

事故耐性燃料開発に関するワークショップ
2024年12月11日（水）
於 東京大学 HASEKO-KUMA-HALL

早期実用化に向けたCrコーティング被覆管の開発

重要技術課題に対する開発者の役割

佐藤 大樹（三菱重工業）

2024.12.11

三菱重工業株式会社

1. 重要技術課題に対する開発者の役割
2. データ取得状況と技術課題
3. 開発ロードマップ・技術成熟度
4. 早期実用化に向けた重要技術課題への取り組み

参考1. 技術及び開発状況の概要

参考2. 開発ロードマップ

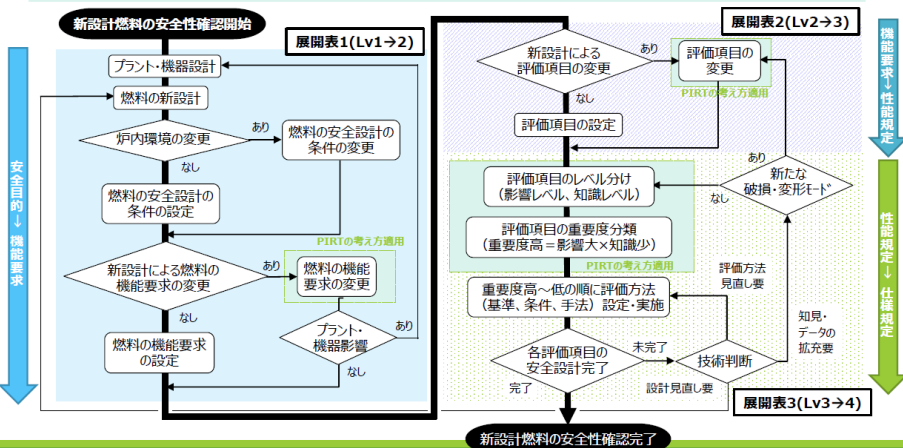
本研究内容は、経済産業省資源エネルギー庁による「原子力の安全性向上に資する技術開発事業」の事業成果及び日本原子力研究開発機構-Idaho National Laboratory-三菱重工業の共同研究の内容を含みます。

1. 重要技術課題に対する開発者の役割

- 技術課題：新技術を実用化するための要解決事項（例：安全評価モデルの作成）
 - ✓ 技術課題を漏れなく洗い出し解決することが開発者の基本的役割
- 重要技術課題：技術課題のうち、重要度高（安全評価影響が大、知見が少）の事項を含む課題と位置づけ
- 重要技術課題に対する開発者の役割：
 - ✓ 新技術を用いた燃料設計、新設計燃料の重要技術課題の抽出（学協会の標準・レポート作成において議論した燃料安全評価に対する考え方が基礎：下図）
 - ✓ **重要技術課題をステークホルダーと共有 → 新知見を取得・評価・共有 → 重要度の更新**
 （繰り返し）
 - TRLに応じた新知見を反映した、最新の重要技術課題に対する効果的・効率的な取り組み
 - ✓ 新設計燃料の導入による効果・影響の定量化 → 実用化判断サポート → 社会実装

