

企画セッション | 総合講演・報告：総合講演・報告1「燃料デブリ」研究専門委員会

■ 2018年9月5日(水) 13:00 ~ 14:30 | ■ D会場 A棟 A32

[1D_PL]「燃料デブリ」研究専門委員会活動報告

座長:阿部 弘亨(東大)

[1D_PL01] 研究専門委員会の設立趣意

*大石 佑治¹ (1. 阪大)

[1D_PL02] 事故進展に関する知見の現状と課題

*尾形 孝成¹ (1. 電中研)

[1D_PL03] 燃料デブリの性状に関する知見の現状と課題その1

*高野 公秀¹ (1. JAEA)

[1D_PL04] 燃料デブリの性状に関する知見の現状と課題その2

*中村 勤也¹ (1. 電中研)

「燃料デブリ」研究専門委員会活動報告
Activity Report of the Research Committee on Fuel Debris

(1) 研究専門委員会の設立趣意

(1) Motivation for the Founding of Research Committee

*大石 佑治, 阪大

1. 「燃料デブリ」研究専門委員会の設立の経緯と目的

福島第一原子力発電所（1F）の 1、2、3 号機は東日本大震災を受け全交流電源喪失に至り、炉心の溶融および圧力容器の損傷を伴う極めて深刻な原子力事故が発生した。この国内最大規模の原子力事故で顕在化した核燃料に関する課題を検討することは核燃料専門家としての責務であると同時に、1F 廃止措置における様々な取組みに寄与でき、また、今後の原子力の安全性向上にも繋がると考えられる。この考えのもと、2011 年に核燃料部会内に「溶融事故における核燃料関連の課題検討ワーキンググループ」が設置され、核燃料の専門家の視点から溶融事故における核燃料関連の課題が検討されてきた。

1F 事故後数年が経過した今、事故時の状況及び事故後の施設内の状況が少しずつ明らかになりつつある。また 1F 廃止措置に関わる燃料デブリ取出し方法の検討およびその技術開発が進み、さらにシビアアクシデント研究にも進展がみられるような状態となっている。このような背景の元、「燃料デブリ」研究専門委員会は上記の「溶融事故における核燃料関連の課題検討ワーキンググループ」の設立の趣意を引き継ぎ、新たに得られつつある燃料溶融や燃料デブリ等に関する知見やデータを核燃料の専門家以外の視点も交えた上で調査・検討し、1F 廃止措置の今後の取り組みや 1F 廃止措置で得た経験のシビアアクシデント研究への反映のための課題の整理と提言を行うことを目的として設立された。

2. 活動の概要

本研究専門委員会は 2016 年 6 月 1 日に設立され、2018 年 3 月 31 日まで活動した。委員数は 2018 年 3 月 31 日時点で 58 名である。委員のうち核燃料部会に所属している委員は半数以下であり、半数以上は核燃料部会以外の様々な部会に所属している。これは、燃料デブリに関連した知見やニーズを核燃料の専門家以外からも幅広く収集するためである。

本研究専門委員会では計 4 回の会合を実施するとともに、R&D の現状調査と共通の知識基盤の提供を目的として計 5 回の講演会（講演 11 件）を開催した。会合では本専門委員会のスコープと進め方について議論し、「事故進展」と「デブリ性状」の 2 つのタスクチームを設置した。これらのタスクチームは、それぞれの分野について R&D の現状調査（講演会）を踏まえて抽出される技術課題について、課題に関連する専門家による深掘り作業を行った。また、タスクチームのメンバー以外の委員に対しても課題の提案を依頼し、様々な分野の専門家から課題を収集した。これらの成果を元に、「デブリ研究」に関する課題を整理し提言を取りまとめた。

本企画セッションでは、「事故進展」と「デブリ性状」のそれぞれのタスクチームより、1F の事故進展および燃料デブリ性状の各々に関する知見の現状と課題について取りまとめた結果を報告する。

Yuj Ohishi

Graduate School of Engineering, Osaka University.

