



Japan Atomic Energy Agency

反応度事故時の 燃料被覆管破損メカニズムに関する研究

— 二軸荷重負荷条件及び水素化物析出形態の影響 —

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

三原 武

令和元年度 安全研究センター報告会

令和元年11月26日

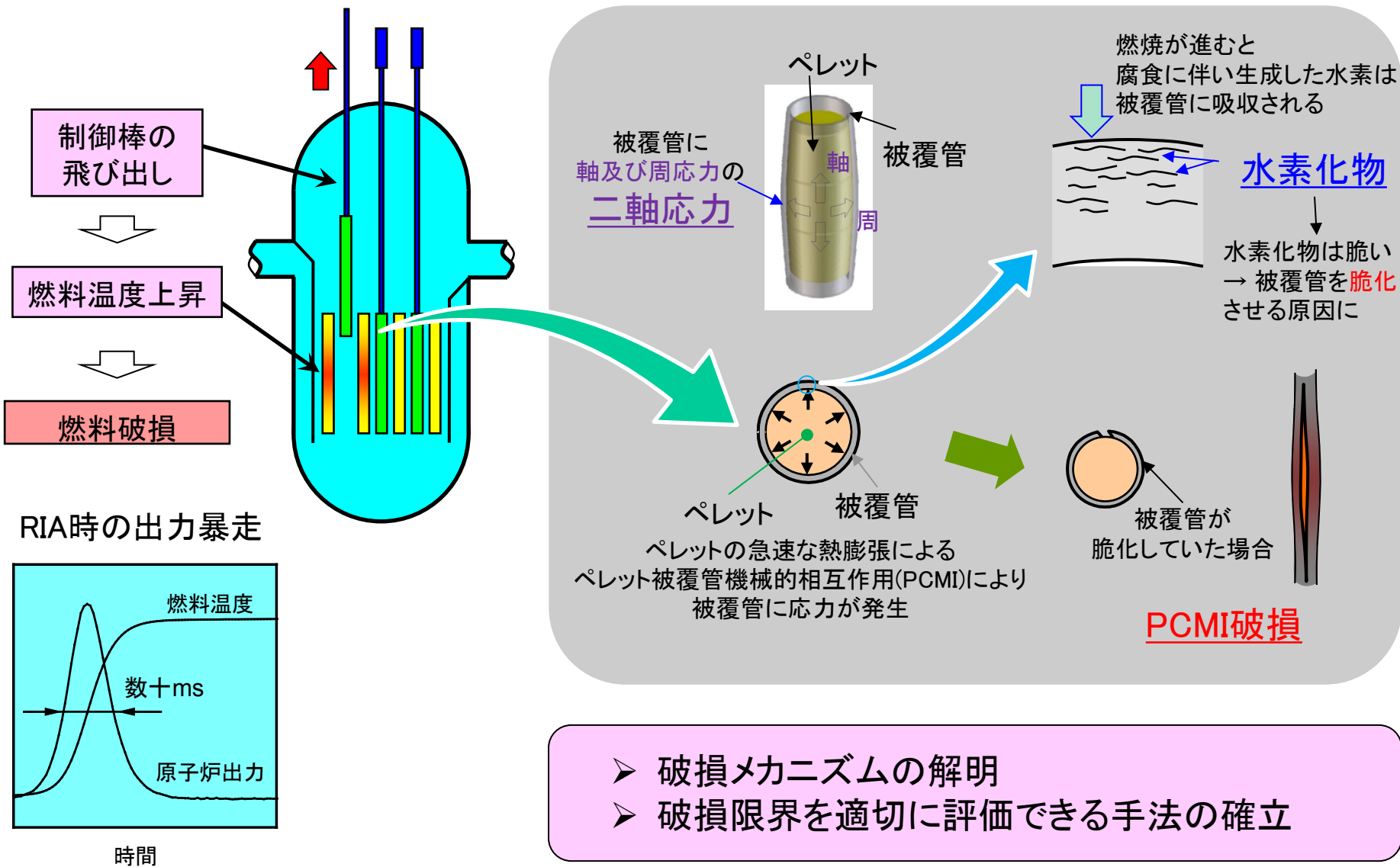
富士ソフト アキバプラザ

本研究における二軸荷重負荷試験は原子力規制庁の平成27、28、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)事業及び平成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)事業として行われたものである。

発表内容

1. 反応度事故(RIA)時の燃料挙動
2. 被覆管に着目した高燃焼度燃料の破損メカニズムに関する研究
 - 2.1 PWR燃料被覆管について
 - 2.2 BWR燃料被覆管について
3. まとめ及び今後の研究

