

開発状況の報告（1）

佐藤 大樹、岡田 裕史（MHI）
山下 真一郎（JAEA）

2025/10/28

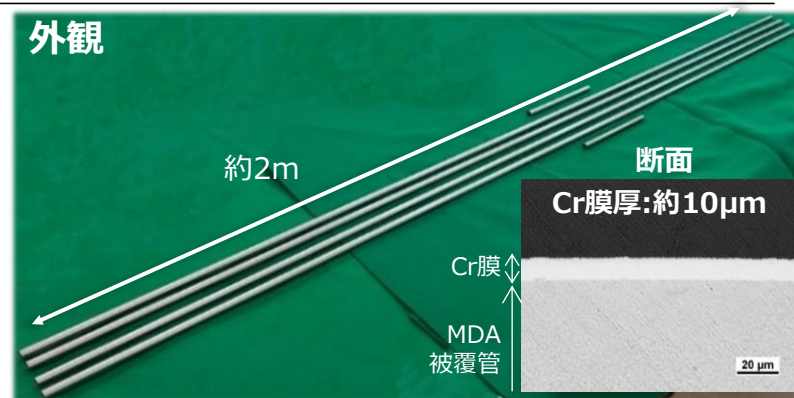
三菱重工業株式会社

1. はじめに
2. コーティング被覆管の開発計画
3. コーティング被覆管の炉外試験
4. 米国研究炉ATRでの試験照射 *
5. 照射後ホットセル試験（速報） *
6. まとめ

* INL、JAEA、MHIによる共同研究成果

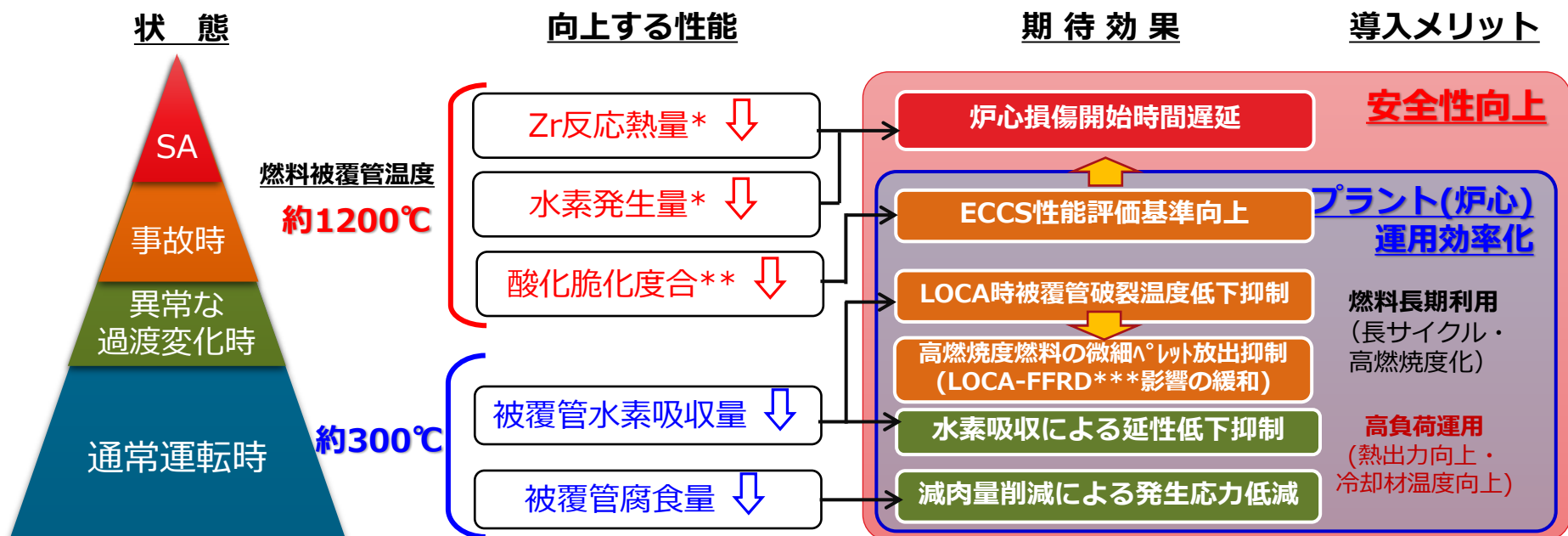
1. はじめに [1]

- 被覆管表面のCr膜により、通常運転時の耐食性・耐水素吸収特性、事故時の耐酸化性・堅牢性向上を実現。
- 全運転状態での安全性向上に加え、炉心運用高度化(高燃焼度化,出力向上等)に貢献できる技術。



