第３回Cr-Zry SWGの進め方(案)

日本原子力研究開発機構

2026年5月29日第3回Cr-ZrySWG会合

目次

- 第3回Cr-Zry SWGでの議論の概要
  - ATF-PFの位置づけ及び会議体の全体構成
  - SWGにおける議論の進め方
  - Cr-Zry PIRT見直しの進め方
  - 第2ATF-PFでの阿部先生の提案を受けての対応
  - 第3回Cr-ZrySWGの議論の進め方について
  - 第4回Cr-ZrySWG以降の議論の進め方について
  - SWGとATFプラットフォームのスケジュール案

ATFプラットフォームの位置づけ

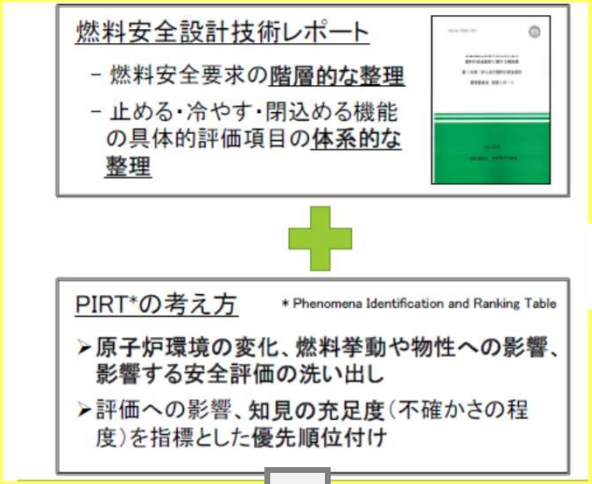
cf. 日本原子力学会2025年秋の大会「ATFsについての企画セッション」

- ATF（Advanced Technology Fuel）の早期の国内実機導入に向けた対応

炉心・燃料の安全設計

LUA標準*【学会：発刊予定】
*燃料の先行照射に係る実施基準

ATF技術レポート
【学会：発刊予定】



反映

これも踏まえ議論

炉心・燃料の安全な運用・管理

規程・規格
（JEACなど）
【法規・民間規格：一部発刊予定】

検査要求など

反映

発電用軽水型燃料の安全高度化ロードマップ【学会】
2024年からローリング実施中
- ➢ 設計による安全性の向上
- ➢ 検査による安全性確保
- ➢ 運転高度化対応の開発（~2030, ~2050）

