

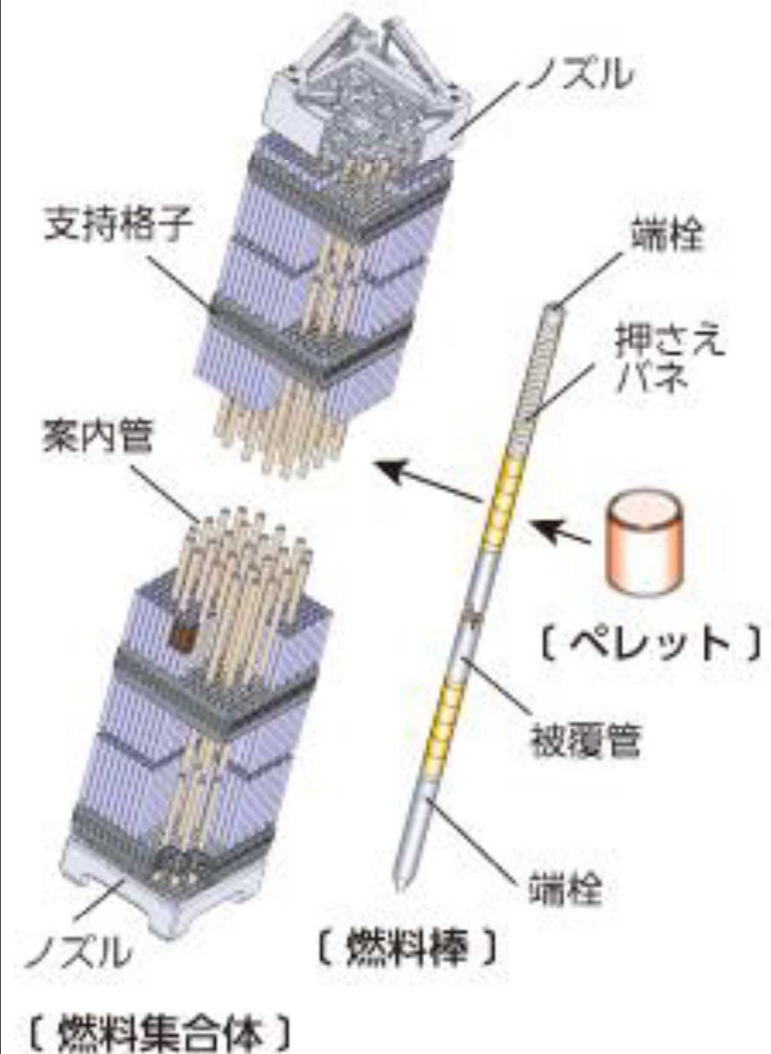
事故耐性燃料(ATF)導入に向けた対応

2022年12月12日

原子力エネルギー協議会

事故耐性燃料（ATF）について

- ✓ 燃料被覆管に用いているジルコニウム基合金は腐食や照射損傷に対する耐性が強く、十分な強度と延性を維持し、ウランの核分裂に必要な熱中性子に対する断面積が小さいなどの優れた特性を持っている。
- ✓ 一方、高温では酸化しやすく、水や水蒸気と反応して酸化物を形成するとともに水素を発生し、また、酸化反応に伴う発熱が大きく、1200～1500℃を超えると急激に酸化反応が進行する特性がある。
- ✓ これらを踏まえ、通常時の性能を維持あるいは向上させつつ、事故時の事象進展を遅らせ、かつ水素発生量低減が可能な「**事故耐性燃料（ATF : Accident tolerant fuel）**」の開発が世界的な潮流となっている。
- ✓ 事業者においては、国の補助をいただきつつ、**ATENA、電力、JAEA、プラントメーカ、燃料メーカが一体となって、ATFの開発を進めている。**



出典：

<https://www.mhi.com/jp/group/mnf/products/pwr.html>

- ✓ **ATFに使用する被覆管には3つの候補材があり、その中でもクロムコーティングが国内外で最も開発が進んでおり、実用化に近い。**
- ✓ クロムコーティング以外の候補材は開発段階であり、課題も多く実用化には時間を要する見込み。

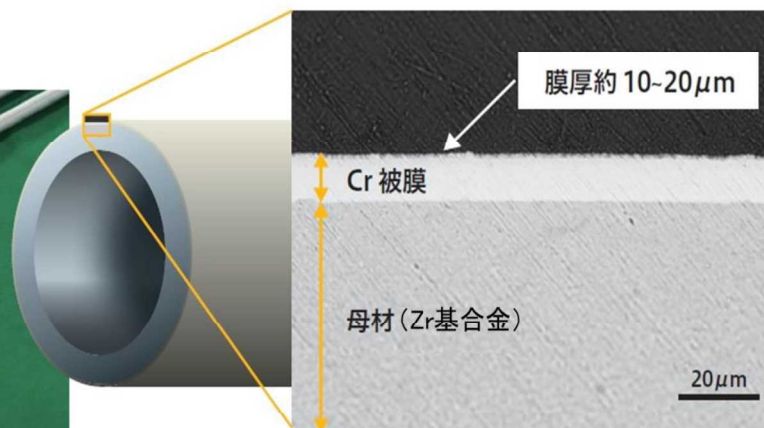
名称	概要	実用化に向けた見通し
クロムコーティング ジルカロイ	<ul style="list-style-type: none"> ・ジルコニウム基合金をクロムコーティングすることで表面の酸化反応を抑制 	<ul style="list-style-type: none"> ・既存技術の延長線であり、他2つより実用化に近い。 (クロムコーティング自体は一般的な技術であり、PWRにおいては制御棒にも施工)
改良ステンレス鋼 (FeCrAl-ODS)	<ul style="list-style-type: none"> ・高温時、アルミナの不動態形成により酸化反応抑制 ・加工性は良いが、中性子経済が悪い 	<ul style="list-style-type: none"> ・燃料設計変更が必要などの課題があり、実用化に時間を要する。(中期導入向け)
炭化ケイ素 (SiC)複合材	<ul style="list-style-type: none"> ・耐熱性、化学安定性の高いSiC繊維を管状に編み成型した複合材料で、酸化は殆ど生じず、事故時水素発生量低減 ・加工性は金属に劣るため、長尺化・気密性確保が困難 	<ul style="list-style-type: none"> ・セラミック系材料が被覆管として実用化されたことはないため、加工性に加え、照射特性の確認等、多くの課題があり、実用化に時間を要する。(長期導入向け)

