

核燃料部会セッション
「ワーキンググループ(SWG2)活動報告」

「燃料溶融事故を踏まえた
軽水炉燃料に係る研究課題検討」
サブワーキンググループ活動報告

東京大学 鈴木晶大

背景

福島第一原子力発電所事故により、

- ・1F廃止措置の安全性確保、効率(迅速)化
 - ・軽水炉の徹底的な安全確保
 - ・核燃料サイクルの柔軟性確保
- が必要であると議論されている。

核燃料分野においても、これらの議論を踏まえ、

- ・既存安全対策について基本に立ち戻っての確認と向上
- ・1F燃料回収とシビアアクシデント時燃料挙動
- ・抜本的な安全対策
- ・周辺環境に応じた分野横断的な安全向上への取り組み

が必要とされている。

燃料溶融事故を踏まえた 軽水炉燃料に係る研究課題検討

- ・既存安全対策について基本に立ち戻っての確認と向上
- ・1F燃料回収とシビアアクシデント時燃料挙動
- ・抜本的な安全対策
- ・周辺環境に応じた分野横断的な安全向上への取り組み

について以下の4分野に分けて検討を行った。

- 1、通常運転時、異常過渡時、事故時における安全性向上
- 2、1F燃料挙動とSA対策
- 3、新材料開発
- 4、超長期貯蔵時の燃料挙動

1、通常運転～異常過渡、事故時における安全性向上

課題検討における現状認識：

現行安全基準：多くは1960～70年代に策定。データベースはZry2/4+UO₂、未照射材料を主体に～40GWd/t程度までの燃焼度

現在までの推移

燃料の主たる変化

- ・新材料(主に被覆管)
- ・MOX燃料使用(主に欧州)
- ・80年代以降の高燃焼度化

炉心等の変化

- ・炉心の不均一化
- 低/高燃焼度の混在・近接
- 異なる設計燃料の混在

⇒上記推移にあわせ、必要な炉外および炉内・照射データ取得/評価ツール高度化を継続的に実施してきている。

⇒福島第一原子力発電所事故を受けて、更なる安全性/堅牢性の向上(また、その基礎となる予測性/模擬性の向上)が必須

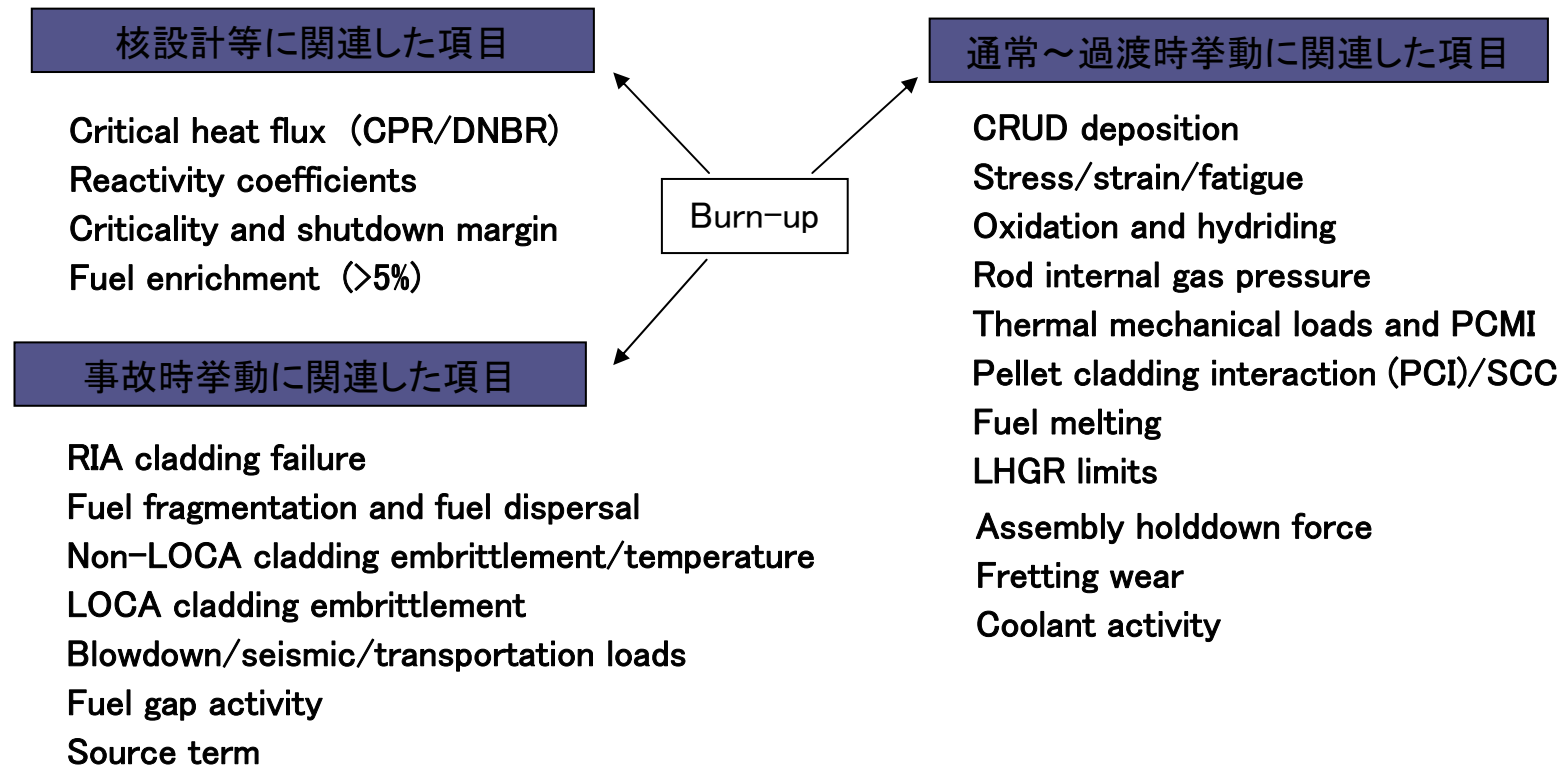


基本に立ち返って燃料(安全)に関する課題整理と抽出が必要

課題検討と抽出：OECD/NEAによる燃料安全基準レビュー作業@2012

国際的な動向を調査する目的も含めて、まず**安全基準に関するOECD/NEAによるレビューレポート(1996-2001年作業後、2012年に改訂版発行)**を参考のため調査(継続中)。

NEAでは、燃料安全基準の技術的基礎に関する再評価と高燃焼度、新または改良設計・材料に対する適用性をレビューするWorking Group活動を実施(日本からはJNES/JAEA参加)。事象を通常～事故とのカテゴリー分けせず、下記の項目について整理している。



