

2022 年 11 月 9 日

早稲田大学ふくしま広野未来創造リサーチセンター

## 第 21 回 1F 廃炉の先研究会 議事録

日時： 2022 年 10 月 27 日 18:00-20:10

方法： オンライン (Zoom)

出席者: 31 名

### 講演者:

倉田正輝：JAEA 廃炉研究プランナー

### 研究会メンバー:

#### 研究会代表

松岡俊二：早稲田大学大学院アジア太平洋研究科・教授

#### 研究会副代表

崎田裕子：NPO 法人・持続可能な社会をつくる元気ネット・前理事長

森口祐一：国立環境研究所・理事

#### 研究会メンバー

井上 正：電力中央研究所・名誉研究アドバイザー

黒川哲志：早稲田大学社会科学総合学術院・教授

菅波香織：未来会議・事務局長（途中参加）

高橋洋充：福島県立福島東高等学校・教諭、福島県浪江町

永井祐二：早稲田大学環境総合研究センター・研究院教授

柳川玄永：三菱総合研究所原子力安全事業本部復興・再生グループ・主任研究員

吉田恵美子：NPO 法人・ザ・ピープル理事長、いわきおてんと SUN 企業組合・代表理事

小林正明：中間貯蔵・環境安全事業株式会社・社長

(欠席)

笠井智貴：早稲田大学法学部・1 年、福島県いわき市

佐藤亜紀：HAMADOORI 13・事務局長、福島県大熊町

鈴木知洋：福島県立ふたば未来学園中学校・高等学校教諭

遠藤秀文：株式会社ふたば・社長

宮野 廣：日本原子力学会・福島第一原子力発電所廃炉検討委員会・委員長

小野田弘士：早稲田大学大学院環境・エネルギー研究科・教授

### オブザーバー:

関口雅浩：1F 地域塾、南相馬市

井出大雅：1F 地域塾、(株)ふたば、富岡町

宇野朗子：1F 地域塾、U. Lab Japan

新妻竹彦：1F 地域塾、漁業者、いわき市

金澤好孝：福島県ロボット産業推進協議会

島 明美：福島県伊達市議員  
森重晴雄：福島事故対策検討会  
後藤政志：元東芝原発技術者、原子力市民委員会委員  
寿楽浩太：東京電機大学工学部教授  
溝上伸也：東京電力  
岡崎 誠：東京電力  
池辺 靖：日本科学未来館  
藤川正浩：NHK 制作局  
任 羽佳：早稲田大学大学院アジア太平洋研究科・博士課程

## 事務局

山田美香：早稲田大学ふくしま広野未来創造リサーチセンター・福島駐在・次席研究員  
朱 鈺：早稲田大学大学院アジア太平洋研究科・博士課程  
松川希映：早稲田大学大学院アジア太平洋研究科・修士課程  
李 洸昊：早稲田大学大学院環境・エネルギー研究科・講師

司会：崎田裕子（研究会副代表）

## 議題：

### 1. 講演：1F 廃炉に向けた燃料デブリ特性の理解

倉田正輝：JAEA 廃炉研究プランナー  
（報告内容は報告資料を参照ください）

【質疑・総合討論】（研究会は研究会メンバーの発言、オブザーバーはオブザーバー出席者の発言です）

オブザーバー：資料 P31 の図では、青い線が何もしない場合のリスクの変化を示しており、それに対し、1F 廃炉作業の際はオレンジの線になるのか灰色の線になるのかは、リスク間のバランスに関わると思われる。そもそも、何もしなくてもリスクが下がるのはなぜか。また、リスク間のバランスの取り方について意見を頂きたい。

倉田：時間の推移とともにリスクが低下するのは、熱・放射能等デブリの持っている潜在的な毒性が時間経過で次第に減っていくからである。それが長期的にリスクが低下していく最大の理由である。

