

# 「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

## 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
- ・周辺状況に応じた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てきた。

- 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廃止措置とSA現象理解の深化
- 3、事故耐性燃料被覆材
- 4、超長期貯蔵時の燃料挙動

### 1、通常運転～異常過渡における安全性向上

- ～2013年春の年会  
国内状況を反映した課題抽出作業を開始（参考：安全基準に関するOECD/NEAのレビューレポート\*）。
- 2013年春の年会～2013年秋の大会  
課題抽出を完了し、3つのカテゴリーに整理
  - ①総合的な安全性/堅牢性を有する軽水炉燃料の研究・開発、性能の実証・確証
  - ②国内外の最新知見を反映した規格/基準の策定、ガイドライン整備のための研究・開発
  - ③安全維持・向上のための研究開発リソース高度化

### ① 総合的な安全性/堅牢性を有する軽水炉燃料の研究・開発、性能の実証・確証

- 軽水炉燃料・材料の改良  
更に安全性/堅牢性を高め、環境負荷の低い燃料として、各々の課題に対応した燃料・材料の開発、導入
  - ✓ 低水素吸収燃料被覆管
  - ✓ 低FP放出燃料
  - ✓ 耐PCI燃料
  - ✓ 熱的余裕向上燃料
- 評価手法・解析コードの高度化  
安全評価を行うためのインプットを精緻化し、適切なプラント安全設計につなげるための通常時から異常過渡時までの燃料挙動予測精度向上、評価手法・解析コードの高度化

## ② 国内外の最新知見を反映した規格/基準の策定、ガイドライン整備のための研究・開発

- 燃料被覆管の破損評価クライテリアへの新技術・新知見反映
- PCI破損評価に関する規格/基準の高度化
- 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
- リーク燃料対応のガイドライン作成
- 燃料長期保管時の健全性評価データ拡充/予測精度向上、基準・ガイドライン作成

## ③ 安全維持・向上のための研究開発リソース高度化

- インフラ維持・整備・高度化（以下、その例）
  - ✓ 照射/照射後試験施設（JMTR、ホットラボ等）
  - ✓ 核/熱水力評価施設
  - ✓ 輸送（キャスク）
  - ✓ 耐震評価施設
- 試験/検査/取扱い技術維持・高度化
- 人材確保・育成

## 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)

- 春の学会以降
- 前回報告した課題に不足している点がないかを再確認
  - 抽出した課題の検討、整理及びまとめ

### 抽出された課題(1)

#### 1. RIA/LOCA時の燃料挙動に係る最新知見の取得、整備

##### RIA/LOCA共通

- ✓ 燃焼に伴う材料劣化（照射効果、被覆管の水素吸収等）、ペレットからのFPガス放出や温度上昇に伴う燃料の熱機械的変化の影響
- ✓ 事故時及び事故後の燃料について、冷却可能形状維持及び長期冷却性に関する考え方や評価手法の構築、及びそのために必要な試験の実施

##### RIA時

- ✓ RIA時の燃料破損メカニズムの解明及びモデル化
- ✓ ペレットの融点低下に及ぼす燃焼度の影響の確認
- ✓ 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
- ✓ 使用中にリークを生じた燃料（燃焼の進んだもの）のRIA時挙動評価

##### LOCA時

- ✓ LOCA時の燃料棒内でのペレット細片化挙動、細片化したペレットの径方向及び軸方向移動挙動、燃料棒からのペレット放出挙動
- ✓ LOCA後の燃料の長期にわたる形状保持能力の評価

## 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)

### 抽出された課題(2)

#### 2. 事故時燃料挙動評価における不確かさの低減

##### 挙動解析コード等の整備、挙動評価手法の維持及び高度化

- ✓ コードの検証に必要な各種データの取得及びデータベース化
- ✓ 実験結果の再現性を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