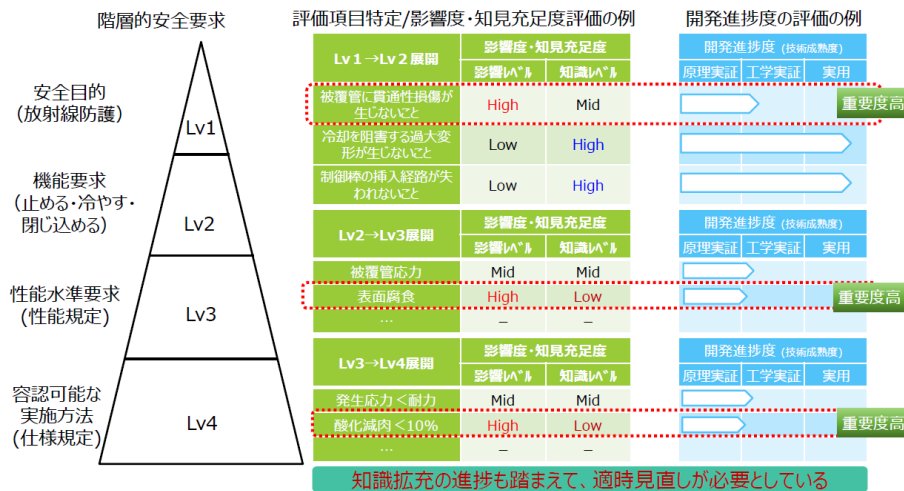
[参考] 安全評価項目の体系的な構築方法

- 現行燃料に対する階層的な安全要求の考え方を参照し新設計燃料安全評価項目を洗い出し、
- 以下の視点も加えて検討することで抜け漏れのない洗い出しを実施（フロー図参照）
 - ① 炉内における使用環境の変化の有無（必要に応じて機能要求を整理）
 - ② 破損・変形モードの追加／修正の確認



[参考] 効果的な開発・安全確保上の優先度／重要度付の考え方^{1b)}

- 洗い出した評価項目の「安全評価への影響度」と「知見充足度」を評価
- 「影響度が高く」、「知見の少ない項目」を「重要度：高」として優先的に知見拡充



2. データ取得状況と技術課題 [1/2]

➤ Cr膜による耐酸化性、耐食性の向上を除き、燃料被覆管性能(物性、挙動)への影響は軽微の見通し

● : データ取得済 or 取得中 ○ : データ未取得 - : データ取得予定なし

データ分類	項目	特徴・性能	炉外試験	研究炉*1	先行照射*1	備考
物性	機械的性質	硬さ	●	○	○	
		UTS/耐力/伸び	●	○	○	
		ヤング率/ポアソン比	●	○	○	
	熱的性質	熱伝導率	●	-	-	
		熱輻射率	●	-	-	
		熱膨張率	●	-	-	
		密度/相変態温度	●	-	-	
		共晶点/融点	●	-	-	● 融点(測定値)は未取得
	化学的性質	酸化反応(通常時)	●	○	○	● 炉外長期データ拡充
		酸化反応(事故時)	●	○	- *2	
		水素吸収特性	●	○	○	● 炉外長期データ拡充
		溶出反応	●	-	○	
	核的性質	中性子吸収断面積	-	-	-	● 10μm程度のZrコーティングによる核的影響は軽微 ● ほう素/制御棒による調整可

*1 照射後試験(PIE)を含む。 *2 安全研究を想定。

PWR 1サイクル後相当燃焼度のATR照射後試験データを今後取得

2. データ取得状況と技術課題 [2/2]

● : データ取得済 or 取得中 ○ : データ未取得 - : データ取得予定なし

データ分類	項目	特徴・性能	炉外試験	研究炉*1	先行照射*1	備考
挙動	被覆管	塑性変形	●	○	○	
		クリープ	●	○	○	
		コワプス	-	○	○	
		アニーリング	-	○	○	
		疲労	●	○	○	
		バースト	●	-	- *2	
		クイン熱衝撃	●	-	- *2	● 拘束あり条件は未取得
		割れ/剥がれ*3	-	○	○	
燃料棒	FPガス放出	-	○	○		
	照射成長	-	○	○		
	PCI/PCMI	-	-	- *2		
	反応度投入特性	-	-	- *2		
燃料集合体	曲がり(棒/集合体)	-	-	○		
	フレッティング	●	-	○		
	DNB特性	○	-	-		
	事故時荷重	-	-	-		

