

## 日本原子力学会 2025 年春の年会 バックエンド部会企画セッション 「原子力発電所から発生する金属廃棄物の再利用」

森下喜嗣\*1

### はじめに

オンラインで開催された日本原子力学会 2025 年春の年會にて、3 月 13 日(木)にバックエンド部会の企画セッションとして「原子力発電所から発生する金属廃棄物の再利用」を開催した。

図 1 に示すように、原子力発電所の廃止措置等で発生する放射能濃度がきわめて低い金属廃棄物については、クリアランス制度を適用して再利用を進める取組みがなされている。電気事業連合会(以下、電事連)では、国の確認を受けたクリアランス金属を限定的に再利用する事例を通して社会の理解を促進し、使途を拡大して制限のない再利用を目指す取組みがなされている。また、福井県では、専用のクリアランス測定装置を使用するなどして対象金属の全量について残留放射能を測定するこれまでの方法に替えて、対象金属を熔融均質化してその一部を採取しこれを溶湯全体の代表試料として残留放射能を評価する検討がなされており、熔融時に金属中の核種がスラグ等に移行することによる除染効果も考慮して、クリアランスの測定処理を効率的に進め、金属再利用をビジネスにつなげていく取組みがなされている。東京電力ホールディングス株式会社(以下、東電 HD)においても、クリアランス制度の適用や再利用先は未定としつつも、福島第一原子力発電所での大量の金属がれきを同様の方法によって除染、減容し、再利用していく検討が行われている。

本セッションでは、各組織の取組みについて講演をいただいた後、その内容についてパネルディスカッションを行った。なお、座長は筆者が担当した。

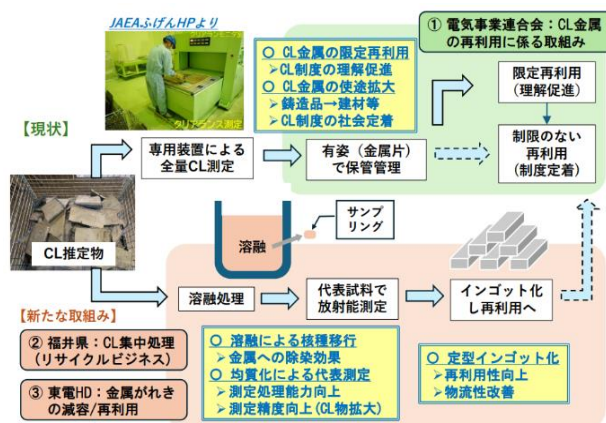


図1 金属廃棄物の再利用について

### 講演

#### (1) クリアランス金属の再利用に係る取組みについて：

上山裕 氏(電事連)

クリアランス制度を国内に導入する際には、制度の円滑な運営のために、関係者が社会に対してその趣旨や内容の周知徹底に努めることとされた。このため、事業者が先ずは業界内で自主的に再利用し、社会の理解を促進して制度の社会定着を目指した取組みが行われている。

これまでに、原子力規制委員会の確認を受けたクリアランス金属として約 3700 トンが原子力施設内保管や自主的に再利用されているが、今後の廃止措置によってさらに物量が増加し、当該作業の進行に影響を及ぼすことが懸念されている。こうした状況を回避するためにも、再利用の拡大やフリーリリースに向けた取り組みが必要とされている。

このため、段階的に再利用の範囲や使途を広げ、トレーサビリティ管理のもとでクリアランス金属の製品利用や理解活動が進められている。業界内においては、ベンチをはじめとした鑄造製品に再利用し、また業界外では、福井県内の公共施設において、高校生が中心となって製作した照明灯や、サイクリングルート上の施設へのサイクルスタンド設置などが行われている。また、今後の建材等への利用拡大を想定し、大容量の電気炉で連続鑄造による建材半製品(ブルーム)製造の実証と建材加工の検討、クリアランス金属の取扱いに関する留意事項の整備とトレーサビリティ範囲の縮小化等の検討がなされており、今後、再利用に係る事業者や製品利用者に対して活動の効果を高めるようなインセンティブの取入れなども検討していくとされている。

