第 3 回 Cr-Zry SWG 議事録

日 時：2026 年 5 月 29 日(金) 13:30～16:00

場 所：東京大学本郷キャンパス工学部 8 号館 226 会議室

出席者：(全 27 名、順不同、敬称略)

【参加者（対面参加)】

牟田（大阪大学)、中ノ園（九州電力)、江口、山内（原子力規制庁)、槙井（神戸製鋼)、槙井（神戸製鋼）金本（四国電力)、河村（電力中央研究所)、村上（東京大学)、鶴田（東京電力ホールディングス)、篠原、岡田（三菱重工)、佐藤（NDC)、加治、谷口、山下（日本原子力研究開発機構、事務局)

【参加者（Web 参加)】

田伏（関西電力)、小柳、安武（九州電力)、阿部（東京大学)、大野（東北大学)、杉野（日本エネルギー経済研究所)、安元（日本原電)、手塚（エネルギー総合研究所)、福田、宇田川、三輪、垣内（日本原子力研究開発機構)

【資料配付のみ】

森田（ATENA)、松永（GNF-J)、坂本（NFD)、安部田（Westinghouse Japan)、鈴木、茶木（エネルギー総合研究所)、荻田、的場（関西電力)、有馬（九州大学)、安武（九州電力)、久保（原子力規制庁)、下山（原燃工)、大堀（四国電力)、中森（電力中央研究所)、西村（東京大学)、菅原、土屋（東京電力ホールディングス)、佐藤（東京都市大学)、前田（三菱重工)、阿部（日本原子力研究開発機構)

配付資料：

資料 3-0 ：第 3 回 Cr-Zry SWG 議事次第（案）

資料 3-1 ：運営要綱及び秘密保持誓約

資料 3-2：第 2 回 Cr-Zry SWG 議事録（案）

資料 3-3 ：第 3 回 Cr-Zry SWG の進め方（案）について

資料 3-4 ：Cr-Zry PIRT に関する意見募集コメント整理結果

資料 3-4-1 ：展開表 3_PIRT

主要議事：

1. 開会挨拶

リード役の大阪大学牟田先生より、開会のあいさつをいただいた。

2. 運営関連他

事務局より以下の内容を説明し、特段の意見・質問はなかった。

・資料 3-1 に基づき、本委員会の運営要項及び秘密保持誓約について説明し、議事録にオブザーバを含め資料配布先に氏名を記載することをもって守秘義務に署名したものとすることを確認した。

・ATF プラットフォーム全体会合及び Cr-Zry サブワーキングの議事録並びに配付資料は JAEA 研究開発推進部ホームページに公開済みであり、メーリングリスト運用開始後にホームページ URL を参加者へ案内する予定であることを説明した。

・PIRT（パート）案及びコメント対応整理表は議論途中の資料であることから、現時点ではホームページへは掲載せず、参加者限りの資料として取り扱うことを説明した。

・第 2 回 Cr-Zry サブワーキング議事録（資料 3-2）は現在「案」としてホームページに掲載しており、問題がなければ正式版へ差し替える予定であることを説明した。

2. 主要議事概要

(1) 第 3 回 Cr-Zry SWG の進め方

・事務局（JAEA、MHI）より資料 3-3、資料 3-4 及び 3-4-1 に基づき、ATF プラットフォームの位置づけ、第 3 回及び第 4 回以降の Cr-Zry サブワーキンググループ（Cr-ZrySWG）の進め方、PI の再分析方法について説明があった。

内容は以下のとおり

- ATF プラットフォーム（ATF-PF）
  - ① 産官学の国内ステークホルダーが共通の立場で課題抽出、PI（Phenomena Identification)、RT（Ranking Table)、TRL（Technology Readiness Level）評価を実施し、ATF 開発の透明性及び客観性の向上を図ることを目的としている
  - ② 設備・解析コード等の共通基盤整備や人材育成にも貢献するとともに、議論の成果は学会活動や規格・基準の整備に反映されることが期待される
  - ③ ATF-PF は 4 つのサブワーキンググループで構成されており、各サブワーキンググループで個別技術テーマについて詳細な議論を行い、その成果が JAEA レポートとして取りまとめられる。
- Cr-ZrySWG の方針
  - ① PIRT の見直しを実施し、PI の抽出を優先した後、RT 及び TRL 評価を実施す

