

日本原子力学会 2022年秋の大会 企画セッション

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 -

(3) 炉心燃料の安全設計に関する技術レポート

(3) Technical report for design safety of fuel and core

福田 龍, 三菱重工業,

三菱重工業株式会社

2022.9.8

1. 炉心燃料の安全設計に関する技術レポートの作成の経緯

--- きっかけ ---

- **2011年3月の東北地方太平洋沖地震による福島第一原子力発電所事故の発生前：**
 - **LUA（小数体先行照射燃料）の標準策定において、（小数体の前提以前に）燃料に対する体系的な安全要求の整備が不十分な状況であることが認識。**
- **2011年3月の東北地方太平洋沖地震による福島第一原子力発電所事故の発生後：**
 - **DBAまでの運転状態においても、燃料・炉心の体系的な安全要求の整備の必要性がより強固となった。（炉心燃料分科会）**
 - **炉心燃料に係る基本的要求指針、具体的要求指針、手引・技術規定等といった階層構造を技術ベースで体系的に整理する抜本的な安全への取り組みが開始。**
- **体系的な整理を目的として、技術レポート「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）」を**
 - **2012年度から具体的な検討開始**
 - **2015年10月に初刊発刊**
 - **2022年3月に最初の改訂版発刊**

1. 炉心燃料の安全設計に関する技術レポートの作成の経緯

--- 技術レポート策定開始時の狙い ---

- ・ 階層的かつ網羅的な安全要求事項の展開
- ・ 燃料棒の閉じ込め機能にとどまらず、以下の機能まで拡張して展開；
 - ・ 燃料棒の冷却形状維持に果たすべき機能
 - ・ 集合体・チャンネルボックスの安全機能（冷却材、制御棒の経路確保）
- ・ 従来の国内安全審査における
 - ・ 添付八 安全設計（燃料健全性）、
 - ・ 添付十 安全評価（燃料の許容設計限界、燃料・炉心の安全性）との（ともすれば陥りがちな）固定解釈から離れ、
おおもととなる「遵守すべき安全機能」からの展開との考えで、横ぐしで検討

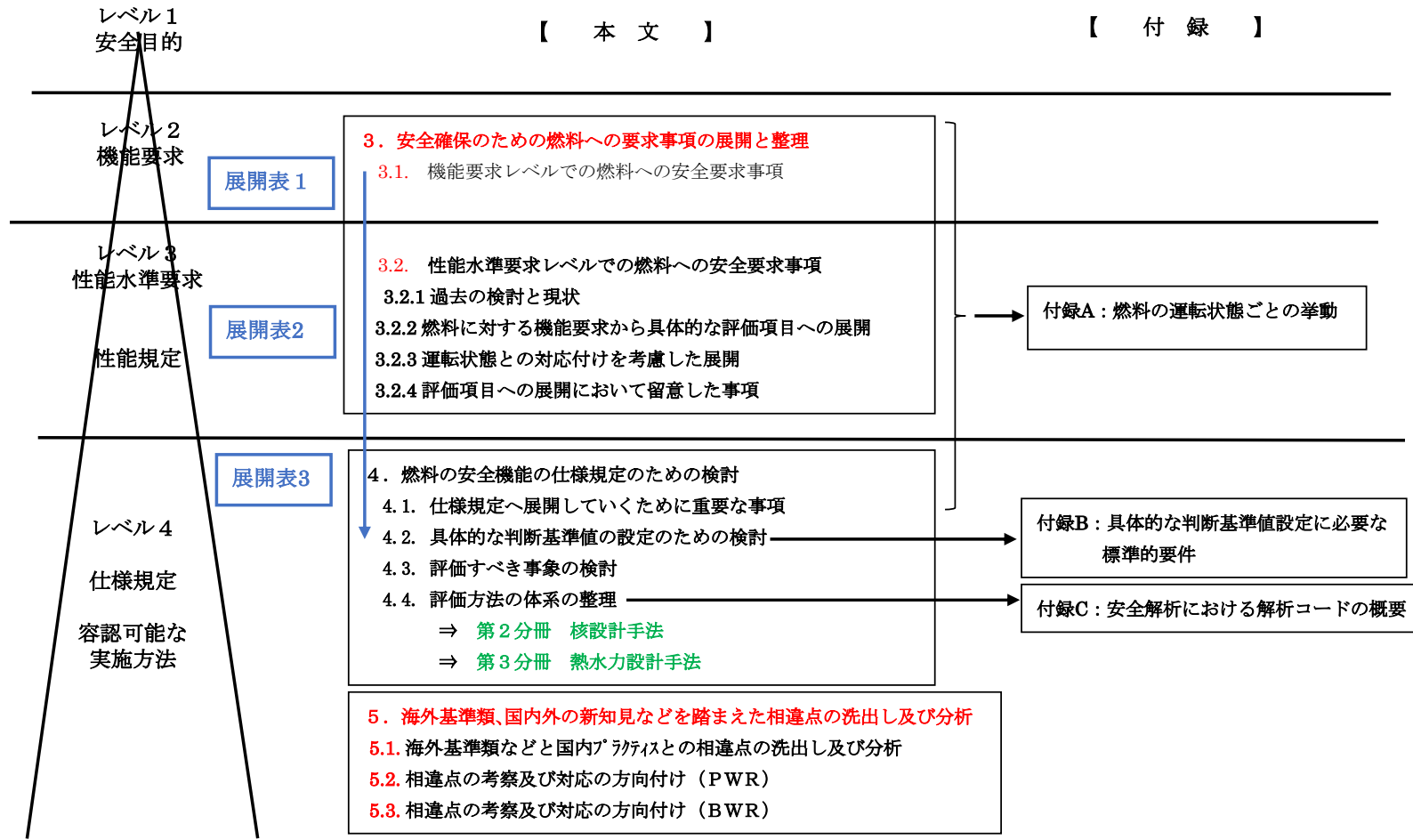
⇒ Damage/Failure/Coolability の大分類で要求事項を体系化。主に以下も参考；

