

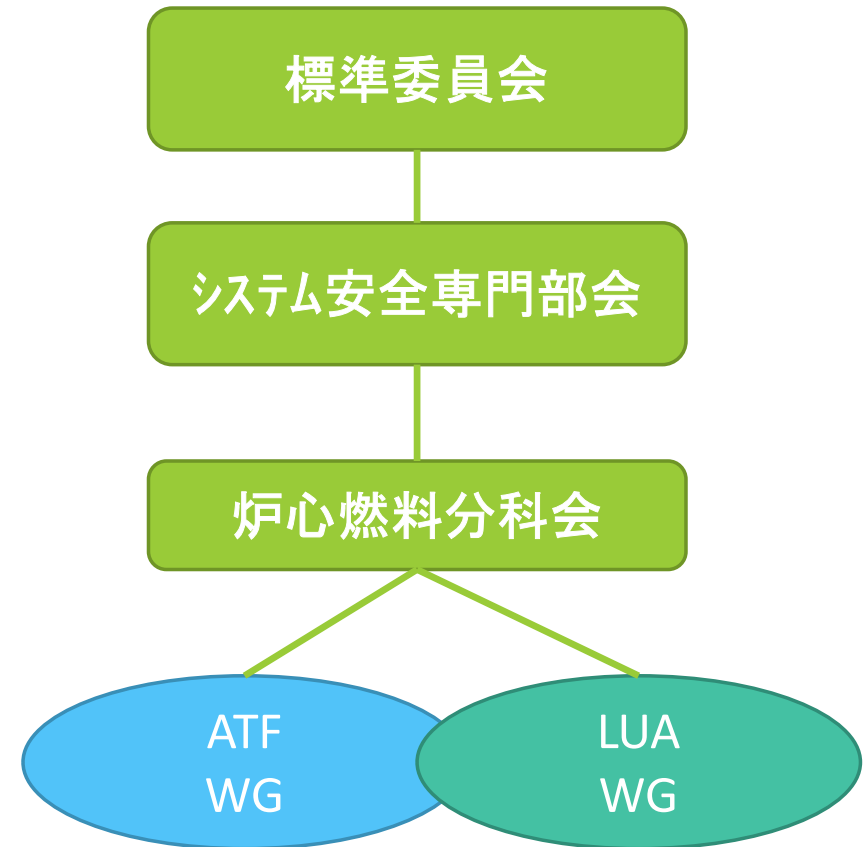
事故耐性燃料開発に関するワークショップ
2023年12月14日
於：東大・武田先端知ビル・武田ホール

新設計燃料の導入に向けた 炉心燃料分科会の活動

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
村上 望

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「LUA-WG」を設置し、新設計燃料の導入にあたっての安全性の確認の方法や、実機(商業炉)での先行照射の実施要件について検討・議論を行ってきた。
- 取りまとめた検討結果を日本原子力学会標準や技術レポートとして発刊すべく、現在準備を進めている。
- 本日のワークショップにおいて本活動の概要を報告し、その検討結果も踏まえて、標準や技術レポートの内容のブラッシュアップを図る予定である。



2. 安全性向上新設計燃料の早期実装の課題

- 新設計燃料の安全性確認方法に関する共通理解確立
 - 従来: 試験炉や海外で確認された設計の導入により、設計段階で必要十分なデータを取得した状態で安全性を確認できた。確実性が見込める一方、データ取得まで長期間を必要とする点や、試験炉基盤が失われている現状にはそぐわない
 - 今後: 設計評価での条件の工夫(不確定性を大きく見積もる等)や、運用中の試験・監視を組み合わせ、総合的な安全性確認を可能とする方法論を標準化していく必要があるが、現時点では、断片化された経験やノウハウがあるだけで、これらを統合した総合的な安全性確認方法が確立されていない
- 新技術レビューの仕組みの確立
 - 新技術の開発段階での不確実性は大きく、投資判断のハードルは高い。このため開発・導入工程や実施内容をステークホルダーで共有し、合理的な研究開発計画策定や投資判断時期を見極める等、予見性を高める仕組みが求められる。
 - 仕組みの構築における重要なポイント:
 - ✓ 開発中技術の致命的課題の有無等
 - ✓ 優先度の高い項目を見定める方法
 - ✓ 優先度の高い項目の確認(レビュー)の方法
 - ✓ 確認のための基礎・基盤研究スキームの確立