る

② 第2回ATF―PF会合での阿部先生からの提案を踏まえ、当面はDBA（Design Basis Accident）範囲を優先してPI、RT及びTRLの整理を進める

- 第3回Cr-ZrySWGの進め方及び第4回SWG以降の進め方
  ① 第3回では、アンケートコメントのうち未議論となっているDBA関連のPI（19件）を対象として議論を実施する。
  ② 第4回以降はPIの抜け漏れ確認、RT分析及びTRLとの紐付けを順次進める計画が説明された。また、2026年8月頃にATFプラットフォームで中間報告、2027年2月頃に最終報告を実施し、その後JAEAレポートとして取りまとめる。
- PI再分析方法の方針
  ① PIについては、DBA、安全設計評価、炉心運用高度化、DEC・SA、燃料貯蔵・ハンドリング、再処理、製造、前提条件、波及影響等の技術分野ごとに分類し、アンケートコメントを整理することで、DBAに関する課題を可視化する。
  ② 当面はDBAに着目してPI整理を進め、その後、その他の分野についても順次整理し、さらに、従来どおり燃料直接影響以外の事項については個票で整理する方針とするものの、今後の整理方法については引き続き事務局内で検討する。
  ③ 配布資料中の分類（星取り）については暫定版であり、第3回終了後にメール等で意見を募集し、第4回サブワーキンググループで最終化する予定である。
- 主な質疑
  ① PI再分析に関して、DBAとDECの区分について、燃料破損の有無のみで区分するとLOCAバースト等のDBA事象との整合が取れない可能性があるため、表現を見直した方がよい。
  ⇒事務局より、LOCAバーストもDBA範囲に含まれることを踏まえ、区分の表現を修正する旨説明された。
  ② PI再分析表の丸印の意味について
  ⇒事務局より、各コメントが該当する技術分野を示すための分類（該当の有無）である旨説明された。

(2) Cr-Zry PIRTに関する議論

・議長より、第3回サブワーキンググループでは、事務局がコメント内容及び回答案

を説明した後、コメント提出者から補足説明を行い、その後、参加者全体で議論する流れで進行することが説明され、議題4のコメント審議に移った。資料3-4の内容についてPI方針、PI追加、PIRT拡張、PI説明見直し、PI削除の順に順次議論を進めた。論点整理内容は以下のとおり

- **(PI方針ID11.01) Crコーティング被覆管において、クラッドを起点とした局部腐食生成物が減肉等の腐食挙動へ与える影響をPIRTへ反映すべきかとの質問に対し事務局から拝承する旨回答したが、質問者不在のため別途議論が必要である。**

- **(PI方針ⅠD15.10) Crコーティング被覆管へのECR適用性及び評価指標の考え方について議論が行われ、メカニズムを踏まえたRTでの継続的な検討が必要との認識が共有された。**
  - ECRを従来材と同様に適用するのではなく、まず脆化・酸化メカニズムを整理した上で、その適用性を検討すべきとの意見があった。**【Crコーティング被覆管へのECR適用の妥当性】**
  - ECRは従来材では経験的な相関に基づく評価指標であることに加え、機械強度の劣化に影響する因子が異なると考えられるCrコーティング材に対して適用が難しいとの意見や、Crコーティング被覆管に適用可能か、あるいは新たな評価指標が必要かについて、今後検討が必要との意見があった。一方で、ECRは事故時の負荷指標や従来材との比較指標として活用できる可能性も示された。**【評価指標の考え方】**
  - LOCA時のECRは高温酸化履歴を表す指標であり、急冷時の拘束荷重とは基本的に独立したパラメータとして整理されることが確認された。**【ECRとLOCA時拘束荷重との関係】**
  - 本件はPIのみで結論づけるものではなく、RTにおいて評価指標の妥当性やメカニズムとの関係を含め、継続的に検討すべき課題であるとの認識が共有された。

