

参考資料1

資料1-4

Cr-Zryの開発経緯とPIRT全体概要の説明

2025年10月28日
佐藤 大樹 (MHI)

2025/10/28

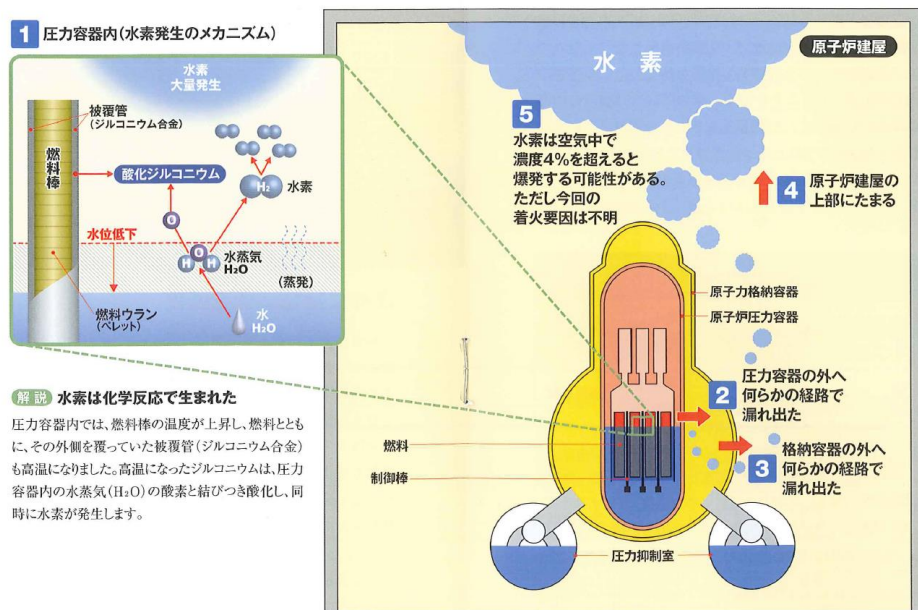
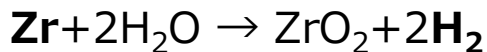
三菱重工業株式会社

1. CrコーティングZr合金被覆管 (Cr-Zry) の開発経緯
 1. 事故耐性燃料(Accident Tolerant Fuel)とは？
 2. Cr-Zryの技術概要と開発状況
 3. Cr-Zryの開発ロードマップ
2. PIRT全体概要の説明
 1. 軽水炉燃料の安全設計と燃料被覆管の役割
 2. 軽水炉燃料の階層的な安全要求の展開
 3. Cr-ZryのPIRT作成について
 4. Cr-Zry PIRTの説明の進め方
 5. Cr-Zry PIRTの論点／悩みどころ
 6. Cr-Zry PIRTの意見募集フォーム

