

事故耐性燃料開発に関するワークショップ
2023年12月14日
於：東大・武田先端知ビル・武田ホール

Crコーティング被覆管の実機導入に向けた取り組み

○佐藤 大樹, 岡田 裕史, 古本健一郎, 村上 望 (三菱重工業)
篠原 靖周, 小方 宏一, 清水 勇希 (MHI原子力研究開発株式会社)
山下 真一郎 (日本原子力研究開発機構)

2023.12.14

三菱重工業株式会社

1. Crコーティング被覆管について
2. 開発ロードマップ
3. Crコーティング被覆管の性能（ポスター発表①②）
4. データ取得状況と性能の見通し
5. Crコーティング被覆管の早期導入に向けた協議
6. LTA実現に向けた課題
7. まとめ

※ 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」による補助を受け実施された事業の成果です。

1. Crコーティング被覆管について

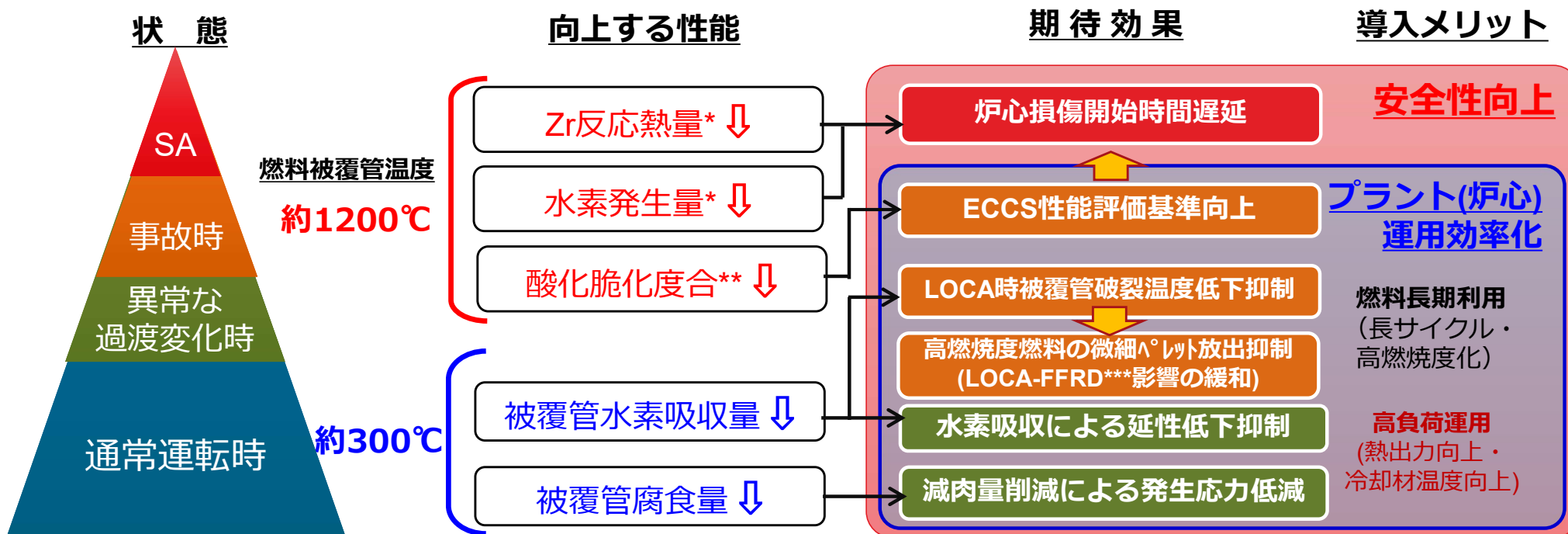
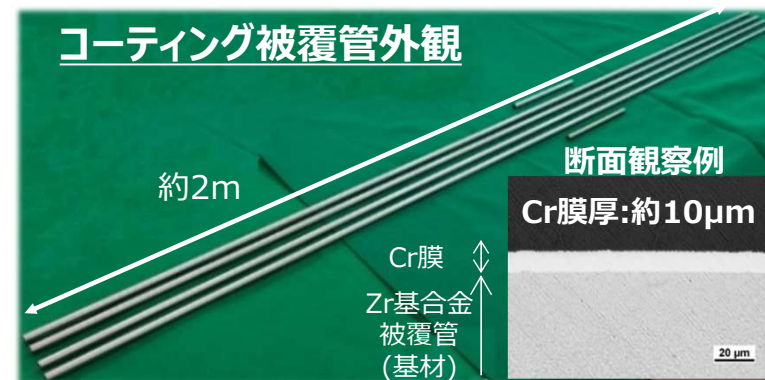
Crコーティング被覆管の技術概要