クロムコーティング被覆管の導入効果

クロムコーティングの表面酸化抑制の効果により、以下の効果が期待できる。

- ✓ 通常運転時から設計基準事故時（DBA）において、耐腐食性の向上及び事故時の燃料体の温度上昇に対する裕度の向上
 - ✓ SAにおいても、有効性評価の“重大事故に至るおそれがある事故”における炉心損傷に至るまでの時間的余裕の向上※
 - ※事象発生後、速やかな対応（数十分程度）が必要なSBO等に対し10分程度余裕を創出
 - ✓ 被覆管の腐食減肉抑制により、地震時発生応力が低減する等、耐震性が向上
 - ✓ 耐腐食性の向上により、最高燃焼度を引き上げる等、効率的な燃料運用
- ⇒ 実用化が近いクロムコーティングについて、早期に本格導入の判断を行いたい。

クロムコーティング被覆管

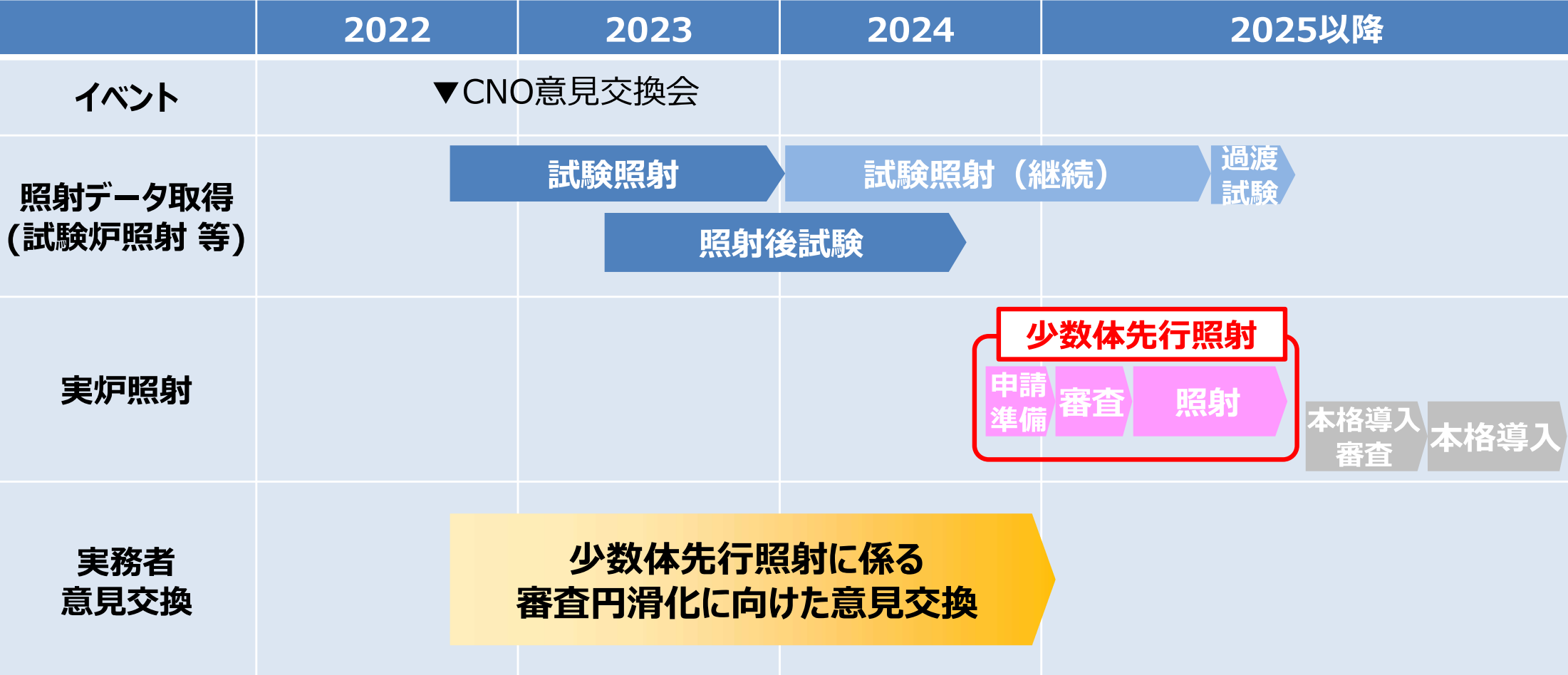


被覆管断面図

Copyright © Atomic Energy Association All Rights Reserved.