#### (2) 嶺南Eコースト計画における原子力リサイクルビジネスについて：前田耕作 氏(福井県)

福井県では、様々な原子炉や研究機関等が立地していることを背景に、原子力エネルギーに関する総合的な研究開発拠点を目指す計画が 2005 年に策定され取り組まれてきた。その後、原子力や福井県を取り巻く環境の変化を踏まえて、原子力のみならず再エネを含む様々なエネルギーを活用したまちづくりを目指す「嶺南Eコースト計画」として 2020 年 3 月に見直され、福井県の嶺南地域を中心に地域経済を活性化し、人・企業・技術・投資が集まるエリア形成を目指した取組みが進められている。

現在、県内 15 基の原子力発電所のうち 7 基が廃炉中であり、これを地域振興や産業育成のチャンスと捉えて、廃止措置工事への県内企業の参入拡大を図る取組みが行われている。とくに、廃止措置で発生する物量の多いクリアランス金属に着目し、発電所ごとに実施されている作業を集中処理化し、確認前の溶解により汚染の均質化や形状の

Recycle and Reuse of Metal Waste Generated from Nuclear Power Plant by Yoshitsugu, MORISHITA (y-morishita@tasnet.co.jp)

\*1 株式会社 TAS

TAS Co. Ltd.

〒914-0812 福井県敦賀市昭和町 2 丁目 2-22

本稿は、日本原子力学会 2025 年春の年会 バックエンド部会企画セッション「原子力発電所から発生する金属廃棄物の再利用」の講演内容に加筆したものである。

画一化を図り、クリアランス作業を効率化させる事業モデル(原子力リサイクルビジネス)を確立し、将来的には大型廃棄物の受入れも視野に地域産業の活性化や新たな連携枠組みの創出、着実な廃止措置の実施に貢献していくこととされている。

このクリアランス集中処理については、国内初の取組みとして規制上の課題等について関係者が原子力規制庁と意見交換を行う場が設けられ、令和5年度から複数回の会合が持たれている。この結果、「廃棄物管理」の許可を取得することで集中処理事業が可能であること、規制庁内でも溶融後クリアランスの許認可に向けて規則の充足等の必要な検討を行うことなどの整理がなされている。また、技術的論点として、クリアランスレベルを満たすために意図的な希釈混合を行わないこと、クリアランス推定物の管理や処理に必要な情報が電力等事業者から新規事業主体に受け渡されることなどが整理されている。

また、以上の取組みと並行して、地元企業の参入促進や地域住民の理解促進に向けた勉強会やクリアランス測定現場の視察、県内の全17市町にクリアランス金属で製作した製品の設置、県内公共事業でのクリアランス金属の活用検討など、積極的な取組みが実施されている。

### (3) 福島第一原子力発電所における金属がれき等の減容及び再利用について：高木昌和氏（東電HD）

東日本大震災・事故直後、津波や水素爆発の影響から敷地内に散乱した大量のがれきや、廃炉等作業に必要な設備の建設エリア確保のために発生した汚染土壌や伐採木が、敷地内の固体廃棄物貯蔵庫や屋外の一時保管エリアで保管管理されている。これらのがれき等は、約50万 $\text{m}^3$ にのぼり、今後新たに発生するものも含めてできる限り減容し、保管管理のための施設を計画的に整備して、屋外一時保管を解消していくことが計画されている。

とくに、金属がれきに対しては、溶融処理によって減容し、また分離除去が可能な放射性物質を除染し、再利用も視野に一般スクラップ相当の金属塊とすることを目的とした溶融設備の導入が計画されている。鉄スクラップを高温溶融する酸化雰囲気においては、酸化されやすい元素(Cs, Sr等)は酸化物形態で主にスラグへ、低沸点の元素はさらにダストにも移行し、除染効果が期待される。

この溶融時の核種移行による除染効果については、鉄スクラップに含まれる微量のSrの挙動を測定確認するなどして、2000程度の除染係数が得られる見込みとされており、引き続き調査が進められている。

