



Japan Atomic Energy Agency

未来へげんき  
To the Future / JAEA

令和3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Grの研究概要

令和3年11月2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

本研究(の一部)は平成27年度～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年度同委託費(燃料設計審査分野の規制研究)事業、並びに平成31年度及び令和2年度同委託費(燃料破損に関する規制高度化研究)事業の成果である。

# 燃料安全研究の全体像

原子炉の安全性を評価する上で必要かつ重要な、事故時 (RIA/LOCA)等における燃料挙動に関して実験的研究の実施と共に解析評価手法の整備及び高度化を推進

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NSRRを用いた照射試験      各種試験装置による事故模擬試験

知見の集約      ↓      モデル化

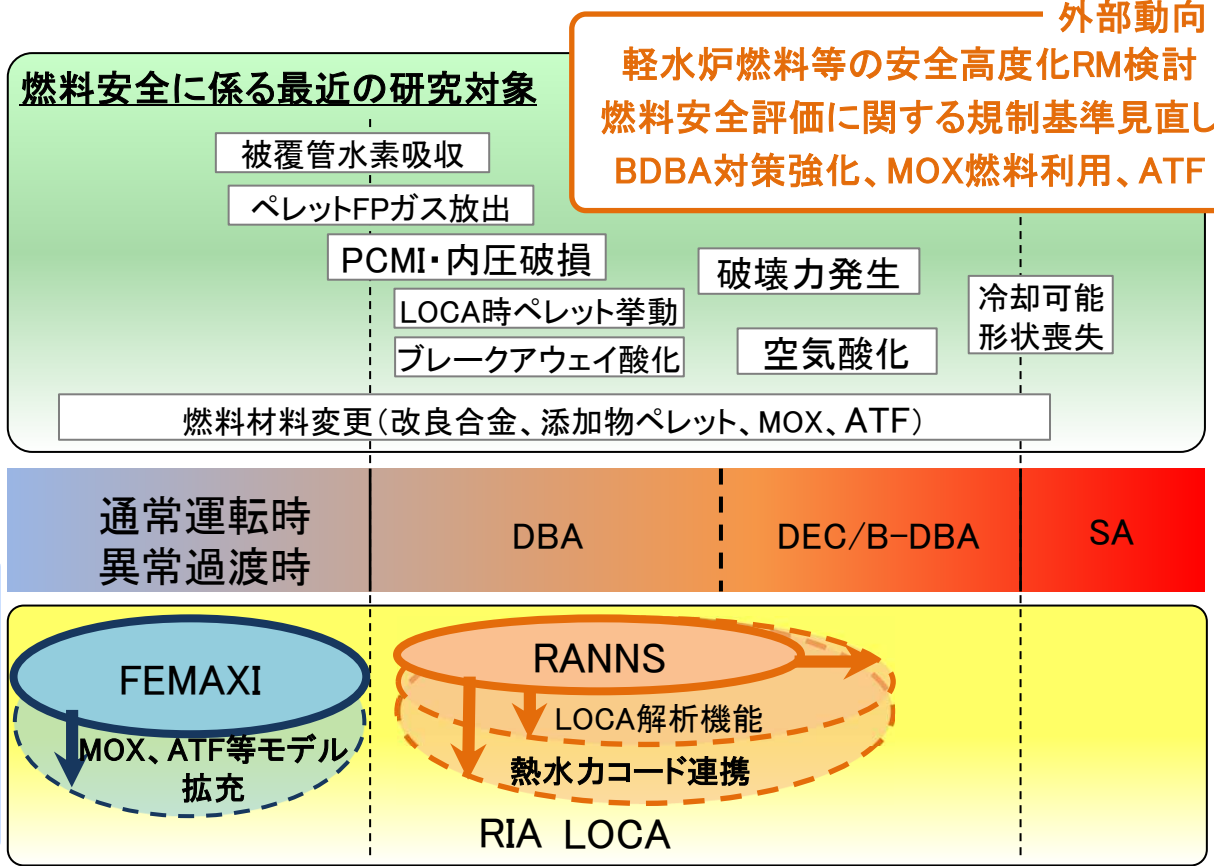
燃料挙動解析コードへの反映を進めその性能を向上(交付金予算を主)