ATF導入に向けた事業者の進め方

- ✓ 過去に55GWd/t燃料を導入した際、試験照射炉において照射を実施後、安全影響等をまとめた報告書を発行し、国内先行照射に向けた整理を行った。
- ✓ 一方、クロムコーティングは現行被覆管からの仕様変更および影響度合いも小さいことから、**早期に少数体先行照射を行い、速やかにATFの本格導入の検討を進めてまいりたい。**



審査円滑化に向けた実務者意見交換について

少数体先行照射に係る審査円滑化の観点から、以下のような内容について、実務者の間で意見交換させていただきたい。

- ✓ 許認可申請時点で取得可能なデータを用いて、下記枠内に示すような案で安全性を説明していくことを検討しているが、**審査を手戻りなく円滑に進めていくために、安全性の示し方(説明にあたり必要なデータ等)について意見交換(整理)したい。**

<取得可能なデータを用いた対応 (案) >

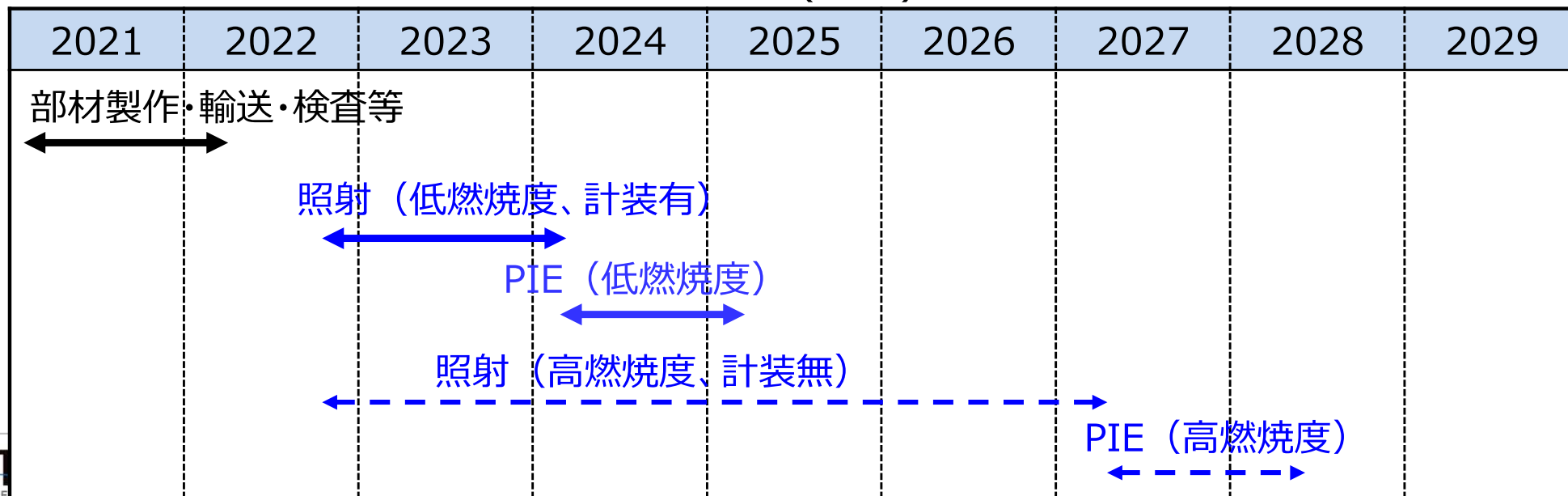
- 現行被覆管の照射実績**により、安全要求を満足することを示す。
(例:被覆管母材の機械特性は同等であること、およびクロムコーティングは外面のみであること等により、現行材と基本的に同等であることを示す 等)
- 一部照射データや未照射データを用いた評価で補完**して安全要求を満足することを示す。
(例:表面腐食、外径変化等については、申請時点までに得られているデータで評価・予測する等)
- 運用管理** (運転中監視、装荷体数・位置制限) により、安全要求を満足することを示す。
(例:運転中のような素濃度監視、出力の低い位置に装荷する、事故影響の緩和 等)

- ✓ 事業者として、ATF導入のための判断を早期に行いたい。
- ✓ ATFは開発段階であり、現時点においてデータが十分でないことから、**最も実用化に近いクロムコーティングの導入に向けて以下のとおり進めていきたい。**
 - 試験炉照射等を活用しつつ、材料特性データを取得。
 - 取得データ等を用いて、少数体先行照射に係る許認可手続きを実施。
⇒現行被覆管の照射実績、一部照射データや未照射材からの評価、運用を考慮した評価等で補完。
 - 実炉における照射挙動確認のため少数体先行照射を実施。
- ✓ 少数体先行照射に向けた準備および審査を手戻りなく円滑に進めることができるよう、**安全性の示し方について、実務者で意見交換させていただきたい。**