3. 発刊予定の標準等の概要

学会標準「原子力発電所における先行照射燃料の導入に係る実施基準(仮)」

- 設計段階での安全性の確認に加え、運転中の監視や照射後試験による確認を行うことで、総合的に原子炉の安全性を確保しながら、開発段階の新設計燃料の照射を行うための実施要件を規程としてまとめた。
- 一連の実施ステップ(フロー)は事前に「実施計画」としてとりまとめることを規程している。策定した「実施計画」はステークホルダーと共有することにより、有機的な連携や計画のローリング(PDCA)の基盤となるようにしている

技術レポート「発電用軽水型原子炉の新設計燃料の安全性を確認する考え方(仮)」

- 階層的な安全要求からの展開による新設計燃料に対する安全性確認項目を、抜け漏れなく抽出するプロセスをまとめた。新設計導入に伴う、原子炉システム(炉内環境)への影響有無まで立ち戻ることにより、炉心・燃料だけではなく、プラントへの影響も含めた抜け漏れのない抽出の方法を検討した。
- PIRTの考え方を活用した、影響度や知見充足度に基づく重要度の考え方を導入し、新設計燃料の開発度合に応じた試験や評価の優先順位付けを行うことで、よいものを合理的に早く導入する方法を示した。

4. 先行照射実施基準の概要

学会標準

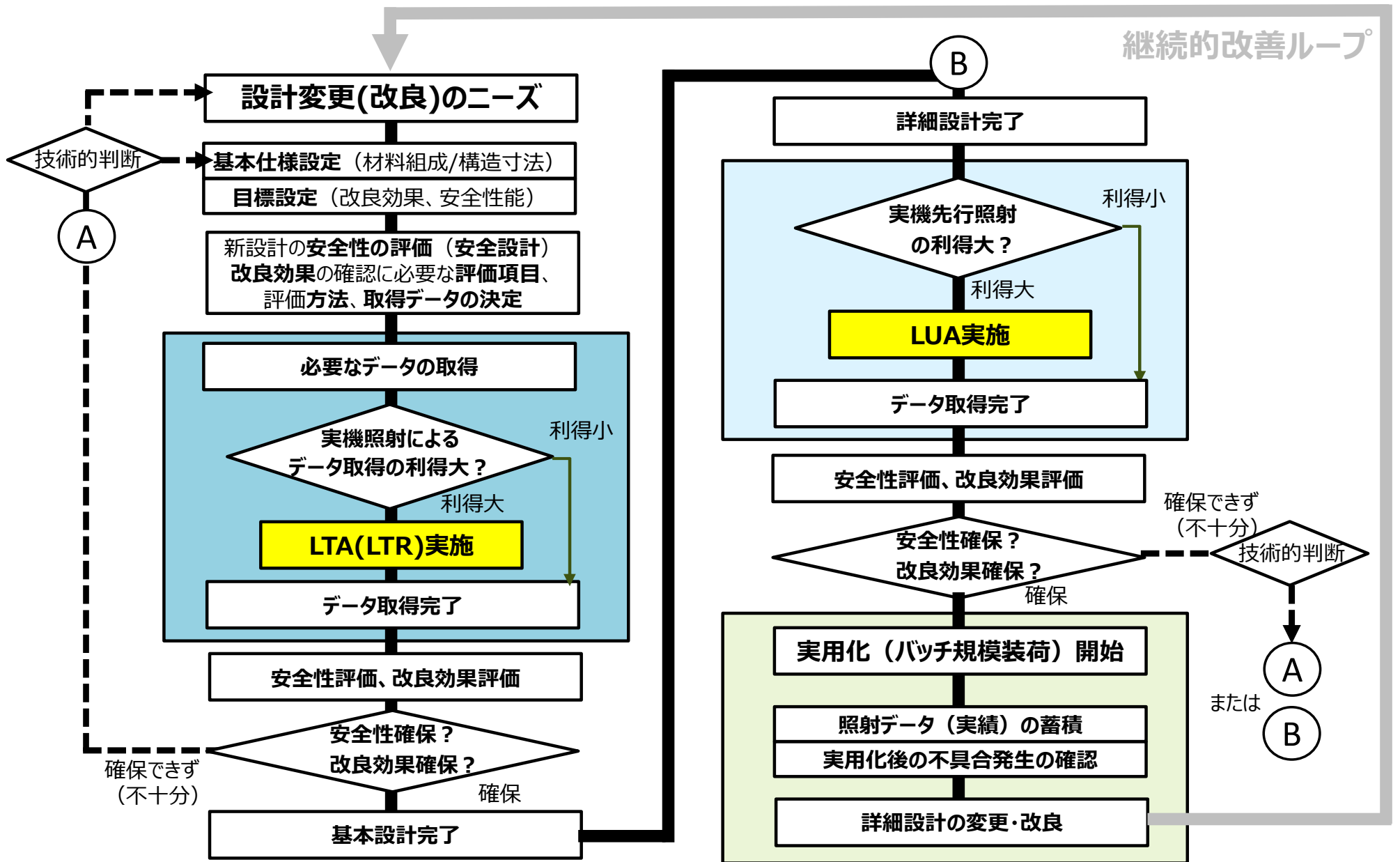
「原子力発電所における 先行照射燃料の導入に係る実施基準(仮)」

- これまでの経験を踏まえ、新設計燃料の開発から実用化までのプロセスを整理し、開発初期段階の技術に対する少数本あるいは少数体に限定した先行照射(Lead Test Rod/Lead Test Assembly)の実施と、その後の確認のための少数体先行使用(Lead Use Assembly)の流れを整理した。→4.1 参照
- 少数体先行照射の実施ステップ(フロー)を定義し、それぞれのステップに対して要件や考え方をまとめた。少数体での実施に限定することで、評価条件を特定・限定する考え方を規程として定義した。→4.2参照
- 導入技術に応じて一般化が難しいものは、参考として附属書に過去事例や考え方をまとめた。

