

原子力サイクルビジネス（クリアランス集中処理事業）の
技術的論点に対する回答について

福井県

1. 経緯等

福井県クリアランス集中処理事業に係る意見交換会合（以下、「意見交換会合」という。）については、第1回意見交換会合（令和5年7月31日開催）において現行の核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律や工場等において用いた資材その他の物に含まれる放射性物質の放射能濃度が放射線による障害の防止のための措置を必要としないものであることの確認等に関する規則（以下、「クリアランス規則」という）に基づき事業許可申請やクリアランスの認可申請を行う方針であることを説明した。

その後、第2回意見交換会合（令和5年10月11日開催）において、貴庁より「福井県クリアランス集中処理事業に係る意見交換会合の確認範囲及び技術的な論点等について」が示されたため、以下のとおり、それぞれの論点に対する考え方を示す。なお、以下で説明する内容は現時点での検討のものであり、今後、具体的な事業計画の検討により変更の可能性がある。

2. 技術的論点に対する考え方

2. クリアランス推定物の取り扱い及び混合・希釈

現行のクリアランス制度においては、クリアランス推定物の放射能濃度がクリアランスレベル以下であることが十分予測できるものを対象としており、希釈してクリアランスレベル以下にしようとする行為を想定していない。

（1）クリアランス推定物の選定

- 除染等によってもクリアランスレベルを明らかに超えるような場合には、放射性廃棄物として発電用原子炉設置者が適切な管理を行うことが必要。放射能濃度がクリアランス基準を満足すると見込まれる推定物について、事前に行う評価など、誰が、どのようなプロセスで対象物の選定を行うのか。
- 除染後放射能測定を行い、どの程度の放射能濃度の核燃料物質によって汚染された物までを溶融する対象とするつもりなのか。

- クリアランス推定物の選定は、発電用原子炉設置者にて実施する。

廃止措置計画の中で検討している施設内の汚染状況調査結果、使用履歴、線量当量率などにより、クリアランス基準を満足すると考えられる放射性廃棄物を、クリアランス推定物として発電用原子炉設置者が選定する。選定にあたっては、本事業で実施する除染作業及び溶融による効果も考慮し、クリアランス推定物を選定する予定である。

本事業での受入れに当たっては、放射能濃度などの廃棄物受入基準（以下、「WAC」という。）を定め、WACを満足しているかを発電用原子炉設置者から提出された記録及び目視により確認する。

- 上記のとおり、発電用原子炉設置者で選定するクリアランス推定物は本事業で実施する除染効果等を考慮することでクリアランス基準を満足するものと考えている。
なお、本事業では、原則、受け入れた全てのクリアランス推定物を除染した後に溶融する計画であり、本事業において設置する除染装置については、あらかじめ除染試験等を行い除染効果を確認する。（図1参照）

（2）放射性廃棄物等の混合・希釈の防止

- 発電用原子炉設置者及び企業連合体において、放射性廃棄物等が意図的に混合・希釈されないことをどのような手段により確保するのか。
- クリアランス基準を満たすためにあえて非放射性的の金属を混ぜることが、意図的な混合・希釈に当たると考えており、「（1）クリアランス推定物の選定」で述べたとおり、使用履歴、線量当量率、除染及び溶融を踏まえクリアランス基準（ $\Sigma D/C \leq 1$ ）を満足すると考えられるものを選定することから、意図的な混合・希釈は行わない。

（3）その他、クリアランス推定物及び廃棄物の取り扱い

- 発電所から企業連合体へクリアランス推定物を出す場合には、外廃棄に当たると考えられるが、クリアランス推定物を運ぶための輸送容器はどのようなものを想定しているのか。
- 企業連合体でクリアランス推定物をどのように保管するのか。また、保管容量をどの程度に考えるのか。
- 溶融後に出てくるスラグをどのような形にして廃棄するのか。廃棄体の形に加工可能か（現行の埋設事業規則の中で対応可能か）。
- 企業連合体が作成した廃棄体は、発電所に返還するとしているが、これはいわゆる解体廃棄物に当たると考えられる。企業連合体が作成した廃棄体はどのタイミングで発電用原子炉設置者に返還し、どのように埋設処分することを考えているのか。
- 発電所から外廃棄として企業連合体へクリアランス推定物を運ぶ際は、核燃料物質等の工場又は事業所の外における運搬に関する規則に定めるL型輸送物として運ぶ予定である。輸送荷姿は、今後詳細に検討するが、現在発電所で用いられている鉄箱またはドラム缶を想定している。

