

課題の状況を整理するための評価方法 (TRL、metrics、attribute guide)

軽水炉燃料等の安全高度化ロードマップ検討WG
第一回会合資料

倉田 正輝

日本原子力研究開発機構 廃炉国際共同研究センター
事故進展挙動評価ディビジョン

本日の概要

- ✓ **商用軽水炉用のATF開発**
 - 現実的かつ効率的な開発戦略が必要
 - 分野横断しての開発段階及び課題の認識共有が不可欠
 - 開発ロードマップを適切にローリングする道具立てが必要

- ✓ **ロードマップをローリングする3つの道具立て：分野横断した認識共有、外部への説明性、透明性のためのツール**
 - TRL (Technology readiness level)：技術成熟度評価
 - 基礎研究、工学開発、実用化開発のレベル設定
 - 技術開発の現状と実用化までのギャップ
 - Metrics：開発戦略・方針
 - 技術成熟度を上げていく戦略、ロードマップ上のマイルストーンの達成方針
 - 候補技術のスクリーニング、開発課題の優先順位づけの手段
 - Attribute guide：技術課題マップ
 - 解決すべき要素課題と達成目標のリスト
 - Potential killerのサーベイ

OECD / NEA及び米国の動向

- ✓ OECD / NEA EGATFL (Expert Group of Accident Tolerant Fuel for LWRs)
 - 設立の目的：要素技術情報のアップデート、導入効果の定量化及び技術評価の方法に向けた国際的ガイドラインの策定
 - ガイドラインに関して、2015年9月目途で、TRL、metricsに関する報告書とりまとめ予定。併せて、新型被覆管の要素技術の現状技術レベル評価に向けたattribute guide策定中(新型燃料に関しては、開発段階が低いため、技術の現状調査に留まる見込み)
- ✓ 米国DOE
 - Technology Readiness Levels for Advanced Nuclear Fuels and Material Developments, FCRD-FUEL-2014-000577, Jan. 2014. (新型燃料開発に関する一般的なTRL定義)
 - Light Water Reactor Accident Tolerant Fuel Performance Metrics, FCRD-FUEL-2013-000264, Feb. 2014. (ATFの開発metrics、attribute guideについても記載)
 - これらに基づき、2016.9月に、DOEにおいて技術選定(2022年のLTR照射に進む、有力要素技術1-2個の選定)を予定