反応度事故 (RIA) 時の燃料挙動



- 破損メカニズムの解明
- 破損限界を適切に評価できる手法の確立

本研究の目的

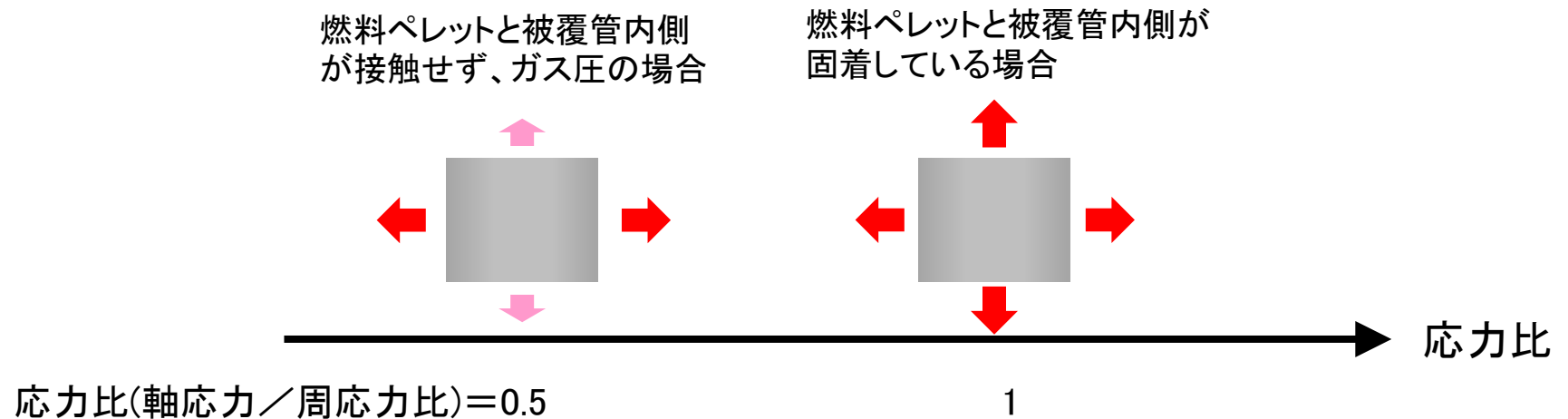
- 研究炉NSRRを用いたRIA模擬実験により、高燃焼度燃料のRIA時の挙動や破損限界を調べてきた
- このRIA模擬実験では、脆い水素化物が析出した被覆管に二軸負荷が作用した状態で燃料破損が発生する



- メカニズムに基づく燃料破損限界のモデル化に向け、複雑な要因が絡み合っている破損現象から以下の影響を分離して評価する
 - 燃料被覆管の応力状態(二軸応力条件)
 - 燃料被覆管の脆化(水素化物析出)