- 本事業で受入れたクリアランス推定物は、受入一時保管棟（汚染のおそれのない管理区域）にて管理する。受入一時保管棟の受入容量は、溶融処理や搬出入、外的要因による遅延を考慮し、4キャンペーン分※の予定である。
 ※ 総量 1,344t（鉄箱約 670 個、ドラム缶約 5,400 本）
- 本事業にて発生したスラグは、発電所毎に分別し鉄箱またはドラム缶に入れ廃棄物保管棟にて保管管理する。また、本事業では廃棄体の形に加工せず、収納効率向上のため必要に応じて破碎等の処理を施し、容器に収納して保管予定である。
- 廃棄物の返還のタイミングは、今後発電用原子炉設置者と検討する。ただし、本事業の保管廃棄施設である廃棄物保管棟の保管容量を超えるおそれがあると判断した場合には発電所に返還する。なお、廃棄物保管棟の保管容量は、運営期間中に発生する廃棄物をすべて保管できる容量設計である。
 発電所に返還された放射性廃棄物は、埋設処分施設の仕様に合わせたうえで、埋設処分することを考えている。

3. クリアランスの評価及び測定について

（1）評価に用いる放射性物質の選定について

現行のクリアランス規則においては、評価に用いる放射性物質について、放射能濃度確認対象物中に含まれる放射性物質のうち放射線量を評価する上で重要なものであることを要求している。

① 測定及び評価の方法に係る申請

- キャンペーン方式で処理を実施し、また、廃棄物毎に核種組成比の違いがあるなかでどの単位でクリアランス測定法の認可申請を行うのか。
- 本事業では、発電用原子炉設置者から受け入れたクリアランス推定物を、キャンペーン方式（発生した発電所ごとにまとめて溶融処理を行う方式）で処理するため、クリアランスの測定及び評価の方法は、発電所ごとの汚染性状を踏まえて行う必要があり、発電所単位で定めて申請することを基本とする。ただし、複数の発電所において、汚染のメカニズムや核種組成比が類似する場合等は、それらを包含する測定及び評価方法とすることも検討する。
- また、クリアランス測定及び評価方法を設定する際に、汚染のメカニズムや核種組成比の類似性、対象範囲に含まれるクリアランス対象物の核種組成比等の分布の広がりなどを考慮する。その際、評価に用いる放射性物質の選定については、発電用原子炉設置者から提供される事前調査のデータに基づき、発電所ごとに汚染のメカニズムを整

理した上でそれぞれの核種組成などの汚染性状を評価し、その核種組成比の違い、溶融時の核種組成比の変化、その他の不確かさを考慮した際にも、放射線量を評価する上で重要となる放射性物質が見落とされないよう選定を行う。

② 使用履歴及び主要核種の選定方法

- 発電用原子炉設置者からクリアランス推定物の使用履歴として、どのようなデータを受領するのか。
 - 使用履歴に関するデータへの説明責任は発電用原子炉設置者にあるのか。それとも企業連合体が行うのか。
 - 使用履歴などのデータを踏まえ、どのように主要核種を選定するのか
- 本事業の実施主体は企業連合体であり、クリアランスの測定及び評価の方法の申請は企業連合体が実施する。当該申請書の作成にあたって、企業連合体は、発電所の汚染性状を考慮してクリアランスの測定及び評価の方法を設定するために必要なデータを発電用原子炉設置者から受領する。想定する主なデータは次のとおりである。
- ✓ 施設の概要、運転履歴、放射化汚染の評価結果。
 - ✓ クリアランス推定物の機器等の種類、材質、発生場所、系統、汚染の履歴、放射線量や放射能濃度の評価結果、推定される総重量。
- 上記において、発電用原子炉設置者は企業連合体に提出するデータの作成責任を担う。また、審査における受領したデータの説明責任は企業連合体が担う。
- 主要核種の選定については 3.(1)①の記載と同様である。

(2) 溶融物の均一化とサンプル数について

現行のクリアランス規則においては、評価単位ごとの重量は、放射能濃度の分布の均一性及び想定される放射能濃度を考慮した適切なものであることを要求している。

① 溶融処理による濃度分布

- クリアランス推定物の溶融プロセス（スラグとの分離含む）において、実際にインゴット中の放射能分布は均一化するのか、科学的な根拠を示されたい。
 - 核種ごとに金属・スラグ間の核種移行の挙動が異なるのか、異なるのであればどのように違うのかを示されたい。
 - 金属元素に関する核種と、イオンとして存在する核種の挙動や固形化の過程における金属中の元素分布などの科学的知見等について示されたい。
- 本事業では、溶融処理を行う 1 バッチ分の重量を評価単位として設定する計画であ

