

事故耐性燃料開発に関するワークショップ
2022年12月21日
於：東大・武田先端知ビル・武田ホール

パネルディスカッション・総合討論向け資料

炉心燃料分科会における 先行照射に向けた検討について

日本原子力学会 標準委員会 システム安全専門部会 炉心燃料分科会
先行照射燃料検討ワーキンググループ メンバー

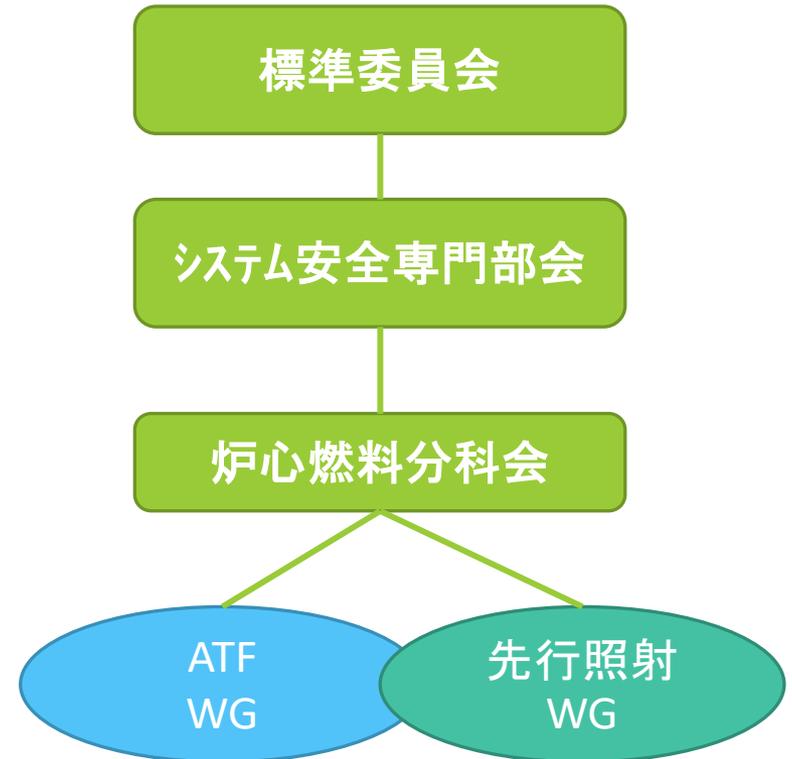
村上 望

(三菱重工業株式会社)

本資料のすべての内容は、先行照射燃料検討ワーキンググループ活動における議論や他メンバーから頂いた示唆を踏まえ、発表者個人の意見をとりまとめたものであり、ワーキンググループや炉心燃料分科会としての総意を取りまとめたものではありません。

1. 炉心燃料分科会における活動について

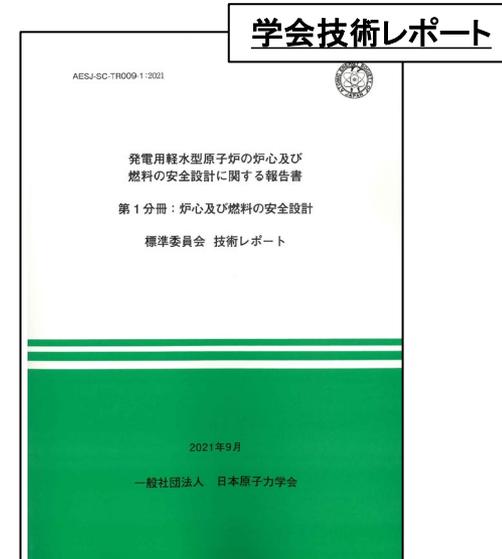
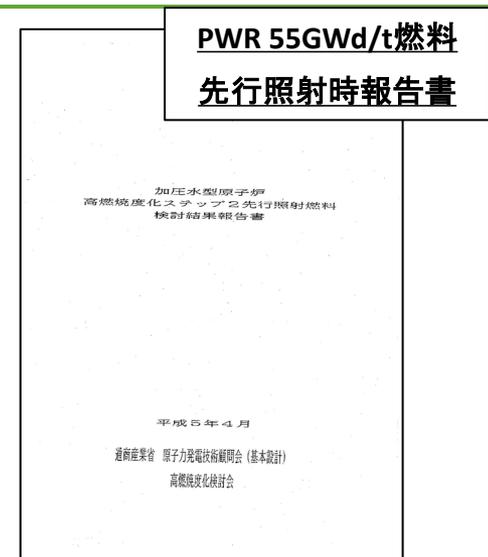
- **炉心燃料分科会**の下に、「ATF-WG」と「先行照射燃料検討WG」が設置され、新型燃料の先行照射の実施にあたっての要件・考え方を整理
- **ATF-WG**では、Crコーティング被覆管を題材として、原子炉の新型燃料を導入する際に確認すべき項目について整理・検討を実施中
- **先行照射WG**では、商業炉での先行照射の実施要件標準化に向けた検討を実施中。2023年ドラフト提示に向け、関係するステークホルダーと連携を図りながら原案検討作業を推進中



