

2013年春の大会企画セッション
「福島事故に鑑みた原子力安全の総合的・一体的向上と規格基準」

(3) 炉心燃料分科会での検討の現状と課題

東北大学金属材料研究所

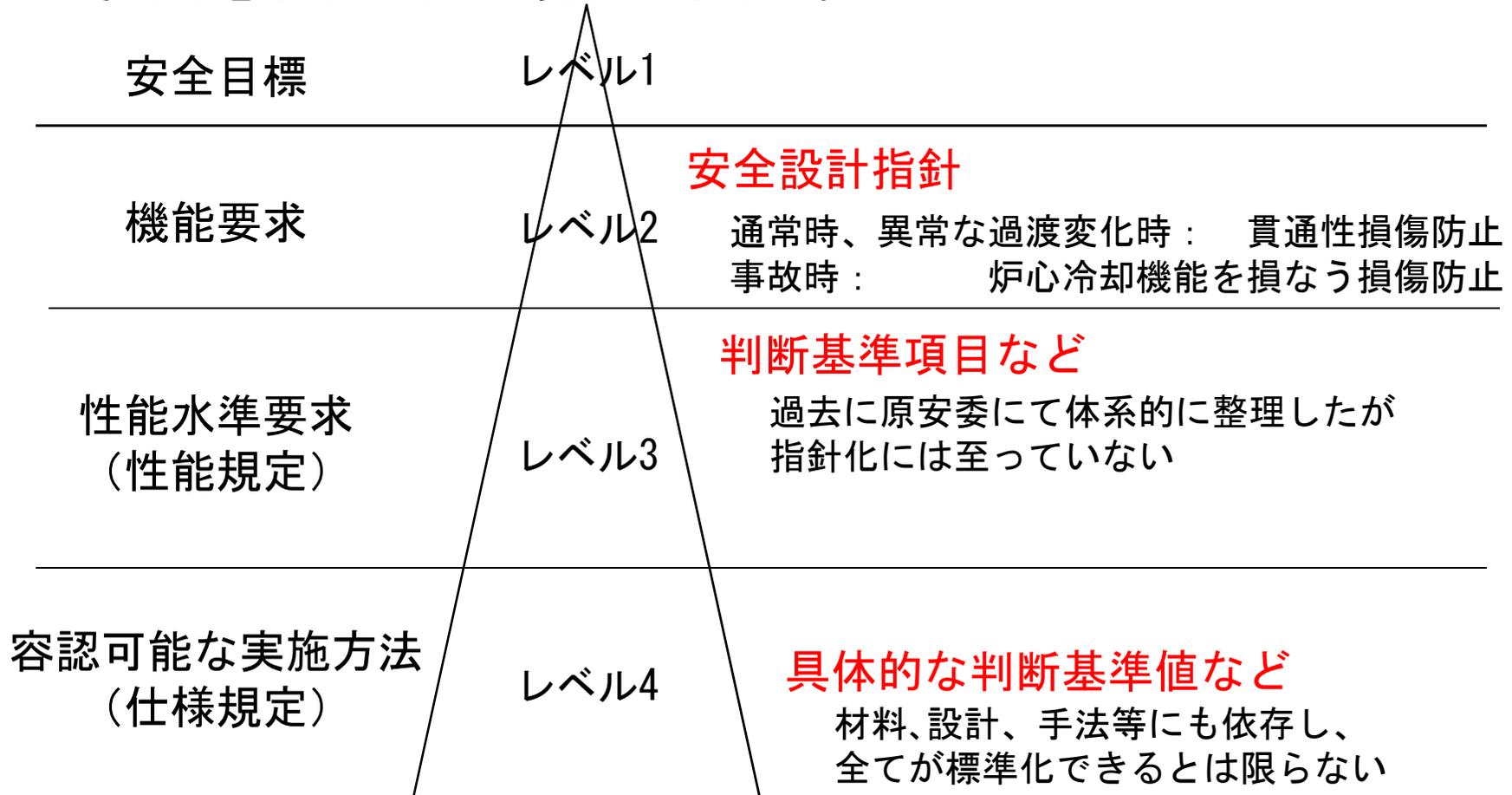
阿部弘亨

炉心燃料分科会主査

1. 背景

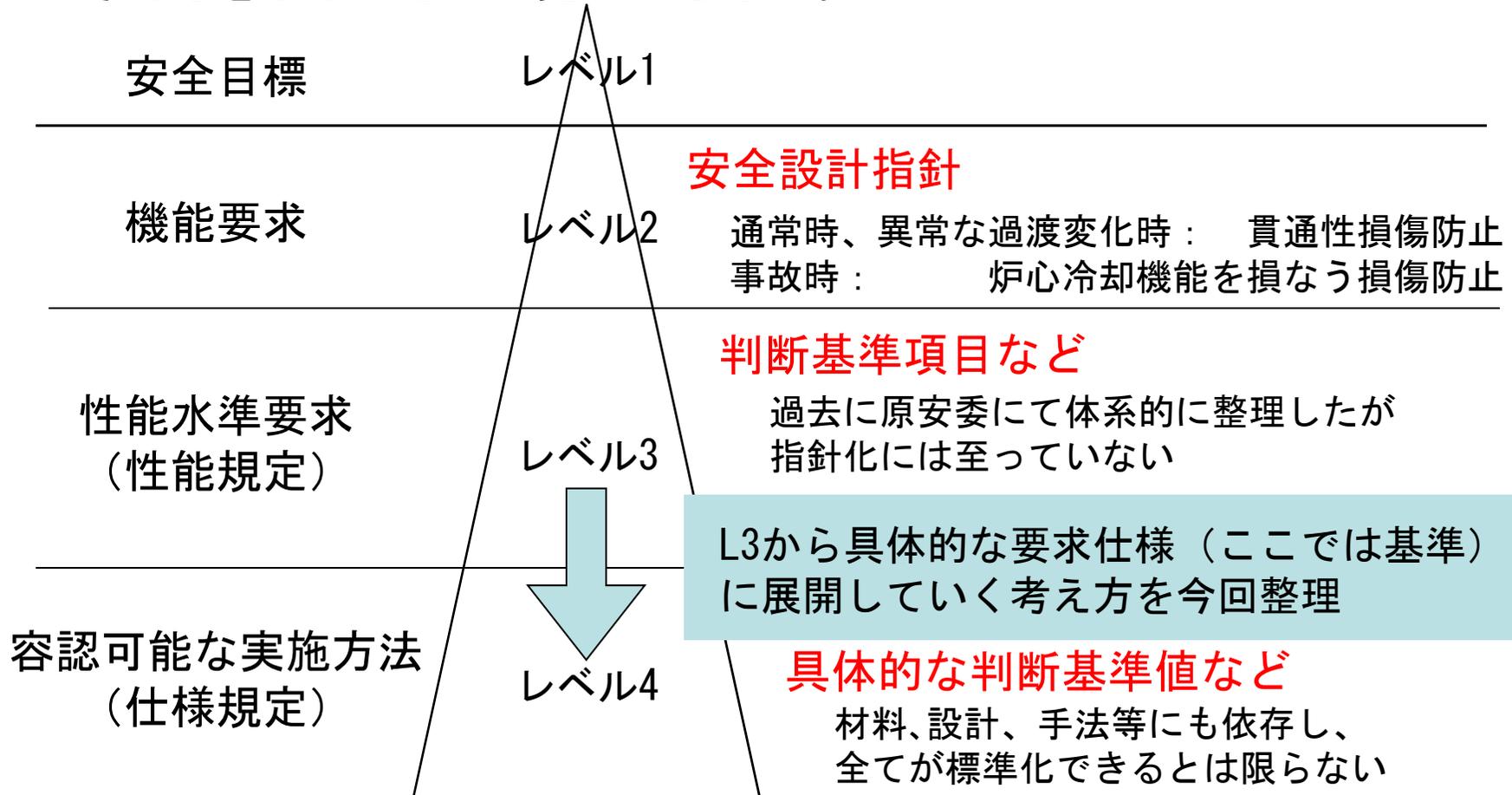
安全確保の要求の階層構造と分科会の検討範囲

- 炉心燃料の安全に係る要求事項・基準類に関しては、性能水準要求（L3）までは整理された実績がある。
- しかし、容認可能な実施方法（仕様規定）への展開については、考え方を示したものが見当たらない。



安全確保の要求の階層構造と分科会の検討範囲

- 炉心燃料の安全に係る要求事項・基準類に関しては、性能水準要求（L3）までは整理された実績がある。
- しかし、容認可能な実施方法（仕様規定）への展開については、考え方を示したものが見当たらない。



1. 背景（つづき）

さらに、

炉心燃料の安全に係る要求事項・基準類について

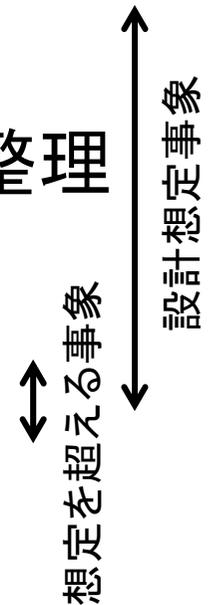
設計想定事象の範囲でも、海外基準類や新知見と照合して、国内の基準類や経験には相違が散見される。

炉心燃料の安全に係る評価方法について

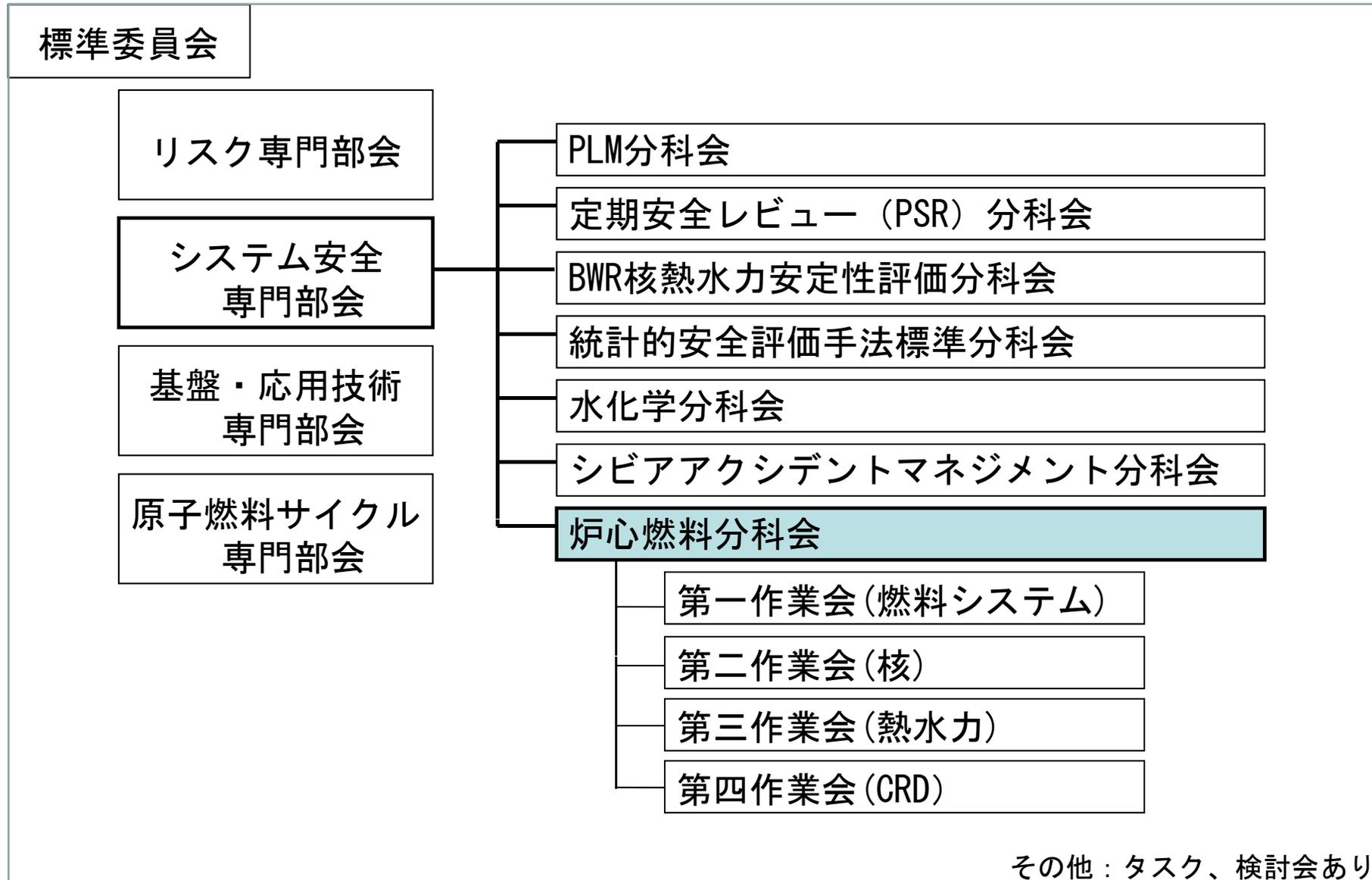
安全解析における燃料過渡応答解析と燃料機械設計との関係、及び核設計と熱水力設計との関係が体系化されたものとして明確に整理されていない。

今回発表の内容

1. 背景
2. 炉心燃料の安全基準（L2, L3）の整理と展開
3. 安全基準に対する評価方法（L4）の体系的整理
4. 海外の安全要求事項、新知見との照合
5. 福島第一原子力発電所事故からの視点
6. まとめ



原子力学会 標準委員会 組織図



その他：タスク、検討会あり

2. 炉心燃料の安全基準 (L2, L3) の 整理と展開

燃料安全確保の上位要求

- 炉心燃料の安全性に対する機能要求（L2）
 - 通常運転時～異常な過渡変化時
 - 燃料被覆管の貫通性損傷の発生防止
 - 事故時（設計想定事故の範囲）
貫通性の損傷発生
 - 炉心の著しい損傷防止
 - 炉心冷却形状の維持

- 原安委^(※)の検討において、機能要求を燃料の損傷モードに着目して性能水準要求（L3）まで展開した。
以下にこれを簡単にまとめる

(※)原子力安全委員会 燃料関連指針類検討小委員会

原安委における検討(1)

機能要求(L2)を燃料の損傷モードに着目して、性能規定(L3)まで展開した。

被覆管貫通性損傷防止の要求(燃料の損傷メカニズムからの網羅性の確認)

損傷	主に通常運転時に考慮すべき損傷	主に運転時の異常な過渡変化時に考慮すべき損傷
機械的損傷	クリープ損傷 (内向き：コラプス) (外向き：内圧膨れ) 摩耗 応力 (内外圧力、振動曲げ応力)	歪 (PCMI) / 応力 (PCMI, 内外圧差) PCI DHC 高温破裂 疲労
熱的損傷		膜沸騰 (核沸騰からの離脱) → (被覆管の温度上昇による) 高温脆化 (指標：DNBR, CPR)
化学的損傷	腐食 水素吸収/脆化	

貫通性損傷防止の要求 (安全性を確保する手法 (L4) からの網羅性の確認)

議論中

安全性を確保する手法(L4)

損傷	損傷のモード	炉心(核熱)、安全解析等を含む解析	燃料の構造強度解析	燃料設計、製造管理、新材料・製法開発等
機械的損傷	クリープ変形	○		○
	振動摩耗		○	○
	応力/歪	○	○	(○)
	疲労(応力/歪繰返し)	○	○	
	PCI、DHC (化学的損傷と重畳)	○		○
熱的損傷	DNBR/CPR	○		
化学的損傷	腐食	○		○
	水素脆化	○		○
反応度投入事象時の損傷	高温脆化、PCMI 高温膨れ/破裂	○	注) ただし、これら三要素は互いに関連しており、必ずしも明確に区別して表現できるわけではない	

上位要求における燃料の損傷モードから展開された性能規定 (L3) に対し、一種類以上の解析によって漏れなく評価していること (網羅性) を改めて確認した。

燃料安全基準の仕様規定（L4）への展開

容認可能な実施方法を規定していくための検討を進めている。

着眼点

- 具体的判断基準値の策定の方法
（試験？ 解析？ その他？）
- 策定の方法における留意すべき/明確にすべき
事項等 →p13
- 基準類の間の相互の関係や制約の明確化 →p14
- 海外基準類との相違、新知見等との照合による
国内課題の抽出 →p21

仕様規定（L4）への展開のための検討用フォーマット

(検討例)

運転状態	性能規定 (L3相当、 基準類)	判断基準値の算出方法 算出における留意事項等	他の性能規定 との関係	海外基準類との相違点 最新知見の反映	評価方法に 対する固有 の要求事項
通常 運転時	内圧	解析でリフトオフとなる限界内圧算出 - 被覆管クリープ速度とペットス ウェリング速度差、出力履歴、解析 コードやモデルの不確かさ、等		リフトオフ以外に水素化物再 配向の観点から内圧制限。 事故時の内圧支配燃料のDNB 伝播評価を海外では要求	
	流動振動摩耗	不安定振動、異物の混入を防止する設 計であること 通常流動振動については寿命中の摩耗 量が被覆管肉厚に比べ十分小さいこと		応力評価において摩耗による 減肉が考慮されていること	
運転時 の異常 な過 渡変 化時	歪 (PCMI)	引張試験等での破損歪量をもとに設定 - 試験片の形状、水素吸収量の付与、 照射量の影響、歪付与方法等	許容水素吸収量に 対して歪基準値ま で延性が確保され ていること	海外では1%歪基準値を全歪評 価値に対して適用している事 例が多い。	
	DNBR CPR	試験で限界熱流束、解析で最小限界熱 束比を設定 - 相関式精度、解析の不確かさ（確 率分布）、統計処理の方法、燃料棒 曲がりや圧損混在の影響、等			
事故 時	PCT/ECR	試験（例：クエンチインテグラル試 験）で熱衝撃荷重に耐える被覆管の高 温の限界条件(脆化、減肉)を算出 - 通常時の酸化・水素吸収の考慮、 LOCA時の温度履歴(高温、急冷)、 急冷時の熱衝撃荷重、照射影響等	通常時の水素吸収 量、酸化膜厚さ (腐食減肉量)が、 初期条件として考 慮されていること		
	(LOCA) 長期冷却	(国内では定量的な要求が規定されて いない。「冠水状態が維持されていれ ばよい」旨の記載がある程度)		LOCA後のほう酸析出 LOCA後の燃料耐震性 漏えい燃料の耐LOCA性能 リロケーションLOCA、他	

基準策定における要求事項の明確化(検討例)

※過去の安全審査等での論点も含む

●燃料棒内圧(通常運転時のクリープ損傷)

解析で被覆管がペレットに対してリフトオフしない限界内圧を算出する場合に明確にすべき項目：

- ・ 解析コードとモデルの妥当性、重要な挙動(ペレットスウェリングと被覆管クリープの速度)、コードとモデルの不確定性の適切な考慮、限界内圧を評価する条件(出力履歴等)、被覆管物性、等

●被覆管高温膨れと破裂(事故(LOCA)時損傷)

高温膨れ試験で膨れ量や破裂条件/破裂後歪等を算出する場合に明確にすべき項目：

- ・ 試験データのばらつき、重要な試験条件(温度、内外圧差、応力等)、試験条件の履歴の妥当性、膨れおよび破裂の試験条件依存性(被覆管温度上昇速度等)の確認、等

基準類の相互の関係明確化検討

燃料に対する基準は個々に独立したものばかりではなく、相互に関連する基準もある。この関係を明確にする。

これにより、新型燃料適用や使用条件変更等に際し、安全性を適切に確保した対応を可能とする。

燃料棒基準間の相互の関係の例：

- ・ 被覆管応力基準⇔被覆管酸化膜厚さ（腐食量）
 - － 酸化膜厚さが過大になると損傷に至るが、現状は十分余裕を持った目安（例：10%減肉）に収まるよう設計されている。
この目安を踏まえたくえで応力評価を行い、基準を満たす必要がある。
- ・ 被覆管歪基準⇔被覆管水素吸収量
 - － 水素吸収が過大になると脆化が進み損傷に至るが、現状は十分余裕を持った目安（例：800ppm）に収まるよう設計されている。
この範囲の水素脆化に対して歪基準を確認する必要がある。

「炉心燃料の安全基準の整理と展開」のまとめ

仕様規定（L4）について整理・検討を行った。

現行の方法について、網羅性を確認した。

要求事項の明確化については、国内の民間の設計・評価等のノウハウレベルまで踏み込んだ整理を行った。

基準類の相互関係も洗い出しを行った。

核・熱・機械等の評価の体系的整理や、海外の安全要求事項や新知見との比較検討（共に後述）のための下地ができた。

3. 安全基準に対する評価方法（L4）の 体系的整理

評価方法（L4）の体系的整理の必要性

炉心燃料の安全性確保の要求を満足することを評価する手法のうち、最も多くの基準に係るのは、炉心やプラント（冷却材温度・圧力）の過渡応答を介した燃料の評価に係る手法である。

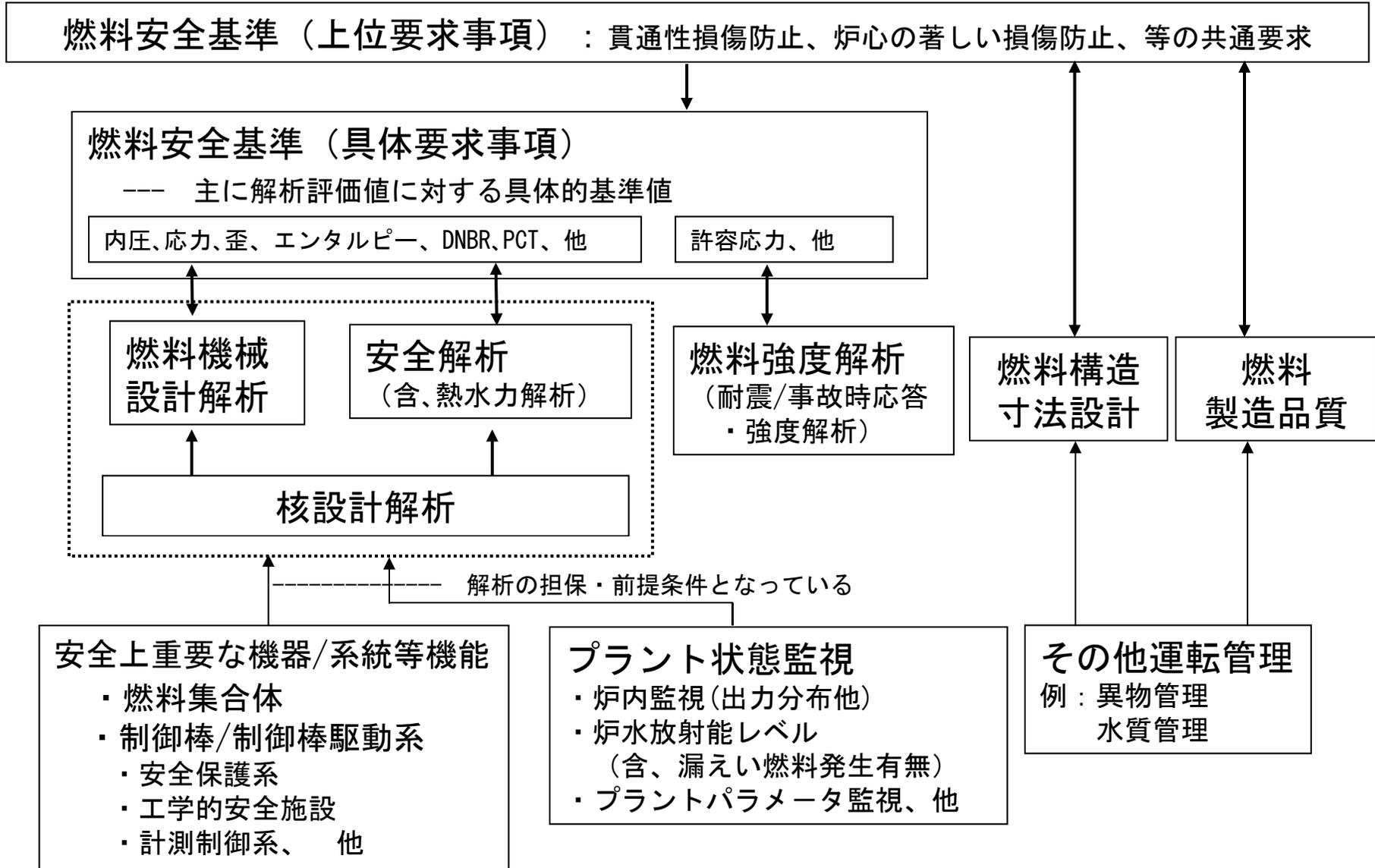
これらは燃料機械設計、安全解析における燃料過渡応答解析が最終的な手法であるが、この両者の関係が必ずしも明確ではない。（例：異常な過渡変化時の機械的破損防止の評価は両者で実施）

また、炉心設計、熱水力設計も関連して複数の解析の間のパラメタの受け渡しがなされ、体系的に整理して理解を広めることは重要。-次葉参照

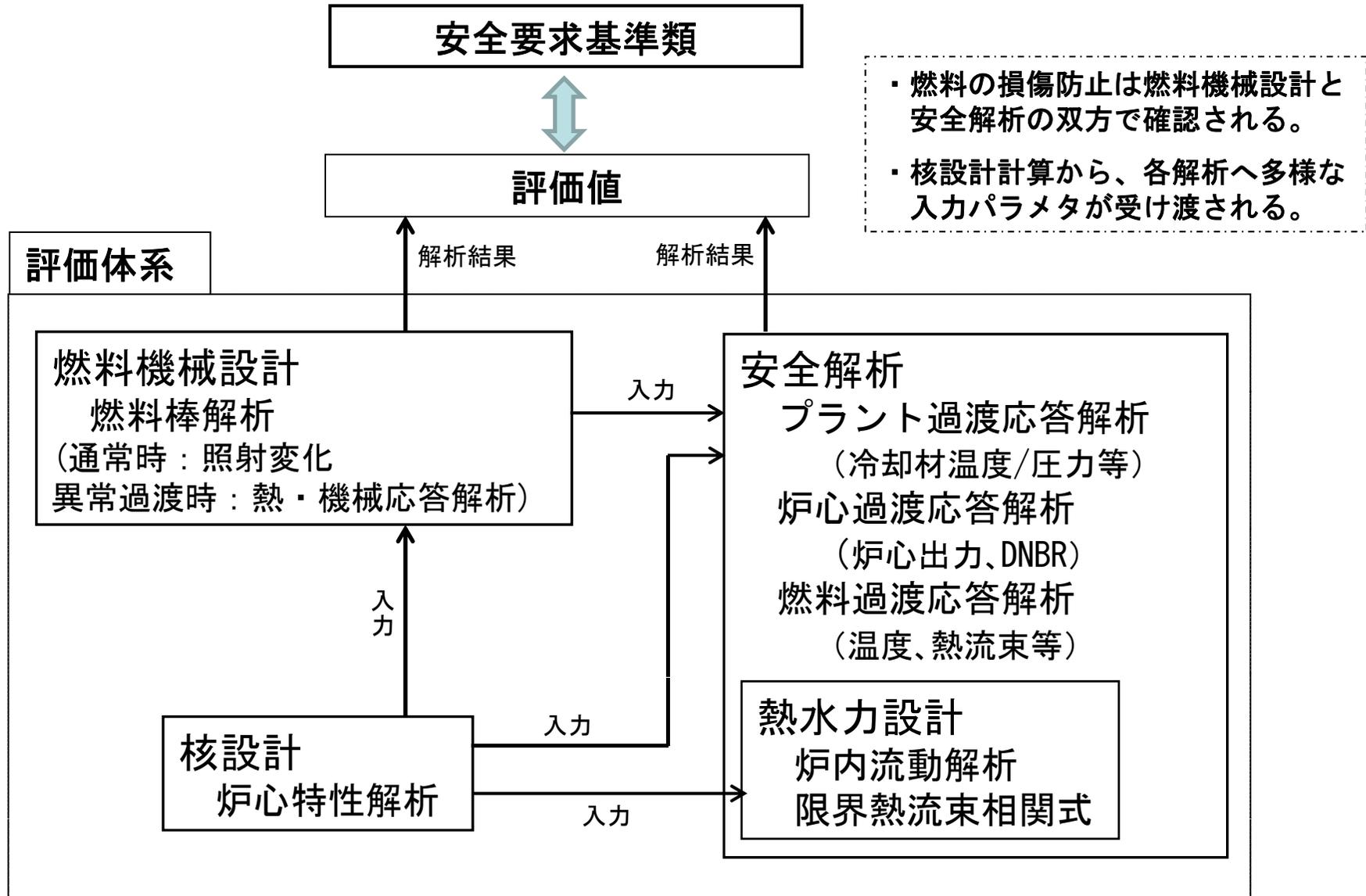
特に核設計は、その解析結果を安全解析、燃料機械設計、熱水力設計すべてに入力パラメタを渡しており、その役割を明確にすることは、安全確保の本質の理解を深める。

⇒これらを包含して示した報告書、資料等がこれまで見当たらず。

燃料安全を確保するための体系



評価方法（L4）の体系的整理



核設計と燃料安全確保との関係

核設計のスコープ

■ 安全設計

- 出力分布、反応度係数、
反応度制御能力（含、安全停止）
出力振動抑制能力、等の
基本特性

■ 各種解析入力パラメータ

- ・ 燃料機械設計解析
- ・ 安全解析
（含、熱水力 (DNB) 解析)
- ・ 安定性解析 (動特性)

燃料の損傷防止、炉心の著しい損傷防止は、主に安全解析及び燃料機械設計によって確認される。

核設計は、これらの解析の入力パラメータの導出にあたり中心的役割を担う。

燃料安全の確保が確認された安全解析及び燃料機械設計解析の結果を担保する観点から、解析入力値（または入力範囲）に収まること、核設計の基準と考えることができる。

解析入力パラメータの一部は、許認可解析のみでなく取替炉心にも確認がなされる。

4. 海外の安全要求事項、新知見との照合

主な調査対象：米国 (SRP、NRC審査トピックス (ADAMS検索)、NUREG)
欧州 (OECD/NEA Fuel Safety Criteria)、
国内 (最近の各種安全審査等でのトピックス等)

海外基準類、新知見との相違抽出 (検討中)

	燃料棒	燃料集合体
通常運転	<ul style="list-style-type: none"> ・ 内圧 (水素再配向からの要求、内圧支配燃料のDNB伝播) 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 型式の異なる燃料集合体との隣接による流動変動の影響
異常な過渡変化	<ul style="list-style-type: none"> ・ PCMI歪基準 (全歪1%) ・ RIE、PCMI破損指標 (局所水素化等) ・ 最新知見：新しい破損モード (DHC) 	
事故	<ul style="list-style-type: none"> ・ ECCS基準値 (PCT/ECR値の水素依存性など) ・ LOCA長期冷却時ほう酸析出 ・ LOCAデブリによる閉塞と冷却性 ・ LOCA後の燃料耐震性能 ・ 高燃焼燃料のLOCA時リロケーション及び破裂時の微粒子放出 ・ 漏えい燃料のLOCA時基準適用性 ・ 異常な過渡変化/事故時の燃料の機械的破損評価 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 事故 (LOCA) 時と地震の重畳を考慮した構造評価 ・ 事故時のグリッド変形によるECCS評価 (冷却性) への影響 ・ 照射燃料の特性を考慮した振動応答 & 強度解析
地震		(事故時の項目と同じ)

機械的破損、LOCA後の長期冷却性に関連する多様な要求基準類が目立つ。22

海外基準類、新知見との相違 (検討中)

今後の対応

直ちに安全性を脅かすような事態に直結したり、緊急安全対策等が必要とは考えにくいですが、これまでの評価の経験から強化は重要と考える。

- ・ 評価方法の見直しなど対応の余地があると考えられる項目
例：1%歪、温度評価の代替/包含評価
- ・ 限られた設計・評価分野のみでは、安全性を定量的に明示することは難しいものの、総合的な安全性の示し方の工夫が必要と考えられる項目
例：LOCA後の長期冷却性確保に係る要求への対応

⇒ 「燃料安全を確保するシステムとは？」の観点からの評価・解決のアプローチがさらに重要かつ不可欠となってきている。

海外基準類、新知見との相違への対応 (検討中)

例：漏えい燃料に対するLOCA時の炉心冷却性

- RIA(反応度投入事象)では安全性への影響評価に明確な基準があるがLOCAでは明確でない。

■システムとして燃料安全確保を考えた場合のアプローチ案：

- ・ ECCS基準の漏えい燃料への適用性の検討、にとどまらず
- ・ 限られた漏えい燃料が急冷時の熱衝撃に耐えられないときでも、炉心冷却阻害への影響（上位要求）の観点まで視野を拡げて評価を行うことは有用と考えられる。
- ・ 運用の実態として、冷却材中の放射能レベルの監視により運転中の漏えい燃料発生を検知、管理がなされていることも総合的に勘案して、体系的な安全評価が望まれる。

海外基準類、新知見との相違への対応

例：LOCA後の燃料耐震安全

■システムとして燃料安全確保を考えた場合のアプローチ案：

- 従来の耐震構造解析の延長上の、高温脆化した被覆管の機械特性の変化 (σ_u , σ_y の低下) を踏まえた、応力評価の成立性の検討だけでは限界があると考えられる。
- 事故時の安全評価の基準（ECCS基準）の上位要求である炉心冷却性の確保の視点から、高温脆化被覆管の地震時荷重への耐力を確認する等のアプローチは有用（例：急冷時の熱衝撃荷重との比較等）