- 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対して安全性向上効果が見込まれる
- プラント運用効率化(高燃焼度化,出力向上等)にも寄与

Crコーティング被覆管の開発状況

- 2030年代のPWR実機適用を目標に、Crコーティング被覆管の開発を実施中（2019年～）

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



*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

2. 開発ロードマップ

- 2030年代のPWR実機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
- 国内LTA照射の審査に向け燃料被覆管の物性及び挙動に対するCr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
10 GWd/tまで問題なく照射。20 GWd/tまで照射後にホットセルPIEを実施する計画
- 国内PWRでのLTA照射と並行しATRでの継続照射を検討中
LTA照射に先立ちATRでの照射実績を積み上げるフレームワークを想定

年代	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
	試験照射@ATR	試験照射(継続)@ATR LTA照射@国内PWR	

3. Crコーティング被覆管の性能（ポスター発表①②）

➤ 事故時性能（ポスター発表①）

- バースト特性（破裂温度、破裂部の膨れ量）への影響なし
- 耐酸化性能が大幅に向上
- 高温クリープを抑制（～15%ひずみ量）
- LOCA時の酸化脆化抑制、クエンチ熱衝撃による折損抑制（～1350℃：Zr-Cr共晶あり）

➤ 通常運転時性能（ポスター発表②）

- 耐食性が大幅に向上、Cr膜が割れても影響軽微（～30日試験、継続中）
- 機械特性への影響なし、Cr膜は破断伸びまで密着性を維持
- Cr溶出影響は小さい見通し（試験確認中）

被覆管材料	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：ポスター発表)
	通常運転時、運転時の異常な過渡変化時	事故時(LOCA等)	シグナクシデント(炉心損傷まで)	
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 水素発生の低減	高温酸化試験、LOCA模擬試験等
Zr基材 +Cr膜	Zr基合金被覆管と同等の性能 （Crコーティングによる影響に問題がないこと）			材料特性（熱、機械）試験、 表面粗さ測定、Cr溶出試験等

4. データ取得状況と性能の見通し一覧[1/2]：物性関連

➤ 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	LTA*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/比熱	●	○	-	-	
		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	●	-	-	-	