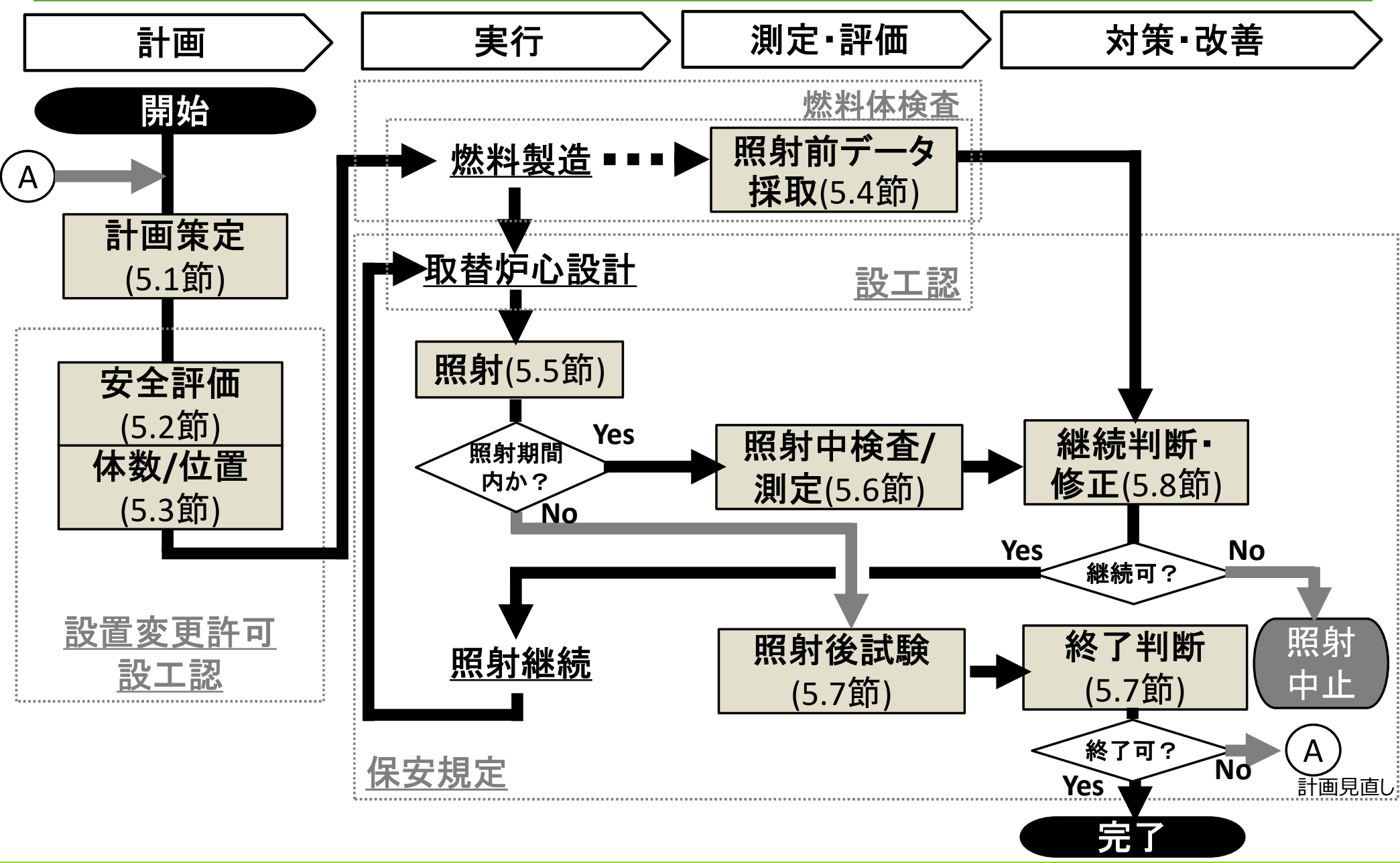
目次

1章	適用範囲
2章	引用規格
3章	用語及び定義
4章	燃料開発における 先行照射の位置づけ
5章	先行照射に係る検討項目
5.1	実施計画
5.2	安全評価
5.3	装荷体数及び装荷位置
5.4	照射前データの採取
5.5	照射
5.6	先行照射実施中の検査 及び測定
5.7	照射後試験
5.8	先行照射の継続判断 及び計画修正

4.1 先行照射実施基準：新設計燃料の開発の流れ



4.2 先行照射実施基準：先行照射の実施ステップ(フロー)



5. 新設計燃料の安全性確認の考え方

技術レポート「発電用軽水型原子炉の新設計燃料の安全性を確認する考え方(仮)」

- 燃料安全設計に関する技術レポートとPIRTの考え方を統合した考え方を提示

→5.1参照

- 新設計燃料の安全性確認項目の特定のためのステップ(フロー)を定義

→5.2参照

- 特定された項目について影響度、知見充足度から重要度を評価するスキームを提示

→5.3参照

目次

1章	はじめに
2章	用語及び定義
3章	新設計燃料の安全性を確認する考え方
3.1	新設計燃料に対する漏れなき安全性評価項目の洗い出し
	3.1.1 軽水炉燃料の階層的な安全要求に対する新設計の影響
	3.1.2 新設計燃料の分類に応じた安全性確認の流れ
	3.1.3 新設計燃料に対する安全設計の評価項目の網羅的な洗い出し