リスク間のバランスの取り方が鍵である。速く廃炉を進めようとしたら、オレンジの線のようなリスクのラインになり、安全裕度を抑えて工程を進めることになる。一方、安全裕度を大きめに取ると、灰色の線になる。安全裕度をいっそう重視する灰色の線であれば、時間がかかり、潜在的なリスクに対していろいろな付加的な設備をつけないければならないかもしれない。安全リスクと長期化によるコスト増加のバランスも考えなければならない。また、建屋の腐食や、自然災害などで現状が大きく変わる可能性もあり、時間経過による許容できないリスク範囲の増加も考える必要がある。

オブザーバー：このような知見や研究内容が、1F 廃炉にどのように役立つのか。先ほどの時間やコストの話も含めて、教えて頂きたい。

倉田：リスクのバランスを考慮し、最初は安全裕度を厳しくしていたが、現場の状況に基づき、合理的な方向に少しずつ進めることになる。合理的な方向に進めるためには、研究者や技術者の情報共有が重

要である。いろいろな技術者と専門家を巻き込み、合理的に説明しながら工程の効率化に向かうための手段の一つとしてこのような研究がある。

**オブザーバー：**燃料デブリ取り出しについて、技術継承の話があった。1Fの1号機は1971年に運行して以来51年も経過している。当時開発に関わった方も70歳を超えている。昔の知見を残すことが難しいと感じている。数十年後の世代に技術や知見を継承するために、何か工夫をされているか。

**倉田：**技術や知見の継承では、まず観測事実や分析事実が重要であるため、事実と推論を明確に分けている。さらに推論については、誰が、いつ評価したかを明確にしている。評価結果が変えられた場合には、その履歴をしっかりと残すようにしている。履歴をみれば、後の人々が評価の試行錯誤の過程も理解しやすくなる。また、分からない点があれば現時点では分からないと書くことも重要である。例として、1号機のコンクリートが特殊な壊れ方をしていることがわかっている。一方で、1Fのコンクリートの成分に関するデータが現在では存在しない。調査から、かなり近いものは見つけたが、1Fの1号機のペDESTALのコンクリートと同等のものはもう見つからない。ここまで調べた経緯やデータも含め、見つからなかったこともデータベースとして残すことが非常に重要であると考えている。

**オブザーバー：**資料のP35～36は、水蒸気枯渇条件にこだわって説明していると感じている。水蒸気枯渇条件が材料の特性にどのような影響を与えるのか。

**倉田：**一番の鍵はジルコニウムの酸化程度である。ジルコニウムが水蒸気に触れていて、特に1400℃以上になると、急速に酸化し、ジルコニウム表面に酸化膜を作る。水蒸気が枯渇すれば、周りが水素であるため、若干残っている水蒸気で酸化するが、その後は水素が急増し、ジルコニウムの特性が変わる可能性がある。例えば、2号機では温度が低下しないうちにジルコニウム被覆管が破れて、デブリがスランピングしたと推定している。ジルコニウムの酸化程度が変わるため、ジルコニウムの被覆管の壊れ方も変わる。

**オブザーバー：**資料のP46で再臨界の可能性の排除を説明している。これは非常に難しい問題であると考ええる。地震が発生してスクラムする前は、原子炉の中は臨界状態にあったため、無理やり近いような状態を再現できるという境界条件を作った場合、必ず臨界になるという答えが出ると思われる。そのため、どういう条件にして最適化するかを考える必要がある。この点について、現場で得られた事実や分析の結果を生かすことは可能か。

**倉田：**JAEAの中で、この分野の専門家がいる。構造材の鉄がどのくらい混ざっているのかなどをどう合理的に盛り込むかという議論が行われている。肝心なのは、体系をどのくらいのサイズで組むかという点である。数十センチを超え、数メートル程度の規模になると、ウランと鉄が混ざっていると言える。数センチの規模になると、混ざっていると言いきれなくなる。体系の組み方をどのように合理的に作ることができるかが議論されている。

**オブザーバー：**実際のサンプルを分析し、ウランの濃度や濃縮度に関する情報もあるかと思うが、これについてはどうか。

**倉田：**ウランは使用済み状態のものと未使用に近い状態のものがある。それがどのくらい混ざっているのかという点も一つの重要なポイントである。極端な仮定をいえば、ほぼ未使用のウランで体系を組むことになる。ただ、実際に燃焼度があり、燃料デブリが溶けていることは、つまりウランが混ざっていることになる。混ざると、臨界は楽な方向にいくため、その点は実際のサンプルのデータをみるのが大事である。