PCMI破損に影響する因子: 二軸応力

- RIA時の燃料被覆管には二軸負荷が作用
 → (軸応力/周応力)の比0.5~1の二軸応力が被覆管に発生。



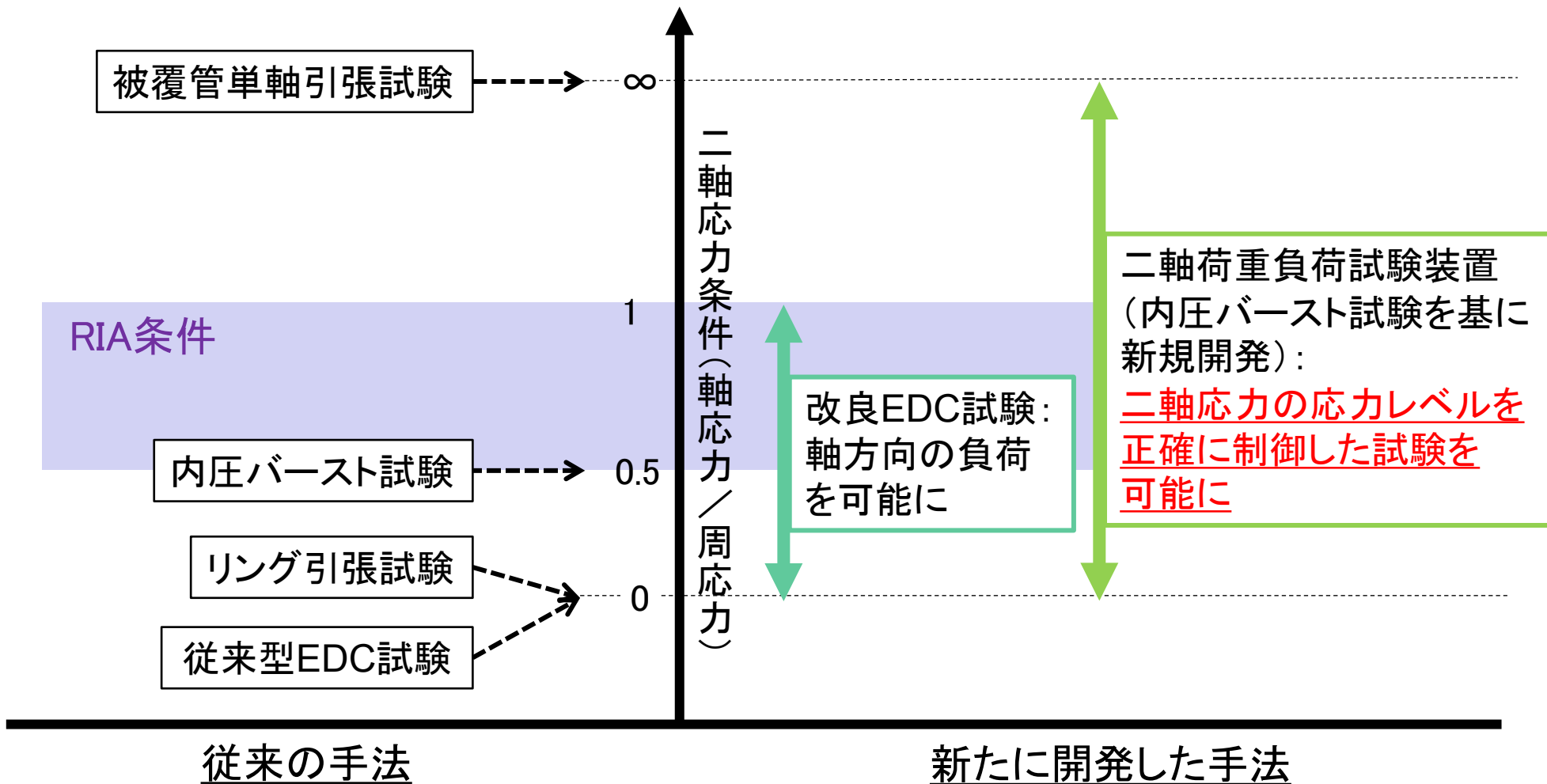
この範囲の応力比で、管状の試料を用いた被覆管機械特性データの報告例無し



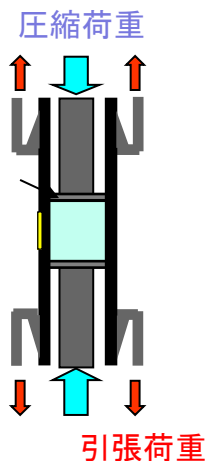
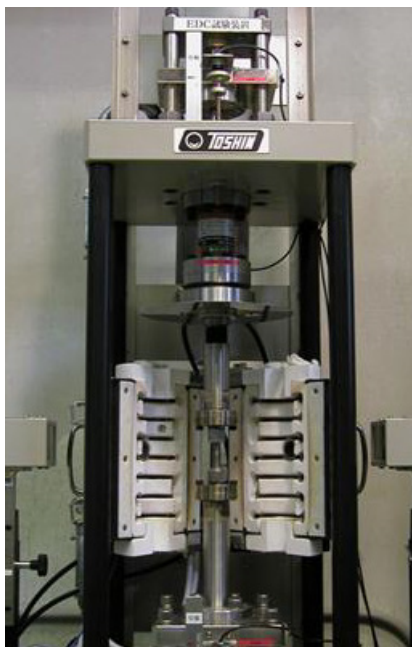
- 二軸応力の影響を把握するには、応力レベルを正確にコントロールできる条件下で被覆管を破損させる試験が必要
- モデル化に必要なデータを系統的に取得するためには、炉外試験が有利

燃料被覆管を対象とした機械特性試験手法の比較

必須条件：管状試料を対象とした試験を行えること



本研究のために開発した機械特性試験装置

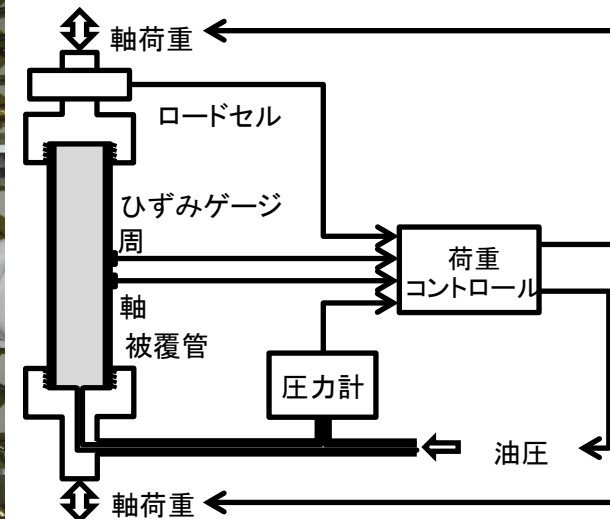


改良EDC試験装置

- テフロンペレットの圧縮に軸引張装置を追加し、二軸応力条件達成
- 与えられる変位が小さいため脆化させた試料を対象



破損時周方向歪みの取得



二軸荷重負荷試験装置

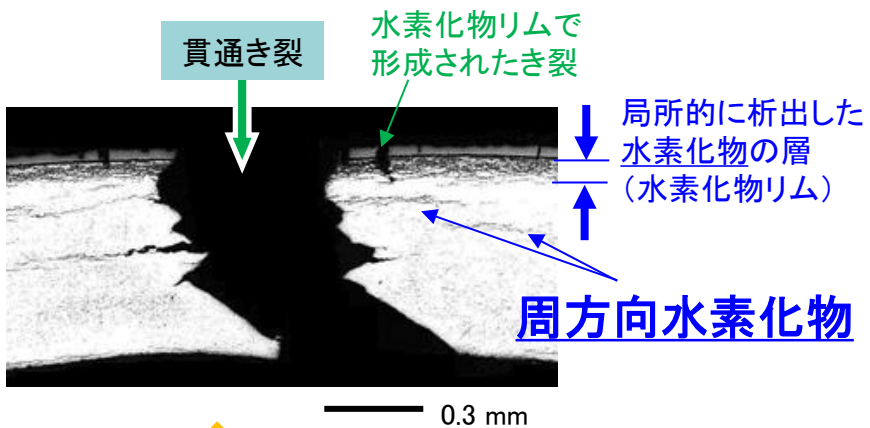
- 内圧バースト試験条件に軸荷重制御を追加した装置を開発
- 応力比制御追加
- 大きな応力、歪み



計算解析に必要な機械特性値の取得

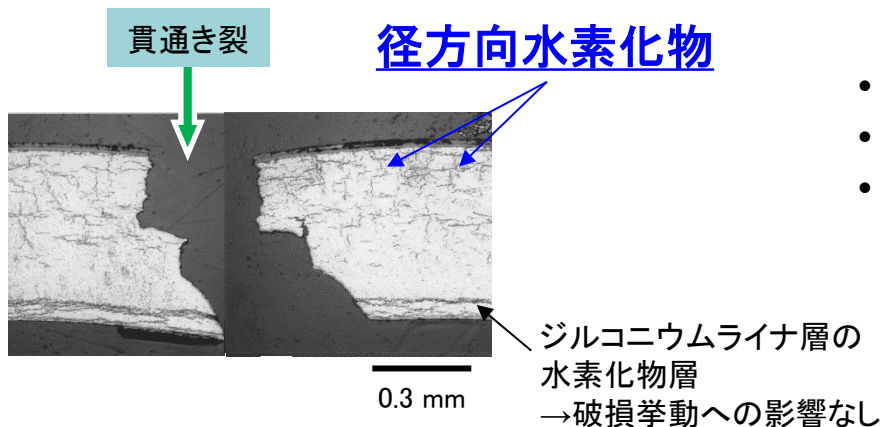
PCMI破損に影響する因子: 水素化物

PCMI破損した高燃焼度PWR燃料被覆管

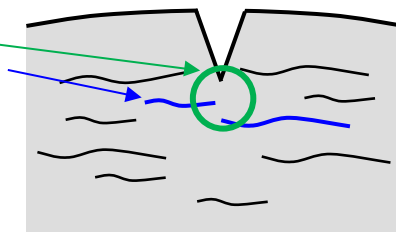


水素化物析出形態が異なる

PCMI破損した高燃焼度BWR燃料被覆管



- 水素化物リムで形成されるき裂がこの破損の主要因
→先端で応力集中し、き裂進展
- 水素化物リムより内側の金属部に析出した周方向水素化物もき裂の進展挙動に影響すると考えられるものの現在までに評価例なし



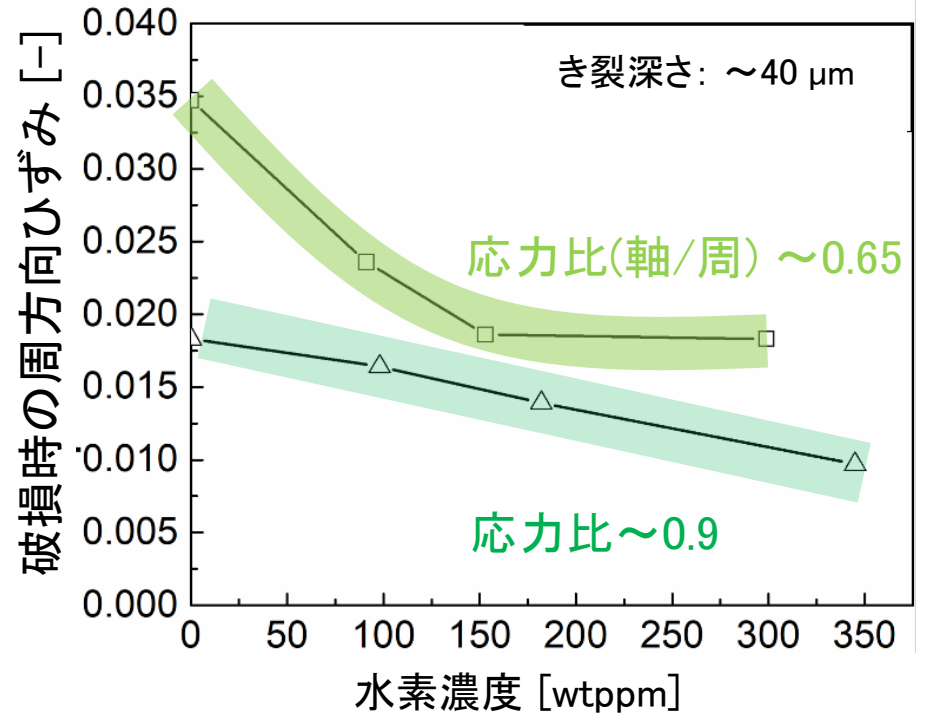
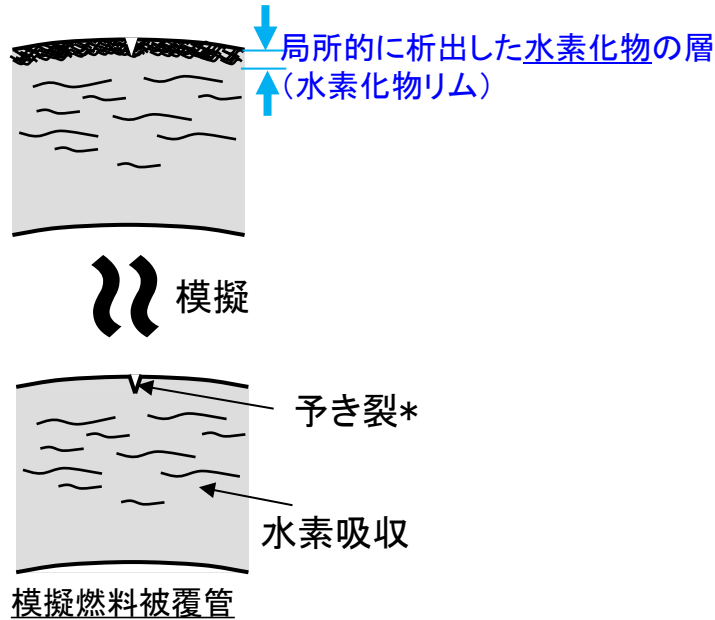
リム内側に析出した水素化物がき裂進展に影響を与えるか？

- 炉内の中性子照射によって製造時よりも硬化(照射硬化)
- 周方向だけではなく径方向の水素化物も存在する傾向
- 水素化物の析出が燃料のPCMI破損限界を低下させるが、水素化物の配向状態が破損限界に及ぼす影響の程度は不明