*1 照射後試験(PIE)を含む。 *2 安全研究を想定。

4. データ取得状況と性能の見通し一覧[2/2] : 挙動関連



● : 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

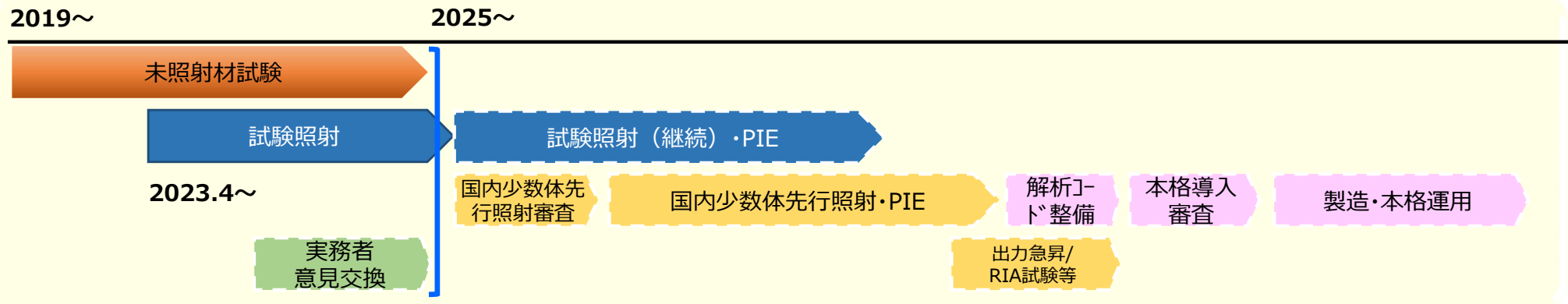
データ分類		項目	特徴・性能	炉外試験	研究炉*1	LTA*1	備考
挙動	被覆管	塑性変形	・ 機械特性が現行と同程度なため、Zrと同等と推定	●	○	○	
		ｸﾘｰﾌﾟ	・ 歪量が相対的に小さい傾向と想定	●	○	○	
		ｸﾞﾗﾌﾟﾙ	・ ｸﾘｰﾌﾟ特性から相対的にはｸﾞﾗﾌﾟﾙしにくいと推定	-	○	○	
		アニーリング	・ Crは高温まで安定と想定	-	○	○	
		疲労	・ 現行被覆管と同程度と想定	●	○	○	
		バースト	・ 現行被覆管と同程度（破裂温度・圧力とも）と想定	●	-	- *2	
		ｸﾞﾗﾌﾟﾙ熱衝撃	・ 1350°C30%ECRまで非折損	●	-	- *2	・ 拘束あり条件は未取得
		割れ/剥がれ*3	・ 機械特性試験では割れ/剥がれは発生していない	-	○	○	
	燃料棒	FPガス放出	・ コーティング管とは直接関連しない	-	○	○	
		照射成長	・ 母材と同等と想定	-	○	○	
		PCI/PCMI	・ 母材と同等と想定	-	-	- *2	
		反応度投入特性	・ 母材と同等と想定	-	-	- *2	
	燃料集合体	曲がり(棒/集合体)	・ 熱膨張差等が影響する可能性はあるが軽微と想定	-	-	○	
		ﾌﾚｯﾃｲﾝｸﾞ	・ 表面耐摩耗性向上	●	-	○	
DNB特性		・ 大きな表面状態変更無し ・ 熱伝導率は母材と同等と想定	○	-	-		
事故時荷重		・ Cr重量増分は軽微	-	-	-		

*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。

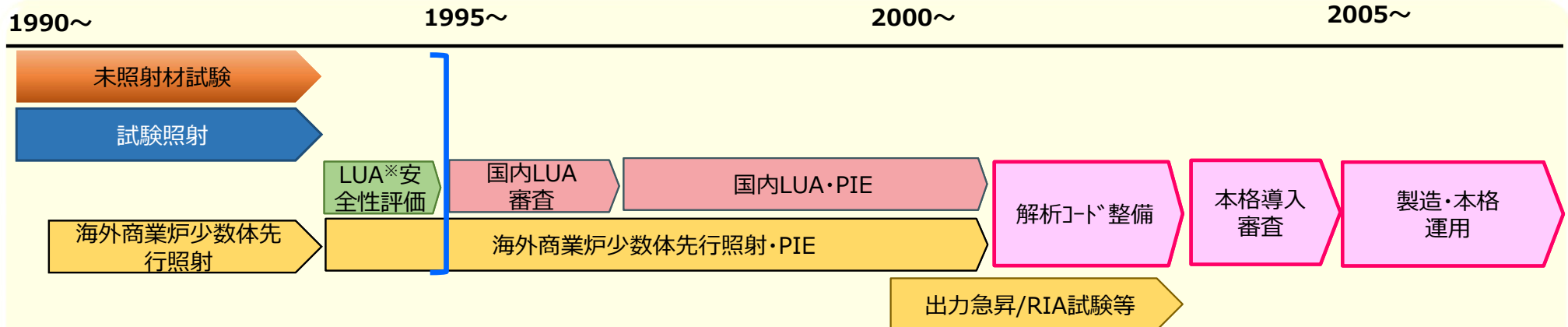
5. Crコーティング被覆管の早期導入に向けた協議

- Crコーティング被覆管の早期導入に向け事業者間で対応を協議中
- 導入判断にはLTA照射が必要であり、これを円滑に進めるためLTA照射の予見性を高めることが重要

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(2022.12.12)資料を一部更新

6. LTA実現に向けた課題①：Crコーティング影響の特定

- 新設計燃料の導入においては、燃料安全評価を抜け漏れなく実施する必要あり
- 優先度の高い評価項目を見定めることが、Crコーティング被覆管の早期導入のため重要
(左下図：原子力学会での議論を基礎に作成中のCrコーティング被覆管の重要度分類表^[1])

【課題】

評価項目に対する意見が大きく相違した状態(例：評価項目の抜け漏れ、優先度に対する認識違い)となる可能性あり (➡LTA審査の手戻り、新設計燃料の開発の大幅遅れが生じるおそれ)

【対策案】

ステークホルダー間の意見交換を開発初期段階から実施する (右下図：米国ATF開発の先行例^[2])

被覆管外面のCrコーティングが燃料挙動に影響する可能性	影響レベル (性能向上：赤字)	知識レベル
	H: 影響が明確 M: 影響が有意となる可能性あり L: 影響なし、または定性的に影響が軽微	H: 評価モデル設定が可能 M: 影響評価は可能だが、データ拡充が必要 L: 評価に必要なデータが限定的

被覆管外面のCrコーティングの欠陥(製造時及び使用中の割れ、はがれ)が燃料挙動に影響する可能性	影響レベル	知識レベル
	H: 影響が明確 M: 影響が有意となる可能性あり L: 影響なし、または定性的に影響が軽微	H: 評価モデル設定が可能 M: 影響評価は可能だが、データ拡充が必要 L: 評価に必要なデータが限定的

評価項目	影響レベル (性能向上：赤字)	知識レベル
燃料格納 閉込の確率(1) (過剰燃焼)		
燃料格納 閉込の確率(2) (過剰燃焼)		
燃料格納 閉込の確率(3) (過剰燃焼)		
燃料格納 閉込の確率(4) (過剰燃焼)		
燃料格納 閉込の確率(5) (過剰燃焼)		
燃料格納 閉込の確率(6) (過剰燃焼)		
燃料格納 閉込の確率(7) (過剰燃焼)		
燃料格納 閉込の確率(8) (過剰燃焼)		
燃料格納 閉込の確率(9) (過剰燃焼)		
燃料格納 閉込の確率(10) (過剰燃焼)		
燃料格納 閉込の確率(11) (過剰燃焼)		
燃料格納 閉込の確率(12) (過剰燃焼)		
燃料格納 閉込の確率(13) (過剰燃焼)		
燃料格納 閉込の確率(14) (過剰燃焼)		
燃料格納 閉込の確率(15) (過剰燃焼)		
燃料格納 閉込の確率(16) (過剰燃焼)		
燃料格納 閉込の確率(17) (過剰燃焼)		
燃料格納 閉込の確率(18) (過剰燃焼)		
燃料格納 閉込の確率(19) (過剰燃焼)		
燃料格納 閉込の確率(20) (過剰燃焼)		