- ・燃料挙動モデルの構築
- ・国産燃料挙動解析コードの開発及び検証

これら条件下における燃料の安全性を評価可能にする

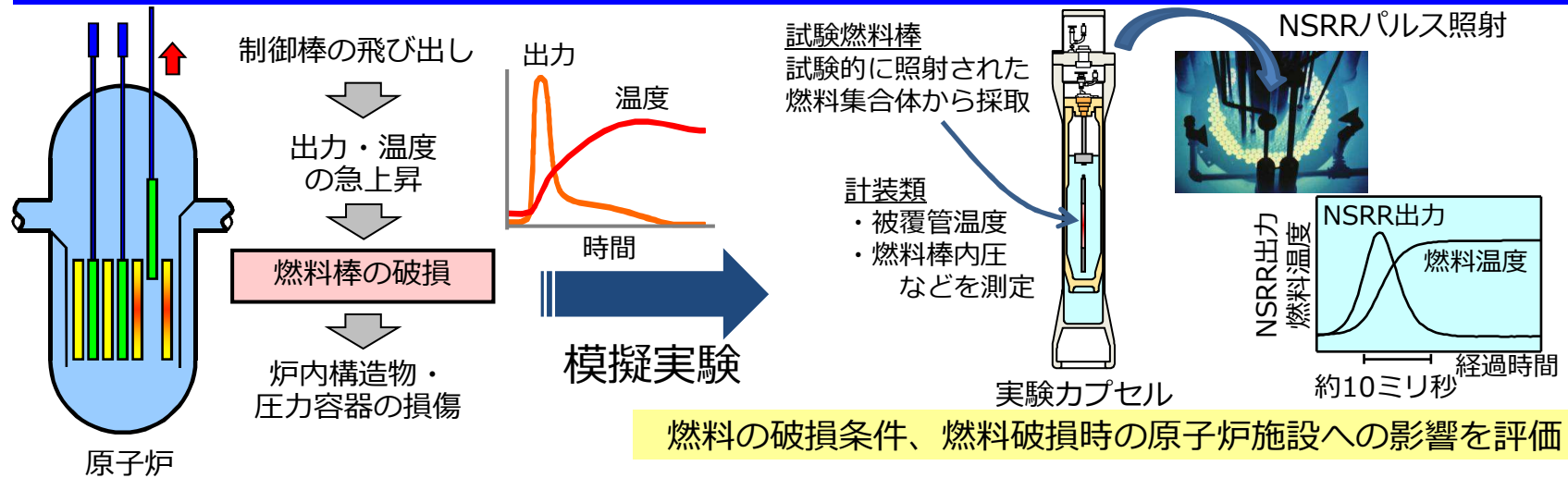
実験的研究

コード開発



軽水炉燃料に係る国の規制を技術的に支援

# 反応度事故 (RIA) 時の燃料挙動



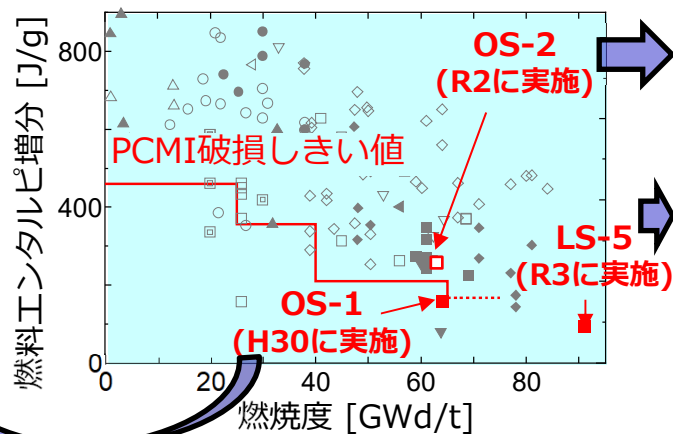
## 最近の取り組み：添加物入りBWR燃料で生じた破損限界低下の原因究明

添加物入り (ADOPT™) BWR燃料を供したOS-1実験で、**破損限界が現行破損しきい値を下回った**<sup>[1]</sup>

燃料被覆管微細観察



径方向に配向した水素化物の比率が高い傾向を確認



- ・ 同一照射条件を経験した無添加燃料を供した比較RIA試験により、ADOPT™燃料ペレットの破損挙動への影響を確認<sup>[2]</sup>
  - ・ 燃焼が進んだ無添加燃料を供した比較RIA試験により、水素化物配向特性の破損挙動への影響を確認<sup>[3]</sup>
- 等を、原因究明に向け実施

- ・ ADOPT™燃料ペレットのRIA試験時/後状態を調べ、被覆管への駆動力としてペレットが破損挙動に与えた影響を調査等を、計画

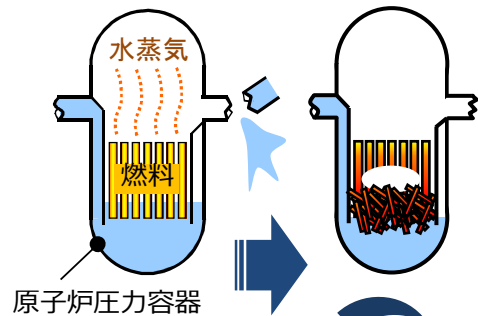
【参考文献】 [1] Mihara T et al., Proc. TopFuel 2019, USA, 544-550. [2] Mihara T et al., Proc. TopFuel 2021, Spain.