「燃料デブリ」研究専門委員会活動報告

Activity Report of the Research Committee on Fuel Debris

(2) 事故進展に関する知見の現状と課題

(2) Current Status and Issues of Accident Progression Analyses

*尾形孝成¹, 三浦弘道¹, 加治芳行², 杉山智之², 永江勇二², 鈴木嘉章³, 實重宏明⁴, 長澤克己⁴

¹ 電中研, ² 原子力機構, ³ 原安進, ⁴ 東京電力 HD

1. はじめに

燃料デブリの性状、組成および分布は事故進展によって変わる。一方、現実起きた事象進展の未解明の部分は燃料デブリの性状、組成、分布等を調査することで明らかになるものがある。そこで「燃料デブリ」研究専門委員会の事故進展タスクチームでは、福島第一原子力発電所（1F）1～3号機の事故進展に関する未解明課題や解析結果などを調査し、1F事故進展の解明に向けた課題をとりまとめた。

2. 事故進展に関する未解明課題と溶融燃料の分布状況の推定

1～3号機の炉心・格納容器の状態に直接的・間接的に関係する52件の課題が東京電力HDによって体系的に整理されている（「福島第一原子力発電所1～3号機の炉心・格納容器の状態の推定と未解明問題に関する検討 第5回進捗報告」平成29年12月、東京電力HD(株)）。これらの課題のうち「炉心損傷状況とデブリ位置」については、事故進展に関する分析やミュオン測定による原子炉内状態の評価などを踏まえ、1～3号機の溶融した燃料の分布状況が次のように推定されている。【1号機】溶融した燃料はほぼ全量が原子炉圧力容器下部プレナムへ落下、元々の炉心部にはほとんど燃料が残存せず。【2号機】溶融した燃料のうち、一部は原子炉圧力容器下部プレナムまたは原子炉格納容器ペデスタルへ落下、燃料の一部は元々の炉心部に残存。【3号機】溶融した燃料のうち、一部は原子炉圧力容器下部プレナムまたはペデスタルへ落下、燃料の一部は元々の炉心部に残存。格納容器に落下した燃料の量は2号機より多い。

3. 事故進展の解析結果

OECD/NEAのBSAFプロジェクト（Benchmark Study of the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Phase I Summary Report, NEA/CSNI/R(2015)18）において1F事故進展の解析が行われた。Phase Iでは日本を含む8か国12機関が参加した。各機関のコードを用いた解析の結果、1号機では炉心構成物質の大部分がペデスタル上に移動、2号機では多くの計算で炉心構成物質が全て原子炉圧力容器内に保持、3号機では炉心構成物質が全て原子炉圧力容器内に保持あるいは一部がペデスタル上に移動、などが示された。

4. 事故進展の解明に向けた課題

炉心構成物質が原子炉圧力容器外へ再配置した割合が1号機→3号機→2号機の順に大きいといった解析結果の定性的な傾向は、ミュオン測定等を踏まえた1～3号機の溶融した燃料の分布状況の推定結果と概ね整合する。しかし、コード間の解析結果の違いや解析結果と現場観察の違いは随所にみられる。これらの要因として、解析コードのモデルや解析手法の違い、主蒸気逃し安全弁や高圧注水系等の動作状態や応答の不確かさ、MCCIを含む燃料デブリ挙動等の事象の理解不足などが考えられる。今後、1F事故におけるデブリ形成・移行過程などの事象進展を解明し、その解析・評価の不確かさを減らしていくためには次の事項などを進めていく必要がある。①各号機の機器の破損状態や格納容器内の観察など定性的情報の収集と分析、②燃料デブリサンプルの採取と分析データ取得、③模擬実験等による事象進展の理解の深化と解析モデル改良、④ベンチマーク解析の継続と新たな観察結果や燃料デブリ分析データによるコード検証、⑤これらの結果による機器の動作状態等の検討と不確かさ低減。

T. Ogata¹, H. Miura¹, Y. Kaji², T. Sugiyama², Y. Nagae², Y. Suzuki³, H. Saneshige⁴, K. Nagasawa⁴

¹CRIEPI, ²JAEA, ³JANSI, ⁴TEPCO HD

「燃料デブリ」研究専門委員会活動報告

Activity Report of the Research Committee on Fuel Debris

(3) 燃料デブリの性状に関する知見の現状と課題その1

(3) Current Status and Issues of Fuel Debris Characterization (I)