PWR1サイクル後相当燃焼度のATR照射後試験データを今後取得

*1 照射後試験(PIE)を含む。 *2 安全研究を想定。 *3 Cr被膜をZr合金被覆管の外面に密着させたCrコーティング被覆管の構造の観点から説明が必要。

3. 開発ロードマップ・技術成熟度

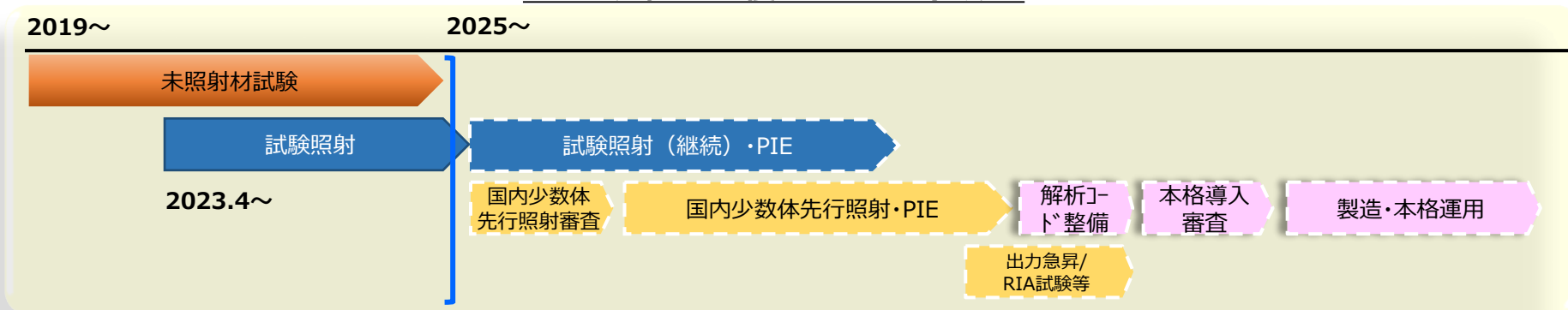
➤ 技術成熟度 (TRL) 3～4 の技術課題に取り組み中。

実施時期 開発段階	短期 (～2030年)	中期 (～2040年)	長期 (～2050年)
実用開発段階 (TRL7-9)		許認可	商用炉照射
技術実証段階 (TRL4-6)	ふるまい解析コードの改良、検証 検査技術の確立 製造技術の確立	材料及び模擬燃料棒照射試験 適用性評価に必要なデータの整備 (バックエンド等影響評価) 規格・基準の策定 商用炉照射 (少数体先行照射) RIA/LOCA、出力急昇試験	量産に向けた準備
原理実証段階 (TRL1-3)	適用性評価に必要なデータの整備 (材料特性試験) 製造技術の確立 (試験片、端栓溶接)		

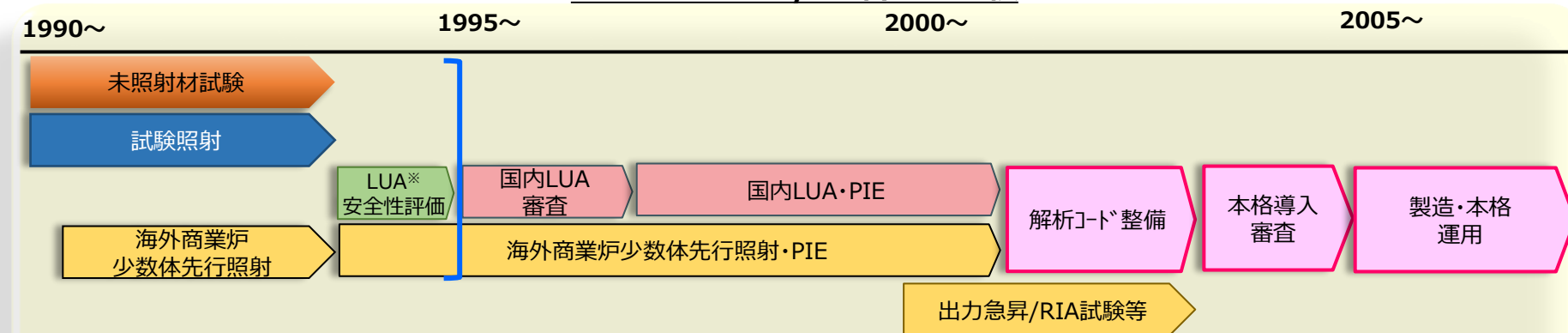
4.早期実用化に向けた重要技術課題への取り組み

- 各ステークホルダーが実用化計画の予見性を高めることが、新技術をなるべく早期に社会実装するための共通タスク
- 重要技術課題・新知見を随時共有し意見交換することで、計画の方向性を相互認識でき、予見性向上に役立つ

Crコーティング被覆管導入ロードマップ



PWR・55GWd/t燃料導入実績



▼加圧水型原子炉高燃焼度化ステップ²
 先行照射試験 検討結果報告書(1993.4)
 (旧MITI・原子力発電技術顧問会)

