

事故耐性燃料への対応について

2022年6月20日

事故耐性燃料（ATF）の種類

✓ ATFの候補材のうちnear termであるクロムコーティングが国内外で最も開発が進んでおり、クロムコーティングの開発・導入について議論。

名称	概要	特徴
クロムコーティング ジルカロイ	ジルコニウム合金をクロムコーティングすることで酸化反応を抑制	・融点はジルコニウム合金とほぼ同等 ・実用化に近いが、SA時耐性効果※ ¹ は限定的
改良ステンレス鋼 (FeCrAl-ODS)	高温時、アルミナの不動態形成により酸化反応抑制	・融点はジルコニウム合金より低い ・加工はしやすいが、中性子経済が悪い※ ² ・実用化に比較的近いが、SA時耐性効果※ ¹ は中程度（SA時水素発生抑制が期待）
炭化ケイ素 (SiC)複合材	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、酸化は殆ど生じない	・融点はジルコニウム合金より高い ・加工性は金属に劣る、SA時耐性効果※ ¹ は大（SA時水素発生抑制が期待） ・長尺化、気密性など課題があり、実用化に時間を要する

※¹ 重大事故等対策有効性評価に対する効果。

※² ただし、被覆管厚を薄くするなどの対策は可能

クロムコーティング被覆管の導入効果

- 現状知見として、通常運転時から設計基準事故（DBA）においては、**表面酸化反応抑制**の効果を確認。
- 他方で、クロムコーティングをしたとしても、重大事故(SA)のように炉心溶融を想定した許認可上のシナリオにおいては、事故耐性効果は限定的であり、現状知見においては、定量的効果の確認には至っていない。
- **DEC～SA効果の整理と知見・拡充についても本格導入に向け進めていくことが必要**

※ 下記表の「現効果と比較した改善効果（例）」に代表例を示す。

対象	現状知見	現行管と比較した改善効果(例)
事故耐性 (SA, DEC)	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 溶融点は現行と同じ ➤ 1332°C付近にCr-Zr共晶点あり ➤ Crによる水反応抑制/水素発生量抑制 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ SBO想定対処時間の伸長：～10分程度^[1] (10～20μmCrコーティング管感度解析) ➤ 溶融までの水素発生量低減：～60%減少^{[1], [2]}
事故耐性 (DBA)	<ul style="list-style-type: none"> ➤ LOCA時クエンチ性能向上 (現状指針では制限値：1200°C/15%-ECR) ➤ 被覆管膨れ量の抑制 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 1350°C・30%ECRまで非折損^[2] (ECCS性能に対する裕度拡大に期待) ➤ 高燃焼度燃料の微細化ペレット放出量抑制（破裂までの時間緩和、膨れ量緩和）^[3]
過渡時/ 通常運転時 性能	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 450°C水蒸気環境での表面腐食はほとんど進展しない^[2]。 ➤ 表面硬さはジルカロイの1.5～2倍程度 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 通常運転時の熱的制限値に対する裕度拡大に期待。
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 ➤ 再処理プロセスへの影響は軽微な見通し 	—