1. CrコーティングZr合金被覆管 (Cr-Zry) の開発経緯

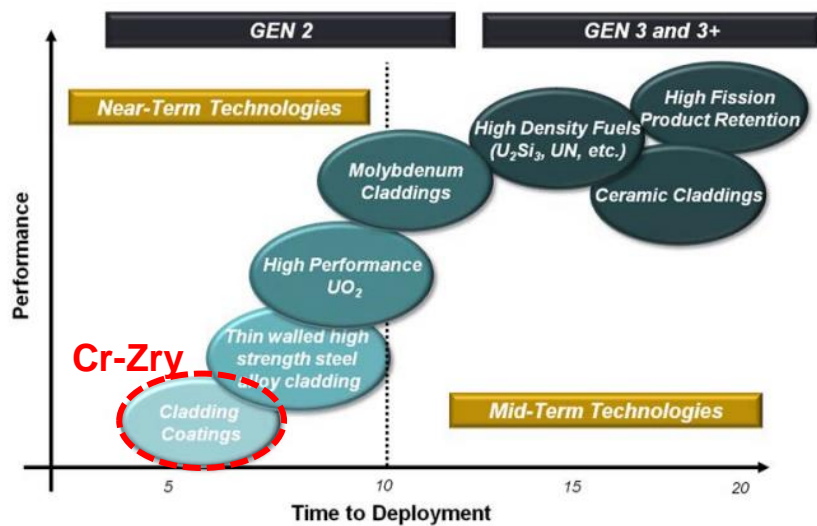
1.1 事故耐性燃料(Accident Tolerant Fuel)とは？

- 1F事故の教訓から、酸化発熱・水素発生が少ない燃料被覆管として開発
- 近年はAdvanced Technology Fuelとの見方も浸透
- 三菱は2019年度からNEXIP補助事業としてCrコーティング被覆管を開発



東京電力・福島第一原子力発電所 ここがポイント 事故調査報告書
 電気新聞特別号vol.28

1F事故(建屋水素爆発)の要因



A.G. SOWDER, "CHALLENGES AND OPPORTUNITIES FOR COMMERCIALIZATION OF ENHANCED ACCIDENT TOLERANT FUEL FOR LIGHT WATER REACTORS: A UTILITY-INFORMED PERSPECTIVE", IAEA-TECDOC-1797

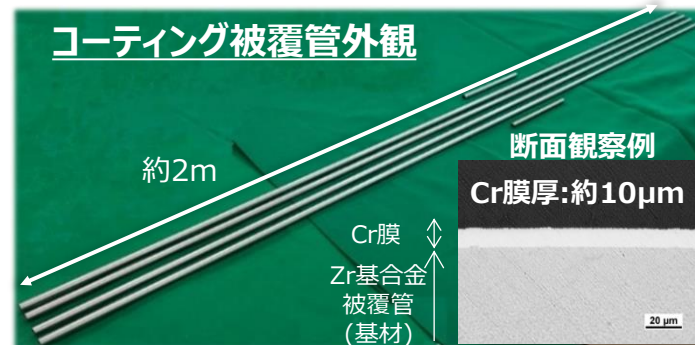
事故耐性燃料の候補と導入までの期間

1.2 Cr-Zryの技術概要と開発状況

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

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（下表）。
- プラント運用高度化(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：本シリーズ発表)

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：本シリーズ発表)
	通常運転時、運転時の異常な過渡変化時	事故時(LOCA等)	
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