#### 3. 既存の発電用軽水炉の安全性向上に資する燃料の導入への対応

##### 材料改良が事故時燃料挙動に及ぼす影響の把握

- ✓ 使用中の腐食量や水素吸収量が従来より低減されるとされる被覆材（改良合金被覆管）
- ✓ FPガス放出を抑えるとされる製造時微細組織を変更した燃料ペレット

#### 4. 拡充が必要と考えられるデータ及び知見の取得、整備

##### 設計基準を超える状態における燃料の挙動評価

- ✓ ECCS性能評価基準である1200℃、15%ECRを超える状態での燃料材料の挙動に関する知見
- ✓ 上記評価に必要な物性値等の基礎データの取得

#### 5. その他

##### 実験技術の維持

- ✓ 試験施設(MSRR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

## 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)

### まとめ

- ・ 前回報告内容に対して不足している課題がないかの再確認を行うとともに、今後燃料分野として取り組むべき課題を以下の5つの観点で整理した。これらの課題の解決は、軽水炉施設に係る今後の規格／基準等への反映を通して安全性の向上に重要な役割を果たすと考えられる。
- 1. RIA/LOCA時の燃料挙動に係る最新知見の取得、整備
- 2. 事故時燃料挙動評価における不確かさの低減
- 3. 既存の発電用軽水炉の安全性向上に資する燃料の導入への対応
- 4. 1F事故を受け、拡充が必要と考えられるデータ及び知見の取得、整備
- 5. その他
- ・ 「DBAの範囲内でも不足しているデータがないか」等、今後も燃料の事故時安全性を向上させるための課題について、検討を行っていくことが重要である。また、国内の研究を的確に進めるため、海外の研究成果についても適時フォローしていくことが必要である。

## SA現象理解の深化に関する課題

- 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に関する現象理解に活用することが重要。
- そのためには、TMI-2の例に見るように、以下を進める必要。
  - 事故プラントからの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SA解析コードの検証と改良

## 2、1F廃止措置とSA現象理解の深化

### 1F廃止措置に関する課題

- 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解析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、以下が必要である。
  - 燃料溶融事象に関する既往研究の調査と整理(溶融燃料SWGで実施)
  - 福島第一発電所事故特有の条件(B<sub>4</sub>C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・溶融試験による現象把握と燃料デブリ特性の評価
  - 上記を支援するための炉内溶融物質の熱力学的解析など
- これらの推定結果は、燃料デブリ取り出しに先立って採取される実燃料デブリサンプルの分析に活用でき、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活用される。

### SA現象理解の深化に関する課題(つづき)

- 1F事故における現象進展の解明に加えて、軽水炉の各種炉型に対して、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・材料の化学的挙動の理解の深化のため、炉内外試験およびモデリングが必要。
  - 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
  - 溶融プールの成層化挙動およびFP放出挙動
  - 溶融コリウム-コンクリート反応
- 使用済燃料プールにおける燃料損傷過程などに関する現象理解も重要。空気雰囲気であること、崩壊熱が小さいことなど炉内とは異なる条件を考慮した以下の取組みが必要。
  - 燃料棒の破損挙動の解明
  - 燃料集合体とラックとの反応機構の解明
  - 溶融物質の流下挙動解明
  - FP放出機構の解明

### 3、事故耐性燃料被覆材

燃料及び被覆材についての検討を実施した結果、被覆材の課題解決が大幅な状況改善につながるとの結論に至った。

燃料被覆材の開発状況

- 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、高温水蒸気との反応により熱と水素を発生する  
**「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、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。改良ステンレス鋼には高温水蒸気共存性が極めてすぐれたものがある。
- SiCは靱性が不足しているが、その他の性質は優れている

SiC燃料被覆材の可能性と研究課題を言及した論文 (L. Hallstadius et al., Prog. in Nucl. Energy, 57 (2012) 71)

**SiC-based composite cladding offers major potential performance improvements** in terms of, e.g., parasitic neutron absorption, resistance to irradiation damage, corrosion performance during normal operation, and **high temperature behavior during accident conditions**. However, implementation of SiC-based ceramic cladding will **require significant time and investment**. Key issues that need to be solved are:

1. Modeling and designing SiC/SiCm structures that are both strong and tough.
2. Cost-effective large-scale manufacturing techniques for SiC precursors, fibers and composite structures.
3. Development of phenomenological and mechanistic models with a sound basis in a wide range of high quality data.
4. Performing the testing and in-reactor verification required to assure regulators and commercial operators of the safety and efficacy of the SiC clad, in particular with higher density or enrichment fuel.