[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

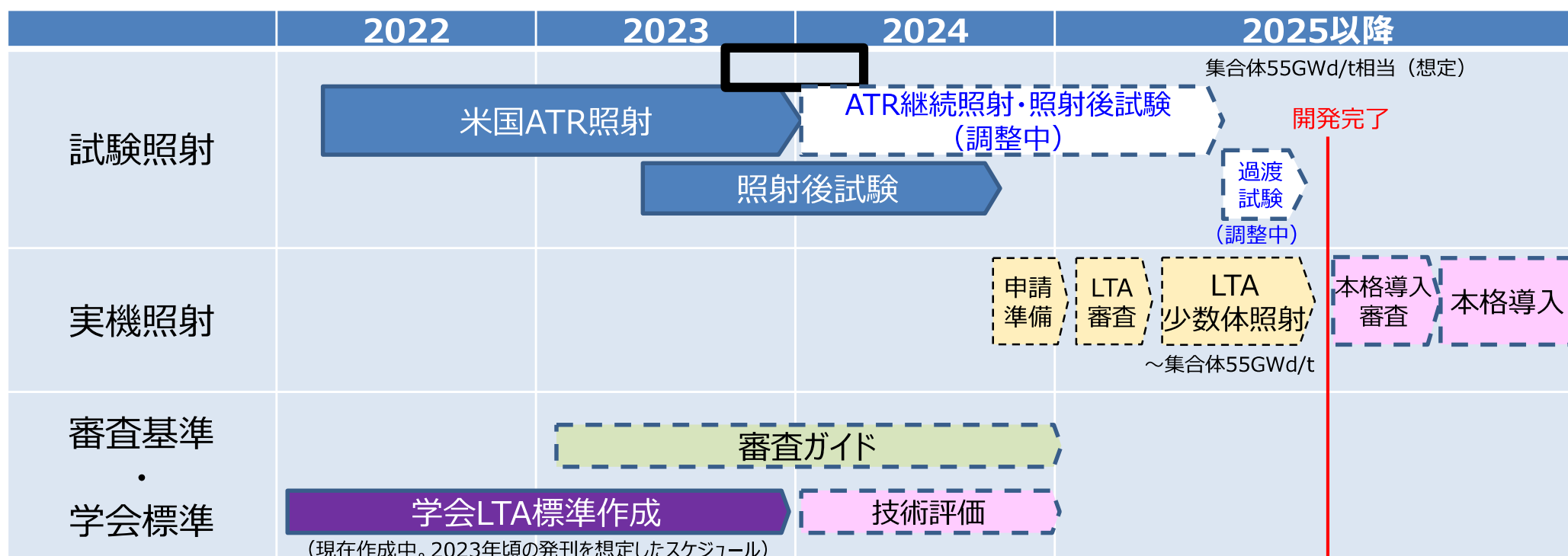
事故耐性燃料（ATF）に対する事業者の考え方

- ✓ 現在、事故耐性燃料（ATF）の開発が進められている。事業者は、これらを導入することにより、発電所の安全性向上に努めたいと考えている。
- ✓ 他方で、ATFは開発段階にあり、現時点において照射実績データが十分にあるわけではない。
- ✓ また、ATFの開発のためには、少数体先行照射燃料(LTA：Lead Test Assembly)の実機装荷により、実炉集合体体系における照射挙動の確認や、照射材を用いた照射後試験データの拡充が必要であると考えている。
- ✓ LTAを装荷する際には、原子炉の安全性を損なわないことを示すことが必要である。クロムコーティング材のように、従来被覆管と同等以上の性能が発揮できると想定されるものについては、今後取得する照射データ等により原子炉の安全性を確保することが可能と考えている。
- ✓ 一方、審査開始後のデータ追加取得といった手戻りによる、規制側/被規制側双方のリソース消費を避けるため、規制側－被規制側の間で、あらかじめLTAに関する共通認識を図ることが望ましい。

⇒**LTA装荷に関する審査要件は明文化されておらず、審査予見性を確保する観点から、規制側の審査ガイドを策定いただきたく、今後、規制企画課実務者レベルとの意見交換を通じて、ガイド作成に協力して参りたい。**なお、このようにクロムコーティング材を題材として、LTA審査の進め方について議論を行い、審査ガイドを策定いただくことは、**他の新型燃料導入における効率的審査にも寄与すると考えられる。**

スケジュール

- ✓ 国内で開発中のクロムコーティングATFは、米国試験炉ATRにおいて2022～2023年に照射予定であり、まで照射される計画。
 - ✓ そこで得られた照射データを基に、実機へのLTA少数体照射をした場合の最早スケジュールを想定。
 - ✓ 新型燃料の本格導入判断にあたっては、導入時期、導入コスト等を勘案する必要がある。
- ⇒現時点で導入判断はできないものの、最早スケジュールを想定した上で意見交換・審査ガイド策定等の準備を遅延なく進めていきたい。



実機LTA(先行照射)における基準適合性の示し方(案)