**研究会：**先ほどの議論でも、この知見が 1F 廃炉にどう役立つのかという質問があった。今後、1F 廃炉のやり方は、いつ頃の段階でどういう方たちがどういう場で決めていくのか、それを今研究している方々はどう考えているのかを伺いたい。

**倉田：**研究者としての役割は、意思決定者に判断の根拠をできるだけ精緻化して提示することが挙げられる。また、リスクのバランスについて、リスクを低く抑えようとしたら、設計が冗長になってしまう。どういう方向に設計を合理化すると、リスクとのバランスが最適化されるのかというような判断材料を提示することも研究者の役割である。1F 廃炉の場合、特に燃料デブリデータが限られているため、取り出しの方法によって、どの程度の範囲からデブリを取り出せるかをできるだけ提示する。一方、1F 廃炉や燃料デブリ取り出しが始まるとデータが出てくる。そのデータをもとにさらに評価精度を上げる。その繰り返しは研究者としての責任である。

**オブザーバー：**今は現状が不明確であることを前提に、どんな状況になっても対応できるように進めることが重要である。燃料デブリを取り出し、その分析が進んでいく中で、現実の証拠をもとにして工程の設計を合理化し、判断することになる。フィードバックをかける形の判断であると理解している。

**倉田：**完全に分かってないものにアクセスして取り出すことは、想定外のものが出てくる可能性がある。データベースをしっかりと持っておくということは、想定外の状況でも、それを理解するためのスタートがあるということになる。この点も研究者の大きな役割だと考える。

**研究会：**資料 P3 の図での線は、ある種の工学的なリスクの概念に基づいたものと思われる。しかし、最近のリスク研究と言えば、リスクは人々が何に価値を置くのか、何を大切にするのかによって、リスクの概念も変わってくる。オンサイトの廃炉を進め側として、このような図を作る際に、しっかりと議論したら良いと思う。リスクのバランスの取り方については、地域社会も含めて議論する必要がある。こういう図がどのように成り立つのか、成り立つとした場合、どの線がいいのか、誰がどう選択するのか、コストがどうなるか、いろいろな問題がある。これらの問題は、原子力ムラ、あるいは一部の専門家や政府だけが閉じた場で決めるのでは、社会的な納得は得られない。研究会としては、技術的な観点と社会的な観点、しっかり含めて見ていきたい。

資料 P5 でのマイクロスケール、メゾスケール、マスケール、マクロスケールのジャンプアップについて質問がある。2023 年、ロボットアームで耳かき 1 杯ぐらいの 1g、2g ぐらいのデブリを取り出すことは、メゾスケールになると思う。2 号機から耳かき一杯をどこの部分から取り出すのか、サンプリング地点をどうするのかなど様々な論点が出てくることが考えられる。メゾからマスに行くのは、現実的な時間の問題、知識の蓄積、工程の精査の問題も含め、かなりの距離感があるように思う。この点をどう理解するのか。

さらに、国際廃炉研究開発機構（IRID）が 2016 年に出した資料によれば、1 号機、2 号機、3 号機のデブリの量が 880t もあり、取り出し完了までは膨大な時間がかかると予想される。それぞれのところで段階を設けながら、ある種の順応的な計画に基づいて上手くプロセスを管理し、実施しないと、マイクロ → メゾ → マス → マクロの流れが非常に難しいのではと率直に感じた。

マイクロ・メゾ・マス・マクロは、単純な時間ではないと思う。マイクロの方から見たとき、どうジャンプアップしていけるのか、ジャンプアップすることが本当に良いのかということも含めて、教えて頂きたい。

**倉田：**現状では、2030 年ぐらいから、マスケールで本格的な取り出しの詳細検討が始まるスケジュールになっている。ジャンプアップについて、例えば、炉内状況推定で压力容器の下の部分の状況について推定精度が上がれば、マスケールで取ってくる場所がより明確に見えてくると考えている。

