

長期サイクル運転等を実現する ための論点と必要な取り組み

東京大学 レジリエンス工学研究センター

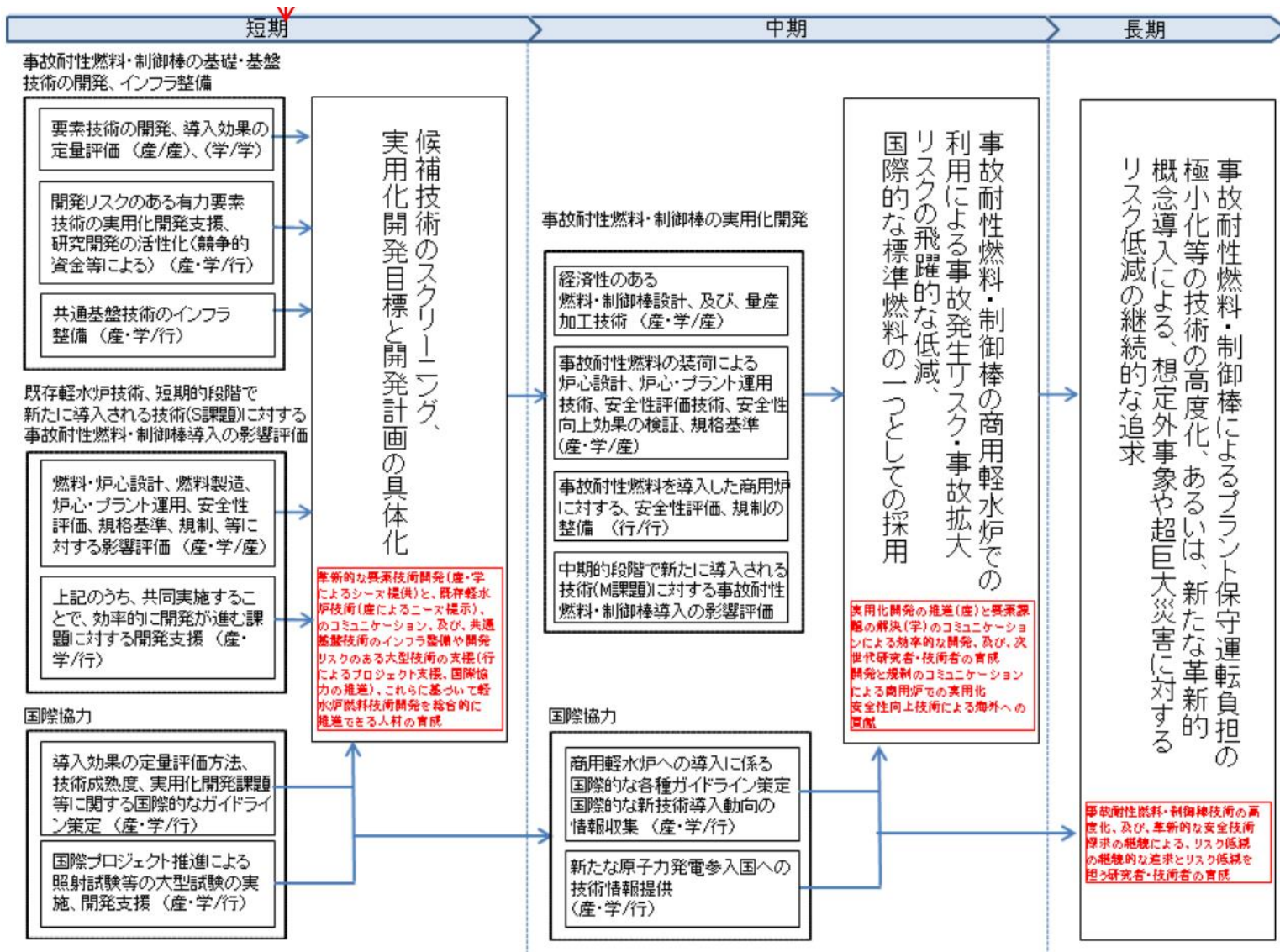
村上健太

murakami@n.t.u-tokyo.ac.jp

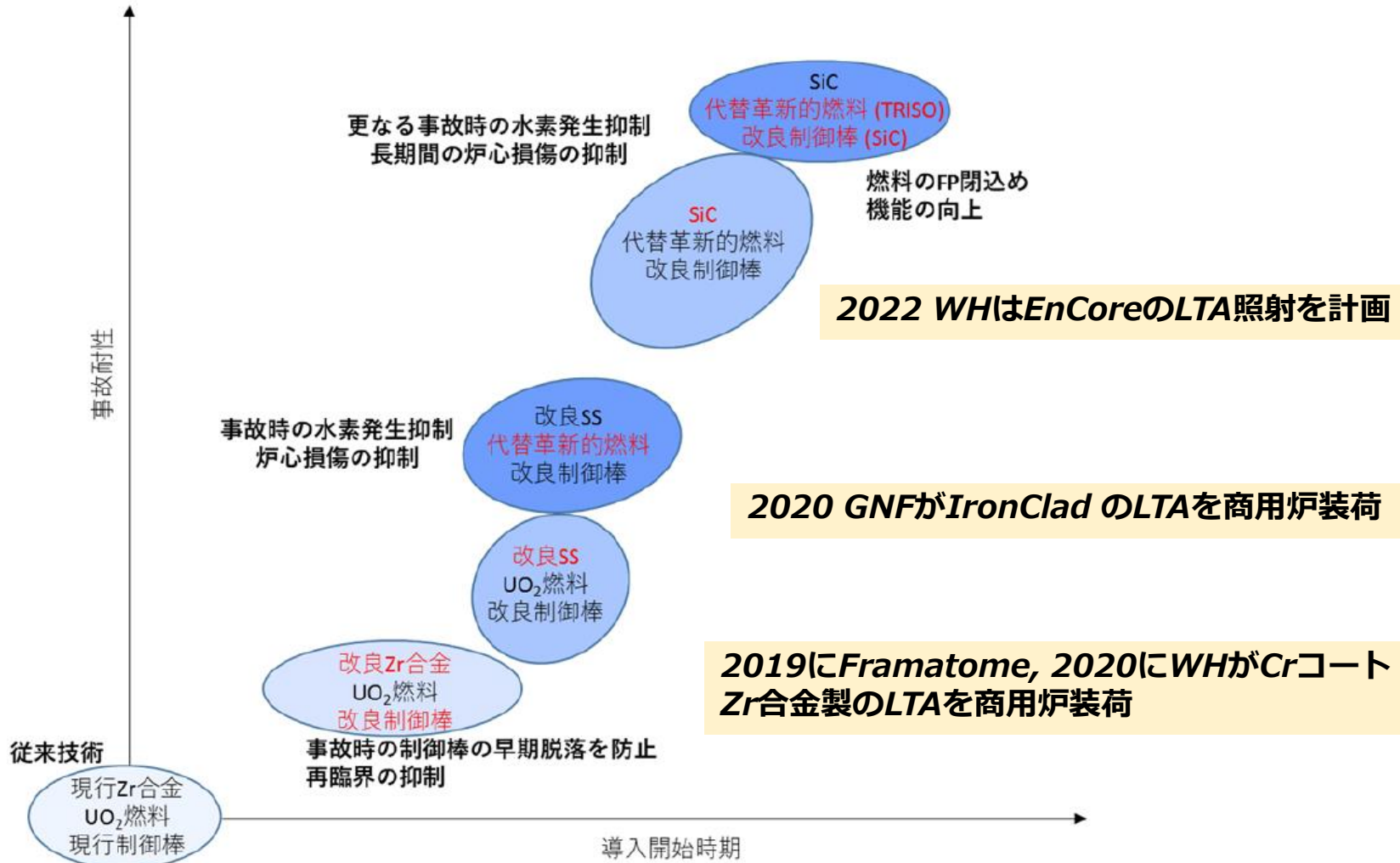
問題提起

- “安全性向上”のため目先の**分かりやすく**て**難しい**課題の解決だけに没頭した結果、研究活動が矮小化していませんか？
- “人材育成”が 若手を指導する人材の**雇用維持**を訴える標語になっていませんか？