[3] 三原ら、日本原子力学会2021年秋の大会予稿集、2D01-04

# 冷却材喪失事故 (LOCA) 時の燃料挙動

## LOCA時のプラント状態と炉心冷却性

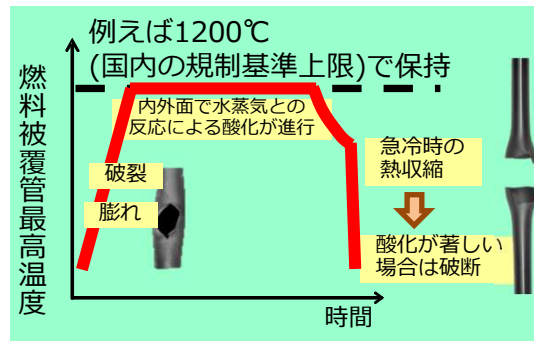
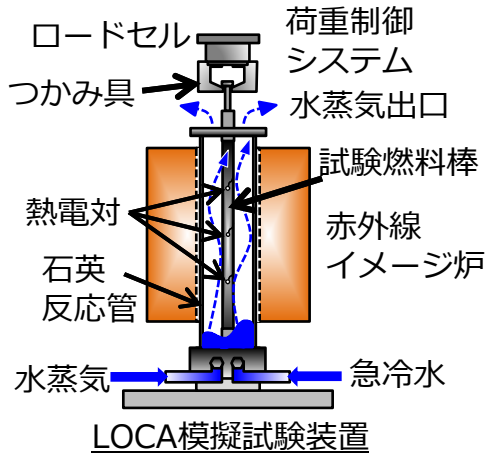
現行基準策定時に考慮されていなかった高燃焼度化や材質変更等が、燃料被覆管の破断限界に及ぼす影響を評価する必要がある。



冷却材の喪失  
 ↓  
 著しい酸化による被覆管の脆化  
 ↓  
 非常用炉心冷却系による注水  
 ↓  
**燃料棒の破断**  
 ↓  
 冷却可能形状の喪失

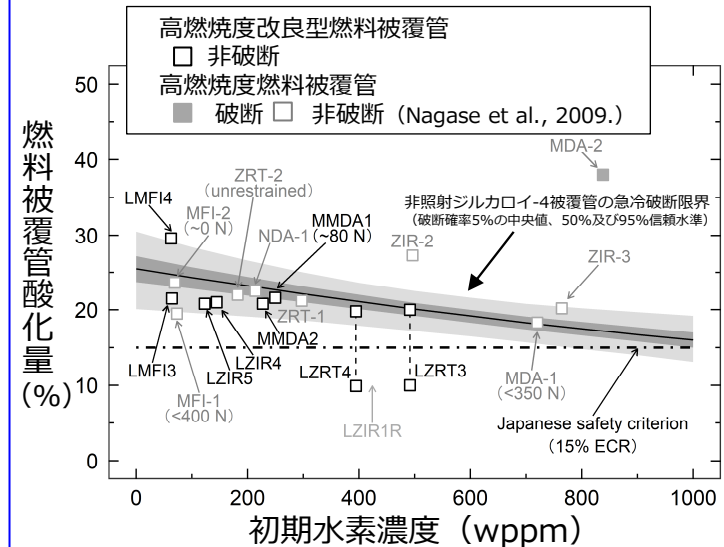
## 模擬実験

## LOCA模擬試験の概要



LOCA模擬試験時の燃料被覆管温度履歴と燃料挙動

## 最近の取り組み： 高燃焼度改良型燃料被覆管の急冷破断限界の評価



酸化量と初期水素濃度に関する破断マップ\*  
 (等温酸化温度: 1473 K、軸方向荷重の上限値: 540 N)

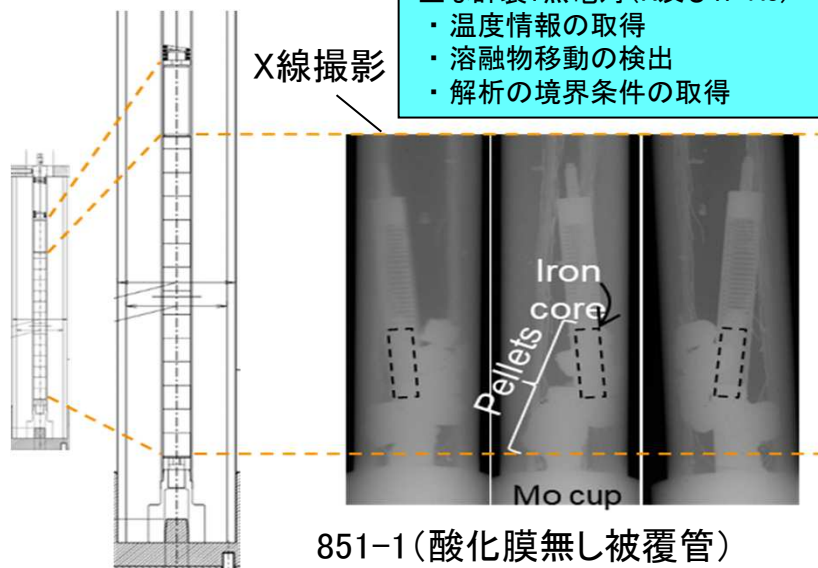
急冷破断限界は通常運転中の水素吸収量の増大に伴い若干低下するものの、燃焼の進展 (最高85 GWd/tU) や合金組成の変更によって著しく低下しないことを明らかにした。

## LOCA時の炉心の冷却可能な形状の維持に必要な条件を把握

\*Narukawa T. and Amaya M., JNST, 57(7), 68-78 (2020).