*高野 公秀¹, 三輪 周平¹, 川野 昌平²¹原子力機構, ²東芝

1. 調査の目的と対象

1Fの燃料デブリ取り出しに向けた性状把握に関する現状と課題を整理するため、本件では模擬燃料デブリを用いた試験やTMI-2デブリの分析による性状推定データの取得状況と過酷事故時のソースタームに関する既往知見をとりまとめた結果を報告する。

2. 調査・検討結果の概要

1F事故以降、実験室規模（数グラム）での熔融試験やTMI-2デブリとの比較検証、及び海外の大規模熔融実験試料の分析等により、炉心熔融固化物及びMCCI（炉心熔融物－コンクリート相互反応）生成物の性状に関する基礎データが蓄積されて来っており、生成相（化合物）、微細組織、機械特性（硬さ等）がその主要項目である。炉心熔融固化物の主成分である $\text{UO}_2\text{-ZrO}_2$ 系固溶体は、全率固溶する温度領域が融点直下の超高温領域に限られることから、冷却速度が生成相に影響すると予測される。すなわち急冷条件では立方晶単相が保持されやすく、徐冷条件ではUリッチの立方晶とZrリッチの正方晶（+単斜晶）に相分離しやすいと考えられる。また、熔融物の水による急冷効果の一例として、固化時に表面での粉体化・粒状化が大規模実験で確認されている。一方、金属質のデブリ構成成分では、熔融進展時の酸化状況に応じて、Zr-(Fe,Cr,Ni)系金属間化合物あるいは(Fe,Ni)系合金等がある他、中性子吸収材の B_4C がZr又はFe系の硬いホウ化物として合金中に析出している可能性が実験及び熱力学平衡計算により指摘されている。

MCCI進展に関しては、炉心熔融物とコンクリートの接触面近傍で大きな温度勾配があり、到達温度領域に応じて生成相・組織に階層構造ができていく可能性がある。コンクリートは 1200°C 強から液相が始めガラス化するとともに、 $\text{UO}_2\text{-SiO}_2$ 系及び $\text{ZrO}_2\text{-SiO}_2$ 系状態図によると固相線は 2000°C 前後まで低下する。MCCI時の各元素の酸化・還元挙動に関しては、コンクリートから放出される水分により酸化環境が優勢と考えられ、未酸化で流下してきたZr等金属元素の酸化が進むと考えられる。

デブリ性状の推定における課題として、①デブリの分布が圧力容器内部から格納容器底部までの広範囲に及ぶことであり、それぞれの位置において熔融物が接触する構造材、温度履歴、酸素分圧、水の有無等が異なることから、これまでに得られた性状データの網羅性に不足が懸念されること、②ミクロレベルの組織や機械特性データは比較的充実しているものの、よりマクロな連続体（バルク）として捉えた際の特性評価が不十分な状況にあること、③取り出しまでの長期間における表面変質や溶出といった経時変化に関する知見が不足していることが挙げられる。

ソースタームに関して、既往のシビアアクシデント（SA）解析コードにおける燃料からのFP放出モデルや炉内の移行モデルの多くは特定の化学種に対する温度のみの関数となっており、算出されるソースタームの不確かさは大きい。このため、燃料デブリ取り出しに資する炉内のFP分布や性状に関する知見を得るためには、事故事象進展との相関において雰囲気や他物質との相互作用も考慮してFP放出移行挙動を評価し、モデルを改良していくことが必要となる。このため、既往実験研究で一部データは取得されているものの、他物質との相互作用による熔融の影響や、再冠水による燃料微細化の影響といった、温度のみではなく多様な物理的・化学的な条件におけるFP挙動評価を進めることが重要であると考えられる。

*Masahide Takano¹, Shuhei Miwa¹ and Shohei Kawano²¹JAEA, ²Toshiba

「燃料デブリ」研究専門委員会活動報告

Activity Report of the Research Committee on Fuel Debris

(4) 燃料デブリの性状に関する知見の現状と課題その2

(4) Current Status and Issues of Fuel Debris Characterization (II)

*中村 勤也¹, 名内 泰志¹, 鈴木 晶大², 松永 純治³, 星野 国義⁴, 坂村 義治¹, 高橋 優也⁵

¹電中研, ²NFD, ³GNF-J, ⁴日立 GE, ⁵東芝エネルギーシステムズ

1. 調査の目的と対象

1F の燃料デブリ取り出しに向けた性状把握に関する現状と課題を整理するため、本件では、デブリ取り出し時の線量評価、臨界評価、収納・保管、処置、サンプル分析に関する技術開発ならびに長期変性挙動に関する知見をとりまとめた結果を報告する。