2. 先行照射燃料の安全設計確認項目の特定方法

- 過去の先行照射実施時は検討会等が設置され、専門家による議論を経て確認すべき項目を特定*¹
- 現在は、原子力学会の炉心・燃料安全性に関する技術レポート*²にて、現行軽水炉燃料に関する安全要求事項を体系的に取りまとめ
- 技術レポートを基礎に新技術導入によるPIRT*³を作成することで安全性等に関する確認項目を特定可能
 - ①安全上重要な項目(物性・挙動等)の特定
 - ②データ拡充が必要な項目の抽出
- Crコーティング被覆管を例題としたPIRT作成方法は、ATF-WGにて検討中。概要は前回WSや原子力学会にて報告*^{4,5,6}

1. 加圧水型原子炉高燃焼度化ステップ2先行照射燃料検討結果報告書
<https://warp.ndl.go.jp/collections/info:ndljp/pid/1368617/www.meti.go.jp/committee/materials/downloadfiles/g60105b09j.pdf>
2. 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：2021 第一分冊：炉心及び燃料の安全設計」
3. Phenomena Identification and Ranking Table
4. 事故耐性燃料導入に係る安全要求に関する原子力学会の検討状況
https://nsec.jaea.go.jp/ATFWS/pdf/2022s/atfws_material_8.pdf
5. 日本原子力学会2022年秋の大会 核燃料部会企画セッション「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」
6. 日本原子力学会2022年秋の大会 核燃料部会企画セッション「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(5)商用炉先行照射(LUA)の導入に向けたワーキンググループ活動」