- 実炉での少数体先行照射にあたっては、実炉装荷前に、実炉と同等の条件で照射試験を行い、データ取得することが望ましい。
- 以下のとおり、**JAEAにて、試験照射炉の利用に向けた取組を実施中。**
 - ✓ 米国アイダホ国立研究所(INL)の試験照射炉(ATR)において、PWR水模擬環境中での燃料棒の照射試験が可能であることを確認。
 - ✓ 日米政府間の原子力研究開発協力の枠組(CNWG)に基づき、米国と折衝を進め、昨年、ATRでのクロムコーティング被覆管の燃料棒照射試験に係る契約を締結。
 - ✓ ATRでの照射が順調に進むよう、JAEAにてINLと調整中。

【Crコーティングジルカロイの試験照射スケジュール(予定)】

(年度)



【補足】 米国試験照射炉(ATR)の概要

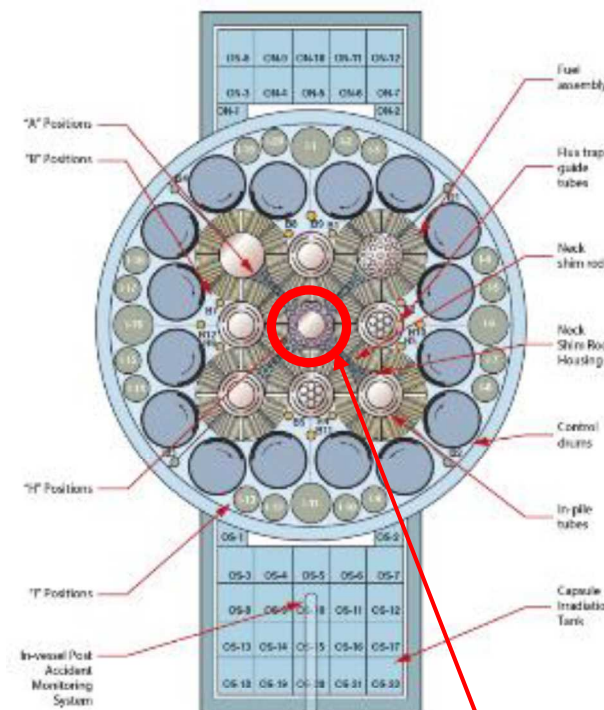
原子炉名	ATR (INL(米国))
熱出力(MWt)	最大250 (通常110)
熱中性子束 (n/cm ² s)	最大1.0x10 ¹⁵ (通常4.0x10 ¹⁴)
高速中性子束 (n/cm ² s)	最大5.0x10 ¹⁴ (通常2.0x10 ¹⁴)
燃料実効長	1.2m
冷却水圧力	2.5MPa
設計冷却水温度	115℃
運転時冷却水温度	<52℃(入り口)、71℃(出口)
運転日数	通常60日
付帯設備	PWR模擬水ループ*6ループ (1ループ：原子力エネルギー研究用)

*PWR模擬水ループ
15.2MPa, 300℃

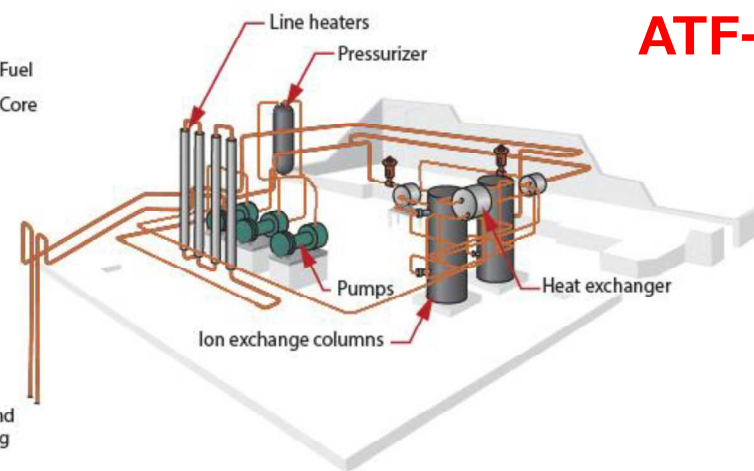
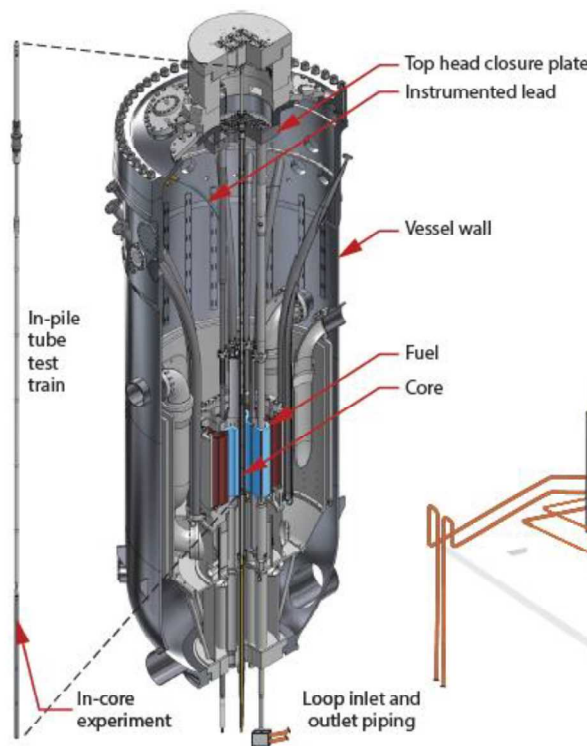
ATF用照射キャプセル

