

第 42 期 (2020 年度) 第 1 回講演会 開催報告

開催日時：2020 年 9 月 18 日(金)13:00～14:30

開催場所：オンライン開催 (2020 年秋の大会、E 会場 Zoom ルーム 5)

講師：日本原子力研究開発機構 廃炉環境国際共同研究センター(CLADS) 炉内状況把握
ディビジョン
ディビジョン長 倉田 正輝

演題：OECD/NEA における 1F 事故以降の国際研究プロジェクトの現状

参加者：2020 年秋の大会参加者オンラインにより 52 名

特に 1F 事故以降、OECD/NEA の原子力科学委員会にて活動をされ、TAF-ID、TCOFF の二つのプロジェクトの立ち上げに携わり、TCOFF では議長を務められているほか、事故耐性燃料に関しては、EGATFL タスク 3 のリーダーを務められている、JAEA の倉田ディビジョン長からご講演をいただいた。

(1) OECD/NEA の構成

OECD/NEA の委員会は 7 つの委員会で構成され、安全研究は CSNI (原子力施設安全委員会)、その要素、基盤的なものが NSC (原子力科学委員会) で議論されている。委員会の下には、常設作業部会 (ワーキンググループやワーキングパーティ) が置かれている。重要課題にはアドホックな専門家会合が設置される。具体的なプロジェクトには、メンバー国が費用を拠出する。ファンド拠出型であれば期間は 3 年までを原則とし、2 回各 1 年間までの延長(すなわち最大 5 年)が可能である。CSNI でのプロジェクトは、WGAMA (事故解析とマネジメントワーキンググループ) が全体を総括している。

(2) CSNI を中心とする活動

a. SAREF (1F 事故以降の安全研究に関するシニア会合)

課題とギャップから今後の安全研究を検討し、1F の技術的サポートに資する会合として、2013 年から 2016 年に行われた。メンバーは 14 の国の規制機関及びその技術支援機関で構成された。

短期と長期に課題を分類し、研究分野の優先度の評価は、安全研究と廃炉の観点で優先付けを行っている。短期課題については具体的な提案を行う一方、長期に関しては、炉内現象、炉外現象、CV (原子炉格納容器) 破損とベントなどについて 1F 廃炉の進捗を考慮しつつ情報交換を継続することとしている。

SAREF での検討に基づき、短期課題は、PreADES と ARC-F の二つのプロジェクトに集約された。長期課題については、2021 年 12 月に 2 号機のデブリ取り出しが始まる計画であることを背景として、SAREF2 の再開を検討する段階に至っている。

長期的課題としては、制御棒ブレード破損の影響評価、RPV 下部の破損メカニズム

の検討、原子炉圧力容器外へのデブリの落下様態、FP データベースの拡充等の重要性が指摘されている。

b. BSAF/BSAF2 (1F 事故進展に関するベンチマーク研究)

BSAF では事故後 6 日間について既往のシビアアクシデント解析コードを用いて評価を行った。BSAF2 では事故後 21 日間に範囲を拡大し、さらに現場知見を参照して解析精度を向上させた。

BSAF は日本を含む 8 か国が参加した。事故時熱水力のベンチマーク解析を行ったところ、炉心溶融開始時点までは、様々な解析コードの解析結果がほぼ一致した一方で、炉心溶融した以後（炉心形状が変わった以降）については、メルトダウンやメルトスルーの時期、デブリ分布や水素発生量、MCCI について大きくばらつく結果が得られた。しかし、解析結果を比較することで課題が抽出され、事故後の炉内状況推定に役立つ情報が得られた。

BSAF2 は 11 か国 16 機関が参加した。BSAF2 では、現場情報を参照して境界条件を見直したことで評価精度は著しく改善した。それでも、1 号機では、炉外デブリのドライウェルへの広がり重要な未解明問題として残された。また、号機に共通する重要未解明課題として RPV 下部の壊れ方や MCCI におけるコンクリートの深さ方向の侵食状況があがっている。FP 解析については、1F 現場データを参考に入力初期条件を与えても大きなばらつきが残された。大きな原因として、現状モデルでは環境放出を保守的に評価する評価式が組込まれており、事故進展の影響を受けて炉内の化学環境が変わると FP 挙動に影響する点が考慮されていないためとされている。BSAF2 により、事故進展と最終段階の知見を拡充でき、現場手掛かりからの評価と工学的分析で得られた知見が解析モデルの実用性を大きく向上させることができた。

c. PreADES (燃料デブリの分析に向けた準備研究プロジェクト)

短期的プロジェクトとして、デブリ分析に向けた準備研究をおこなう。予想されるデブリ特性のとりまとめ、研究課題の同定、国際協力立案を目的とする。COVID-19 の影響のため、プロジェクト期間が、2020.12 まで延長されている。来年、報告書が公開される予定である。

今年度から、1F 堆積物の中の U 粒子の特性評価に関する共同タスクフォースが立ち上がり、7 か国 9 機関が参加している。1F 堆積物サンプルは一つ一つの分析結果にはばらつきがあるが、系統的に整理することで、燃料デブリの特徴に係る知見が得られると期待されている。

d. ARC-F (1F 建屋と格納容器から得られる情報の分析プロジェクト)