(参考)燃料に求められる基本的な安全機能

表 3.2-1 燃料に要求される基本的な安全機能と運転状態との関係

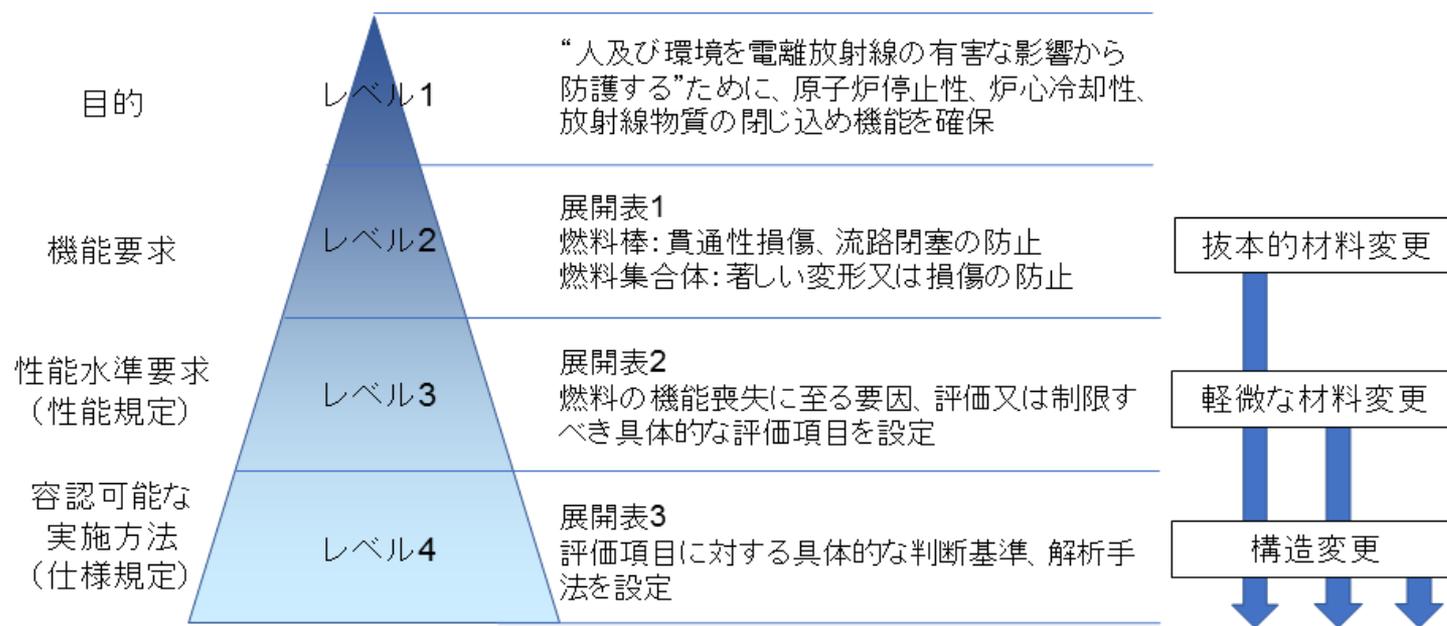
安全機能	対象	燃料に要求される基本的な安全機能	通常運転時 (通常の地震を含む)	運転時の異常な過渡変化時	事故時	地震時 (基準地震動 Ss)
閉込め機能	燃料棒	<ul style="list-style-type: none"> 燃料被覆管に貫通性の損傷が生じないこと 被覆管及び端栓溶接部に貫通性の損傷が生じないこと 	○	○	—*1	○
冷やす機能*2	燃料棒	<ul style="list-style-type: none"> 冷却材の流路面積の大幅な減少に至るような燃料棒の過大な変形が生じないこと 冷却材の流路面積の大幅な減少に至るようなペレットの放出を伴う燃料棒の損傷が生じないこと 冷却材の流路を構成する燃料以外の機器に健全性を喪失するような損傷が生じないこと 	○	○	○	○
	燃料集合体	<ul style="list-style-type: none"> 燃料棒の保持が失われないこと 冷却材の流路面積の大幅な減少又は閉塞となるような変形が生じないこと 	○	○	○	○
止める機能	燃料集合体	<ul style="list-style-type: none"> 制御棒の挿入経路が失われるような損傷及び変形が生じないこと 制御棒の挿入を妨げるような抗力が生じないこと 	○	○	○	○

*1 放射性物質の環境への放出量を評価する事故で燃料被覆管に貫通性の損傷が生じた場合は、破損本数を評価する必要がある。

*2 PWR の各運転状態での低温停止及び ECCS が注水される事象の一部においては、炉心へ注入されるほう酸により止める機能が働くが、この機能の維持は本表の冷やす機能である炉内の流路の確保に係る要求を満足することで維持される。

(参考)燃料に対する安全要求事項

① 新設計燃料の安全性評価に必要な評価項目 (3/3)



設計改良に応じた安全確認項目の検討(技術レポート掲載の階層的な安全要求図との関係)

3. 燃料に対する安全要求事項と展開(PIRTの作成)

7

ATF安全設計の評価項目抽出の考え方

- ▶ 技術レポートの**展開表2**について、軽水炉燃料に一般的な記載内容が確認した。具体的には従来材であるZr合金被覆管とは異なるATF (FeCrAl被覆管、SiC被覆管) にも適用可能か確認した。燃料の機能要求 (閉じ込める、冷やす、止める) のうち、
 - ✓ “閉じ込める”は金属ではないSiC被覆管について追加が必要な項目がある。(例：水素透過性)
 - ✓ “冷やす”、“止める”はほぼ一般的な記載となっている。
- ▶ 新設計燃料に考慮すべき材料特性や照射挙動についての記載を追記し、**展開表2**との繋がりについて確認し、適切な記載内容を検討している。
- ▶ ATF安全設計に必要な評価項目を抜け漏れなく抽出できるようにする。