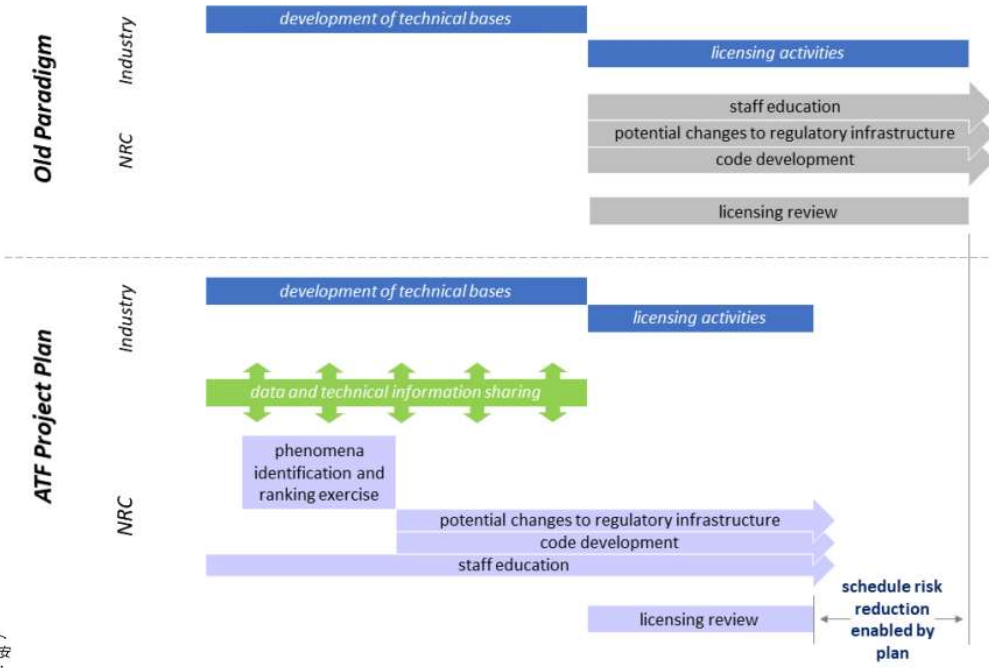


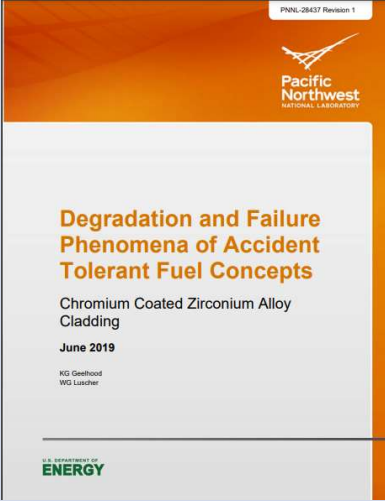
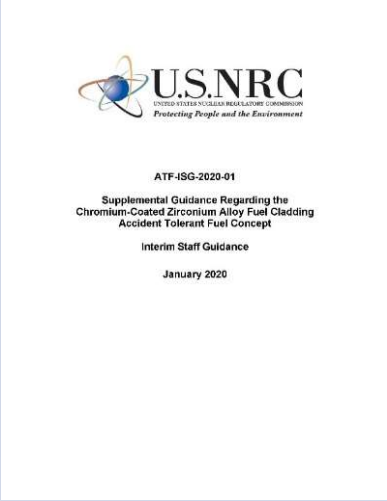
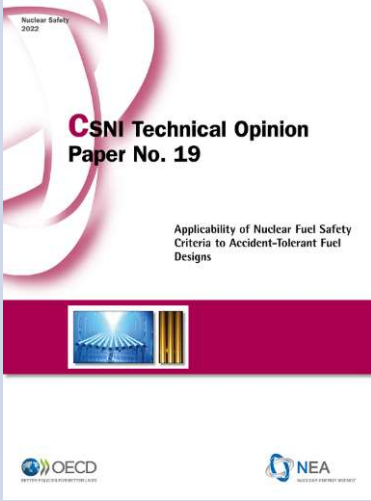
Figure 3-1 New Paradigm for the ATF Project Plan

[1]日本原子力学会2022年秋の大会 核燃料部企画セッション「炉心燃料の安全高度化に向けた原子力学会での体系的活動について(4)事故耐性燃料(ATF)の実用化に向けたワーキンググループ活動

[2] U.S.NRC "PROJECT PLAN TO PREPARE THE U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION FOR EFFICIENT AND EFFECTIVE LICENSING OF ACCIDENT TOLERANT FUELS" Version .1.2 September 2021

(参考)Crコーティング被覆管の技術的確認事項の整理

- Crコーティング被覆管の技術的知見と燃料性能及び安全設計評価への影響をまとめた資料があり評価項目の重要度分類レビューの参考として活用している

<p>米国パシフィック・ノースウェスト国立研究所 (PNNL) Degradation and Failure Phenomena of ATF Concepts, Chromium Coated Zirconium Alloy Cladding (2019)</p>	<p>米国原子力規制委員会(U.S.NRC) ATF-ISG-2020-01 Supplemental Guidance regarding the Chromium Coated Zirconium Alloy Fuel Cladding ATF Concept (2020)</p>	<p>経済協力開発機構/原子力機関 (OECD/NEA) CSNI Technical Opinion Paper No.19 Applicability of Nuclear Fuel Safety Criteria to ATF Designs (2022)</p>
		
