

Cr-Zry SWGの概要報告

2025年12月16日

- 開発状況の報告（1）（三菱殿から概要説明）
- 第1回Cr-Zry SWGでの議論の概要
 - SWGにおける議論の進め方
 - PIRT全体概要
 - SWGでのコメント概要
 - 実施工程案と各回の議題案
 - スケジュール案
- 意見募集の概要

SWGにおける議論の進め方

- ✓ 参加者の知識レベルをそろえ、共通理解を得るため、第1回はPIRTの概要や進め方の説明のみとし、議論は第2回以降に進める。

第1回（済）

- ・Cr-Zryの開発経緯
- ・PIRT概要紹介

意見募集
～集約

第2回以降
・PIRT議論

...

最終回
・総括

第2回までの対応のお願い

PIRT表（配布）

- ・評価項目を細分化
- ・項目番号を付記

意見募集フォーム（WEB）

URL: <https://forms.office.com/r/XABZq3B6cE?origin=lprLink>

第2回以降の進め方

- ✓ 回数：必要に応じ柔軟に対応
- ✓ 時期：集中的に議論できるよう配慮
- ✓ 集約した意見の状況を踏まえ、各回で深堀する切り口（テーマ）を選定



第2回以降における議論のルール

- 投稿者が意見を読み上げ
- 全員が発言
- リード役（牟田）が指名

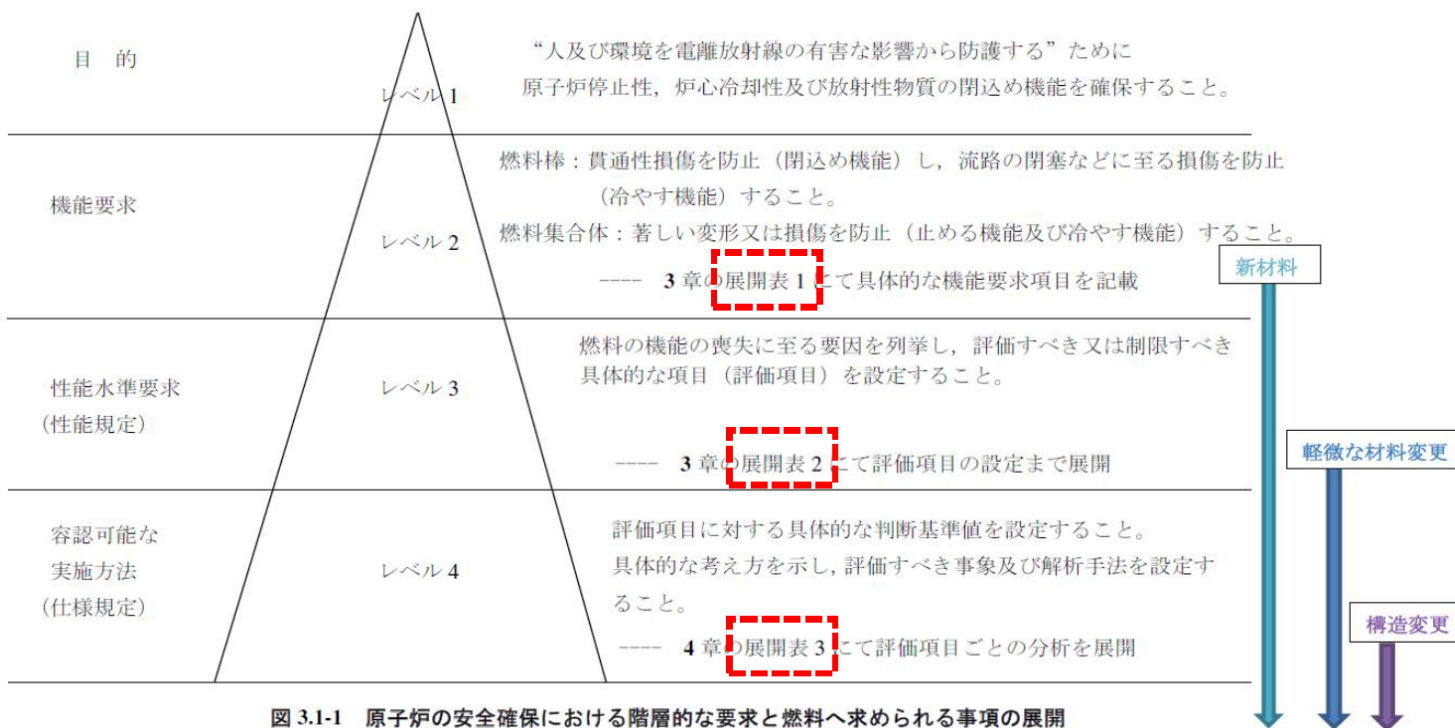
本SWGでは、燃料分野以外の立場からの視点についても積極的に取り入れるため、**第1回終了後に意見募集を行い、多様な着眼点を次回以降の議論に反映する。**