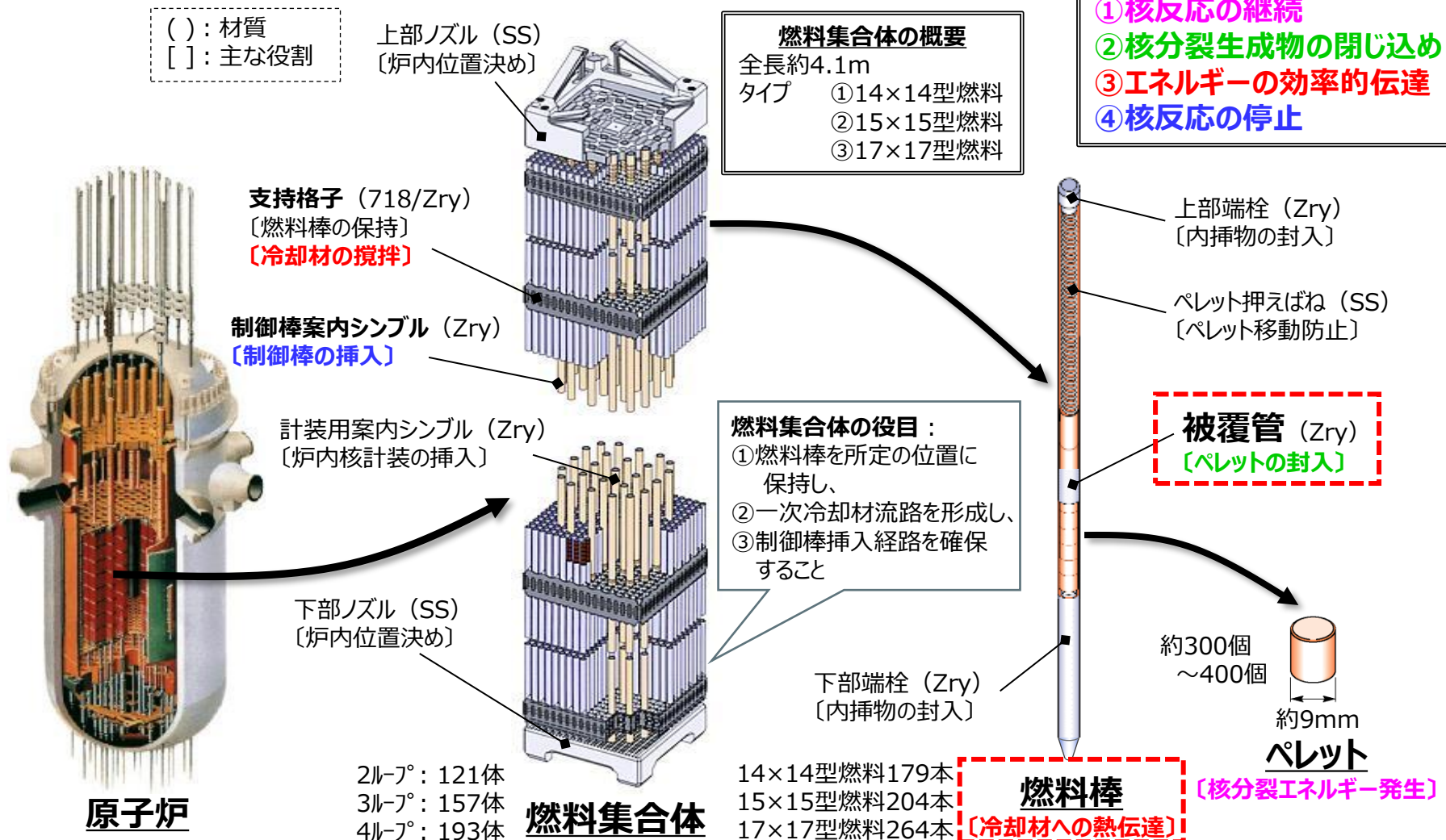
1.3 Cr-Zryの開発ロードマップ

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)			<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;">許認可</div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;">商用炉照射</div>
技術実証段階 (TRL4-6)	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">RIA/LOCA、出力急昇試験</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">商用炉照射 (少数体先行照射)</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">規格・基準の策定</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">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)</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">ふるまい解析コードの改良、検証</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">検査技術の確立</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">製造技術の確立</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">材料及び模擬燃料棒照射試験</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">量産に向けた準備</div>			
原理実証段階 (TRL1-3)	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">適用性評価に必要なデータの整備(材料特性試験)</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">製造技術の確立 (試験片、端栓溶接)</div>			