米国のATF研究開発スケジュール

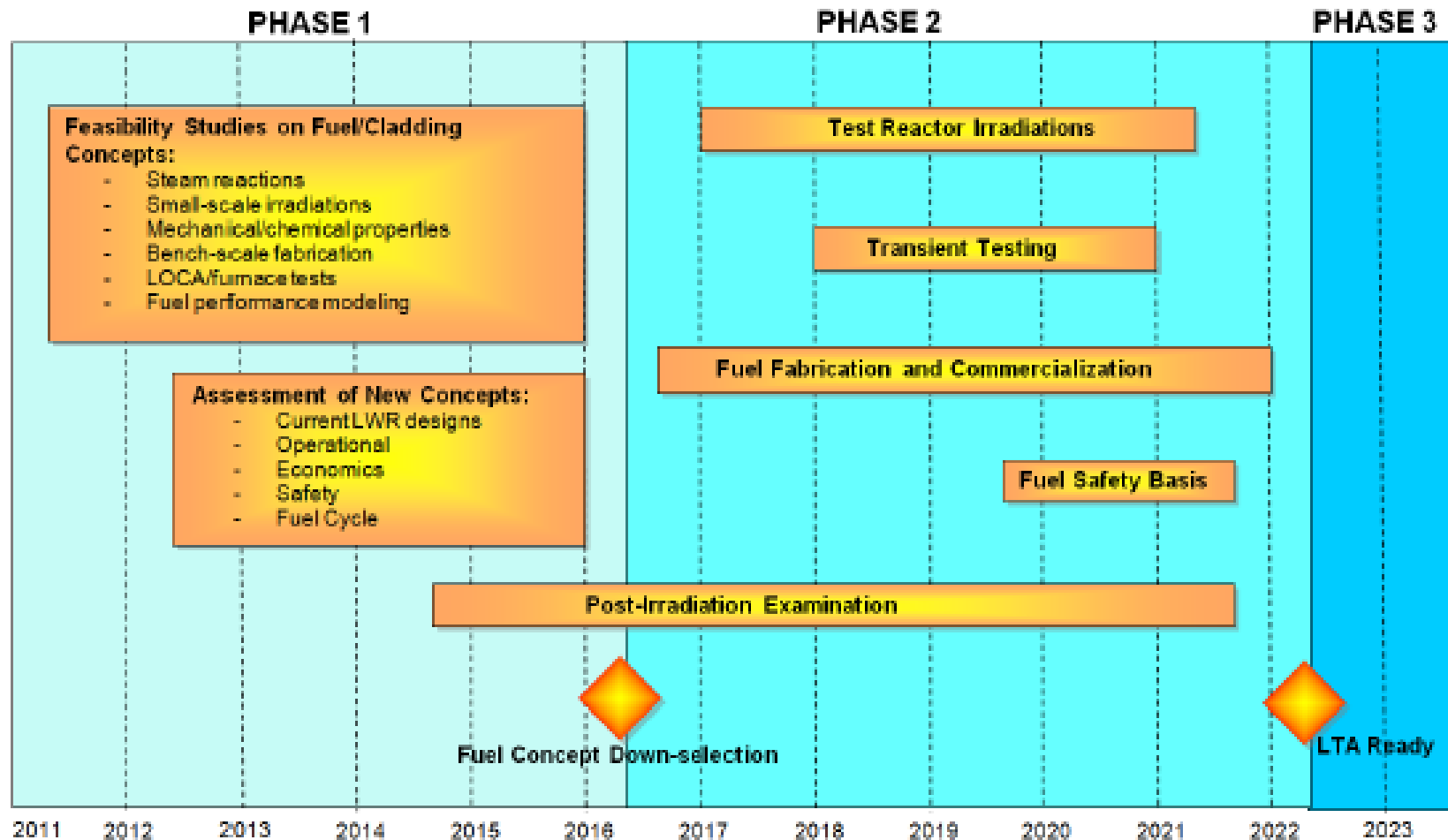


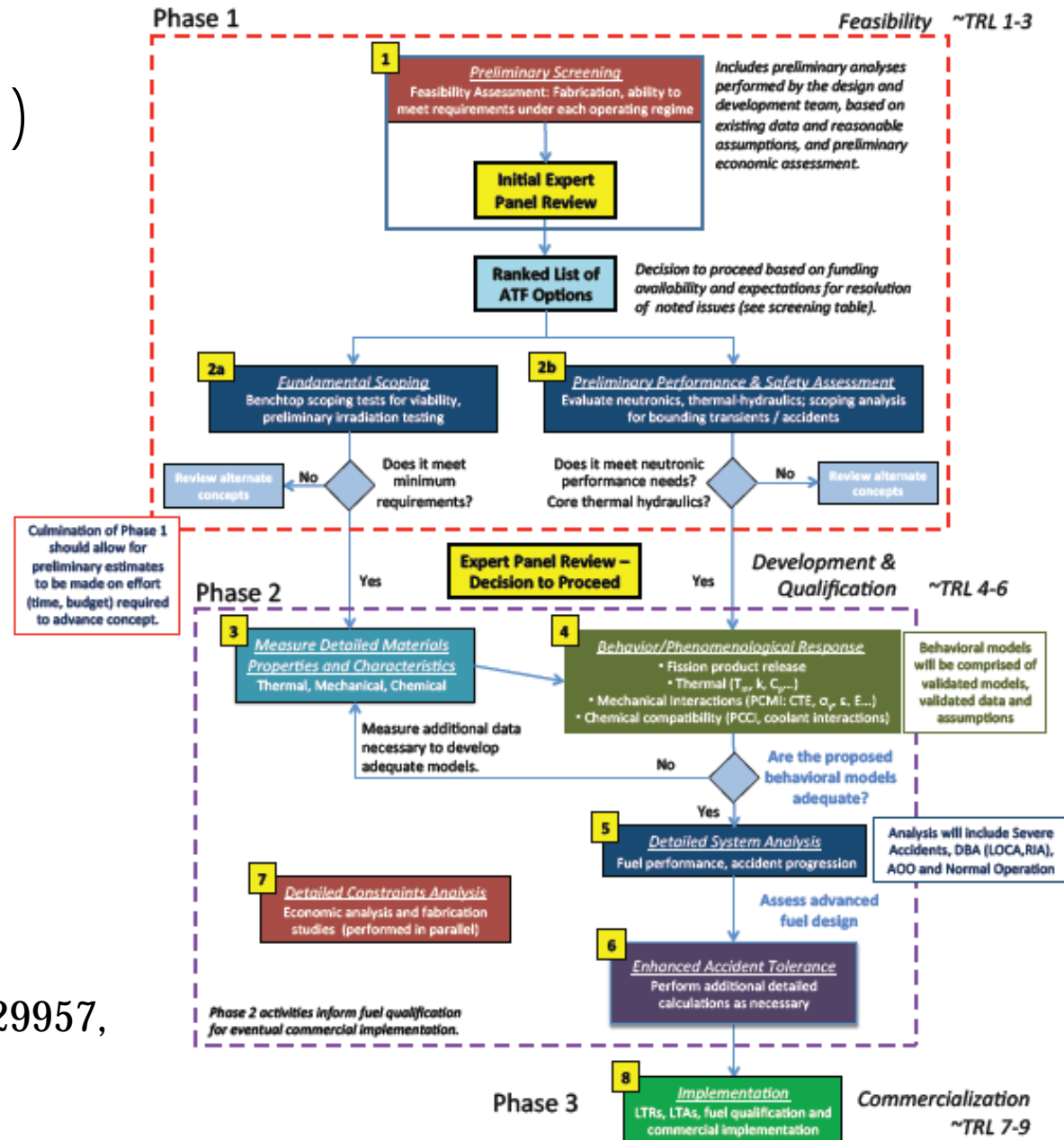
Figure ES-1. Research, development, and demonstration strategy for enhanced accident tolerant fuel development; an estimated timeline for each phase is included.