*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：2015第一分冊：炉心及び燃料の安全設計」(2015.10.21) (転載の上、加筆)

展開表2 *に基づくATF安全設計の評価項目抽出の検討

3. 燃料に対する安全要求事項と展開(PIRTの作成)

重要度分類表 (PIRT) 作成の考え方

9

- ▶ 技術レポートの**展開表3**に基づいて、コーティング被覆管のPIRTを作成：
 - ✓ 技術レポートの**展開表3**の評価項目について、考慮すべき事象の特定のため「燃料被覆管外面のCrコーティングが燃料挙動に影響する可能性」を追記
 - ✓ 各基準値・評価値への「影響レベル」、当該項目に関する「知識レベル」(データ、知見の確認状況)を3段階で評価し、重要度を分類
 - ✓ 米国PIRTなどの海外知見を追記し、差分項目を確認
- ▶ 重要度高(影響レベル高&知識レベル低)の評価項目について、個票作成：
 - ✓ 知識レベル拡充のための方法(解析、試験、設定条件、方針)を整理
- ▶ 次の観点などから、PIRT及び個票について分科会メンバーがレビュー：
 - ✓ 重要度(H/M/L)を分類する考え方に不明な点はないか
 - ✓ 知識レベルに関連し、考慮すべき知見に漏れはないか
 - ✓ 多角的な視点(学术界、産業界、規制の視点)から新たな考慮事項はないか
 - ✓ 追加すべき評価項目(新たな破損モード)はないか
- ATF安全設計の評価項目の重要度を分類できる。
(関連する課題について優先順位を付けることができる。)
- 新知見を反映することにより研究開発課題を更新できる。
- ATF安全設計に必要な評価項目に抜け漏れがないことを確認できる。

PIRT : Phenomena Identification and Ranking Table

3. 燃料に対する安全要求事項と展開 (PIRTの作成)

10

コーティング被覆管のPIRT (一部抜粋)

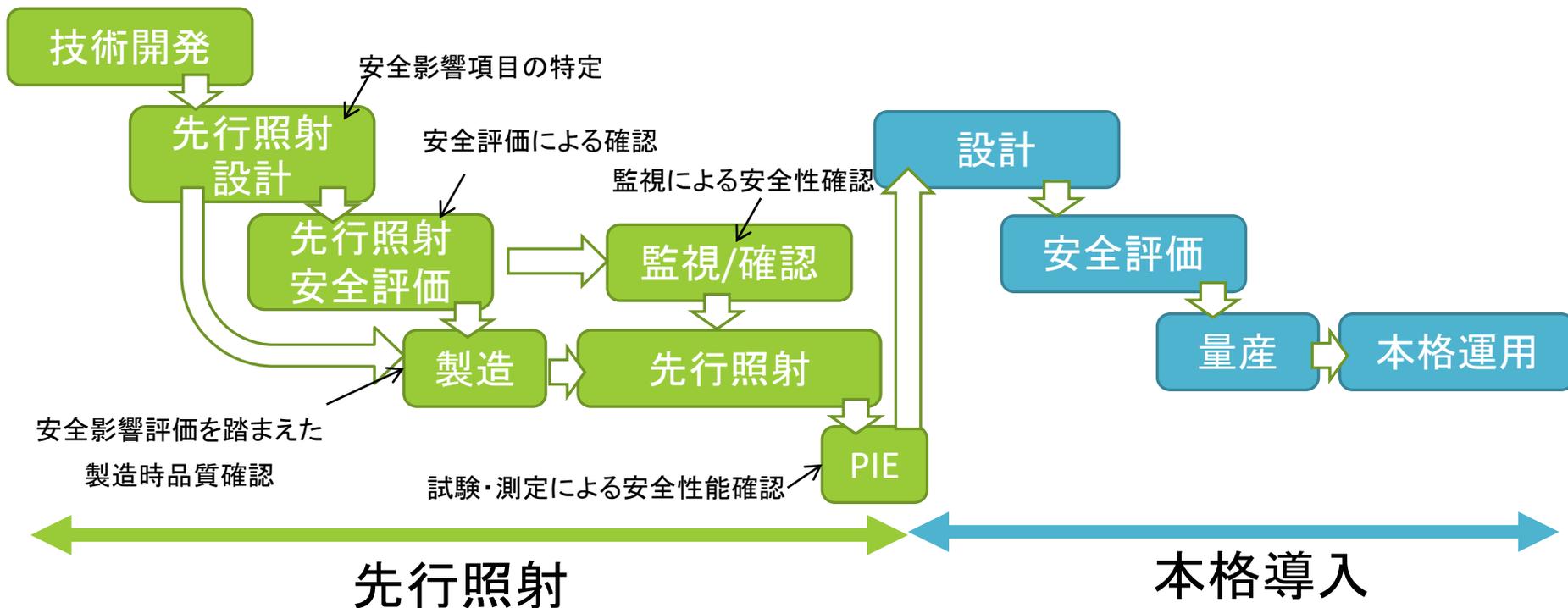
被覆管外面のCrコーティングが燃料挙動に影響する可能性	影響レベル (性能向上: 赤字)	知識レベル
	H: 影響が明確 M: 影響が有意となる可能性あり L: 影響なし、または定性的に影響が軽微	H: 評価モデル設定が可能 M: 影響評価は可能だが、データ拡充が必要 L: 評価に必要なデータが限定的

