

炉心燃料の安全高度化に向けた原子力学会での体系的活動について
—炉心燃料分科会活動報告—

Advanced safety of nuclear fuels and cores

- Systematic approach at the fuel and core subcommittee -

(5) 商用炉先行照射 (LUA) の導入に向けたワーキンググループ活動

(5) Activity on lead use assemblies (LUA)

*北島 庄一¹, 阿部 弘亨², 山内 景介³, 原田 健一⁴, 尾家 隆司⁵, 福田 龍⁶,
村上 望⁷, 佐藤 大樹⁸, 久保 雄一郎⁹, 金子 浩久¹⁰

¹電力中央研究所, ²東京大学, ³東京電力HD, ⁴中部電力, ⁵関西電力,
⁶三菱重工業, ⁷三菱重工業, ⁸三菱原子燃料, ⁹原子燃料工業,
¹⁰グローバル・ニュークリア・フュエル・ジャパン

核燃料部会セッション

[標準委員会, 標準委員会システム安全専門部会共催]

2022年9月8日

商用炉先行照射に関する標準/指針作成の背景

- ◆ 幅広い開発レベルの新設計燃料の導入が想定されている。
 - 世界的には十分な商用炉使用実績がある新設計燃料(10x10燃料、等)
 - 研究開発が進められている新設計燃料(事故耐性燃料、等)

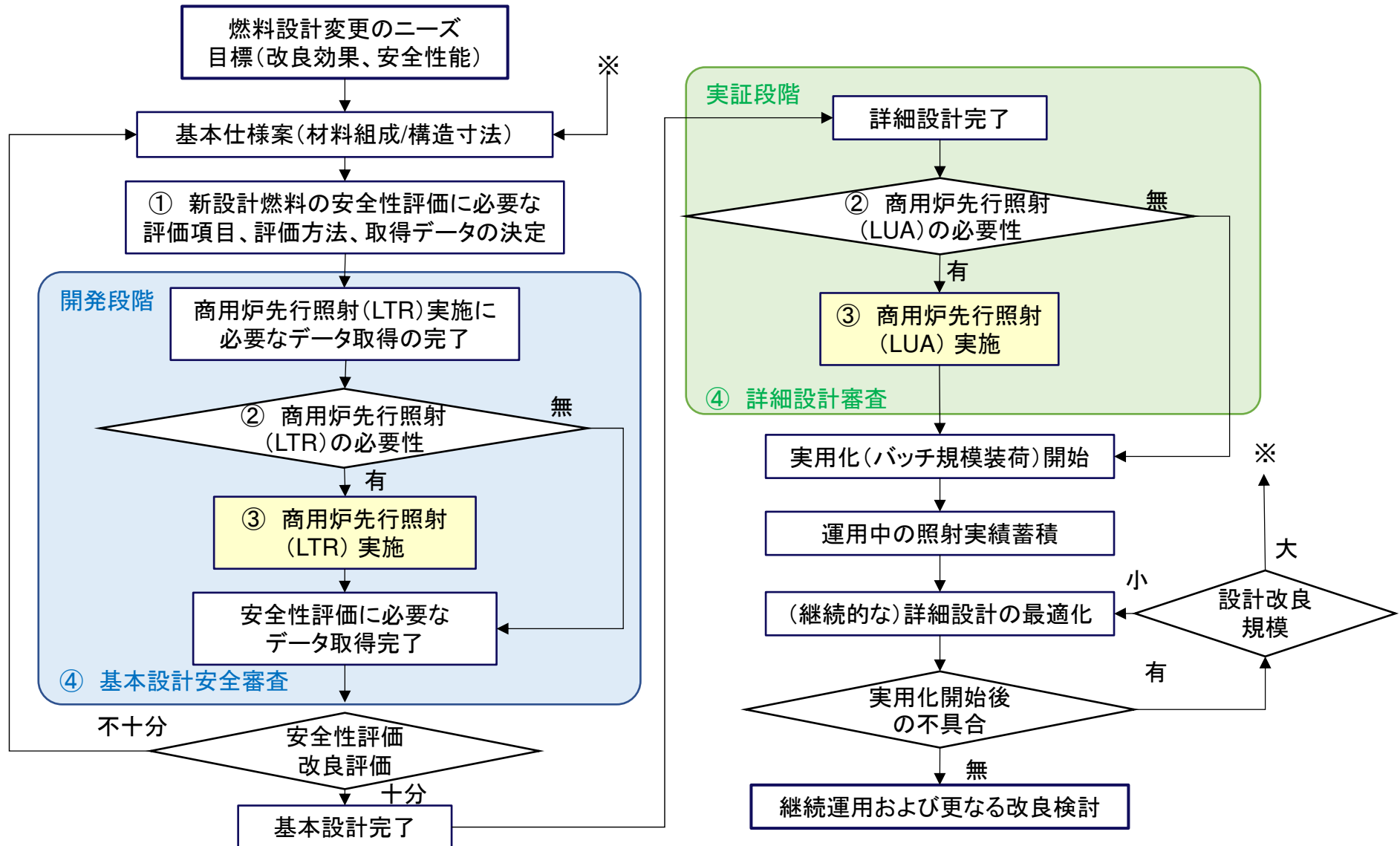
- ◆ 関連する民間規格の制定により、商用炉先行照射の導入に係る標準/指針を作成するため環境が整ってきた。
 - 炉心燃料の安全設計の基本的要求指針、具体的要求指針等の体系的な整理
⇒ 発電用軽水型原子炉施設の炉心及び燃料の安全設計に関する報告書
(AESJ-SC-TR009-1:2021)
 - 運転中の漏えい燃料の検知と発生時の適切な対応
⇒ 運転中における漏えい燃料発生時の監視及び漏えい燃料発生時の対応規程
(JEAC-4213-2016)