PIRT全体概要(1/4)

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^①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）」

PIRT全体概要(2/4)

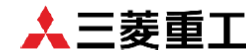
2.3 Cr-ZryのPIRT作成について [1/3]



- ◆ 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。

PIRT全体概要(3/4)

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	備考	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ップ変形が被覆管が破損しないこと。 (被覆管の外向き変形によるバレットと被覆管のギャップの増加によって燃料棒中心温度が上昇バレットの損傷を生じないこと。)	Cr被覆のクリッ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ップ強度に影響する可能性がある。	H: 高いCr被覆による被覆管全体のクリップ強度への影響は軽微と予想されるが、ZrよりもクリップにいくCr被覆による被覆管全体の外向きのクリップ割れが期待される。	L: M: Cr被覆による被覆管のクリップモデル (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ップを抑制する場合、Cr被覆の欠陥位置でクリッ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ップが進展する場合、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ッ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。
被覆管外面腐食(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、貫通性の損傷に至ることがある。 ※クラッド付着に伴う局所熱障壁の影響、及び出力分布歪ともなる局所出力増加の影響についても考慮する必要がある。クラッド付着が原因で燃料棒の出力密度が局所的に増加するまでの現象は2MMA 又は CIP と呼ばれる。	Cr被覆の腐食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腐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。	H: Cr被覆の従来材 (Zr合金) よりも高い耐食性により、M: Crの腐食が有意である場合、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被覆の腐食が局所的に発生し、腐食が局所的に進む可能性がある。	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応力時に想定される割れなどの食害に対して被覆管が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量の評価に影響する可能性がある。	H: 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、局所的に水素が濃縮する可能性がある。	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	外圧応力のクリップ変形が被覆管がコラプスしないこと。	Cr被覆のクリッ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ップ強度に影響する可能性がある。	L: M: 高いCr被覆による被覆管全体のクリップ強度への影響は軽微と予想されるが、ZrよりもクリップにいくCrが被覆管全体のクリッ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ップモデル (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ップを抑制する場合、Cr被覆の欠陥位置で局所的にクリッ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ップが進展する場合、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ッ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。
被覆管フレッチング摩耗領域	被覆管と接触する構成部材(グリッド)とのフレッチング摩耗が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。 ・通常運転時での燃料棒、燃料集合体のランダムな振動による被覆管のフレッチング摩耗によって、寿命を過ぎ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。	H: 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、フレッチングが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、フレッチング摩耗が進展する可能性がある。M: フレッチングがCr被覆のはがれを助長する可能性がある。	L: 実際にはCr被覆に生じ得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: フレッチングが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。
燃料に侵入した異物とのフレッチング摩耗	燃料に侵入した異物とのフレッチング摩耗によって、被覆管が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。	H: 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。	M: Cr被覆のはがれが十分に大きい場合、フレッチング摩耗が進展する可能性がある。	L: 実際にはCr被覆に生じ得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。
被覆管の局所水素発生による貫通性損傷(製造要因による内外面水酸化)	被覆管の内面又は外面から水酸化物の析出と濃縮化により、それによって貫通性の損傷が生じないこと。 (製造要因による内外面水酸化)	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合金への付着による局所水素発生のような懸念(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、局所的に水素が濃縮する可能性がある。	M: Cr被覆の欠陥位置で局所的な水素吸収及び水素濃縮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濃縮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。

