日本原子力学会2022年秋の大会
核燃料部会企画セッション
令和4年9月8日

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
(4)事故耐性燃料（ATF）の実用化に向けたワーキンググループ活動

○山下 真一郎[1] 阿部弘亨[2] 佐藤大樹[3] 大脇理夫[4] 坂本寛[5]
草ヶ谷和幸[6] 土屋暁之[7]

[1]JAEA [2]東京大学 [3]MNF [4]NFI [5]NFD [6]GNF-J [7]日立GE

事故耐性燃料検討WG立ち上げの経緯・目的

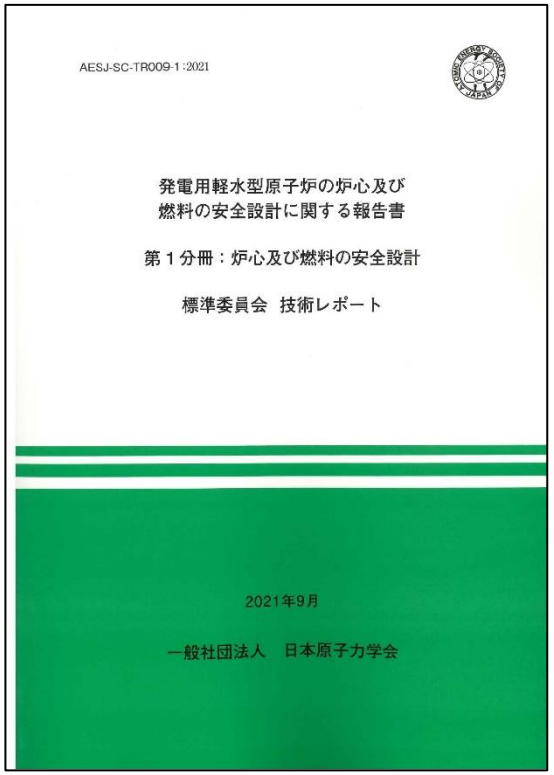
- 2011年3月の東京電力福島第一原発事故での教訓を踏まえて、冷却材喪失等の過酷な条件においても損傷しにくく、高い信頼性を有する事故耐性燃料（ATF*）の開発が世界的に進められてきている。

*ATF：Accident Tolerant Fuel

- 国内においても、早期の実機導入を目指して、現在以下に示すATF候補材の開発が民間主導で進められている。
  - コーティングZr被覆管
  - FeCrAl被覆管
  - SiC被覆管／SiCチャンネルボックス
- ATF導入に関する安全要件について整理・検討を進めるために、2017年に炉心燃料分科会にATF検討WGが立ち上げられた。構成メンバーは以下の通りである。
  - 学識経験者（東京大学 阿部先生）
  - 研究機関（JAEA、NFD）
  - 電気事業者、原子炉・原子燃料メーカー（三菱、日立、東芝等）

ATF検討WGにおける基本的検討方針

- 燃料の安全性を向上させるためには、新技術や新知見の導入を促す必要がある。一方、新技術や新知見の導入に際しては、それらの安全性を確認する考え方を整理することが重要となる。
- ATFに対する燃料安全の考え方の整理・検討においては、軽水炉燃料の安全設計の考え方が階層的・網羅的に整理されている、日本原子力学会標準委員会 技術レポート（右図）を基礎とする。
- ATF検討WGでは、ジルカロイを基本に整理された考え方をもとに、新設計（改良）燃料を導入する際に考慮すべき燃料の破損モードと、各破損モードについて影響を考慮すべき燃料の特性及び挙動を整理している。
- 先行する海外での公開文献があるATF（例えば、Crコーティング Zr被覆管の破損メカニズムに関するレポート等）については、そこでの検討内容を参考に、破損メカニズム毎の重要度を追加した重要度分類表（PIRT）等を作成している。



【概要】
炉心及び燃料の安全設計全体の枠組みが示されている。主として熱機械設計の観点から損傷モードの抽出及び安全機能を維持するための要求が展開され、かつ評価対象とすべき事象も選定されている。

https://www.aesj.net/publish-1504

（参考）階層的安全要求の展開

- 原子炉の安全確保における階層的な要求（レベル2～4）に応じて、燃料へ求められる事項が展開されている（展開表1～3）＊
- 展開表1～3のそれぞれについて、ATF適用影響の検討要否を整理