短期的プロジェクトとして、1F 事故進展の解明、1F サンプル分析結果を用いた建屋・格納容器内の現状の理解、シビアアクシデント解析手法の現場知見による改良に向

けた情報交換などを取り扱う。来年12月までの予定で、12か国22機関が参加している。

e. ROSAU（シビアアクシデントの不確かさ低減に向けたプロジェクト）

原子炉圧力容器から流出する溶融炉心物質の格納容器内での広がりの評価にフォーカスした資金拠出型プロジェクトである。1Fの2号機では、米国スリーマイル原発事故で発生したような炉心物質が完全に酸化した燃料デブリ以外に、金属系デブリによるメルトスルーが生じた可能性が検討されている。従来未検討であった金属系デブリによるMCCIの検討や、金属系デブリを含む燃料デブリの原子炉圧力容器から格納容器への移行や広がり、落下デブリの冷却性や水中での広がり方などを検討する。プロジェクト期間5年間で提案され、8か国が参加している。米国施設で大型の模擬試験も行う計画である。

(3) NSC（原子力科学委員会）を中心とした活動

a. TCOFF（1F事故解析結果を参考にした燃料デブリとFPの熱力学的な特性評価プロジェクト）

BSAFなどでは熱水力ふるまいを中心に評価が進められた一方、熱力学・材料科学の観点での議論は十分でなかった。TCOFFでは、シビアアクシデント解析の専門家だけでなく材料基礎科学の専門家を交えたシナジーにより、燃料デブリ特性評価に役立つ熱力学データを採取し、燃料デブリや溶融燃料の特性評価、FP挙動などを対象とする。廃炉研究を基礎科学専門家にもまで拡充し、その加速化をねらう観点で、プロジェクト予算（約72万ユーロ）は文科省から拠出されている。予算のおよそ1/2は研究基金とし、各国の大学の研究協力を得ている。TCOFFには11か国18機関が参加しているが、その活動は国内外で高く評価され、各国が予算を分担する形式に変更してTCOFFフェーズ2として継続する検討が進んでいる。

・タスクフォース1：燃料とコリウム

熱力学データベースのベンチマークにより材料科学的課題を抽出すること、U-Zr-Oの状態図についての検討、多元系での溶融物質の検討、これらの基礎知見による1F事故の評価などの活動を実施した。その成果に基づき、上述したように、PreADESに共同タスクフォースを提案している。

・タスクフォース2：FP

事故時の化学状態がFP挙動に影響することから、Csと鋼材の反応やCs複合酸化物などの化学的な状態の情報を新たに取得・整理、中揮発性のSrやBa等のデータ拡充、FP浸出について意見交換、等を実施した。

・ TCOFF ワークショップ

令和元年7月に、福島県浜通りにおいて、TCOFF での専門家意見交換を発展させ、材料科学的な基礎知見をシビアアクシデント解析や廃炉に向けどのように活用するかをテーマにワークショップを開催した。25 か国から 134 名の参加を得て盛況に開催された。人材育成・技術継承の観点でも、TCOFF 活動の有用性が確認された。

b. TAF-ID (先進燃料に関する国際熱力学データベースプロジェクト)

国際汎用の熱力学データベース開発・整備に特化したプロジェクトである。元来、高速炉やガス炉の燃料など先進燃料開発に向けて国際的な熱力学データベースを作るため、2013 年からフェーズ 1 が始まり、現在フェーズ 2 が進んでいる。1F 事故を踏まえて、日本から開発範囲に軽水炉燃料や燃料デブリも含めることを提案した。参加機関は、カナダ、フランス、EU、韓国、オランダ、英国、米国、日本である。データベースは、現在 ver.8 となっており下記サイトで公開版を参照できる。

<https://www.oecd-nea.org/science/taf-id>

c. EGATFL (軽水炉事故耐性燃料に関する専門家会合)

1F 事故後 ATF (軽水炉事故耐性燃料) が非常に注目された。NEA 主催で ATF に係る国際研究協力に向けたワークショップが開催され、CSNI と NSC の両委員会が協力する形で EGATFL が立ち上がった。材料科学の専門家が多く参加することから NSC 傘下のプロジェクトに位置付けられ、2017 年に終了した。日本からは、JAEA、電中研、東芝、NFD、京大、室蘭工大、が常時メンバーとして参加し、三菱重工、日立 GE、原燃工がオブザーバ参加した。

ATF は開発目標や方針が大きく異なる様々な概念があり、それらを公平性を確保しながらどのように技術評価するのかが課題とされた。EGATFL の検討結果は、各国で研究予算を適切に配分するためのガイドラインとなっている。EGATFL では、ATF を大きく、改良型概念 (revolutionary concept) と革新型概念 (evolutionary concept) に区別して、技術の現状と課題を評価した。改良型概念は Cr コーティングジルカロイ被覆管や Cr₂O₃ 添加 UO₂ ペレットに代表され、現状技術 (ジルカロイ被覆管と UO₂ ペレット) の改良に基づく概念である。革新型概念は、改良ステンレス鋼被覆管や SiC 被覆管あるいはシリサイド燃料、窒化物燃料に代表される概念である。