Crコーティング被覆管(PVD法)の外観と断面

➡ Advanced Technology Fuel(安全性+経済性の向上)として期待。



*被覆管損傷までを想定

**再冠水時熱衝撃(クエンチ)に対する耐性向上

***FFRD: Fuel Fragmentation, Relocation, and Dispersal

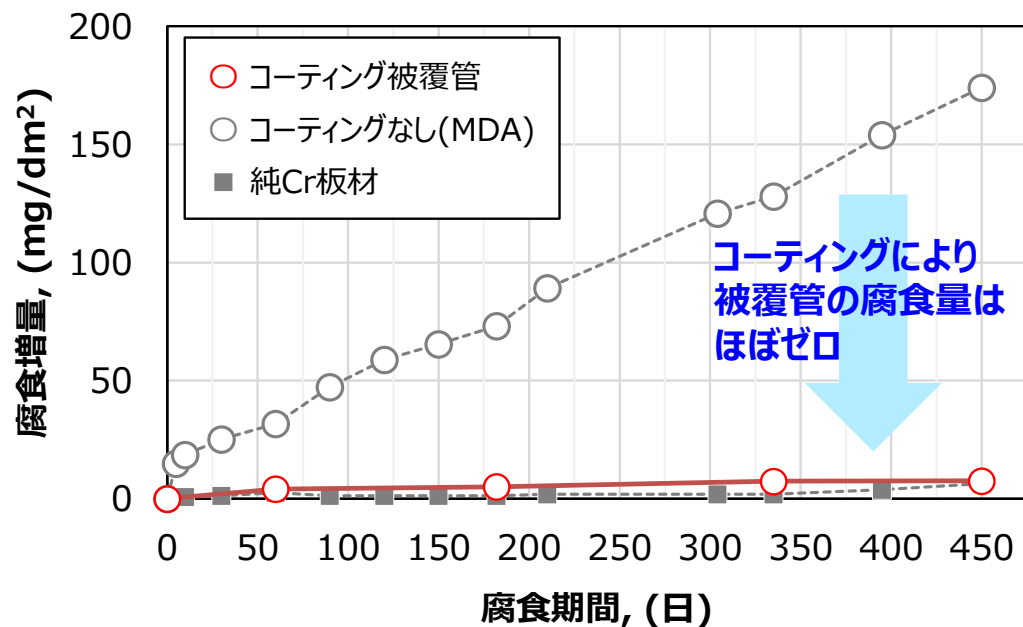
3. コーティング被覆管の炉外試験

1. 腐食
2. 機械強度
3. 熱クリープ挙動
4. 疲労特性
5. 熱物性
6. LOCA時のバースト挙動
7. 高温水蒸気酸化
8. LOCA時の熱衝撃耐性
9. 炉外試験まとめ

3.1 腐食

PIRT通し番号2

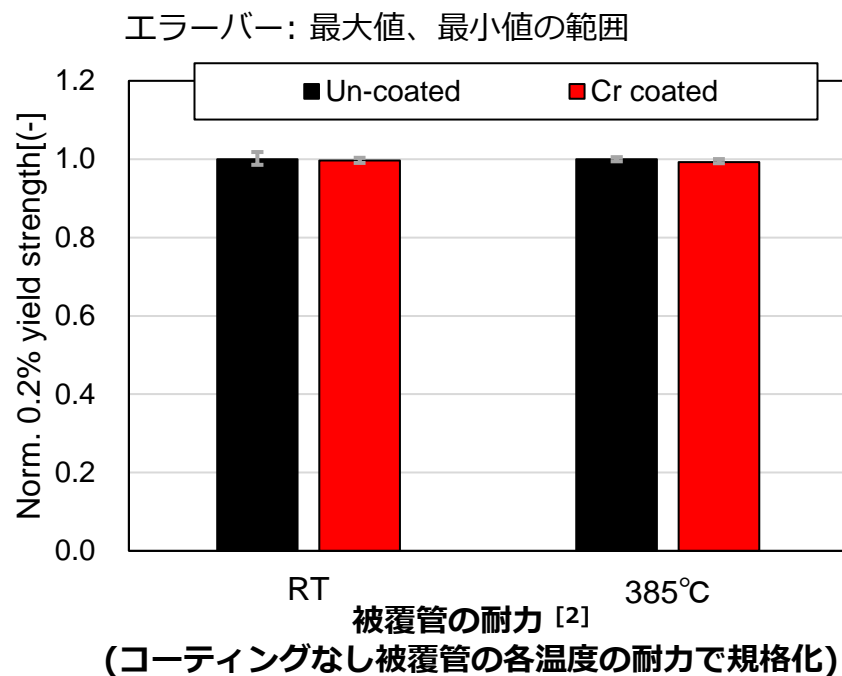
- 360℃PWR模擬水中でオートクレーブ試験
- 450日まで被覆管外面の腐食増量ほぼなし
- Crコーティングが優れた耐食性を発揮、
PWRの運用高度化に貢献可能



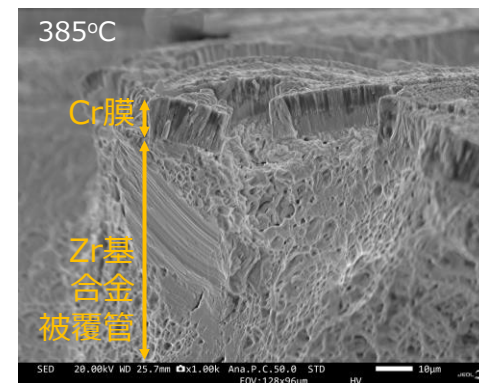
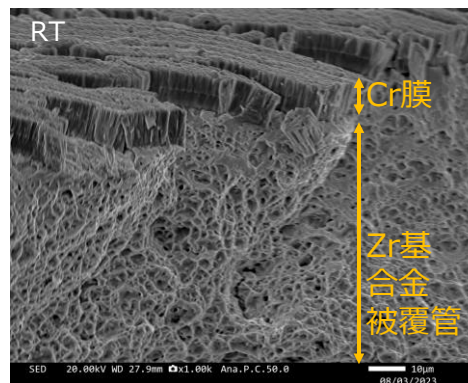
オートクレーブ試験中の被覆管の外観と腐食増量 [1]

腐食期間	MDA	Crコーティング被覆管
試験前		
60日		
180日		
335日		
450日		

- 室温と385℃で軸引張試験
 - Crコーティングによる機械特性への影響は測定されず
 - 被覆管が破断するまでCr膜は被覆管に密着
- Crコーティングによる機械特性への影響なし