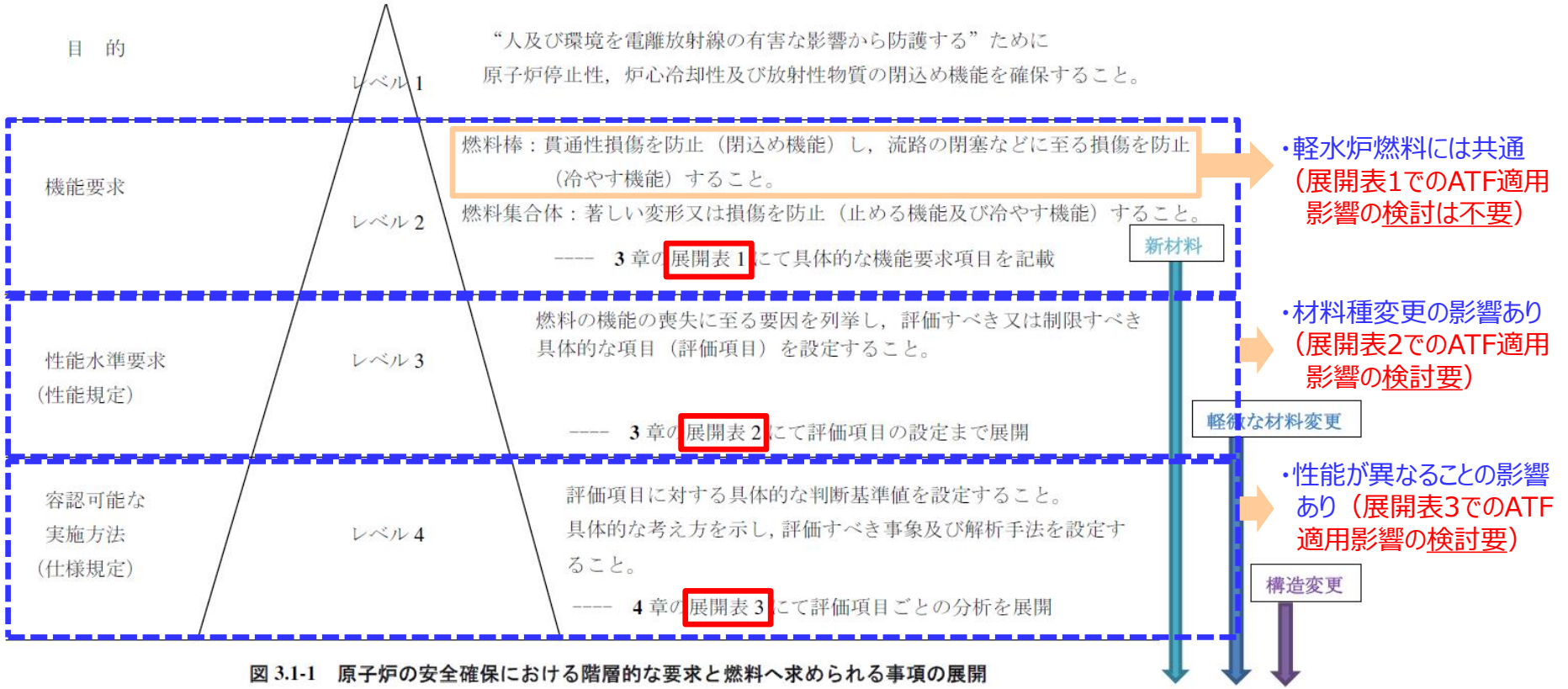


図 3.1-1　原子炉の安全確保における階層的な要求と燃料へ求められる事項の展開

＊日本原子力学会標準委員会技術レポート
「発電用軽水型原子炉の炉心及び燃料の安全設計に関する報告書：2015 第一分冊：炉心及び燃料の安全設計」（2015.10.21）

（参考）階層的安全要求の展開

- 原子炉の安全確保における階層的な要求（レベル2～4）に応じて、燃料へ求められる事項が展開されている（展開表1～3）＊
- 展開表1～3のそれぞれについて、ATF適用影響の検討要否を整理

