

企画セッション | 部会・連絡会セッション：核燃料部会[標準委員会，標準委員会システム安全専門部会共催]

■ 2022年9月8日(木) 13:00～14:30 | 会場 E1棟2F 23番教室

[2D_PL] 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

座長：黒崎 健(京大)

[2D_PL01] 標準委員会挨拶

*成宮 祥介¹ (1. 標準委員会)

[2D_PL02] 炉心燃料の安全確保・向上に向けた体系的な活動

*阿部 弘亨¹ (1. 東大)

[2D_PL03] 炉心燃料の安全設計に関する技術レポート

*福田 龍¹ (1. MHI)

[2D_PL04] 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 (1. JAEA)

[2D_PL05] 商用炉先行照射（LUA）の導入に向けたワーキンググループ活動

*北島 庄一¹ (1. 電中研)

[2D_PL06] 総合討論

*成宮 祥介¹、阿部 弘亨²、福田 龍³、山下 真一郎⁴、北島 庄一⁵ (1. 標準委員会、2. 東大、3. MHI、4. JAEA、5. 電中研)

企画セッション | 部会・連絡会セッション | 核燃料部会[標準委員会, 標準委員会システム安全専門部会共催]

[2D_PL] 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

座長：黒崎 健 (京大)

2022年9月8日(木) 13:00 ~ 14:30 D会場 (E1棟2F 23番教室)

[2D_PL01]標準委員会挨拶

*成宮 祥介¹ (1. 標準委員会)

日本原子力学会標準委員会システム安全専門部会炉心燃料分科会では、炉心燃料の安全高度化に向けた体系的活動をすすめている。今回の核燃料部会企画セッションでは、炉心燃料分科会活動報告として、分科会活動の全体像、炉心燃料の安全設計に関する技術レポート、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、商用炉先行照射（LUA）の導入に向けたワーキンググループ活動などについて説明する。最後に、講演者全員と会場参加者で総合討論を行う。

核燃料部会セッション[標準委員会，標準委員会システム安全専門部会共催]

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 -

(2) 炉心燃料の安全確保・向上に向けた体系的な活動

(2) Activity on improved safety of fuel and core

炉心燃料分科会主査 *阿部 弘亨¹

¹ 東京大学

1. 標準委員会 システム安全専門部会 炉心燃料分科会の経緯と目的

炉心燃料分科会（以下、委員会。）は、標準委員会システム安全専門部会傘下の組織であり、炉心燃料の安全に係る標準作成を担っている。委員、常時参加者等を含めると、規制当局も含め産官学の幅広いステークホルダーからの燃料及び炉心の専門家約 40 名で構成されている。

委員会は、炉心安全の機能原則「止める、冷やす、閉じ込める」を出発点として、炉心及び燃料が担っている役割を明確にし、安全機能を確実にするための設計及び評価の方法を示し、安全設計に係る実施基準を策定する際の基礎資料を提供し、“炉心及び燃料が安全に設計されている”ことに対する十分な科学的根拠を提供することを目的としている。

2. 炉心燃料分科会の燃料安全に向けた取り組み

この目的の下、震災以前は、十分な安全性を確保しつつより高い経済性を達成することを目的とした炉心及び燃料の技術基準の策定を進め、先行少数体照射試験（いわゆる LUA）の基準の作成を目指していた。しかしながら、当時の指針や基準には、「炉心及び燃料が安全であること」に対する科学的な説明性が曖昧であったり、古い基準のためその根拠が良く分からなかったりするものがあった。さらに、ジルカロイのある破損モードに寄与する事象 A と B がある場合、厳しめに影響する事象 A を評価すれば良い、という思想に基づいていた。しかしこれはジルカロイでは成立するかもしれないが、改良材や新材料の適用を考えた場合には事象 A が厳しめに影響するとは限らない。故に、科学的な合理性と説明性を当時の指針及び基準類から導出することには限界があるとの認識に至った。