- **(PI方針ⅠD17.01) Crコーティング被覆管PIRTにおける性能向上の記載方法について、開発者の期待を示す表現ではなく、現象に基づく客観的な表現とする方向で整理することが確認された。**
  - 現行PWR燃料との差分を整理する考え方を基本とし、性能向上に関する

記載は赤字表記を含めて見直すとともに、「期待される」といった主観的表現ではなく、現象ベースの客観的な表現へ修正する方向で整理することとなった。

- **（PI 追加 I D8.01）Cr 皮膜の剥離がフレッティング及び異物影響へ及ぼす影響について議論した。**
  - ✧ 異物フレッティングについても、グリッドフレッティングと同様に「フレッティングが Cr 皮膜の剥離を助長する可能性」を PIRT へ追記することが確認された。**【異物フレッティングに係る PIRT への反映】**
  - ✧ 剥離した Cr 皮膜が異物として燃料健全性やフレッティングに及ぼす影響について議論し、現時点では粉状となる知見があるものの、成膜方法や膜厚による影響を含めて今後も知見を蓄積する必要があるとの認識が共有された。**【剥離した Cr 被膜の影響】**
  - ✧ SG（Steam Generator：蒸気発生器）配管に係るスケール剥離との比較が行われ、Cr 皮膜は SG スケールより著しく薄いことから、同一の現象として扱うことは適切ではないとの認識が示された。**【他事例との比較】**

- **（PI 追加 I D9.08） AOA を PIRT の独立した評価項目とするかについて議論した。**
  - ✧ AOA（Axial Offset Anomaly（軸方向出力偏差異常））は燃料の損傷モードではないため、PIRT の独立した評価項目とはせず、外面腐食（通し番号 2）の評価の中で考慮する整理が適切であるとの考えが示され、その方針で進めることが確認された。**【AOA の PIRT での位置付け】**

- **（PI 追加 I D9.10）Cr-Zr 化合物（Laves 相）の生成とその影響について議論した。**
  - ✧ Cr-Zr 化合物が炉水に曝された場合の耐食性への影響については、Cr 被膜に欠陥がある場合の外面腐食（通し番号 2）へ追記して整理する方針が示された。**【PIRT への反映方針】**
  - ✧ 通常運転時には Cr-Zr 化合物の形成を示す知見はほとんどなく、高温事故時には界面に金属間化合物（Laves 相）が形成されることが報告されているとの説明があった。一方、製造時にも数 nm～数十 nm 程度の極め

て薄い反応層が形成される可能性があるとの知見が示された。**【Cr-Zr 化合物の生成挙動】**

- ✧ Laves 相は高温で成長し脆性を有することから、亀裂進展や皮膜剥離の起点となる可能性が示された。また、水素化物形成の核生成サイトとなる可能性も指摘されたが、現時点では十分な知見はなく、今後の検討課題とされた。**【Laves 相の成長と材料特性への影響】**
- ✧ Cr 皮膜の結晶構造や Laves 相の形成・成長は、Cr の PVD（物理蒸着法）時の温度や成膜条件に依存する可能性があり、成膜方法によって挙動が異なることが議論された。**【成膜条件の影響】**
- ✧ 現状の Laves 相は非常に薄いため、通常運転時の熱伝達や熱機械解析への影響は小さいと考えられる一方、照射や高温により成長する可能性については基礎データが不足しており、今後の検討課題との認識が共有された。**【熱伝達への影響】**