- ◆ 国内の商用炉先行照射の役割を充実させることが望まれている。
 - 相次ぐ国内外の試験炉の廃炉
 - 海外での商用炉先行照射の将来的な利用の不透明性

商用炉先行照射に関する標準/指針の役割

- ◆ 新設計燃料を速やかに導入することにより、原子力発電所の継続的安全性向上に資するため、商用炉先行照射(LTR/LUA)を有効に活用する方策を示す。
 - ① 商用炉先行照射の実施に向けて必要な評価項目
 - ② 商用炉先行照射で取得すべきデータ(安全評価、性能評価)
 - ③ 商用炉先行照射を安全に実施するための方法(照射前及び照射中の安全確認)
 - ④ 設置変更許可を含めた新設計燃料導入手続きの合理的な負担低減

新設計燃料の実用化に至るまでの手順と 商用炉先行照射の位置づけ



① 新設計燃料の安全性評価に必要な評価項目(1/3)

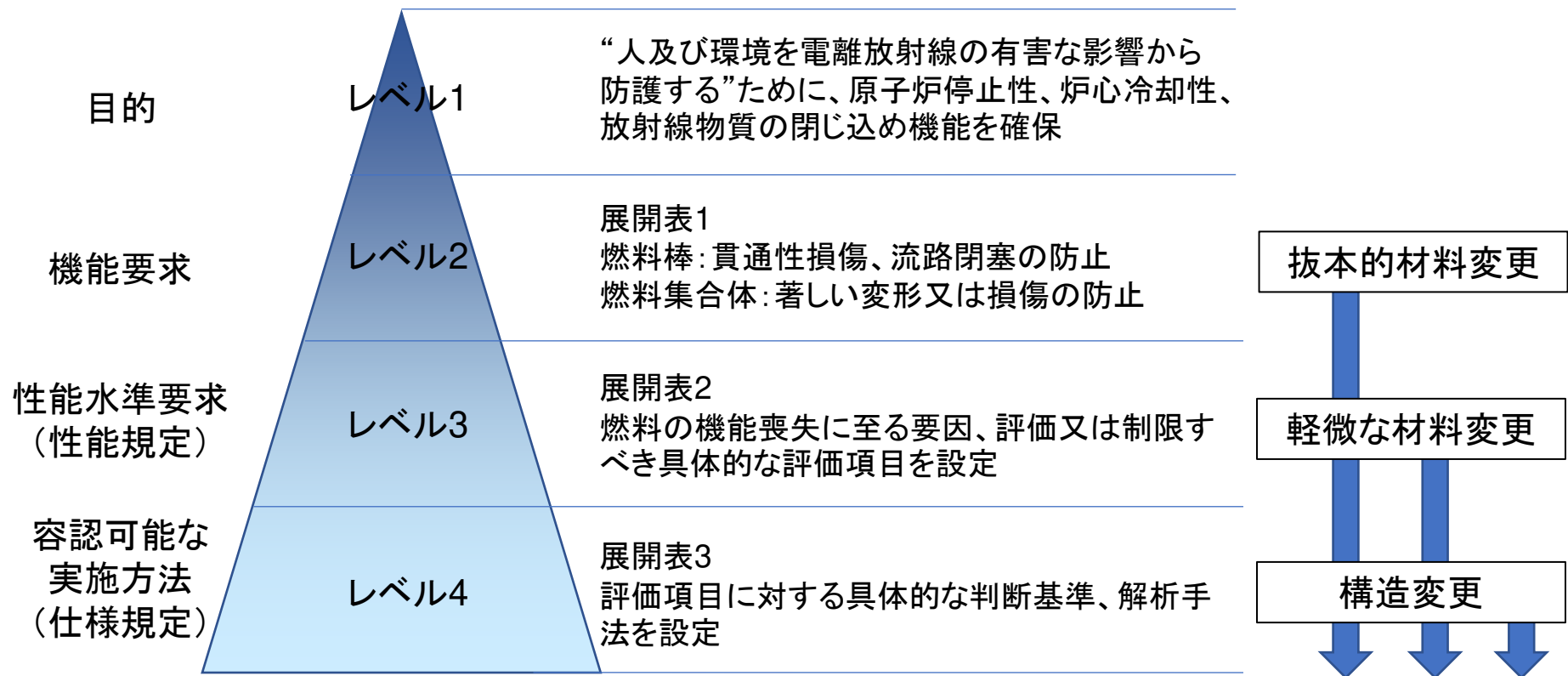
- ◆ 商用炉先行照射(LTR/LUA)の安全性評価及び改良効果に必要な評価項目は、新設計燃料の対象部位、技術的達成度を考慮し、以下の手順で決定する。
 - 一般的な評価項目は、技術レポートの性能水準要求(レベル3)の展開表2に基づいて決定する。
 - 新設計燃料で設計改良内容ごとに着目すべき個別の評価項目の特定する。
 - 抜本的材料変更等を行う新設計燃料では、技術レポートの機能要求(レベル2)に立ち返って評価項目を特定する。