そこで委員会では、当時の指針や基準から一旦離れ、炉内における燃料の挙動と破損モードの全てをリスト化し、破損のメカニズムと条件、破損限界を一つ一つ整理していくこととした。これまで評価の対象になっていなかったようなモードも含め、漏れ欠けが無いよう全てをリスト化し、個々の破損限界を評価した。福島第一原子力発電所の事故による中断期間があったものの、国内外の規格基準、報告書や論文等を丁寧に精査し、時間をかけて整理し、委員会の構成員の代替わりも含めると 100 名弱の多くの研究者、技術者による議論を重ねた。その結果、2015 年に技術レポート「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」（2021 年には第一分冊改訂版発行）（以下、技術レポート。）を発行するに至った次第である。

上記の原則に基づいて燃料劣化や破損の情報を網羅的に整理したため、技術レポートの適用先は現行の燃料被覆管材料に限定されない。新材料の適用を考えた際にも、その材料に特有な現象の追加的評価を踏まえれば基本的に同じ基準で安全を考えることができる。策定当初は軽水炉用ジルコニウム系新材料を念頭に置いていたが、非ジルコニウム系新材料にも広く適用可能なものとなっている。

そこで、技術レポートを LUA に適用することを次のステップとした。LUA は新設計、新材料の実機適用を図るために必要な手段であるが、これまで国内での実績はほとんどなく主には海外炉での試験等に

基づいている。しかし、海外炉で大丈夫だから国内炉でも大丈夫という考え方は科学的な説明性には乏しいし、何よりも国産技術を育成するという戦略的視点で非常に弱い。委員会では、より安全な技術を国内で開発するためには、技術開発と実機による確認の両輪が確実に機能することが必須であると考え、現在 LUA の標準を作成中である。さらに、事故後に提案された事故耐性燃料（ATF）の開発においても、技術レポートで確立した安全の考え方を適用可能であることから、委員会では本技術レポートを基礎として、ATF への適用を図ることとした。

特に、ATF は現在、世界中の国やメーカーによる競争が激化している分野でもある。このような分野において原子力安全を確保するためには、学協会により客観的、網羅的かつ科学的な安全評価手法を策定し、さらに国内炉を用いた確認を行い、これに基づいた評価により安全性を確認する手段をとり、高い説明性を担保することを目指している。

3. 今回の企画について

炉心燃料分科会の活動はこのように日本の国情に合わせつつ時代の先端を行く燃料安全を模索している。今回の企画では、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」について報告し、現在検討中の先行少数体照射試験標準、事故耐性燃料に関する技術レポートの考え方を報告する。最新の燃料安全の考え方について学会の皆様と議論させていただきたい。

最後に、炉心燃料分科会では非常に多くの専門家にご参画いただき、ご意見を伺い、検討をお願いし、また執筆をお願いすることにより、質の高いレポートを完成させ、最先端の原子力技術への継続的な貢献を図っています。これは偏に、ボランティアな活動であるにも拘らず労を惜しまず御貢献をいただいた全ての方々の功績です。皆様に本稿をもって改めて感謝申し上げます。また本委員会への新規のご参加も歓迎しております。

参考文献

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（改訂版）（AESJ SC TR009 1:2021） ISBN 978 4 89047 440 0

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: (AESJ-SC-TR009: 2015)

第 1 分冊炉心及び燃料の安全設計 ISBN 978 4 89047 384 7

第 2 分冊核設計 ISBN 978 4 89047 385 4

第 3 分冊熱水力設計 ISBN 978 4 89047 386 1

* Hiroaki Abe¹

¹ The University of Tokyo

核燃料部会セッション[標準委員会，標準委員会システム安全専門部会共催]