2. PIRT全体概要の説明

2.1 軽水炉燃料の安全設計と燃料被覆管の役割

- ▶ 原子燃料は単なるエネルギー源ではなく、安全性確保のための設計が必要。
- ▶ 燃料被覆管の安全機能は**閉じ込め機能**と**冷やす機能**



【燃料に要求される役割】

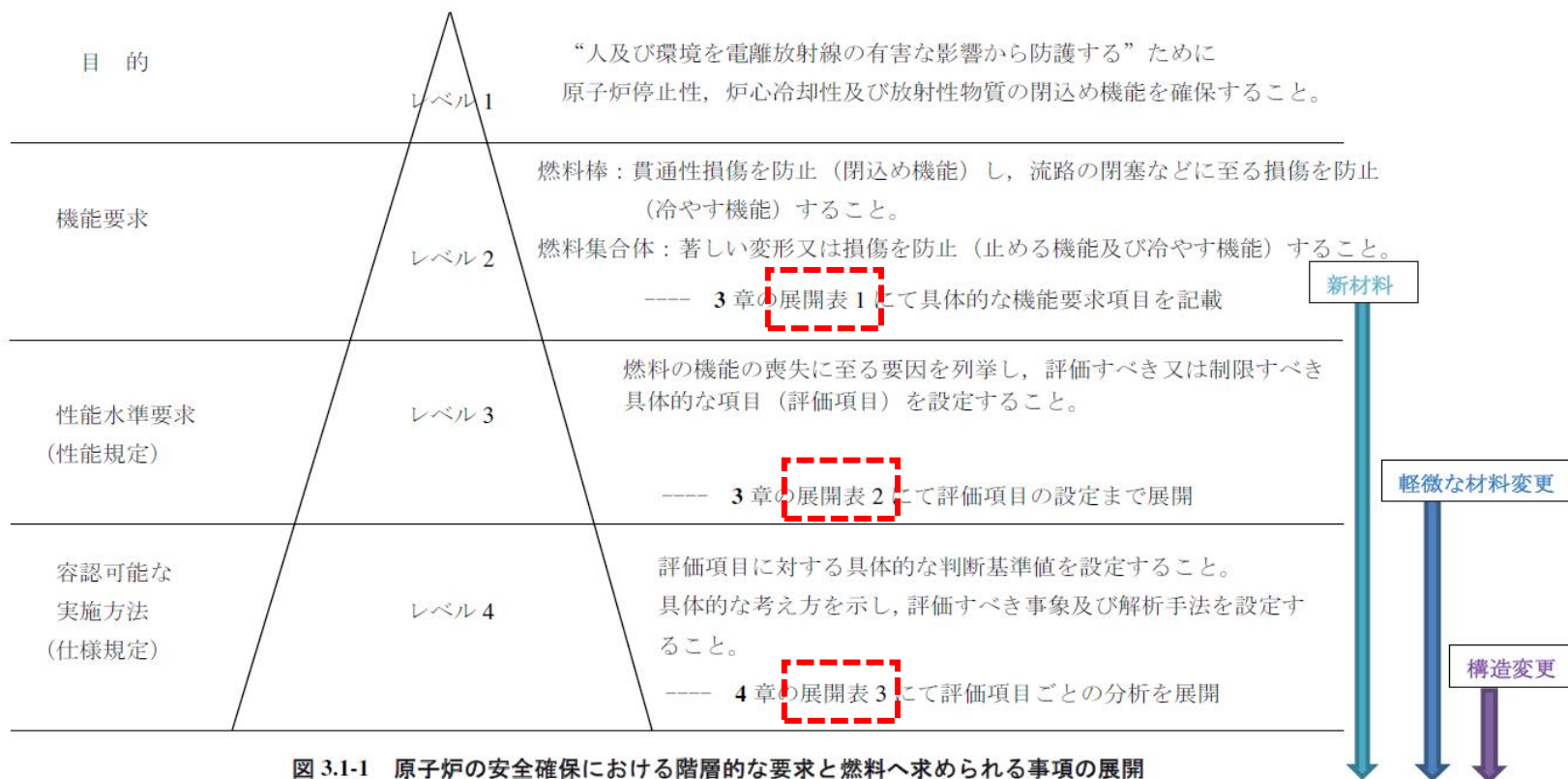
- ①核反応の継続
- ②核分裂生成物の閉じ込め
- ③エネルギーの効率的伝達
- ④核反応の停止

被覆管 (Zry)
〔ペレットの封入〕

燃料棒
〔冷却材への熱伝達〕

2.2 軽水炉燃料の階層的な安全要求の展開

- ◆ 原子炉の安全確保における階層的な要求に応じ、燃料への要求事項が展開され、表形式で整理されている（展開表1,2,3）*
- ◆ **Crコーティングは、被覆管外面に薄いCr膜を付与するものであり、被覆管の軽微な材料変更～構造変更**に該当すると考えられる。