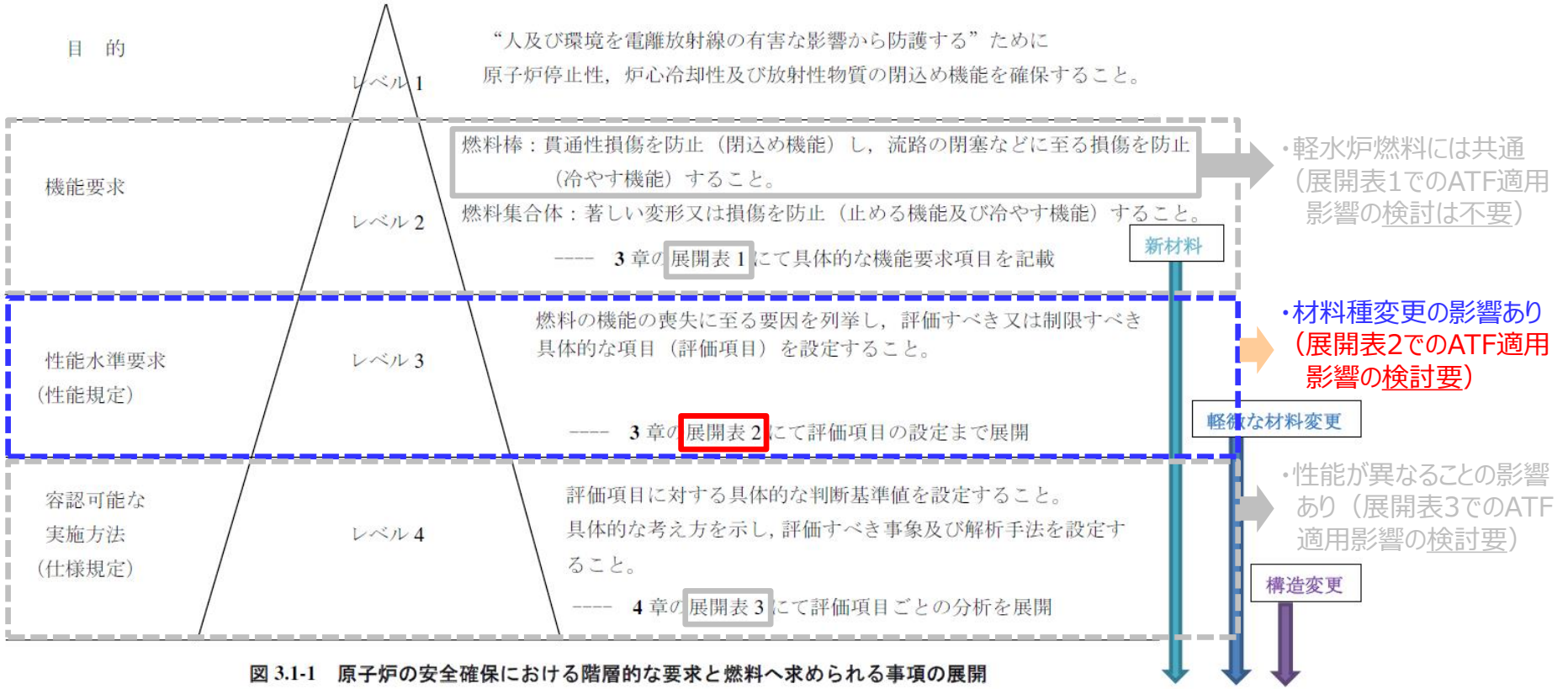


図 3.1-1　原子炉の安全確保における階層的な要求と燃料へ求められる事項の展開

＊日本原子力学会標準委員会技術レポート
「発電用軽水型原子炉の炉心及び燃料の安全設計に関する報告書：2015 第一分冊：炉心及び燃料の安全設計」（2015.10.21）

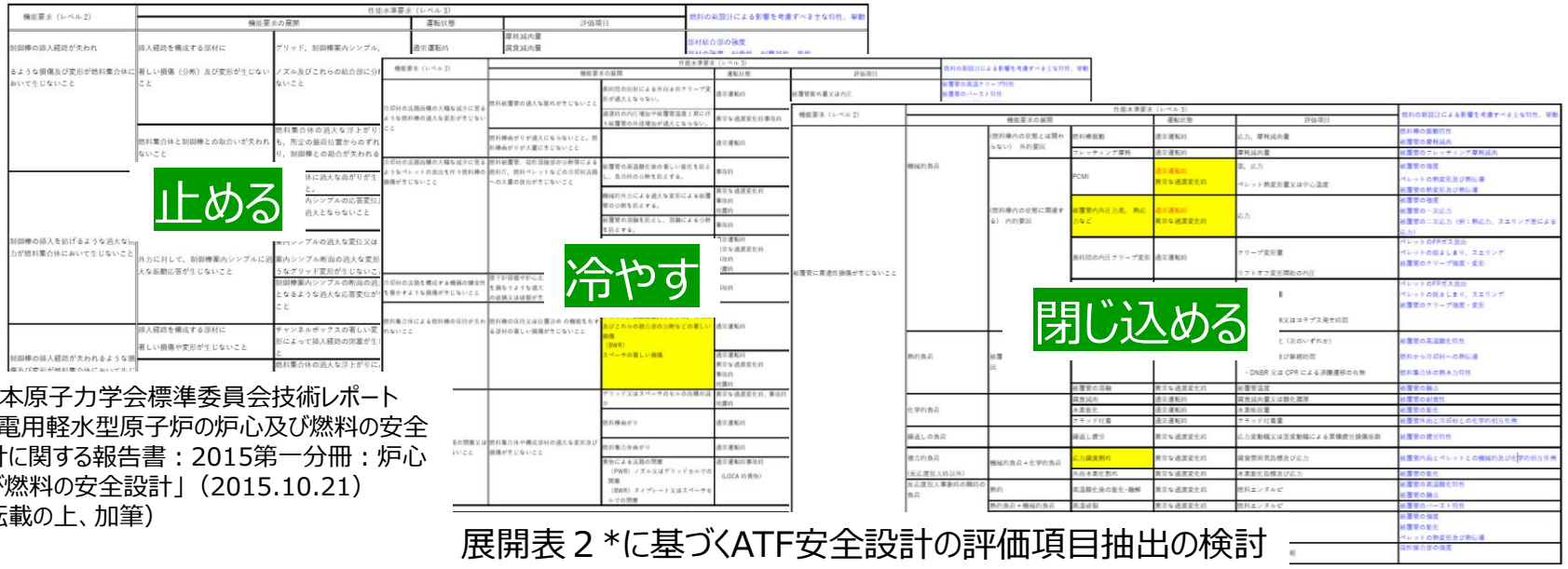
運転状態と対応付けたレベル2からレベル3への展開：展開表2（燃料棒／冷却）

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		運転状態	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。	通常運転時	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。	異常な過渡変化時 事故時	被覆管膨れ量
	燃料棒曲がりが過大にならないこと。燃料棒曲がりが大量に生じないこと		通常運転時	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。	事故時	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。	異常な過渡変化時 事故時 地震時	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。	事故時	被覆管温度
		端栓溶接部での破断を防止する。	通常運転時 異常な過渡変化時 事故時 地震時	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		事故時	燃料エンタルピ及び機械的エネルギへの換算係数