▼PWR燃料の高燃焼度化(ステップ²)及び
 燃料の高燃焼度化に係る安全研究の
 現状と課題について(2001.12)
 (METI原子力安全・保安部会 原子炉安全小委員会)
 ※Lead Use Assembly

CNO意見交換会(2023.12.12)資料を一部更新



MITSUBISHI
HEAVY INDUSTRIES

MOVE THE WORLD FORWARD

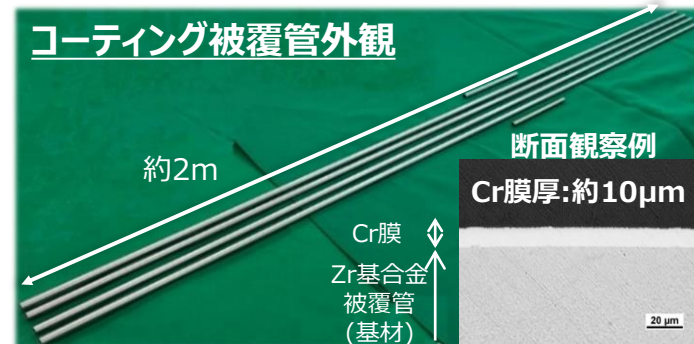
**MITSUBISHI
HEAVY
INDUSTRIES
GROUP**

参考1. 技術及び開発状況の概要

コーティング被覆管の技術概要

- 被覆管表面に耐酸化性・耐食性に優れるCr膜を形成
- Cr膜の効果により全ての運転状態において安全性向上効果が見込まれる
- プラント運用高度化(高燃焼度化,出力向上等)にも寄与

MDA: Mitsubishi Developed Alloy (耐食性改良被覆管)



コーティング被覆管の開発状況概要

- 2030年代のPWR実機への早期適用を開発目標に、Crコーティング被覆管の開発を実施中
- Crコーティング被覆管の性能・挙動データを拡充中
- 米国研究炉での燃料棒照射試験を実施中

コーティング被覆管による安全評価への期待効果

安全評価への期待効果の確認方法 (下線：本発表で報告)

被覆管材料	通常運転時、運転時の異常な過渡変化時	事故時(LOCA等)	シビアアクシデント(炉心損傷まで)	安全評価への期待効果の確認方法 (下線：本発表で報告)
Cr膜	被覆管腐食(減肉)の大幅低減			オートクレーブ試験による腐食増量測定 照射試験(被覆管水素分析)等
	被覆管水素吸収の抑制(水素脆化の抑制)	燃料棒破裂温度の低下抑制		
		被覆管耐酸化性の向上(酸化脆化の抑制)	酸化発熱の緩和 水素発生量の低減	高温特性試験等
Zr基材	Zr合金被覆管と同等の性能 (Cr膜によるZr基材への影響に問題がないこと)			材料特性(熱、機械)試験等

参考2. 開発ロードマップ

- 2030年代のPWR適用を目標に計画を3つのフェーズに分け開発を推進中
- 燃料被覆管の物性及び挙動に対するコーティング影響を確認中
- **実用化研究へのステップアップ**に向け、日米連携枠組みを活用し研究炉(ATR*)で**試験照射中**
 - ✓ 2024~2025年度、**PWR 1 サイクル相当の燃焼度での照射後試験(PIE)**
(外観観察、耐食性改善効果の確認等)を実施する計画
 - ✓ 早期実用化を目指して、国内PWRでの少数体先行照射と並行しATRで継続照射を実施し、少数体先行照射に先立ち、ATRで照射実績を積み上げるスキームを想定

*Advanced Test Reactor

年代(年度)	2019~2024 【基盤技術研究】	2025~2029 【実用化研究】	2030~ 【実用化】
開発・実施内容	製造試験	生産技術整備・量産試験	
	基礎物性/事故耐性確認試験	基本設計/安全評価	許認可
	導入効果・影響評価		バッチ導入
	(燃焼度はPWR1サイクル相当) 試験照射@ATR+PIE	試験照射(継続)@ATR+PIE	少数体先行照射@国内PWR