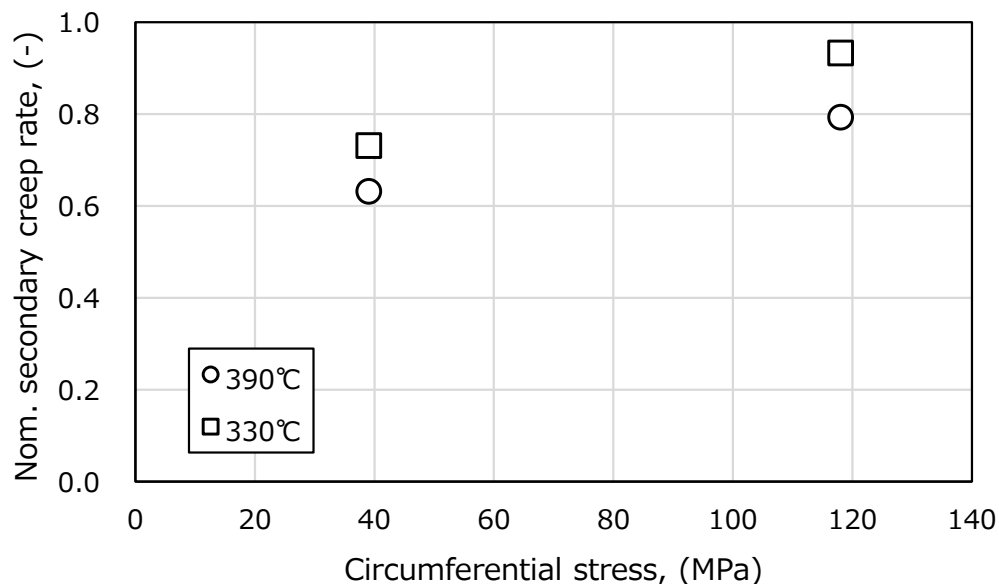


引張試験後の被覆管の外観



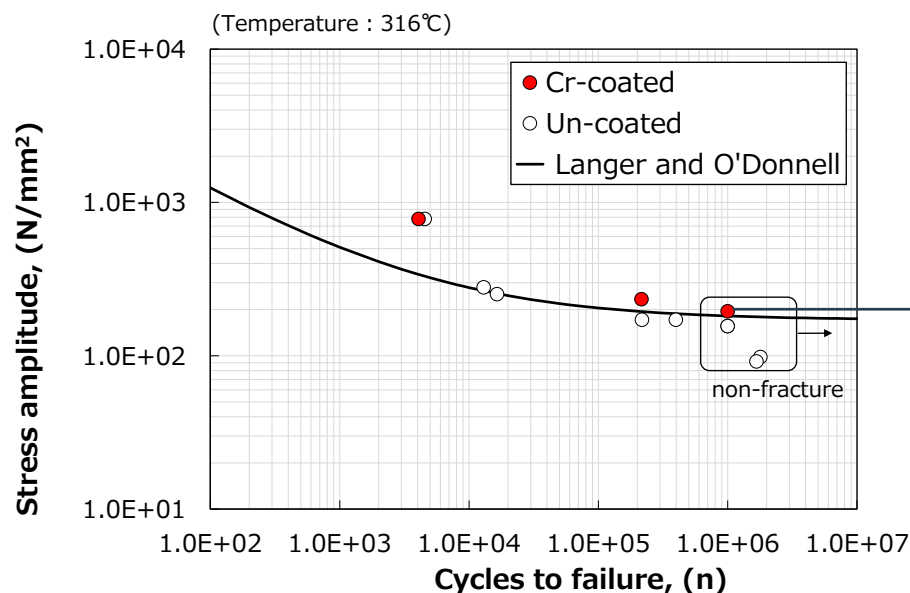
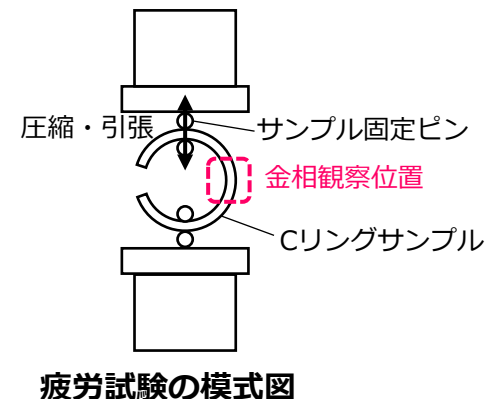
引張試験後の被覆管の破面 [2]

- 330℃と390℃で熱クリープ試験、被覆管周方向応力は39, 118 MPa
- コーティング被覆管の二次クリープ速度はコーティングなしより低下する傾向

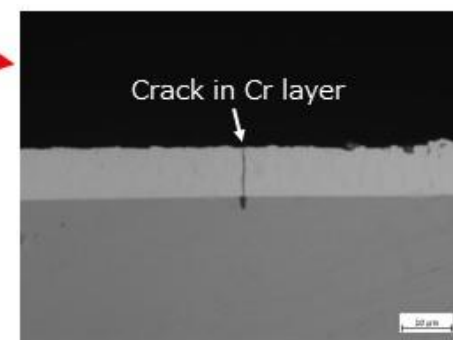
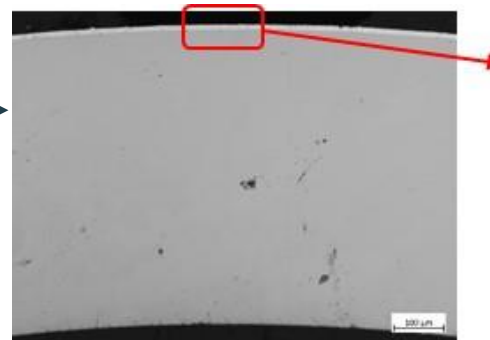


コーティング被覆管の二次クリープ速度
(コーティングなし被覆管の各温度、応力条件の二次クリープ速度で規格化)^[3]

- 316℃でC-リングサンプルを疲労試験
- コーティング被覆管の疲労破損サイクル数はコーティングなしとほぼ変わらず
- 疲労強度に対するCrコーティングの有意な影響なし
- Langer & O'Donnell曲線^[4]をコーティング被覆管に適用可能

