

デブリ臨界安全に関するフォローアップセミナー開催の報告

炉物理部会 学術交流小委員会

担当幹事(任期) 日本原子力研究開発機構 大泉 昭人(2018-2019)

テプコシステムズ 阿萬 剛史(2019-2020)

東北大学 相澤 直人(2020-2021)

東日本大震災で発生した福島第一原子力発電所(1F)の事故から、2020年3月で9年が経過した。1Fの1-3号炉では、燃料は破損・溶融し、燃料デブリの形で原子炉・格納容器などに存在すると考えられていたが、2019年には実際に2号炉のデブリへの接触到成功するなど、少しずつ炉内の状況が明らかとなり、燃料デブリの取出しに向けた研究開発が着実に進められている。燃料デブリは、現状、希ガスの監視等により未臨界状態であることが確認されている。今後の水中あるいは冷却材かけ流し状態での燃料デブリの取出し作業、燃料取出し後の収納、輸送、保管に至るまで、燃料デブリの特徴とその不確かさを踏まえた様々な条件・シナリオを想定し、引き続き未臨界を維持することが重要とされる。

事故から本日に至るまで、日本原子力学会において、産学官の各立場から燃料デブリの臨界安全に関わる検討内容が報告されてきた。しかし、2013年秋の大会の炉物理部会企画セッション「燃料デブリ取出に向けた臨界安全における課題」以降、個々の研究成果発表時の議論はあったものの、同企画セッションのようにある程度の時間を設けた、燃料デブリの取出しにおける具体的な炉物理分野で貢献すべき課題の抽出・議論が不十分であった。これを受け、2020年秋の大会の炉物理部会企画セッションのテーマとして採用され、燃料デブリに関する最新情報、これまでの研究開発から明らかになった新たな課題、今後取り組むべき課題の方向性と優先順位が、国内の炉物理研究者間で共有された。

本セミナーは、上述の企画セッションでの議論内容についてさらに掘り下げるべく開催され、1Fの燃料デブリの取出しにおいて炉物理分野で貢献すべき課題を確認し、優先順位の高い今後の研究・技術開発課題を部会員で共有することを目的とした。まず、辻本和文部会長より開会挨拶に始まり、その後、名古屋大学 遠藤知弘氏より、2020年秋の大会の企画セッションで講演、議論された内容について紹介があった。遠藤知弘氏には引き続きモデレーターとして登壇いただき、京都大学 中島健氏、原子力損害賠償・廃炉等支援機構(NDF) 阿部守康氏、国際廃炉研究開発機構(IRID) 中野誠氏、日本原子力研究開発機構(JAEA) 外池幸太郎氏の4名(順不同)をパネリストに迎えた形で、パネルディスカッションが行われた。最後に、中島健氏による閉会の挨拶で幕を閉じた。なお、本セミナーは、専門的に踏み込んだ議論を行う場とするため、一般には公開しない Closed で開催され、かつ新型コロナウイルスをめぐる状況を鑑み、ZOOMでの開催となった。初の試みではあったが、43名が参加し、活発な議論が行われた。以下、各セッションの詳細を紹介する。

企画セッションのおさらいと論点の整理

はじめに、名古屋大学 遠藤氏より、「企画セッションのおさらいと論点の整理」とのタイトルで講演がなされた。

企画セッションのおさらいとして、2020 年秋の大会の 3 つの講演の概要が整理された。また、セミナーで議論する内容について、以下の 5 つの論点が示された。

論点 1：達成すべき目標

デブリ取出時の臨界管理で達成すべき定量的/定性的な目標は何か？

論点 2：1F デブリ取出し時の臨界管理

組成や幾何形状・非均質性等の不確かさが大きい状況において適用可能な臨界管理の考え方は？

論点 3：臨界リスク

再臨界に至るイベントの発生確率・影響がどの程度の小ささ・規模なら許容できるのか？

論点 4：判明した知見の活用方法

再臨界の発生確率を下げたり、再臨界発生時の影響を緩和したりするためには「どのような情報」を得る必要があるのか？また、判明した知見を「どのような方法論」によって臨界管理に活かすのか？