基準適合性の示し方

⇒具体例は次ページ

- 実機LTAを申請する時点においては、十分に照射データ等が揃っているわけではないため、以下のプロセスで基準適合性を確認することを考えている。

Step1 LTA(先行照射)の審査開始時点におけるデータを整理する。

Step2 被覆材に求められる安全要求事項から展開して、以下のいずれかにより基準適合性を示す。

A.十分なデータが既にとられているものは実測データを基に示す。

(例：PCI試験データなど。被覆管内面は変更がないため、PCI性能を損なわない 等)

B.データ未取得、あるいは一部不足している場合、評価で補完して安全要求を満足することを示す。

(例：表面剥がれ状態、外径変化等は、低燃焼度領域までのデータで傾向を確認する 等)

C.上記A,B以外については、運転中の監視、装荷体数・位置を制限することで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 等)

LTA審査基準

- 上記のようなLTAの実施要件と確認プロセスに関しては、日本原子力学会で標準案を検討中。
- 許認可申請書類での引用による活用や、規制エンドース等も視野に検討していく。

クロムコーティングの場合

- 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から、以下のとおり基準適合性を示すことは可能と考えている。

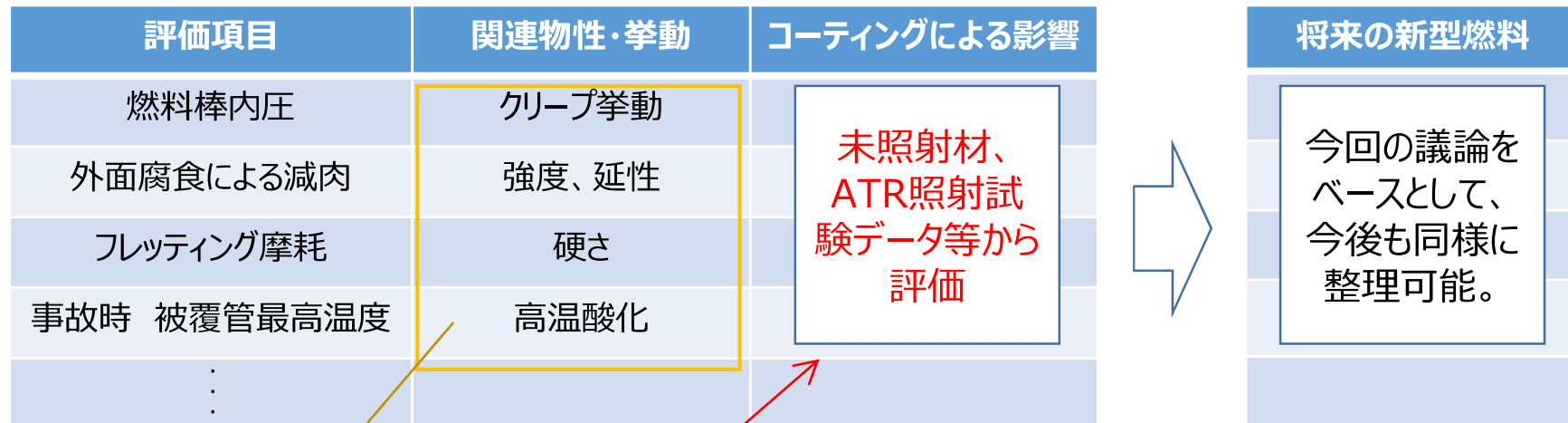
取得項目の分類	取得時期	基準適合性の示し方
未照射材 の基礎物性データ、事故模擬時の挙動データ (照射模擬材を用いたLOCA試験など)	取得中 (~2023)	B. 照射影響が低燃焼度で飽和すること、著しい剥がれがないことを確認することで、実機LTAにおいて悪影響を及ぼさないことを確認できる。
米国試験炉における 低燃焼度 ()データ(表面の剥がれ状態、外径変化、水素吸収、強度、など)	LTAまでに取得	
55GWd/t 到達時点での物性の不確かさ (照射影響は低燃焼度で飽和すると考えているが、その影響を確認する)	本格導入までに取得	C. 部分的剥がれによる熱勾配など、物性の不確かさは否定できないことから、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	LTA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。