### SiC燃料被覆材開発に関する比較的新しい研究(2012~2013)

1. 燃料被覆材としてのSiC-SiC複合材料の製造 (C.P.Deck et al., Prog. in Nucl. Energy, 57 (2012) 38)  
**熱・機械的特性に優れた製造プロセスの確立**
2. 種々の条件下におけるSiCの高温酸化特性 (M.B.Pichelin et al., Progress in Nuclear Energy, 57 (2012) 38)  
**SiCの高温における酸化状態を定量的に評価**
3. SiC及びSiC-SiC複合材料の各種基礎物性及び照射効果 (M.B.Pichelin et al., J. European Ceramic Soc., 30 (2010) 2653., 30 (2010) 2661., 32 (2012) 485.)  
**実設計のための照射特性データの取得**
4. SiC-SiC複合材料に適用するためのSiCウイスカーの製造と物性評価 (S.Li et al., Ceramic Int., 39 (2013) 449.)  
**組織と物性との関連性を評価**
5. SiC-SiC複合材料の熱伝導率改善のための微細組織設計 (K.Yoshida et al., J. Nucl. Mater., 440 (2013) 539)  
**微細組織改善で大幅な熱伝導率の向上**

- 高温における熱物性等の基礎特性データが蓄積されつつある。
- 靱性を改善したSiC/SiC複合材料の製造プロセスが徐々に確立されつつある。
- 照射特性(スエリング、機械特性)や高温での酸化状態のデータ取得が行われており、そのデータが誤差を持つ式で評価されている等、実設計に向けたデータが整備されつつある。

- 集合体に組み上げられるレベルの加工技術を開発することが大きな課題

### SiC燃料被覆管実用化に向けた研究課題と最新の研究開発状況

平成24年度「原子システム研究開発事業-安全基盤技術研究開発-」 H24~H27の4年間

安全性を追求した革新的炉心材料利用技術に関する研究開発

吉田 紀之(株式会社東芝)

高熱伝導性に加え高温での化学的安定性に優れ、靱性も補強された**シリコンカーバイト複合材**を炉心材料へ適用することを目指して、被覆技術の開発、製造実現性試験等を行い、原子炉炉心用構造体としての成立性評価を行う。

高度の安全性を有する炉心用シリコンカーバイト燃料被覆管等の製造基盤技術に関する研究開発

香山 晃(室蘭工業大学)

ナノ含浸遷移共晶相法(NITE法)を用いた**シリコンカーバイト複合セラミック**燃料被覆管及び燃料ピン製造の基盤技術を開発する。

- SiCの持つ最大の弱点である**脆弱性**を改善するため、高強度・高剛性のSiC繊維を複合化
- 研究開発の主流は、**シリコンカーバイト複合材料(SiC/SiC)**

### 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

○アルファ崩壊発生ヘリウムによるベレットスエリング(MOX燃料の場合)

100年を超える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

⇒MOX燃料の場合にはヘリウム蓄積によるPCMI影響評価が必要

➢ 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)で検討中

\*「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

#### 4、超長期貯蔵時の燃料挙動

##### ➢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、**使用済燃料の真空乾燥等の取り扱い中・乾式貯蔵中の温度やフープ応力に制限を設けて、固相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、新たに開発された被覆管を含む**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な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)。

・**MOX燃料**では長期間貯蔵した場合、アルファ崩壊で発生するヘリウムの影響について把握・評価が必要。

・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。

・貯蔵中の**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

- ・更なる安全性/堅牢性を有する軽水炉燃料の研究・開発、性能の実証・検証
- ・国内外の最新知見を反映した規格/基準の策定、ガイドライン整備のための研究
- ・開発・安全維持・向上のための研究開発リソース高度化

##### ・1F廃止措置の対応とSA現象理解の深化

- ・1F事故進展の解明を進め、燃料デブリの特性と性状の推定、SAIに関する現象の理解に活用
- ・現象のモデリングと解析コードの高度化や使用済燃料貯蔵プールにおけるSAの現象解明などを通じたSA現象理解の深化

##### ・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

##### ・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、以下が重要となる。

・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

今後、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。  
10月末を目途に溶融燃料WG報告書の第一種を作成する。

## 研究課題検討SWG2メンバー

木戸俊哉 (NDC)  
坂本 寛 (NFD)  
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)