論点 5：今後必要となる技術・検討

燃料デブリ取出しの臨界管理で必要となる技術として、今後どのような技術開発や検討が必要となるか？

パネルディスカッション

遠藤氏の「論点の整理」で示された 5 つの論点に沿って、議論がなされた。議論はパネルディスカッションの形式で実施された。

以降では、遠藤氏より提示された各論点の主題および議論のポイントに対すパネリストの意見、参加者による議論内容の要約をそれぞれ示す。

論点1：達成すべき目標

<議論のポイント>

● デブリ取出時の臨界管理で達成すべき定量的/定性的な目標は何か？

まず、達成すべき大きな目標として、安全に、短時間で、あまり余計な廃棄物を出さずに、取り出せる限り燃料デブリを取り出すことが挙げられた。また、臨界を防止するとともに、万が一臨界事象が発生した場合でも異常な被ばくを防ぐこと、臨界事象が起きたとしても廃炉作業に遅延を生じさせないようにすることが挙げられた。また、燃料デブリ取出しとは、燃料デブリをより管理された状態にすることであるという考えが示された。

以下には、遠藤氏の提示した3つのリスク（①原子力安全に関わるリスク、②廃炉作業に要する期間・費用、③風評被害によるリスク）のそれぞれについて、出された意見を掲載する。

① 原子力安全に関わるリスク

原子力安全の目標が不明確だと、期間・費用に直結する安全対策が過剰から過少に大きく振れる。原子力安全の目標は安全対策（期間、費用）の過少、過剰双方への歯止めとなり重要であるとの意見が出された。

定量的目標として考えるべき対象としては公衆と作業員の被ばくであり、通常の発電炉の被ばくリスク以下である必要があるとの意見が提示された。

IRIDにおいても、公衆と作業員の被ばくについては、通常の発電炉と同程度の被ばくリスクから検討をスタートしている。

作業員の被ばくと公衆の被ばくについての定量的目標は一意に決まるものでないとの意見も提示された。次に示す制限を満たしたうえで定量的目標を最適化していくとの提案がなされた（「事故」とみなすべき事象に対しては公衆 5 mSv/事象、作業員 100 mSv/事象。「事故」とみなすべき実態がない事象に対しては公衆 1 mSv/年、作業員 100 mSv/5年）。

② 廃炉作業に要する期間・費用

デブリ取出し作業全体で定める目標であり、臨界管理においては制約条件となる。いたずらに作業期間を延長できないので、廃炉作業に要する期間・費用を制約条件として、臨界管理の方法を考えていく必要があるとの見解が示された。

一方、臨界に至ると作業が停滞する可能性があり、万が一臨界に至ったとしても遅延が生じない程度に影響が小さくなるように臨界管理ができないかとの意見が示された。

③ 風評被害によるリスク

原子力安全確保を前提にいかに社会的理解を得るかが重要であることが示された。

また、これに関連して、リスクコミュニケーションについての発話があった。事業者や規制委員会だけではなく、専門家集団としての学会からも提言をしていくべきとの意見があった。

論点2：1F デブリ取出時の臨界管理

<議論のポイント>

- 組成や幾何形状・非均質性等の不確かさが大きい状況において適用可能な臨界管理の考え方は？

中島氏からは、通常の臨界安全は臨界の発生を防止することが主眼となるが、福島第一のデブリ取出しでは、臨界を防止するとともに、臨界発生時の適切な緩和措置を講ずることが重要であり、これをセットにした「臨界管理」という考え方が重要となることが述べられた。臨界を防止するという観点では、最初はかなり保守的な条件から、データが取得されるにつれて徐々に保守性を緩め、最終的には現実的な条件にもっていく。それを実現するためには、迅速なデブリ分析技術や、得られたデータに基づき臨界評価を即座にやり直すようなデータベース・ツールの開発が必要である。一方、臨界発生時への対応としては、緩和措置により、事故とみなさないレベル（許容されるレベル）に抑え込むことが必要との意見が出された。

これに対して外池氏より、核的制限値の設定・管理で確実に臨界防止することは、中性子毒物濃度を厳格に管理できない限り難しいことが述べられた。未臨界監視を決定論的方法に組み込むことが可能かとも考えたが、その場合には、未臨界監視技術の妥当性確認が極めて高いハードルになるとのことであった。