- **研究成果の導入**が 以前より遅くなっていませんか？
- **最近の規制研究の特徴**
 - 重要な実験基盤を利活用して取得されたデータを、新しい統計手法を用いて整理・評価する
 - 新たに注目された誘因事象や事故シーケンスに関係した基礎的な知見を取得する
 - 安全解析コードに新しい機能を追加する

事故耐性燃料開発 大風呂敷では？



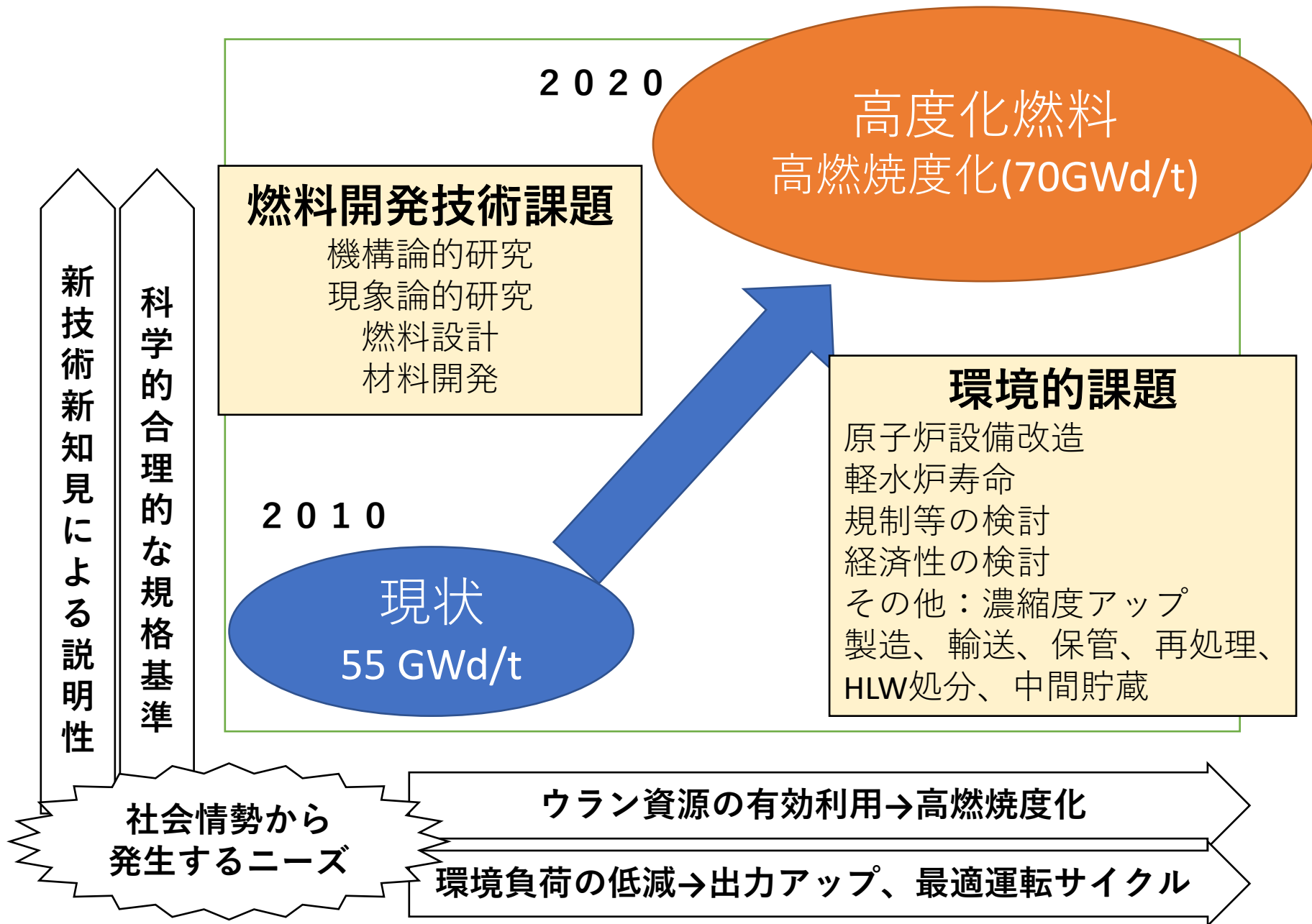
過酷事故の影響緩和に着目すれば良い？ 先行する海外燃料より高い信頼性を目指す戦略？