# 設計基準を超える事故時の燃料挙動

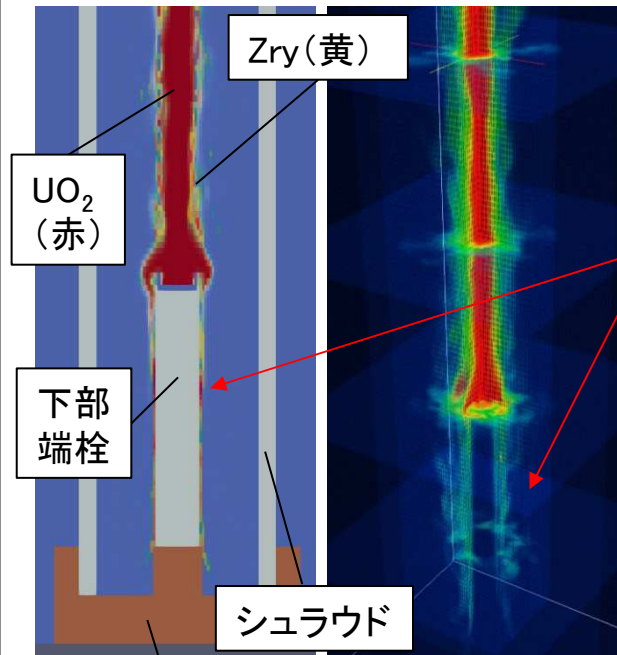
- ・ BDBA～SA初期を念頭に、炉心の冷却不全を原因とする燃料破損／溶融崩落挙動に関するデータ、知見を取得することが目的。
- ・ NSRRを用いた照射試験により、燃料棒周囲の雰囲気条件、被覆管外表面腐食の有無、等が燃料破損／溶融崩落挙動に及ぼす影響を調査。これまでに到達温度、被覆管条件(高温酸化膜有無)を変更して実験を実施し、破損、溶融、崩落の変化を調査



NSRRの台形パルス運転を用いた  
溶融進展予備実験結果例

主な計装: 熱電対(K及びW-Re)  
 ・ 温度情報の取得  
 ・ 溶融物移動の検出  
 ・ 解析の境界条件の取得

詳細解析によりマクロな崩落挙動と局所的な燃料/被覆管状態の対応を把握



モリブデンカップ 温度分布

燃料棒周囲の雰囲気へ伝熱、対流が発生。

UO<sub>2</sub>とZryが溶融して、下部端栓を伝ってMo cupに流れ落ちている。

酸化膜成長や輻射などの条件やメッシュ分割を精緻にした解析を実施予定。

詳細熱流動解析コードJUPITER\*\*を用いたモデリング:  
予備解析結果(左:2D、右:3D)

- ・ 被覆管融点付近で起こる、UO<sub>2</sub>とZrの化学的相互作用(溶融ZryへのUの拡散)をモデル化し、検証解析を行う予定。PIEで取得したペレットの減径量や溶融物の堆積具合と比較しモデルの妥当性を確認する。

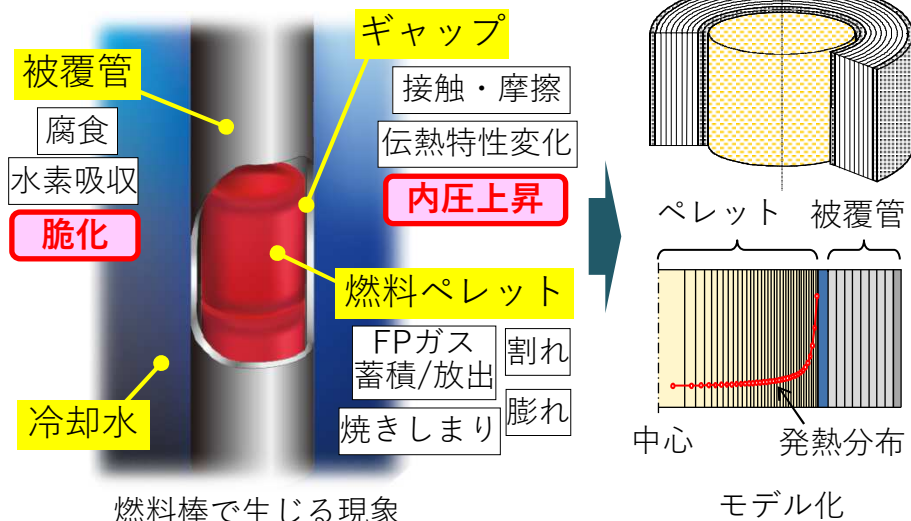
\*\*Yamashita S. et al., Mechanical Engineering Journal, 4(3), 16-00567\_1-16-00567\_13 (2017).

# 燃料挙動解析コード開発

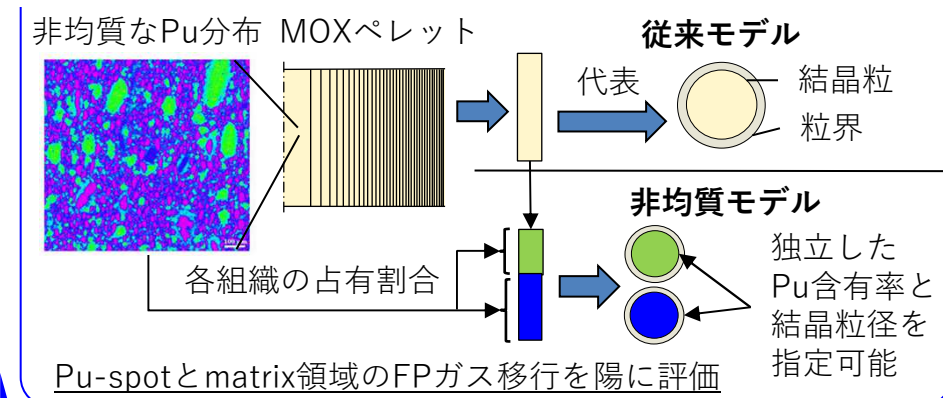
燃料挙動解析コード：原子炉内の核燃料の複雑な挙動を評価可能な唯一の技術的手段

## FEMAXI-8コード

バージョンIV以降JAEAが開発/改良を継続



## 燃料微細組織の非均質性を考慮したFPガス放出モデル

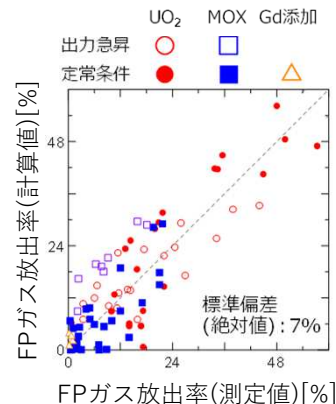
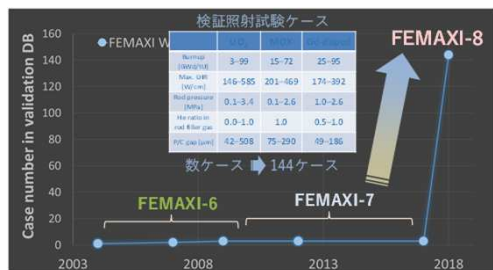


開発/改良版を逐次公開、産/官/学へ提供

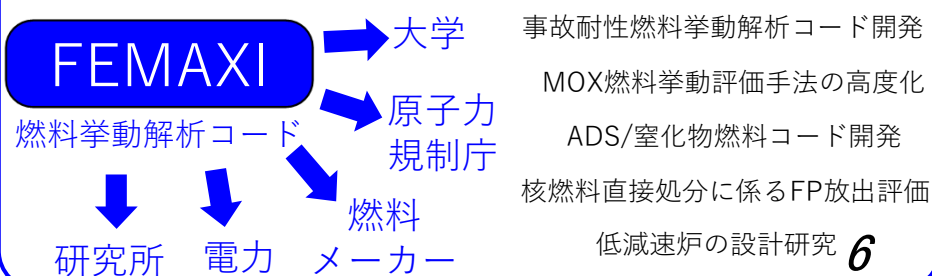
- 燃料挙動の予測、健全性評価
- 実験データの実機条件への変換
- 実験で直接計測出来ない物理量の推定
- 現象における支配的因子の抽出

## 燃料照射試験データによる大規模検証

検証規模拡大 (>従来比20倍)、軽水炉の設計を十分カバーする条件範囲 (<90GWd/t, <60kW/m)



JAEAによる開発/公開 >>>> 様々な研究開発用途で活用





Japan Atomic Energy Agency



令和3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

# ナノインデンテーション法を用いた燃料被覆管の 機械特性評価

令和3年11月2日

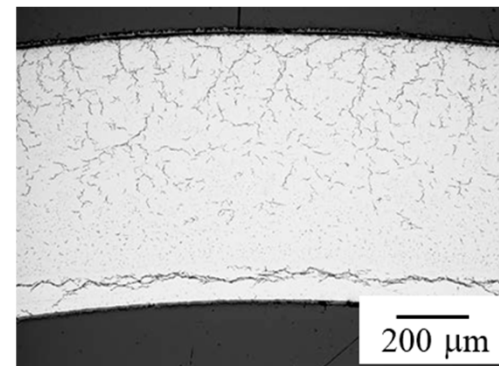
国立研究開発法人日本原子力研究開発機構  
安全研究・防災支援部門 安全研究センター  
燃料安全研究グループ

原子力規制庁長官官房技術基盤グループ

本研究は原子力規制庁及びJAEAの共同研究により行われたものである。

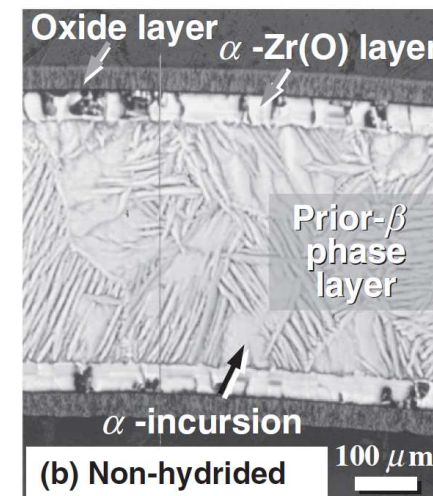
# はじめに

- Zr合金燃料被覆管の機械特性は、通常運転時の水側腐食に伴う水素吸収や冷却材喪失事故(LOCA)時の高温酸化によって金属部に水素化物や酸素固溶相等が析出することで劣化(脆化)する。
- 通常運転時の燃料健全性や事故時の燃料挙動を評価するためには微細組織が機械特性に与える影響を把握することが重要である。
- 本研究では被覆管中の微細組織の機械特性をナノインデンテーション法により直接測定する手法について検討している。
- 本ショートプレゼンテーションでは、室温、高温試験結果の一例及び今後の予定について紹介する。



水素化物が析出した被覆管の金相写真例

出典: A. Yamauchi and K. Ogata, J. Nucl. Sci. Technol. 2020; 57: 301-311



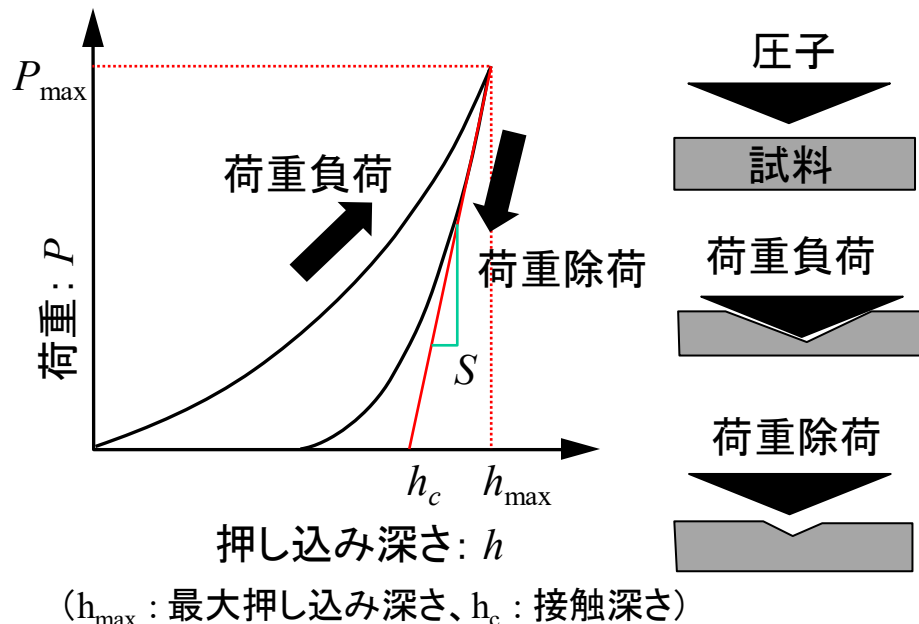
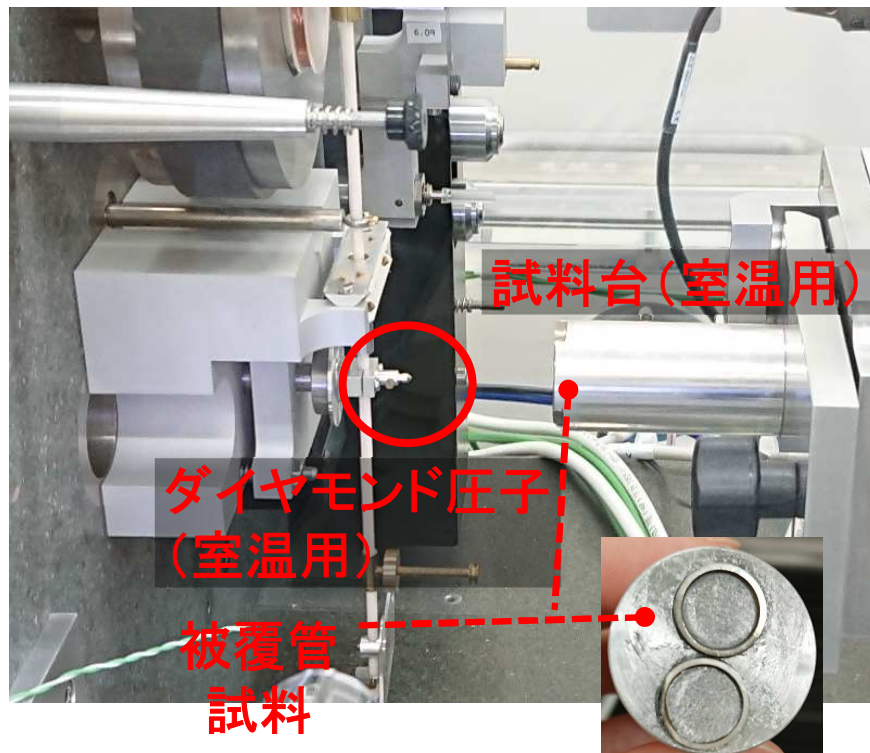
LOCA急冷後の被覆管の金相写真例

出典: F. Nagase and T. Fuketa, J. Nucl. Sci. Technol. 2004; 41:723-730



# ナノインデンテーション法について

- 試験装置: Micro Materials社製



硬さ :  $H = \frac{P_{max}}{A}$

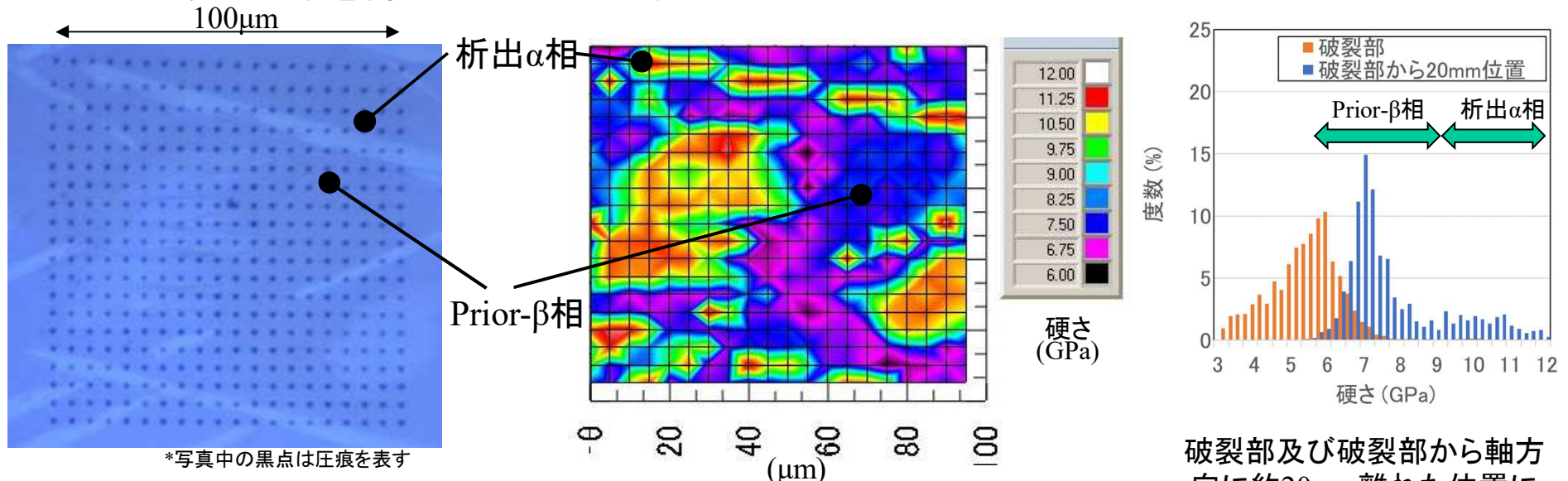
ヤング率 :  $E = \frac{1 - \nu_s^2}{\frac{2\sqrt{A}}{S\sqrt{\pi}} - \frac{1 - \nu_i^2}{E_i}}$

$A$ : 圧痕の投影面積  
 $\nu_s, \nu_i$ : 試料、圧子のポアソン比  
 $E_i$ : 圧子のヤング率

- ✓ 荷重-押し込み深さ曲線より、硬さやヤング率を評価
- ✓ 専用の圧子及び試料台を用いることで高温測定が可能 (~750°C)

# 測定結果の一例(室温)

- LOCA模擬試験後試料を用いた室温測定
  - ✓ 昇温破裂後に水蒸気雰囲気中、1200°Cで酸化量約20%まで高温酸化し、700°Cまで徐冷後に急冷したジルカロイ-4被覆管試料
  - ✓ 破裂部及び破裂部から軸方向に約20mm離れた位置における残存金属層中の硬さ分布を荷重10mNにて測定



\*写真中の黒点は圧痕を表す

破裂部から軸方向に約20mmの位置における顕微鏡写真(左)及び硬さ分布のコンター図(右)