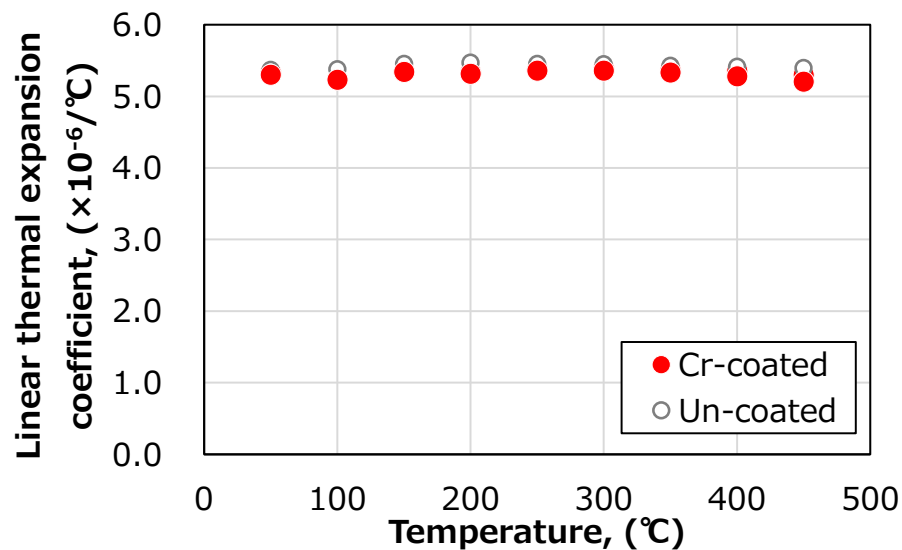
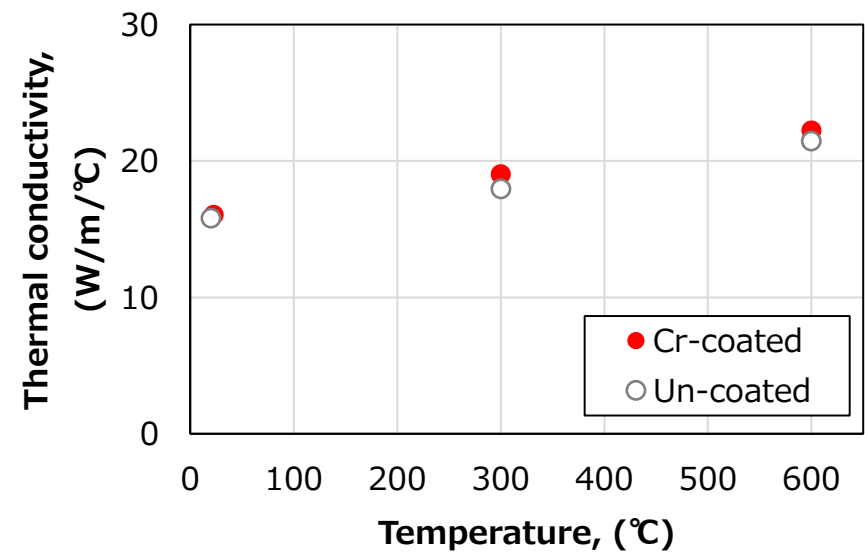


被覆管の応力振幅と疲労破損サイクル数の関係 [5]

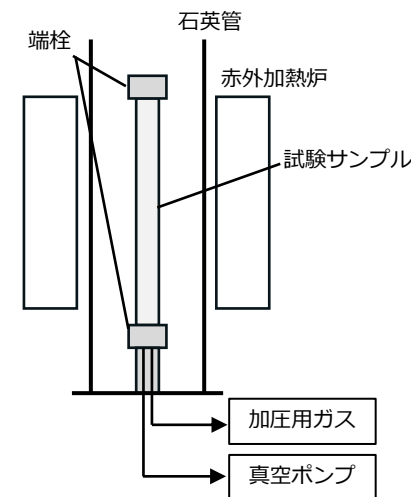


疲労試験後の非破損被覆管の断面金相 [5]

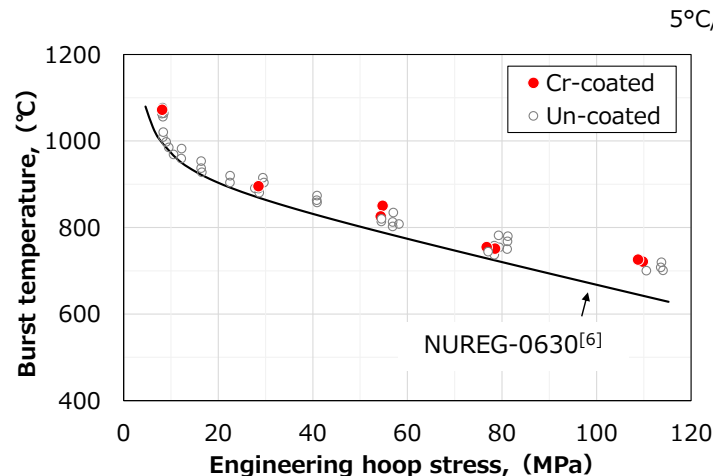
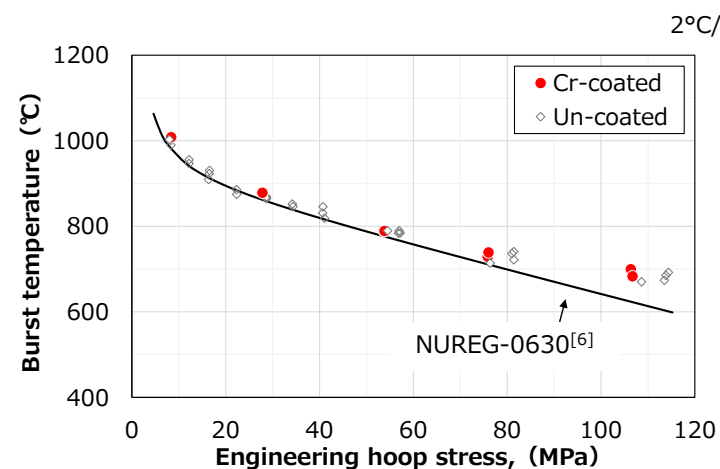
- 通常運転時の温度範囲で熱膨張係数と熱伝導率を測定
- コーティング被覆管の熱物性はコーティングなしとほぼ変わらず
- 被覆管の熱物性に対する薄いCr膜の有意な影響なし

被覆管の熱膨張係数^[5]被覆管の熱伝導率^[5]

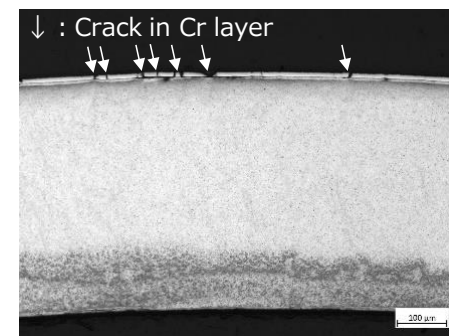
- 赤外線炉でLOCA模擬バースト試験を実施
- コーティング被覆管のバースト温度はコーティングなしとほぼ同等
- CrはZrに比べ脆性であるため、被覆管の膨れ破裂前にCr膜にクラック発生
- CrコーティングによるLOCA時の被覆管バースト挙動への影響なし