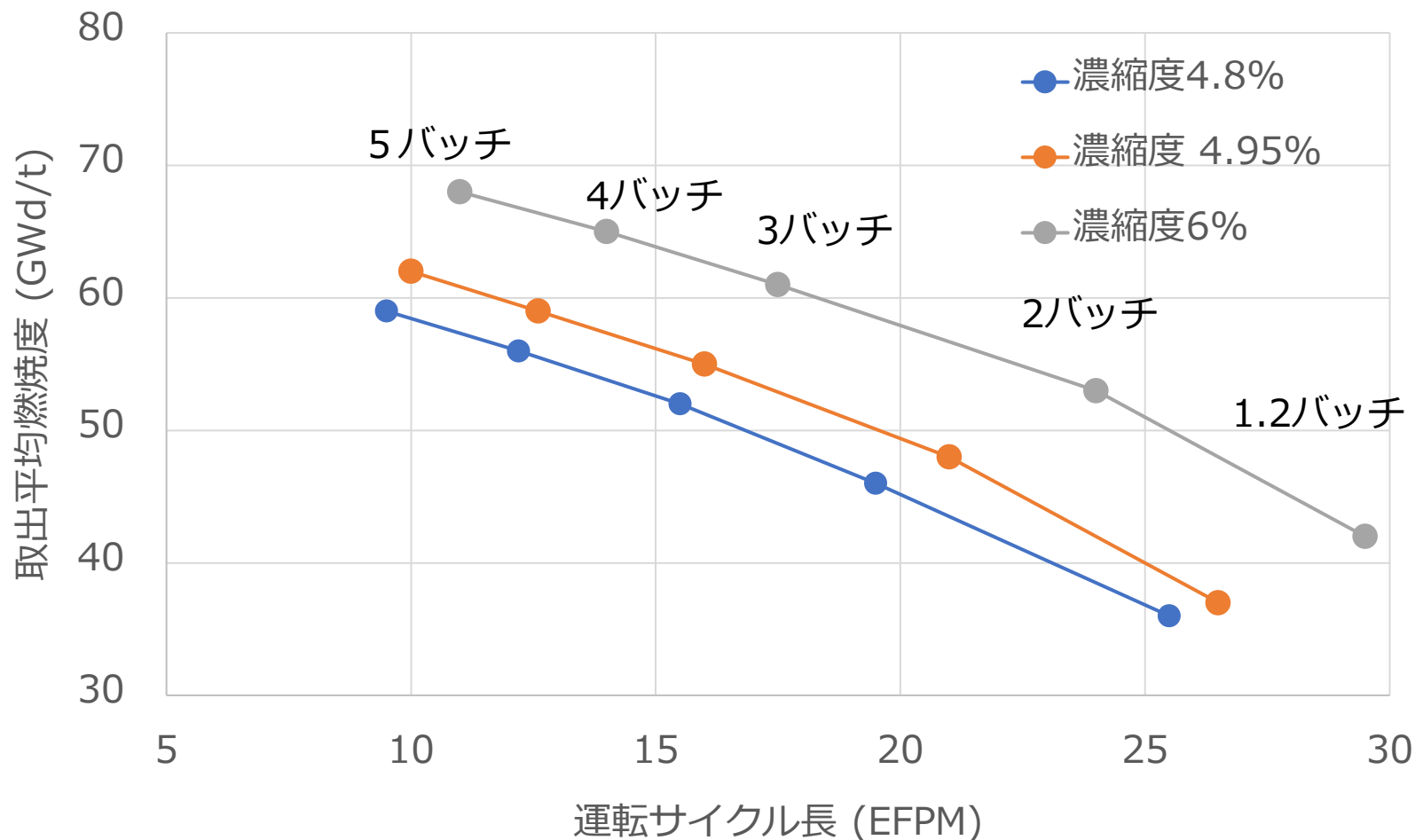
本発表の目的

- 1F事故前の課題設定をレビューし、これからの燃料開発におけるチャレンジの“軸”を再考する