- ・ 米国：NRC Standard Review Plan Sec.4.2 Fuel Design Systems
- ・ 欧州：IAEA Nuclear Fuel Safety Criteria Technical Review
- ・ 性能規定までを規制サイド、仕様規定への具体化を申請者側、との境界線を意識せずに
レベル2：安全機能要求→レベル3：性能水準要求→レベル4：容認すべき実施方法
の展開を縦ぐしの階層的検討によって整理。
⇒ IAEA SSR-2/1参考
- ・ 旧原子力安全委員会での「安全設計指針」、「安全評価指針」、「個別の指針、内規、報告書類」を広く、等しい深さまで深掘りした燃料・炉心の安全要求等を構築。

2. 技術レポートの特徴

2-1. 体系的階層的な安全要求事項の展開

IAEA SSR2/1 参照



2-1. 体系的階層的な安全要求事項の展開：展開表 1

基本的な要求事項(FSF)		止める機能 (制御棒挿入経路の確保)	冷やす機能 (炉心冷却可能な形状の確保)	閉込め機能
燃料に関わる機能要求	燃料棒		<ul style="list-style-type: none"> 冷却材の流路面積の大幅な減少に至るような燃料棒の過大な変形が生じないこと 例：LOCA中高温膨れ →PCT/ECR 冷却材の流路面積の大幅な減少に至るようなペレットの放出を伴う燃料棒の損傷が生じないこと 例：PCT/ECR基準、FFRD影響 燃料棒の損傷に伴う衝撃力によって冷却材の流路を構成する燃料以外の機器に損傷が生じないこと 例：RIA基準 	<ul style="list-style-type: none"> 燃料被覆管に貫通性の損傷が生じないこと 被覆管と端栓の溶接部に貫通性の損傷が生じないこと
	燃料集合体	<ul style="list-style-type: none"> 制御棒の挿入経路が失われるような損傷や変形が生じないこと 制御棒の挿入を妨げるような過大な抗力が生じないこと 	<ul style="list-style-type: none"> 燃料集合体による燃料棒の保持が著しく失われ、燃料棒間の冷却材の流路面積の大幅な減少が生じないこと 燃料集合体の構成部材内の冷却材の流路面積の大幅な減少が生じないこと 	

2-1. 体系的階層的な安全要求事項の展開：展開表 2

レベル 2：安全機能要求 → レベル 3：性能規定 評価項目

機能要求 (レベル2)	性能水準要求 (レベル3)	
	機能要求の展開	評価項目
冷却材の流路面積の大幅な減少に至るような燃料棒の過大な変形が生じないこと	燃料被覆管の過大な膨れが生じないこと	長時間の照射による外向きのクリープ変形が過大とならない。 被覆管膨れ量又は内圧
		過渡時の内圧増加や被覆管温度上昇に伴う被覆管の外径増加が過大とならない。 被覆管膨れ量
	燃料棒曲がり過大にならないこと。燃料棒曲がり大量に生じないこと	燃料棒曲がり量
冷却材の流路面積の大幅な減少に至るようなペレットの放出を伴う燃料棒の損傷が生じないこと	燃料被覆管、端栓溶接部の分断等による燃料片、燃料ペレットなどの冷却材流路への大量の放出が生じないこと	被覆管の高温酸化後の著しい脆化を防止し、急冷時の分断を防止する。 被覆管温度 (PCT) 化学量論的酸化量 (ECR)
		機械的外力による過大な変形による被覆管の分断を防止する。 被覆管応力又は歪
		被覆管の溶融を防止し、溶融による分断を防止する。 被覆管温度
		端栓溶接部での破断を防止する。 溶接部健全性
冷却材の流路を構成する機器の健全性を脅かすような損傷が生じないこと	原子炉容器や炉心支持構造物等の健全性を損なうような過大な衝撃力を伴う燃料の破損又は破裂が生じないこと	燃料エンタルピ及び機械的エネルギーへの換算係数