さらに、溶融後金属の均質性を確認するため、溶鋼サンプルと固化ビレットの双方について、Co元素濃度の分析を行った結果、両者の濃度はおおむね一致し、溶鋼サンプルを分析することで全体の評価が可能との見通しも得られている。

検討中の溶融設備は、民間で実績のあるアーク溶融方式とし、約30トン規模の溶融炉が検討されている。製品としてのインゴットの放射能濃度は溶鋼からの代表サンプルにより分析する計画であり、分析手法としては、迅速性も考慮して、 $\gamma$ 核種は直接測定、 $\beta$ 核種は酸溶解して全 $\beta$ として

測定、主要な汚染核種については個別に分析・測定を行うことなどが検討されている。

### パネルディスカッション

以上の3件の講演に関して、金属の溶融処理とクリアランス金属の再利用促進の視点から、ポイントを以下の点に絞ってパネルディスカッションを行った。

- 1) 金属廃棄物を溶融処理して再利用やクリアランス制度を適用する場合の技術課題への対応
  - ① 溶融時のスラグ等への核種移行(金属除染)や金属中の残留核種の定量に係る課題への対応について
  - ② 溶融処理後の金属の均質化を前提として代表サンプリングを取り入れる際の課題について
- 2) クリアランス制度の社会定着に向けた取組みや、再利用策を含めたプロセスの更なる効率化や利活用促進に向けた政策課題への対応

なお、パネリストとして、講演者に加えて、福井県から松田貴光氏、資源エネルギー庁から奈良篤人氏、また放射線測定の専門家として井口哲夫名誉教授(名古屋大学)に加わっていただいた。

1)-①については、溶融時の核種移行を溶湯金属に対する除染効果として見込む場合に、スラグ等への核種の移行や溶湯金属中の放射能の残留の挙動を定量化しておく必要があることから、挙動解明のための取組みなどについて意見を交換した。

今後の事業化を予定している福井県や東電HDのパネリストからは、核種移行について、国内外の溶融炉を用いた金属廃棄物の減容処理に関する試験研究の知見を整理し拡充していくこと、挙動解明のために実施中の小規模試験について条件・パラメータを変えて継続し知見を充足していくと共に、溶融炉のスケールアップ効果については多くの試験を行うことに難しさもあり、実機施設が完成した段階でホット運用に入る前に核種移行の挙動確認のための試験を行うなどの考えが示された。

また、関連する課題として、処理された金属中の残留放射能の測定方法についても議論した。溶融処理後の金属を事業者内で再利用する若しくはクリアランス制度を適用する場合、金属中に残留する放射エネルギーを定量し、安全上の基準を満たしていることを確認する必要がある。履歴が明確な発電所廃棄物等に対してクリアランスを適用する場合には、難測定核種( $\beta$ ,  $\alpha$ )に対して現場で直接的に測定可能な核種( $\gamma$ )との核種組成比を事前調査で求めておき、直接測定と核種組成比による評価を併せて残留放射能を測定・評価する方法もあるが、履歴が広範な金属がれきに対する場合には、難測定核種も含めて直接的に測定する必要性も考えられることから、その方法などについて意見を交換した。

溶融炉を用いた試験を実施中の東電HDパネリストからは、測定に時間を要する難測定核種について、まずは大きく全 $\alpha$ や全 $\beta$ の放射エネルギーとして把握することを考えているが、そのうえで、再利用等の目的に応じて定量が必要な核種については酸溶解処理等で個別に放射エネルギーを分析する方

法を検討していくこと、なお測定対象が鉄鋼であり相応量の迅速な溶解が困難で放射能の検出下限値を小さくしようとする場合の難しさがあることから、海外での先行例も参考により良い方法を検討していく等の考えが示された。

また、放射線測定を専門とするパネリストからは、液体シンチレーションカウンタによる従来の測定方法では、金属がれきのように大量かつ多種多様な対象の分析には溶融処理時間が制約となることも想定でき、福島第一原子力発電所の放射性廃棄物分析のために大学や研究機関が質量分析法(ICP-MS)を活用した迅速かつ合理的な測定方法を開発中であり、これを今回のような低汚染で多種多様な対象物の測定にも適用していくことを考えてはどうかとのご意見をいただいた。さらに、海外での事業化事例では、溶湯をサンプリングして円盤状に成型し残留放射能を測定しているが、この成型固体を複数個用意して第三者がチェックできるようにしていること等が国内での取組みの参考になるとのご意見もいただいた。