2. 技術開発状況の概要

【線量評価】プラント内線量率分布評価手法や局所線量率を実測する手法開発に加え、計量管理としての非破壊測定技術開発が行われている。

【臨界評価】燃料デブリ取出し時の実効増倍率への影響因子と臨界防止、臨界監視技術、臨界事故時の影響評価、臨界停止手段等の技術開発が行われている。

【収納・保管】キャニスター内に中性子吸収材を備えた TMI-2 の実績と異なり、最高濃縮度が約 5% と高い 1F では、同伴水量を 35vol% 以下に制限することによって収納缶内径 400mm を確保する臨界安全評価、ならびに、収容缶の強度や水素ガス管理技術開発等が行われている。

【処置】燃料デブリの化学処理に湿式および乾式再処理技術を適用する技術開発が行われてきた。溶解率の観点では、フッ化物揮発法の基礎的な成立性が確認され、Pu 試験が計画中である。

【サンプル分析】IF 廃止措置の技術開発に必要な燃料デブリの機械的特性や化学的特性等の分析ニーズが整理される一方、1F サイトに隣接した放射性物質の分析・研究施設（大熊分析・研究センター）の建設や、X 線 CT やトリプル四

重極プラズマ誘導結合質量分析装置等の最新の分析技術開発が進められている。

【長期変性挙動】事故炉の燃料デブリについて、自己照射損傷や熱応力による機械的破損、気中における長期変性挙動、浸出挙動等が観測されている。挙動評価に重要なサンプルの均質性や代表性、表面性状に加え、放射線環境下の影響も考慮した模擬デブリや使用済燃料からの核種の浸出挙動が調べられている。

3. 燃料デブリの性状に関する課題の抽出

上述の技術開発状況を踏まえ、燃料デブリ性状に関する課題を抽出した。その結果を表 1 にまとめる

表 1 燃料デブリ性状に関する主な課題

項目	主な課題
線量評価	- 事故進展過程における線量強度の三次元分布 - デブリ取出時の燃料デブリの形態変化・移行等に伴う作業地点の線量強度の経時変化 - 核燃料物質の含有量、Eu の帯同性、Cs 放出率
臨界評価	- 燃料デブリの冠水・冷却状況 - 燃焼度と燃料デブリの化学組成の位置依存性 ¹⁵⁵Gd、¹⁵⁷Gd、ホウ素、鋼材、コンクリート成分の均質性 - 粒径、密度、含水率、開/閉気孔率、熱特性 - デブリ表面で軽水からホウ酸水への置換時間 - FP ガス (Xe、Kr 等) 放出割合と放出速度 - 中性子吸収材との親和性 (短期～長期、化学的安定性、物理的帯同性)
収納・保管	- 水の濡れ性、水切り特性、乾燥特性 - 水素ガス発生挙動 - 収納缶内での長期変性挙動 - 収納缶との長期両立性 - 迅速なデブリ分別技術と判定基準 (構造物、工具等)
処置	溶解性、均質性、FP 放出挙動、プロセス成立性
サンプル分析	- サンプル取出し位置と事故進展解明との相関 - サンプルの代表性 (ミクロ⇄マクロ) - 機械的特性 (材料健全性の評価)、化学的特性 - 気中取出し時の FP 放出挙動
長期変性挙動	- 循環注水冷却による An/FP 等の浸出・移行挙動 - 各位置 (PCV、RPV、S/C 等) の環境条件 (放射線環境下、pH、陰イオン濃度等) に応じた浸出・移行挙動 - 物理化学的特性や微細構造・相構造等の変化
その他	デブリ取出し作業の安全ガイドラインの策定・指針

*Kinya Nakamura¹, Yasushi Nauchi¹, Akihiro Suzuki², Junji Matsunaga³, Kuniyoshi Hoshino⁴, Yoshiharu Sakamura¹, Yuya Takahashi⁵, ¹CRIEPI, ²NFD, ³GNF-J, ⁴Hitachi-GE, ⁵Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation