2021年春の年会

総合講演･報告１

「シビアアクシデント時の FP 挙動」研究専門委員会の活動実績と今後の展開

Activity results of the research committee on fission product behaviors under severe accident and its future developments

（2）FP 挙動に関する実験サーベイの実績と課題

(2) Latest Survey Results on Experimental Studies on FP behavior and its Future Developments

*逢坂 正彦[1]

[1]原子力機構

1. 活動の目的

軽水炉等の原子力施設におけるシビアアクシデント（SA）時のソースターム評価に必要な FP 挙動については、TMI-2 事故以降多くの研究が行われてきたものの、1F 事故前においても多くの課題が残されたままであった。加えて、1F 事故により、BWR 制御材であるホウ素がセシウムの挙動に与える化学的影響等、新たな課題やニーズが生じている状況である。これらの課題へ対応していくためには、ソースタームをより高精度・詳細に評価するための FP 挙動評価技術体系が必要であると考えられる。そこで、本研究専門委員会に「WG1：実験 WG」を組織して、実機 FP 物理化学現象を適切に表現可能なモデル構築を目的とした活動を開始し、4 年間の活動期間における目標を以下の通り定めた。

- 多様な専門性の視点から調査を行い、FP 挙動・現象を把握する
- 主に 1F 廃炉に係る研究課題（以下、「6 課題」）[1] への対応の観点で、把握した FP 挙動・現象が「6 課題」における目的達成にどのように関連するか、またどのような課題があるか等を評価する
- 上記の FP 挙動・現象評価を以下の視点でも行い、今後の課題も同時に抽出する。
  - 把握すべき現象に不足は無いか
  - さらに深堀り／詳細検討すべきものはどれか（WG2 及び WG3 からのニーズ等も考慮）

2. FP 挙動・現象の調査

過去実施されたソースタームに関する PIRT 等に基づき、SA 時の FP 放出移行に係る挙動・現象を時系列や原子炉内で主に生じる場所等に応じて 11 の項目に区分した。これらの区分ごとに、熱流動、SA 解析、化学、計算科学、燃料等、多様な専門性を持つ委員から、FP に係る最新の研究動向や課題、課題解決のための基礎知識等について、調査を行った（表 1）。さらに、調査した結果を 1F 廃炉に資するための実験提案につなげるための最初の一歩として、各 FP 挙動・現象について、「6 課題」との関係性等を考察し、以下の通り 4 年間の活動結果を総括した。

- 「6 課題」のうち、「燃料デブリの経年変化プロセス等の解明」「特殊環境下の腐食現象の解明」「廃炉工程で発生する放射性飛散微粒子挙動の解明（αダスト対策を含む）」「放射性物質による汚染機構の原理的解明」の 4 つの課題において、関連情報・データが少ないところ、本 WG 活動での調査結果を基礎的な情報等として提供できると考えられる。
- 本 WG 活動で実施した調査結果は、廃炉までの数十年の長期間を見渡した場合に重要となると考えられる以下の課題に関連した情報を含むと考えられる。
  - 水相を介した長期ソースターム評価
  - 建屋解体時の粉塵発生評価
  - 解体廃棄物のインベントリー評価　　など

3. FP 挙動・現象の今後の調査の方向性と課題

2.に記載した調査結果の総括を受け、今後さらなる活動を進めていくための課題として以下を抽出した。

- さらに把握すべき、及び／または、深堀り／詳細検討すべき FP 挙動・現象
  - 水相を介した長期ソースターム評価（「6 課題」のうち、「放射性物質による汚染機構の原理的解明」に関連）については、さらに深堀り／詳細検討をすすめ、WG2 において提案された廃炉解析に必要なモデル構築のための実験提案につなげることも検討する。
  - 上記検討においては、燃料デブリ切断や経年変化（「6 課題」のうち、「燃料デブリの経年変化プロセス等の解明」及び「廃炉工程で発生する放射性飛散微粒子挙動の解明（αダスト対策を含む）」に関連）による表面劣化により発生する微粒子性状や組成（Cs に加えて、Sr, Pu, Am）の考慮が重要であり、主に他 WG と協力しながら関連する情報の調査等をすすめる。
  - 軽水炉の安全性向上への／からのフィードバックを常に意識してすすめる。
- 1F 廃炉に係り、本研究専門委員会活動を通じて得られた知見等は、他の関連する研究開発の中での位置づけを整理・評価し、今後の委員会としての課題特定につなげていくことが重要である。
- 1F 内部の線量分布や少量の放射性サンプル分析結果等の限定された情報のみを用いて FP 分布等を予測することには限界があるため、今後試験的取り出しが予定されている [2] 燃料デブリサンプル分析及び評価について、研究専門委員会としての情報等の提示を目指すことが重要である。

表 1　FP に係る最新の研究動向や課題、課題解決のための基礎知識等についての調査結果

題名	調査結果概要
レベル 2PRA の実施による FP 挙動研究　課題の抽出	➢ 規制要件ともなった PRA を実施し、原子力安全性向上に資する重要課題（セシウム特徴を踏まえた FP 挙動・化学反応、より現実的な CV 破損形態とその際のソースターム挙動）を摘出。 ➢ 上記重要課題解決においては、PHEBUS 実験、1F データ等の有効活用が重要。
FP 放出移行挙動について	➢ ソースターム評価高度化に向けて、FP 化学挙動評価高度化が重要課題である。 ➢ セシウム、ホウ素等の化学挙動評価のための基礎基盤研究を実施し、化学吸着等に係る基礎知見を取得。
論文（Conclusion on severe accident research priorities）紹介	➢ SARNET による PIRT 結果の紹介。酸化雰囲気での Ru 挙動、FP 高温化学吸着挙動、ヨウ素化学、SFP での集合体挙動等が重要度高とされた。
ロードマップ（RM）作成方法について	➢ 熱水力安全評価基盤技術高度化戦略マップ 2017（熱水力 RM2017）では、導入シナリオ、技術マップ（技術課題のリスト）、RM（時間軸を考慮、マイルストーン設置）に分けられる。 ➢ 熱水力 RM においては、2017 年の改訂において「FP 挙動の最適評価」が課題として追加されている等、本研究専門委員会の活動を進めていくにあたっては関連 RM 等の参照が重要。
放射性物質の環境動態研究－環境測定データからの FP 放出源推定－	➢ モデル改良等により福島の環境線量を概ね良好に再現できるようになったものの、更なる放出源インプットの精緻化・高度化が必要。 ➢ 特にヨウ素の放出源では化学形の考慮は重要。
再処理施設における対応を検討すべきシビアアクシデントの選定方法と影響評価手法	➢ 日本原子力学会 再処理・リサイクル部会 核燃料サイクル施設シビアアクシデント研究ワーキンググループ（SAWG）の活動概要の紹介。 ➢ 再処理施設における SA は発生頻度とその影響を考慮して選定され、ソースターム評価に当たっては五因子法を使用。蒸発乾固時に放出される RuO_4 の影響が最も厳しく、沈着についてはメカニズムが良く分かっていない。
水相を介したコンクリートへの元素の化合脱離挙動	➢ 鉄鋼スラグからのリン除去等にかかわる研究と MCCI 生成物からの FP 溶出へのアナロジーが紹介された。 ➢ 1F において重要な水相を介した長期的なソースターム研究の重要性が認識された。
軽水炉事故時の放射性物質放出移行挙動　モデル化の現状と課題	➢ 現象把握・挙動評価を行ってモデル化するための参考例として、JAEA において実施している FP 化学基礎基盤研究のうち、ホウ素の化学的影響とセシウムの鋼材との高温化学反応に関する実験評価とモデル化の現状が紹介された。
燃料・デブリからの FP 放出・浸出挙動	➢ 海水、ホウ酸水を用いた使用済燃料・デブリ長期冷却時の各元素の浸出挙動に係る研究の紹介。 ➢ コンクリート共存（pH）、試料表面状態、試料中の FP 分布等が浸出挙動へ与える影響について議論がなされた。
福島第一原子炉建屋におけるボーリングコアコンクリートの汚染状況とコンクリートへの Cs の浸透挙動	➢ 福島第一原子炉建屋からボーリングされたコンクリートの分析結果と、Cs の浸透挙動を評価した試験結果について紹介。 ➢ セシウムのコンクリートへの浸透継続、事故時の浸透状況（乾燥 or 濡れ）、セシウム拡散へ与える影響（液性や浸透経路）について議論がなされた。
シビアアクシデント時の格納容器内ヨウ素化学に係る課題調査	➢ SA 時の格納容器内ヨウ素化学評価の現状と課題について文献調査した結果の紹介。 ➢ モデル化における課題、ラジオリシスの影響等について議論がなされた。
SA 時の FP 挙動に関連した水のラジオリシスの研究	➢ 事故時の水ラジオリシスに関する研究として、ハロゲン化物イオンの化学形態に与える影響や、気相への水素放出、界面におけるラジオリシスの影響等が紹介された。 ➢ 沸騰時やナノ粒子が気相への水素放出量に与える影響、放射線種類やラジカルの影響について議論がなされた。

表１　FP に係る最新の研究動向や課題、課題解決のための基礎知識等についての調査結果（続き）

題名	調査結果概要
原子炉建屋内の遠隔除染技術の開発　汚染状況調査を主とした成果の紹介	➢ 燃料デブリ取り出し準備に係る IRID 研究開発の一環として実施した、原子炉建屋内の遠隔除染技術の開発についての紹介。 ➢ 汚染性状（遊離性、固着性）、水素爆発等の影響、場所（高所・低所）による線量の違いの原因、除染方法、ホットスポットや汚染性状の経時変化等について議論がなされた。
Sr，I の化学	➢ 原子力分野以外の一般的な性質や分析方法を含む、Sr 及び I の化学についての紹介。 ➢ Sr の分析方法、環境中ヨウ素同位体比、ヨウ素化学形等について議論がなされた。
SAMPSON による FP 放出・移行挙動解析および 1F 廃炉に向けた取り組み	➢ SAMPSON における FP 挙動の取り扱い及び SAMPSON を用いた 1F 解析の内容の紹介。 ➢ 各モデルについて、計算対象としている核種や化学形態、SOARCA 等モデル・パラメータの妥当性評価方法についての議論がなされた。
非溶解性中性子吸収材の開発と 1F への花王の取組	➢ 花王㈱の取組である界面活性等の技術を応用した 1F 廃炉への貢献検討例として「非溶解性中性子吸収材の開発」が紹介された。 ➢ 吸収材の耐放射線性、使用後の処理方法、デブリへの適用方法、液性変化の影響、特性制御等について議論がなされた。
FP 研究の現状と課題（計算科学）	➢ 計算科学（分子軌道計算、CFD 等）による FP 研究の現状と課題として、気相中での FP クラスターの生成や環境中の FP 挙動（海洋拡散、土壌中 Cs 化学形態）研究の紹介。 ➢ 計算科学手法で求めた結果の SA コードモデルへの応用等について議論がなされた。
FP 実験のための施設　－国内施設の紹介と FP 関連実験調査－	➢ FP 挙動実験のために使用可能な NDC㈱所有の PIE 装置、仏 CEA 所有の FP 放出移行実験装置（VERDON 装置）の紹介。 ➢ 装置スペックや PIE 結果への質問、VERDON 装置様のものの導入可否等についての議論がなされた。
放射性セシウム粒子の炉内生成プロセスの検討	➢ IRID 事業「廃炉・汚染水対策事業費補助金（総合的な炉内状況把握の高度化）」のうち Cs 放射性微粒子についての研究概要が紹介された。
放射光光電子分光を用いたセシウム吸着挙動研究	➢ 顕微 HAXPES によるセシウム吸着ステンレス表面層の断面分析より、吸着化合物を特定。また、FP 放出移行実験サンプルの分析により、ヨウ化セシウムの移行挙動に及ぼすホウ素蒸気の影響を評価した。 ➢ “その場観察”放射光光電子分析により、ステンレス基板上のセシウム吸着表面層の酸素ガス雰囲気下での酸化傾向の温度依存性を取得。
1F 燃料デブリ取り出しに係る定量的リスク評価手法の検討～廃炉リスク評価分科会　報告書～	➢ １F 廃炉検討委員会・廃炉リスク評価分科会での検討結果の紹介。 ➢ 落下の影響を受けての粉状デブリや構造材付着 FP の舞い上がりによる放出量が不確かさも大きく、影響も大きいこと、燃料デブリ・構造材付着 FPP の分布とともに性状の把握も重要であること等が述べられた。
ソースタームにかかわる規制の現状と課題	➢ ソースタームの経緯、設置許可における安全評価、新規制基準におけるソースタームの適用（SA 対策の有効性評価、安全性向上評価）、許認可におけるソースターム評価に係る課題について概説がなされた。

[参考文献]

[1] 原子力損害賠償・廃炉等支援機構、６つの重要研究開発課題の今後の基本的方向性について（案）、廃炉研究開発連携会議（第６回）、平成２９年１２月２１日.

[2] 技術研究組合国際廃炉研究開発機構・東京電力ホールディングス株式会社、「2 号機 PCV 内部調査及び試験的取り出しの準備状況」、2020 年 12 月 24 日.

*Masahiko Osaka[1]

[1]Japan Atomic Energy Agency