1)-②については、測定・評価の効率化のために「代表サンプリング」を適用する場合、溶融金属中に残留する放射能が均質となることやそのための溶融炉設備の運転方法などを確認しておく必要があること、また、再利用やクリアランスの適用を前提とすると、残留放射能の測定誤差の扱いも含めて「均質程度」を見極めておく必要があり、これらの課題に関する現行知見や対応等について意見を交換した。

事業化に向けて規制庁との意見交換を進めている福井県のパネリストからは、JAEA 東海での廃棄物減容のための溶融試験等に関する文献情報を整理し、溶湯からのサンプリング試料と溶湯を固形化した後のインゴットから採取した試料の双方で、Co 元素濃度が均一となっている知見などを意見交換の場で説明してきていることや、今後のクリアランス申請に当たっては、溶融炉が完成した段階で実機でもデータを採取・確認して申請に臨む計画であるとの考えが示された。また、東電 HD のパネリストからは、溶鋼の均質性を把握していくために、代表的な核種である Co 元素の他に微量な元素もについても、鉄鋼メーカーでの不純物元素の測定分析の知見も踏まえながら検討を進めているとの紹介があった。

また、溶融炉設備の運転方法については、東電 HD では鉄鋼メーカーにおける電気炉での製品製造オペレーションに近い運用とすることで均質化を確保することを基本と考え、実機の完成時にその確認を行う等の対応を図っていく考えであること、福井県では Cyclife 社など海外で実施されている同種事業の情報や実績を踏まえて、溶融炉の運転方法などをさらに検討していく予定であることなどの考えが示された。

また、本年 1 月に開催された原子力規制委員会において、福井県の原子力リサイクルビジネスの取組みに係る規制上の対応方針が示されている。とくに、溶融処理を取り入れる際の新たな視点として、「事業主体が、溶融処理の後にクリアランス基準を満たすように受入基準を設けてクリアラ

ンス推定物を受け入れることで、現行クリアランス審査基準にある“評価単位内でバラツキが小さいこと(測定単位でクリアランス基準の 10 倍を超えないこと)”を溶融処理前の金属廃棄物について考慮する必要はなく、溶融処理後のクリアランス確認時をバラつき考慮の基準点とすればよい」とされている。この規制上の方針について、福井県ではクリアランス推定金属を溶融した後の金属に対してバラつきや均質の程度を明確にし、審査基準に則ってクリアランスの測定・評価を行う考えであり、現段階で規制上の方針と福井県の考え方に相違はなく、この方針に沿って測定・評価の方法の検討を進めるとの考えが示された。

2) については、金属廃棄物の再利用のためには民間事業者の協力が不可欠であり、全国規模での協力事業者の拡大のための施策や事業者のインセンティブ確保などについて、これを進める資源エネルギー庁や電事連のパネリストから、取組みの方向性などの考えが示された。クリアランス金属の再利用については、まずは発生するサイトの近傍で行うのが合理的であり、サイトに近い業界関係者の理解が不可欠であること、また、クリアランス金属を扱うことについて関係者や周辺住民に負のイメージもあり、これを払拭するために丁寧な説明が前提となることに加えて再利用のためのインセンティブも考慮していくこと等が紹介された。一例として、福井県内の高校では課外活動の一環としてクリアランス金属再利用の取組みが行われていることや、クリアランス金属の加工では分別管理等のプロセスの追加がコストに直結することから、そのコストを経済的に支援する取組みなどが既に実施されていること等が紹介された。また、クリアランス金属は素性が明確で品質の良い素材であり、より需要の多い建材等への再利用先を確保していくことで関係者のモチベーションアップにつなげることや、インセンティブとしての更なる経済的支援等も検討していくとの考えが示された。