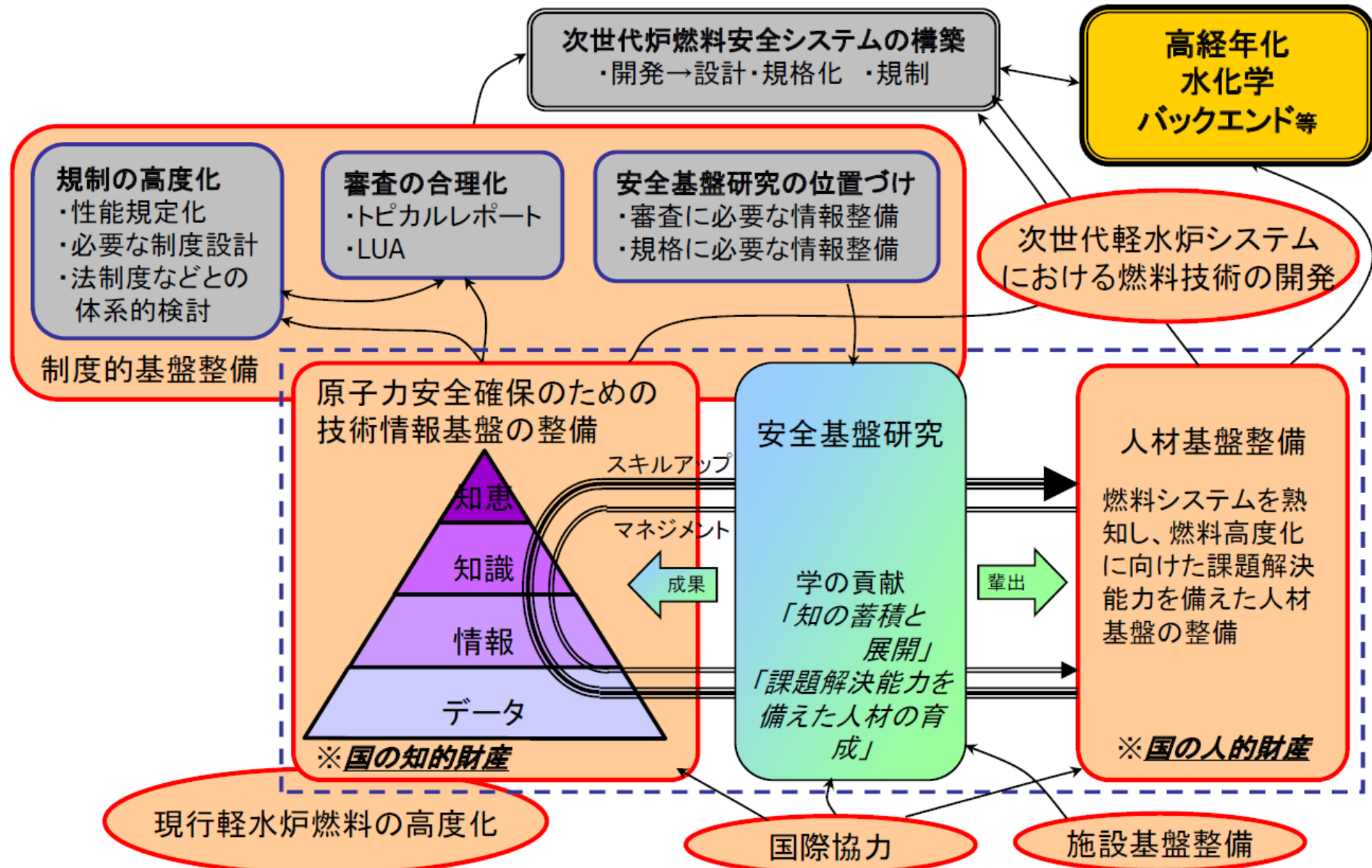
1F事故前の 燃料高度化の基本戦略



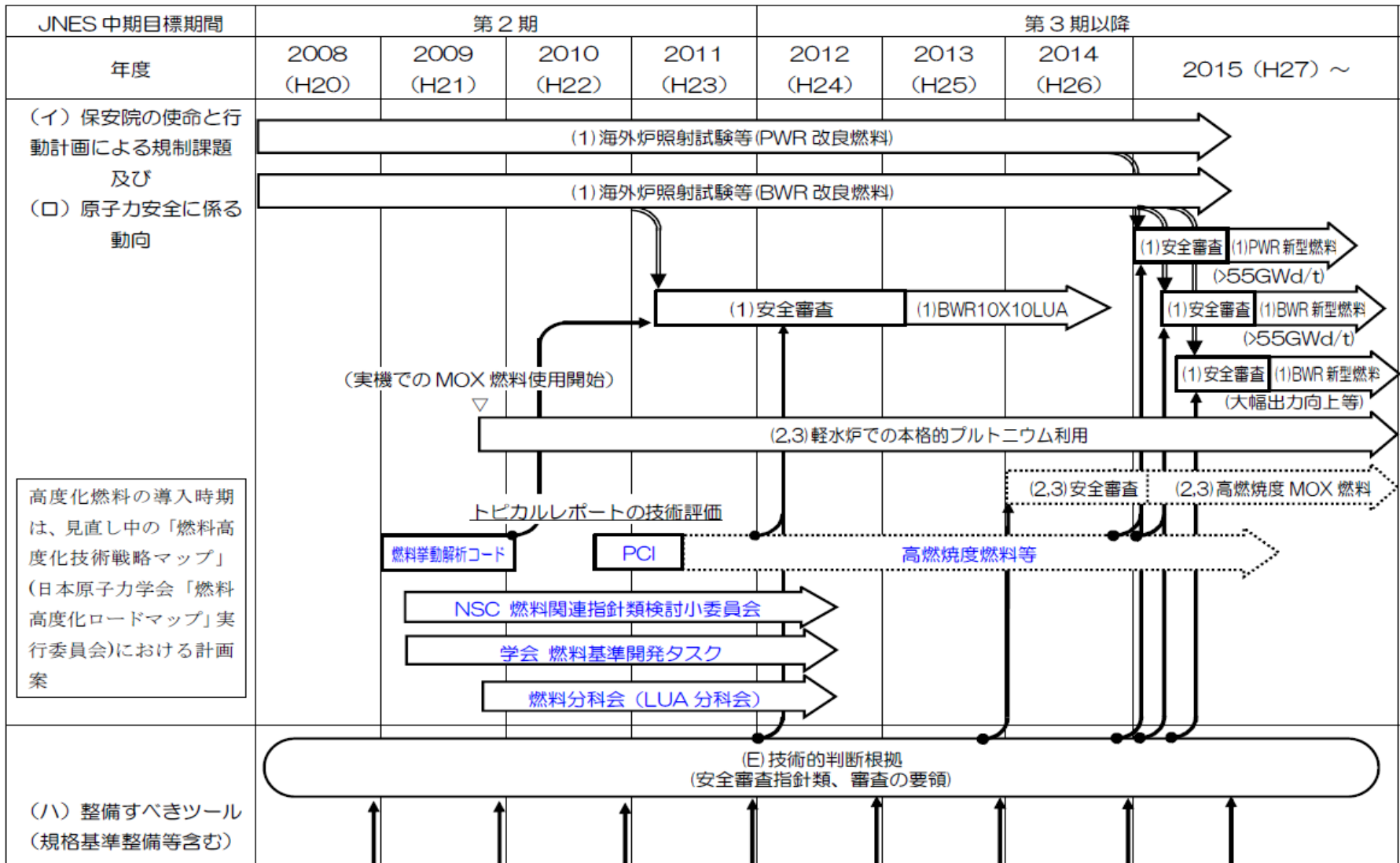
サイクル長と取出平均燃焼度の概略評価 (PWR 4ループ)