阿部氏からは、臨界への余裕把握を誤っても、影響がごく軽微な一時的な臨界に留まることを担保するロジックとすることが提案された。そのためには、操作中の中性子計数率を連続監視することで、臨界継続を防止する（最悪でも一時的な臨界超過に留める）こと、デブリ操作について、操作時反応度印加が微小で状態変化が緩やかであることを確認する、あるいは作業をそのように設計することが提案された。

中野氏からは、組成や幾何形状の不確定性は大きいですが、保守的な厳しい条件を設定して管理方法・管理をしていくことが提示された。ただし、燃料デブリをこのままの状態でも長期間置いておくこと自体もリスクであると考ええると、臨界管理側で不明だからといって、いたずらに保守性を盛り込み過ぎるのも正しくないこと、ある程度は現実的な条件を踏まえた上で管理方法を考えていく必要があることが述べられた。また、現実的

条件による推定結果が万が一外れた場合の対応・確認法を組み合わせしていくのが基本的な考え方となること、現実的な条件で臨界評価を実施し管理方法を決めたとしても、それと計測・監視でバックアップする必要があること、デブリ状況の不確定性が大きいこと、複数の管理手段を準備しておく必要があること、が述べられた。不確定性が大きいこと、そのため長いスパンでの外挿は避け、段階的な取出し拡大、すなわち短いスパンで比較的良好に見通せる範囲で管理方法を見直していくことが一つの考え方であると述べられた。

論点3：臨界リスク

<議論のポイント>

● 各デブリ加工工法について

① 想定される再臨界に至るシナリオは？

複数のパネリストから、「作業時の添加反応度の大きさは様々な要因（核燃料物質量、H/U比、デブリ組成（含有Gd組成）、吸収材濃度、幾何形状）によって異なること」、「有意なリスクを伴う再臨界に至るケースとしては比較的大きな堆積デブリの体系に上部からデブリが大量崩落することで急激に大きな反応度が添加されるケースが考えられるが、それ以外は定性的には有意なリスクを伴う再臨界の可能性は低いと考えられること」の意見があり、この点は全パネリストでコンセンサスが得られていた。また、阿部氏から、臨界シナリオとしては、「作業に伴い発生が想定されるシナリオ」と「稀に発生する要因（地震など）で想定されるシナリオ」は区別して考えるべきとの意見があった。

② 1回作業当たりの臨界リスクを評価可能か？

リスクを「発生確率（頻度）と影響度の関数」と考えた場合、IRIDの考えとして、発生頻度の評価は難しいが、取出し作業にて必然的に発生する事象（切削・加工、切削粉体積など）の方が相対的に発生頻度は大きいとし、相対的な発生頻度に基づき影響度の大きいシナリオを検討している、との話があった。また、阿部氏からは、先の「作業に伴い発生が想定されるシナリオ」としては、作業に伴い発生が想定されるもの（切削等によるデブリの加工工法によるもの）とそれ以外があり、後者は、発生確率を予見したり臨界発生場所を特定したりすることが難しく、検出器位置等の問題から臨界防止のための管理が難しい、との話があった。

影響度に関しては、IRID中野氏から、デブリの加工方法による反応度影響の評価を実際に行っているとの話があり、一例として表面を薄く切削するレーザー加工の方が直接デブリを砕くボーリング加工より反応度添加は小さいとの話があった。また、阿部

氏からは、「デブリ加工は連続した中性子監視下での作業を前提としていることから、臨界兆候が確認される最小単位の加工工程で作業を停止が可能なので、臨界事象の評価は最小加工単位による影響を考えれば良く、最小加工単位によるそれぞれの反応度に対する影響を比較することで、臨界シナリオのリスクの大小の比較が可能」との話があった。

しかしながら、想定外の場所での臨界の発生の可能性はあるため、想定箇所から離れた場所でのデブリの堆積の可能性も考える必要があるとの議論があった。

③ 各工法の相対的なリスクの大小を比較すること、あるいはリスクレベルと併せた形で作業シナリオの選択肢を提示可能か？

まず、デブリ取出し作業の前提として、連続した中性子モニタによる臨界監視下で行われ、臨界兆候が確認された際には速やかに作業の停止・臨界事象の緩和措置が行われることが複数のパネリストから示された。(注：現状では、PCV 内の FP ガスはガスモニタにより測定されており、PCV 内で臨界が発生した場合には、ガスモニタで臨界を検知し、緊急用ホウ酸水を注入する仕組みが運用されている。)