り、その溶融処理により溶湯内の放射能濃度の分布が均一化する（分布の広がりが比較的小さい範囲内に抑えられる）ことを示す必要がある。

- 溶融処理による放射能濃度の分布の均一化に関しては、既往の研究により、複数の溶融条件での溶融試験が実施されている。いずれも溶湯中の Co 等の鉄族元素はほぼ均一に分布することが示されており、本事業においても溶湯内の放射能濃度が均一化するように溶融処理を行う。クリアランス認可申請を行う際には、本事業で使用する溶融炉において溶湯内の放射能濃度が均一化することについて、既往の研究結果に加えて、本事業で使用する溶融炉の試験データを揃えて示していく計画である。
- また、評価に用いる放射性物質の選定にあたっては、溶融時の核種組成比の変化等を考慮して、放射線量を評価する上で重要となる放射性物質が見落とされないよう選定を行うため、溶融処理における核種の移行挙動を確認する必要がある。
- 溶融処理における核種の移行挙動については、既往の研究により、主要な核種について、溶湯に残る核種、スラグへ移行する核種、気相へ移行する核種及びそれら核種の移行率等が得られている。認可申請を行う際には、これら核種の移行挙動を踏まえてクリアランスの測定及び評価の方法を定めるとともに、その根拠となるデータ等について、本事業で使用する溶融炉の試験データも含めて示していく。
- イオンとして存在する核種については、基本的にイオン状態で溶湯中に存在することはなく、金属結合で溶湯を形成、またはイオン化合物として溶湯中に介在している。溶湯中に介在するイオン化合物については、溶解の過程で分離（スラグに移行）される。また、金属に固溶する主要核種の平衡分配係数は高いため、偏析することはなく均一となる。クリアランス認可申請を行う際には、その根拠となるデータ等については、本事業で使用する溶融炉での試験データも含めて示していく計画である。

【参考】 溶融による均一性と核種移行挙動に関する参考文献

- ✓ Nakashio N, Osugi T, Iseda H, et al. "The verification tests of the melting conditions for homogenization of metallic LLW at the JAEA". J. of Nucl. & Tec. Vol.53. 2016.
- ✓ 宮本 泰明, 山中 智弘, 青山 誠. "溶融除染技術評価報告書". JNC TN8400 2003-044. 2003.
- ✓ 中塩 信行, 磯部 元康, 涌井 拓治ほか. "模擬雑固体廃棄物の溶融挙動と固化体の特性". JAERI-Research 2001-001. 2001.
- ✓ 中村 寿, 金沢 勝雄, 佐藤 孝幸, 山手 一記, 藤木 和男. "放射性金属の

溶融基礎試験”. デコミッションング技報 No.9. 1993.

- ✓ 梅村 昭男. “放射性金属廃棄物の溶融・有効利用技術の開発”. デコミッションング技報 No.11. 1994.
- ✓ 安井晋示, 天川正士, 足立和郎. “低レベル放射性廃棄物のプラズマ溶融技術の開発 (その6) 加熱雰囲気の影響”. 電力中央研究所報告 W94017. 1995.
- ✓ 天川正士, 足立和郎, 安井晋示. “低レベル放射性廃棄物のプラズマ溶融技術の開発 (その8) 鉄と灰と木を一括処理した溶融固化体の特性”. 電力中央研究所報告 W95019. 1996. など.
- ✓ 大橋 徹郎. “鋼の連続鋳造における凝固、偏析現象の基礎とその応用に関する研究”. 大阪大学 博士論文. 1977.

②均一性の確認

- 汚染の程度が大きく異なると考えられるものを一つの測定単位としないことが要求される場所、クリアランス対象物（溶融後、クリアランス測定を受ける段階の金属を指している。）の放射性核種が均一であることについて、どのように検証可能なのか示されたい。
- 溶融処理による放射能濃度の分布の均一化の知見については 3. (2)①に記載したとおりであるが、実際に溶融処理を行った後のクリアランス対象物中の放射能濃度が均一化していることの検証については、あらかじめ、本事業で使用する溶融炉において放射能濃度が均一化する溶融条件を決定した上で、クリアランス対象物を処理した際の溶融条件が前述で決定した溶融条件を満足することを確認することにより検証可能と考えている。