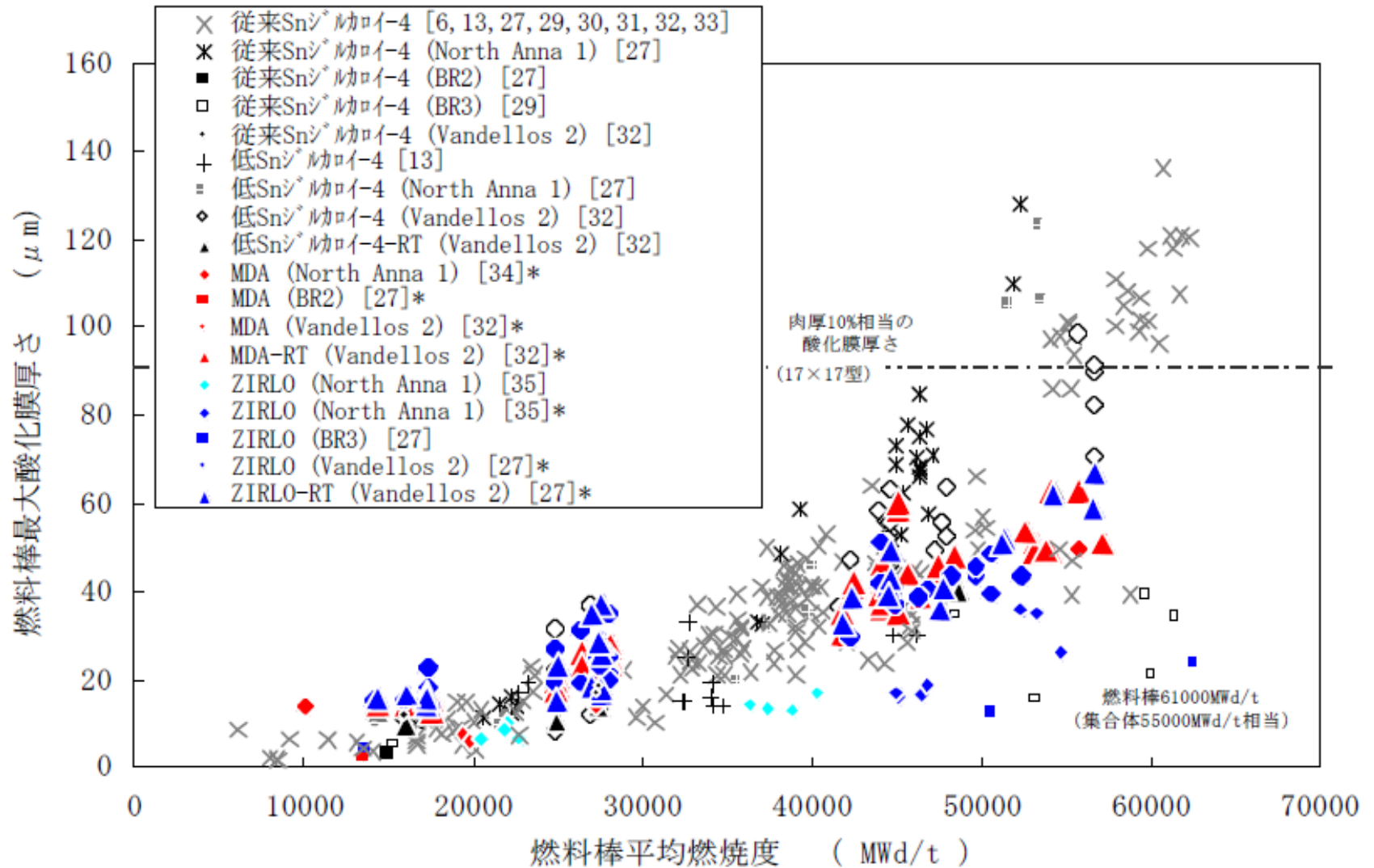
燃料高度化における 技術課題の分布



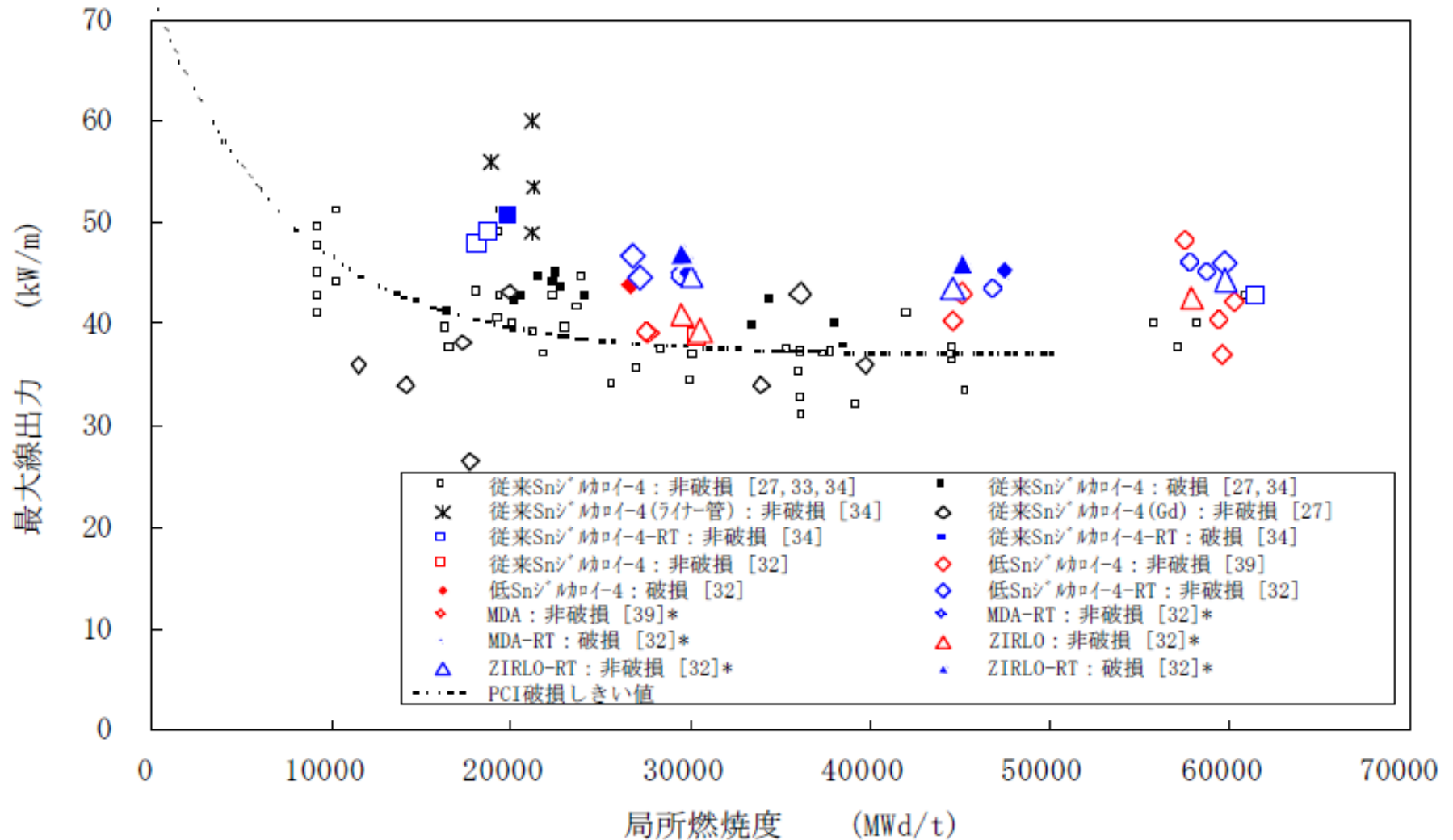
