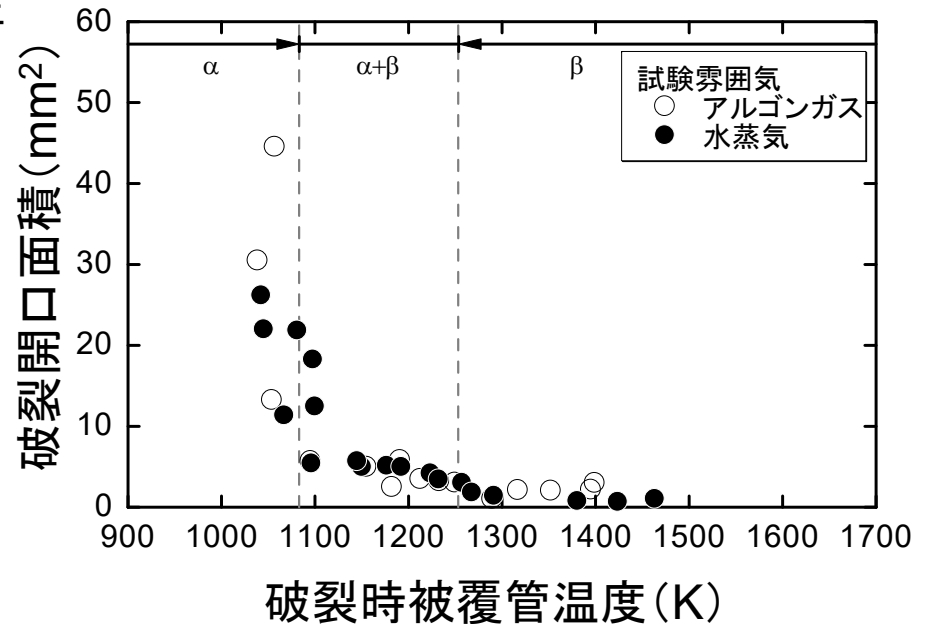
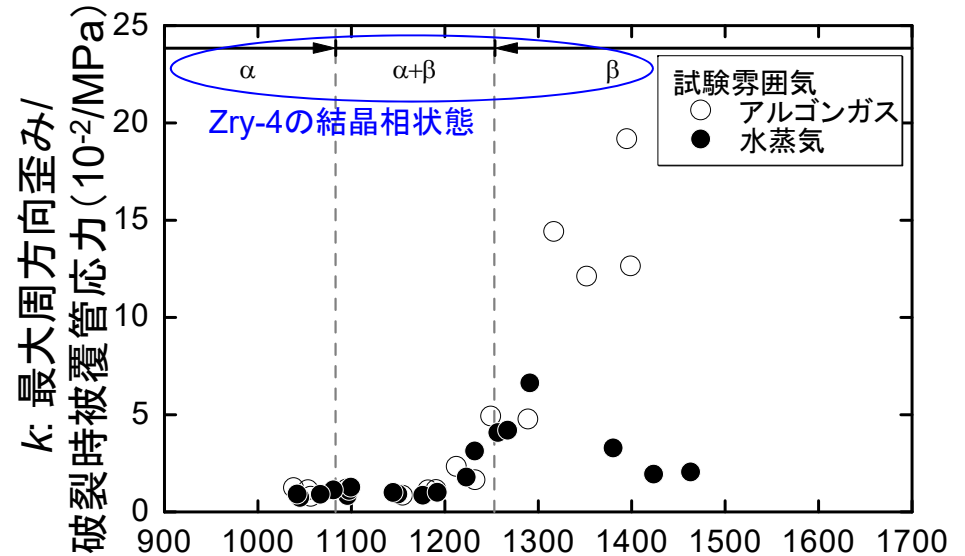
ε : 最大周方向歪み
 σ : 破裂直前の周方向公称応力

$$\sigma = \left(\frac{d}{2t} \right) \Delta P$$

d : 被覆管内径
 t : 被覆管肉厚
 ΔP : 破裂直前の被覆管内圧

- k は破裂温度がZry-4の β 相域に近づくにつれ大きくなる傾向
- 一方、破裂温度が β 相域になると、アルゴンガス雰囲気では k が温度とともに大きくなり、水蒸気雰囲気では小さくなる傾向
- 破裂開口面積は α 相域で大きくなる。