参加は、NEA 加盟の 14 か国 35 機関からであり、プロジェクト当初は中国からの参加もあった。プロジェクト期間中に米国で政権交代があり、途中から中国の参加が拒否されることとなった。

ATF 被覆管と先進燃料について、AOO (通常運転時及び過渡状態)、DBA (設計基準事故)、DEC (設計拡張条件、基準事故を超えた条件)、燃料サイクル課題の 4 つについて最新の技術知見を取りまとめた。ATF の技術成熟度 (TRL : Technology Readiness level) 評価の指標を定め、要素概念の TRL 評価も実施した。3 つのタスクフォースで

構成され、ATF 技術の評価手法、被覆管候補技術の各論、先進燃料技術の各論をそれぞれ取り扱っている。ATF 技術評価のための典型シナリオとしては、2 つのハンドオフシナリオ（ATF 以外の安全設備や運転員のアクションを考慮しないシナリオ）として、1 F 事故型の SBO（Station Blackout）と、より温度の高い段階で破損する大破断 LOCA を選定している。2017 年段階の最新技術がとりまとめられ、報告書として公開されている。

質疑応答

Q：組織について伺う。複数の委員会のもとに多数のプロジェクトが存在している。国際的なプロジェクトを効率的に進めるにあたってはコミュニケーションが重要と考えるが、各プロジェクトには共通するメンバーがいるのか、それともそれぞれ異なるメンバーで構成されているのか？

A：安全にかかわる研究課題については、WGAMA が母体となり、年 2 回の年次会合などで、適切なメンバー構成も含めて情報交換される。総論的な議論を WGAMA で行ったうえで、各プロジェクトでの検討に分かれていく。

Q：1 F 事故の BSAF での解析結果を踏まえて、必要となった試験や評価を他の 1 F 関連プロジェクトで実施していく場合、どのような連携がされているのか？

A：1 F 関連プロジェクト相互での情報交換は、現在、PreADES の下にジョイントインフォメーションセッションを設置し、そこで情報交換をしている。

Q：U-Zr-O の共晶モデルについて、MAAP では従来の古い状態図に基づく評価モデルを用いていたため、実現象の評価精度を向上するにはコードのチューニングが必要とのことだった。また、BSAF と BSAF2 の二つのプロジェクトにおいて、炉心形状が崩壊する前の初期段階ではコードの違いに依らず解析結果がほぼ一致するが、炉心形状が崩壊した後は境界条件に実機データを反映させることで精度が上がったとの話があった。解析コードの精度向上を図るには、実データの取り込み、コードのチューニング、物理モデルの改良の三つ巴で考えることが必要なのではないか？

A：ご指摘の通り。機構論的なモデルを緻密に組立て、それを解析コードに組み込むのは適切ではない。材料科学的に燃料溶融の評価精度を向上させる取り組みを行った上で、シビアアクシデント解析コードのニーズに基づいて適切な単純化を行い、かつ、模擬試験等で検証していく必要がある。一方、下部プレナムで起こりうる溶融炉心が構造材(Fe)と反応するモデルは現状のシビアアクシデント解析コードには十分に組み込まれておらず、材料科学的な検討でその重要性が指摘されている。このような現象についても、機構論的なモデルを考えた上で、解析コードへの適切な反映について検討する必要がある。

C：ある程度、機構論モデルは要るが、実用面では、シビアアクシデント解析の不確かさの範囲内に実際の事故進展シナリオが入ることが重要である。2号機、3号機での圧力容器の下部の穴の開き方についての違いなど、従来の評価でつかめなかったことが見え

てきたことは素晴らしい成果であり、今後に期待する。

Q：1F 格納容器内部調査で得られた映像による情報が取れた後、本日伺ったような知見がすぐに得られたのか、そのような映像が得られる前から、ある程度予想できていたのか？

A：材料学的な予備評価で、2号機の金属デブリの先行溶融や3号機の固液混合物の移行や堆積など、TMI 事故と異なる事故進展は可能性としては考えられていた。しかし、内部情報が得られる前は、いくつも考えられる可能性の一つであった。現場情報が得られることで、材料科学的な評価結果の活用範囲が拡充され、相乗的に有用な知見が増えてきている。

Q：事故時の海水注入がデブリに対して与えた影響はどのようなものか？

A：海水注入のタイミングと量は1，2，3号で違う。これが、燃料デブリの圧力容器下部プレナムや格納容器ペデスタル部での堆積状態に大きな影響を与えたと考えられている。また、海水に含まれるCa/Na等の成分の影響については、事故直後には、これらがUと反応して燃料デブリの特性に影響しないか、特殊な化学物質が形成されないかとの懸念があった。燃料デブリ本体のサンプルはまだ分析できていないが、これまでに得られた燃料デブリ周辺のサンプルの分析結果をみると、海水成分とUの反応はあまりないといえる。むしろ、構造材やコンクリートとの反応については見ていく必要があると認識している。