課題検討と抽出：OECD/NEAによる燃料安全基準レビュー作業@2012

NEAによるレビュー例：Burn-up（高燃焼度化）

Fuel Cycle Cost低減のため、1980年代以降高燃焼度化が進められた結果

- ・ 被覆管腐食増大 ⇒ 水素による延性低下
⇒ 新Zr合金の導入、合金の改良 ⇒ 安全/設計基準の満足性
- ・ FPガス放出増大 ⇒ 安全評価(RIA/LOCA)への影響確認必要
- ・ PCMI増大懸念

一方で、

- ・ 高燃焼度化への要求は緩和(長サイクル化→低燃焼度取出し増加、再処理前提の仏での対応は～52GWd/t上限)
- ・ 水素化による被覆管延性低下懸念の新被覆管材料導入による解消傾向、高燃焼度出力急昇試験での非破損事例(PWR)、といった当初の技術課題の変化も存在

- ⇒
- ・ 水素については局所化/配向など分布の影響評価の重要性が増しており、延性低下による1%歪懸念は逆に新材料での緩和との方向性に興味に変化
 - ・ 内面酸化の影響評価(PCI/膨れ破裂後挙動等へ)の必要性
 - ・ MOX挙動(高燃焼度FGガス放出)データ拡充

等

通常運転時、異常過渡時、事故時に関する現状での課題整理

更なる安全性・堅牢性の向上を図る上での課題：

- ✓ 継続的な材料開発や技術開発による改良燃料の導入
- ✓ 最新知見を反映した規制・基準の適切な見直し
- ✓ 規制・基準の合理性/信頼性の向上

OECD/NEAのレビュー結果を参考とし、国内の状況を鑑みて課題抽出作業を実施中。

通常運転時～異常過渡時に関する現状での課題整理と抽出状況

具体的な課題の検討例

- **被覆管の水素化による延性低下(水素脆化)に関する課題解決**
 - 水素脆化による潜在的リスクを低減、回避するための水素吸収低減改良被覆管の開発(炉外、炉内試験)
 - 延性低下した被覆管の安全性、堅牢性を合理的に説明するために必要となる破損評価クライテリアの再構築、並びに再構築に必要なデータ収集及びデータ評価
- **事故時評価の信頼性向上に向けた通常時燃料挙動(内圧,材料特性,寸法等)に関する継続的なデータ拡充および予測精度/手法の高度化と影響評価確認**
- **改良燃料に関するPCI破損データ拡充、評価手法高度化、基準/許認可の適正化**
- **水質環境/CRUDの燃料挙動への影響評価データ拡充/予測精度向上、ガイドライン作成**
- **リーク対応の高度化・標準化**
- **新技術導入手法確立(LTA(Lead Test Assembly)等)**