➤ ATF-2：ループ照射

- 燃料ピンを商用PWR模擬水質条件で照射
- 計装 (ペレット温度、燃料ピンの内圧及び伸び、中性子束)
- Cr-coated Zry短尺6本(4本計装、2本無計装)照射予定

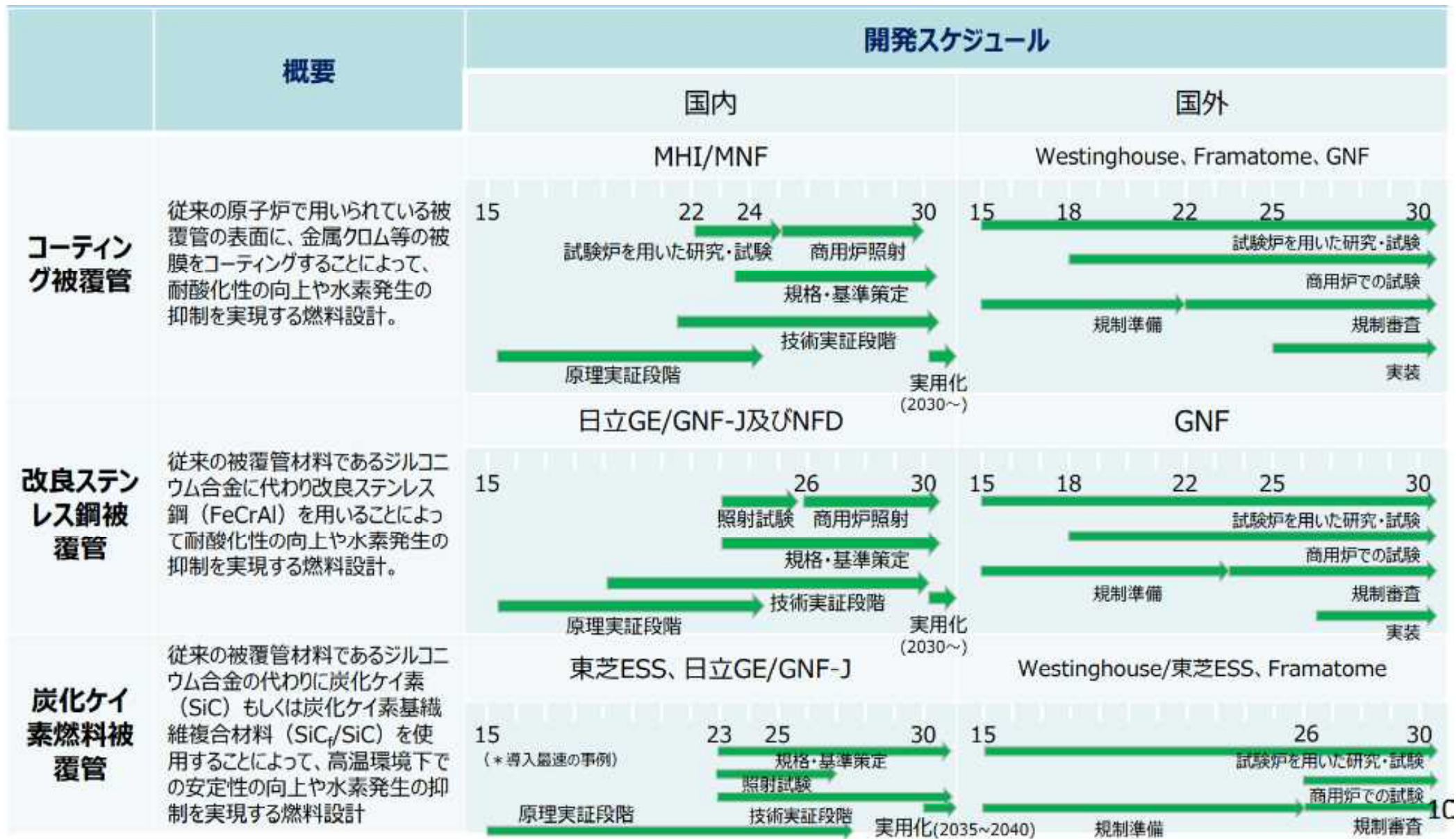


ATF-2



(参考)