JNESの安全研究計画



ステップ2 燃料の性能：炉内酸化膜厚さ



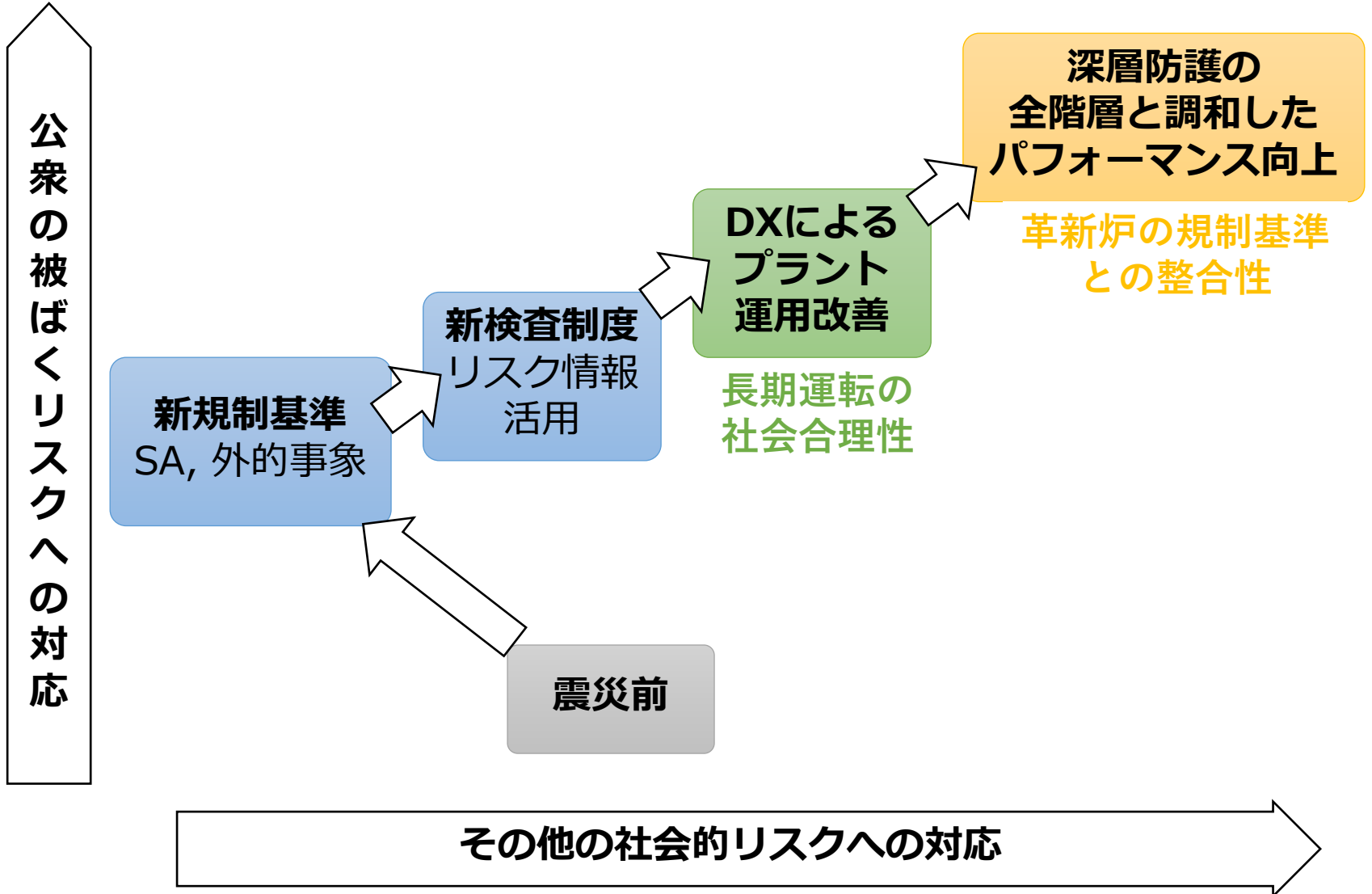
ステップ2燃料の性能：耐PCI特性 (Pmax)