LOCA模擬バースト試験装置の模式図

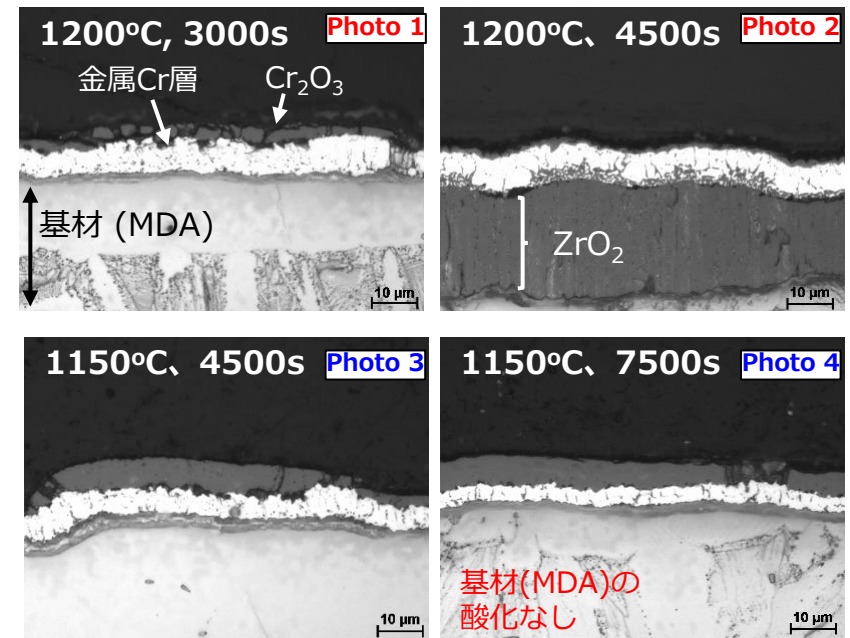
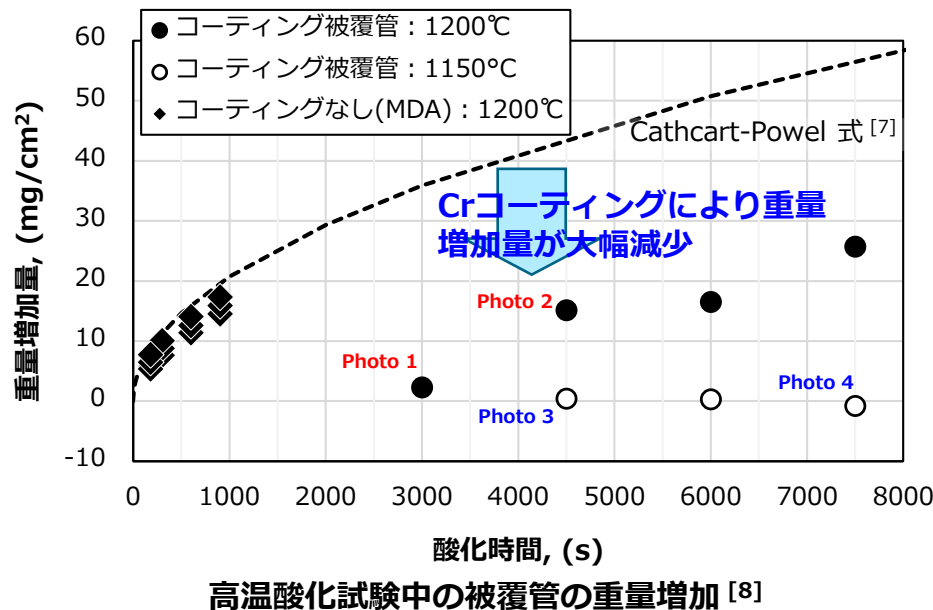


被覆管のバースト温度と周方向応力との関係^[5]



被覆管バースト位置の断面金相^[5]

- 両端閉じ被覆管の高温水蒸気酸化試験を実施（外面のみ酸化）
 - 1150℃では7500秒までほぼ酸化なし
 - 1200℃では4500秒以降に酸化開始
- LOCA時の高温水蒸気酸化に対する優れた耐性を発揮、安全性向上に寄与



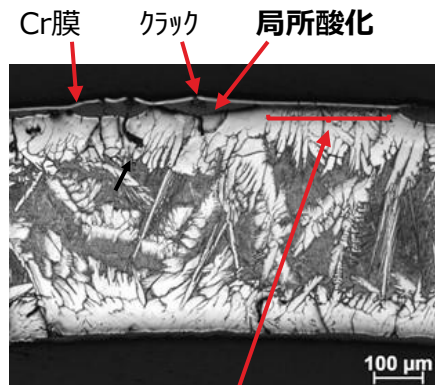
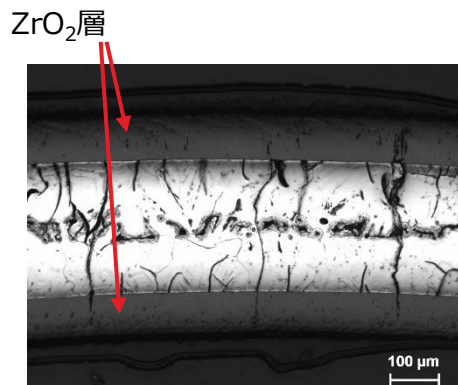
高温酸化試験後の被覆管の断面金相^[8]

- 国内ECCS性能基準（1200℃ PCT、15%ECR）よりも厳しい条件でLOCA模擬試験を実施
 - 1200℃ 500秒保持条件でCrコーティングは被覆管の酸化を抑制
 - 1350℃ではZr-Cr共晶反応あり、60秒保持条件で被覆管の延性を維持
- CrコーティングによりLOCA時における被覆管の熱衝撃耐性が向上する可能性

1200℃、500 s (30%ECR*)