*日本原子力学会標準委員会技術レポート
「発電用軽水型原子炉の炉心及び燃料の安全設計に関する報告書 第１分冊：炉心及び燃料の安全設計（AESJ-SC-TR009-1：2021）」（2022.3.30）

ATF安全設計の評価項目抽出の考え方

- 技術レポートの展開表2について、軽水炉燃料に一般的な記載内容か確認した。
  具体的には従来材であるZr合金被覆管とは異なるATF（FeCrAl被覆管、SiC被覆管）にも適用可能か確認した。燃料の機能要求（閉じ込める、冷やす、止める）のうち、
  - ✓ “閉じ込める”は金属ではないSiC被覆管について追加が必要な項目がある。
    （例：水素透過性）
  - ✓ “冷やす”、“止める”はほぼ一般的な記載となっている。
- 新設計燃料に考慮すべき材料特性や照射挙動についての記載を追記し、展開表2との繋がりについて確認し、適切な記載内容を検討している。
- ATF安全設計に必要な評価項目を抜け漏れなく抽出できるようにする。



展開表２*に基づくATF安全設計の評価項目抽出の検討

*日本原子力学会標準委員会技術レポート「発電用軽水型原子炉の炉心及び燃料の安全設計に関する報告書：2015第一分冊：炉心及び燃料の安全設計」（2015.10.21）（転載の上、加筆）

（参考）階層的安全要求の展開

- 原子炉の安全確保における階層的な要求（レベル2～4）に応じて、燃料へ求められる事項が展開されている（展開表1～3）＊
- 展開表1～3のそれぞれについて、ATF適用影響の検討要否を整理