具体的な内容について議論

ATF-PFの議論内容を反映

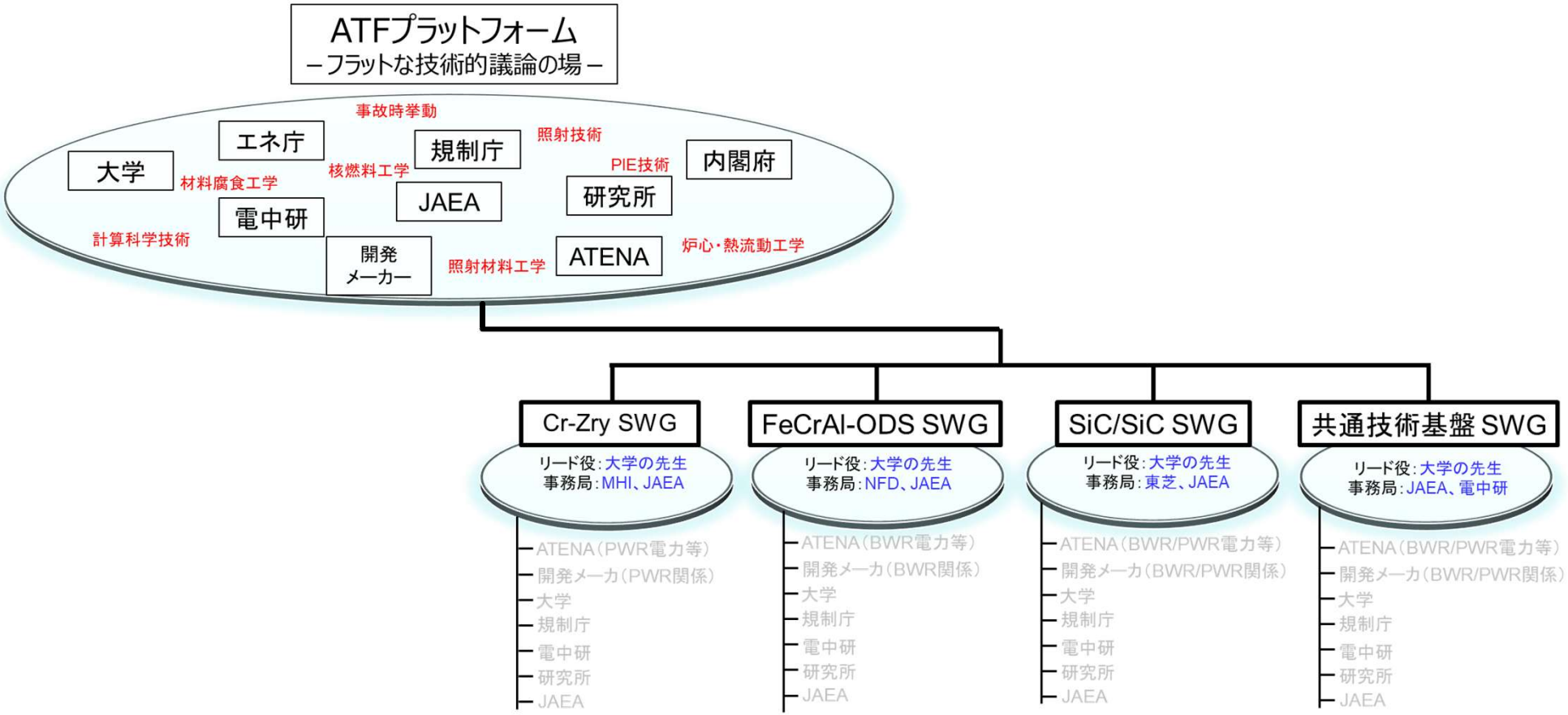
ATFプラットフォーム(ATF-PF)【JAEAが全体事務局】

- ➢ PI整理、PIRT作成およびTRL評価（Cr-Zry, FeCrAl, SiC）
- ➢ 共通基盤整備に係る議論（設備維持・解析コード整備）
- ➢ これらを通じた人材育成への貢献　など

産官学の
国内ステイクホルダ
が同じ立場で議論

ATF-PFの会議体の全体構成

- 全体の議論をATF-PF本会合において、個別技術テーマごとの詳細議論を4つのサブワーキング（SWG）に分けて議論（下図参照）
- 2025年度～2026年度（2年間）で議論し、結果をJAEAのHP上で公開。最終的にはJAEAレポートの形にて発刊する予定。



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
・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（牟田先生）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、**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。**

Cr-Zry PIRT 見直しの基本的進め方

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）：

PI
- 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）
- 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

第2回ATF-PFでの阿部先生の提案を受けての対応

開発の流れとATF-PFの位置

技術マップ → 担当機関の決定 → 時間軸への落とし込みロードマップ → 開発、実用化

DBAまで	PI	RT
DEC、SA	PI	（RT）

提案
- まずはDBAまでのPIを整理しましょう
- CrコートはRTも視野に
- DEC、SAでは、PIまでが精々でしょう
  - ※RTは事故解析コードへの影響度が主となると思慮
  - PFの次の段階へ

・PIには多くの視点がある
・RTの視点も同じ

これらの視点をTRLにあてはめていく
- TRL１～３相当（基礎研究）
- TRL４～６相当（実用化開発）
- TRL７～９相当（実機適用）

PFの所掌範囲の多軸性

- 燃料棒、燃料集合体、といった部材、部品
- 製造、輸送、使用、使用済燃料、再処理、処分といったLife
- 炉内運用、水化学、腐食、他機器への影響、安全
- 製造：工業生産性
- 規制基準、型式認証、民間規格
- 導入インセンティブ

PIの一例（LOCA基準、Crコート材）

技術レポート

部材		要求	基準値	他の基準との関連	考え方
燃料棒/冷やす機能/事故時	被覆管最高温度(PCT) 被覆管高温酸化量(ECR)	LOCA発生時に炉心の露出に伴い高温蒸気による酸化反応が進み，脆化した被覆管が，ECCSの注入による再冠水時の急冷時に生じる熱衝撃(引張)荷重に対して破断しないこと。	〔現行の判断基準値〕 (PCT)：1200℃ (ECR)：15%	・PCT/ECRの基準値の設定において，腐食減肉量及び水素吸収量の影響を考慮する。 ・確率論的安全性評価(PRA)，シビアアクシデント対策の有効性評価などでは，炉心損傷過程に関する知見が少ないことから，本項に示した被覆管最高温度(PCT)：1200℃の判断基準値を炉心損傷の判断基準として取り扱うことがある。	米国などではPCT 2200°F(1204℃)/ECR 17%を基準としている。 国内では15%のECR 基準値の設定に用いているB-J 式を評価においても用いている。一方，海外ではより現実的なCP式を用いている。また，リング圧縮試験から延性とECRの相関を評価する事例もある。 米国ではLOCA 基準の変更が検討されており，水素吸収量への依存性を考慮した基準値への変更とともに，次の要求の追加が検討されている。 ・温度評価におけるクラッド及び酸化膜の考慮 ・ペレット熱伝導率の燃焼に伴う低下の考慮 ・ブレイクアウェイ酸化の評価 漏えい燃料がLOCA時に破断した場合の炉心冷却阻害影響が近年の国内規制対応で論点となった。またOECD/NEA CSNIのWGFSの報告書及び米国の新LOCA基準の検討においては，漏えい燃料棒の本数は限定されるため，炉心の安全性に問題はないとの見解が示されている。