マスからマクロにジャンプについては、一般論でしか言う事ができないが、スケールによって、機器、装置、方法が異なる。また、メゾとマスの間で、デブリがどういう平均的な特性を持ち、どのくらいばらつくか、それなりの精度でわかれば、マクロで取り出す工学的手法の議論が進むだろうと考えられる。

そして、メゾやマスでデータベースを作り、デブリのことをよく知ることが一番重要な過程である。1F 廃炉の完遂に向かうのはまっすぐな最適解の 1 本道ではなく、紆余曲折を経て進むと考えられる。ただし、紆余曲折の話ばかりしていても進まないの、例えば、10 年後くらいの見通しを立てて、そこに向かってできるだけ工程を最適化していくというのが現実的ではないか。その過程で増えた情報をもとに、次の 10 年の最適な方向と目標を決める。マクロスケールまでいつ頃どのように行けるのか、マスのスケールでたくさんデブリが取れるかなど、その段階での情報をもって一步一步決めるしかないと考えている。

**研究会：**どこかで中間ステージを設定することを意識したほうが良い。止まらずに最後まで進めるという一直線のイメージでプロセスを組むことは、1F 廃炉の中長期ロードマップの大きな問題点であると感じている。

**オブザーバー：**地域社会や社会全体のステークホルダーと一緒に話を進める際に、今日のような話を共有することは非常に難しいと感じた。他の分野の専門家と隣接分野の専門家、あるいは、一般の人も含めたステークホルダーと廃炉について話す際に、データや事実情報も大事だが、それに加えて、論理の筋道はどう提示すればいいか。

**倉田：**専門家の間でも分野が異なる場合、お互いに論理の組み立て方の認識共有からスタートしなければならない。お互いの論理の組み立て方の認識を理解した上で、ジャンプアップの話は科学技術的な話に落とし込むことができれば、専門家同士では合意を取り付けやすいと思われる。ただ、肝心なのは、専門家の意見はあくまでサポート的に、判断根拠を提供する話なので、意思決定者の判断にご活用いただければありがたい。

**オブザーバー：**他の分野の人と話すにあたって地雷ワードはあるか。バックグラウンドが違うと、話が通じなくなることある。

**倉田：**実は、ある状況下では、燃料デブリというのは地雷ワードだった。燃料デブリという用語は、人によってイメージがかなり違う。原子力学会では、燃料デブリの定義を公開しているが、そもそも燃料デブリ自体がどういうものかまだ良くわかっていないので、定義があっても人によって理解が異なる。デブリの実データのデータを見ながら、やはりきちんと定義して、お互いに理解した上で進んでいかないといけない。

**研究会：**典型的な状況以外の状態のデブリが生成されているという話があったが、それは今後の燃料デブリ取り出し、あるいは廃炉のスケジュールに影響を与えるか、与えないか。研究としては興味深いが、我々はそれをどう受け止めたらいいたろうか。

**倉田：**工学的に裕度の大きい方法を採用するのはかなり最初からの選択であったため、今のスケジュールやデブリ取り出しの方法にはさほど影響はしないと思う。むしろ大事なのは、デブリの知識を積み重ね、こういった研究がだんだん使われていくことで、この先の廃炉がより合理的、より安全度が高いものになることが期待される。

**研究会：**客観的なデータを持って現状を説明していただき、非常にパッションを持って取り組まれていることも伝わってきた。しかし、私たち地域住民が、こういう問題にどう関わるべきかがまだ分からな

い。住民は関心を持って関わりたいと考えながらも、非常に重いリアルな課題を背負っているのが廃炉の現状である。こういう課題への地域の関わり方についてずっとモヤモヤと感じている。

**研究会：**専門家同士でも考え方が違えば対話は成り立たないということに驚いた。また、先ほど、専門家は意思決定の立場ではなく、エビデンスを提供する役だという話があったが、意思決定者に自分の欲しいデータを要求された場合、出してしまうか、逡巡することはあるか。