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，

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

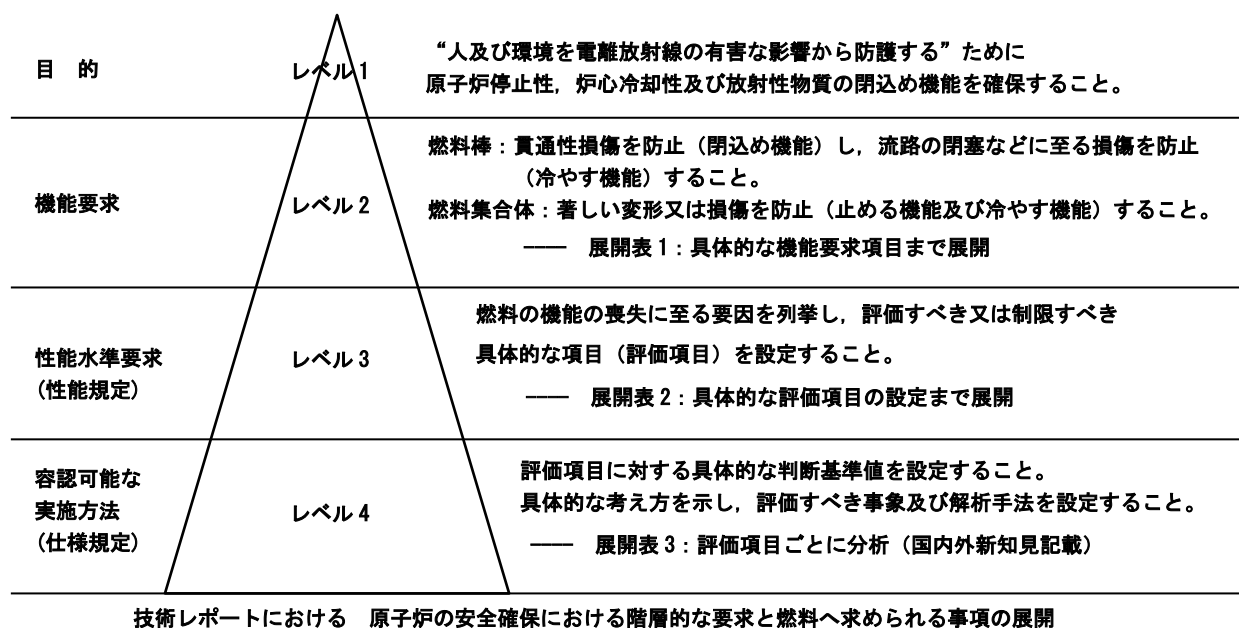
炉心燃料分科会では、2011 年 3 月の東北地方太平洋沖地震による福島第一原子力発電所事故の発生を踏まえ、炉心燃料に係る基本的要求指針、具体的要求指針、手引・技術規定等といった階層構造を技術ベースで体系的に整理する抜本的な安全への取り組みが重要とされた。この体系的な整理を目的として、炉心燃料分科会で 2012 年度頃から検討が継続されており、「発電用軽水型原子炉施設の炉心及び燃料の安全設計に関する報告書（AESJ-SC-TR009-1）」が 2015 年 10 月に、最初の改定版が 2022 年 3 月にが発刊されている。

2. 技術レポートの特徴

技術レポートは、主に安全要求の階層的・網羅的な展開、国内外の幅広い知見の収集と分析からなる。

2-1. 体系的階層的な安全要求事項の展開

それまでの燃料棒の閉じ込め機能に限定した検討から、機器は燃料集合体、チャンネルボックスまで、機能は止める（制御棒挿入経路確保）、冷やす（冷却流路の確保）、まで対象を広げた包含的な展開を行った。ここで、性能規定までは規制側、仕様規定以降は産業界との既成概念を撤廃して、IAEA の階層的な安全要求を参考に、レベル 1 の安全目的からレベル 4 の仕様規定（容認可能な実施方法）の一部までを可能な限り包含的に展開している。また設置変更許可申請における添付八章の安全設計と添付十章の安全評価との区分にあえてとらわれずに、その主旨から、通常運転時から設計基準事故時までの燃料のおかれた環境を踏まえ、主に米国の Standard Review Plan sec4.2 と IAEA の Nuclear Fuel Safety Criteria Technical Review を参考に、旧原子力安全委員会で策定された安全設計審査指針の中の安全設計審査指針、安全評価指針及び各種の個別の指針等を燃料安全に関連して包含し、より粒のそろった体系的な整理を完遂した。上位から下位の階層への要求展開では、網羅的な検討となるよう展開表 1 から展開表 3 を整備している。