ATFの実装に向けた国内外の動き

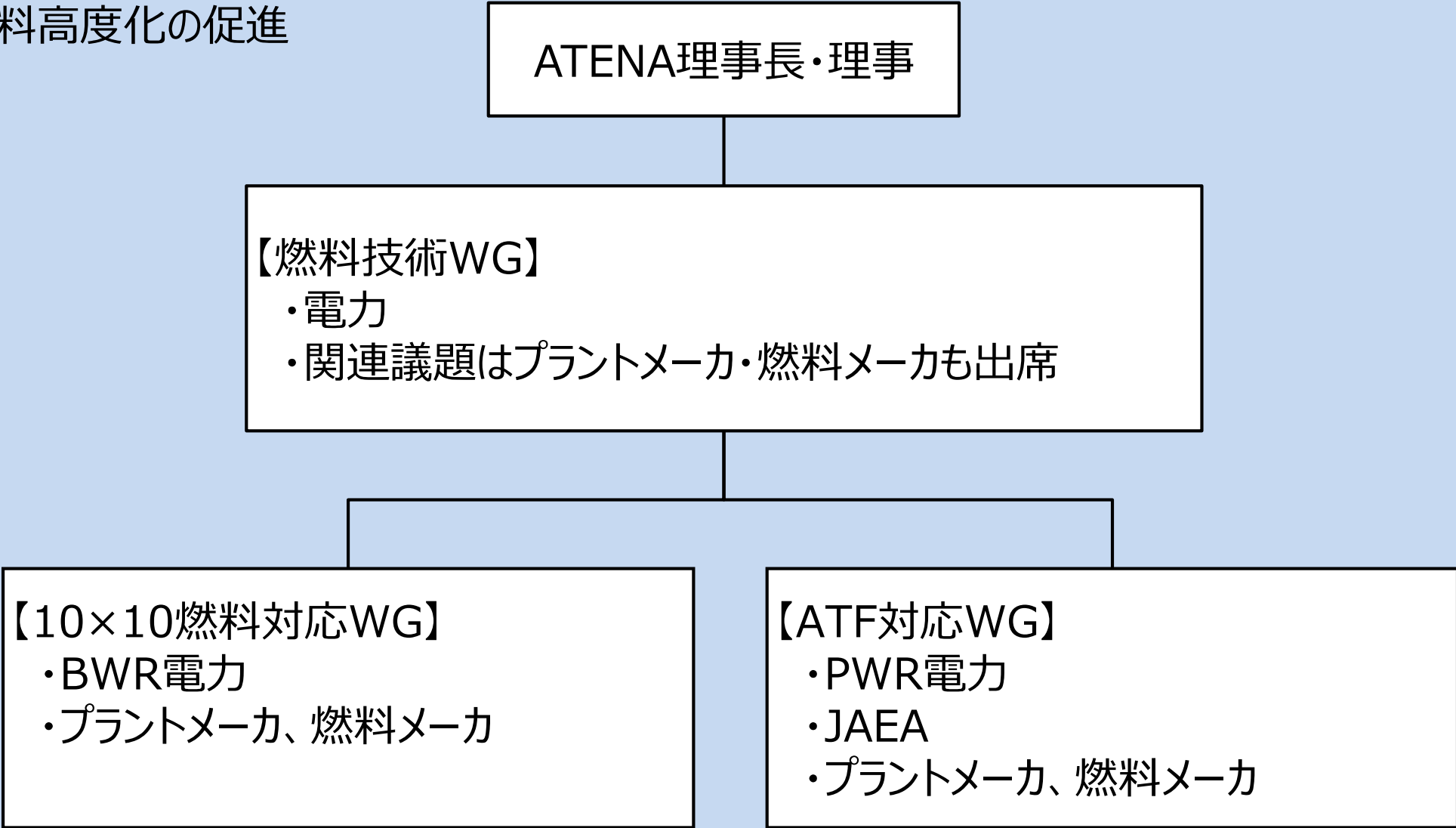


出典：事故耐性燃料開発に関するワークショップ(2022.3.11)

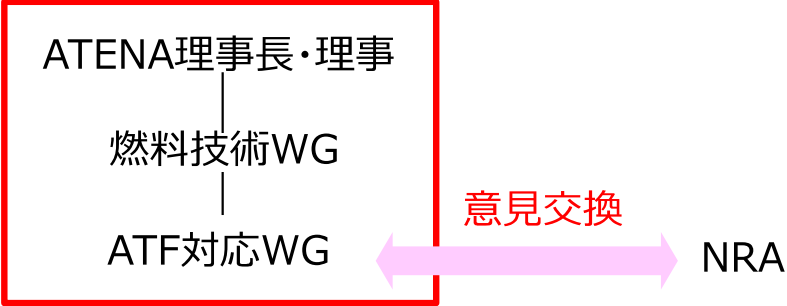
https://nsec.jaea.go.jp/ATFWS/pdf/atfws_material_2.pdf

ATENAとしての燃料案件の取組体制

ATENAテーマ：
燃料高度化の促進



少数体先行照射に係る取組体制

対応フェーズ	体制
<p>少数体先行照射に係る審査円滑化に向けた考え方の整理（意見交換）</p>	 <p>ATENA理事長・理事 ↓ 燃料技術WG ↓ ATF対応WG</p> <p>意見交換 ↔ NRA</p> <p>ATF対応WGが主体的にNRAと意見交換</p>
<p>少数体先行照射の設置変更許可申請対応</p>	 <p>ATENA理事長・理事 ↓ 燃料技術WG ↓ ATF対応WG</p> <p>(連携) 申請電力 ↔ NRA 審査</p> <p>申請電力がNRAの審査を受け、審査状況を適宜WGに報告</p>

現状被覆管と比較した場合のクロムコーティング被覆管の改善効果(例)¹³

対象	現状知見	現行管と比較した改善効果(例)
過渡時/ 通常運転時 性能	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 通常運転時より厳しい条件で腐食試験を行い、腐食がほとんど進まないことを確認。[2]。 ▶ 表面硬さは、母材のジルカロイよりも硬いことを確認。 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 現状評価に取り込んでいる被覆管腐食による被覆管の性能低下（腐食減肉・水素吸収）を評価に考慮不要となる。燃料設計・炉心運用の高度化に貢献。 ▶ 燃料リークの可能性低減。
事故耐性 (DBA)	<ul style="list-style-type: none"> ▶ LOCA時の再冠水時に折損する温度の上昇 ▶ LOCA時被覆管膨れ量の抑制 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ LOCA時の折損発生までの裕度向上 ▶ 被覆管破裂の裕度向上 [3]
事故耐性 (SA)	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 溶融点は現行と同じ。 ▶ 1350度付近に共晶点を確認。 ▶ Crが表面に存在する期間における水反応抑制。 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ クロムが表面に存在している期間はZrの酸化が抑制されることで被覆管酸化を抑制し、損傷発生までの対処時間の余裕を伸長可能（例：SBO想定対処時間の伸長：～10分程度^[1]）
その他の影響	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Cr膜による核的影響はごく軽微 	<p style="text-align: center;">—</p>