- **（PI 追加ⅠD9.11） DNBR 評価における Cr 膜の熱伝達への影響について議論した。**
  - ✧ コメントは表面粗さだけでなく、Cr 膜自体の熱伝導特性も考慮すべきではないかという趣旨であることが確認された。**【コメントの趣旨の確認】**
  - ✧ 通し番号 12 については、表面粗さが熱伝達へ影響すること及び Cr 膜自体の熱伝導特性も考慮することが分かるよう記載を追記することとした。Cr 膜自体の熱伝導特性も考慮対象となるが、膜厚が非常に薄いため、その影響は軽微であるとの認識が示された。**【PIRT への反映方針、Cr 膜の熱伝導の影響】**

- **（PI 追加ⅠD10.01） Cr 被膜の微小割れが通常運転時及び事故時の腐食・酸化挙動へ及ぼす影響について議論した。**
  - ✧ Cr 被膜の割れや欠陥による局所腐食、高温酸化、水素発生への影響は、各関連評価項目（通常運転時の腐食、LOCA 時の高温酸化等）に反映して整理する方針が示された。**【Cr 被膜欠陥の PIRT での取扱い】**
  - ✧ 微小な割れが局所的な腐食や機械特性の劣化の起点となり、現象を加速させる可能性があるため、被膜の健全性や劣化メカニズムを評価することの重要性が指摘された。**【被膜健全性の評価】**

- ✧ 人工的にクラックを付与した腐食試験では、クラック直下に軽微な酸化膜は確認されているものの、現時点では大きな影響は認められておらず、今後も知見を蓄積していく必要があるとの説明があった。**【現状の知見】**
- ✧ 通常運転時の評価には将来的な水化学条件の変更（LiOH から KOH への変更など）も含めて耐食性を確認していく必要があるとの認識が示された **【水化学条件の考慮】**
- ✧ 停止時の酸化環境から通常運転時の還元環境への遷移が腐食挙動へ及ぼす影響については、現時点では知見が十分ではなく、RT で整理すべき課題であるとの認識が共有された。**【停止時酸化環境の取扱い】**

➢ **（PI 追加ＩＤ15.04、15.05） Cr 被膜の照射による表面性状変化及び水素発生挙動への影響について議論した。**

- ✧ Cr 被膜の照射に伴い、表面性状や濡れ性が従来材の酸化膜表面と異なり、伝熱挙動へ影響する可能性があるため、通し番号 12、16.3、20 に追記する方針が示された。**【照射による表面性状・濡れ性の変化】**
- ✧ Cr 膜に割れ等の微細欠陥がある場合、表面性状や照射効果と相まって伝熱挙動へ影響する可能性があり、同様に関連項目へ追記することとした。**【欠陥がある場合の伝熱挙動】**
- ✧ 照射により酸化膜表面の濡れ性が改善し、親水性が増すことで伝熱特性が向上する RISA 効果が紹介された。Cr 表面でも同様の傾向が想定されるが、Zr 酸化膜との差異は試験による確認が必要との認識が示された。 **【RISA 効果の整理】**
- ✧ Cr は Zr に比べて自発的な水素発生開始温度が高く、水素発生量も大幅に少ないとの知見が示された。一方で、Cr 被膜に割れがある場合のクレバス条件下での水素発生挙動は未解明であり、今後の検討課題とされた。 **【Cr と Zr の水素発生挙動の違い】**

➢ **（PI 追加ＩＤ15.06） Cr の母相への拡散が被覆管の延性へ及ぼす影響について議論し、関連評価項目を「強度・延性」に整理する方針が示された。**

- ✧ Cr が Zr 母相へ拡散した場合の影響は、RIA/RIE および LOCA 時の評価項目へ追記するとともに、「腐食・水素吸収・酸化」から「強度・延性」の

評価項目へ分類を見直す方針が示された。**【評価項目の整理】**

- ✧ LOCA 条件では、Zr 中の Cr 濃度が約 1.5 wt%以上になると脆化するとの海外研究例が紹介され、Cr 拡散による延性低下の可能性を考慮すべきとの補足説明があった。**【Cr 拡散による脆化の可能性】**