コーティングなし

スパッタリング

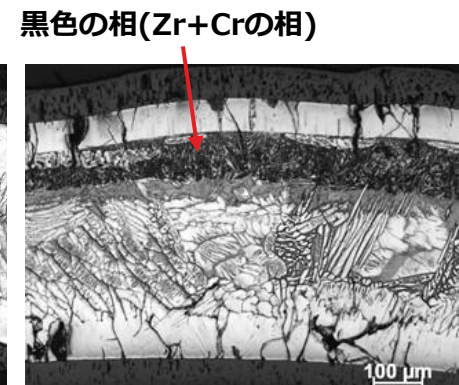
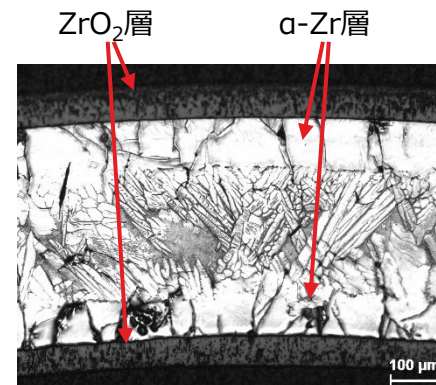
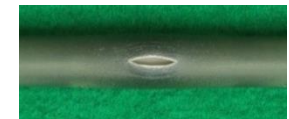


酸化抑制

1350℃、60 s (30%ECR*)

コーティングなし

スパッタリング



LOCA模擬試験後の被覆管の外観と横断面金相 [9]

* 30%ECRはZr基合金被覆管の両面酸化を想定した酸化量の計算値

3.9 炉外試験まとめ

➤ Crコーティングにより被覆管性能が向上する見通し








凡例
(見通し含む)



現行より向上



現行と同等

炉外試験項目		関連評価項目	コーティング被覆管の 炉外試験結果	燃料の安全性・信頼性への影響 (現行燃料との比較)	
通常時 異常過渡時	腐食	燃料健全性 (腐食)	✓ 腐食量は現行被覆管より大幅抑制(ほぼなし)		腐食量・水素吸収量低減
	機械特性	燃料健全性 (応力、歪)	✓ 機械強度は現行被覆管と同程度		なし
	内圧クリープ	燃料健全性	✓ クリープ速度は現行被覆管よりも遅い可能性		なし*
	熱物性	燃料健全性、安全性	✓ 熱伝導率、熱膨張係数は現行被覆管と同程度		なし
事故時	バースト	安全性 (LOCA時バースト特性)	✓ バースト温度は現行被覆管と同程度		なし
	熱衝撃耐性	安全性 (LOCA時PCT, ECR)	✓ LOCA時酸化脆化は現行被覆管より抑制の可能性		熱衝撃耐性向上
	高温酸化	安全性	✓ 外面酸化は現行被覆管より抑制(~1200℃, 3000s)		水素発生量抑制