新型燃料の軽水炉導入に関する 技術成熟度(総合評価、例)

TRL	開発段階	
性能実証	9	商用炉利用
	8	新たな許認可・規格基準に基づく新型燃料の全炉心装荷、燃料品質の確認
	7	新型燃料の製品化、実ベンダーによる最終設計の確立 商用燃料として製造技術確立、新型燃料集合体の先行照射 (LUA)
原理実証	6	新型燃料集合体の性能実証、安全評価基準の確立 新たな許認可・規格基準に基づく、プロトタイプ燃料集合体(LTA)の設計と照射試験 新型燃料製造プラントの設計
	5	プロトタイプ燃料棒の性能実証 LTR照射試験 (燃料装荷、商用炉照射) ← 米国の2022年目標 新型燃料製造プロセス性能の証明
	4	新型燃料 (プロトタイプ) の概念設計、燃料設計パラメータの確立 プロトタイプ燃料の照射試験 (燃料装荷なし、照射炉) 燃料製造要素技術の証明
概念実証	3	燃料概念の実証、サンプル照射試験 工学技術の開発目標の設定 ← フランスが重視する開発段階 (実用化に対しpotential killerが存在するか否か?)
	2	新たな燃料概念の具体化、達成可能範囲の評価 技術オプションの評価
	1	新たな燃料概念の提案 開発課題の抽出

米国レポートに準じ、報告者がとりまとめたもの
TRL評価においては、これを技術分野ごとにブ
レークダウンし、要素技術ごとにエビデンスを示して、
技術の現状評価を行う。(例:分離変換技術のTRL評価)

ATF開発 メトリクス(米国)



USDOE報告書 INL/EXT-13-29957,
FCRS-FUEL-2013-000264

Figure ES-2. Proposed Accident Tolerant Fuel evaluation methodology. Preliminary concept down-selection would occur within Step 1 (see step numbers 1-8 noted), with secondary down-selection occurring at the end of Phase 1 prior to detailed tests and behavior model development.

Phase 1

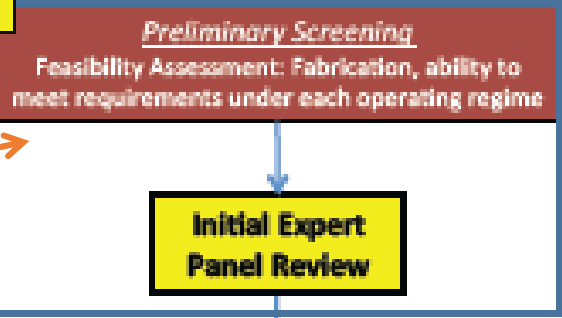
(2012-2016)

Feasibility ~TRL 1-3

予備的な技術スクリーニング

- 製造と燃料性能のフィジビリティスタディに基づく
- 要素技術の専門家だけでなく、燃料設計開発チームもレビューに加わる
- 予備的な経済性評価も含む

1



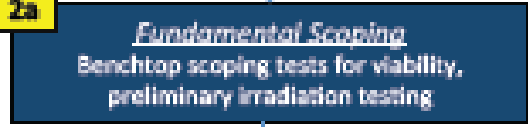
Includes preliminary analyses performed by the design and development team, based on existing data and reasonable assumptions, and preliminary economic assessment.