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	具体的な考案方	影響レベル (性能向上: 赤字)	知識レベル	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
燃料棒内径 (運転時20mm以内の侵蝕及び燃料挙動を定量的に評価も考慮する)	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	影響が明確 影響が有意となる可能性あり 影響なし、または定性的に影響が軽微	評価モデル設定が可能 影響評価は可能だが、データ拡充が必要 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	影響が明確 影響が有意となる可能性あり 影響なし、または定性的に影響が軽微	評価モデル設定が可能 影響評価は可能だが、データ拡充が必要 評価に必要なデータが限定的
燃料棒内径 (運転時20mm以内の侵蝕及び燃料挙動を定量的に評価も考慮する)	被覆管の肉厚が不足し、内外圧力差による過熱運転時の外向きのクラック発生が被覆管の破断につながる。 (被覆管の外向き変形によるプ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プレットの加熱を生じないこと。)	1年未満の被覆による被覆管全体のクラック発生への影響は軽微と想定されるが、ひずみとクラックの発生による被覆管全体のクラック発生への影響は軽微と想定される。	1年未満の被覆による被覆管全体のクラック発生への影響は軽微と想定されるが、ひずみとクラックの発生による被覆管全体のクラック発生への影響は軽微と想定される。	1年未満の被覆による被覆管全体のクラック発生への影響は軽微と想定されるが、ひずみとクラックの発生による被覆管全体のクラック発生への影響は軽微と想定される。	1年未満の被覆による被覆管全体のクラック発生への影響は軽微と想定されるが、ひずみとクラックの発生による被覆管全体のクラック発生への影響は軽微と想定される。	1年未満の被覆による被覆管全体のクラック発生への影響は軽微と想定されるが、ひずみとクラックの発生による被覆管全体のクラック発生への影響は軽微と想定される。
被覆管外面腐食による腐蝕 (過熱運転時の酸化腐食)	過熱運転時において被覆管外面の腐食による被覆管径寸法の減少が、真鍮性の損傷に及ぼさないこと。	1年未満の被覆による被覆管全体のクラック発生への影響は軽微と想定されるが、ひずみとクラックの発生による被覆管全体のクラック発生への影響は軽微と想定される。	1年未満の被覆による被覆管全体のクラック発生への影響は軽微と想定されるが、ひずみとクラックの発生による被覆管全体のクラック発生への影響は軽微と想定される。	1年未満の被覆による被覆管全体のクラック発生への影響は軽微と想定されるが、ひずみとクラックの発生による被覆管全体のクラック発生への影響は軽微と想定される。	1年未満の被覆による被覆管全体のクラック発生への影響は軽微と想定されるが、ひずみとクラックの発生による被覆管全体のクラック発生への影響は軽微と想定される。	1年未満の被覆による被覆管全体のクラック発生への影響は軽微と想定されるが、ひずみとクラックの発生による被覆管全体のクラック発生への影響は軽微と想定される。