具体例：被覆材の要求事項からの展開イメージ

コーティングによる影響範囲の検討

- コーティングによる影響範囲を被覆管の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、燃料の評価項目とコーティングによる影響を特定化し、ATR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整理について議論を深めておき、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LTA 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		○	○

米国ATR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。

法令手続き

行政処分

LTAにあたっての行政処分は、以下パターンがあるが、①を想定。

パターン	評価	説明
① 少数体LTAのための設置変更許可申請	○	設置許可本文にコーティングを追記。(正攻法)
② ①に先んじて型式証明を取得した上で、少数体LTA設置変更許可申請	×	LTAは個別プラントに対して少数体装荷という限定条件のもとで使用するため、型式証明の必要性がない。
③ ノーアクションレターにより行政処分不要であることの確認(米国の除外規定を想定)	×	許可本文の変更になると想定され、行政手続き要否の確認をとる必要性がない。

設置許可本文の記載

(ii) 燃料被覆材の種類

- ・ジルカロイ-4の合金成分を調整しニオブ等を添加したジルコニウム基合金
 - ・ジルコニウム-ニオブ合金にスズ及び鉄を添加したジルコニウム基合金
- ただし、第1～第13領域燃料については、ジルカロイ-4

(iii) 燃料要素の構造

a. 構造

燃料要素(燃料棒)は、円筒形被覆管に二酸化ウラン焼結ペレット(一部ガドリニアを含む)を挿入し、両端を密封した構造であり、ヘリウムが加圧充てんされている。

b. 主要寸法

燃料棒外径	約9.5mm
被覆管厚さ	約0.6mm
燃料棒有効長さ	約3.7m

法令等改正

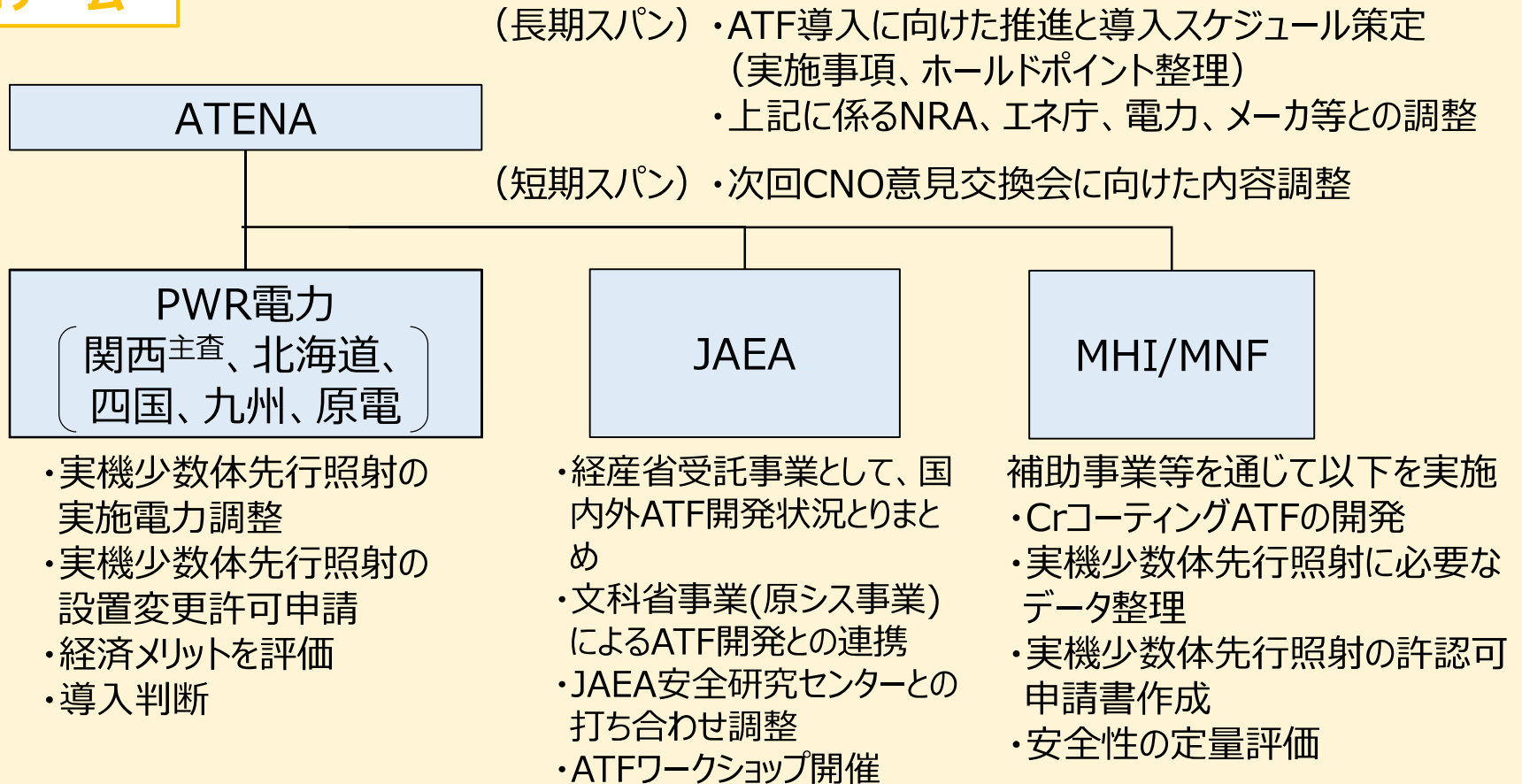
- 設置許可基準規則・技術基準規則では、被覆管の仕様までは規定されていないため、**法令等の改正は不要であり**、現行規則のもとで申請・審査は可能と考える。
- なお、技術基準規則解釈では別記-10のとおりジルカロイ-4を想定した仕様の記載があるものの、既にジルカロイ-4以外の被覆材についても特殊加工認可を取得し導入済であるため、別記-10に限定されるものでもない。
- 一方で、ATFのスムーズな審査を実現するために、審査ガイドの策定が望ましいと考え、それにより導入審査の予見性が高まることで、導入是非の判断にも資すると考える。