既設炉に価値を付加する研究とは？

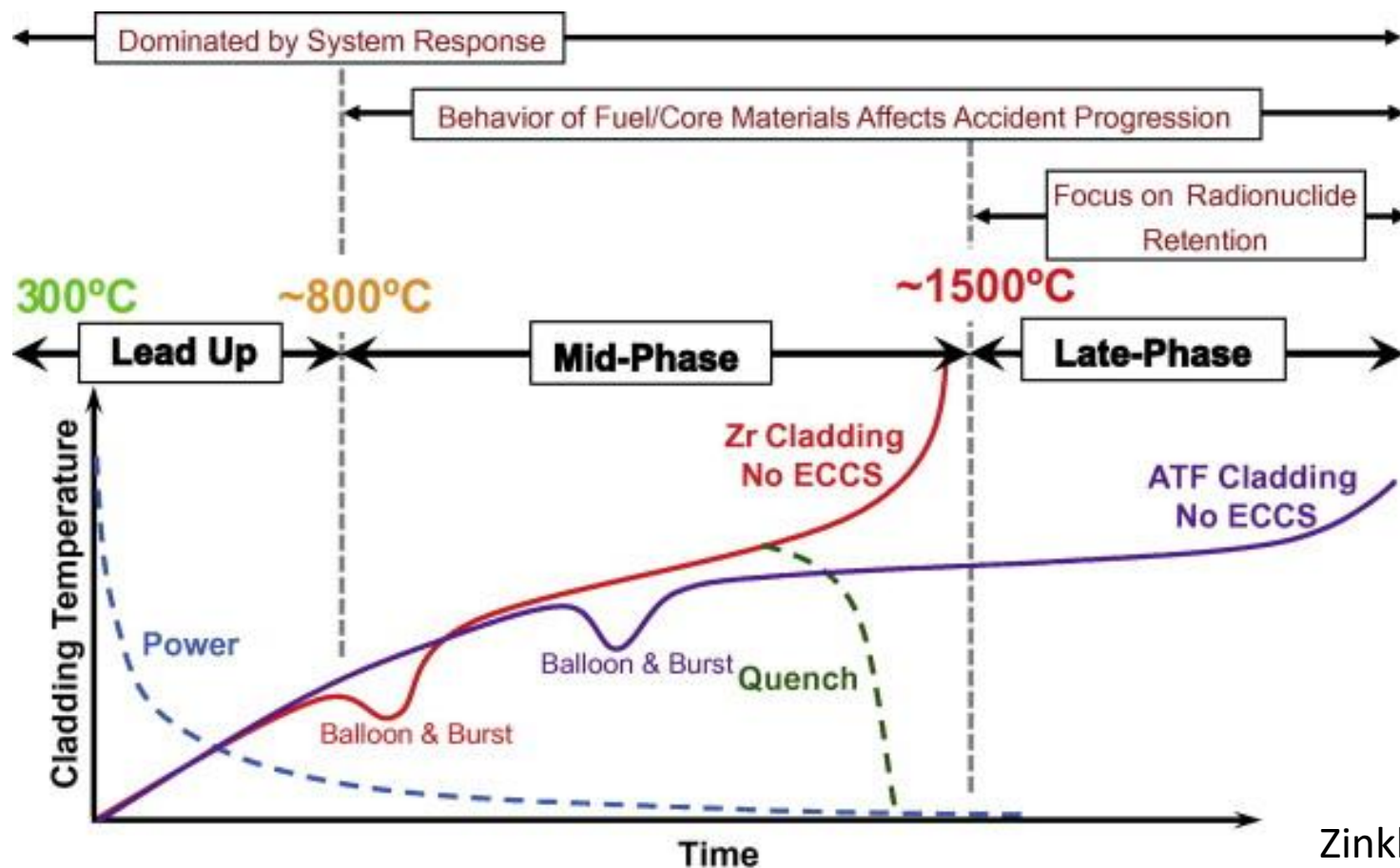
- **狭義の安全性向上はR&D着手の必要条件**
 - 通常運転時の信頼性
 - 設計基準に対する安全余裕の増加
 - プラントの状態変更時のリスク管理
 - 設計拡張状態における対応の容易さ
 - Unknown-unknown のモニタリング
- **環境・社会・ガバナンスの視点が不可欠**
 - 核燃料サイクルと廃棄物管理へのインパクト
 - プラント稼働率向上とアップレーティング →気候変動対策
- **アセットの効率的な運用も重要**
 - 多様化する収益機会（電力量、容量、調整力、慣性力？）
 - 運用コストの低減
 - サプライチェーンとの関係
 - 知識基盤のアップデート

これからの燃料高度化 多様なリスクのマネジメントに資するR&D



事故耐性燃料が目指していること/いないこと

冷却材喪失に起因する事故進展と被覆管温度



Zinkle, JNM, 2014

プラントの設計条件と燃料の性能

通常運転と過渡変化

- 被覆管/ペレットのギャップが運転中に増加しないこと
- 供用中の劣化による貫通性損傷を防止し、ある程度の延性が維持される
 - 寸法安定性、腐食減肉、水素化、疲労、フレッキング