事故時燃料挙動に関する課題検討

(設計基準事故(DBA)について)

反応度事故(RIA)及び冷却材喪失事故(LOCA)時の燃料挙動に係る種々の模擬実験や炉外での個別効果実験等により、事故時の燃料挙動評価に必要なデータ及び知見が蓄積。しかしながら、原子炉施設の事故時安全性をさらに向上させる観点で、燃料分野として今後以下のような課題に取り組む必要がある。

RIA時及びLOCA時の燃料挙動に共通する課題

- ・ データ及び知見のさらなる拡充
 - 燃焼に伴う材料劣化（照射効果、被覆管の水素化等）が及ぼす影響
 - ペレットからのFPガス放出、温度上昇に伴う燃料の熱機械的变化の影響
 - 従来の材料に比べ腐食量や水素吸収量が少ないとされる被覆材(改良合金 被覆管等)や製造時微細組織を変更した燃料ペレットの影響
- ・ 挙動解析コード等の整備、挙動解析評価手法の高度化
 - 燃料材料に関する種々の物性等のデータベース更新及び不足データの追加取得
 - 実験結果の再現性をより高める解析モデルの構築
 - 計算によるシミュレーション技術開発
- ・ 実験技術の維持
 - 試験施設(NSRR等の試験用原子炉、ホットラボ施設等)の維持
 - 実験技術レベルの維持及び新規技術開発に必要な人材の確保

など

事故時燃料挙動に関する課題検討

個別の課題

- ・ RIA時の燃料挙動に関連して、
 - 現在燃焼度のみの関数で定められているPCMI破損しきい値（安全基準）の高度化（例：腐食や水素吸収を考慮した指標の導入）
 - 破損に伴う燃料放出による圧力バウンダリへの影響評価
 - ペレットの融点低下に及ぼす燃焼度の影響の確認
- ・ LOCA時の燃料挙動に関連して、
 - 燃料棒内でのペレット移動及び燃料棒からの放出挙動
 - LOCA後の燃料の長期冷却性及び健全性の維持に関する考え方、評価手法及びそれらの構築に必要な試験の実施

など

その他の課題

- ・ ECCS性能評価基準である1200°C、15%ECRを超える状態（DBAとシビアアクシデントの狭間）での燃料材料の挙動評価、その評価に必要な物性等の基礎データの取得
- ・ DBAの範囲内でも、不足しているデータがないかの再確認

など

2、1F燃料挙動とSA対策

1F廃止措置に向けた課題

- **燃料デブリ取り出しを効率的に進めるため、事故進展シナリオの評価による炉内状況の推定、および燃料デブリの特性および性状の推定が重要。このために、以下が必要。**
 - **燃料溶融事象に関する既往研究の調査と整理**
 - **福島第一発電所事故特有の条件(B_4C 制御棒の溶融挙動、海水注入、長い事象継続時間、溶融燃料とコンクリートとの反応など)を踏まえた燃料破損・溶融試験や熱力学的解析など**
- **これらの推定結果は、燃料デブリ取り出しに先立って実施される可能性があるサンプル分析によって検証され、また、サンプル分析結果を内外挿して炉内状況を推定する際にも用いられる。**

SA対策の高度化に向けた課題

- SA対策に事故の経験を活かしてゆくためには、**1F事故における事象進展の解明を進め、SAに関する現象の理解を進めることが重要。**
- そのためには、TMI-2の例に見るように、以下を進める必要。
 - **遠隔操作によるサンプリングと分析、溶融物質生成過程の評価**
 - **上記を効率的に進めるためのインフラ整備(燃料デブリサンプルの分析施設の現地整備または円滑なサンプル輸送手段の整備など)**
 - **関係機関による分析結果の共有、分野横断研究の実施**
 - **国際協力体制の構築**
 - **SA対策の有効性を検討するためのツールであるSA解析コードの検証と改良**