**研究会：**今の状況ではかなり時間を使わざるを得ないことになるが、時間の経過によってリスクが伴うとのお話もあったため、長い時間をかける意味を伺いたい。もう一つ、「専門家はエビデンスを提供する立場で、意思決定者ではない」について、専門家は真摯な姿勢を持っていると思うが、原子力の世界になると、専門家だけの交流に閉じている。研究会はこれまで、自然科学と社会科学の観点が融合するべきだと呼びかけているが、両者をどう噛み合わせるかを悩んでいる。

**倉田：**地域の方とのコミュニケーションは、まさに我々も模索中のことである。我々の役割はきちんとしたエビデンスを出すことであるが、こういった話を専門家の中で閉じてはいけなくとも考えている。いかにそれを様々なステークホルダーの方にわかりやすく伝えるのかも研究者の役割だと思う。そのため、少なくとも廃炉に関しては、専門家同士の議論は「閉じている」ではない。debrisWikiなどは、一部の機微情報を除いて一般公開している。研究者として地元の方とのコミュニケーションのやり方を手探りで進めている。

研究者間の会話が成り立たないとのコメントについて、会話は成り立つのである。ただし、専門が違えば成り立つまでに手間がかかる。お互いにまず理解しないと、分野が変わると話が通じない部分がある。廃炉の世界では、いろいろな分野の専門家が協力しているため、そういう状況が非常に多いので、お互いに理解した上で、議論を進める必要がある。

なお、出せる情報は全部出すのは研究者の鉄則である。出せるものは出し、技術的に出せないものは出せない理由を説明する。

**研究会：**今日チャットで参加者から多くの質問をいただいている。この研究会には多様な専門性を持つ参加者がいて、質問も非常に多様である。可能な限り答えていただけるとありがたい。その一方で、やはり研究者も自分のリソースに限りがあるので、どの疑問に答えるか、ある種のプライオリティをつけざるを得ない。

そういう観点で、今日のような議論は、これからどのように役立つのが重要である。この研究成果を活用すべき人、使わないといけなく人に届けられているのか、それに対しどう受けとめられているかなど、それは研究者側からより踏み込んで考える必要がある。リスクをアセスメントする立場とマネジメントする立場は違うが、おそらくそういう意味では、倉田さんの報告での緻密な話をしかるべき人が受け止めて、生かしていかなければならない。それによって、市民、地域の方々も廃炉プロセスに関心を持って、一緒に学びたい気持ちが湧いてくるだろう。何をもちえて安心感が得られるかということ、専門家がしっかりと仕事をしていて、研究成果は受け止めるべき人が受け止めて、そして生かしていくことを目に見えることが大事であると考えている。

今日の報告のような話はすべての人に理解を要求するのが難しいが、それが分かるべき人にちゃんと伝わっていて、そして何か見えるのもので反映されるというプロセスが動いていることをみんなに見せることが必要である。それも、この研究会の役割であろう。

#### <チャット>

**オブザーバー：**保管容器が数 kg しか保存できないのであれば保管容器は 10 万個となる。工学的に成り立つのか。

**倉田：**まさにその数をどう扱うのが課題です。容器を何重かの構造にするなどの工夫をするのではと思います。

**オブザーバー：**1号機のペDESTAL部のコンクリートがないことによる耐震強度が弱体化していることの影響はどう考えられるでしょうか？

**倉田：**耐震性は専門でないため、詳しくわかりませんが、東京電力が数年前にペDESTAL・コンクリートの数分の1が強度を失ったというような極端な仮定で解析をしていたはずですが。その極端な仮定においても耐震強度は十分であったという結論だったと理解しています。

**オブザーバー：**1号機のペDESTAL・コンクリートがあのように溶けるメカニズム等につきまして、また改めてご教示いただければと思います。

**倉田：**おそらくいくつものメカニズムが重畳していると推定しています。東電でも原子力機構でも、色々な仮定をおいて検討を始めたところです。高温高压の水蒸気雰囲気下でのコンクリートのデータがほとんどないため、まずはデータを揃えるところから始めています。

**オブザーバー：**1. 廃炉に関して、どんな分野の専門家がどんなチームを組んで、どんなプロジェクトを進めているのか、全体像が知りたいです。  
2. リスクのバランスというお話、特に関心があります。ペDESTAL耐震補強など、リスク低減についてどこで検討し、どんなプロセスで決定していくのか教えていただきたいです。