技術レポートはロバストな課題表としているが、部材や要求のレベルでの新規課題がある可能性もある
例：SiC被覆管の端栓、Cr材の水化学

1200℃、15%ECRはCrに適用できるのか？

1200℃はLOCA時の温度履歴からの知見

ECRはZryの水素脆化から⇒Cr材では使える考え方？

⇒Cr材でも同等と考えてよい
⇒確認は必要

基盤研究　TRL4～6
規制基準の検討　TRL7～9

⇒水素透過する？
⇒Crの変形能は十分？
⇒高温クリープは？
⇒界面割れは？

基礎研究（TRL1～3）

様々な視点
多様な意見

後の意見棄却は恐れない

整理学
RTやTRLへの連結

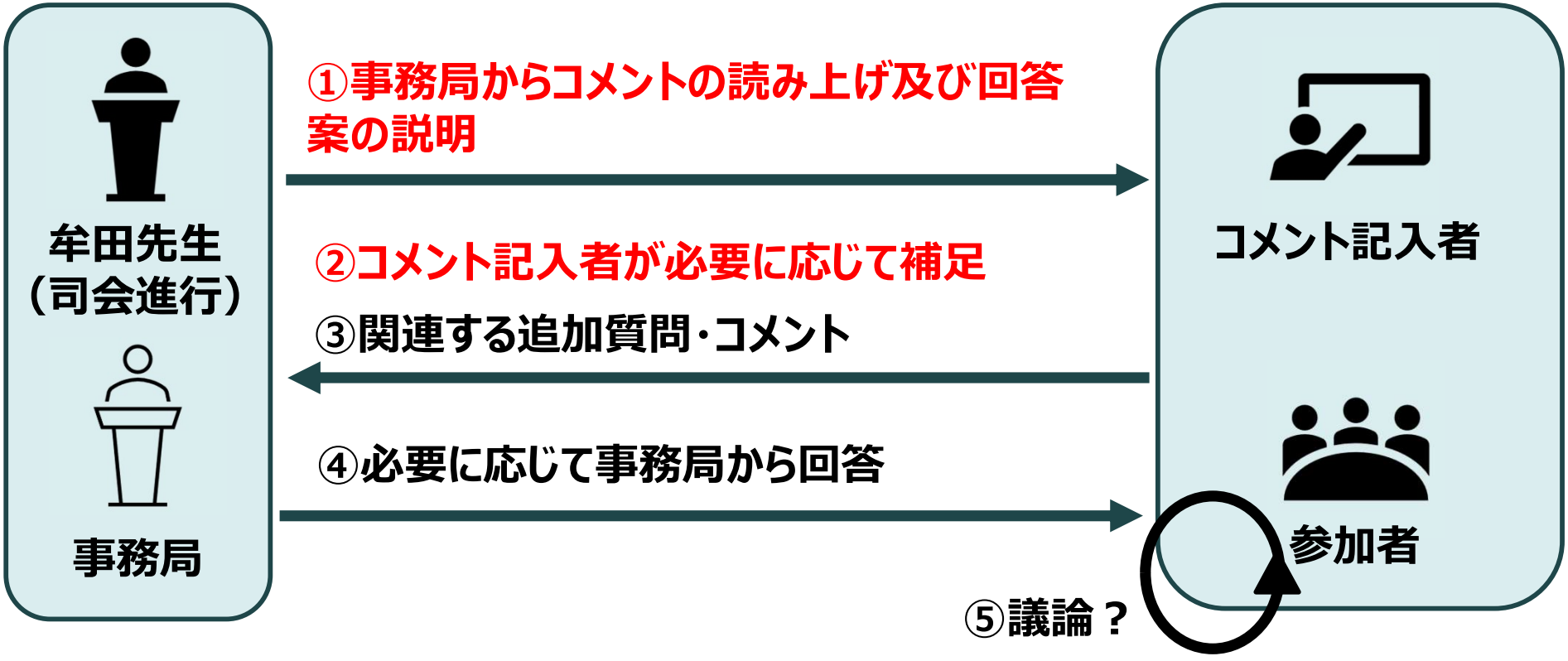
① DBAまでのPIの整理
② DBAまでのRTの整理
③ DEC・SAに係るPIの整理