* 燃料の安全性・信頼性への影響は軽微と考えている。

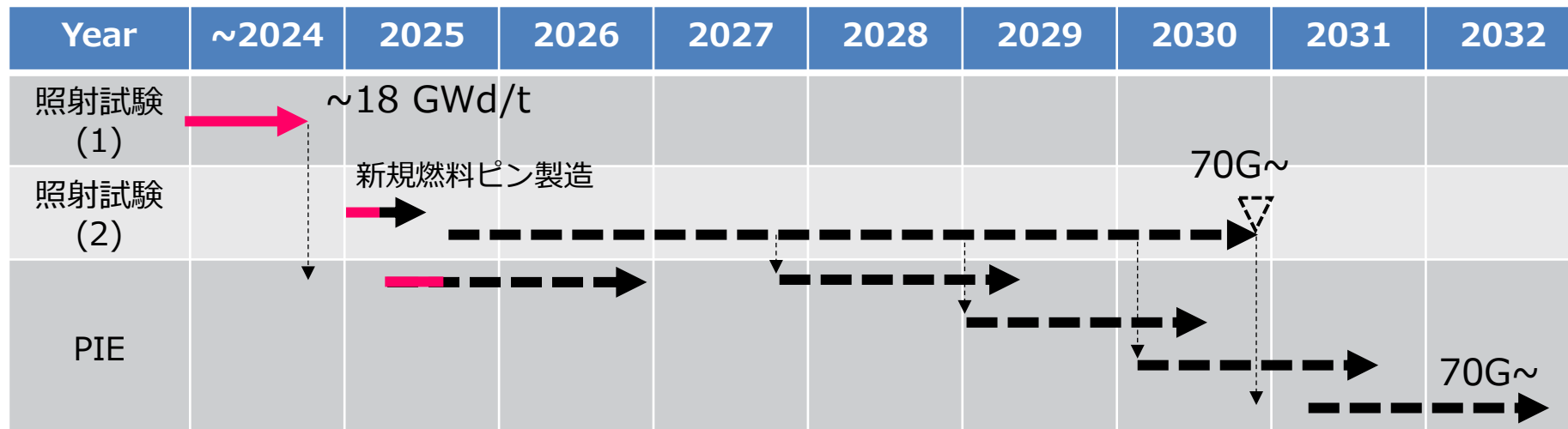
4. 米国研究炉ATRでの試験照射

1. 照射計画
2. 照射条件
3. 試験照射の進捗状況

4.1 照射計画

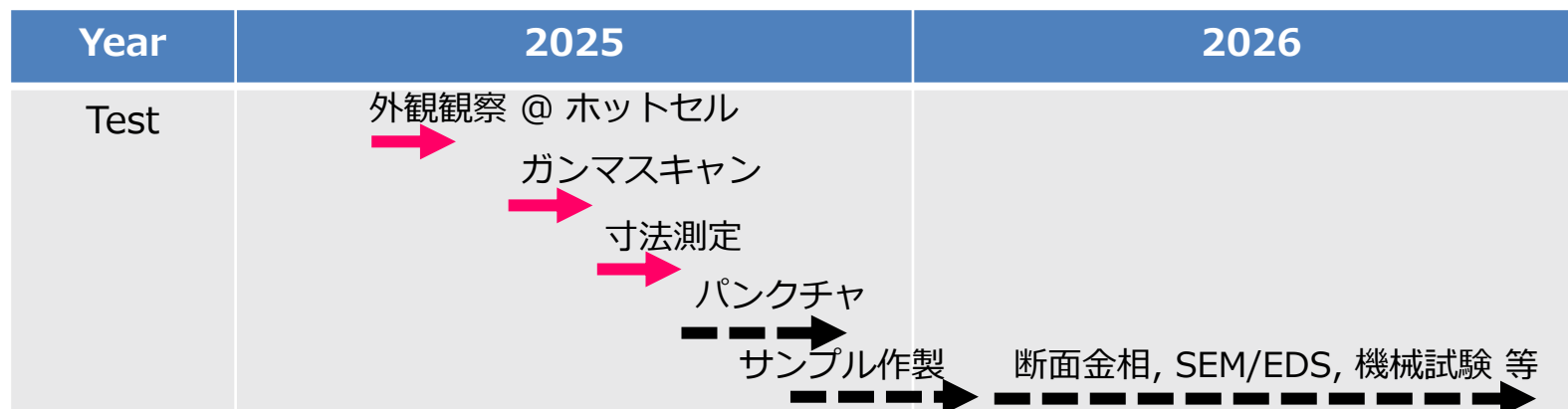
試験照射

新規の高燃焼度照射を2025年から開始する計画

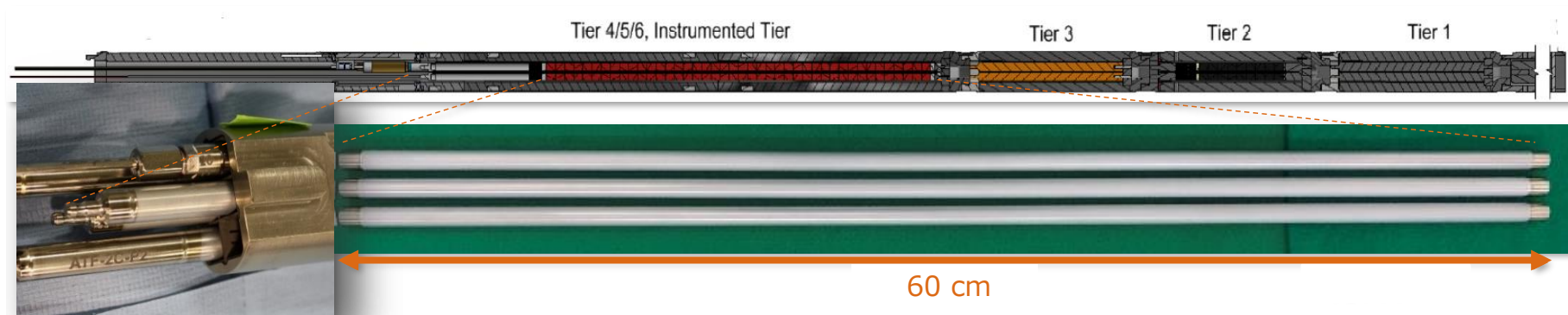


照射後ホットセル試験

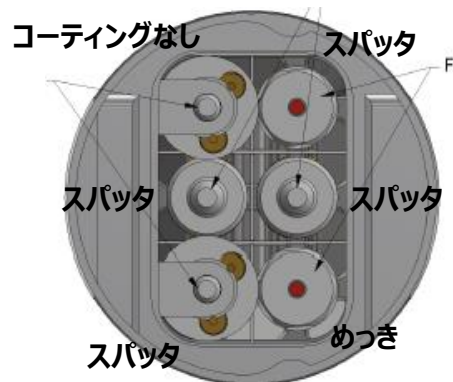
➤ 照射後燃料ピン（~18GWd/t）の非破壊試験を実施中



- 6本の燃料ピンを装荷した照射リグをATR炉心中央のPWRループに装荷



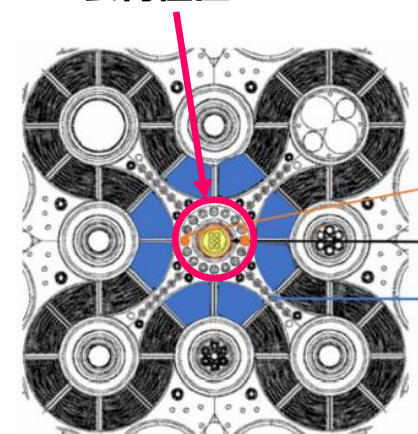
ATRに装荷したコーティング被覆管の外観



6本の燃料ピンの照射リグ内装荷位置

コーティング方法	Cr膜厚さ	本数
スパッタ	10 μm	4
めっき	10 μm	1
なし	—	1

装荷位置



ATR炉心断面の模式図 [10]

4.3 試験照射の進捗状況

- 燃料ピンの平均燃焼度は16~18 GWd/t（国内PWRの1サイクル相当）を達成
- Cr膜はがれのような特異な外観はATRカナルでは認められず

熱水力条件の実績 [1, 11]

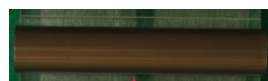
パラメータ	条件
タイプ	PWR模擬
圧力	13.8~16.5 MPa
温度	275~300°C
B濃度	0-2100 ppm
溶存酸素濃度	< 5 ppb
溶存水素濃度	40-60 cm ³ H ₂ /kg
pH	6.9-7.4 (LiOH)

照射条件の実績 [1]

パラメータ	条件
線出力	30~40 kW/m
EFPD	227 days
高速中性子束 (>1 MeV)	$1.2 \sim 1.5 \times 10^{18}$ n/m ² /s
熱中性子束	$4.4 \sim 6.0 \times 10^{17}$ n/m ² /s



この部分の外観は、オートクレーブ試験60日後と同様の金色



この部分の外観は、オートクレーブ試験335日後の外観よりも黒い（クラッド影響の可能性）

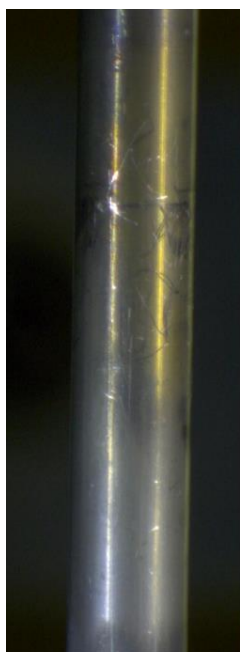


ATRカナルでの燃料ピン外観例 [1, 10]