被覆管水素吸収	過熱運転時の被覆管の水素吸収によって燃料棒の膨張が過剰となり、過熱運転時及び過熱運転の異常な過熱運転時に想定される熱膨張の過剰の負荷に対して被覆管に真鍮性の損傷が生じることがないこと。	1年未満の被覆による被覆管全体のクラック発生への影響は軽微と想定されるが、ひずみとクラックの発生による被覆管全体のクラック発生への影響は軽微と想定される。	1年未満の被覆による被覆管全体のクラック発生への影響は軽微と想定されるが、ひずみとクラックの発生による被覆管全体のクラック発生への影響は軽微と想定される。	1年未満の被覆による被覆管全体のクラック発生への影響は軽微と想定されるが、ひずみとクラックの発生による被覆管全体のクラック発生への影響は軽微と想定される。	1年未満の被覆による被覆管全体のクラック発生への影響は軽微と想定されるが、ひずみとクラックの発生による被覆管全体のクラック発生への影響は軽微と想定される。	1年未満の被覆による被覆管全体のクラック発生への影響は軽微と想定されるが、ひずみとクラックの発生による被覆管全体のクラック発生への影響は軽微と想定される。
被覆管コアスリ	高圧配のクラック発生が被覆管コアスリを生じないこと。	1年未満の被覆による被覆管全体のクラック発生への影響は軽微と想定されるが、ひずみとクラックの発生による被覆管全体のクラック発生への影響は軽微と想定される。	1年未満の被覆による被覆管全体のクラック発生への影響は軽微と想定されるが、ひずみとクラックの発生による被覆管全体のクラック発生への影響は軽微と想定される。	1年未満の被覆による被覆管全体のクラック発生への影響は軽微と想定されるが、ひずみとクラックの発生による被覆管全体のクラック発生への影響は軽微と想定される。	1年未満の被覆による被覆管全体のクラック発生への影響は軽微と想定されるが、ひずみとクラックの発生による被覆管全体のクラック発生への影響は軽微と想定される。	1年未満の被覆による被覆管全体のクラック発生への影響は軽微と想定されるが、ひずみとクラックの発生による被覆管全体のクラック発生への影響は軽微と想定される。
被覆管フレッシング摩耗傾向	被覆管と燃料棒間の構成材料(グラッド)とのフレッシング摩耗が真鍮性の損傷を生じないこと。 燃料の流動不安定流動が生じないこと。 過剰の流動下での燃料棒、燃料集合体のシフトによる腐蝕による被覆管のフレッシング摩耗が生じないこと。	1年未満の被覆による被覆管全体のクラック発生への影響は軽微と想定されるが、ひずみとクラックの発生による被覆管全体のクラック発生への影響は軽微と想定される。	1年未満の被覆による被覆管全体のクラック発生への影響は軽微と想定されるが、ひずみとクラックの発生による被覆管全体のクラック発生への影響は軽微と想定される。	1年未満の被覆による被覆管全体のクラック発生への影響は軽微と想定されるが、ひずみとクラックの発生による被覆管全体のクラック発生への影響は軽微と想定される。	1年未満の被覆による被覆管全体のクラック発生への影響は軽微と想定されるが、ひずみとクラックの発生による被覆管全体のクラック発生への影響は軽微と想定される。	1年未満の被覆による被覆管全体のクラック発生への影響は軽微と想定されるが、ひずみとクラックの発生による被覆管全体のクラック発生への影響は軽微と想定される。
被覆管の局所水素吸収による真鍮性損傷 (製造原因による内外面水素化)	被覆管の内面又は外面から水素吸収の発生が、真鍮性の損傷を生じないこと。	1年未満の被覆による被覆管全体のクラック発生への影響は軽微と想定されるが、ひずみとクラックの発生による被覆管全体のクラック発生への影響は軽微と想定される。	1年未満の被覆による被覆管全体のクラック発生への影響は軽微と想定されるが、ひずみとクラックの発生による被覆管全体のクラック発生への影響は軽微と想定される。	1年未満の被覆による被覆管全体のクラック発生への影響は軽微と想定されるが、ひずみとクラックの発生による被覆管全体のクラック発生への影響は軽微と想定される。	1年未満の被覆による被覆管全体のクラック発生への影響は軽微と想定されるが、ひずみとクラックの発生による被覆管全体のクラック発生への影響は軽微と想定される。	1年未満の被覆による被覆管全体のクラック発生への影響は軽微と想定されるが、ひずみとクラックの発生による被覆管全体のクラック発生への影響は軽微と想定される。