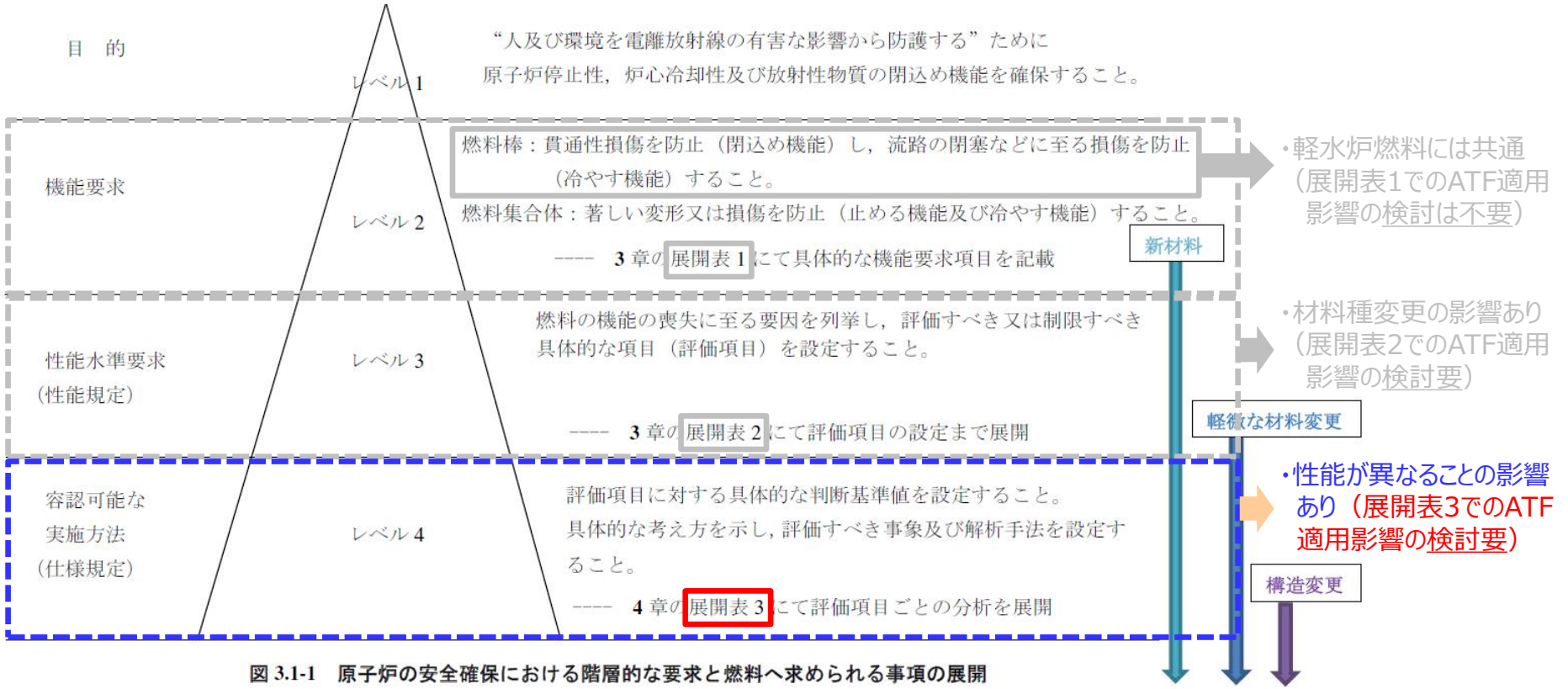


図 3.1-1　原子炉の安全確保における階層的な要求と燃料へ求められる事項の展開

＊日本原子力学会標準委員会技術レポート
「発電用軽水型原子炉の炉心及び燃料の安全設計に関する報告書：2015 第一分冊：炉心及び燃料の安全設計」（2015.10.21）

重要度分類表（PIRT）作成の考え方

- 技術レポートの展開表3に基づいて、コーティング被覆管のPIRTを作成：
  - ✓ 技術レポートの展開表3の評価項目について、考慮すべき事象の特定のため「燃料被覆管外面のCrコーティングが燃料挙動に影響する可能性」を追記
  - ✓ 各基準値・評価値への「影響レベル」、当該項目に関する「知識レベル」（データ、知見の確認状況）を3段階で評価し、重要度を分類
  - ✓ 米国PIRTなどの海外知見を追記し、差分項目を確認
- 重要度高（影響レベル高＆知識レベル低）の評価項目について、個票作成：
  - ✓ 知識レベル拡充のための方法（解析、試験、設定条件、方針）を整理
- 次の観点などから、PIRT及び個票について分科会メンバーがレビュー：
  - ✓ 重要度（H/M/L）を分類する考え方に不明な点はないか
  - ✓ 知識レベルに関連し、考慮すべき知見に漏れはないか
  - ✓ 多角的な視点（学術界、産業界、規制の視点）から新たな考慮事項はないか
  - ✓ 追加すべき評価項目（新たな破損モード）はないか

- ATF安全設計の評価項目の重要度を分類できる。
  （関連する課題について優先順位を付けることができる。）
- 新知見を反映することにより研究開発課題を更新できる。
- ATF安全設計に必要な評価項目に抜け漏れがないことを確認できる。

PIRT：Phenomena Identification and Ranking Table

コーティング被覆管のPIRT（一部抜粋）

	影響レベル　（性能向上：赤字）	知識レベル
被覆管外面のCrコーティングが燃料挙動に影響する可能性	H:影響が明確 M:影響が有意となる可能性あり L:影響なし、または定性的に影響が軽微	H:評価モデル設定が可能 M:影響評価は可能だが、データ拡充が必要 L:評価に必要なデータが限定的

	影響レベル	知識レベル
被覆管外面のCrコーティングの欠陥（製造時及び使用中の割れ、はがれ）が燃料挙動に影響する可能性	H:影響が明確 M:影響が有意となる可能性あり L:影響なし、または定性的に影響が軽微	H:評価モデル設定が可能 M:影響評価は可能だが、データ拡充が必要 L:評価に必要なデータが限定的