上記それぞれについて、以下の順で検討
- 欠陥のないCr被膜を付与することによる現行燃料との差分の洗い出し
- Cr被膜に欠陥がある場合
- TRLとの紐づけ

第3回Cr-ZrySWGの議論の進め方について

- まずはアンケートにより頂いたコメントについて、**議論が終わっていないPIRT PI（特にDBA範囲）を優先的に議論する【計19件】。**なお、より多くのコメントを議論するため、以下のとおり議論を進める。

分類1	分類2	ご質問	回答
PIRT PI	PI追加	・【番号2】注釈で記載されているクラッド付着起因のAOAは一つの評価項目に起こし①することが望ましいと思います。	PIRTの項目は炉心燃料の安全設計に関する評価項目であり、燃料の損傷モードに関連①が、AOAは損傷モードではないため、評価項目に起こすではなく、通し番号2の評価において要すればAOAを考慮する、という整理がよいと思います。



第4回Cr-ZrySWG以降の議論の進め方について

詳細はMHI殿よりご説明

①PIの抜け漏れ確認：現行PIRT(＝**現行運用範囲(～DBA)**)のPIの抜け漏れが無い状態

- PIコメントについて、現行の運用範囲内か枠外か、どの技術分野へのコメントかを分析（以下のPI整理表参照）
- 現行PIに対するコメント反映を行う

PI再分析のイメージ【PI整理表】（RTも同様に再分析予定）

PIRT分類	コメント	技術分野					
		安全設計・評価 (DBE, DBA)	安全設計・評価 (炉心運用高度化)	DEC, SA	輸送・貯蔵	再処理	製造
PI追加	○○～	○					
	△△～			○			
	□□～				○		
R根拠補足	●●～		○				
	▲▲～	○					
…							