2-1. 体系的階層的な安全要求事項の展開：展開表 3

表 4.2-2(4) 燃料安全要求事項の仕様規程への展開のための整理 (PWR)

展開表 3

評価項目	具体的な考え方 (運転状態ごとの炉内の環境及び燃料挙動を記載した付録 A も参考となる)	判断基準値と求め方(試験/解析/その他)	他の評価項目*との関係 (*判断基準値, 評価値)	海外との相違点, 国内外新見など (SRP, Nuclear Fuel Safety Criteria など)
		(判断基準設定の要件(条件, 考慮する事項, 方法)については, 付録 B に別途記載)		
被覆管最高温度 (PCT) 被覆管高温酸化量 (ECR)	LOCA 発生時に炉心の露出に伴い高温蒸気による酸化反応が進み, 酸化した被覆管が, ECCS の注入による再冠水時の急冷時に生じる熱衝撃 (引張) 荷重に対して破断しないこと。	[現行の判断基準値] 被覆管最高温度 (PCT): 1200°C 化学量論的酸化量 (ECR): 15% [基準値の求め方] 試験による確認 (ケエンパ試験) [評価値の求め方] 解析によって求める	- PCT/ECR の基準値の設定において, 腐食減肉量及び水素吸収量の影響を考慮する。	国内では ECR の算出に B-J 式を用いている。一方, 海外ではより現実的な CP 式を用いている。また, リング圧縮試験から延性も ECR の相関を評価する事例もある。 NRC 情報及び Halden からの追加情報として次の 3 点がある。 - 腐れ, リローケーション及び破断時ガスバースル - 温度評価には CRUD 及び酸化膜の考慮 - ペレット熱伝導率の燃焼に伴う低下 NRC の LOCA 基準改訂の動き: 水素吸収量依存の判断基準値, プレイクアクワイエーションの有無の確認, 被覆管温度の持続時間からの検討などが行われている。 備えい燃料が LOCA 時に破断した場合の炉心冷却阻害影響が近年の国内規制対応で論点となった。また OECD/NEA CSNI の WG5 でも世界各国の安全影響への考え方, 現状について情報整理などが開始されている。
被覆管膨れ量	LOCA 発生時又は LOCA 以外の事故時において, 内圧支配燃料に DNB が発生し, 高温かつ内圧支配となって被覆管が膨れ, 炉内の冷却材の流路面積を著しく減少させないこと。	[現行の判断基準値] 内外圧力差 (被覆管温度に依存) 破断時の歪 (被覆管温度又は内外圧力差に依存) [基準値の求め方] 試験で求める (高温クリーブ及び/又は高温破断 (バースト) 試験) [評価値の求め方] 解析によって求める	- 被覆管が破断するまでの膨れ量は, 次の項目の影響を受ける。 - 燃料棒内外圧差又は被覆管応力 - 水素吸収量	
LOCA 後の長期冷却性維持	LOCA 発生後, ECCS による炉心への注水によって被覆管温度は判断基準値に至ることなく炉心が再冠水を達成したのち, 格納容器底部のサンブ水を利用した再循環モードでの炉心への注水に切り替わった後の長期の炉心冷却においても, 炉心が再度露出しない水位を保った状態で腐蝕を除去することができること。	ECCS 性能評価指針の解説 1 では, 次の記載がされている。 “炉心が冠水しているか, 又は少なくとも炉心の出力密度の高い部分が冠水し, それ以外の部分の冷却も十分であるような状態が維持できることを示せば満足されたと見なす。”		米国審査, OECD/NEA の Nuclear Fuel Safety Criteria Technical Review などでは次の要求及び問題提起がなされている。これらはいずれも LOCA 後の長期冷却性に関連する。 - LOCA 再循環時の原子炉容器内でのほう酸析出。(米国では審査事項である。国内でも至近の審査で説明を要求される傾向にある。) - LOCA 後の燃料耐震評価。(国内もかつての JEAG4601 耐震設計技術指針には将来の検討事項として明記されていた。) - 再循環冷却時に, LOCA 時の配管保冷材などから生じた異物がサンブストレーナのスクリーン又は燃料集合体に閉塞した場合の長期冷却性への影響。
事故時の燃料振動に伴う被覆管の強度(応力)	配管破損に代表される事故の発生に伴い, 原子炉冷却材システム内の減圧波伝播, 配管破断の反力などによって原子炉容器の振動に伴う外的荷重に対して, 事故発生中及びその後の炉心冷却形状維持のため, ペレット片の散逸を伴うような被覆管の破断が生じていないこと。	[現行の判断基準値] 許容応力(耐力) [基準値の求め方] 試験で許容応力(3 σ_{50})を確認(引張試験) [評価値の求め方] 解析によって求める	- 被覆管の応力評価値に対して, 腐食減肉量及び/又は摩耗減肉量が影響する。	