水素化物配向状態が燃料のPCMI破損限界に影響を及ぼすか？

被覆管の破損時ひずみに及ぼす水素濃度と二軸応力の影響

き裂進展直前の高燃焼度PWR燃料被覆管



* 水素化物リムに生じるき裂を未照射被覆管で如何に模擬するかが肝要 → Rolling after grooving (RAG) 法を開発し外面予き裂入り被覆管の製作に成功

破損時周ひずみは、水素濃度及び二軸応力条件である応力比(軸方向/周方向)が大きくなると低下



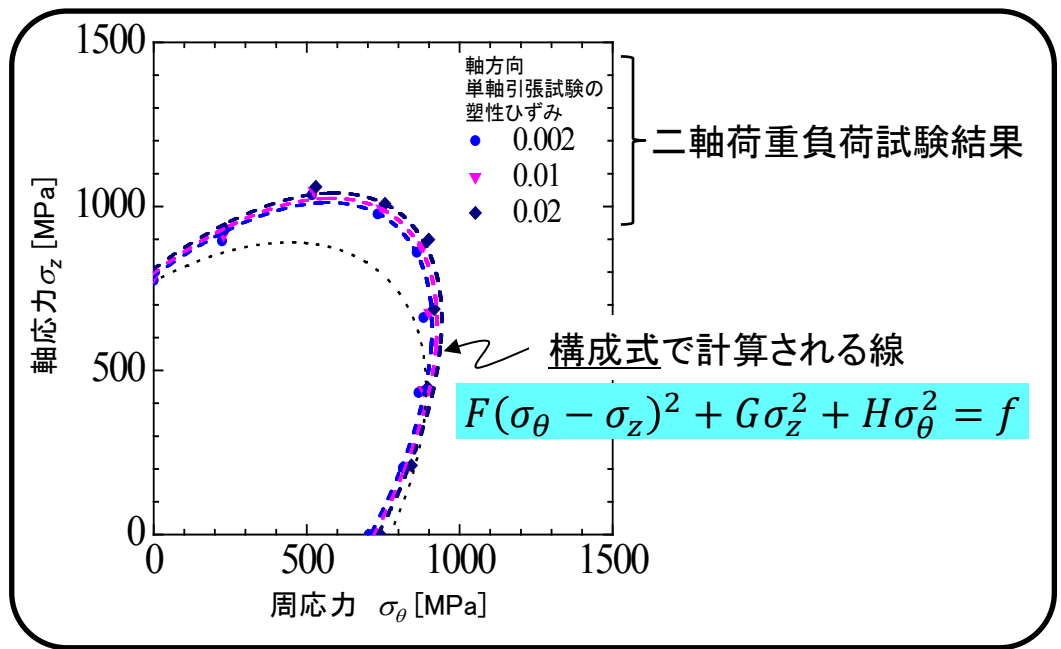
リム内側に析出した水素化物がき裂の進展に及ぼす影響を評価するため破壊力学の考え方を導入 → 本研究では、破損限界指標として「J積分値」を利用

PWR燃料被覆管について(2/5)

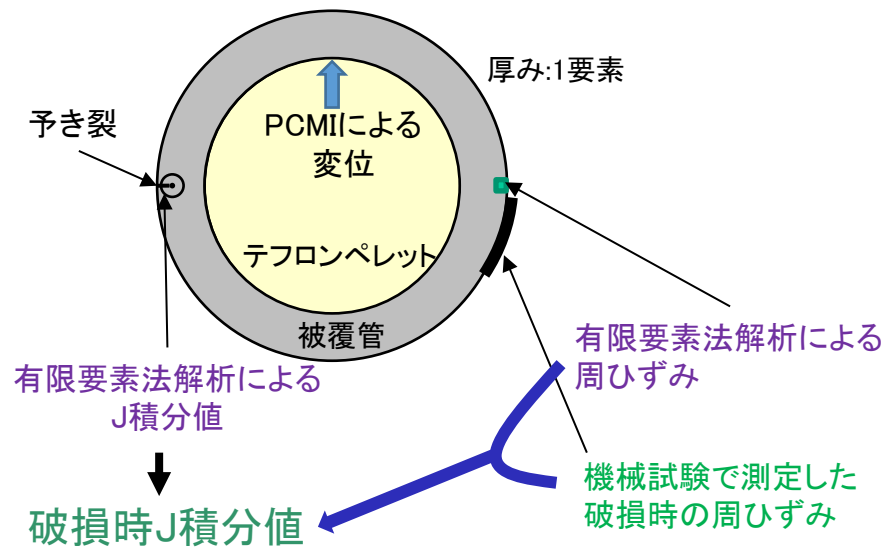
破壊力学評価による破損限界指標の導出

計算コードを利用した解析を行うためには、対象とする材料の機械特性値(応力とひずみの関係、変形異方性)を表す「**構成式**」が必要だが、ジルコニウム合金被覆管に対する評価式無し