* Ryo Fukuda, Mitsubishi Heavy Industries, Ltd,

- ・展開表 1：最も基本的な安全機能要求（止める、冷やす、閉じ込める）を燃料の構造に即してより具体化
- ・展開表 2：具体化した安全機能要求を具体的な評価すべき項目まで展開
- ・展開表 3：評価項目ごとの分析（具体的基準値設定の基本的考え、関連する知見・トピックスの収集など）

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 にて評価項目ごとに、燃料の安全確保に関する国内外の規制動向、運転経験、技術的な研究成果、民間規格等を調査した結果をもとに、留意すべき知見として記載している。過去に遡って収集した多数の情報を分析し、「燃料棒の多様な閉じ込め機能」「LOCA 後を含む事故時の燃料棒冷却維持」「集合体・チャンネルボックスの安全機能」の 3 分類に統合の下、国内で取り組むべき課題を明確にしている。PWR の例では、LOCA に関連する FFRD、デブリ閉塞や LOCA 後の材料劣化後の燃料耐震性の長期冷却の現象解明と安全余裕の定量化の目処付けが優先度が高く、レポート発刊と共に電共研等で集中的な検討を行ってきた。

2-3. その他の主要な記載事項

その他、燃料棒と燃料集合体の安全機能確保を評価する各種のコード、モデル等を燃料設計及び安全解析の現状の概要を主な入出力とともに整理し、評価すべき事象を炉内での核熱及び機械的な環境の変化に伴う物理現象から具体化している。現状の評価手法の全体像の理解の促進と技術・知識の伝承に努めている。

3. 技術レポートの第 1 回の改定の骨子

燃料安全の要求事項の展開については、照射燃料の地震時の放射性物質閉じ込め機能の要求を追加している。追加知見関連では、基本的に新規な項目は見いだせなかったが、初刊からの世界的な進捗状況の把握に努めるとともに、今後の解決すべき課題として FFRD の安全余裕の定量化及び燃料被覆管の機械的破損の評価手法の 2 点を抽出し、それぞれ多角的なアプローチによる検討の重要性・有効性を提言している。

また、付録として漏えい燃料の安全性について、特性と安全性評価の着眼点と見通しを体系的にまとめている。この中で、2 次水素化で過度に脆化した漏えい燃料被覆管に大 LOCA 時のような過大な熱衝撃力が作用する場合には、設計、安全評価にとどまらず、最近の運転中の漏えい燃料監視等の民間規格の充実も踏まえ、運転中の漏えい燃料発生の抑制管理も考慮した総合的な安全確保が合理的であることを提言している。

4. 技術レポートの今後の改定予定

今後も基本的に 5 年ごとに更新を行っていくが、都度、追加知見の収集と分析に努めるとともに、国内における安全性の向上への取り組みの進捗を示していくことが重要と考えている。これに加えて、これまでの安全要求と関連知見の分析は炉内の DBA に限定していたが、今後は炉心損傷に至る前の BDBA や使用済みピットにおける燃料安全の考え方と要求等を、新知見も盛り込みながら対象に広げていく予定である。

5. 技術レポートの広範な活用への期待

技術レポートは定期的な更新にとどまらず以下の幅広い活用が期待でき、分科会でも実践していく。また技術レポートを、燃料の安全高度化ロードマップと近年目覚ましい充実ぶりの炉心燃料の管理に関する民間規格類と合わせて定期的に見直しを行っていくことで、燃料安全の着実な向上に結び付くものと考えられる。