*日本原子力学会標準委員会技術レポート

「発電用軽水型原子炉の炉心及び燃料の安全設計に関する報告書 第1分冊：炉心及び燃料の安全設計（AESJ-SC-TR009-1：2021）」

- ◆ 展開表3の「具体的な考え方」には、現行燃料（Zry被覆管）の評価項目毎に損傷メカニズムに基づく損傷防止の考え方が示されている。
- ◆ Cr膜はZry被覆管の外面に密着しており、界面で**相互作用**する。またCr膜は被覆管の外面となり、被覆管と接触する支持格子（718合金またはZry）及び冷却水（事故時には水+水蒸気）と**相互作用**する。
- ◆ 上記の相互作用による燃料安全設計への影響は、**Cr膜に特徴的な材料特性・挙動**による。この観点で、Crコーティングの影響レベルとその知識レベルを、展開表3をベースにCr-Zry PIRTとして整理した。
- ◆ Cr膜影響あり項目の知見拡充方法を個票に示した。

2.3 Cr-ZryのPIRT作成について [2/3]

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

■ 燃料棒 閉込め機能(1) : 通常運転時

評価項目	具体的な考え方	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	個票	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
燃料棒内圧	被覆管の内圧が上昇し、内外圧力差による通常運転時の外向きのクリープ変形が破損しないこと。 (被覆管の外向き変形によるペレットと被覆管のギャップの増加によって燃料中心温度が上昇しペレットの溶解を生じないこと。)	Cr被覆のクリープ特性が従来の被覆管材料(Zr合金)と異なることにより、Cr被覆が被覆管のクリープ強度に影響する可能性がある。	L-M: 薄いCr被覆による被覆管全体のクリープ強度への影響は軽微と予想されるが、ZrよりもクリープしにくいCr被覆による被覆管全体の外向きのクリープ抑制が期待される。	L-M: Cr被覆による被覆管のクリープモデル (Cr被覆なし) への影響を定量的に確認するためには、試験データを取得する必要がある。	001	Cr被覆が被覆管のクリープを抑制する場合、Cr被覆の欠陥位置でクリープ変形が進む可能性がある。	M: 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
被覆管外面腐食による減肉(通常運転時の酸化膜厚)	通常運転時において被覆管外面の腐食による被覆管母材部の減肉が進み、貫通性の損傷に至らないこと。 蒸気クラッド付着に伴う局所熱降膜の影響、及び出力分布面にもともなう局所出力増加の影響についても考慮する必要がある。クラッド付着に起因して燃料棒の輻照密度が局所的に増加するまでの現象はAOA または CIP と呼ばれる。	Cr被覆の耐食性が従来の被覆管材料 (Zr合金) と異なることにより、Cr被覆が被覆管外面の耐食性に影響する可能性がある。 また、Crが溶出し放射化して被ばく評価に影響する可能性がある。	M: Cr被覆の従来材 (Zr合金) よりも高い耐食性が期待される。 M: Crの溶出し放射化して被ばくが増加する方向になる可能性がある。	L-M: Cr被覆による耐食性の向上効果を定量的に確認するためには、試験データを取得する必要がある。 L-M: Cr被覆の溶出し放射化を定量的に把握するためには、試験データを取得する必要がある。	004	Cr被覆の欠陥位置で耐食性が低下し、腐食が局所的に進む可能性がある。	M: Cr被覆の欠陥位置で局所的に腐食が進展する場合、被覆管の強度評価に影響する可能性がある。	L: Cr被覆の欠陥による局所的な耐食性への影響はデータ不足により不明であるため、試験データを取得する必要がある。
被覆管水素吸収	通常運転時の被覆管の水素吸収によって延性が大幅に低下し、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時に想定される熱応力などの負荷に対して被覆管に貫通性の損傷が生じることがないこと。	Cr被覆の腐食に伴う水素発生及び水素吸収が従来の被覆管材料 (Zr合金) と異なることにより、Cr被覆が被覆管の水素吸収に影響する可能性がある。また、Cr被覆により水素吸収率が変化し、腐食量に基づく水素吸収率の評価に影響する可能性がある。	M: Cr被覆の従来材 (Zr合金) よりも高い耐食性により、水素発生及び吸収の抑制が期待される。	L-M: Cr被覆による腐食に伴う水素発生及び吸収の抑制効果を定量的に確認するためには、試験データを取得する必要がある。	005	Cr被覆の欠陥位置で耐食性が低下し、局所的に水素吸収が進む可能性がある。 また、はがれ位置の被覆管外面温度が低下することにより、局所的に水素が蓄積する可能性がある。	M: Cr被覆の欠陥位置で局所的に腐食及び水素吸収が進展する場合には、被覆管の強度評価に影響する可能性がある。	L: Cr被覆の欠陥による局所的な水素吸収への影響はデータ不足により不明であるため、試験データを取得する必要がある。