臨界リスクの評価のための情報として、外池氏からは、現場で観測された様々な情報を良く見て、作業することで状態がどのように変わるのか、という観点から始めることが重要であるとの意見が示され、中島氏からは、最初は少量のデブリを取扱い、その後は性状のサンプリング結果等を踏まえて不確実性を縮小しながら取扱量を増やすべき、との意見が示された。デブリのサンプリングによる性状分析については、外池氏より、初期の小規模取出しではサンプル採取による破壊分析による組成分析を行うと考えられるが、段階的に分析の規模を大きくするためには非破壊分析によって作業する必要がある、との話があった。(注：その後の議論にて、現時点では破壊分析による組成分析は最短 1~2 ヶ月かかるため、今後非破壊かつ迅速に測定する手法の開発が必要、とのコメントあり。)

各工法の相対的なリスクについては、前述の通り「最小加工単位での反応度に対する影響を比較することで、臨界シナリオのリスクの大小の比較が可能」であり、影響度は工法毎に IRID にて評価が進められているが、臨界リスクの管理に当たっては、「臨界リスクの管理並びにリスクの低減に関して、段階的に管理を変えていくというより、取出時デブリの観測結果に基づいて動的(ダイナミック)に管理を変えていく必要がある。

(外池氏)、「臨界防止のためにこの加工方法を使って下さいと提案するというよりも、この加工方法を使用するにはこういう制限値を守って下さいといった各加工工法に対する(臨界防止のための)要求を出すことが求められる。(中野氏)」との意見が出された。

- 再臨界に至るイベントの発生確率・影響がどの程度の小ささ・規模までなら許容できる

のか？

論点 3 では、具体的な発生確率・影響の許容値に関する具体的な議論はなかったが、論点 1 の議論にて、「臨界になったから NG ではなく、作業被ばく線量や敷地境界線量の線量に基づく評価の必要性」についての話があり、臨界リスクについてもそのような基準による作業時の運用が考えられる。

論点 4 : 判明した知見の活用方法

<議論のポイント>

- 再臨界の発生確率を下げたり、再臨界発生時の影響を緩和したりするためには「どのような情報」を得る必要があるのか？

全パネリストから、デブリの組成・性状の情報（核種組成、密度、U・Pu 濃度、含水率等）の情報が重要であるとの説明があり、とりわけ中性子吸収材・毒物 (Gd)、fissile 以外の構造材等の核種の混合割合の情報の重要性が述べられた。そのための分析に関して、現状では破壊測定が考えられるが、短時間での分析手法（非破壊による組成分析・中性子寿命の測定等）の必要性が述べられた。

作業時の臨界検出・緩和措置の実行のために、臨界監視モニタ（中性子モニタ、炉内ガスモニタ）や冷却材温度等の情報が必要であるが、臨界監視に関しては炉雑音法や中性子源増倍法等による評価結果の信頼性が課題であるとされた。（注：論点 3 の議論にて、中島氏より、臨界近傍ないし臨界超過時には精度良い検知が期待できるのでは、との話があった。）また、中野氏より、中性子モニタの活用として、中性子束空間分布を測定することにより、フラットなのか、凹凸があるのか等の分布情報を測定することで、体系がどれくらい非均質かを調べることができないか、との意見があった。阿部氏からは、最小加工単位の印加反応度・温度反応度係数の情報が必要、との意見があった。

- 判明した知見を「どのような方法論」によって臨界管理に活かすのか？

得られる組成・性状情報については、サンプル数が限られることから、データの代表性に対してパネリスト・参加者から広く懸念が示され、阿部氏からは「もっと情報が得られれば、と言いつけて問題の先送りをしていないか」、との意見が述べられた。データの活用方法としては、シビアアクシデント (SA) コード等の事故進展解析手法による推定結果との組み合わせ（注：外池氏によれば、SA コードの専門家の意見としては、臨界リスクに対して現時点で解像度の良い結果を得ることは難しい、とのこと）、ベイズ推定や Kriging 法やデータ同化法（測定結果を取り入れて、数値計算による予測結果の不確かさを低減する方法論）等の手法を用いたデータの強化等が意見として出された