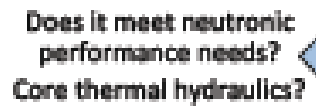
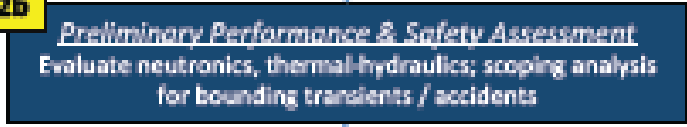
Decision to proceed based on funding availability and expectations for resolution of noted issues (see screening table).

燃料性能評価(2a)
安全性評価、既存炉心・プラントへの影響評価(2b)

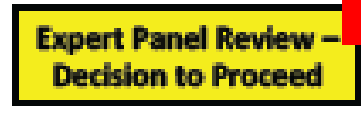
2a



2b



Culmination of Phase 1 should allow for preliminary estimates to be made on effort (time, budget) required to advance concept.



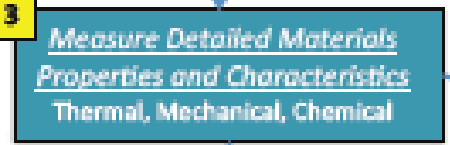
(2016)

Development & Qualification ~TRL 4-6

Phase 2

(2017-2022)

3



Measure additional data necessary to develop adequate models.

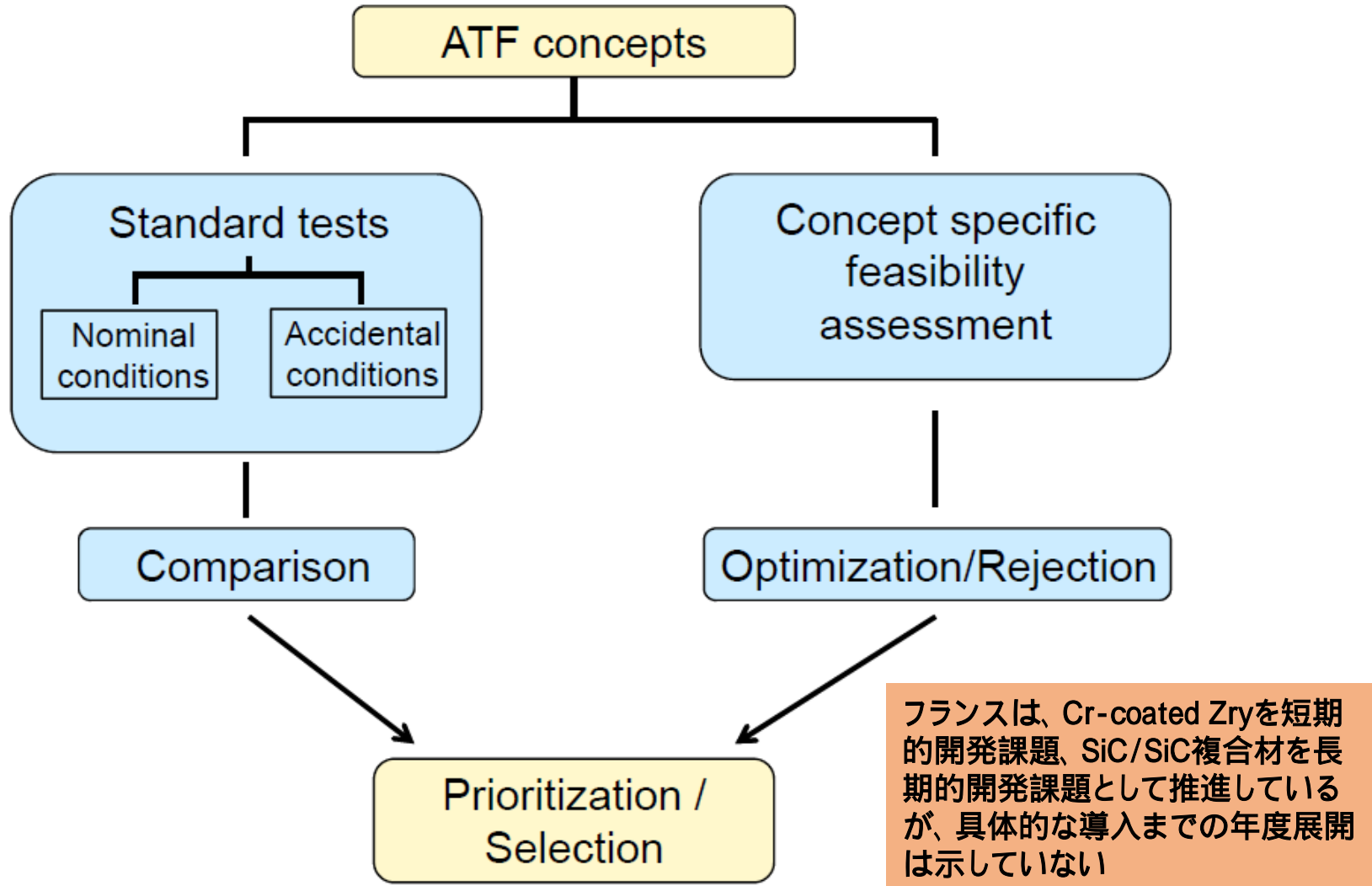
4



Behavioral models will be comprised of validated models, validated data and assumptions