SA対策の高度化に向けた課題

- SA対策の強化に伴い、1F事故における現象の理解に加えて、軽水炉の各種炉型に対して、SAの各現象の理解の深化、現象のモデリングと解析コードの高度化が重要。
- そのためには、次の燃料・材料の化学的挙動について理解を深め、炉内外試験およびモデリングを行うことが必要。
 - 溶融前の燃料破損とペレット分散挙動、FP放出挙動(特に高燃焼度)
 - 制御棒崩落挙動
 - ステンレス、ジルカロイ、制御材、燃料等の材料間の反応の進展挙動(雰囲気の影響など)
 - 溶融プールの成層化挙動およびFP放出挙動(雰囲気の影響、溶融コリウムの組成の影響など)
 - 溶融コリウム-コンクリート反応(広がり方、ガス発生量(H_2 , CO , CO_2)、反応速度、冷却性、雰囲気の影響、溶融コリウムの組成の影響など)
- 上記の他、格納容器の損傷防止対策や使用済燃料貯蔵プールにおける燃料損傷防止などに関しても、対策の有効性実証や現象解明のための課題あり

3、新材料に係る研究課題検討

燃料被覆材の開発状況

材料特性		ジルカロイ	ステンレス鋼	Ni基合金	Ti合金	Nb合金	V合金	SiC
核特性	中性子経済性	◎	△	×	×	△	×	◎
	放射化	○	△	△	◎	△	◎	○
力学特性	強度	○	○	○	○	×	△	◎
	靱性	○	○	○	◎	○	○	×
照射特性		○	○	△	△	△	△	△
腐食特性 (運転時)		◎	○	○	○	△	△	△
水反応による 水素発生と発熱 (1200°C以上)		×	×	×	△	△	△	◎
実炉実績		◎	○	—	—	—	—	—

◎:非常に優れている、○:優れている、△:改良の必要あり、×:劣っている

開発状況のまとめ

ジルカロイは現行軽水炉に用いられ、実績や各種特性は優れているが、水蒸気との反応により水素を発生する

「水素発生と酸化発熱の有無」が材料選定基準としてクローズアップ

ステンレス鋼は、中性子経済性が劣り高温強度がやや不足しているものの、SBO時に水蒸気反応までの時間がやや稼げ、軽水炉条件での実績がある。

Ni基合金は中性子経済性の点で利用は難しい

Ti合金は代替候補材として検討する価値はあるが、中性子経済性に難点がある

Nb合金は強度が不足しており、利用は難しい

V合金は中性子経済性が劣り、強度がやや劣るため利用は難しい

SiCは韌性が不足しているが、その他の性質は優れている

SiCの特徴

<利点>

溶融温度が高い(2730°C)

異常時の緩やかな温度応答

SiC比熱: $690\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$

ジルカロイ比熱: $288\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$

中性子経済性に優れている

高温での強度に優れている

水反応による水素発生は起こさない

<欠点>

韌性が不足している

SiC被覆材の国内外での研究動向

未照射SiCの開発（ORNLによる検討）

高温水蒸気中によるSiCの腐食試験結果により、SiCの高温水蒸気中（800～1400℃）の酸化反応はZr合金と比較して低いことを解明

SiC/SiC複合材料の開発

脆弱なSiCセラミックスに高強度・高剛性のSiC長繊維を複合化させることで、靱性・信頼性が向上。ただし、複合プロセスに応じて高温水腐食が変化
EPRIではチャンネルとしても有望な材料として提案

今後の課題

被覆管の封じ切り、気密性確保、高温水腐食に弱いC界面制御が開発課題

軽水炉条件での照射特性データの取得が必要

高温における熱伝導、電気伝導が基礎特性データとして必要

再処理をするとした場合、それをどうすすめるか、検討が必要

最終的には集合体に組み上げることを前提とした加工性をどう確保するか

SiCは比較的遠い将来を見据えた新材料

これ以外にも、実炉での使用実績を踏まえて、**近い将来を見据えた新材料として、酸化発熱を抑えた改良SUS等**も代替候補材として検討が必要

4、超長期貯蔵時の燃料挙動

金属キャスク等の金属製の容器に使用済燃料を装荷して貯蔵する乾式貯蔵方式が世界的に主流になりつつある。日本では40～60年*程度の乾式貯蔵期間を想定しているが、この貯蔵期間を超える超長期貯蔵(IAEAや米国等では、100年を超える貯蔵を検討)を考えた場合に、検討が必要である。