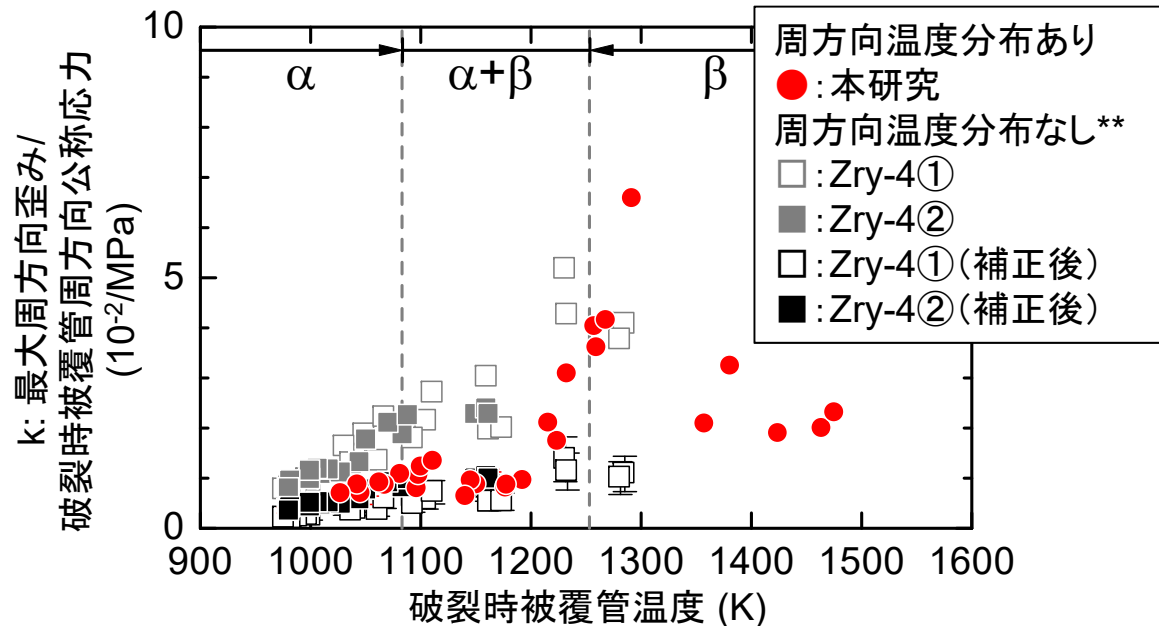
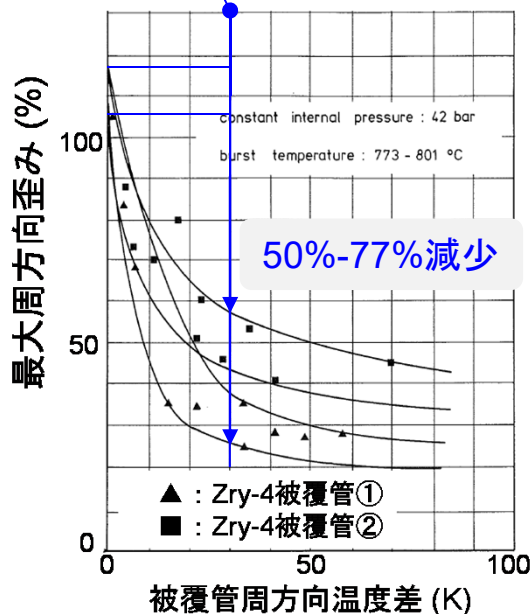
被覆管の最大周方向歪み及び破裂開口面積は被覆管の脆化及び破裂時の相状態に依存



*Narukawa T and Amaya M. JNST, 53:112-122 (2016).