TRLまで分類できれば、先行照射までに対応すべき項目を特定できる

②RTの分析：現在得られている知見の整理・分析及び今後取得すべき知見の整理（～DBA）

- 本格的なRTコメント分析は第5回SWG以降※を想定（PIと同様の分析を予定）

③ TRLとの紐付け：抜け漏れが無い状態のPI（**～DBA**）に対するTRL評価

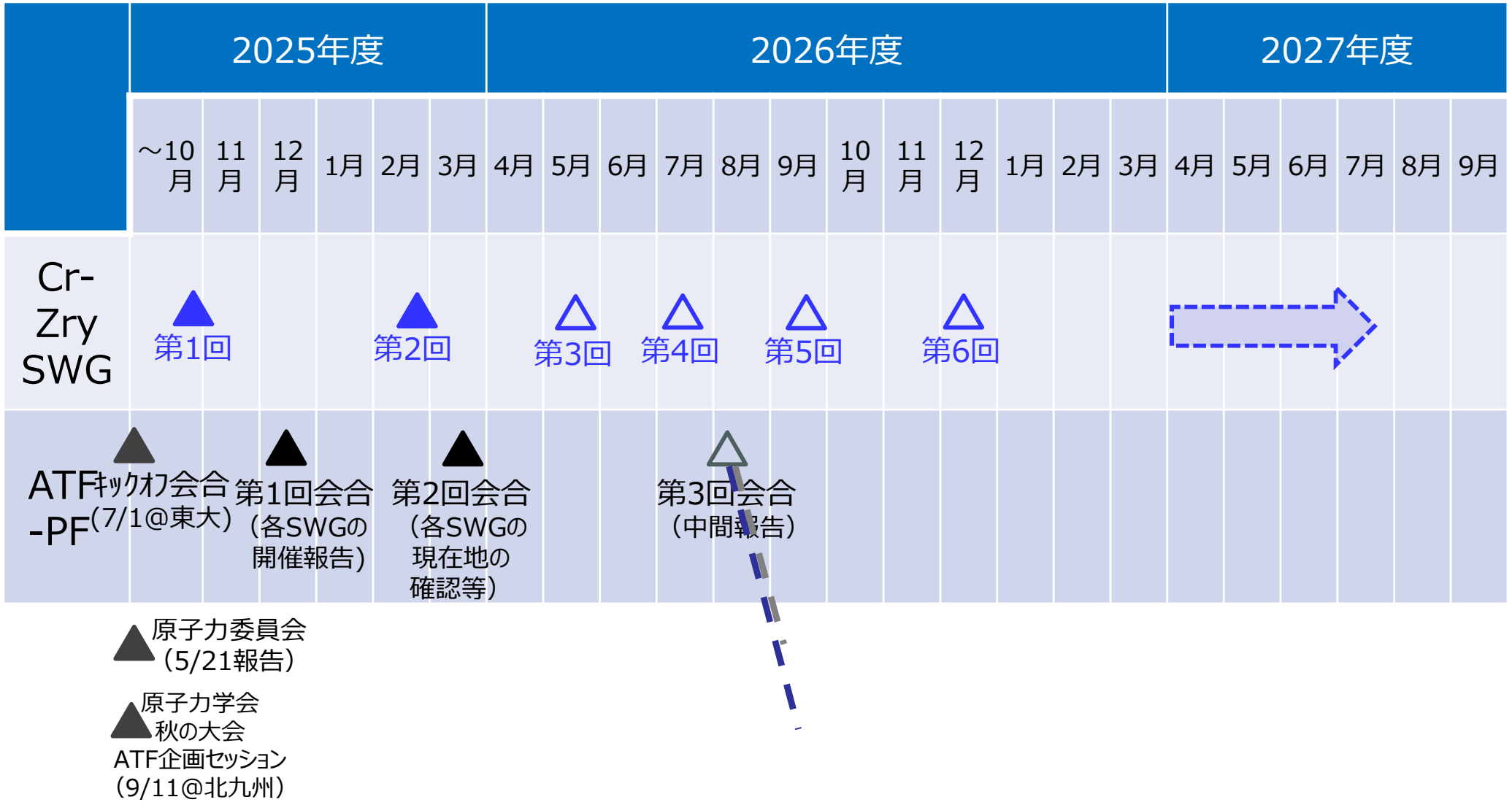
- 上記①のPIの抜け漏れ確認完了後、第5回SWG以降を想定

PI抽出：～DBA(DEC/SAについてはDBA範囲特定のためにアンケートのコメントを対象に議論)、
RT分析：～DBA、TRL評価：～DBA

⇨**今年度に一定の成果をとりまとめる観点からDBAを重点化**

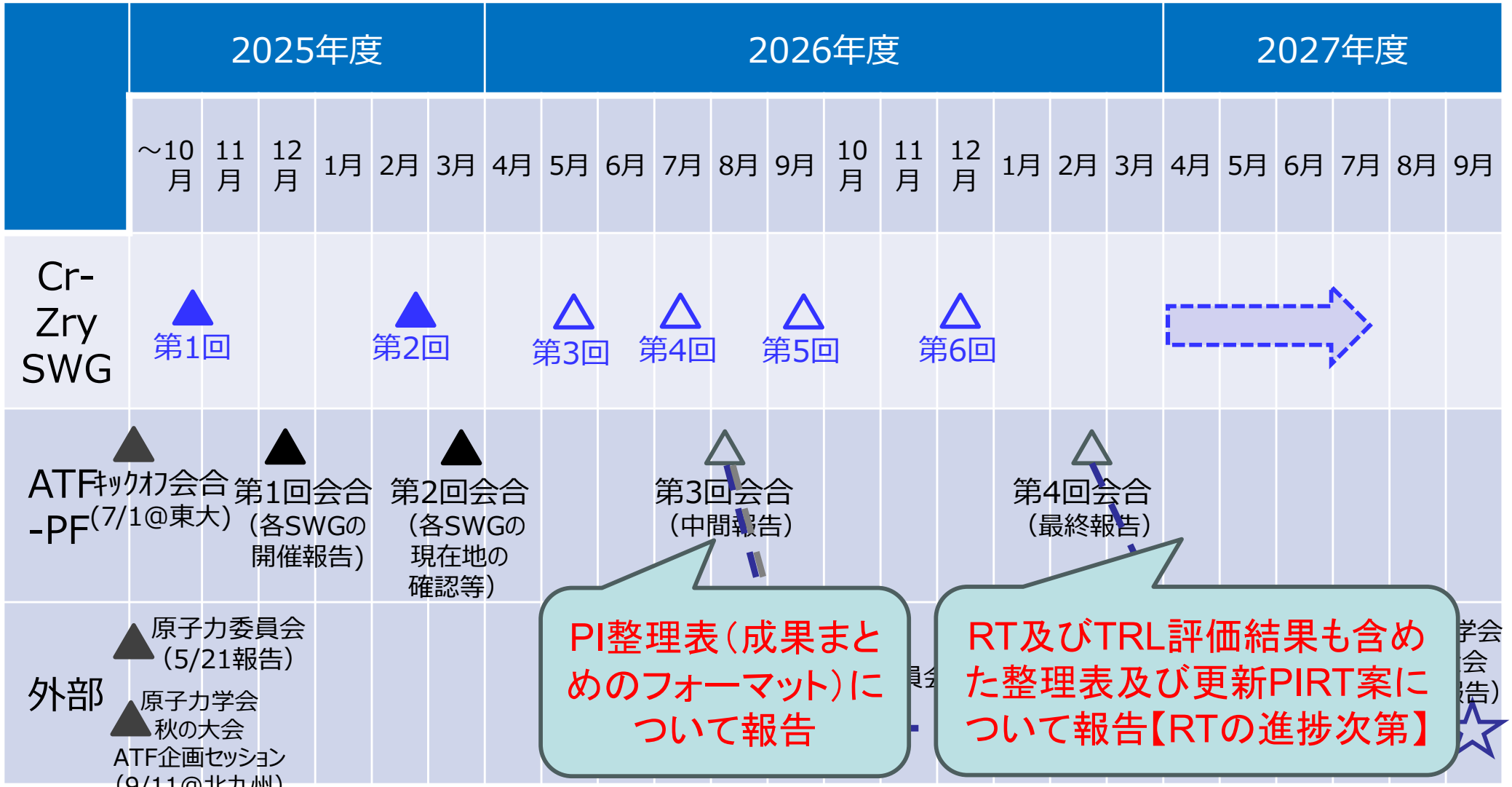
SWGとATFプラットフォームのスケジュール(案)