⇒ 上位要求は同じである。ECCS評価基準と耐震解析基準の双方を踏まえた総合的な安全性確認は有用。

5. 福島第一原子力発電所事故からの視点

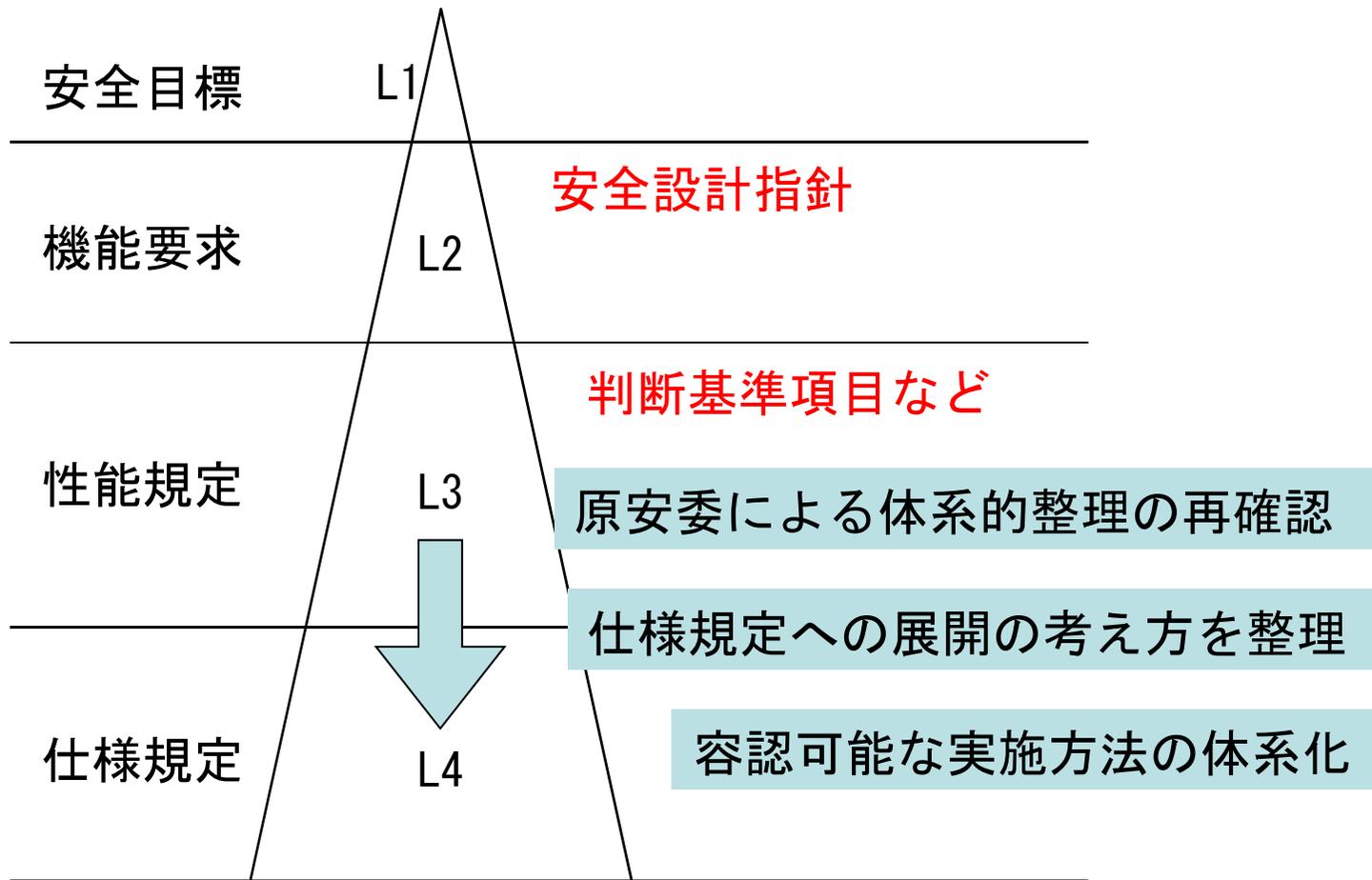
福島第一原子力発電所事故を踏まえた 燃料安全取り組みの強化からの視点（１） 設計想定事象の範囲

- 設計想定外事象への安全強化と設計想定内事象における安全強化はともに重要。
 - － 設計想定事象内の検討は見過ごされがち。
- 今回の検討から、特にLOCA後の長期冷却に係る要求を整理し、安全確保のための対応を（限られた設計分野にとどまらずに）体系的に明示することが重要。

福島第一原子力発電所事故を踏まえた 燃料安全取り組みの強化からの視点（２） 設計想定外事象への展開

- 設計想定事象の基準が適用できる想定外事象
 - － 設計想定内事象を対象として検討している基準類、評価方法が適用できると考えられる。ただし、設備対応や評価条件にも依存するのでフォローが必要。
- 同じ基準を適用できない想定外事象（例：燃料溶融）
 - － 燃料の性状（溶融）、挙動（溶融燃料、FPガス）、構造などが想定内事象と異なる事象の検討

6. まとめ



海外の最新規制や新知見などとの対比から、課題と対応の方向性について検討

まとめ

- ・ 過去に燃料安全基準の性能規定（レベル3）で実施された体系的な整理を再度確認し、仕様規定（レベル4）への展開のための検討を進めてきた。
- ・ 海外の最新の要求事項や新知見などとの対比を行い、国内の課題と対応の方向性について検討を進めている。
- ・ これらは近々報告書としてまとめ、優先度の高い重要な事項から、燃料安全基準の具体的な標準策定に反映していくこととしている。