4. 先行照射の流れと課題

- 先行照射における開発・設計・製造・試験の流れは以下の通り
(PWR 55GWd/t 高燃焼度化ステップ2燃料導入を参考)
- 現状国内には明確な実施要件はなく、これまではケースバイケースで対応
- 確認すべき項目・要件の明確化など、先行照射の安全確保の方法を明確にすることが必要



5. 先行照射の要件検討(1): 検討概要

① 新設計燃料の安全性評価に必要な評価項目(1/3)

- ◆ 商用炉先行照射(LTR/LUA)の安全性評価及び改良効果に必要な評価項目は、新設計燃料の対象部位、技術的達成度を考慮し、以下の手順で決定する。
 - 一般的な評価項目は、技術レポートの性能水準要求(レベル3)の展開表2に基づいて決定する。
 - 新設計燃料で設計改良内容ごとに着目すべき個別の評価項目の特定する。
 - 抜本的材料変更等を行う新設計燃料では、技術レポートの機能要求(レベル2)に立ち返って評価項目を特定する。
 - PIRT(重要度ランクテーブル)などを活用し、“データ量が小”且つ“影響が大”に相当する項目・特性について特に留意する。

5. 先行照射の要件検討(2) 破損(損傷)モードによる整理

① 新設計燃料の安全性評価に必要な評価項目(2/3)

安全設計/評価項目(設計基準事象): Cr-coated被覆管の例

運転状態	損傷モード	評価項目	評価方法			特記事項
			機械設計(解析)	安全評価(解析)	その他	
通常運転時 【閉込め機能】	機械的損傷	内圧	○(クリープ)	-	-	
		クリープコラプス	○(クリープ)	-	-	
		流動振動摩耗	-	-	流水振動試験	表面硬さ影響確認
	化学的破損	腐食減肉	○(酸化反応)	-	-	Cr溶出影響確認要
		水素吸収	○(酸化反応)	-	-	
運転時の異常な 過渡変化時 【閉込め機能】	機械的損傷	歪	○	-	-	
		応力	○	-	-	
		PCI/DHC	-	-	出力急昇試験	
		燃料エンタルピ(PCMI)	-	○	-	制限値確認のため RIA試験実施要*
		燃料中心温度	○	○	-	
		疲労	○	-	-	
	熱的損傷	DNBR	-	○	-	
		燃料エンタルピ(高温融解)	-	○	-	*同上
事故時 【冷却機能】	熱的破損	被覆管温度・酸化量	-	○(酸化反応)	-	割れ等影響確認
	機械的破損	燃料エンタルピ	-	○	-	*同上
	熱/機械的破損	膨れ・破裂	-	○(クリープ)	-	
地震時 【冷却/閉込め】	機械的損傷	応力	○	-	地震時 曲げ応力解析	

5.被覆管物性・挙動確認項目（Crコーティング被覆管の例）

項目		通常運転時	運転時の異常な過渡変化時	事故時 (LOCA/RIA)	設計拡張事象 (DEC)	シビアアクシデント (溶融前)
物性	機械的性質	硬さ 引張強さ/耐力/伸び ヤング率/ポアソン比	表面粗さ 引張強さ/耐力/伸び ヤング率/ポアソン比	脆性限界	—	—
	熱的性質	熱伝導率 熱膨張率	熱伝導率 熱膨張率 相変態温度	熱伝導率 熱輻射率 熱膨張率 密度/比熱 相変態温度	熱伝導率 熱輻射率 熱膨張率 密度/比熱 共晶点	熱伝導率 熱輻射率 — 密度/比熱 共晶点/融点
	化学的性質	酸化反応(水) 水素吸収反応 溶出反応 (通常時被ばく)	酸化反応(水) 水素吸収反応	酸化反応 (水蒸気) 水素生成/吸収	酸化反応 (水蒸気/空気) 水素生成/吸収	酸化反応 (水蒸気/空気) 水素生成/吸収
	核的性質	中性子吸収断面積	—	—	—	—
挙動	被覆管 (単体)	塑性変形 クリープ 座屈 疲労 割れ/剥がれ	塑性変形 クリープ アニーリング 割れ/剥がれ	塑性変形 クリープ バースト クエンチ熱衝撃 割れ/剥がれ	塑性変形 クリープ バースト クエンチ熱衝撃 割れ/剥がれ	—
	燃料棒	FPガス放出	PCI/PCMI	反応度投入特性 (断熱高速変形)	—	—
	燃料集合体	曲がり(棒/集合体) フレットング	DNB	事故時荷重/ 振動	—	—