・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。

核燃料部会セッション[標準委員会、標準委員会システム安全専門部会共催]

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 -

(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

(4) Activity on accident tolerance fuels (ATF)

*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 日本原子力研究開発機構, ² 東京大学, ³ 三菱原子燃料, ⁴ 原子燃料工業, ⁵ 日本核燃料開発,

⁶ グローバル・ニュークリア・フュエル・ジャパン, ⁷ 日立 GE ニュークリア・エナジー

1. ATF 検討ワーキンググループ設立の経緯と目的

2011 年 3 月に発生した東京電力福島第一原子力発電所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いる。海外では、米国を中心に商用炉を用いた ATF の先行照射試験が開始されている中、国内においても早期実用化を目指して複数の ATF の開発が原子炉・原子燃料メーカーを中心に精力的に進められている。そのような状況下において、本ワーキンググループ (WG) は、ATF 導入に関する安全要件について整理することを目的に、国内で ATF 開発に関わりを持つ学識経験者、官民の研究機関、原子炉・原子燃料メーカーからの構成員で設立された。ATF 検討 WG の活動は、事前検討が 2017 年 7 月から開始され、安全性確認の考え方の整理に向けて検討を進めている。

2. WG の具体的な活動

2-1. 検討の基本方針

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。一方で、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 (燃料安全に係る要件) 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を検討し整理する過程においては、軽水炉燃料の安全設計の考え方が体系的に整理されている、日本原子力学会標準委員会の技術レポート (AESJ-SC-TR009-1: 2021) を土台とすることで、考え方の整理・検討を合理的かつ効率的に進めることとした。

2-2. 具体的な検討内容

先ず初めに、軽水炉燃料に対して想定しうる種々の機械的、化学的作用が網羅的に整理されている上述の技術レポートの表 4.1-1 及び表 4.1-2 (燃料の安全機能の評価方法の現状整理) を活用し、これらの表に ATF として国内で開発が進められている、コーティング被覆管、FeCrAl 被覆管、SiC (チャンネルボックス含む) 等を当てはめた場合の過不足を検討 (新規試験の実施の必要性等も考慮) することから始めた。

次に、技術レポートの表 3.2-2(1)～表 3.2-2(5) (展開表 2) (運転状態と対応付けた機能要求の性能水準要求への展開) について、従来材であるジルコニウム合金被覆管とは異なる ATF (FeCrAl 被覆管、SiC 被覆管) への適用性を検討した。検討の結果、燃料の機能要求のうち、“閉じ込める” については、金属でない SiC 被覆管について追加項目が必要となるが、“冷やす”、“止める” はほぼ一般的な記載になっていることが確認できた。また、ATF 安全設計に必要な評価項目を抜け漏れなく抽出することを目指し、新設計 (改良) 燃料

*Shinichiro Yamashita¹, Hiroaki Abe², Daiki Sato³, Masao Owaki⁴, Kan Sakamoto⁵, Kazuyuki Kusagaya⁶, Akiyuki Tsuchiya⁷

¹ Japan Atomic Energy Agency, ² Tokyo Uni., ³ Mitsubishi Nuclear Fuel Co., Ltd., ⁴ Nuclear Fuel Industries, Ltd., ⁵ Nippon Nuclear Fuel Development Co., Ltd., ⁶ Global Nuclear Fuel - Japan Co, Ltd., ⁷ Hitachi-GE Nuclear Energy, Ltd.