PIRT全体概要(4/4)

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	
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。)	
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)	
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。	
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

Cr-ZryのPIRTに関する意見募集の概要

- Cr-Zry PIRT に関する意見募集フォーム（以下のURL）を用いて意見募集を実施。入力締切：12/5(金) **追加コメント歓迎!**

URL:<https://forms.office.com/r/XABZq3B6cE?origin=lprLink>

Cr-Zry PIRT 意見募集フォームの質問文

- 1 お名前と所属機関をご記入ください。例：加治芳行（JAEA）
- 2 資料1-5(1)の技術課題整理表（PIRT）のカテゴリ分けについて、コメントがあれば記入してください。
例：
 - ・「Crの材料特性・挙動」列のカテゴリ分けは有効あるいはわかりづらい
 - ・「Crの材料特性・挙動」列のカテゴリのうち分割または結合した方がよいものがあるか
 - ・新たなカテゴリ分け（例：材料以外の専門分野からの視点など）が良い、またはご提案 等[自由記述]
- 3 PIRTの内容について、コメントがあれば記入してください。
例：
 - ・「Cr膜が健全である場合」（PIRTの左側）の燃料挙動への「影響レベル」や「知識レベル」の記載内容について
 - ・「Cr膜に欠陥がある場合」（PIRTの右側）の燃料挙動への「影響レベル」や「知識レベル」の記載内容について
 - ・現在のPIRTに記載のない、燃料挙動に影響を及ぼす可能性があるCrの材料特性・挙動について
 - ・評価項目（PIRTの行）の過不足について 等[特定の評価項目・PIRT行へのコメントについては、PIRT左側の通し番号をご記入願います]
- 4 資料1-5(2)のPIRTの個票について、コメントがあれば記入してください。
例：
 - ・新たな個票が必要と考えられる項目について
 - ・個票の「確認方法（解析、試験、条件、方針）」の記載内容について 等[特定の個票へのコメントについては、ページ上の個票番号をご記入願います]
- 5 その他ご要望やコメントがあれば記入してください。
[自由記述]

第1回SWGでのコメントの概要

- PIRTの知識レベルについて、例えば将来の高燃焼度化等まで含めた観点あるいは現状の安全基準を満たすのに必要な情報がそろっているかの観点のどちらになるのか。
⇒現在のPIRTは現行の運用内の範囲で整理しているが、運用高度化に適用する期待があるため本観点でのコメントもアンケートの形でいただきたい。
- 現状のPIRT作成にいたる段階での情報などあれば開示いただきたい。
⇒原子力学会炉心分科会での経緯のQ&Aのリストがある。必要な手順を踏んで対応したい。
- 燃料分野ではない核設計などの別分野の視点からのコメントは共通技術基盤での対応あるいは本アンケートで回答するのかどちらか。
⇒幅広い観点でコメントをいただきたいので本アンケートで回答をお願いしたい。各SWGでいただいた意見をATFプラットフォームの全体会合で調整することも予定している。
- 1200°Cの上限温度制限、PWRやBWR向けという前提条件は決めず意見募集させていただく。

実施工程案と各回の議題案

※開催月はめやす

	第1回 2025年10月	第2回 2026年2月	第3回 2026年5月	第4回 2026年10月
1	Cr-Zry SWGの進め方 (JAEA)	—	—	—
2	Cr-Zryの開発経緯とPIRT全体概要(MHI)	—	—	—
3	意見募集(JAEA)	意見集約結果(JAEA)	—	—
4	開発状況の報告 (1) (MHI)	開発状況の報告 (2) (MHI)	開発状況の報告 (3) (MHI)	—
5	—	国内外の最新知見の共有 (1) (JAEA他)	国内外の最新知見の共有 (2) (JAEA他)	—
6	—	PIRT及び技術課題に係る議論 (1) (*1)	PIRT及び技術課題に係る議論 (2) (*1)	—
7	—	—	—	報告書骨子案の議論 (JAEA・MHI) (*2)
8	—	—	—	次年度以降の進め方について議論(JAEA)