最大周方向歪みに及ぼす 被覆管周方向温度分布の影響評価*

本研究で実施した試験時の
周方向温度差: ~30 K



LOCA模擬破裂試験時の被覆管 周方向温度差と最大周方向歪みの関係**

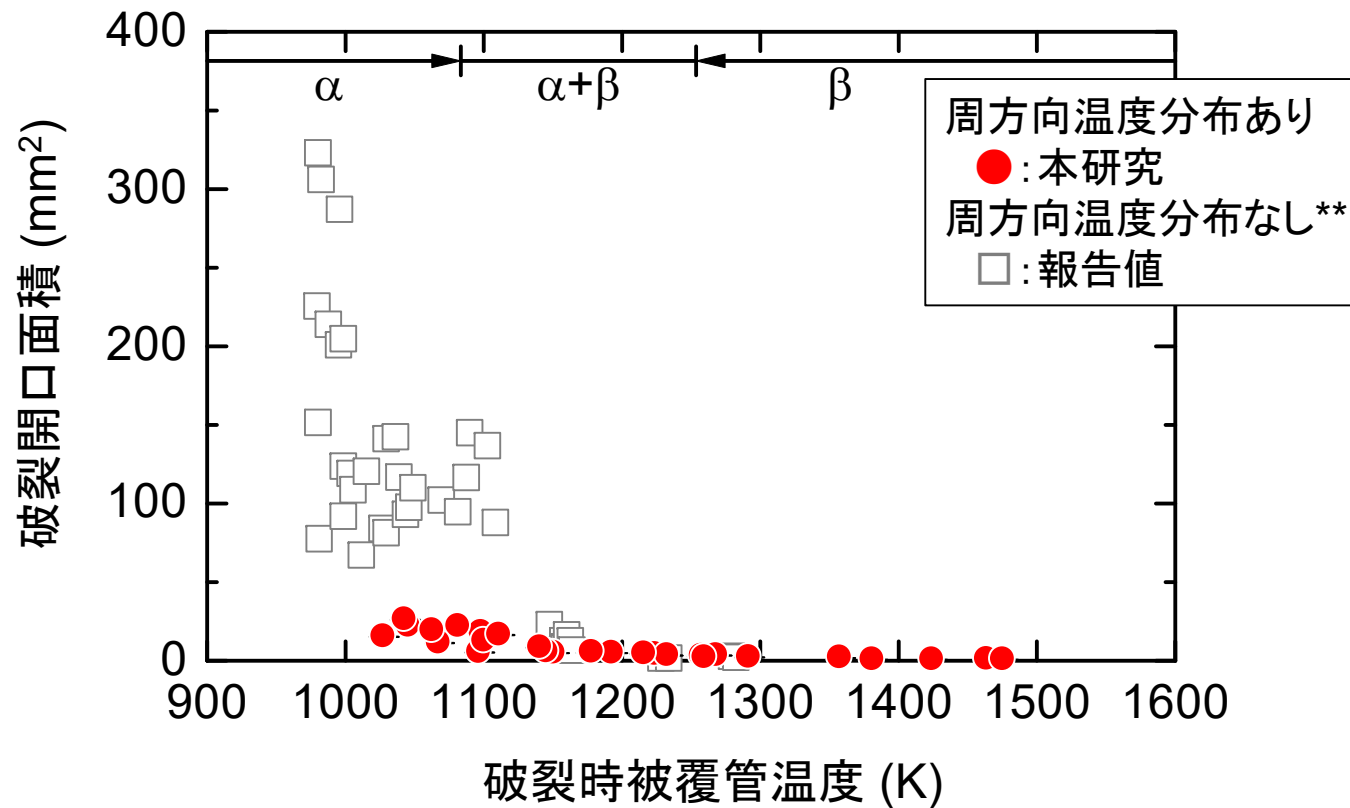
- LOCA模擬破裂試験時の被覆管は周方向に温度分布が生じた状態
- 実機では周方向の温度分布が生じにくい条件も想定される。
 - 本研究により得られた結果から実機条件の被覆管膨れ破裂挙動を予測するためには、周方向の温度分布条件が膨れ破裂挙動に及ぼす影響を評価することが重要



周方向温度差による補正後の最大周方向歪みの 破裂温度依存性(水蒸気雰囲気)*

- 被覆管周方向温度差を考慮して補正したkの絶対値は両条件の間で比較的良く一致
- 被覆管の周方向温度差を考慮したkを利用することで、周方向温度分布を考慮した最大周方向歪みを評価可能

*Narukawa T and Amaya M. JNST, 53:1758-1765 (2016). **KfK-4343 (1988).



- 破裂開口面積について、周方向に温度分布ありの結果は温度分布なしの結果に比べ小さい傾向
 - 試験時の被覆管周方向の温度分布だけでなく、軸方向の温度分布が影響している可能性 → この影響の評価を計画

* Narukawa T and Amaya M. JNST, 53:1758-1765 (2016).

**KfK-4343 (1988).

JAEA LOCA時の燃料被覆管膨れ破裂挙動評価のまとめ ¹¹

- FFRD現象に関し、発生のおきい値、実機での発生の有無、及び発生時に燃料や炉心の安全性に及ぼす影響、等の評価の一環として、LOCA模擬破裂試験を実施

LOCA時の被覆管最大周方向歪みの評価式

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \alpha \times k(T) \times \sigma \\ &= \alpha \times k(T) \times \left(\frac{d}{2t} \right) \Delta P \end{aligned}$$

- ε: 最大周方向歪み
- α: 周方向温度差に基づく補正項
- k: 膨れ破裂直前に被覆管周方向に生じていた公称応力で最大周方向歪みを除した値
- σ: 破裂直前の周方向公称応力
- d: 被覆管内径
- t: 被覆管肉厚
- ΔP: 破裂直前の被覆管内圧
- T: 破裂時被覆管温度

試験時の被覆管の周方向温度分布、被覆管の脆化及び破裂時の相状態を考慮することで、実機のLOCA時に予想される被覆管の最大周方向歪みを評価可能に

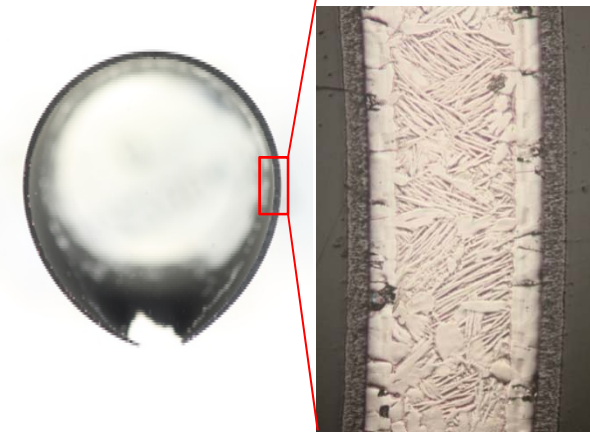
- FFRD現象に関して今後取得すべきデータ及び知見

FFRDで生じる現象	取得すべきデータ及び知見	
	被覆管	ペレット
ペレット細片化	・被覆管膨れに伴う拘束力変化	・燃焼度 ・微細組織変化(出力履歴と関係) ・LOCA時到達温度
燃料棒内ペレット移動	・被覆管膨れ量(最大周方向歪み)	・細片化ペレットサイズ ・軸方向移行割合
燃料棒外ペレット放出	・破裂開口形状	・運転中及びLOCA時のFPガス放出(燃料棒内圧に影響)

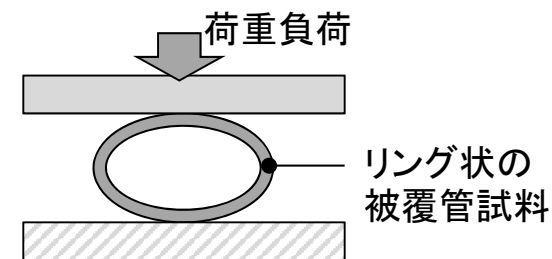
本研究にて取得

高燃焼度燃料を対象とした炉外試験を計画中

- LOCA後の燃料長期冷却中における課題
 - 長期に渡り炉心の冷却可能形状を維持する観点から、LOCA時に膨れ・破裂、内外面酸化及び水素吸収、等を経て局所的に脆化した燃料被覆管が地震等の外力に耐え得るか否かの評価が重要
- 従来手法:リング圧縮試験
 - 高温水蒸気中酸化及び急冷を経たリング状の被覆管試料の強度評価
 - LOCA時に被覆管に形成される膨れ破裂部の強度を評価出来ない。



LOCAを経た被覆管の
水平断面の例

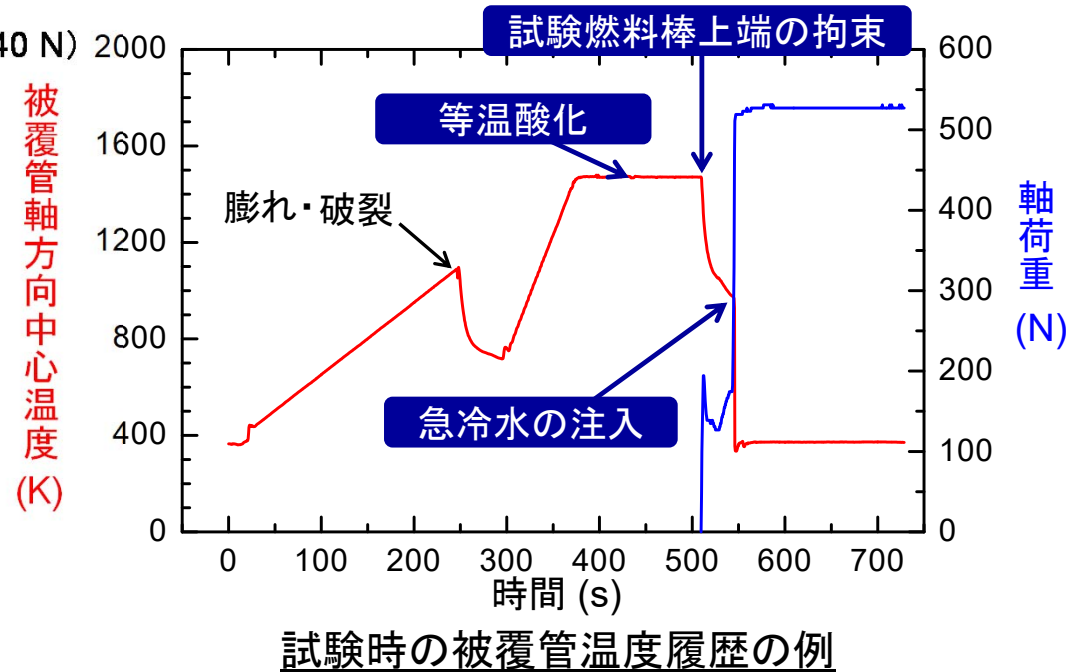
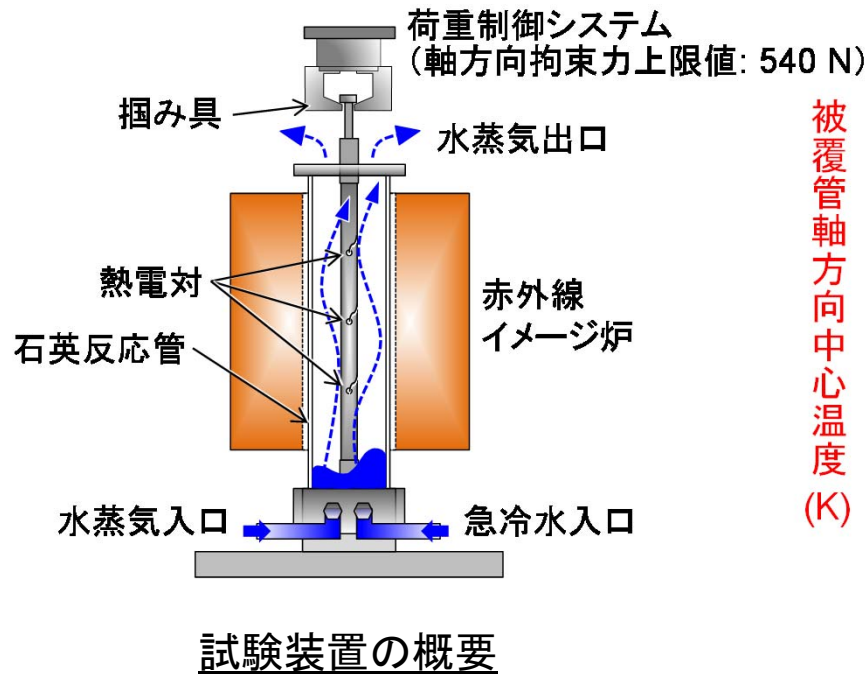


リング圧縮試験の概要

研究の目的

- LOCA後に長期に渡り炉心の冷却可能形状を維持できるか否かを評価するため
 - LOCAを経た被覆管の曲げ強度を評価できる4点曲げ試験手法を開発
 - 非照射Zry-4被覆管及び高燃焼度改良型燃料被覆管のLOCA後の曲げ強度を評価

LOCAを経験した試料の作製： LOCA模擬急冷破断試験の概要



- 等温酸化温度：1273–1573 K
- 目標酸化量：10%–25% ECR*

*等価被覆酸化量：酸化反応でジルカロイ中に吸収された酸素が全て化学量論組成の ZrO_2 を生成すると仮定した場合の被覆管肉厚に対する ZrO_2 に変化した金属割合

- 4点曲げ試験の特徴

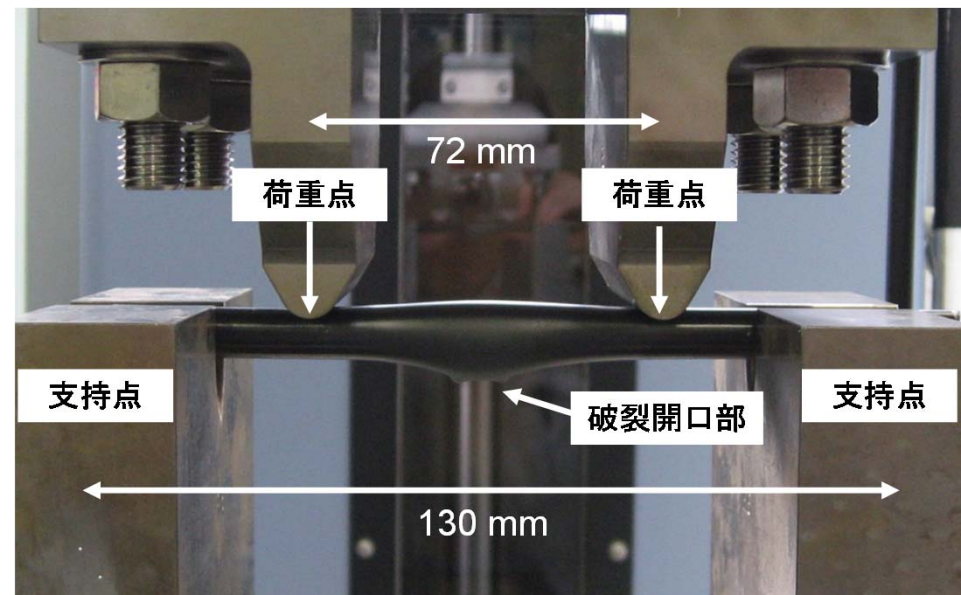
- 被覆管試料の支点間に均一な曲げモーメントを加えることができる
 - 膨れ・破裂、内外面酸化及び水素吸収、等を経て軸方向に異なる機械強度を有するLOCA後の被覆管に対する機械強度評価に適する。
- 有限要素解析による装置及び試料配置の設計
 - 被覆管の破裂開口に対し均一な曲げモーメントを負荷
 - 破裂開口に引張応力が生じる設計(最も厳しい応力条件)