二軸荷重負荷試験を実施



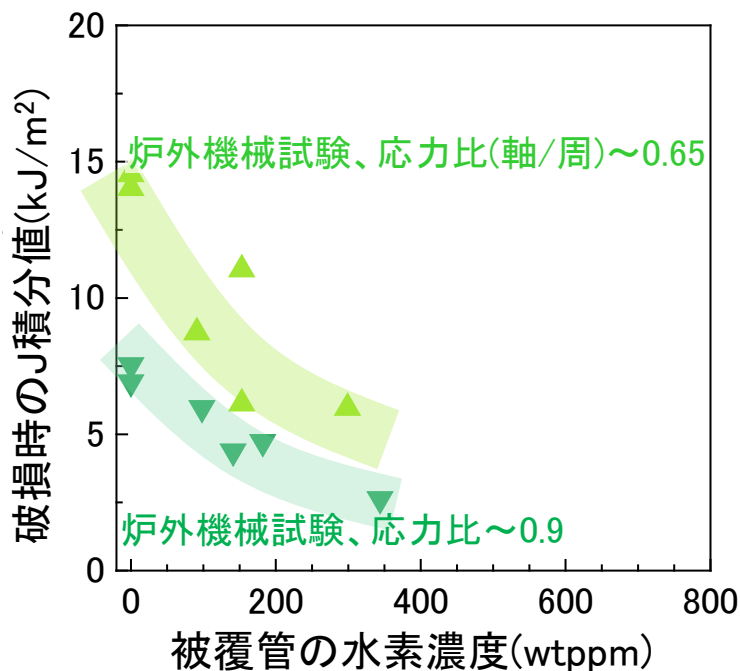
構成式を有限要素解析に適用



機械試験では、測定した破損時周ひずみに対応するJ積分値を破損時J積分値とした

破壊力学に基づく破損限界指標(破損時J積分値)

PWR燃料被覆管について(3/5) 破損時J積分値の水素濃度依存性



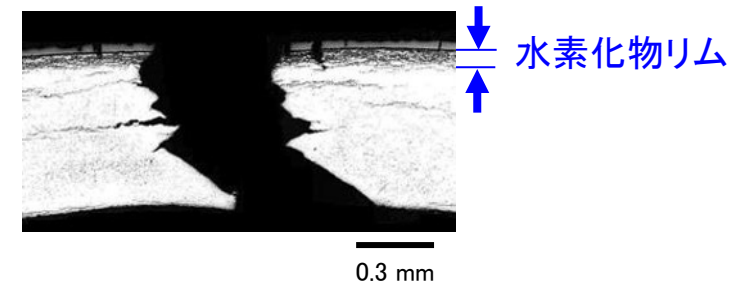
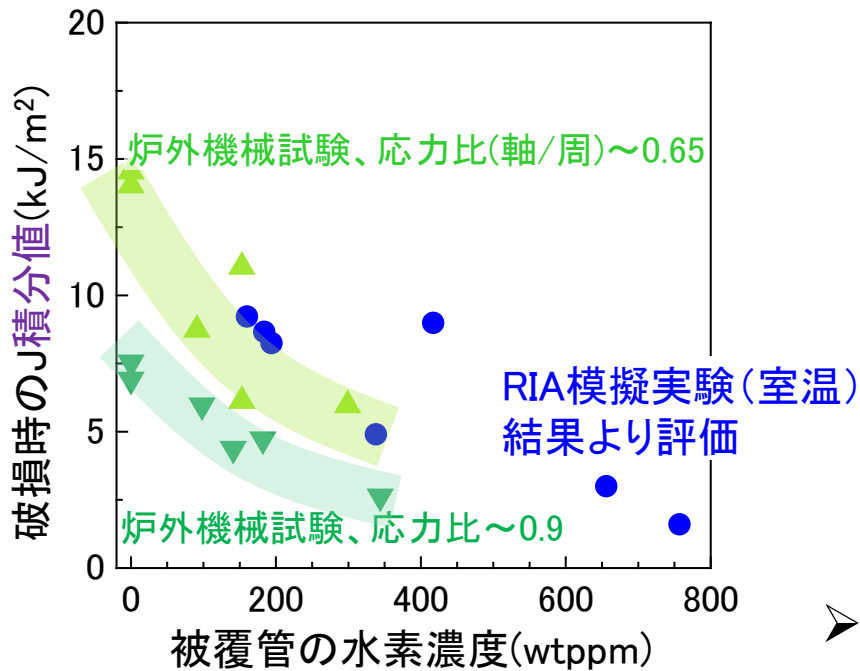
- 水素濃度増加に従い、破損時J積分値は減少
- ➡ 予き裂先端周辺に析出した水素化物は破損限界を低下させる

- 応力比~0.9の破損時J積分値は、応力比~0.65の場合よりも低い
- ➡ 応力比が大きいほど破損限界が低下することを示唆

被覆管の破損限界を破壊力学指標(J積分値)を用いて整理。応力比及び被覆管の水素濃度の影響を明らかにした

破壊力学指標(J積分)のRIA模擬実験結果との関係

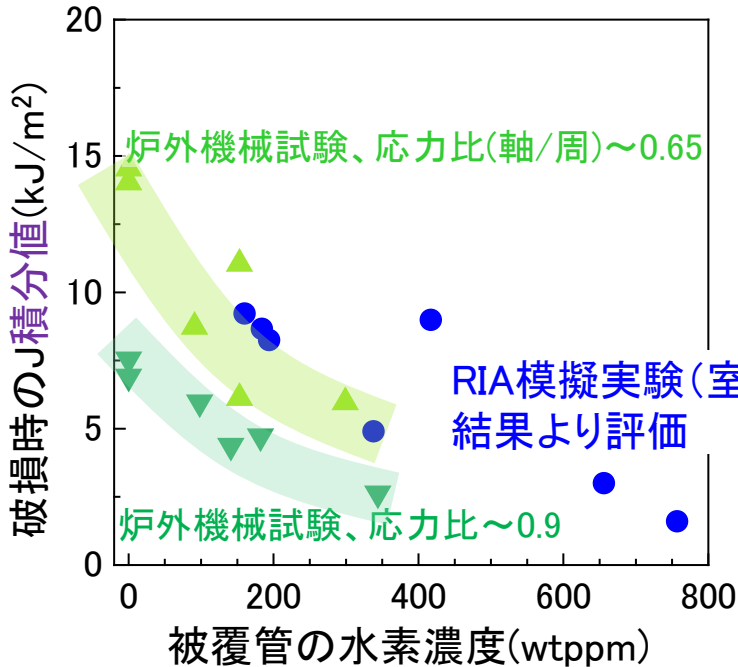
- RIA模擬実験結果に基づく破損限界(J積分)値
水素化物リム厚さよりき裂長さを推測し、この長さを用いた有限要素法解析によりJ積分値を算出する。このデータを利用したRIA解析コードにおいて、破損が発生した時刻のJ積分値を破損時J積分値として計算している。