- 各SWGにおいて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
- 2025年度は2025年12月と2026年3月に開催。2026年度は2026年8月と2027年2月に開催予定とするが、各SWGでの活動状況により開催時期は変更あり
- 第4回ATF-PF会合で最終報告案の議論後、JAEAレポートの形で発刊予定(2027年中)



SWGとATFプラットフォームのスケジュール(案)

- 第3回SWG：PIコメント（～DBA 18件、第2回持ち越し1件【計19件】）に関し議論
- 第4回SWG：PI整理表の確認（～DBA）、PI残り【計14件】に関し議論
- 第5回SWG：RTコメントに関し議論及びRTの根拠について共有（勉強会）
- 第6回SWG：RTの確認、TRL評価の確認←第5回SWG後RT/TRL評価案を提示



参考情報

Cr-Zry PIRTのPI洗い出し 議題(第3回SWG議論予定)

議題案[PI方針及びPI追加]…アンケート意見集約リストより抽出

ID	分類1	分類2	ご質問	回答
11.01	PIRT PI	PI方針	通し番「2」などの「外面腐食」に係るところで、クラッドなどを起点としたCr系の局部腐食生成物が発生した場合、その水溶性に対しての懸念はないでしょうか。減肉などの原因となりえるかもしれません。	ご指摘の懸念につきましては通し番号2（外面腐食）で整理します。
15.10	PIRT PI	PI方針	27.1, 27.2, 27.3: ECRは直接の評価項目として適当でない。	Crコーティング被覆管のLOCA時の酸化脆化、Cr-Zr中間層の形成、並びにCr被膜とグリッド材料との相互作用については、ご指摘のとおり現行ジルカロイのECRで評価できるものではありませんが、ECRを決める被覆管温度とその時刻歴が関連する評価項目として整理したいと思います。
17.01	PIRT PI	PI方針	Cr皮膜が健全／欠陥で分けるのは良いと思います。性能向上を赤字で示しているのは（重要なのは理解しますが、PIRTとしては少し）違和感があります。性能向上を織り込んで設計しているものの、性能向上に不安がある場合に、それがPIRTの中で重視されることは当然ですが。例えば>>55GWd/t の燃焼度を目指すことを前提にPIRTを組むならば、期待されている効果である赤字部分がHの重要度であることはうなずけます。 その場合、Cr皮膜に欠陥がある場合は、欠陥があっても>>55GWd/t に行けるということを示すことに主眼が置かれるはずです。	Crコーティング被覆管のPIRT作成については、まず現行PWR燃料と同じ運用条件を前提として、欠陥のないCr被膜を付与することによる現行燃料（Cr膜なし）との差分を洗い出すことから始めようと考えていますので、性能向上を含め黒字に修正します。なおこの検討を進めるための方法は、炉心燃料分科会のWGでレポートにまとめられており、並行して検討を進めます。 このように作成したPIRTを基礎として、運用高度化することによるPIRTへの影響をPI→RTの順番に整理することにより、漏れ欠けのリスクを下げつつ分かりやすい整理に繋がると考えています。
8.01	PIRT PI	PI追加	①「Cr膜に欠陥がある場合」のグリッドフレッティング（通し番号6）では、フレッティングがCr被膜の剥がれを助長する可能性ありという記載があります。一方で、異物フレッティング（通し番号7）ではその記載がありません。この違いは、グリッドフレッティングと異物フレッティングのどういった違いに起因するのか、ご教示頂きたく。	異物フレッティング（通し番号7）についても、グリッドフレッティング（通し番号6）と同じく、フレッティングがCr被膜の剥がれを助長する可能性があることを追記致します。なお、この記載は、はがれたCr被膜が被覆管のフレッティングに影響する可能性あり、との米国PIRT記載を参考としたものです。
9.08	PIRT PI	PI追加	・【番号2】注釈で記載されているクラッド付着起因のAOAは一つの評価項目に起こして整理することが望ましいと思います。	PIRTの項目は炉心燃料の安全設計に関する評価項目であり、燃料の損傷モードに関連しますが、AOAは損傷モードではないため、評価項目に起こすのではなく、通し番号2の評価において要すればAOAを考慮する、という整理がよいと思います。
9.10	PIRT PI	PI追加	・【番号9.2】Cr-Zr化合物が生成されることもあるかと思いますが、Cr-Zr界面反応後の外側のCr膜がはがれたときの影響（Cr-Zr化合物が炉水に触れたときの影響）は確認する必要はないでしょうか？	Cr-Zr化合物が炉水に触れた時の影響として、耐食性への影響を考慮し、通し番号2のCr被膜に欠陥がある場合の欄にご指摘の旨を追記します。
9.11	PIRT PI	PI追加	・【番号12】DNBRの評価項目に対して、Cr膜の材料特性・挙動には表面粗さだけが抽出されていますが、熱伝導の観点で考慮する必要はないでしょうか？	通し番号12の表面粗さは熱伝達への影響を考慮して記載していたので、その旨を追記します。