- ➢ **（PI 追加ⅠD15.07）Zr-Cr 共晶（共晶反応・金属間化合物形成）による Cr 被膜の耐酸化性低下の可能性について議論し、関連評価項目へ追記する方針とした。**
  - ✧ Zr-Cr 共晶により Cr 被膜の耐酸化性が低下する可能性を、RIA・LOCA 時の評価項目（通し番号 16.02〔新設〕、21.4）へ追記する方針が示された。**【PIRT 評価項目への反映】**
  - ✧ 意見者より共晶反応により Cr 被膜が消失・劣化した後の耐酸化性低下を想定してコメントしたことの補足説明がなされた。ラーベス相などの金属間化合物の形成による保護性低下を指しているか、共晶反応が起こる温度域まで到達した条件で議論しているかコメントがあった。これに対し、RIA では DBA 範囲でも共晶反応温度域（約 1330℃）に達することを想定し、その条件下で Cr 被膜の耐酸化性が維持されるかを確認すべきという趣旨との説明がなされ、その認識の共有がなされた。**【共晶反応・ラーベス相の位置付け、想定温度条件の確認】**

- ➢ **（PI 追加ⅠD19.02）Cr 被膜の欠陥の定義・分類及び機械特性への影響について議論し、欠陥形態を明確化した上で健全性評価を進める必要性が共有された。**
  - ✧ 「欠陥」が何を指すのか（ヘアクラック、貫通クラック、ピッティング、剥離など）の認識を統一し、欠陥形態ごとに整理すべきとの意見があった。**【欠陥の定義・分類の必要性】**
  - ✧ 欠陥がある場合だけでなく、欠陥が発生しない条件や被膜健全性を維持する条件についても整理し、健全・欠陥状態を区別した評価が必要との認識が共有された。**【健全性評価の考え方】**
  - ✧ Cr 被膜のクラックが Zr 母材へ進展し脆性破壊の起点となる可能性や、アモルファス・ナノ結晶 Cr がクラック進展を抑制する可能性が紹介された。一方で、母材へのクラック進展の頻度や影響については定量的知見

が不足していることが確認された。**【クラック進展と機械特性への影響】**

- ✧ ピッティング腐食については現時点で十分な知見がなく、発生の有無を確認すべき評価項目として追加を検討すべきとの意見があった。**【ピッティング腐食の位置付け】**
- ✧ Cr 被膜は高硬度により耐フレッティング性の向上が期待されるものの、実機条件での知見は十分ではなく、今後確認が必要との認識が示された。**【フレッティングとの関係】**

- **（PI 追加ＩD20.01）Cr 被膜欠陥時の異物接触およびフレッティング影響を評価項目へ反映する方針が示され、回答案が了承された。**
  - ✧ 被覆管外面と異物との接触、およびフレッティングによる Cr 被膜剥離の可能性を評価項目へ追記する方針が示され、関連コメントも併せて反映することとなった。**【PIRT 評価項目への反映】**

- **（PIRT 拡張ＩD7.05）炉心燃料の安全設計以外（加工・輸送・貯蔵・再処理等）の評価項目については、PIRT とは別に整理する方針が示された。質問者不在により質問に対する回答のみ実施した。**
  - ✧ 加工工程、輸送、ハンドリング、貯蔵、再処理など燃料サイクル全体への影響も重要な評価項目として整理する必要があるとの認識が示された。また、現行 PIRT は炉心燃料の安全設計に関する PI を対象とし、それ以外の燃料サイクルに関する PI は PIRT へ直接追加せず、分類表（星取り表）には位置付けを残しつつ、詳細は個票等で整理していくこととした。**【評価範囲の整理、PIRT との切り分け、分類方法】**

- **（PIRT 拡張ＩD9.03）Cr コーティングの影響が小さいと考えられる項目も含めて評価対象を整理し、炉心燃料の安全設計以外の項目は個票で整理する方針が示された。**
  - ✧ 端栓溶接部、崩壊熱、未臨界性、線量評価、輸送・取扱い時の強度評価など、Cr コーティングの影響が小さい項目についても確認対象とし、炉心燃料の安全設計以外の PI は個票で整理する方針が示された。個票で整理した項目を今後どのように取り扱うかについては、事務局で引き続き検討することとなった。**【評価項目の整理方針】**