③評価・測定単位及びサンプル数

- 溶融処理されたクリアランス対象物について、評価・測定にあたっての評価・測定単位の考え方及びサンプリングの考え方及び科学的な妥当性を示されたい。
- 仮に濃度分布・核種組成比の分布が発生すると想定される場合、どのようにサンプリングを想定しているのか。
- 3.(2)②の記載によりクリアランス対象物の放射能濃度の均一性を担保できることを前提として、本事業では溶融処理を行う 1 バッチ分の重量である最大 10t を評価単位とする計画である（図 2 参照）。評価単位の放射能濃度は、放射能濃度が均一化

している溶湯からサンプリングした試料を測定し、溶湯内の放射能濃度の不確かさ等を考慮して評価する考えである。その際、事前に取得する溶融炉の試験データにより、想定される溶湯内の放射能濃度の分布をあらかじめ評価する等し、その分布を考慮して放射能濃度を適切に評価することを想定している。

4. その他情報提供依頼

上記に掲載した技術的な論点について海外事例があれば、あわせて提示頂きたい。

(1) 金属溶融設備について

海外における放射性金属の再利用は、1980年代から溶融処理を基本とした再利用が実用化され、ドイツ、スウェーデン、アメリカ等で放射性の金属廃棄物（炭素鋼、ステンレス鋼、アルミニウム、鉛、等）を除染・溶融をした上で、金属素材等として再利用する事業が確立している。

(2) 溶融処理時の濃度分布

各国の溶融炉では、放射性核種ごとに金属、スラグ、ダスト中への移行率のデータが得られている。溶融温度と放射性核種データの記載があるドイツの CARLA 炉の金属溶融施設では、溶融温度 1350℃から 1500℃の条件下では、放射性核種の濃度分布は以下の傾向が認められる。

- ✓ 鉄族元素（Fe、Co、Ni）は、ほとんどが金属の溶湯中に残留し、スラグやダストへの移行割合は小さい。
- ✓ アクチノイド（U、Pu、Am 等）、アルカリ金属（Cs）、アルカリ土類金属（Sr）は、ほとんどがスラグやダストへ移動し、金属の溶湯中への移行割合は小さい。
- ✓ 上記以外の傾向を示す核種の例として、亜鉛族元素（Zn）は、金属の溶湯、スラグ、ダスト、それぞれに移行する。マンガン族元素（Mn）は、金属の溶湯、スラグに移行しダストへの移行割合は小さい。

【参考】 海外の金属溶融に関する参考文献

- ✓ Thomas Kluth; Utilization of External Capacities as an Integral Component of Concepts for Residues and Dismantling Using the Example of the CARLA Plant, Symposium on Recycling of metals arising from operation and decommissioning of nuclear facilities,

April 8-10, 2014 at Studsvik

- ✓ Leif Andersson ; RECYCLING OF CONTAMINATED METALS FOR FREE RELEASE, WM'99 CONFERENCE, FEBRUARY 28-MARCH 4, 1999
- ✓ Cyclife; Metallic waste treatment, melting and recycling (<https://www.cyclife-edf.com/en/cyclife/our-solutions/decontamination-of-metal-waste-by-melting>)
- ✓ Cyclife; Cyclife Sweden AB, Nyköping facility (<https://www.cyclife-edf.com/en/cyclife/governance/cyclife-sweden>)
- ✓ OECD/NEA; Recycling and Reuse of Materials Arising from the Decommissioning of Nuclear Facilities, 2017
- ✓ 福島第一原子力発電所の廃炉によって発生する放射性廃棄物の処理に向けた固化技術及び減容技術カタログ JAEA-Review 2017-015
- ✓ Barry Moloney, Graham Raw, Troy Eshleman; Beneficial Re-Use , Symposium on Recycling of metals arising from operation and decommissioning of nuclear facilities, April 8-10, 2014 at Studsvik
- ✓ QUADE, U. and MÜLLER, W. (2005). Recycling of radioactively contaminated scrap from the nuclear cycle and spin-off for other application, Rev. Metal. Madrid Vol. Extr. (2005) 23-28.