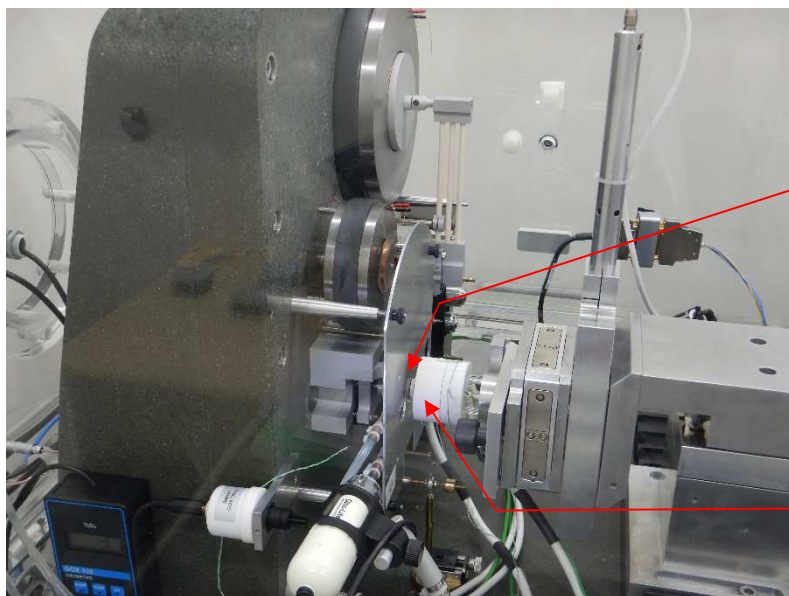
破裂部及び破裂部から軸方向に約20mm離れた位置における硬さ分布

- 破裂部と比較して、破裂部から軸方向に約20mm離れた位置の硬さは高く、prior-β相と析出α相の硬さ分布の差異も顕著であった。

⇒ 約20mm離れた位置では二次水素吸収が生じており、prior-β相中の水素濃度増加等に起因していると考えられた。

# 測定結果の一例(高温)

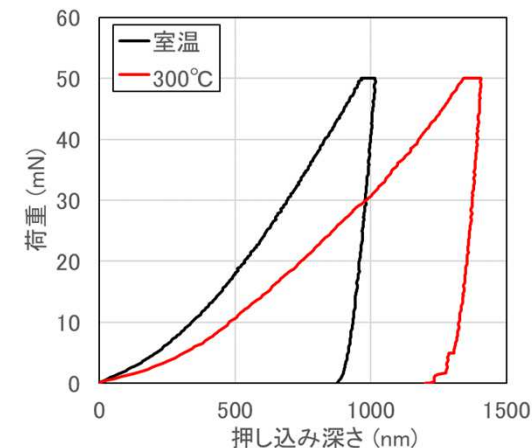
- ジルカロイ-4被覆管を用いた高温測定
  - ✓ 高温用圧子部及び試料部の両方を加熱
  - ✓ アルゴン雰囲気にて高温測定(荷重50mN)
  - ✓ これまでに測定条件(試料固定方法、温度出力条件、圧子押し込み条件等)を検討



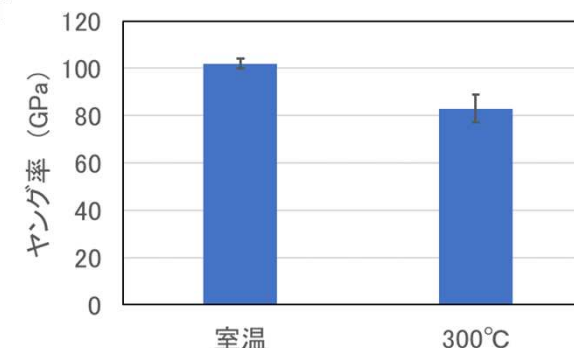
ヒータ付き高温圧子  
(BN:窒化ホウ素)



ヒータ付き試料台  
(セメントで固定)



室温及び300°Cにおける押し込み深さの比較



室温及び300°Cにおけるヤング率の比較

- 良好な荷重-押し込み曲線が得られ、高温時のヤング率はバルクの機械試験(文献値)と比較して同等であることを確認

# まとめ

---

通常運転時及び事故時におけるZr合金燃料被覆管の機械特性の劣化(脆化)を把握するためにナノインデンテーション法を用いた評価検討を進めている。

- これまでに得られた知見

- ✓ LOCAクエンチ試料に適用して、破裂部及び破裂部から20mm離れた位置において硬さの違いが認められた。これは、二次水素化を反映した結果と考えられる。
- ✓ 高温試験の測定条件を検討し、バルクの機械試験と同等なヤング率を取得できることを確認した。

- 今後の予定

- ✓ 水素吸収材に適用して、室温から高温までの水素化物相及び水素固溶領域の特性データを取得する。
- ✓ Zr合金燃料被覆管の機械特性の劣化(脆化)に及ぼす微細組織の影響を評価する。