次ページへ

2-1. 体系的階層的な安全要求事項の展開：展開表3

評価項目(レベル3)からさらに「具体的判断基準値(レベル4)設定の考え方、現状の値」、「他の項目との関係」まで踏み込んで検討した結果を掲載

レベル3 → レベル4

評価項目	具体的な考え方 (運転状態ごとの炉内の環境及び燃料挙動を記載した付録Aも参考となる)	判断基準値と求め方 (試験/解析/その他) (判断基準設定の要件(条件, 考慮する事項, 方法)については, 付録Bに別途記載)	他の評価項目*との関係 (*判断基準値, 評価値)	海外との相違点, 国内外新知見など (SRP, Nuclear Fuel Safety Criteriaなど)
被覆管最高温度(PCT) 被覆管高温酸化量(ECR)	LOCA発生時に炉心の露出に伴い高温蒸気による酸化反応が進み, 脆化した被覆管が, ECCSの注入による再冠水時の急冷時に生じる熱衝撃(引張)荷重に対して破断しないこと。	[現行の判断基準値] 被覆管最高温度(PCT) : 1200℃ 化学量論的酸化量(ECR) : 15% [基準値の求め方] 試験による確認(クエンチ試験) [評価値の求め方] 解析によって求める	PCT/ECRの基準値の設定において, 腐食減肉量及び水素吸収量の影響を考慮する。	国内ではECRの算出にB-J式を用いている。一方, 海外ではより現実的なCP式を用いている。また, リング圧縮試験から延性とECRの相関を評価する事例もある。 NRC情報及びHaldenからの追加情報として次の3点がある。 ・膨れ, リロケーション及び破綻時ディスパースル ・温度評価にはCRUD及び酸化膜の考慮 ・ペレット熱伝導率の燃焼に伴う低下 NRCのLOCA基準改訂の動き: 水素吸収量依存の判断基準値, ブレイクアウェイ酸化の有無の確認, 被覆管温度の持続時間からの検討などが行われている。 漏えい燃料がLOCA時に破断した場合の炉心冷却阻害影響が近年の国内規制対応で論点となった。またOECD/NEA CSNIのWGFSでも世界各国の安全影響への考え方, 現状について情報整理などが開始されている。
LOCA後の 長期冷却性維持	LOCA発生後, ECCSによる炉心への注水によって被覆管温度は判断基準値に至ることなく炉心が再冠水を達成したのち, 格納容器底部のサンプル水を利用した再循環モードでの炉心への注水に切り替わった後の長期の炉心冷却においても, 炉心が再度露出しない水位を保った状態で崩壊熱を除去することができること。	ECCS性能評価指針の解説1では, 次の記載がされている。 “炉心が冠水しているか, 又は少なくとも炉心の出力密度の高い部分が冠水し, それ以外の部分の冷却も十分であるような状態が維持できることを示せば満足されたと見なす。”		米国審査, OECD/NEAのNuclear Fuel Safety Criteria Technical Reviewなどでは次の要求及び問題提起がなされている。これらはいずれもLOCA後の長期冷却性に関連する。 ・LOCA再循環時の 原子炉容器内でのほう酸析出 。(米国では審査事項である。国内でも至近の審査で説明を要求される傾向にある。) ・LOCA後の 燃料耐震評価 。(国内もかつてのJEA4601耐震設計技術指針には将来の検討事項として明記されていた。) ・再循環冷却時に, LOCA時の配管保冷材などから生じた異物がサンプルトレーナのスクリーン又は燃料集合体に閉塞した場合の長期冷却性 への影響。