5. 照射後ホットセル試験（速報）

1. 外観観察
2. ガンマスキャン

- 布でふき取り後の燃料ピンに対しホットセルで外観観察を実施
- 燃料スタック位置では、ふき取り後も光沢の弱い外観
- 従来のATR試験照射で見られたクラッド付着した燃料ピンと同様 [12]



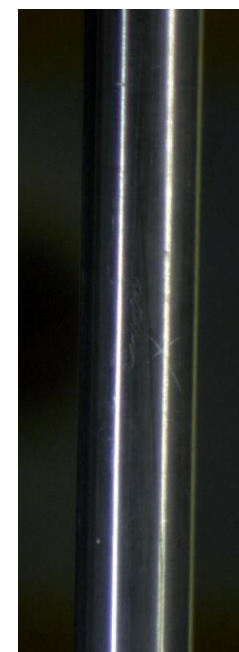
スパッタリング
(プレナム)



スパッタリング
(スタック)



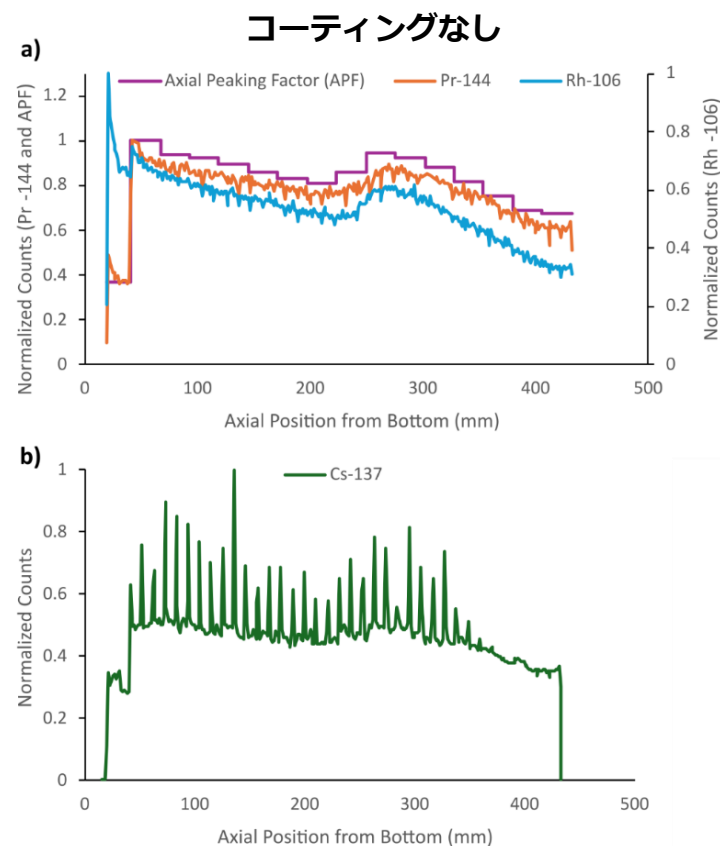
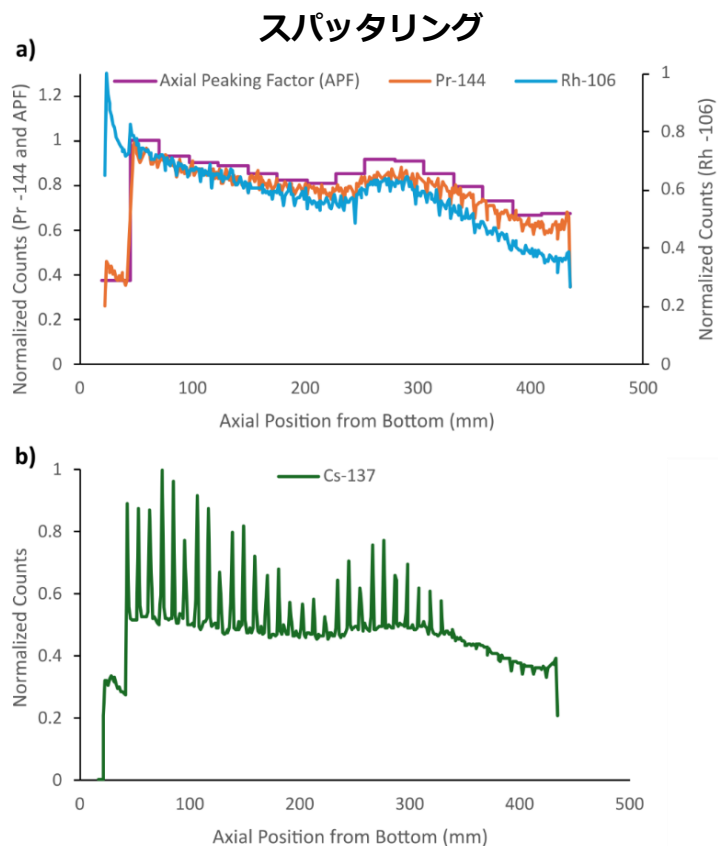
めっき
(スタック)



コーティングなし
(スタック)

布ふき取り後の燃料ピンの外観例

- 軸方向のPr, Rh分布は出力分布計算値と同様
 - ✓ 燃料ピン下部側（炉心中央側）の燃焼度が高め
- 高線出力での照射により、ペレット間にCsが移動



燃料ピンの軸方向ガンマ線プロファイル例

- コーティング被覆管の国内開発の進捗状況は次のとおり：
 - ✓ 実機適用（長尺化）に向けたコーティング技術を確立
 - コーティング被覆管を適用した燃料挙動を評価
- コーティング被覆管を適用した燃料ピンの試験照射を米国研究炉で2023年に開始
 - ✓ 2024年に**燃焼度18GWd/tを達成**
- **ホットセル照射後試験を実施中**
 - 照射試験結果に基づき、コーティング被覆管を適用した燃料ピンの照射挙動評価を実施予定