また、現在行われているクリアランス物に対する「制限付き」の再利用については、クリアランス制度の社会定着を国が適切な時期に判断して制限のない再利用に移行していくこととされているが、この社会定着をどのように判断していくのか、その方策、ステップなどについて意見を交換した。

資源エネルギー庁のパネリストからは、現在、有識者に協力をいただきながら社会定着をどのような指標で判断していくかの検討を進めていることや、その状況が紹介された。この検討では、1) 再利用の実績をしっかりと積み上げていく必要があること、2) 制限解除に向けてはクリアランス金属を取扱う事業者やその事業者が立地する自治体等関係者の理解が必要であることから、これら 2 つを判断の指標として社会定着を見極めていくことを検討しているとの紹介がなされた。

最後に、再利用の更なる促進に向けて新しい考え方や方策などについて、放射線測定の専門家であるパネリストから海外の状況もまじえてご意見や提言をいただいたことか

ら、以下に要約する。

欧米では、「特定クリアランス物」や「リサイクル可能な放射性物質」について、既にリサイクルのためのビジネスが成立しており、この分野では日本が遅れを取っている印象がある。国内では、基準の下でクリアランス物の利用シナリオを限定しない「無条件クリアランス」としているのが現状であるが、クリアランスレベルをわずかに超える廃棄物も廃止措置等から相応量が発生する。前述の「特定クリアランス」は、従来のクリアランスのように用途を無制限にするのではなく、少し放射能濃度が高くても安全は担保できるような利用シナリオを考慮して、その制約のもとでクリアランス制度を運用する考え方であり、従来の「無条件クリアランス」と同等の安全性を確保しつつ有効利用できる資材物量を増やすことが出来、既にドイツなどではこの考え方が導入されている。また、基準を若干超える放射性物質でも、安全を担保しつつ再利用できるのであれば、そのような物質を放射性廃棄物として廃棄してしまうのは、資源の有効利用の考え方に逆行するものである。

国内では、無条件クリアランスの有用性について、先ずは社会の理解を得ていくことを最優先に理解促進に向けた取組みを実施しているところであるが、近い将来、海外事例や福井県のリサイクルビジネスの事例なども踏まえて、「特定クリアランス物」や「リサイクル可能な放射性物質」の再利用について、現行のステークホルダーに加えて、原子力に直接関係しない一般産業界の関係者や福井県の例のように規制側担当者にも加わっていただくなどして、その妥当性についてオープンで率直に議論する機会を設けて、将来の可能性を検討していくことを始めてはどうかとの提言をいただいた。

## おわりに

この企画セッションでは、原子力発電所の廃止措置等で発生する金属廃棄物の再利用を促進する取組みを実施している各組織からその概要を講演いただくとともに、関係者や有識者に参加いただき技術的・政策的な視点からパネルディスカッションを行った。

電事連のクリアランス金属再利用に向けた取組みは、クリアランス制度を適用して貴重な資源を社会のリサイクルプロセスに組み込んでいくために必須の取組みであり、建材への用途拡大など更なる前進を期待したい。福井県内では、地元高校生グループがクリアランス金属の再利用を積極的に試行する取組みや、ステークホルダーグループが中心となったクリアランス金属の再利用を考える市民交流会なども実施され、取組みの輪が広がっており、これらを通してクリアランス再利用の社会理解がさらに進んでいくことを期待したい。

また、福井県や東電 HD が進める金属を溶融処理して効率的に再利用する取組みは、国内においては新しいものであり、溶融処理時の放射能の除染効果や、溶融金属中の放射能の均質化とそのための溶融炉の運用方法などの技術的側面について各組織で検討がなされていく予定である。今後、それらの進捗の状況や結果について、学会の場などで

公開・共有がなされ、金属廃棄物の再利用技術の促進につながっていくことを期待したい。

さらに、これらの実績も踏まえて、将来的にはパネルディスカッションで提言された「特定クリアランス」などに議論が進展し、同等の安全性を確保しつつ有用な資源をさらに活用していけるような道筋が開けていくことを願いたい。

最後に、今回の企画セッションにご出席やご参加をいただいた皆様や、このような場を提供していただいたバックエンド部会に対し、ここに感謝の意を表します。