において考慮すべき材料特性や照射挙動について、展開表 2 との繋がりを確認しながら適切な記載内容の追記を進めた。

ATF 開発で先行する米国、国際原子力機関（IAEA）や経済協力開発機構／原子力機関（OECD/NEA）等からは、ATF 開発に関する様々なレポートが公開されている。本 WG の検討においては、ATF の中でも比較的事実化の時期が近いと期待され、数多くのレポートが公開されているコーティング被覆管を対象に、技術レポートの表 4.2-2（展開表 3）（燃料安全要求事項の仕様規定への展開のための整理）に基づいて事象を特定するための重要事象ランキングテーブル（PIRT：Phenomena Identification and Ranking Table）作成の考え方を整理した。

表 1 に、コーティング被覆管を対象として PIRT を検討した時の、ATF 安全設計の重要度分類表（燃料棒閉込め機能（1）：通常運転時）を一例として示す。考慮すべき事象として、「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」や「燃料被覆管外面の Cr コーティングの欠陥が燃料挙動に影響する可能性」（表 1 中の赤字箇所）や性能向上要素（赤字箇所）を追記のほか、米国レポートの PIRT 等を参考に知見の追記と差分確認を行った。また、3 段階で評価・分類した重要度について、重要度が高いと判断した評価項目について、図 1 に示すような個票を作成し、知識レベル拡充のための方法（解析、試験、設定条件、方針等）を整理した。

ここで作成した PIRT 及び個票については、①3 段階（H/M/L）で重要度を分類する考え方に不明な点はないか、②知識レベルに関連して考慮すべき知見に漏れはないか、③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、④追加すべき評価項目（新たな破損モード）はないか、等の観点で炉心燃料分科会のメンバーによりレビューがなされている。

3. まとめ

2017 年 7 月に活動を開始した、ATF 検討 WG では、ATF 開発が先行する米国等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。検討においては、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」を土台として、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。また、ATF 検討 WG の活動は、ATF 開発の観点から LUA 検討 WG と相互に関連しており、今後も引き続き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予定である。

表1 技術レポート展開表3*に基づくATF安全設計の重要度分類表 (コーティング被覆管のPIRT検討例)

*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」(2015年)
(一部転載の上、加筆)

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、EOCS 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 被覆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 被覆が被覆管の脆化度合いに影響する可能性がある。また、Cr 被覆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 被覆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。 L: Cr 被覆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 被覆による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 被覆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

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-005)

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: 被覆管全体
評価項目: 被覆管水素吸収	評価の考え方: 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酸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。
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 被覆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 被覆が被覆管の水素吸収に影響する可能性がある。また、Cr 被覆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。
影響レベル *1	H: Cr 被覆の従来材 (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。
知識レベル *2	L-M: Cr 被覆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。
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(水素吸収量/率、機械特性)と比較し、水素吸収率が従来材と同等かそれ以下であること、水素吸収量が従来材よりも低いことを確認する。
引用・参考 (なし)	
関連 No.	004

*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

図 1 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)

核燃料部会セッション[標準委員会, 標準委員会システム安全専門部会共催]

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 -

(5) 商用炉先行照射 (LUA) の導入に向けたワーキンググループ活動

(5) Activity on lead use assemblies (LUA)

*北島 庄一¹, 阿部 弘亨², 山内 景介³, 原田 健一⁴, 尾家 隆司⁵, 福田 龍⁶,
村上 望⁷, 佐藤 大樹⁸, 久保 雄一郎⁹, 金子 浩久¹⁰

¹電力中央研究所, ²東京大学, ³東京電力 HD, ⁴中部電力, ⁵関西電力, ⁶三菱重工業,
⁷三菱重工業, ⁸三菱原子燃料, ⁹原子燃料工業, ¹⁰グローバル・ニュークリア・フュエル・ジャパン

1. 商用炉先行照射に関する標準/指針作成の経緯

炉心燃料分科会では商用炉先行照射の導入に係る標準の作成を進めていたが、炉心燃料に対する基本的要求指針、具体的要求指針等の階層構造を技術ベースで体系的に整理することが先決であると判断して、標準の作成を中断していた。この体系的な整理については、「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-TR009-1:2021)」に最新の検討結果がまとめられた。

福島第一原子力発電所事故以降、国内の新燃料設計の導入は進んでおらず、世界標準からの遅れを早急に取り戻すことが望まれている。一方、世界中で事故耐性燃料 (ATF) の開発が積極的に進められており、近い将来、これらを国内の原子力発電所に導入することも視野に入れる必要がある。このような状況で、幅広い開発レベルの新設計燃料を対象とした商用炉先行照射の活用方策を検討することが望まれている。