被覆管コラプス	外圧支配のクリープ変形が進み被覆管がコラプスしないこと。	Cr被覆のクリープ特性が従来の被覆管材料 (Zr合金) と異なることにより、Cr被覆が被覆管のクリープ強度に影響する可能性がある。	L-M: 薄いCr被覆による被覆管全体のクリープ強度への影響は軽微と予想されるが、ZrよりもクリープしにくいCrが被覆管全体のクリープを抑制する可能性もある。	L-M: Cr被覆による被覆管のクリープモデル (Cr被覆なし) への影響を定量的に確認するためには、試験データを取得する必要がある。	002	Cr被覆が被覆管のクリープを抑制する場合、Cr被覆の欠陥位置で局所的にクリープ変形が進む可能性がある。	M: Cr被覆の欠陥が局所的に発生し、その位置で局所的にクリープが進展する場合、影響が有意となる可能性がある。	M: Cr被覆の欠陥による局所的なクリープへの影響を定量的に確認するためには、試験データを取得する必要がある。
被覆管フレットング摩耗減肉	被覆管と接触する構成部材(グリッド)とのフレットング摩耗で貫通性の損傷を生じないこと。 ・燃料の流動不安定振動が生じないこと。 ・通常の流動下での燃料棒、燃料集合体のランダムな振動による被覆管のフレットング摩耗によって、寿命を通じて貫通性の損傷が生じないこと。	Cr被覆の耐摩耗性が従来の被覆管材料 (Zr合金) と異なることにより、被覆管外面の耐摩耗性に影響する可能性がある。	M: Cr被覆の従来材 (Zr合金) よりも高い耐摩耗性が期待される。	L-M: Cr被覆による耐摩耗性の向上効果を定量的に確認するためには、試験データを取得する必要がある。	003	Cr被覆がはがれた被覆管の基材が直接グリッドの被覆管支持部(スプリング、ディンプル)と触れる場合、Cr被覆による耐摩耗性が失われる可能性がある。 また、フレットングがCr被覆のはがれを助長する可能性がある。	M: Cr被覆のはがれが十分に大きい場合、フレットング摩耗が進展する可能性がある。 M: フレットングがCr被覆のはがれを助長する可能性がある。	L: 実際にCr被覆に生じるはがれの大きさを定量的に確認するためには、試験データを取得する必要がある。 L: フレットングがCr被覆のはがれを助長するかどうかを確認するためには、試験データを取得する必要がある。
燃料に混入した異物とのフレットング摩耗	燃料に混入した異物とのフレットング摩耗によって、被覆管に貫通性の損傷が生じないこと。	Cr被覆の耐摩耗性が従来の被覆管材料 (Zr合金) と異なることにより、被覆管外面の耐摩耗性に影響する可能性がある。	M: Cr被覆の従来材 (Zr合金) よりも高い耐摩耗性が期待される。	L-M: Cr被覆による耐摩耗性の向上効果を定量的に確認するためには、試験データを取得する必要がある。	003	Cr被覆がはがれた被覆管の基材が直接グリッドやディンプルに触れる場合、Cr被覆による耐摩耗性が失われる可能性がある。	M: Cr被覆のはがれが十分に大きい場合、フレットング摩耗が進展する可能性がある。	L: 実際にCr被覆に生じるはがれの大きさを定量的に確認するためには、試験データを取得する必要がある。
被覆管の局所水素化による貫通性損傷(製造要因による内外面水素化)	被覆管の内面又は外面から水素化合物の析出と進展が生じ、それによって貫通性の損傷が生じないこと。	Cr被覆の局所的な水素吸収の要因が従来の被覆管材料 (Zr合金) と異なることにより、被覆管の局所的な水素吸収について新たな要因が挙げられる可能性がある。(なお、被覆管内面についてはCr被覆がないため影響はないと考えられる。)	L: Cr被覆には、Zr合金へのN付着による局所水素化のような懸念(知見)は見当たらない。	-	-	Cr被覆の欠陥位置で耐食性が低下し、局所的に水素吸収が進む可能性がある。 また、はがれ位置の被覆管外面温度が低下することにより、局所的に水素が蓄積する可能性がある。	M: Cr被覆の欠陥位置で局所的な水素吸収及び水素蓄積が進展する場合には、被覆管の強度評価に影響する可能性がある。	L: Cr被覆の欠陥による局所的な水素吸収及び水素蓄積への影響はデータ不足により不明であるため、試験データを取得する必要がある。