■　燃料棒　閉込め機能(1)　：通常運転時

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）	被覆管外面のCrコーティングが燃料挙動に影響する可能性	影響レベル　（性能向上：赤字） H:影響が明確 M:影響が有意となる可能性あり L:影響なし、または定性的に影響が軽微	知識レベル H:評価モデル設定が可能 M:影響評価は可能だが、データ拡充が必要 L:評価に必要なデータが限定的	被覆管外面のCrコーティングの欠陥（製造時及び使用中の割れ、はがれ）が燃料挙動に影響する可能性	影響レベル H:影響が明確 M:影響が有意となる可能性あり L:影響なし、または定性的に影響が軽微	知識レベル H:評価モデル設定が可能 M:影響評価は可能だが、データ拡充が必要 L:評価に必要なデータが限定的
燃料棒内圧	被覆管の内圧が上昇し，内外圧力差による通常運転時の外向きのクリープ変形で被覆管が破損しないこと。 （被覆管の外向き変形によるペレットと被覆管のギャップの増加によって燃料中心温度が上昇しペレットの溶融を生じないこと。）	Cr被膜のクリープ特性が従来の被覆管材料（Zr合金）と異なることにより、Cr被膜が被覆管のクリープ強度に影響する可能性がある。	L~M:薄いCr被膜による被覆管全体の外向きのクリープ抑制が期待される。Zrよりもクリープしにくいcr被膜による被覆管全体の外向きのクリープ抑制が期待される。	L~M:Cr被膜による被覆管のクリープモデル（Cr被膜なし）への影響を定量的に確認するためには、試験データを取得する必要がある。	Cr被膜が被覆管のクリープを抑制する場合、Cr被膜の欠陥位置でクリープ変形が進む可能性がある。	M:Cr被膜の欠陥が局所的に発生し、その位置で局所的にクリープが進展する場合、影響が有意となる可能性がある。	M:Cr被膜の欠陥による局所的なクリープへの影響を定量的に確認するためには、試験データを取得する必要がある。
被覆管外面腐食による減肉 （通常運転時の酸化膜厚）	通常運転時において被覆管外面の腐食による被覆管母材部の減肉が進み，貫通性の損傷に至らないこと。	Cr被膜の耐食性が従来の被覆管材料（Zr合金）と異なることにより、Cr被膜が被覆管外面の耐食性に影響する可能性がある。 また、Crが溶出し放射化して被ばく評価に影響する可能性がある。	H:Cr被膜の従来材（Zr合金）よりも高い耐食性が期待される。 M:Crの溶出が有意である場合、被ばくが増加する方向になる可能性がある。	L~M:Cr被膜による耐食性の向上効果を定量的に確認するためには、試験データを取得する必要がある。 L~M:Cr被膜の溶出を定量的に把握するためには、試験データを取得する必要がある。	Cr被膜の欠陥位置で耐食性が低下し、腐食が局所的に進む可能性がある。	M:Cr被膜の欠陥位置で局所的に腐食が進展する場合には、被覆管の強度評価に影響する可能性がある。	L:Cr被膜の欠陥による局所的な耐食性への影響はデータ不足により不明であるため、試験データを取得する必要がある。
被覆管水素吸収	通常運転時の被覆管の水素吸収によって延性が大幅に低下し，通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時に想定される熱応力などの負荷に対して被覆管に貫通性の損傷が生じることがないこと。	Cr被膜の腐食に伴う水素発生及び水素吸収が従来の被覆管材料（Zr合金）と異なることにより、Cr被膜が被覆管の水素吸収に影響する可能性がある。また、Cr被膜により水素吸収率が変化し、腐食量に基づく水素吸収量の評価に影響する可能性がある。	H:Cr被膜の従来材（Zr合金）よりも高い耐食性により、水素発生及び吸収の抑制が期待される。	L~M:Cr被膜による腐食に伴う水素発生及び吸収の抑制効果を定量的に確認するためには、試験データを取得する必要がある。	Cr被膜の欠陥位置で耐食性が低下し、局所的に水素吸収が進む可能性がある。 また、はがれ位置の被覆管外面温度が低下することにより、局所的に水素が集積する可能性がある。	M:Cr被膜の欠陥位置で局所的に腐食及び水素吸収が進展する場合には、被覆管の強度評価に影響する可能性がある。	L:Cr被膜の欠陥による局所的な水素吸収への影響はデータ不足により不明であるため、試験データを取得する必要がある。
被覆管コラプス	外圧支配のクリープ変形が進み被覆管がコラプスしないこと。	Cr被膜のクリープ特性が従来の被覆管材料（Zr合金）と異なることにより、Cr被膜が被覆管のクリープ強度に影響する可能性がある。	L~M:薄いCr被膜による被覆管全体のクリープ強度への影響は軽微と予想されるが、ZrよりもクリープしにくいCrが被覆管全体のクリープを抑制する可能性もある。	L~M:Cr被膜による被覆管のクリープモデル（Cr被膜なし）への影響を定量的に確認するためには、試験データを取得する必要がある。	Cr被膜が被覆管のクリープを抑制する場合、Cr被膜の欠陥位置で局所的にクリープ変形が進む可能性がある。	M:Cr被膜の欠陥が局所的に発生し、その位置で局所的にクリープが進展する場合、影響が有意となる可能性がある。	M:Cr被膜の欠陥による局所的なクリープへの影響を定量的に確認するためには、試験データを取得する必要がある。
被覆管 フレッティング摩耗減肉	被覆管と接触する構成部材（グリッド）とのフレッティング摩耗で貫通性の損傷を生じないこと。 ・燃料の流動不安定振動が生じないこと。 ・通常の流動下での燃料棒，燃料集合体のランダムな振動による被覆管のフレッティング摩耗によって，寿命を通じて貫通性の損傷が生じないこと。	Cr被膜の耐摩耗性が従来の被覆管材料（Zr合金）と異なることにより、被覆管外面の耐摩耗性に影響する可能性がある。	H:Cr被膜の従来材（Zr合金）よりも高い耐摩耗性が期待される。	L~M:Cr被膜による耐摩耗性の向上効果を定量的に確認するためには、試験データを取得する必要がある。	Cr被膜がはがれた被覆管の基材が直接グリッドの被覆管支持部（スプリング、ディンプル）と触れる場合、Cr被膜による耐摩耗性が失われる可能性がある。 また、フレッティングがCr被膜のはがれを助長する可能性がある。	M:Cr被膜のはがれが十分に大きい場合、フレッティング摩耗が進展する可能性がある。 M:フレッティングがCr被膜のはがれを助長する可能性がある。	L:実際にCr被膜に生じ得るはがれの大きさを定量的に確認するためには、試験データを取得する必要がある。 L：フレッティングがCr被膜のはがれを助長するかどうかを確認するためには、試験データを取得する必要がある。
	燃料に混入した異物とのフレッティング摩耗によって，被覆管に貫通性の損傷が生じないこと。	Cr被膜の耐摩耗性が従来の被覆管材料（Zr合金）と異なることにより、被覆管外面の耐摩耗性に影響する可能性がある。	H:Cr被膜の従来材（Zr合金）よりも高い耐摩耗性が期待される。	L~M:Cr被膜による耐摩耗性の向上効果を定量的に確認するためには、試験データを取得する必要がある。	Cr被膜がはがれた被覆管の基材が直接グリッドやディンプルと触れる場合、Cr被膜による耐摩耗性が失われる可能性がある。	M:Cr被膜のはがれが十分に大きい場合、フレッティング摩耗が進展する可能性がある。	L:実際にCr被膜に生じ得るはがれの大きさを定量的に確認するためには、試験データを取得する必要がある。
被覆管の局所水素化による貫通性損傷 （製造要因による内外面水素化）	被覆管の内面又は外面から水素化物の析出と進展が生じ，それによって貫通性の損傷が生じないこと。	Cr被膜の局所的な水素吸収の要因が従来の被覆管材料（Zr合金）と異なることにより、被覆管の局所的な水素吸収について新たな要因が挙げられる可能性がある。（なお、被覆管内面についてはCr被膜がないため影響はないと考えられる。）	L:Cr被膜には、Zr合金へのNi付着による局所水素化のような懸念（知見）は見当たらない。	_	Cr被膜の欠陥位置で耐食性が低下し、局所的に水素吸収が進む可能性がある。 また、はがれ位置の被覆管外面温度が低下することにより、局所的に水素が集積する可能性がある。	M:Cr被膜の欠陥位置で局所的な水素吸収及び水素集積が進展する場合には、被覆管の強度評価に影響する可能性がある。	L:Cr被膜の欠陥による局所的な水素吸収及び水素集積への影響はデータ不足により不明であるため、試験データを取得する必要がある。