設計で想定した事故

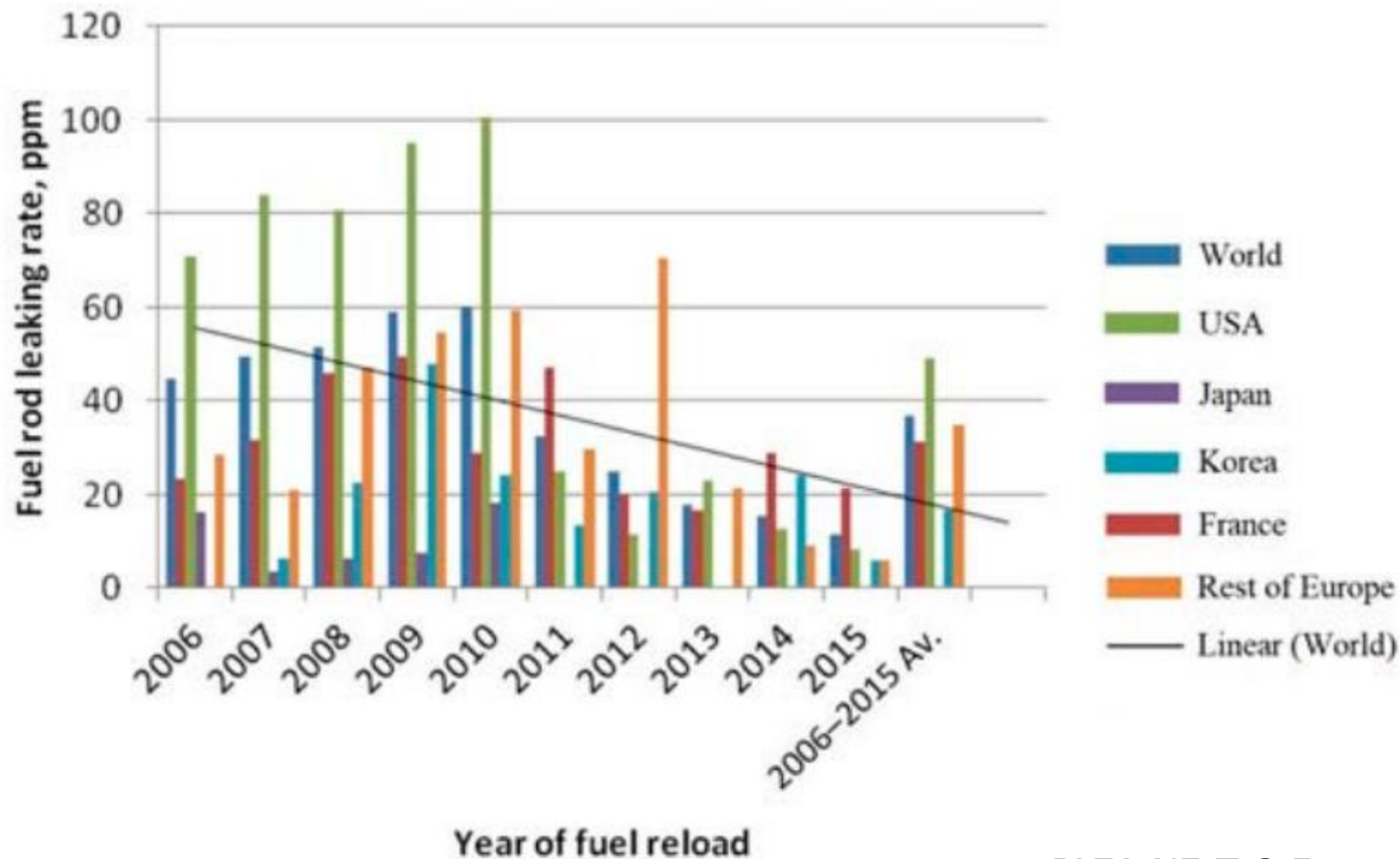
- 被覆管温度上昇により核沸騰から離脱して、急激に高温酸化が進まない(DNBR)
 - **熱流動解析**により確認。線出力密度等の制約条件になる
- ペレットの熱膨張等に起因して、被覆管が機械的に破損しない
 - 現行規制では材料の破損歪を把握したうえで **被覆管周方向の歪み量を解析**
 - 急峻な変化に対し、**反応度試験**を行って**燃焼度に応じたPCMI破損エンタルピ**を設定
- 熱膨張による引張歪と被覆管内面の腐食雰囲気との重畳により、応力腐食割れしない
 - 現行規制では **出力急昇試験**で破損の有無を確認し、**PCI破損の閾値**を設定
- 高温蒸気による酸化が進み、脆化した被覆管が再冠水で破断しない
 - 現行規制では **被覆管最高温度 1200℃**、**化学量論的酸化量 15%**によって担保
- 溶融し微細化したペレットによる水蒸気爆発が原子炉容器の健全性を脅かさない
 - 現行規制では、**エンタルピ制限値 230 cal/gUO₂**によって担保

設計拡張状態

- 制御棒が共晶反応により先行溶融しない
- 酸化に伴う水素発生を減らす（爆発防止、過圧の抑制）→SA設備とのトレードオフ
- 核分裂生成物ができるべく燃料中にとどめる →SA設備とのトレードオフ

漏洩燃料の発生

フレットィングによる漏洩は減少



漏えい燃料の発生に関連した技術基準

保安規定

- よう素131濃度についての制限値
 - PWRでは 1%程度の燃料損傷を仮定し、 4×10^4 Bq/cm³ 程度に設定

安全実績指標

- 制限値の50%未満であれば“緑”判定

燃料検査規程 (JEAC4212-2020)

- よう素131の濃度が 3.7×10^1 Bq/cm³ を超えると、全数の SHIPPING 検査を要求

漏えい燃料規程 (JEAC4213-2016)

- よう素の濃度と131/133同位体比に基づいて損傷の進展性を判断

運転サイクルとの関係

- 取替炉心の安全性
 - 規格基準化（電気協会）
 - 長期サイクル運転時の評価（燃料プラットフォーム）
- その他の保全活動とのインタラクション
 - 現行規制は時間基準保全のみの制度。状態監視を実質的に取り入れた事業者定期検査への転換が必要
- 原子炉の運転・起動・停止のリスク変化
 - PWRではミッドループ運転が高リスク→長期サイクル運転の正当性
 - 燃料の劣化と、安全余裕の低下や故障率増加との関係性の整理

アップレーティング

- 米国では、のべ171回、803万kWe 分のアップレーティングを実施済み
 - **MUR**: 原子炉出力計算の精度向上に基づく 2%以下の出力増強
 - **Stretch** : 燃料の線出力密度の増加と炉心特性の変更による 7%以下の出力増強
 - **Extended** : 発電設備の更新による20%程度の大幅な出力増強

当面の研究開発ターゲットに関する提案

- **PWR16カ月運転を短期のR&Dターゲットに！**
 - 燃焼度は 55 GWd/t 程度、ステップ 2 燃料で可能。信頼性向上の観点から、高燃焼度燃料の事故時挙動、制御棒挿入性等に関する研究テーマが存在
 - 状態監視保全と時間基準保全の組合せで、実質的にオンラインメンテナンスを導入する。状態監視技術の信頼性を考慮した論理体系の構築
 - **規制ベースの変更を合理的に進めるための論理体系の確立**
- **BWRの10×10燃料導入を 2～3年後に並走！**
 - 解析技術
 - 海外の知見をどのように規制判断に利用するか
 - アップレーティング

革新的な燃料の導入（2035年）に合わせて考えたい事項

- 高燃焼度化
- 限界熱流束の考え方は？
- 漏えい燃料の定義と水化学の管理値
- 地震と事故の重畳の考え方
- SA設備とのトレードオフ

新型炉(SMR)の規制要件と共通する課題が大きい