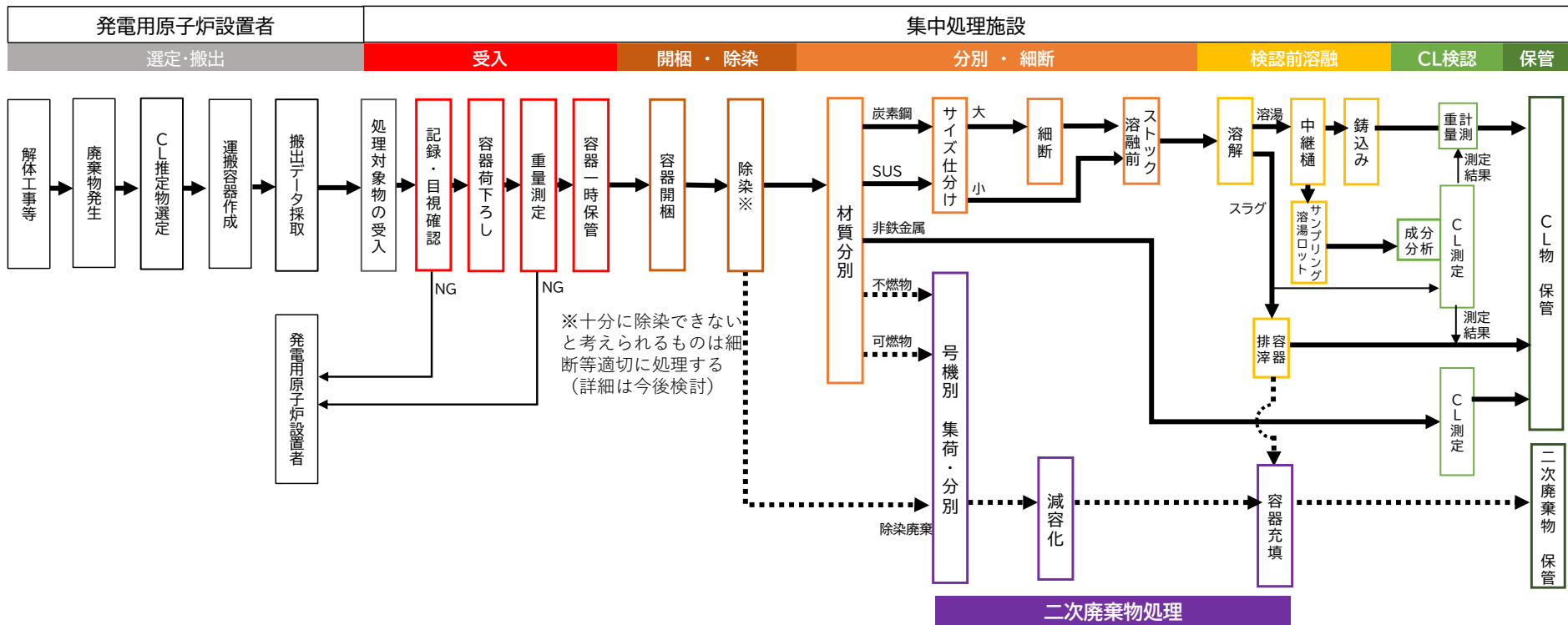


図1 処理フロー案

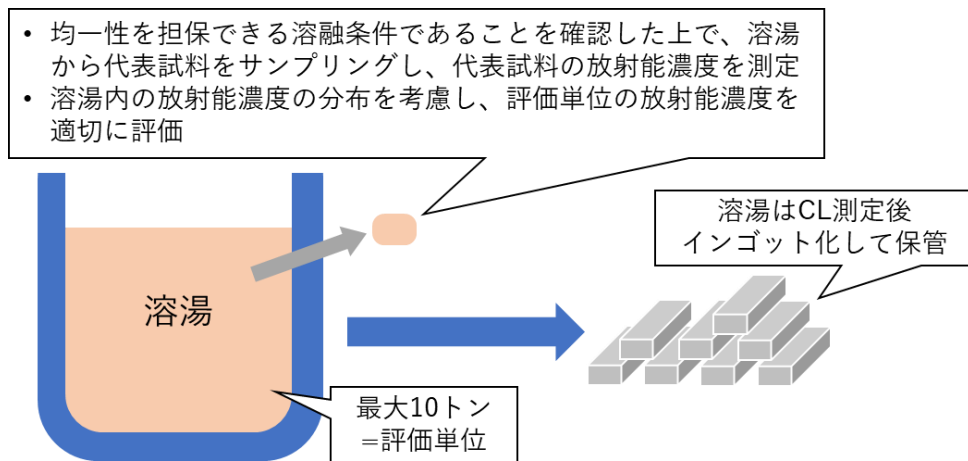


図2 評価・測定単位のイメージ