コーティング被覆管の個票（一部抜粋）

赤字：性能向上、下線：変更部分

PIRT 個票（No. PWR-コーティング被覆管-004）

記入日：2020/12/10		
運転状態：通常運転時（閉じ込め機能）		
損傷モード：化学的損傷		
損傷位置：被覆管外面		
評価項目：被覆管外面腐食による減肉(通常運転時の酸化膜厚)		
評価の考え方： 通常運転時において被覆管外面の腐食による被覆管母材部の減肉が進み，貫通性の損傷に至らないこと。 【波及的影響】 ・腐食に伴う Cr の溶出による水化学への影響 ・溶出 Cr の放射化に伴う被ばく評価への影響		
設計変更の燃料挙動に対する影響とその確認方法		
燃料挙動に影響する可能性	Cr 被膜の耐食性が従来の被覆管材料（Zr 合金）と異なることにより、Cr 被膜が被覆管外面の耐食性に影響する可能性がある。	
影響レベル *1	H：Cr 被膜の従来材（Zr 合金）よりも高い耐食性が期待される。	
知識レベル *2	L-M：Cr 被膜による耐食性の向上効果を定量的に確認するためには、試験データを取得する必要がある。	
確認方法	解析	・燃料棒ふるまい解析コード(FINE)
	試験	・オートクレーブ試験（未照射材） ・照射試験（試験炉照射、LTR）
	条件	・通常運転時条件（被覆管外面温度、試験時間）
	方針	従来材の試験結果（腐食増量、金相）と比較し、被覆管外面の腐食が低減することを確認する。 試験結果を解析モデルに反映し、被覆管外面腐食の低減効果を定量化する。
引用・参考	（なし）	
関連 No.	005	