- ✧ 被覆管のたわみによるCr被膜への影響や、製造・輸送時のハンドリング方法については、製造プロセスの中で適切に考慮・管理すべき課題との認識が示された。**【製造・輸送時のハンドリング】**
- ✧ 使用済燃料から剥離したCrの放射化や被ばく影響について議論が行われ、Cr-51は半減期が約30日と短く、十分な冷却期間を経れば影響は限定的と考えられるとの意見が示された。**【使用済燃料輸送時の影響】**
- ✧ 被覆管のたわみがあっても塑性ひずみが生じなければCr被膜は容易には剥離しないと考えられる一方、長尺燃料の製造では実際のたわみ量を踏まえた製造・ハンドリング条件の検討が必要との認識が共有された。**【Cr被膜剥離に関する知見】**

- ➢ **（PIRT拡張ＩＤ15.12）FFRD時のCr酸化挙動や酸素ポテンシャル変化の影響については、燃料挙動と波及影響を切り分けてPIRTへ反映する方針が示された。**
  - ✧ FFRDはDBA-LOCA時に生じる比較的新しい事象であり、PIRTの評価項目として取り扱うことが確認された。**【FFRDの位置付け】**
  - ✧ ペレットとの接触に伴う酸素ポテンシャルの変化により、Crの酸化状態やセシウムとの化学反応・化合物生成などが生じる可能性があり、ソースタームや被ばく評価に影響する可能性があり、今後検討すべき課題との意見が示された。また、燃料そのものの事象ではないものは波及影響として整理し、燃料挙動への影響についてはFFRDの評価項目として整理する方針が示された。**【酸素ポテンシャル変化によるCr化学反応及び被ばく影響、燃料挙動及びそれに係る波及効果に対する評価項目の整理】**
  - ✧
- ➢ **（PI説明見直しＩＤ20.02）Cr-Zr「中間層」の表現については、材料学的に正確な用語へ見直し、ラーベス相など実際の組織を反映した記載に修正する方針とした。**
  - ✧ RIA/RIE時もLOCA時と同様に、「界面反応」ではなく「Cr-Zr中間相の形成」として表現を統一する方針が示された。**【用語の統一】**
  - ✧ 「中間層」は純Cr層とZr合金母材の間に形成される層を意図していたが、意味が曖昧であり、ラーベス相など実際の組織を用いて記載すべきとの意見が示された。**【「中間層」の定義】**

- ✧ 低温では α-Zr 層、高温では β-Zr 層とラーベス相が層分離して形成され、ラーベス相の厚さや形成状態にはばらつきがあることから、「中間層」ではなく実際の組織に基づく表現へ修正する必要があるとの認識が共有された。**【材料学的な表現の適正化】**
- ✧ 用語を機械的に統一するのではなく、形成される組織や現象に応じて適切に書き分ける方針が確認された。**【表現方法】**

- ➢ **(PI 削除ＩD15.15)「高温酸化強度と機械的エネルギーとの相関」に関する評価項目は、相関が明確でないことから削除する方針が了承された。**
  - ✧ 高温酸化強度と機械的エネルギーとの相関は明確ではないとの認識から、当該評価項目を削除する方針が了承され、コメント提出者からも追加意見はなく、事務局案どおり対応することが確認された。

(3) 今後の進め方

・第 4 回サブワーキンググループは**7 月頃の開催を目途**とし、今回未対応となった質問については質問者を確認した上で対応し、日程はメールで調整することとした。

・第 4 回で**PI（Phenomena Identification）の整理を完了**する予定であり、その後 RT および TRL 評価へ進む方針を確認した。

・今後も事務局より冒頭にて説明した進め方・方針に沿って議論を進めることを参加者間で確認し、特段の異論は示されなかった。

以上