3.2	新設計燃料の開発進捗に応じた効果的な安全性確認の進め方
	3.2.1 階層的な安全要求の確認と開発進捗との関係
	3.2.2 新設計燃料の開発進捗に応じた安全性確認の重要性
	3.2.3 安全設計の評価項目の重要度分類表の作成
4章	CrコーティングZr基合金被覆管の安全性確認の検討例
4.1	安全設計の評価項目の洗い出しと重要度分類
4.2	開発進捗に応じた安全性確認

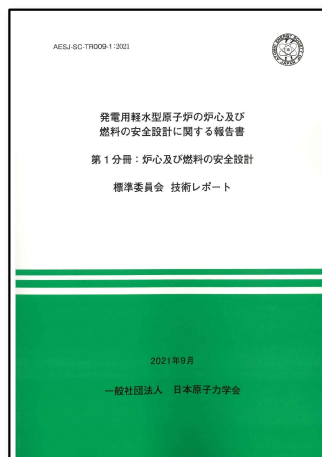
5.1 新設計燃料の安全性を確認する考え方

※ PIRT: Phenomena Identification and Ranking Table

- 新たな技術レポートでは、**燃料安全設計技術レポート**を基礎とし、**PIRT**※の考え方を取り込み、新燃料の**安全性確認に必要な項目を特定し、優先度／重要度付け**の方法を提示する。
- 事故耐性燃料Crコーティング被覆管を例として、考え方を構築・提示する。
(なお、今後他の新規材料や新設計へも拡張の方針としている。)

燃料安全設計技術レポート¹

- 燃料に対する安全要求の階層的な考え方
 - 現行燃料を対象とした、止める・冷やす・閉込めるの機能別の具体的安全評価項目を体系的に整理
1. 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」(2015,2021)



新技術レポート

発電用軽水型原子炉の新設計燃料の安全性を確認する考え方(仮称)