- 試験条件

- 温度: 室温 or 410 K
- 雰囲気: 大気
- ストローク速度: 1 mm/s

- 評価項目

- 最大曲げモーメント
 - 強度の指標
 - 被覆管が破断に至る限界値



試験装置の概要

4点曲げ試験に供した試験燃料棒

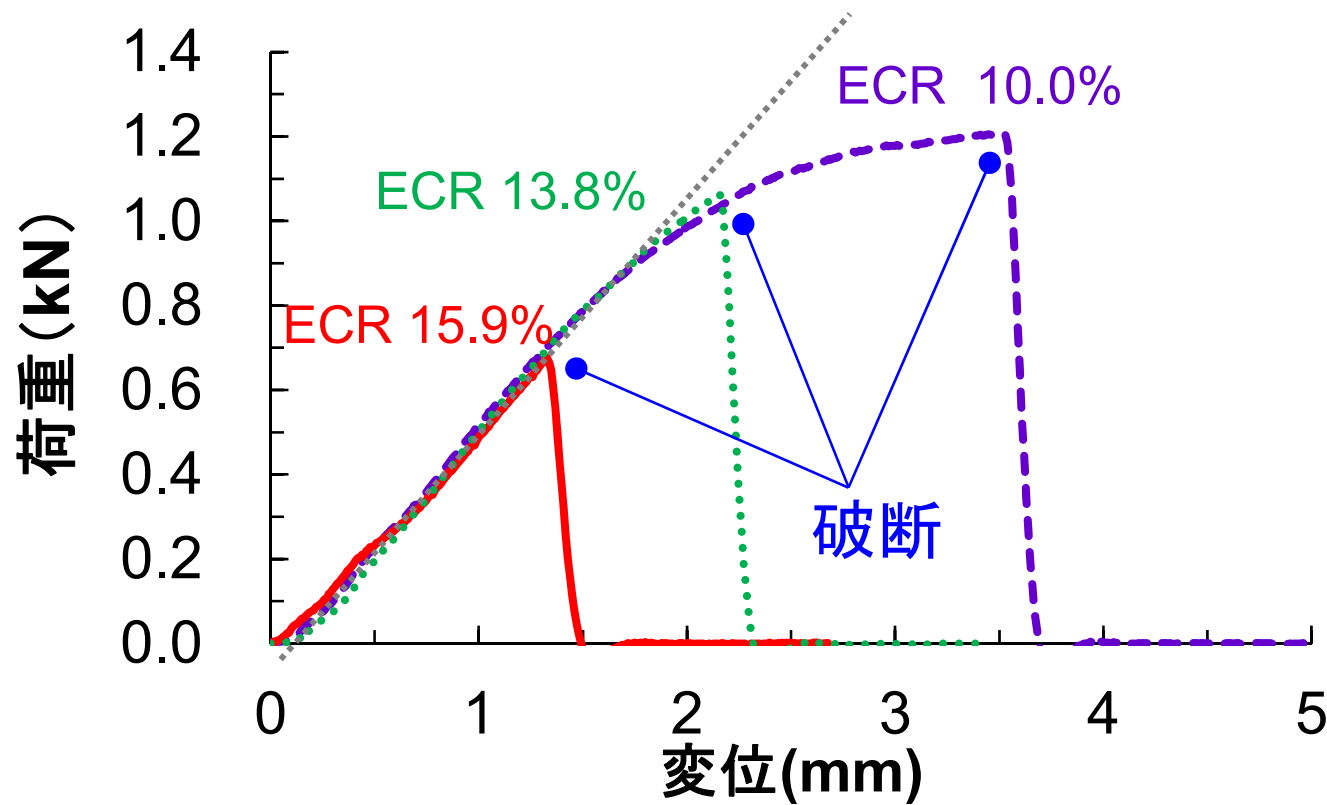
被覆管材料	試料 燃焼度 (GWd/t)	照射材を模擬し 予め添加した 水素濃度 (wppm)	急冷破断試験結果			
			酸化温度 (K)	酸化量 (%ECR)	急冷時 荷重 (N)	破断/ 非破断
Zry-4	非照射	0-800	1273-1573	5-25	非拘束	非破断

被覆管材料	試料 燃焼度 (GWd/t)	腐食酸化膜 厚さ(μm)	照射中に 吸収された 水素濃度 (wppm)	急冷破断試験結果			
				酸化温度 (K)	酸化量 (%ECR)	急冷時 荷重 (N)	破断/ 非破断
低スズ ZIRLO ^{*,**}	80	18	144	1474	21	529	非破断

*Amaya M et al. Proc. WRFPM 2017 (2017).

**平成27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)事業に関する報告書.

荷重－変位曲線と試験後試料外観* (非照射Zry-4)



- ECR>約15%:弾性領域で破断
- 破裂開口位置において破断



ECR: 22%
周方向歪み: 61%

*Yamato M et al. JNST, 51: 1125-1132 (2014).