[1] NUREG/CR-7282 "Severe Accidents Review of Accident Tolerant Fuel Concepts with Implications to Severe Accident Progression and Radiological Releases"

[2] Murakami, et.al., "Development of coated zirconium alloy fuel cladding as an accident tolerant fuel for PWR (1) Coated cladding performance at accident conditions", 2D07, Atomic Energy Society of Japan (AESJ) 2021 Fall meeting, September 2021 (in Japanese only)

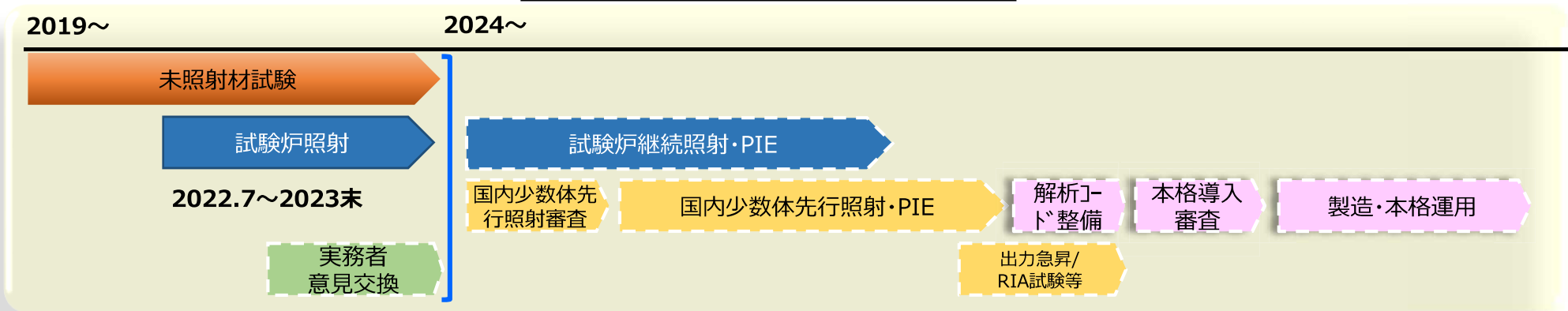
[3] YOON et.al. "POST LOCA DUCTILITY OF Cr COATED CL ADDING AND ITS IMPLICATIONS ON ACCIDENT COPING TIME", Top Fuel 2021, October 2021 (in English)

[4] Okada, et.al., "Investigation of Chromium Coated Zirconium Alloy Behaviour as Accident Tolerant Fuel Cladding for Conventional LWRs", Top Fuel 2021, October 2021

国内の過去の新型燃料導入プロセス（55GWd/t燃料の例）

- 55GWd/t燃料導入では、初期段階の試験炉照射後に安全影響等をまとめた報告書を発行し、国内先行照射に向けた整理を行った。
- また、国内/海外炉先行照射を並行実施によりデータを拡充し本格導入許認可前に報告書を取りまとめた。

Crコーティング被覆管導入ロードマップ



PWR・55GWd/t燃料導入実績



▼加圧水型原子炉高燃焼度化ステップ2
先行照射試験 検討結果報告書(1993.4)
(JMITI・原子力発電技術顧問会)

▼PWR燃料の高燃焼度化（ステップ2）及び
燃料の高燃焼度化に係る安全研究の
現状と課題について(2001.12)
(METI原子力安全・保安部会 原子炉安全小委員会)

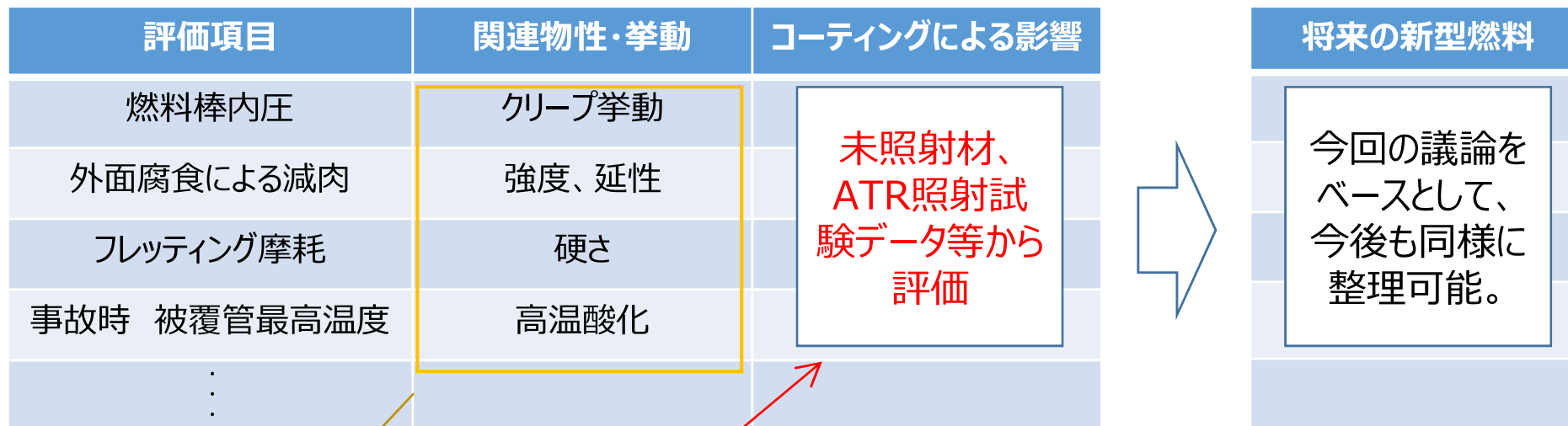
➤ 母材に変更はなく、また、コーティングによる影響は限定的、かつ、既存炉に対して悪影響を及ぼさない方向であることを踏まえ、以下に示す方法にて新型燃料導入による安全性を示していくことを想定しており、審査を手戻りなく円滑に進むように、安全性の示し方について意見交換を行いたい。