Cr-Zry PIRTのPI洗い出し 議題(第3回SWG議論予定)

議題案[PI追加]…アンケート意見集約リストより抽出

ID	分類1	分類2	ご質問	回答
10.01	PIRT PI	PI追加	Cr膜をつけることによってZryとは異なることが起こらないのかという点でのコメントを下記に示します。 ・Cr膜に微小な割れが発生した場合、通常運転時の腐食挙動に影響を与えないのか、具体的にはCr膜が割れた部位において局所腐食など部分的に腐食が進行することがないのか。また、LOCA等の事故時の高温酸化挙動においても局所的に参加が進み水素発生し水素化が加速することなどないのか。水素発生量についてもZryの場合より増えるということはないのか。	Cr被膜に割れなどの欠陥がある場合、次の評価項目のCr被膜に欠陥がある場合の列で整理したいと思います。 ・通常運転時の局所腐食については、通し番号2 ・LOCA時等の局所高温酸化については、通し番号16.1, 21.4, 27.1, 29.2, 30, 32.2 ・[RT]LOCA時等の被覆管の水素化は、被覆管の酸化が進んでいない箇所で高温水蒸気の水素分圧が高くなると加速するため、Cr被膜割れ位置での局所酸化の影響はないと考えています。 ・[RT]LOCA時等の水素発生量については、Cr被膜の割れの頻度によっては増加する可能性があるため、関連個所に追記します。
15.04	PIRT PI	PI追加	12, 16.1, 16.2, 20:Cr被膜の照射に伴う表面性状（濡れ性等）が従来材酸化膜表面と異なり、伝熱挙動に影響を及ぼす可能性がある。(M-L)	Cr被膜の割れが伝熱特性に影響する可能性について、通し番号12、16.3(新規)、20に追記します。
15.05	PIRT PI	PI追加	12, 16.1, 16.2, 20PIRT右:微細な欠陥が表面性状（濡れ性等）を介して、照射効果と相まって伝熱挙動に影響を及ぼす可能性がある。(M-L)	Cr被膜の割れが伝熱特性に影響する可能性について、通し番号12、16.3(新規)、20に追記します。
15.06	PIRT PI	PI追加	16.1, 21.4, 27.2:Zr母相に拡散したCrが母相の延性に影響を及ぼす可能性がある。(M-M)	通し番号27.2は、ご指摘の評価項目について記載したものです。 その他のRIE/RIA時の評価項目（通し番号16.1、21.4）について、追記します。また、これらの分類は「腐食・水素吸収、酸化」から「強度、延性」に見直しました。
15.07	PIRT PI	PI追加	16.1, 21.4:Zr-Crの共晶によりCrの保護性が低下する可能性がある。(H-M)	Zr-Cr共晶によりCr被膜の耐酸化性が低下する可能性について、通し番号16.02(新設、通し番号16.1を16.01に変更)、21.4に追記します。
19.02	PIRT PI	PI追加	PIRTに直接繋がる話ではなくて恐縮ですが…：「欠陥」と呼べるか（呼ぶべきか）はさておき、Cr被覆に縦割れ亀裂*のようなものが入っていると、それがZr合金母材に対する予亀裂として働き、応力集中を起こすというような研究例もあります（極端な想定とは思いますが）。Cr被覆がそのような状態にならず、性能を想定通り発揮できるよう寿命を通じて健全であることを示すのは、MHI殿ご指摘の通り別途検討（PIRT内外含め）する必要があると感じている次第です。（フレッティングは別途特出しされていますが、例えばスエリングに伴う外径増加で割れが生じる事はない、など他の要因についても…。） *いわゆる「縦割れ破損」のような軸方向に長いものはここでは想定していません。	ご指摘のとおりと考えています。なお、例示いただいたようなCr被膜の割れによる強度低下は、分類「強度、延性」の項目について記載しています。
20.01	PIRT PI	PI追加	No.7 「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」欄でグリッド、ディンプルとの接触について記載があるが、異物との接触について記載すべきではないか。また、No.6に記載の「フレッティングがCr被膜のはがれを助長する可能性がある。」といった観点はNo.7には不要でしょうか。	通し番号7について、被覆管外面と異物との接触と読めるよう修正します。 また、以降のご指摘についても、同様のご指摘を受けており、反映いたします（ID8.01参照）。