また、国内外の試験炉の廃炉が相次いでおり、これまで海外商用炉で実施してきた先行照射も将来的な利用については不透明な部分があり、国内の商用炉先行照射の役割を広げることも考えなければならない。

2. 商用炉先行照射に関する標準/指針の骨子

炉心燃料分科会ではワーキンググループ活動を通じ、商用炉先行照射を有効に活用する実施手順を検討し、課題について議論を重ねてきた。標準/指針の完成には至っていないが、現状の検討結果の概要を以下に示す。

2-1. 商用炉先行照射の位置づけ

国内の原子力発電所に新技術を導入して発電所を運転するにあたっては、事前に想定されるリスクを排除することが必要であり、新技術の工学的安全性を確認した後に導入することが重要である。これまでの新設計燃料の導入では、本格的な導入の前に国内の商用炉先行照射 (LTR/LUA) を経た事例があるが、LTR/LUA を実施する判断基準や実施プロセスが明確ではないため、基準適合性を示すために本格導入と同様の許認可取得を行った。将来の LTR/LUA 審査に備えて、具体的にどこまでのデータ取得が必要であり、安全設計及び安全評価が必要となるのかを明確にすることが、新設計燃料の速やかな導入による継続的な安全性向上を促進するために必要であると考えている。新設計燃料には、構成部材の材料や構造を一部変更する軽微変更から、機能要求を見直すような大幅変更まで存在する。新設計の内容とその技術的達成度合い、さらには LTR/LUA のリスクの程度によって、LTR/LUA を実施する判断基準や導入プロセスは異なるものとして、技

*Shoichi Kitajima¹, Hiroaki Abe², Keisuke Yamauchi³, Kenichi Harada⁴, Takashi Oka⁵, Ryo Fukuda⁶, Daiki Sato⁷, Nozomu Murakami⁸, Yuichiro Kubo⁹, Hirohisa Kaneko¹⁰

¹Central Research Institute of Electric Power Industry, ²Tokyo Uni., ³Tokyo Electric Power Company Holdings, Incorporated, ⁴Chubu Electric Power Co., Inc., ⁵Kansai Electric Power Co., Inc., ⁶Mitsubishi Heavy Industries, Ltd, ⁷Mitsubishi Heavy Industries, Ltd,

⁸Mitsubishi Nuclear Fuel Co., Ltd., ⁹Nuclear Fuel Industries, Ltd., ¹⁰Global Nuclear Fuel - Japan Co, Ltd

術的な考え方を定めることが望ましいと考えている。

2-2. 商用炉先行照射で取得するデータ

新設計燃料の安全性や信頼性を確認するため、一般的に商用炉での使用に先立ち、未照射材による試験や試験炉等での試験が行われる。これらの試験では、商用炉における使用環境（温度、圧力、出力等の照射条件及び構造体系）と完全に一致させることは難しい。このため、原子力発電所の安全性を損なわない範囲で、商用炉環境での照射実績を積み重ねることにより、新設計燃料の安全性・信頼性をより確かなものとする。