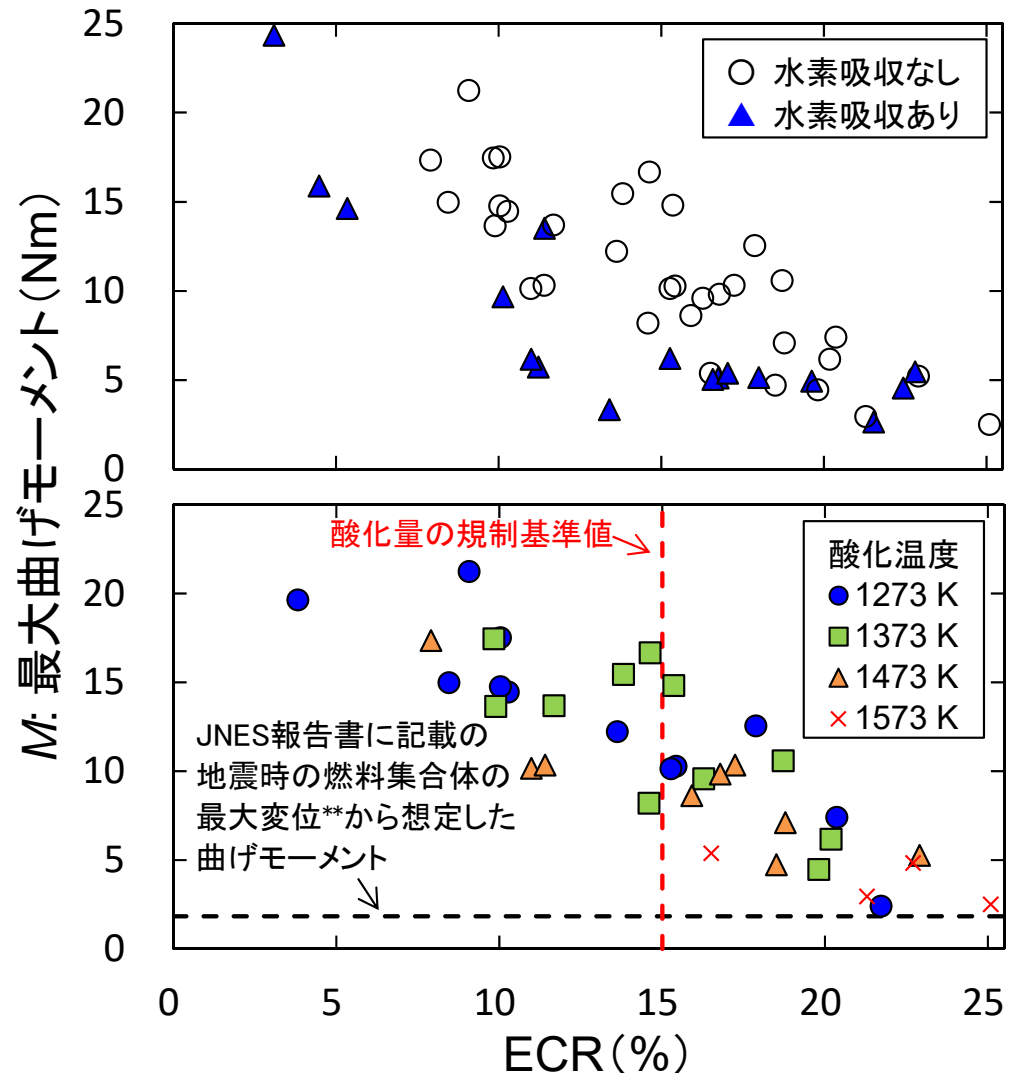
$$M = \frac{P}{2} a$$

M: 最大曲げモーメント

P: 最大荷重

a: 支点-荷重点間距離

- 最大曲げモーメントは水素吸収及び酸化量の増加に伴い低下
- 地震時の燃料集合体の最大変位**から想定した曲げモーメントが負荷される場合も、酸化条件が酸化温度1300℃、酸化量25%ECRの範囲内であれば被覆管は破断しないと考えられる。
 - DBAとしてのLOCAに関する規制基準を満たす酸化温度及び酸化量の範囲内(1200℃、15%ECR)であれば、被覆管は破断しないと考えられる。