1. 新設計燃料に対する安全評価項目の体系的な構築
2. 対象項目に対する効果的な知見拡充のための優先順位付け

- Crコーティング被覆管への考え方の適用事例

PIRT²の考え方

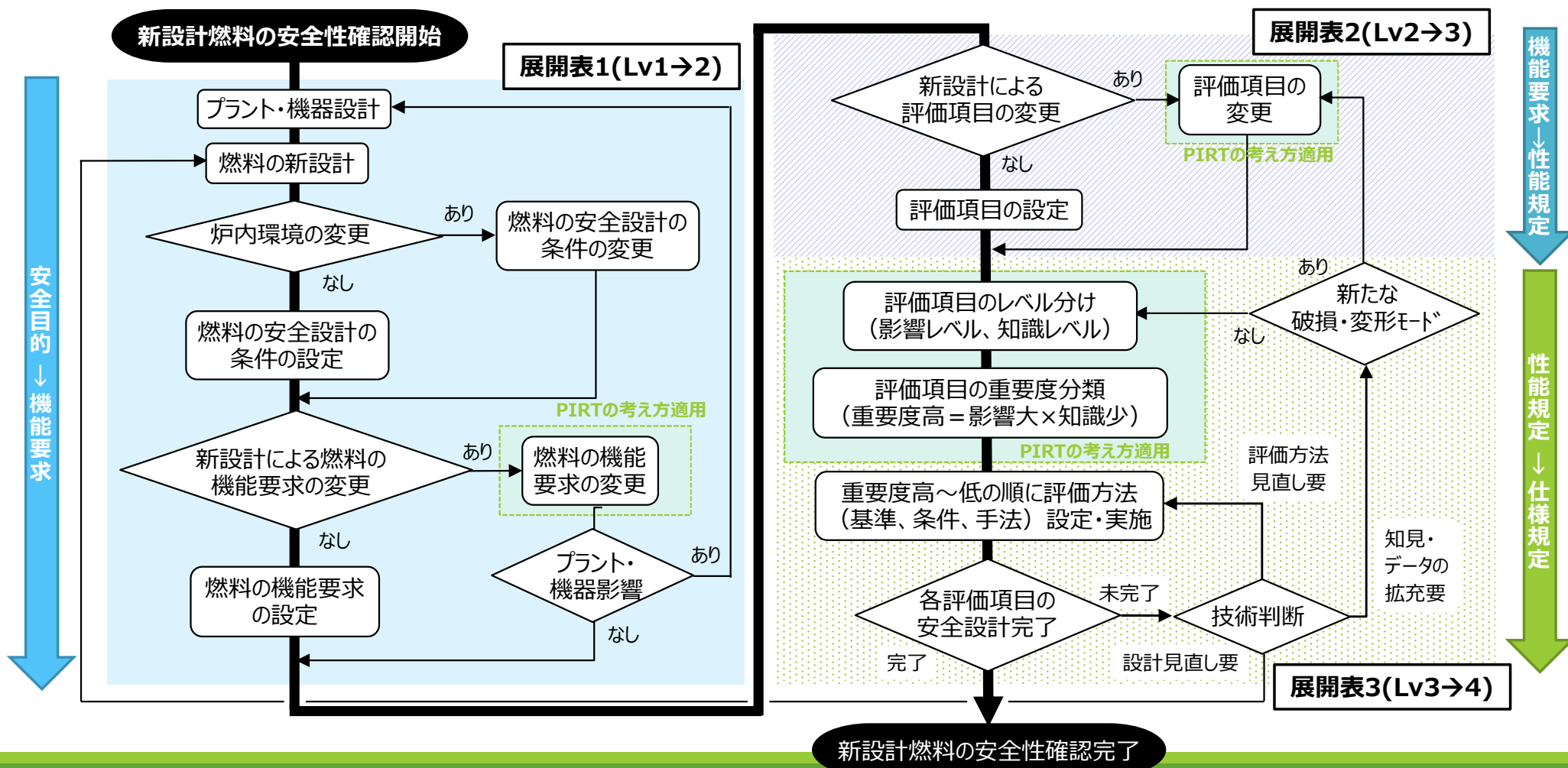
- 新設計燃料導入時の原子炉環境の変化、燃料挙動や物性への影響、影響する安全評価の洗い出し
- 評価への影響、知見の充足度(不確かさの程度)を指標とした優先順位付け

2. PIRT参考資料

- (1) <https://www.nrc.gov/reactors/power/atf/pirt.html>
 (2) https://www.jstage.jst.go.jp/article/taesj/12/3/12_J12.044/_pdf

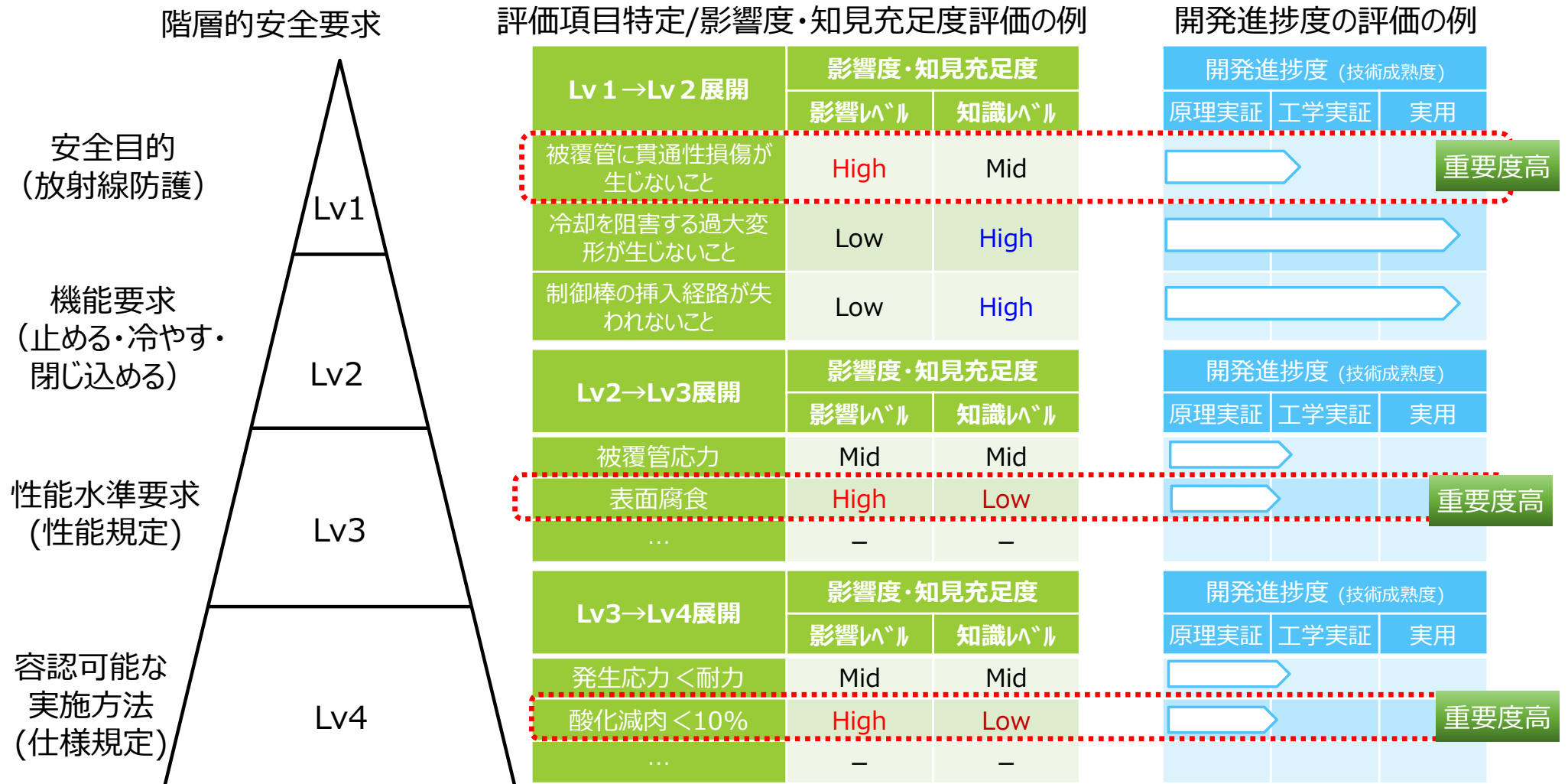
5.2 新設計燃料に対する安全評価項目の体系的な構築方法

- 現行燃料に対する階層的な安全要求の考え方を参照し新設計燃料安全評価項目を洗い出し、
- 以下の視点も加えて検討することで抜け漏れのない洗い出しを実施した。（フロー図参照）
 - ① 炉内における使用環境の変化の有無（必要に応じて機能要求を整理）
 - ② 破損・変形モードの追加／修正の確認



5.3 効果的な開発及び安全確保上の優先度／重要度付の考え方

- 洗い出した評価項目の「安全評価への影響度」と「知見充足度」を評価した。
- 「影響度が高く」、「知見の少ない項目」を「重要度:高」として優先的に知見拡充を進める。



知識拡充の進捗も踏まえて、適時見直しが必要としている

6.米国における動きを踏まえた国内への展開

- 米国では開発計画段階から規制当局と産業界の対話の場を設け、開発計画や基礎・基盤となる技術情報を共有し、それぞれに必要なアクションを早期開始することで実装までの期間の合理的な削減を指向している
- 国内への展開として、規制当局と産業界だけではなく、関係するすべてのステークホルダーと情報共有を行える場を設定することで、適時の情報共有と、あらたな取り組み事項の特定など、インタラクションが期待される。

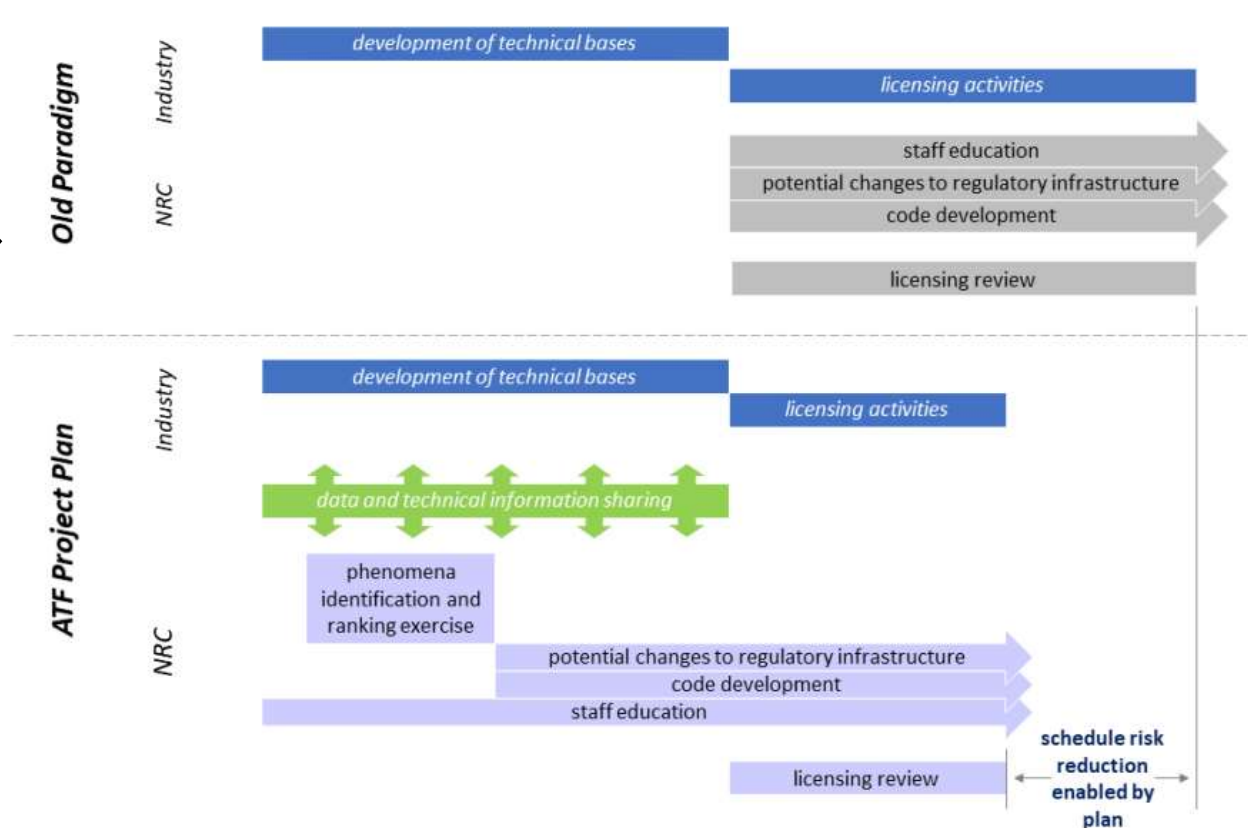


Figure 3-1 New Paradigm for the ATF Project Plan

<https://www.nrc.gov/reactors/power/atf/roadmap/project-plan.html>

原子力学会：ステークホルダーが同じ立場で参加できる場
 考え方、要件、プロセスを議論し標準や技術レポートを策定
 新設計燃料導入に関する議論の基盤として策定された標準等を活用

7.まとめ

- 2018年より炉心燃料分科会の下に、事故耐性燃料の導入に向けた検討を行うWGと実機(商業炉)での先行照射を行うための検討を行うWGが設置され、安全性向上に資する新設計燃料の早期の社会実装に向け、要件等の検討と議論を重ねてきた。本報告ではこれらの活動の概要を説明した。
- 学会標準及び技術レポートの発刊に向け、現在学会関係部門での意見聴取等の手続きを進めており、多様な意見を集約反映しながら、早期発刊にむけ引き続き活動を進め、早期の先行照射／新型燃料の実用化に貢献していく。
- 今回報告する標準等が、関係者の議論の基盤(プロトコル)として、国内で活用できることを期待している。

参考：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

■ 燃料種 閉込の構成(1) : 過渡運転時

評価項目	具体的な考え	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	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
燃料種内化	被覆管の内径が上昇し、内外径差による過渡運転時の外向きのクランプ応力が被覆管に発生しないこと。 (被覆管の内径が定規によるピケ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、ピケットの腐蝕を生じないこと。)	被覆管のクランプ特性が従来の被覆管材料(20合金)と異なることにより、Cr被覆管が被覆管のクランプ強度に影響する可能性がある。	L:半導心的被覆管による被覆管全体のクランプ強度への影響は軽微と予想されるが、ひずみもクランプ力に及ぼす影響による被覆管全体のクランプ強度への影響は不明である。	Cr被覆管による被覆管のクランプモデル、(20合金)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。	Cr被覆管が被覆管のクランプを抑制する場合、Cr被覆管の欠陥位置でクランプ応力が過剰となる可能性がある。	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(過渡運転時の酸化腐蝕)	過渡運転時において被覆管外面の腐食による被覆管材料部の剥離が速く、異質性の腐蝕に及ぼさないこと。	Cr被覆管の耐食性が従来の被覆管材料(20合金)と異なることにより、Cr被覆管が被覆管の耐食性に影響する可能性がある。また、Crが析出し、酸化して酸化皮膜が形成され、腐食を促進する可能性がある。	M:Cr被覆管の耐食性(20合金)よりも高い耐食性が期待される。劣化の程度が有意である場合、試験データを取得する必要がある。	L:半導心的被覆管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。	Cr被覆管の欠陥位置で耐食性が低下し、腐食が局所的に進行する可能性がある。	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
被覆管本線収縮	過渡運転時の被覆管の本線収縮によって燃料が大幅に低下し、過渡運転時及び運転時の異常な過渡運転時に想定される熱応力などの負荷に対して被覆管に異質性の腐蝕が生じることがないこと。	Cr被覆管の収縮に伴う本線収縮及び本線収縮が従来の被覆管材料(20合金)と異なることにより、Cr被覆管が被覆管の本線収縮に影響する可能性がある。また、Crが析出し、酸化して酸化皮膜が形成され、腐食を促進する可能性がある。	M:Cr被覆管の耐食性(20合金)よりも高い耐食性が期待される。劣化の程度が有意である場合、試験データを取得する必要がある。	L:半導心的被覆管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。	Cr被覆管の欠陥位置で耐食性が低下し、局所的に本線収縮が進行する可能性がある。また、はがれ位置の被覆管本線収縮が低下することにより、局所的に本線収縮する可能性がある。	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
被覆管クランプ	過渡運転時のクランプ応力が過剰な被覆管がクランプしないこと。	Cr被覆管のクランプ特性が従来の被覆管材料(20合金)と異なることにより、Cr被覆管が被覆管のクランプ強度に影響する可能性がある。	L:半導心的被覆管による被覆管全体のクランプ強度への影響は軽微と予想されるが、ひずみもクランプ力に及ぼす影響による被覆管全体のクランプ強度への影響は不明である。	Cr被覆管による被覆管のクランプモデル、(20合金)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。	Cr被覆管が被覆管のクランプを抑制する場合、Cr被覆管の欠陥位置で局所的にクランプ応力が過剰となる可能性がある。	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
被覆管フレットフィッシュ	被覆管に付着する腐蝕生成物(フラット)とのフレットフィッシュ腐蝕が異質性の腐蝕を生じないこと。 燃料の流動不安定振動が生じないこと。 過渡の流動不安定振動による燃料種、燃料種全体のギャップの増加による被覆管のフレットフィッシュ腐蝕によって、寿命を通じて異質性の腐蝕が生じないこと。	Cr被覆管の耐摩耗性が従来の被覆管材料(20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被覆管の耐摩耗性(20合金)よりも高い耐摩耗性が期待される。	L:半導心的被覆管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。	Cr被覆管がはがれた被覆管の基材が直接フラットに接触する可能性がある。Cr被覆管による耐摩耗性が低下する可能性がある。	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
被覆管の腐食(製造要因による内外面腐食)	被覆管の内面又は外面から本線収縮の発生による腐蝕が生じ、それによって異質性の腐蝕が生じないこと。	Cr被覆管の局所的な本線収縮の発生が従来の被覆管材料(20合金)と異なることにより、被覆管の局所的な本線収縮について異なる腐蝕がみられる可能性がある。(なお、被覆管内面についてはCr被覆管がないため影響はないと考えられる。)	L:半導心的被覆管による本線収縮の発生が従来の被覆管材料(20合金)と異なることにより、被覆管の局所的な本線収縮について異なる腐蝕がみられる可能性がある。(なお、被覆管内面についてはCr被覆管がないため影響はないと考えられる。)	L:半導心的被覆管による本線収縮の発生が従来の被覆管材料(20合金)と異なることにより、被覆管の局所的な本線収縮について異なる腐蝕がみられる可能性がある。(なお、被覆管内面についてはCr被覆管がないため影響はないと考えられる。)	Cr被覆管の欠陥位置で局所的な本線収縮及び本線収縮が過剰となる場合には、試験データを取得する必要がある。	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