 - PIRT(重要度ランクテーブル)などを活用し、“データ量が小”且つ“影響が大”に相当する項目・特性について特に留意する。

① 新設計燃料の安全性評価に必要な評価項目(2/3)

安全設計/評価項目(設計基準事象): Cr-coated被覆管の例

運転状態	損傷モード	評価項目	評価方法			特記事項
			機械設計(解析)	安全評価(解析)	その他	
通常運転時 【閉込め機能】	機械的損傷	内圧	○(クリープ)	-	-	
		クリープコラプス	○(クリープ)	-	-	
		流動振動摩耗	-	-	流水振動試験	表面硬さ影響確認
	化学的破損	腐食減肉	○(酸化反応)	-	-	Cr溶出影響確認要
		水素吸収	○(酸化反応)	-	-	
運転時の異常な 過渡変化時 【閉込め機能】	機械的損傷	歪	○	-	-	
		応力	○	-	-	
		PCI/DHC	-	-	出力急昇試験	
		燃料エンタルピ(PCMI)	-	○	-	制限値確認のため RIA試験実施要*
		燃料中心温度	○	○	-	
		疲労	○	-	-	
	熱的損傷	DNBR	-	○	-	
		燃料エンタルピ(高温融解)	-	○	-	* 同上
事故時 【冷却機能】	熱的破損	被覆管温度・酸化量	-	○(酸化反応)	-	割れ等影響確認
	機械的破損	燃料エンタルピ	-	○	-	* 同上
	熱/機械的破損	膨れ・破裂	-	○(クリープ)	-	
地震時 【冷却/閉込め】	機械的損傷	応力	○	-	地震時 曲げ応力解析	

① 新設計燃料の安全性評価に必要な評価項目 (3/3)



設計改良に応じた安全確認項目の検討(技術レポート掲載の階層的な安全要求図との関係)

② 商用炉先行照射で取得するデータ(1/2)

- ◆ 新設計燃料の安全性評価及び改良評価の精度向上が望める項目について、照射データを取得する。
- ◆ 原子力発電所の安全性を損なわない範囲で、商用炉環境での照射実績を積み重ねることにより、新設計燃料の安全性・信頼性をより確かなものとする。

各データ取得方法とその特徴

データ取得方法	運転状態	試験体	データ種別
炉外試験	通常時 運転時の異常な過渡変化時 事故時	各燃料構成要素 燃料棒 燃料集合体	未照射データ
試験炉照射&PIE	通常時 運転時の異常な過渡変化時 事故時	(短尺)燃料棒	照射データ
商用炉先行照射 &PIE	通常時 (試験炉へのサンプル提供)	燃料棒(LTR) 燃料集合体(LUA) クーポン試験片	照射データ

② 商用炉先行照射で取得するデータ(2/2)

◆ 商用炉先行照射(LTR)

- 開発段階の新設計燃料の照射データ
- 通常運転中のペレット、被覆管、燃料棒に関する豊富な照射データ
- 試験炉照射への迅速かつ豊富なサンプル提供

◆ 商用炉先行照射(LUA)

- 実証段階の新設計燃料の照射データ
- 新設計燃料の安全性・信頼性をより確かなものとする照射データ
- 通常運転中の燃料集合体に関する照射データ

◆ 実運用

- 実用化段階の新設計燃料の照射データ
- 通常運転中の燃料集合体に関する照射実績の蓄積

商用炉先行照射により取得することが有効なデータ(例)

開発内容	取得データ
ペレット	結晶構造変化、FP分布状態、寸法変化、被覆管癒着等の熱・化学的相互作用等
被覆管	表面腐食、水素吸収の化学的作用、寸法変化、照射後の機械特性等
燃料棒	FPガス放出に伴う燃料棒内圧変化、ペレットと被覆管の機械的相互作用による外径変化等
燃料集合体	燃焼集合体の伸び・曲がり・寸法変化、ばね要素等の照射による応力緩和等

③ 商用炉先行照射の照射前の安全評価

- ◆ 商用炉先行照射に先立ち、LTR/LUAの炉内使用条件(炉内装荷体数、装荷位置、装荷期間等)に基づいた安全評価を実施し、確認すべき全ての評価項目に対する判断基準を満足することを確認する。
 - 炉内装荷体数、装荷位置、装荷期間等については以下を念頭に設定する。
 - 運転時の異常な過渡変化を含む通常運転時および事故時に周辺の公衆に対して著しい放射線被ばくのリスクを与えないこと
 - 安全評価及び改良効果に必要なデータを取得できること
 - 安全評価では、以下のような設計評価等も行うことができる。
 - 既認可燃料の仕様から変更のない設計項目に対する合理的な評価
 - LTR/LUAの仕様、炉内使用条件、照射計画等を踏まえた上での既存データに基づく合理的な範囲における外挿

③ 商用炉先行照射の照射中の安全性確認

- ◆ LTR/LUAの照射中においては、比較的大きな不確かさを有する商用炉先行照射(LTR/LUA)に対する安全評価を含め、運用で補完する。
 - 運転中の監視、定期検査中の測定などにより基本的な燃料の安全機能維持を確認する。
 - 安全維持機能の適切な確認には、これまでの原子炉の運転経験等に基づく知見を踏まえてとりまとめた民間規格類を活用する。

安全維持機能を確認するための監視/検査方法

安全維持機能	監視/測定方法	関連する民間規格
閉じ込め機能	<ul style="list-style-type: none">• 運転中の冷却水中放射性物質濃度の監視	JEAC 4213-2016(運転中における漏えい燃料発生の監視及び漏えい燃料発生時の対応規程)
停止機能	<ul style="list-style-type: none">• 定期検査時の制御棒クラスタ挿入時間の測定(PWR)	JEAC 4001-2020(原子燃料管理規程)
冷却形状機能	<ul style="list-style-type: none">• 定期検査時の再使用燃料集合体の外観検査• 運転中の炉心出口での冷却材温度分布の測定(PWR)	

③ 商用炉先行照射の継続/中止の判断(1/2)

- ◆ 運転中及び定期検査中の安全確認、根幹的な安全機能の確認を十分に行うことで、安全確保の万全を期す。
- ◆ 設計段階での想定でない状況となった場合の商用炉先行照射燃料の継続照射の要否について、
 - 少数体を考慮したうえでの真の安全性の阻害となる限界
 - 有効な照射データの取得の継続の両方に留意しながら、具体的に多様な想定外の状況を事前に考えながら、柔軟に判断できるよう幅広い検討を行っている。

③ 商用炉先行照射の継続/中止の判断(2/2)

商用炉先行照射の継続/中止の判断に係る検討例

	監視、測定方法	次サイクル継続照射	次サイクル照射はホールド
基本的 安全機能 の支障 又は喪失	閉じ込め機能 <ul style="list-style-type: none"> 当該サイクルは放射性物質濃度の監視・管理の下で原則的に継続照射(通常燃料と同等) 定検時にリーク燃料を特定 	<ul style="list-style-type: none"> リーク燃料がLTR以外と判明 リーク燃料がLTRでも、新設計の燃料棒以外と判明。かつ、系統的原因でないと判断(サイトでの漏えい燃料の引抜き及び代替ロッドの挿入等の作業が可能であることが前提) 	<ul style="list-style-type: none"> リーク燃料がLTRでかつ新設計の燃料棒と判明 リーク燃料がLTRで、新設計燃料棒以外であっても、集合体構造設計等に起因する系統的なリークと判断(流動振動等)
	止める機能 <ul style="list-style-type: none"> 定検時に制御棒挿入時間を測定 	<ul style="list-style-type: none"> 制御棒挿入時間が規定時間を超過しても完全挿入 ⇒ 制御棒挿入位置以外に装荷して継続照射(LTRは最初から制御棒以外の位置装荷が望ましい) 	<ul style="list-style-type: none"> 制御棒が不完全挿入でスタック ⇒ 同種のLTRについては、異常なければ、制御棒挿入位置以外に装荷して継続照射
集合体 照射挙動 の異常	集合体寸法変化 (伸び、曲がり) <ul style="list-style-type: none"> 次サイクル終了時の寸法変化を予測したうえで判断 	<ul style="list-style-type: none"> 最確曲線から外れても(包含的に設定された)設計曲線内と予測 設計曲線から外れても制限値以内と予測(最確曲線を超過しても直ちに安全機能の喪失としない確認が望ましい) 	<ul style="list-style-type: none"> 次サイクル末までに制限値を超過すると予測

④ 多様な安全確認による設置変更許可の負担の軽減

- ◆ 商用炉先行照射の許認可手続きは、現行の法体系に基づく許認可取得を基本と考えるが、新設計燃料の導入を円滑するため、許認可の負担の合理的な軽減を目指す。

これまでの新設計燃料の導入

- 商用炉先行照射(LTR/LUA)の実施において大半で設置変更許可が必要とされた。
- 実用化でも、改めて設置変更許可が必要とされた。



許認可の負担の軽減

今後のLTA・LUAにおける合理的な許認可のありかたの検討

設置変更許可手続きのスキップ(米国10CFR50.78での例外規定等)は、国内法令改正が必要で早期実現は困難

設置変更許可の前後の制度・機会を活用した多様・重厚な安全確認を實踐し、設置変更許可での負担を軽減



設置変更許可の前

- 型式証明による新設計燃料の妥当性の事前審査
- トピカルレポートによるモデル・手法、適用基準(値)の妥当性の事前審査

(実証段階のLUAだけでなく、開発段階のLTAも対象)

設置変更許可の後

- 取替炉心の安全確認における燃料挙動・健全性を含めた安全確認(開発段階での不確かさの大きさは、小数体、製造仕様・装荷位置等でのAs Built, As Isの情報を反映した評価でカバー)
- 運転中の監視、定検時の測定等(保安規定等)による重厚な安全確認
 - 定検時の外観検査、寸法確認
 - 基本的安全機能(閉じ込め機能、止める機能、冷やす機能)の維持の確認

④ 炉心運用高度化以外をターゲットとした 早期実用化のための許認可合理化

- ◆ 炉心運用高度化と切り離れた時期に高い安全性を有した新設計燃料を導入することなども選択肢の一つとして考えられるため、より一層の許認可の合理化が望まれる。

従来の新設計燃料の導入

炉心運用高度化(高燃焼度、サイクル延長、Puサーマル等)に備えての商用炉先行照射が主

- 運用高度化自体が設置変更許可対象
- 設置変更許可も炉心運用高度化のターゲットに合わせて計画

安全性向上を目的とした新設計燃料(ATF)の導入

炉心運用高度化が予定されている場合

- 炉心運用高度化の時期に合わせて、ATF燃料の許認可・導入を計画できる

炉心運用高度化の予定が当面ない場合

- ATF燃料導入だけのために実機照射の設置変更許可の手続きが必要になる

許認可(設置変更許可)の負担軽減と早期実用化の両立できる仕組みが望まれる

設置変更許可の前後の多様・重厚な安全確認による設置変更許可への集中負担の軽減(既出)

実証段階の商用炉先行照射(LUA)から実用化に至るまでの一括の許認可手続きの実現

今後の予定

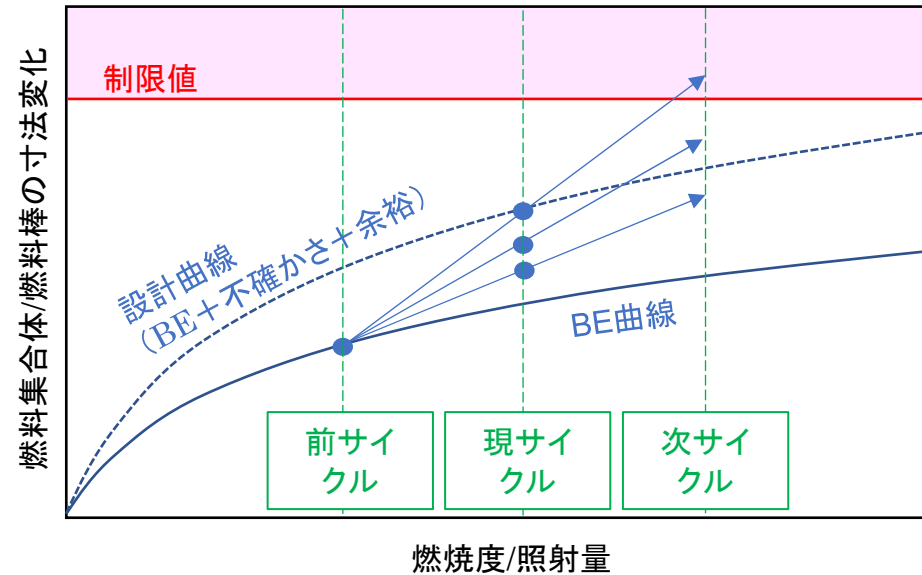
- ◆ 以下の審議を経て、来年度上旬の標準/指針の制定を目指す。
 - 炉心燃料分科会
 - システム安全専門部会
 - 標準委員会
 - 公衆審査

商用炉先行照射の継続/中止の判断(補足)

- ② 定期検査中に寸法変化に異常が確認された場合は、前サイクルからの変動等を考慮して次サイクル末までの予測評価を行い、次サイクル以降の継続照射を判断する。

➤ 現サイクルのデータ、及び、次サイクル予測値に基づく判断

- < 設計曲線 ⇒ 継続
- 設計曲線 ~ 制限値 ⇒ 継続可能(?)
- > 制限値 ⇒ 中止



燃料集合体/燃料棒に特異な寸法変化が発生した場合の次サイクル照射継続/中止の考え方(例)