- RIA模擬実験の300 wtppmH以下の破損点の低下傾向は、炉外試験の低下傾向と類似
➡ この低下は水素化物リムで形成されたき裂先端周辺に析出した水素化物に起因していることを示唆

破壊力学指標(J積分)のRIA模擬実験結果との差

➤ RIA模擬実験結果に基づく破損限界(J積分)値:
RIA解析コードを用いて実験データを処理・評価



- 水素化物リム厚さからき裂長さを推測する上で、リム厚さ範囲に不確かさあり
- 被覆管の水素濃度は、水素化物リムおよび金属部の水素化物を含む平均の値を使用 ← 水素化物リムとその内側の水素を分けて測定・評価することが困難なため
- RIA模擬実験時の応力比は0.5~1の範囲で不確かさあり

高燃焼度PWR燃料被覆管のき裂先端水素濃度を平均水素濃度で近似することが過大評価側であることを示唆

今回の研究成果を受けた、RIA解析コードRANNSの破損限界評価モデルの改良方針

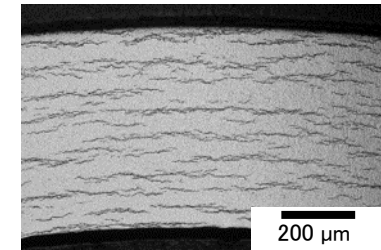
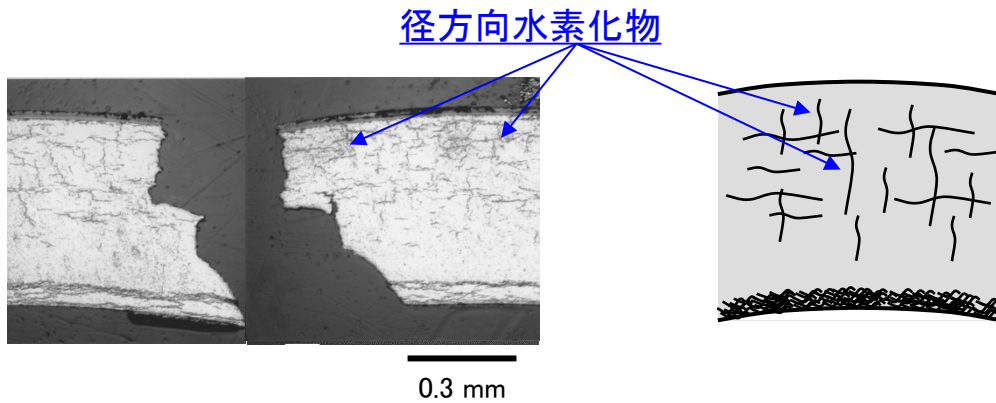
- き裂先端水素濃度の算定方法の修正
- 二軸応力の影響の反映

物理過程記述の適正化、支配因子の取り込み → 破損予測手法の外挿性、信頼性向上

高燃焼度BWR燃料被覆管における径方向水素化物析出状態の模擬

➤ 高燃焼度BWR燃料被覆管の特徴

- 中性子照射による照射硬化
- 周方向に加え**径方向**に析出した水素化物

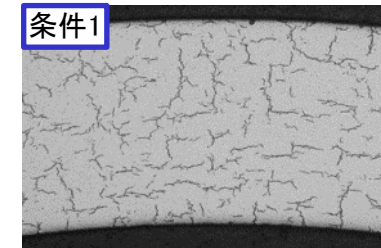


周方向に配向

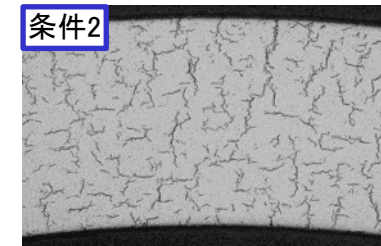
作製した水素吸収試料
(再配向処理なしSR材)

➤ 未照射の被覆管を用いて以下の特徴を有する模擬試料を作製

- 照射硬化: BWR燃料被覆管(再結晶焼鈍被覆管)よりも機械的強度が高く硬い**応力除去焼鈍被覆管**を使用
- 水素化物析出形態: 応力除去焼鈍材に水素を吸収させた後、**再配向処理**を実施