取得項目の分類	取得時期	安全性の示し方
未照射材 の基礎物性データ、事故模擬時の挙動データ (照射模擬材を用いたLOCA試験など)	取得中 (~2023)	B. 照射影響が低燃焼度で飽和すること、著しい剥がれがないことを確認することで、実機少数体先行照射において悪影響を及ぼさないことを確認できる。
一部照射データ の活用(表面の剥がれ状態、外径変化、水素吸収、強度、など)	少数体先行照射までに取得	
55GWd/t 到達時点での物性の不確かさ (照射影響は低燃焼度で飽和すると考えているが、その影響を確認する)	本格導入までに取得	C. 部分的剥がれによる熱勾配など、物性の不確かさは否定できないことから、ホットスポットに装荷しない炉心設計とする。
実機使用環境での挙動 （集合体曲がり等） その他、予期しない燃料破損が起らないこと、過度な集合体曲がり等が起らないことの確認	少数体先行照射中	C. 制御棒位置に装荷しない炉心設計とする。また、破損したとしてもよう素濃度監視、かつ、装荷本数を限定することで、燃料破損したとしても原子炉の安全を阻害しないことを評価で示す。
過渡試験データ (ランプ試験、RIA試験など)	本格導入までに取得	A. 母材は変わらず、被覆材内面のPCI※への影響はないため、従来材のデータを用いて悪影響を及ぼさないことを示す。

※ PCI：ペレット／被覆管相互作用（Pellet-Clad Interaction）。出力急上昇時等でペレットが膨れすぎると、燃料ペレットが被覆管を内側から押し広げる形となり、それが被覆管の延性範囲を超えると被覆管破損に繋がる。

新型燃料導入による安全評価項目への影響の展開イメージ(例)

- ▶ 新型燃料導入による影響範囲を燃料に対する安全要求をもとに整理する。
- ▶ 具体的には原子力学会技術レポート等を参考にして、燃料の安全評価項目と新型燃料導入による影響を特定し、試験炉照射データなどの結果から影響を評価する。
- ▶ コーティングを題材に議論を深め、将来の新型燃料においても適用できる基礎を作る。



関連物性・挙動	今回の少数体先行照射実施前	本格導入前の必要データ	過去の先行照射例
クリープ挙動	○ (未照射)	○	○
強度	○	○	○
RIA時挙動		○	○

試験炉(米国ATR等)での取得データや未照射データを整理する。

これにより、本格導入(クレジットをとった許認可)で必要なデータを明確にするとともに、将来の新型燃料においても適用できる基礎として活用できる。

- 設置許可基準規則・技術基準規則では、被覆管の仕様までは規定されていないため、[法令等の改正は不要であり、現行法令等のもとで申請・審査は可能と考える。](#)
- なお、技術基準規則解釈では別記-10のとおりジルカロイ-4を想定した仕様の記載があるものの、既にジルカロイ-4以外の被覆材についても特殊加工認可を取得し導入済であるため、別記-10に限定されるものでもない。

規則類	条文	記載
設置許可基準規則	15条	5 燃料体は、通常運転時における圧力、温度及び放射線に起因する最も厳しい条件において、必要な物理的及び化学的性質を保持するものでなければならない。
		6 燃料体は、次に掲げるものでなければならない。 一 通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時における発電用原子炉内の圧力、自重、附加荷重その他の燃料体に加わる負荷に耐えるものとする。
	13条	設計基準対象施設は、次に掲げる要件を満たすものでなければならない。 一 運転時の異常な過渡変化時において次に掲げる要件を満たすものであること。（以下略）
技術基準規則	技術基準23条	燃料体、減速材及び反射材並びに炉心支持構造物の材料は、通常運転時における圧力、温度及び放射線に起因する最も厳しい条件において、必要な物理的及び化学的性質を保持するものでなければならない。
		燃料体、減速材及び反射材並びに炉心支持構造物は、最高使用圧力、自重、附加荷重その他の燃料体、減速材及び反射材並びに炉心支持構造物に加わる負荷に耐えるものでなければならない。
解釈	23条解釈	3 第1項及び第2項の燃料体の物理的性質、化学的性質及び強度等については「発電用軽水型原子炉の燃料設計手法について（昭和63年5月12日 原子力安全委員会了承）」及び「燃料体に関する要求事項（別記-10）」によること。