**倉田：**詳しくは、原子力損害賠償・廃炉等支援機構のサイトをご覧ください。同機構が開催しているフォーラムを聴講いただくのがよいと思います。以下、簡単に役割をご紹介します。

1F 廃炉の司令塔が、原子力損害賠償・廃炉等支援機構です。そのマネジメントの下で、廃炉工程に直結する実用工学技術や実デブリを直接取り扱う研究は、経産省が運営する廃炉・汚染水・処理水対策事業で行われています。ここでは、東電、プラントメーカー、原子力機構、大学などが、課題ごとにチームを組んで研究開発プロジェクトを進めています。廃炉・汚染水・処理水対策事業で検索すると、どのような事業が行われ、どのような成果が出ているかすべて公開されています。

一方で、もう少し先進的な研究（現状ではすぐに廃炉に活用できないが、この技術が完成すれば、将来的に廃炉の大幅な合理化につながるような候補技術）については、文科省の指導のもとで原子力機構が運営する英知事業（英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業）において、主に大学をリーダーとし、原子力機構等が協力する形で実施されています。英知事業の成果もすべて公開されています。こちらでも英知事業で検索いただければ、色々な研究グループが活動していることがご理解いただけます。さらに、これらの研究開発において、無駄なオーバーラップや重要課題の抜けがないように、廃炉・汚染水・処理水対策事業は、内部調査、取り出し工法の開発、作業環境の向上、廃棄物処理、汚染水対策、使用済み燃料保管の6分野に分割され、それぞれで小課題を精査し、第三者の専門家レビューを受けつつ技術開発が進んでいます。英知事業では、原子力機構が東電等と協力して廃炉の基礎基盤研究マップを作成し、どのような先進技術が期待されているのかを公開し、原子力の専門家だけでなく、様々な分野の専門家が参加できるように進めています。

リスクのバランスの検討と決定のプロセスについては、原子力機構は回答できる立場にはありません。一般論として、技術的な内容については、原子力損害賠償・廃炉等支援機構が中心となり、東電や規制側と意見交換しながら進めるのではないかと思います。

**研究会：**MCCI が起きていないということに、希望的観測をもっておられるように感じたのですが、わからない予測不能な部分があれば、希望的な観測と、絶望的な予測の両論併記で説明いただくと、より安

心するのではないかと思いますがいかがでしょうか。

倉田：希望的な観測とご理解いただいたのだとすると、私の説明が至らなかったためです。むしろ、典型的な MCCI より、ずっと複雑な状況がおそらく起きており、それも号機ごとに異なっているので、考慮しないといけないことが増えている可能性もありそうです。

研究成果は、一般的に、希望的 or 絶望的という裏か表の両論併記のようなくりとは整合しません。ここが一般の方に技術をご説明する際に、一番説明が難しいところです。技術評価には、一般に前提条件が付いており、○○の前提の下では▽▽になり、そうでなければ□□になるというような、グレーゾーンがあります。MCCI の例で言えば、1F では、コンクリートへの浸食は抑制されている可能性が高いですが、一方で、高粘性状態から凝固したとすると、デブリの化学的特性のばらつきは拡大しており、切り出しや取り扱いがやりにくくなっている可能性があります。研究者技術者の立場としては、このような 1F デブリや炉内の特徴を理解した上で、それに最適な工法を検討していくことになります。おそらく、取り出し工法によって、重視する課題が変わってくるのではと思います。

## 2. 今後の予定、その他

|                          |                          |
|--------------------------|--------------------------|
| 11 月 17 日（木） 9:00-10:00  | 第 5 回 1F 地域塾に関する打ち合わせ    |
| 12 月 10 日（土） 13:00-18:00 | 第 5 回 1F 地域塾@ふたば未来学園     |
| 12 月 27 日（火） 13:00-17:30 | 福島県観光物産交流協会との連携関連講演      |
| 1 月 29 日（日） 13:00-18:00  | 第 11 回ふくしま学（楽）会@link る大熊 |

以上