(*1)第1回終了後、PIRTや技術課題他に係る意見を検討いただき、第2回・第3回で集中的に議論予定

(*2)第4回会合終了後、報告書(議事録も含む)をとりまとめ、2027年内に公開予定

スケジュール案

- 2年間かけてPIRTをベースにTRLに照らし、技術課題の抽出等を実施
- 第1回SWGでPIRT全体概要を説明。その後意見募集を実施(12月初旬締切)。第2回(2/25を予定)、第3回SWG(5月中旬～末を予定)で集約した意見を中心にPIRTに関する議論を実施。第4回SWGでとりまとめの議論を実施。
- 第2回と第3回は短期間で集中的に議論する予定。必要に応じて開催回数の変更も検討。

	2025年度												2026年度																						
	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月											
SWG							PIRTに係る 意見募集 (12/5締切)																												
							△						△						△																
							第1回						第2回						第3回						第4回										
							Cr-Zry SWG						FeCrAl-ODS SWG						SiC/SiC SWG						共通技術基盤SWG										
ATF-PF							△						△						△						△										
							△						△						△						△										
							△						△						△						△										
							△						△						△						△										
						△ 検討委員会 (7/1@東大)						△ 第1回会合 (Cr-Zry SWG を議論)						△ 第2回会合 (各SWGの 現在地の確認等)						△ 第3回会合 (中間報告)						△ 第4回会合 (最終報告)					

Cr-Zry PIRT に関する意見募集結果の概要

1. 回答状況

- 回答23件（100件に近いコメントあり）、産官学の幅広い分野から意見を取得
- 燃料分野外（炉物理・構造・バックエンド等）の視点も多く含まれた

2. 主なコメント傾向（テーマ別）

① PIRTカテゴリ構成に関する指摘

：カテゴリ統合・追加案、通し番号体系の整理要望、表現改善など

② 影響レベル／知識レベルの基準に関する意見

：判断根拠明確化、レベル表現の見直し提案、将来運用条件の考慮など

③ 欠陥（Defects）に関する議論

：欠陥の定義・スケール・位置の明確化、欠陥個票の新設提案

④ 他分野からの技術的視点

：炉物理影響、事故時の放射率、バックエンド・輸送影響など

⑤ 個票内容に関する指摘

：個票番号体系、記述統一、必要データ的具体化など

⑥ **Cr及びCr被覆材の基礎特性**：Crの照射影響、薄膜形状Crの評価、組成など

⑦ **規制基準**：現行規制基準の見直しの確認

⑧ **製造方法及び使用前健全性**：製造方法・手順の最適化など

⑨ **使用済み燃料の健全性**：中間貯蔵、再処理

ATF-PFのねらい：

「客観的、包括的、かつ漏れ欠けの無い技術課題を抽出し」
その影響度を評価すること

➡ 技術課題に関する事象の洗い出し（PIRTのPI）が最優先

Cr-Zry PIRT見直しの進め方（案）：

- アンケート結果からPIに関するコメントを抽出
- 炉心燃料の安全性確認を中心としたPIに加え、範囲を広げて※
事象を洗い出し（※例：製造、炉物理、輸送・貯蔵、再処理）

PI ➤ 安全性確認PIに必要なフィードバックがないか確認



- 実用化全体の目線から漏れ欠けのない技術課題の洗い出し



RT ➤ ランキングに関するコメントに対応後、影響度評価について協議

Cr-Zryは1F事故後に開発された、最も国内での実用化が近い（と目される）ATFです。

実炉への円滑な導入に向け、ぜひご協力、募集フォームへのご意見入力をお願いいたします。