➤評価ツールの概要

・乾式貯蔵中の燃料被覆管健全性に影響を与える現象

○被覆管のクリープ

○水素を原因とする機械特性の劣化

超長期貯蔵では被覆管温度が低下

⇒水素を原因とする燃料被覆管健全性への影響評価が必要

⇒貯蔵後の使用済燃料の取り扱い中・輸送中の落下事故時の衝撃評価が必要

➤データベースの概要

・日本では超長期貯蔵の評価ツールに利用できるデータは未整備

・100年以上貯蔵する場合の乾式貯蔵システムの健全性に関する海外の動向

○米国の長期貯蔵研究プログラム(ESCP)で検討開始

*「金属製乾式キャスクを用いる使用済燃料中間貯蔵施設のための安全審査指針」、平成14年10月、原子力安全委員会

➤ 水素影響評価

- ・現在想定されている貯蔵期間に関しては、燃料被覆管の温度、フープ応力及び冷却速度をパラメータに、水素化物の再配向や被覆管機械特性データが整備されている。

⇒これに基づいて、使用済燃料の貯蔵中・取り扱い中の温度やフープ応力に制限を設けて、固容水素が水素化物として析出する時の再配向の影響を低減化している。

超長期貯蔵で燃料温度が大きく低下した場合

⇒水素脆化や水素化物による被覆管の経年変化を考慮したモデル、これを用いた輸送・貯蔵容器の落下時等、装荷燃料にかかる荷重の衝撃解析が必要



経年変化モデルに使用するために、燃料温度が大きく低下した場合を模擬し、水素脆化や水素化物のデータの取得・整備が必要

4、超長期貯蔵時の燃料挙動

➤ 検討課題

- ・経年変化の影響を考慮した燃料被覆管健全性評価ツールが必要である。
また、健全性評価で必要となるデータ取得のために加速試験を実施する場合には、加速因子の妥当性について検討が必要である。
- ・貯蔵期間が超長期まで拡大することにより、これまで考慮の必要が無かったリスク評価が必要になる可能性がある(例えば自然外部事象による外力負荷時の燃料棒健全性データ等)。
- ・現在、乾式貯蔵は健全燃料(漏洩無し、部材の変形無し)のみが可能であるが、破損燃料や乾式貯蔵中・取り扱い中の温度やフープ応力が許容の条件を逸脱した使用済燃料の取り扱いについては検討が必要である。
- ・使用済燃料の健全性を検査・モニタリングする技術の開発が必要である。

まとめ

・通常運転時、異常過渡時、事故時における安全性向上

- ・OECD/NEAによるレビューレポートを参考のため調査(継続中)
- ・更なる安全性・堅牢性の向上を図る上での課題抽出作業を開始:
 - ✓ 継続的な材料開発や技術開発による改良燃料の導入
 - ✓ 最新知見を反映した規制・基準の適切な見直し
 - ✓ 規制・基準の合理性/信頼性の向上

・1F燃料挙動とSA対策

- ・事故進展シナリオの評価による炉内状況の推定、燃料デブリの特性と性状の推定
- ・1F事故の事象進展の解明を進め、SAに関する現象の理解を進めること
- ・SAの各現象の理解の深化、現象のモデリングと解析コードの高度化が重要

・新材料開発

- ・「水素発生と酸化発熱の有無」を材料選定基準としてクローズアップ
- ・SiC材料被覆管開発に向けた開発課題の整理及び改良SUS等の検討を実施中

・超長期貯蔵時の燃料挙動

- ・水素を原因とする燃料被覆管機械特性に係るデータの取得・整備、およびこれらのデータに基づく経年変化を考慮した評価ツールが必要

なお、これらの課題を解決するに当たっては、

・研究資源確保 ・分野横断型研究の推進 ・国際共同研究の推進 ・人材育成
が必要となる。

今後の予定

- ・本検討結果については、核燃料部会の今後の展開の指針となるよう、WG報告にまとめる。
- ・本検討結果が、産官学の今後の研究の方向性の指針となるよう、情報発信を進めて行く。
- ・本SWGについては来年度も継続し、最新の海外事例・研究事例の検討等を通じ、研究課題の抽出・評価を進めるとともに、検討課題についての具体的研究法の提案を実施する。

研究課題検討SWG2メンバー

木戸俊哉 (NDC)
坂本 寛 (JAEA)
天谷政樹 (JAEA)
黒崎 健 (阪大)
西 剛史 (JAEA)
尾形孝成 (電中研)
笹原昭博 (電中研)
鈴木晶大 (東大)

(順不同、敬称略)