2.3 Cr-ZryのPIRT作成について [3/3]

PIRT 個票 (No. PWR-コーティング被覆管-001)

記入日: 2025/10/6	
運転状態: 通常運転時(閉じ込め機能)	
損傷モード: 機械的損傷	
損傷位置: 被覆管全体	
評価項目: 燃料棒内圧	
<p>評価の考え方: 被覆管の内圧が上昇し、内外圧力差による通常運転時の外向きのクリープ変形で被覆管が破損しないこと。 (被覆管の外向き変形によるペレットと被覆管のギャップの増加によって燃料中心温度が上昇しペレットの熔融を生じないこと。)</p>	
設計変更の燃料挙動に対する影響とその確認方法	
燃料挙動に影響する可能性	Cr 被膜のクリープ特性が従来の被覆管材料(Zr 合金)と異なることにより、Cr 被膜が被覆管のクリープ強度に影響する可能性がある。
影響レベル *1	L-M: 薄い Cr 被膜による被覆管全体のクリープ強度への影響は軽微と予想されるが、Zr よりもクリープしにくい Cr 被膜による被覆管全体の外向きのクリープ抑制が期待される。
知識レベル *2	M: 炉外試験データより、Cr 被膜は被覆管の熱クリープを抑制する傾向を示した。 Cr 被膜による被覆管のクリープ抑制効果を定量的に確認するためには、照射データを取得する必要がある。
確認方法	解析 ・なし(影響ありの場合、燃料棒ふるまい解析を実施)
	試験 ・熱クリープ試験(未照射材) ・照射クリープ試験(試験炉照射、LTR)
	条件 ・通常運転時条件 (被覆管の温度、周方向応力、高速中性子照射量)
	方針 従来材のクリープモデル及びクリープ試験結果と比較し、クリープ速度が設計上許容できることを確認する。
引用・参考	(なし)
関連 No.	002

*1 影響レベルの定義:
 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

*2 知識レベルの定義:
 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

PIRT 個票 (No. PWR-コーティング被覆管-004)