商用炉環境での照射により取得することが有効なデータを以下に例示する。

燃料ペレット：結晶構造変化、FP 分布状態、寸法変化、被覆管癒着等の熱・化学的相互作用

被覆管：表面腐食、水素吸収の化学的作用、寸法変化、照射後の機械特性

燃料棒：FP ガス放出に伴う燃料棒内圧変化、ペレットと被覆管の機械的相互作用による外径変化

燃料集合体：燃焼集合体の伸び・曲がり・寸法変化、ばね要素等の照射による応力緩和

2-3. 商用炉先行照射の安全性確認

商用炉先行照射に先立ち、LTR/LUA の炉内使用条件（炉内装荷体数、装荷位置、装荷期間等）に基づいた安全評価を実施し、確認すべき全ての評価項目に対する判断基準を満足することが必要である。安全評価に当たっては、既認可燃料の仕様から変更のない設計項目に対する合理的な評価、LTR/LUA の仕様、炉内使用条件、照射計画等を踏まえた上での既存データに基づく合理的な範囲における外挿のような実証データに頼らない設計評価等も行うことができる。安全評価における一般的な評価項目は前述の技術レポート記載の展開表 2 に基づいて決定し、LTR/LUA で新たに採用する設計改良内容ごとの着目すべき個別の評価項目の特定に際しては重要度ランクテーブル（PIRT）などを活用できるが、さらに、LTR/LUA において抜本的材料変更等を行う場合には原子力安全を達成するための機能要求（レベル 2）に立ち返った上での評価項目の特定が必要となる。

商用炉先行照射中は、基本的な安全機能維持を確認することが重要となる。運転中の冷却水中放射性物質濃度監視による閉じ込め機能維持の確認、定期検査中の制御棒挿入時間の測定による停止機能維持の確認、運転中の炉心出口冷却材温度分布の測定による冷却形状維持機能の確認等が事例として挙げられる。

2-4. 商用炉先行照射の継続/中止の判断

商用炉先行照射中又は照射後に、基本的安全機能の維持に係る異常、燃料集合体/燃料棒の特異な寸法変化、燃料集合体/燃料棒の外観異常の発生等を検知し、安全への影響を鑑み、次サイクル以降の継続照射を判断する。基本的安全機能に異常が生じた場合は、当該燃料は次サイクル以降の継続照射を中断し、原因究明と対策を検討する。一方、その他の先行照射燃料については、安全が確保できると判断される場合は継続照射の選択肢も検討する。定期検査中に寸法変化に異常が確認された場合は、前サイクルからの変動等を考慮して次サイクル末までの予測評価を行い、次サイクル末で予測値が制限値を下回ることなどが十分な信頼性をもって評価されれば、次サイクル以降の継続照射の選択肢もあり得る。

2-5. 許認可対応

商用炉先行照射の許認可手続きは、現行の法体系に基づく許認可取得を基本と考えるが、過度の許認可の負担は速やかな新設計燃料の導入を妨げ、結果的に継続的な安全性向上を疎かにする事になりかねない。トピカルレポート（TR）、型式証明（DC）等の制度を十分に活用するなどして、許認可の負担を合理的に軽減することが肝心である。将来的には、米国のような取替炉心ごとの安全性確認及び運転中の安全確認にシフトすることが現実的かつ合理的であるが、法律の一部改訂が必要になると考えられる。

また、これまでは炉心運用高度化の時期に合わせて新設計燃料を開発し、総合的な設置変更許可を取得するのが一般的であった。これからは、炉心運用高度化と切り離れた時期に高い安全性を有した新設計燃料を導入することなども選択肢の一つとして考えられ、より一層の許認可の合理化が望まれる。

企画セッション | 部会・連絡会セッション | 核燃料部会[標準委員会, 標準委員会システム安全専門部会共催]

[2D_PL] 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

座長：黒崎 健 (京大)

2022年9月8日(木) 13:00 ~ 14:30 D会場 (E1棟2F 23番教室)

[2D_PL06]総合討論

*成宮 祥介¹、阿部 弘亨²、福田 龍³、山下 真一郎⁴、北島 庄一⁵ (1. 標準委員会、2. 東大、3. MHI、4. JAEA、5. 電中研)

日本原子力学会標準委員会システム安全専門部会炉心燃料分科会では、炉心燃料の安全高度化に向けた体系的活動をすすめている。今回の核燃料部会企画セッションでは、炉心燃料分科会活動報告として、分科会活動の全体像、炉心燃料の安全設計に関する技術レポート、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、商用炉先行照射（LUA）の導入に向けたワーキンググループ活動などについて説明する。最後に、講演者全員と会場参加者で総合討論を行う。