ATF開発メトリクス(フランス)



Attribute guide イメージ(米国)

- 軽水炉体系への新型燃料導入に際しては、広範囲な技術分野間での認識共有が重要
- 燃料性能や燃料製造だけでなく、安全評価、輸送、貯蔵、品質管理、規格基準、規制、再処理等について、現行技術体系に与える影響評価が、開発の早い段階から不可欠
- 分野ごとにattribute guideを作成し、開発課題と達成目標を具体的に示すことは、認識共有や開発プロジェクトの効率性、透明性の観点で有効とみなされている。 **potential killer** が存在するか否か

Table ES-1. Candidate Fuel Screening Attributes Assessment Table

Performance Regime	Performance Attributes (For large-scale deployment)	Expert Opinion Assessment		Recommended Actions
		Benefit	Vulnerability	
Fabrication/Manufacturability <i>Considerations:</i> Millions ft of clad/year ~300 million pellets/year Economics - cost of raw materials and fabrication process Current fabrication plant enrichment limits	Manageable fissile material content			
	Compatible with large-scale production needs (material availability, fabrication techniques, waste, etc.)			
	Compatible with quality and uniformity standards			
	Licensibility			
Normal Operation and AOO: <i>Considerations:</i> Overall neutronics Linear Heat Generation Rate (LHGR) to centerline melt Power ramp, ~100 W/m/min Reduced flow (departure from nucleate boiling, DNB) Flow-induced vibrations Surface roughness effects Safe shutdown - earthquake External pressure (~2750 psi, 10% above PWR design pressure) Axial growth (less than upper nozzle gap)	Utilization or Burnup (12, 18, or 24 month/cycle)			
	Thermal hydraulic interaction			
	Reactivity control systems interaction			
	Mechanical strength, ductility (beginning of life and after irradiation)			
	Thermal behavior (conductivity, specific heat, melting)			
	Chemical compatibility (fuel-cladding) / stability			
	Chemical compatibility with and impact on coolant chemistry			
	Fission product behavior			
Postulated Accidents (Design Basis) <i>Considerations:</i> Prompt reactivity insertion Post-DNB behavior (T > 800°C for Zr-UO ₂ system) Loss of coolant conditions Thermal shock Steam reactions (~1000°C +)	Thermal hydraulic interaction			
	Mechanical strength and ductility			
	Thermal behavior (conductivity, specific heat, melting)			
	Chemical compatibility/ stability (e.g. oxidation behavior)			
	Fission product behavior			
	Combustible gas production			
Severe Accidents (Beyond Design Basis) <i>Considerations:</i> Thermal shock Chemical reactions Combustible gas release Long-term stability in degraded state	Mechanical strength, ductility			
	Thermal behavior (conductivity, specific heat, melting)			
	Chemical compatibility/ stability (including high temperature steam interaction)			
	Fission product behavior			
	Combustible gas production			
Used Fuel Storage/ Transport/ Disposition <i>Considerations:</i> Handling, placement, and drying loads; future reprocessing potential	Mechanical strength, ductility			
	Thermal behavior			
	Chemical stability			
	Fission product behavior			

まとめ

- ✓ 開発ロードマップを、効率的に、かつ、技術選択や予算配分などに透明性をもってローリングしていく評価ツールとして、TRL、metrics、attribute guideの組合せが有効であり、米国を中心に導入されている。
- ✓ 今後、我国でも、ATFに限らず、様々な軽水炉用新型燃料（高度化燃料）の開発プロジェクトがあると予想され、TRL、metrics、attribute guideの枠組み構築（評価に向けた一般的なガイドラインの策定）は有効と考えられる。
- ✓ ガイドライン自体のレビューも重要であり、我国では、原子力学会レベル（研究専門委員会等）での実施が適していると思われる。
- ✓ ATFに関しては、本当に軽水炉体系に入れられるのかどうか危惧する声も多い。開発の早い段階で、potential killerが存在するか否かを示すことは、こうした懸念にも対応できる。