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Cr膜形成によるZr被覆管の材料特性・挙動への影響と、規制基準への影響を整理 ➤ 新たな損傷モード等も抽出し、知見拡充が必要な項目を特定 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Crコーティング被覆管の審査確認ポイントをまとめた審査官向けガイダンス(中間報告) ➤ 技術論点や重要度についてはPNNL報告書を引用 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Crコーティングを含むATF導入に向けた技術的論点を整理 ➤ Crコーティング被覆管については、各国開発状況も踏まえ、知見拡充が必要な項目を特定

[1] <https://www.nrc.gov/docs/ML1917/ML19172A154.pdf>

[2] <https://www.nrc.gov/docs/ML1934/ML19343A121.pdf>

[3] https://www.oecd-nea.org/upload/docs/application/pdf/2022-07/7576_top_atf_2022-07-13_14-33-3_535.pdf

6. LTA実現に向けた課題②：燃料安全評価への影響確認

- 従来の新設計燃料の実装においては、試験照射等で燃料安全評価に必要な十分なデータ(照射挙動を含む)を取得した後に先行照射の審査を開始
- Crコーティング被覆管を早期導入するには、研究炉での試験照射で照射挙動を先行取得しながら、段階的にLTA照射を進める審査スキームが有効
- さらに、上記の審査スキームをシームレスに進めるため、LTA照射後のCrコーティング被覆管の照射挙動をタイムリーに確認し、燃料安全評価に反映することが重要
- LTA照射挙動のタイムリーな確認のためには、原子炉サイトでの非破壊検査、燃料集合体からの燃料棒の引抜、ホットセルへの輸送と、ホットセルPIEが必要（下表）

【課題】

照射実績等の開発進捗度に応じて段階的に進められる審査スキーム、及び上記の原子炉サイト作業につき、現在の法体系等の観点からの実現性が不透明

【対策案】

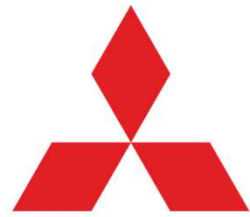
上記の審査スキーム及び原子炉サイト作業の実現性をステークホルダー間でLTA開始前に明らかにしておく

照射挙動	原子炉サイト検査	棒引抜	棒輸送***	ホットセルPIE
腐食、Cr溶出	ECT酸化膜厚さ測定*	○	○	金相観察、水素分析
外径変化	外径測定(燃料棒引抜後)**		○	パンクチャ試験(内圧測定)
燃料棒伸び/曲がり	外観観察	-	-	-
機械特性変化	-	○	○	引張試験、疲労試験
摩耗	外観観察(燃料棒引抜後)**		○	金相観察、硬さ試験

*Cr酸化膜が薄く測定不可の可能性 **海外商業炉の実績 ***集合体輸送は長期冷却要かつ輸送コスト高

7. まとめ

- Crコーティング被覆管は、事故時酸化脆化の抑制による安全性向上と、通常時耐食性の向上によるプラント運用効率化への寄与の両立が期待される技術であり、早期導入に向け開発を進めている。
- 事故時及び通常運転時の性能把握に向け、炉外試験によるデータ取得及び評価を進めるとともに、日米協力の基でJAEA、INLと連携し、米国研究炉ATRにおいて照射実績を取得している。
- 早期導入に向けた対応について事業者間の協議を進めており、この導入判断に必要な少数体先行照射（LTA照射）を円滑に進めるための課題を整理している。LTA照射の実現に係る課題解決の予見性を高める準備が重要であり、ステークホルダーと前もって意見交換/相談することが有効である。
- Crコーティング被覆管のLTA照射及び早期導入の円滑な実現に向け、引き続き照射影響を含む知見の取得及び拡充と性能評価を実施するとともに、学会WGを含むステークホルダーとの議論の場で検討を進める。



MITSUBISHI
HEAVY INDUSTRIES

MOVE THE WORLD FORWARD

mitsubishi
HEAVY
INDUSTRIES
GROUP