が、まだまだ原子炉工学・炉物理分野でそのような技術を上手く共有できていないと思われることから、今後炉物理だけでなくマルチフィジックスな観点も取り入れつつ検討していく必要があることが参加者で共有された。

論点5：今後必要となる技術・検討

<議論のポイント>

- 燃料デブリ取出し時の臨界管理で必要となる技術として、今後どのような技術開発や検討が必要となるか？

① 計測・測定技術

全パネリストより、非破壊による迅速なデブリ性状の分析技術をはじめ、1F建屋内の限られた空間や条件で使用可能な高放射線環境下での測定・運用技術ならびに、それらの測定データを元にして、即座に臨界性を評価できる技術（裕度や不確かさの定量的提示、様々な要因の補正技術含む）の必要性が叫ばれた。また、変形などのデブリの力学的特性の評価技術の必要性についての提言があった。

② 計算科学技術

上記の臨界性評価に関連して、デブリの代表性の検討と不確かさ・余裕を検討するための計算手法や評価手法の必要性に関する意見が複数のパネリストからあった。それらの臨界性への影響に関して、それらの知見から保守的仮定を排除するための手法や、臨界時に緩和措置を実行するための合理的な中性子吸収材投入量の評価につなげる必要性についての意見があった。

また、外池氏より、JAEAにおける、組成のムラや非均質性などに対する核特性への影響を解析するための Solomon コードの開発への取り組みに関する紹介があった。

③ リスク評価手法

外池氏より、JAEAの検討として「実際のデブリ時の状況から工程を検討し、それらの情報を元に評価手法を組み立てる方針」との話があった。その他は、特に論点5において意見・議論はなかったが、論点3にて議論された内容がリスク評価手法として求められると考えられる。

④ その他

阿部氏より、臨界管理に関して、結局は人が監視して操作することが現実的かつ確実であり、施設運営者の技術・能力（中性子増倍過程の知識と豊富な臨界操作、反応度制御の実経験）の向上が重要である、との意見があった。加えて、議論の中で、「今まで炉物理の知識だけでできることには限りがあり、貪欲に色々な知識を入れていく必要がある」との意見が出された。

総合討論

論点3：臨界リスクに関する議論として、発生確率と影響度のうち、発生確率を定量的に評価することの難しさについての意見があった。それに対して、頻度を定量的に評価することにそれほど注力する必要はなく、関係者が認識できる範囲（例えば、日常で起こる可能性がある範囲と、悪条件の重なりで起こる可能性がある範囲）で大まかに分ければ良いのでは、との意見が参加者から出された。

また、参加者から、1Fのリスクは臨界リスクだけではなく経年変化によるペDESTAL崩落などの他のリスクも存在することから全体的な視野でリスクを検討する必要があること、リスクを考える際には時間積分されたリスクとピークリスクを考える必要があることのコメントがあった。加えて、燃料デブリのサンプリング分析ではコストや制限があることから、欲しい情報に関する必要性（何のために、何が欲しくて、何に活用して、どのような成果が得られるのか）を明確に情報発信する必要がある、との意見が出された。

外池氏からは、臨界安全は、炉物理的な増倍率基準の評価ではなく、プロセス量（濃度・質量・サイズ）で管理し、臨界事象が発生した場合には fission 数と線量で管理するなど、局面で管理する量が変わることが特徴であることを理解する必要があるとの意見があった。

複数の参加者からの意見として、1Fでの事故の扱い（事故とみなす実態が無い事象や想定内の臨界の扱いなど）についての意見が出され、臨界リスクの中での基準（敷地境界線量や作業員被ばく線量など）の設定について今後議論を進めていく必要があることが共通の認識として得られた。

最後に、廃炉に携わる様々な専門家・技術者・学識者ならびに次代を担う学生が、このような場で組織を越えて意見や情報を交換することの重要性、今後もこのような機会を継続的に設けることの必要性が共有された。