評価項目ごとに国内外の関連知見(知見の調査・収集の結果)を記載。これを分析して課題へ展開

2-2. 国内外の新知見・運転経験等の収集・分析と国内への安全性向上への反映

展開表3の右端にて評価項目ごとに記載された国内外知見の分類・分析 ⇒ 以下の課題を抽出

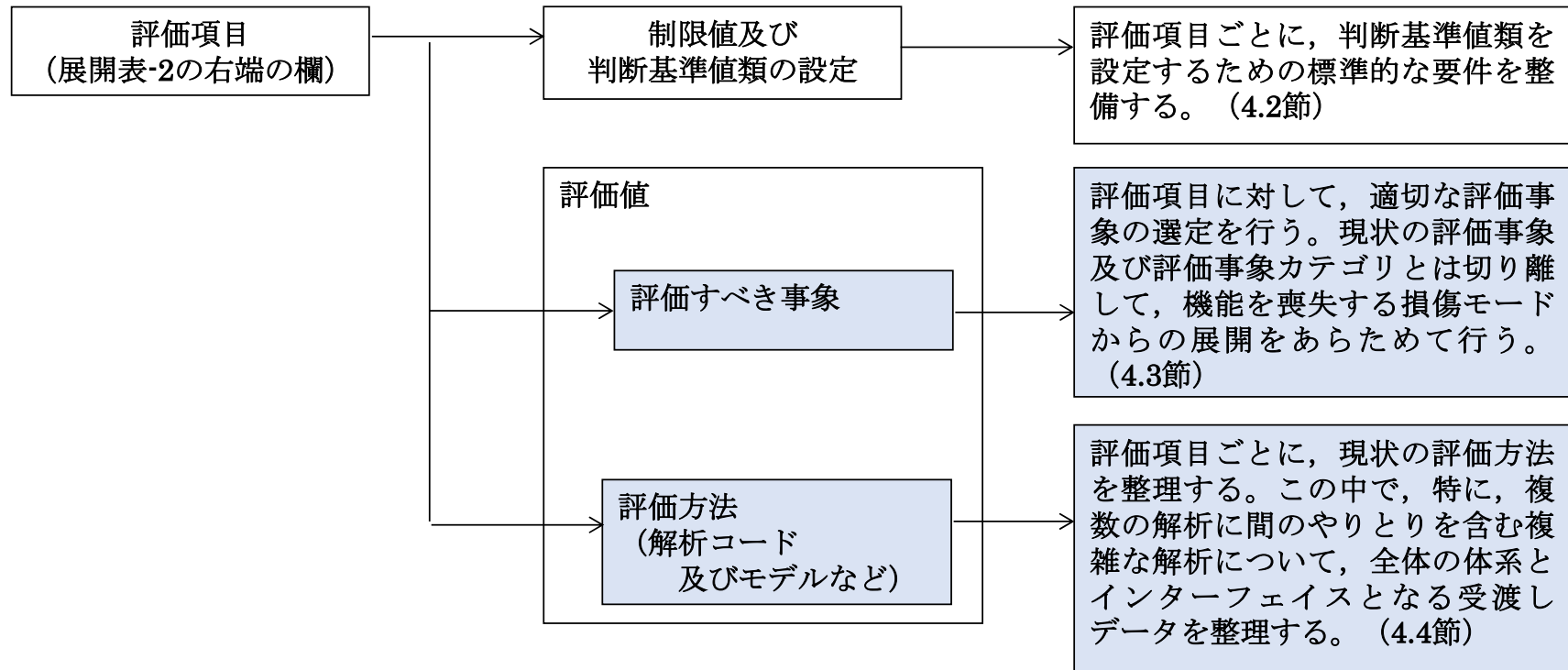
大分類	具体項目	
被覆管の閉込め機能のうち 機械的破損に関わる要求 (閉込め機能)	燃料棒内圧(通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時の基準の多様な考え方, 事故時の内圧支配での高温膨れ破損によるDNB伝播の評価)	
	PCMI1%歪基準の適用性(全歪/塑性歪)	BWR
	遅れ水素化割れ(DHC)	
	SCC PCI評価の具体化・定量化の動き	
	燃料の内圧, 腐食, 中心溶融防止に対する基準類の明確化	
	歪以外の機械的破損に着目した多様な閉込め機能評価(含む被ばく評価)	
RIE PCMI破損エンタルピの指標		
LOCA時又はLOCA後の 冷却性に関わる要求 (冷やす機能)	新ECCS基準	
	LOCA再循環冷却時の原子炉容器内のほう酸析出(PWR)	
	LOCAデブリの炉内での閉塞の可能性及び崩壊熱除去への影響評価	PWR
	LOCA後の地震に対する燃料棒の冷やす機能の評価	
	FFRD (Fuel Fragmentation Relocation Dispersals)	
漏えい燃料に対する事故時(含LOCA)の安全性の考え方		
燃料集合体の安全機能評価 の条件に関わる要求 (止める機能,冷やす機能)	地震とLOCAの重畳評価	
	LOCA時のグリッド変形による集合体機能及び安全解析への影響(PWR)	
	照射に伴う特性変化を考慮した燃料集合体の安全機能への影響	

