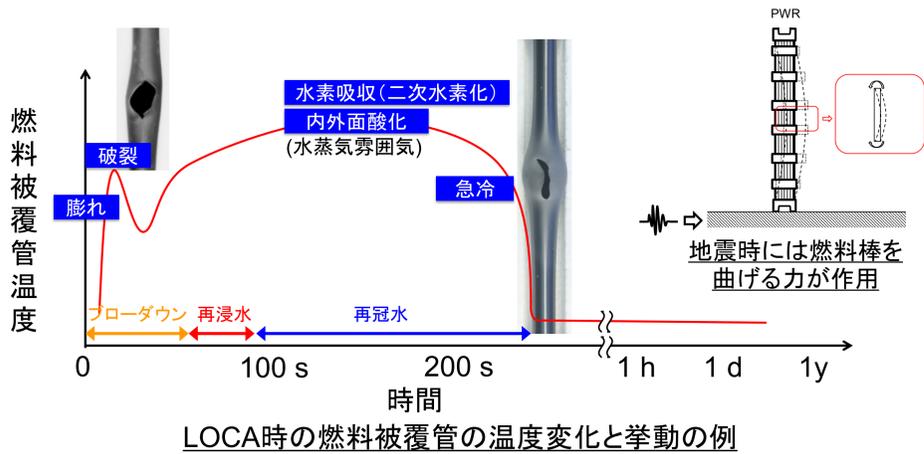


## 背景

- 冷却材喪失事故(LOCA)時に燃料被覆管は膨れ・破裂、高温水蒸気中酸化、水素吸収、等により脆化
- 東京電力福島第一原子力発電所事故後に多くの余震が発生→燃料被覆管のLOCA時の脆化が著しい場合、LOCA後の地震時に作用する曲げ等の外力によって燃料被覆管が破断し炉心の冷却可能形状を喪失する恐れ



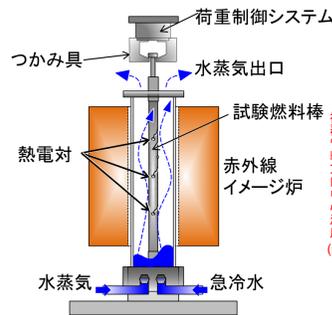
LOCA時の燃料被覆管の温度変化と挙動の例

## 目的

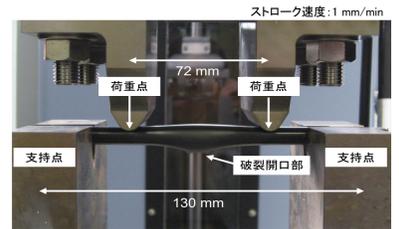
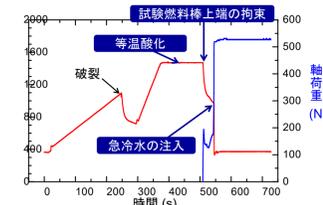
LOCA後に長期にわたって炉心の冷却可能形状を維持できるかを評価するために必要な、燃料被覆管のLOCA後耐破断性に及ぼすLOCA時二次水素化の影響、並びに燃焼の進展及び被覆管材質変更の影響を評価

## LOCA後耐破断性評価の概要

- 燃料被覆管試料の支点間に均一な曲げモーメントを負荷できる4点曲げ試験手法を開発
- LOCA模擬試験後の燃料被覆管に対し4点曲げ試験を実施し、作用する曲げに対する耐破断性を評価



LOCA模擬試験の概要

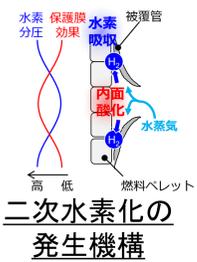


4点曲げ試験装置の外観

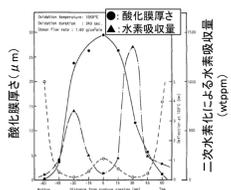
(室温、大気圧雰囲気下)

## LOCA時の二次水素化が燃料被覆管のLOCA後耐破断性に及ぼす影響

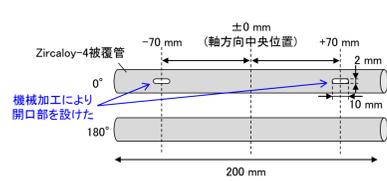
- LOCAを経験した燃料被覆管は軸方向に異なる機械強度を有すると考えられ、中でも薄肉化した破裂開口部と水素脆化が著しい二次水素化部の強度を把握しておくことは、LOCA後の耐破断性や破断位置を評価する上で重要
- 二次水素化部を模擬した領域を有する試験燃料棒について4点曲げ試験を実施し、LOCA時に起こる二次水素化がLOCA後耐破断性に及ぼす影響を評価