法令等の記載（抜粋）

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。

参考：コーティングATF検討体制

Crコーティング ATF検討チーム

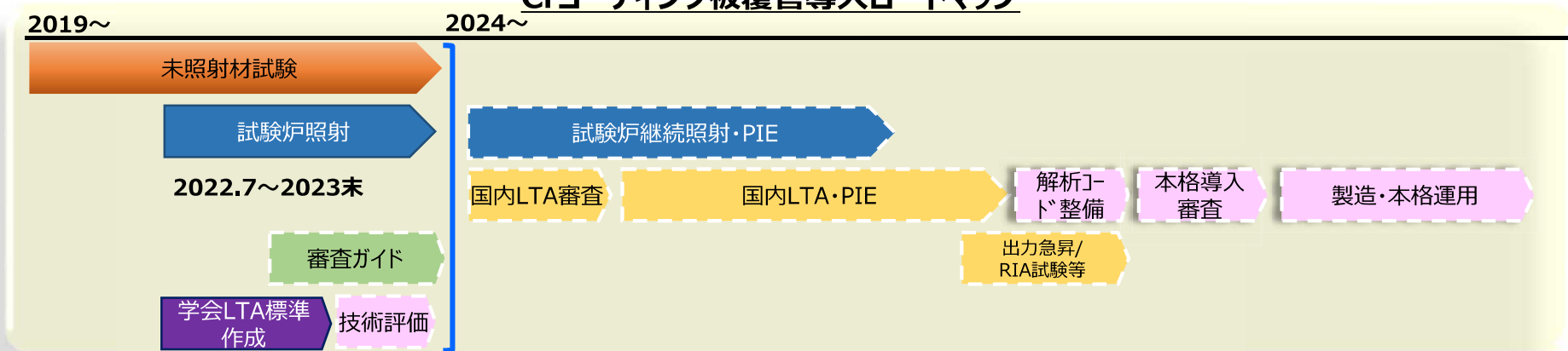


※新型燃料導入の全般に係る事項に関して、BWR電力とも連携・協力する。

参考：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)
(旧MITI・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)

※Lead Use Assembly