2-3. その他の主要な記載事項

【レベル3（性能水準要求）】

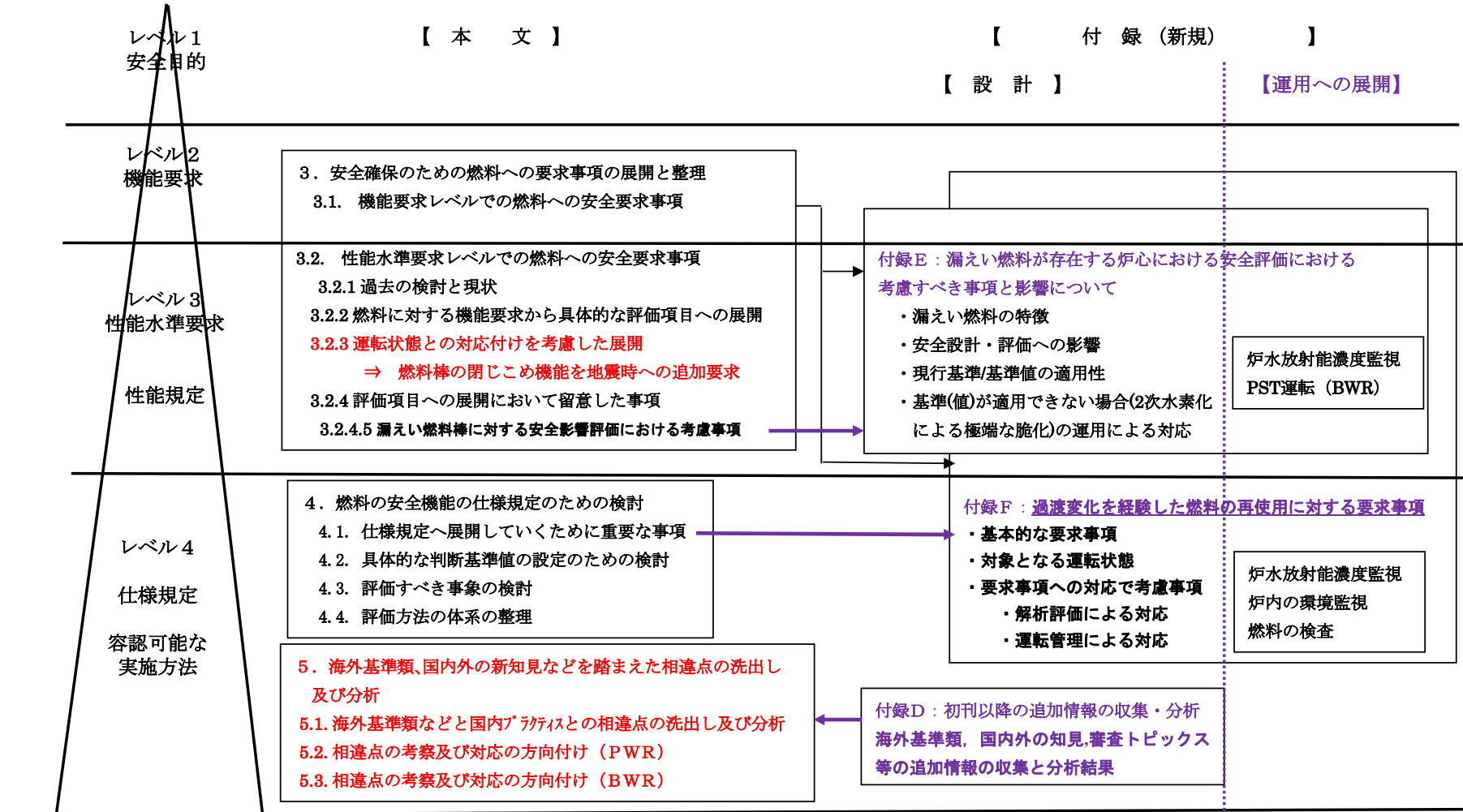
【レベル4（仕様規定）の内容】

【技術レポートでの取り組み内容】



レベル3（性能規定）から仕様規定へ展開していくための必要な検討として、評価すべき事象の炉内の物理現象からの展開、評価方法についての体系的整理を掲載している。

3. 技術レポートの初回改定：骨子



3. 技術レポートの初回改定の骨子

- 安全要求事項として地震時の燃料棒の閉じ込め機能の要求を追加（国内審査トピックス反映）
- 追加知見で国内外の進捗事項の収集と分析により、国内現状との相違点の一覧表に反映
- 付録の充実：漏えい燃料を含む炉心の安全性、異常な過渡変化・事故（一部）経験後の再利用の基本的要件、等
- 設計のみでなく運転中の管理・監視等による安全確認の視点も合わせた総合的・合理的な安全確保のあり方の検討

安全機能	対象	燃料に要求される基本的な安全機能	通常運転時 (含,通常の地震)	運転時の異常な 過渡変化時	事故時	地震時 (基準地震動Ss)
閉込め機能	燃料棒	<ul style="list-style-type: none"> ・燃料被覆管に貫通性の損傷が生じないこと ・被覆管及び端栓溶接部に貫通性の損傷が生じないこと 	○	○	—*1	○ 【今回追加】
冷やす機能	燃料棒	<ul style="list-style-type: none"> ・冷却材の流路面積の大幅な減少に至るような燃料棒の過大な変形が生じないこと ・冷却材の流路面積の大幅な減少に至るようなペレットの放出を伴う燃料棒の損傷が生じないこと ・冷却材の流路を構成する燃料以外の機器に健全性を喪失するような損傷が生じないこと 	○	○	○	○
	燃料集合体	<ul style="list-style-type: none"> ・燃料棒の保持が失われないこと ・冷却材の流路面積の大幅な減少又は閉塞となるような変形が生じないこと 	○	○	○	○
止める機能	燃料集合体	<ul style="list-style-type: none"> ・制御棒の挿入経路が失われるような損傷及び変形が生じないこと ・制御棒の挿入を妨げるような抗力が生じないこと 	○	○	○	○

*1 事故時の被ばく評価のための破損本数の算出は必要。

3. 技術レポート初回改定：国内外知見収集から抽出された課題一覧

大分類	具体項目
被覆管の閉込め機能のうち 機械的破損に関わる要求 (閉込め機能)	燃料棒内圧(通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時の基準の多様な考え方, 事故時の内圧支配での高温膨れ破損によるDNB伝播の評価)
	PCMI1%歪基準の適用性(全歪/塑性歪)
	遅れ水素化割れ(DHC)
	SCC PCI評価の具体化・定量化の動き
	燃料の内圧, 腐食, 中心溶融防止に対する基準類の明確化
	歪以外の 機械的破損に着目した多様な閉込め機能評価 (含む被ばく評価)
	RIE PCMI破損エンタルピの指標
LOCA時又はLOCA後の 冷却性に関わる要求 (冷やす機能)	新ECCS基準
	LOCA再循環冷却時の原子炉容器内のほう酸析出(PWR)
	LOCAデブリの炉内での閉塞の可能性及び崩壊熱除去への影響評価
	LOCA後の地震に対する燃料棒の冷やす機能の評価
	FFRD
	漏えい燃料に対する事故時(含LOCA)の安全性の考え方
燃料集合体の安全機能評価 の条件に関わる要求 (止める機能,冷やす機能)	地震とLOCAの重畳評価
	LOCA時のグリッド変形による集合体機能及び安全解析への影響(PWR)
	照射に伴う特性変化を考慮した燃料集合体の安全機能への影響