Crコーティング被覆管で重要と考えられる項目

6. 先行照射の位置づけ: Crコーティング被覆管の例

物性/挙動			開発段階		先行照射段階			許認可段階			
物性	機能的性質	硬さ	未照射材	試験炉照射	運転中	取出し時	照射完了後	許認可解析時	運転中	取り出し時	
物性	機械的性質	硬さ	○	○	—	—	硬さ測定	照射材データ	—	—	
		引張強さ/耐力/伸び	○	○	—	—	引張試験	照射材データ	—	—	
		ヤング率/ポアソン比	○	○	—	—	引張試験	照射材データ	—	—	
	熱的性質	熱伝導率	○	—	—	—	—	未照射材データ	—	—	
		熱輻射率	○	—	—	—	—	未照射材データ	—	—	
		熱膨張率	○	—	—	—	—	未照射材データ	—	—	
		密度/比熱	○	—	—	—	—	未照射材データ	—	—	
		相変態温度	○	—	—	—	—	未照射材データ	—	—	
		共晶点/融点	○	—	—	—	—	未照射材データ	—	—	
		化学的性質	酸化反応	○	○	—	—	非破壊測定	照射材データ	—	—
	水素吸収反応		○	○	—	—	吸収量測定	照射材データ	—	—	
	溶出反応		○	—	水質確認	—	—	照射材データ	水質確認	—	
	挙動	核的性質 被覆管	中性子吸収断面積	解析評価	—	—	—	—	解析評価	—	—
			塑性変形	○	○	—	—	外径測定	照射材データ	—	—
			クリープ	○	○	—	—	外径測定	照射材データ	—	—
コラプス			○	—	—	—	—	未照射材データ	—	—	
アニーリング			○	—	—	—	—	未照射材データ	—	—	
疲労			○	—	—	—	疲労試験	照射材データ	—	—	
バースト			○	—	—	—	破裂試験	照射材データ	—	—	
クエンチ熱衝撃			○	—	—	—	クエンチ試験	照射材データ	—	—	
割れ/剥がれ			○	○	—	—	外観検査	照射材データ	—	外観検査	
燃料棒			FPガス放出	—	—	—	—	ハンクチャ試験	照射材データ	—	—
		照射成長	—	—	—	—	外観検査	照射材データ	—	外観検査	
		PCI/PCMI	—	—	—	—	ランブ試験	ランブ試験データ	—	—	
		反応度投入特性	—	—	—	—	RIA試験	RIA試験データ	—	—	
		燃料集合体	曲がり(棒/集合体)	—	—	—	—	外観検査	LTAデータ	—	外観検査
フレッキング			—	—	—	—	外観検査	LTAデータ	—	外観検査	
DNB特性	—		—	—	—	—	(解析評価)	—	—		
事故時荷重	—		—	—	—	—	(解析評価)	—	—		

7.まとめ

- 先行照射の実施に向け、実施要件や確認事項等について標準化を図るため、原子力学会・炉心燃料分科会の下にワーキンググループを設置し、専門家による議論を実施中
- 新技術導入に伴う安全性への影響(評価対象の追加・変化)に対し原子力学会技術レポートを活用したPIRTを作成することで、設計段階で安全確保の方法を明確化し、さらに先行照射中の監視や、照射後試験を組みわせることで、結果を確認することが可能となり、論理的な安全性の説明が可能となると期待される
- 早期の先行照射／新型燃料の実用化に資するべく、WGでの検討活動に貢献していく

○謝辞

本資料は炉心燃料分科会主査・阿部先生およびWGメンバーの皆様との議論や示唆を受けまとめたものです。御礼申し上げます。