周・径方向に配向

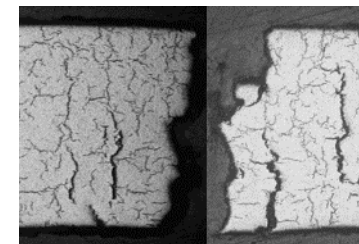
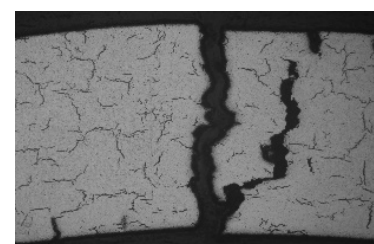
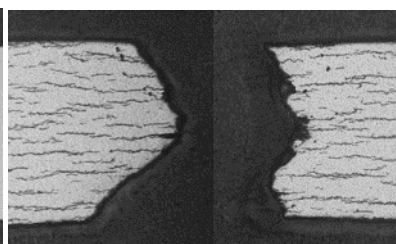
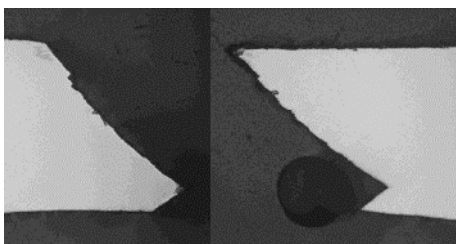
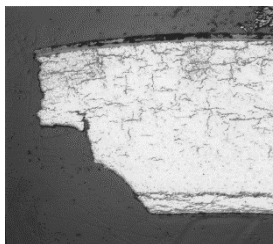
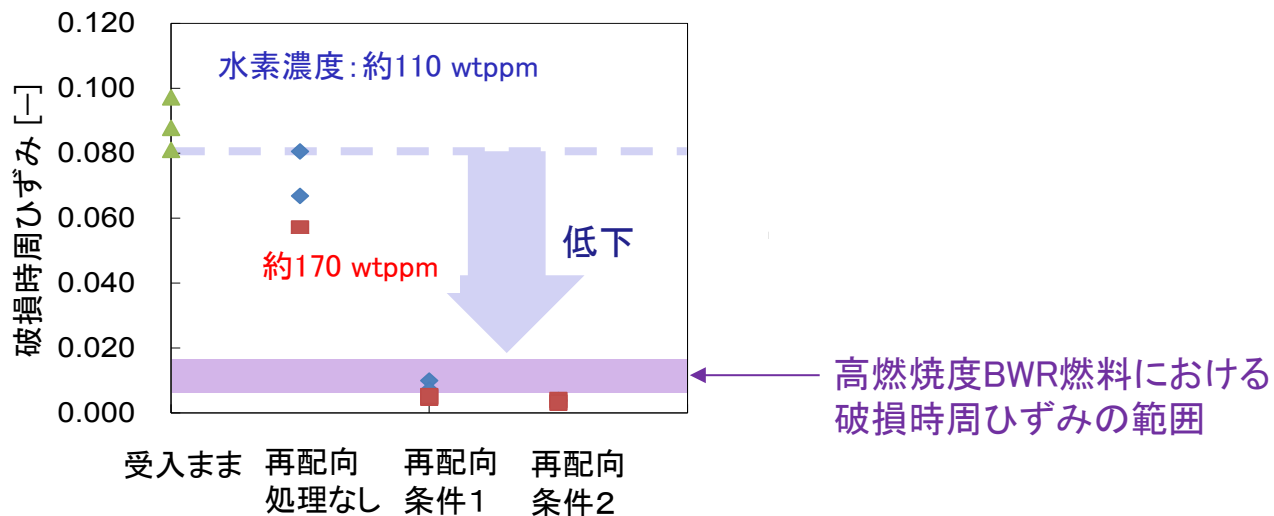


周・径方向に配向
(径方向が多い条件)

再配向処理試料(SR材)

BWR燃料被覆管について(2/2)

破損限界に及ぼす径方向水素化物析出の影響



BWR燃料被覆管の破損部断面

受入まま

再配向処理なし

再配向処理被覆管(条件1)

- 再配向処理試料の破損時周ひずみは、高燃焼度BWR燃料と同じかそれ以下まで低下
 - 再配向処理試料ではき裂が外表面で径方向に進展、高燃焼度BWR燃料でみられた破損形態の特徴と類似
- 高燃焼度BWR燃料被覆管の破損限界、外表面近傍の破損形態を炉外で再現できた。高燃焼度BWR燃料の破損メカニズムのモデル化に必要な、様々な応力比条件、水素濃度及び配向条件でのデータ取得が可能に

まとめ及び今後の研究

- PCMIを適切に模擬できる炉外機械特性試験により、PWR燃料及びBWR燃料の破損限界に及ぼす二軸応力及び水素化物析出形態の影響を評価した。
- PWR燃料のPCMI破損限界については、PWR燃料被覆管の破損プロセス模擬を目的として開発した試験技術の適用によるデータ取得を概ね完了。総合試験結果に見られる水素濃度依存性の傾向と炉外機械特性試験のそれとが一致したことから、PCMI破損プロセスが水素化物リム部に発生したき裂の進展により支配されるという現象理解が裏づけられた。
- BWR燃料のPCMI破損限界については、径方向に析出した水素化物の影響による低下を炉外で再現できた。これにより、高燃焼度BWR燃料の破損メカニズムのモデル化に必要な、様々な応力比条件、水素濃度及び配向条件での系統的なデータ取得が可能となった。

今後の研究

- 昨年度実施した高燃焼度改良型BWR燃料を対象としたRIA模擬実験(OS-1)の破損限界が従来型燃料に比べ低下した原因について、被覆管の水素化物析出状態及び二軸応力条件との関係を明らかにする。
- 径方向水素化物を含む被覆管の破損限界評価手法を構築する。
- 析出水素化物の機械特性を考慮した被覆管の破損限界評価手法を構築する。