*1 影響レベルの定義；
H： 影響が明確
M： 影響が有意となる可能性あり
L： 影響なし、または定性的に影響が軽微

*2 知識レベルの定義；
H： 評価モデル設定が可能
M： 影響評価は可能だが、データ拡充が必要
L： 評価に必要なデータが限定的

赤字：性能向上、下線：変更部分

PIRT 個票（No. PWR-コーティング被覆管-012）

記入日：2020/12/15		
運転状態：事故時(冷やす機能)		
損傷モード：熱的損傷		
損傷位置：被覆管外面		
評価項目：被覆管最高温度(PCT)、被覆管高温酸化量(ECR)		
評価の考え方： 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。		
設計変更の燃料挙動に対する影響とその確認方法		
燃料挙動に影響する可能性	Cr 被膜の高温蒸気による酸化反応が従来の被覆管材料（Zr 合金）と異なること、及び Cr-Zr 中間相の形成により、Cr 被膜が被覆管の脆化度合いに影響する可能性がある。また、Cr 被膜とグリッド材料との化学的相互作用により、急冷時に被覆管に生じる引張荷重に影響する可能性がある。	
影響レベル *1	H：Cr 被膜により高温蒸気に対する耐酸化性の向上、及び被覆管全体の脆化の抑制が期待される。 M：Cr-Zr 界面での中間相の形成により、被覆管が脆化する可能性がある。 M：Cr 被膜とグリッド材料との化学的相互作用により急冷時の引張荷重が増加する可能性がある。	
知識レベル *2	L-M：Cr 被膜によるの耐酸化性の向上効果、及び被覆管全体の脆化の抑制効果を定量的に確認するためには、試験データを取得する必要がある。 L-M：Cr-Zr 界面での中間相形成の有無、及びこれによる被覆管の脆化への影響を定量的に確認するためには、試験データを取得する必要がある。 L-M：Cr 被膜とグリッド材料との化学的相互作用の有無、及びこれによる引張荷重への影響を定量的に確認するためには、試験データを取得する必要がある。	
確認方法	解析	・PCT/ECR 評価
	試験	・LOCA 模擬試験（未照射材、試験炉/LTR 照射材）
	条件	・LOCA 模擬条件（PCT、保持時間、昇温速度、内圧、軸拘束力）
	方針	従来材の破損（折損）しきい値と比較し、従来材と同等かそれ以上であることを確認する。
引用・参考	（なし）	
関連 No.	014	

*1 影響レベルの定義；
H： 影響が明確
M： 影響が有意となる可能性あり
L： 影響なし、または定性的に影響が軽微

*2 知識レベルの定義；
H： 評価モデル設定が可能
M： 影響評価は可能だが、データ拡充が必要
L： 評価に必要なデータが限定

PIRTにより重要度高に分類した評価項目の個票（コーティング被覆管の個票検討例）

まとめ

- 原子力学会　炉心燃料分科会においては、2017年7月にATF検討WGを立ち上げ、ATF開発で先行する米国などの海外知見を取り込みながら、ATF導入に係る安全要件について検討を進めてきた。
- 原子力学会の技術レポート「発電用軽水型原子炉の炉心及び燃料の安全設計に関する報告書 第１分冊：炉心及び燃料の安全設計」を基礎として、ATF安全設計に必要な評価項目を抜け漏れなく抽出するための考え方、及びATF安全設計の評価項目の重要度を分類するための考え方を整理した。
- ここで整理した考え方は、現在国内で進められているATFの研究開発にも役立てられるものであり、今後、レポートにまとめる予定としている。
- ATF検討WGの活動は、ATF開発の観点からLUA検討WGとも相互に関連しており、今後も相互の論点を共有して活動内容にフィードバックしていく。

補足説明

ATF検討WGの活動内容

時期	これまでのATF検討WGの活動内容
2017～	● 事前検討、本WGの立ち上げ。
～2019	● 技術レポート（AESJ-SC-TR009）に基づいて、 PWR／BWRにATF被覆管を適用した場合の影響を整理。 ● 米国におけるATF開発（PIRT作成を含む）状況をフォロー。
～現在	● コーティング被覆管を先行例として、 技術レポート（AESJ-SC-TR-009）の展開表3に基づきPIRTを作成し、 重要な評価項目について個票を作成。 ● メールにて分科会レビューを実施。

燃料の安全機能の評価方法の現状整理（PWR、燃料棒）

運転状態	損傷モード	評価項目	最終の評価方法		
			燃料機械設計解析	燃料過渡応答解析（安全解析）	その他
通常運転時（閉込め機能）	機械的損傷	内圧	○		
		クリープコラプス	○		
		流動振動摩耗深さ			流水試験又は振動摩耗解析
	化学的損傷	腐食減肉	○		
		水素吸収	○		
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（PCMI，熱応力）	○		
		応力（水力振動）			曲げ応力解析
		PCI（SCC）			炉心局所出力解析
		DHC			出力急昇試験
		燃料エンタルピ（PCMI 破損）		○	
		燃料中心温度	○（定常）	○（非定常）	
		疲労	○（応力振幅）		累積損傷係数の算出
	熱的損傷	DNBR		○	
		燃料エンタルピ（高温融解）		○	
事故時（冷やす機能）	熱的損傷	被覆管温度，高温酸化量		○	
	機械的破損	燃料エンタルピ（機械的エネルギ）		○	
（被ばく評価用）	熱・機械的破損	被覆管高温膨れ及び破裂		○	
地震時（冷やす機能）	機械的損傷	応力			曲げ応力解析

*日本原子力学会標準委員会技術レポート
「発電用軽水型原子炉の炉心及び燃料の安全設計に関する報告書 第１分冊：炉心及び燃料の安全設計（AESJ-SC-TR009-1：2021）」（2022.3.30）

レベル2機能要求としての燃料への展開（展開表1）

基本的な要求事項 (FSF*1)		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		・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 ・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*2	・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	・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	・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	

*1 FSF：Fundamental Safety Function

*2 反応度投入事象時の燃料被覆管の貫通性損傷などによって、原子炉容器や炉心支持構造物に過大な変形又は貫通性の損傷の発生の防止を意味している。