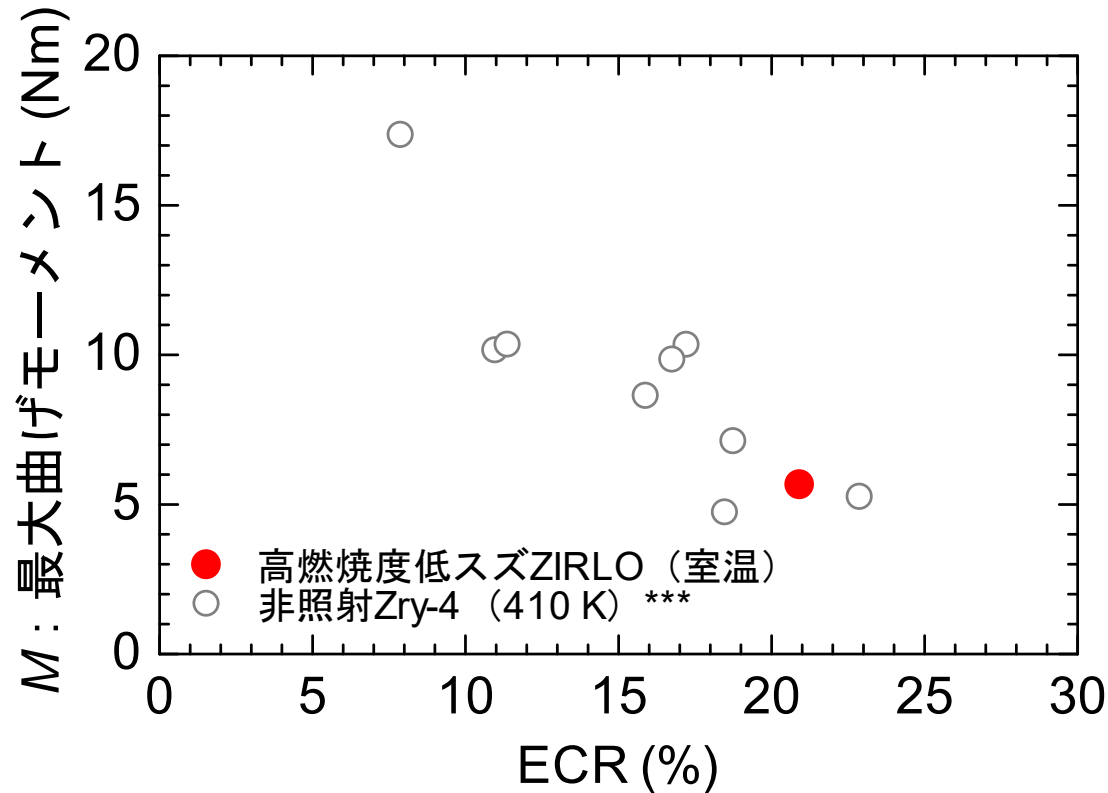
最大曲げモーメント(M)とECRの関係

(試験温度: 410 K)

*Yamato M et al. JNST, 51: 1125-1132 (2014).

** (独)原子力安全基盤機構、06 基情報-0001 (2006).

高燃焼度低スズZIRLOの最大曲げモーメント^{*,**} (等温酸化温度: ~1473 K)



- 高燃焼度低スズZIRLO被覆管の最大曲げモーメントは非照射Zry-4被覆管とほぼ同等
- 燃焼度(80 GWd/tまで)や合金元素の違いがLOCA後の曲げ強度に及ぼす影響は顕著でないと考えられる。

*Amaya M et al. Proc. WRFPM 2017 (2017).

**平成27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)事業に関する報告書。

***Yamato M et al. JNST, 51: 1125-1132 (2014).

LOCA後の燃料被覆管の曲げ強度評価のまとめ

- LOCA後に長期に渡り炉心の冷却可能形状を維持できるか否かを評価するため
 - LOCAを経た被覆管の曲げ強度を評価できる4点曲げ試験手法を開発
 - 非照射Zry-4被覆管及び高燃焼度低スズZIRLO被覆管のLOCA後の曲げ強度を評価

得られた知見

- 地震時の燃料集合体の最大変位*から想定した曲げモーメントが負荷される場合も、DBAとしてのLOCA条件(1200°C、15%ECR)を超える酸化条件(1300°C、25%ECR)の範囲内であれば被覆管は破断しないと考えられる。
- 燃焼度(80 GWd/tまで)や合金元素の違いがLOCA後の曲げ強度に及ぼす影響は顕著でないと考えられる。

*(独)原子力安全基盤機構、06 基情報-0001 (2006).

- LOCA時のFFRD
 - 燃料棒内での燃料ペレットの拘束及び集積状態に影響を及ぼす被覆管最大周方向歪みの評価式を提案
 - 破裂開口面積の評価及び影響を及ぼす因子の把握
- LOCA後長期冷却中の地震等により発生する外力に対する燃料形状維持
 - 長期冷却中に作用する可能性が最も高いと考えられる「曲げ」に対して、LOCA後の燃料棒が有する強度を評価し、LOCA後の長期冷却中の燃料棒破断発生の有無を評価

今後の展望

- 高燃焼度燃料を対象としたLOCA模擬試験によるLOCA時の燃料棒内外の燃料ペレット挙動の把握、並びにペレット細片化の原因及び発生しきい値の明確化
 - FFRD発生に関する判断基準の評価検討
- DBAを超える条件を含め、LOCA時及びLOCA後の燃料破断の発生確率の評価
 - 燃料破断発生に係る判断基準の評価検討、及び炉心損傷確率評価等への反映
- 本研究により得られる実験データ及び知見を当研究グループの燃料挙動解析コードへ反映
 - 実機条件における事故時燃料挙動の評価、ないし判断基準への反映