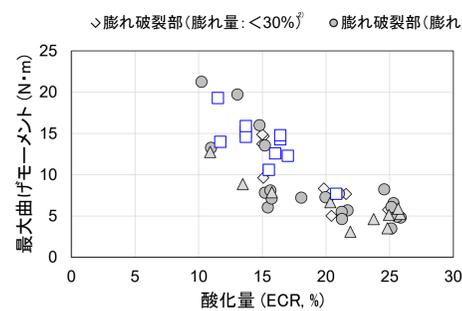
二次水素化の発生機構



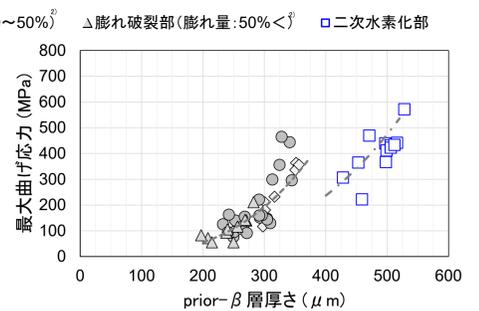
二次水素化の軸方向プロファイル<sup>1)</sup>



二次水素化部を模擬した領域を有する試験燃料棒の作製方法



最大曲げモーメントと酸化量の関係<sup>3)</sup>  
(LOCA模擬試験時等温酸化温度: 1273-1473 K)



最大曲げ応力とprior-β層厚さの関係<sup>3)</sup>  
(LOCA模擬試験時等温酸化温度: 1273-1473 K)

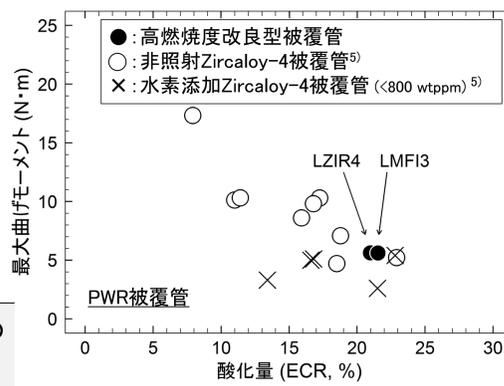
二次水素化した領域は酸化のみの領域(破裂開口部)に比べ最大曲げ応力が半分程度に低下。燃料被覆管はLOCA時の膨れ量及び酸化量次第で二次水素化部で破断する可能性あり  
⇒ LOCA時の膨れ量・酸化量・水素吸収量の評価結果に基づき、曲げの外力が作用した際の燃料棒破断発生の有無や破断箇所の推定が可能に

## 高燃焼度改良型燃料被覆管のLOCA後耐破断性

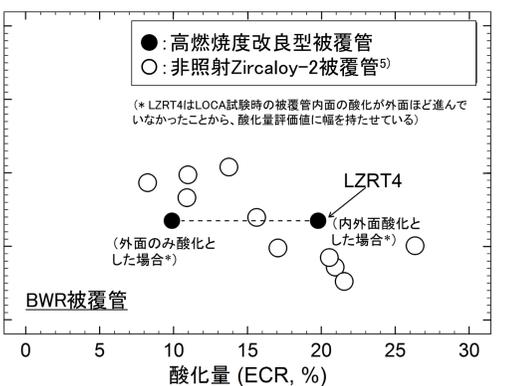
- LOCA模擬試験に供した高燃焼度改良型燃料被覆管に対し4点曲げ試験を実施し、燃焼の進展及び被覆管材質の変更が燃料被覆管のLOCA後耐破断性に及ぼす影響を評価

4点曲げ試験に供した高燃焼度改良型燃料被覆管<sup>4)</sup>

試験燃料棒番号	燃料タイプ	照射炉	燃料被覆管採取部の平均燃焼度 (GWd/t)	被覆管材質	腐食膜厚さ (μm)	LOCA試験前の水素濃度 (wtppm)
LZIR4	PWR 17×17	Vandellios-2	80	低スズ ZIRLO™	18	144
LMF13		Gravelines-5	84	M5®	10	64
LZRT4	BWR 10×10	Leibstadt	73	Zircaloy-2 (LK3)	35	395



最大曲げモーメントと酸化量の関係<sup>4)</sup>  
(破裂開口部における破断、LOCA模擬試験時等温酸化温度: ~1473 K)



高燃焼度改良型燃料被覆管の最大曲げモーメントは非照射Zircaloy-4被覆管のそれとほぼ同等  
⇒ LOCA後耐破断性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約85 GWd/tまでの燃焼度進展や被覆管材質の変更により著しく低下せず

## まとめ

LOCA模擬試験後の燃料被覆管に対し4点曲げ試験を実施。燃料被覆管のLOCA後耐破断性に及ぼすLOCA時二次水素化の影響、並びに燃焼の進展及び被覆管材質変更の影響を明らかにした。

LOCA後の長期冷却期間中、燃料棒に曲げ等の外力が作用した場合に炉心の冷却可能形状が維持されるか否かの評価が可能に

本研究成果の一部(高燃焼度改良型燃料被覆管のLOCA後耐破断性)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27-29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」の成果の一部として得られたものである。  
[出典] 1) Uetsuka H. et al., JNST, 18: 705-717 (1981). 2) Yumura T. and Amaya M., ANE, 120: 798-804 (2018). 3) Okada Y. and Amaya M., ANE, 136, doi: 10.1016/j.anucene.2019.107028 (2020). 4) 成川、他、日本原子力学会2019年春の年会、2M16 (2019). 5) Yamato M. et al., JNST, 51: 1125-1132 (2014).