- ・ 新規な課題となる項目はなく、初刊からの進捗（国内外）を反映。
- ・ 機械的破損評価手法、FFRDの解明、に関する多角的アプローチを具体的に低減

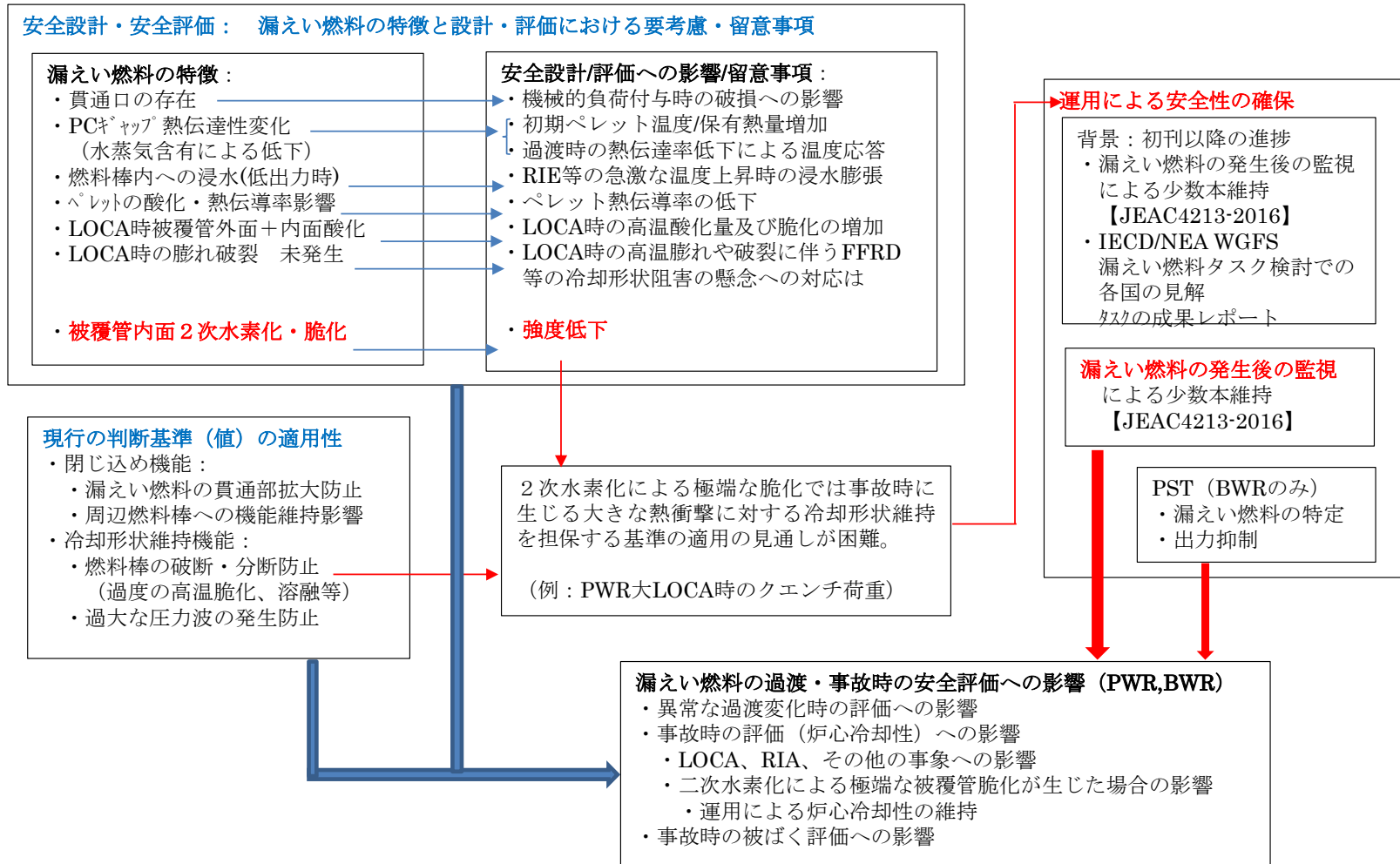
3. 技術レポート 初回改定 FFRDの多角的な解決への提言

Dispersion発生限界条件(燃焼度等)に集中した検討から実機でのDispersion有無評価、燃料設計改良、Dispersion後の冷却性等多角的検討へ

燃焼の進んだ燃料のLOCA時の高温膨れ破裂に伴うディスパースルに対して炉心の長期の冷却性を評価する方策

	評価の方法	具体的方策	注記等
高燃焼度燃料は破裂しない、又は破裂しにくい(少数)こと。	試験	照射の進んだ燃料を用いたLOCA模擬高温膨れ破裂試験で、破裂及びそれに伴うディスパースルが生じる条件を把握する。	国際プロジェクトSCIPでは、専らこの観点から知見が拡充されている。
	解析	高燃焼燃料は内部でペレットの微細化は生じやすいが、一方、運転時の出力及び事故後の崩壊熱が比較的低温、被覆管温度の上昇が抑制される方向なので、ディスパースル以前に、被覆管の破裂が抑制されることを、実機でのLOCA解析により確認する。	国内の新規制基準適合性審査の場で、BWRではLOCA時の燃料被覆管の破裂は高燃焼条件でも生じにくいことが説明されている。
	運用 燃料設計	取替炉心の燃料装荷パターンで破裂の回避軽減を図る。 膨れにくい、破裂しにくい燃料の開発及び実用化	----- -----
被覆管が破裂しても、ディスパースルが生じない、又は生じにくいこと。	試験	バンドル体系では、燃料棒の膨れによる隣接燃料棒との干渉効果で破裂してもディスパースルが生じにくくなる効果を試験で確認する。 同じ集合体内でも、隣接する燃料棒が同じ軸方向位置で破裂する保証はないため、1本のみで膨れ破裂が生じた場合の隣接燃料棒との干渉効果を確認する。	過去、複数の照射燃料棒サンプルを用いたLOCA模擬試験は国際プロジェクトでの計画段階で言及されたことはあるが、実現に至っていない。
被覆管が破裂し、その後ディスパースルが生じても炉心冷却性を阻害しないこと。	試験 解析	被覆管の破裂に伴うディスパースル及びそれによる燃料バンドル間(含むグリッド部)でのペレット片等の蓄積が生じて、少量であれば、炉心冷却が可能な形状の喪失とはならないこと、及びペレット片等の蓄積部付近の冷却(ディスパースル片の冷却及び近傍の被覆管の冷却)が問題とならないことを、試験及び解析で確認する。	冷却性維持の着眼点が多岐にわたる。計画も含め、具体的な試験の例は現時点では確認されていない。

3. 技術レポート初回改定：付録の充実例 燃料単体機能喪失⇒炉心としての機能維持の評価の考え方



⇒ 極端な2次水素化脆化まで考慮すると設計評価に加え運転中監視による少数本相当の管理が重要。15

4. 技術レポートの今後の改定の内容

今後も基本的に5年ごとに更新を行っていくが、

- 定期的更新：国内外の追加知見の収集と分析、国内での取り組み・進捗

→ 国内における安全性の向上への取り組みの進捗の提示

- 対象の拡大：

- ・安全要求事項の階層・網羅的展開、国内外知見

これまで：

⇒ 次回以降：

炉内のDBAに限定

(炉心損傷に至る前の) **BDBA**

使用済み燃料ピットにおける挙動と要求事項

- ・その他：解析手法／モデル等：**BEPU**安全解析手法の取り込み

5. 技術レポートの広範な活用

- 世界的な知見の収集・分析の継続による不断の安全性向上への取り組み

国内外とのギャップ分析や追加知見の収集によって抽出された個別の課題については、産業界、研究機関及び規制側との共通の認識となることで、解決にむけて合理的な安全性向上への対応を進めていくことが期待できる。また産業界では限られた資金の効果的・重点的な投資対象の共有として活用している。

- 安全性向上等の改良燃料の開発における階層的な安全要求の適用・活用

ATFに代表される新設計燃料の開発において網羅的な安全要求事項と照合させながら性能改良と安全確保を両立させた開発が着実に遂行できる。

大きな設計変更では、新設計の特徴に応じた新たに具体的な評価項目がないか確認が必要で本レポートでの安全機能要求レベル（レベル2）から性能要求（レベル3）への展開の検討が参考となる。

- 燃料安全に関わる技術の伝承

体系化された燃料安全要求事項と都度更新される国内外知見の整理は、燃料の安全設計と安全評価に係る関係者において、貴重な技術伝承の礎となるものと考えられる。