記入日: 2025/10/5	
運転状態: 通常運転時(閉じ込め機能)	
損傷モード: 化学的損傷	
損傷位置: 被覆管外面	
評価項目: 被覆管外面腐食による減肉(通常運転時の酸化膜厚)	
<p>評価の考え方: 通常運転時において被覆管外面の腐食による被覆管母材部の減肉が進み、貫通性の損傷に至らないこと。</p>	
設計変更の燃料挙動に対する影響とその確認方法	
燃料挙動に影響する可能性	Cr 被膜の耐食性が従来の被覆管材料(Zr 合金)と異なることにより、Cr 被膜が被覆管外面の耐食性に影響する可能性がある。
影響レベル *1	H: Cr 被膜の従来材(Zr 合金)よりも高い耐食性が期待される。
知識レベル *2	M: 炉外試験データより、Cr 被膜により被覆管の腐食増量がほぼゼロになった。 Cr 被膜による耐食性の向上効果を定量的に確認するためには、照射データを取得する必要がある。
確認方法	解析 ・燃料棒ふるまい解析コード(FINE)
	試験 ・オートクレープ試験(未照射材) ・照射試験(試験炉照射、LTR)
	条件 ・通常運転時条件(被覆管外面温度、試験時間) 方針 従来材の試験結果(腐食増量、金相)と比較し、被覆管外面の腐食が低減することを確認する。 試験結果を解析モデルに反映し、被覆管外面腐食の低減効果を定量化する。
引用・参考	(なし)
関連 No.	005

*1 影響レベルの定義:
 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

*2 知識レベルの定義:
 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

2.4 Cr-Zry PIRTの説明の進め方

- ◆ Cr-Zry PIRTの内容をご確認いただくため、Cr-Zry PIRT作成時に着目した**Cr膜に特徴的な材料特性・挙動**の観点から説明する。
- ◆ Crの材料物性・挙動を分類し（下表）、Cr-Zry PIRTに色分け表示した。また、今回説明用に、分類/色分け毎のまとめ表を作成した。

分類（Cr材料特性・挙動）	項目数 ※
クリープ、膨れ・破裂	10
腐食・水素吸収、酸化	11
耐摩耗性・硬さ	3
強度・延性	9
疲労	2
表面粗さ	2
熱膨張・熱伝導	3
その他	9
（外面Cr膜影響なし）	23

- ※
- 展開表3の1つの評価項目に複数のCrの材料物性・挙動が関連する場合、材料物性・挙動の項目毎に行を設けるよう細分化した。
 - Cr-Zry PIRTの各項目に通し番号を付与。

- Cr膜に期待される性能が実際に発揮されるか
- Cr膜が割れたらどのような影響があるか
 - (例) 耐食性は従来材並みか、劣化しないか、割れても向上するか？
- Cr膜がはがれたらどのような影響があるか
- Cr膜の付与自体による安全評価影響はないか
 - (例) Cr膜の照射脆化⇒被覆管全体の延性低下？
 - (例) 炉水中へのCrの溶出？⇒被ばく評価に影響？
 - (例) Cr膜の割れ⇒局所酸化⇒疲労強度に影響？

3つの大項目に分けて設問：

1. 技術課題整理表（PIRT）のカテゴリ分けについて
 - カテゴリ分けした説明が意見募集に有効か、新たなカテゴリ分けのアイデアがあるか、ご意見を伺いたい。

2. 技術課題整理表（PIRT）の内容について
 - Cr-Zryに関する現状知見（照射データ含む）を共有し、Crコーティングによる安全性への影響レベルとその知識レベルについて、ご意見を伺いたい。
 - 項目の過不足について、ご意見を伺いたい。
 - PIRTの範囲外のご質問、ご意見も募集。

3. 技術課題整理表の個票について
 - 技術課題の解決（例：安全評価に必要な知見拡充）方法について、個票もご参考としていただき、ご意見を伺いたい。