Cr-Zry PIRTのPI洗い出し 議題(第3回SWG議論予定)

議題案[PI拡張、PI説明見直し、PI削除]…アンケート意見集約リストより抽出

ID	分類1	分類2	ご質問	回答
7.05	PIRT PI	PIRT拡張	追加の観点としては、加工工程～輸送工程への影響検討に興味がございます。フロントエンドのハンドリングにおいて、Crコーティングの剥離を防止するための手当は、不要でしょうか。他にも、運転中の水質、キャスク保管、再処理への影響検討も必要と思います。	現在のPIRT案は炉心燃料の安全設計に関する評価項目を対象としたものになっていますが、ハンドリング・輸送や貯蔵・再処理などのその他の燃料サイクル過程に関連する評価項目についても特定していきたいと考えています。但し、これらの評価項目を現在のPIRTに追記すると煩雑になるため、炉心燃料の安全設計以外のPIについては、別途（例：個票）で整理したいと思います。
9.03	PIRT PI	PIRT拡張	②明らかにCr膜に影響のない評価項目についても、現在のPIRT案では記載したうえで「99.(外面Cr被膜の影響無し)」と整理していることを踏まえ、原子力学会技術レポート以外の項目で燃料設計をする上では考慮したほうが良いと思われる項目を以下に記載します。必要に応じ追加してもよいかと思います。 ・端栓溶接部の健全性への影響（溶接部付近までCrコーティングされないため影響無しと思われる） ・炉心崩壊熱、SFP崩壊熱への影響（影響無しと思われる） ・SFP未臨界性、新燃料貯蔵庫未臨界性への影響（影響無しと思われる） ・燃料取扱い/燃料貯蔵時の線量評価（放射線業務従事者の被ばくの観点、影響無しと思われる） ・燃料輸送、取扱い時の各構成部材の応力（類似項目として番号45,51が該当、Cr被膜の影響無しと整理可能）	・端栓溶接部へのCr被膜の影響については、端栓溶接部熱影響部にはCrコーティングしない条件で整理します。 ・崩壊熱への影響については、炉心燃料の安全設計以外のPIとして、別途（例：個票）で整理したいと思います。 ・未臨界性への影響については、炉心燃料の安全設計以外のPIとして、別途（例：個票）で整理したいと思います。 ・燃料取扱・貯蔵時の線量評価については、炉心燃料の安全設計以外のPIとして、別途（例：個票）で整理したいと思います。 ・燃料輸送・取扱の燃料集合体の強度評価については、炉心燃料の安全設計以外のPIとして、別途（例：個票）で整理したいと思います。
15.12	PIRT PI	PIRT拡張	27.4: 有意なFFRDが生じスペーサ部にペレットが堆積した場合、ペレットとCrの接触により従来材とはことなる速度でCrの酸化（ペレットの還元）が生じる可能性がある。（L-L)	LOCA時のペレット放出について、通し番号27.1に追記します。
20.02	PIRT PI	PI説明見直し	No.27.2 「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」欄に「Cr-Zr中間相の形成」と記載がありますが、No.9.2、15.3等には「界面反応」と記載がある。事象の違いについて教えていただきたい。	現状では、事故時の高温条件で比較的に長時間保持されると考えられる場合には「Cr-Zr中間相の形成」とし、RIE・RIA時の高温保持が短時間の場合には界面反応としましたが、後者も「Cr-Zr中間相の形成」として良いと思いましたので、修正します。
15.15	PIRT PI	PI削除	32.2: 高温酸化挙動と機械的エネルギとは相関が無いように思われる。	ご指摘を拝承します。通し番号32.2については削除し、32.1を32とします。

募集意見の集約結果

✓募集した意見を集約した結果、以下のとおり整理

分類1		分類2		第2回SWG済	第3回SWG予定
リスト項目	該当数	リスト項目	該当数		
PIRTカテゴリ分け	6	カテゴリ追加	3		
		カテゴリ説明見直し	3		
PIRT PI	43	PI方針	7	4	3
		PI追加	11		11
		PIRT拡張	22	6	3
		PI説明見直し	2		1
		PI削除	1		1
PIRT RT	31	R方針	5		
		R根拠・補足	10		
		R説明見直し	16		
その他	26	全体方針	9		
		表現、体裁の修正	17		