

NRA 技術ノート

NRA Technical Note Series

溶融クリアランスに関する技術的知見の整理 - ドイツ、スウェーデン及び米国の事例調査並びに今後の検討課題 -

Technical Overview of Clearance for Melting

- Case Studies of Germany, Sweden and the United States, and Issues for Future Consideration -

古田 美憲 吉居 大樹 仲宗根 峻也 澁谷 憲悟
酒井 宏隆

FURUTA Yoshinori, YOSHII Taiki, NAKASONE Shunya, SHIBUYA Kengo,
and SAKAI Hirotaka

放射線・廃棄物研究部門

Division of Research for Radiation Protection and Radioactive Waste Management

原子力規制庁

長官官房技術基盤グループ

Regulatory Standard and Research Department,
Secretariat of Nuclear Regulation Authority (S/NRA/R)

令和 8 年 7 月
Jul 2026

本報告は、原子力規制庁長官官房技術基盤グループが行った安全研究等の成果をまとめたものです。原子力規制委員会は、これらの成果が広く利用されることを期待し適時に公表することとしています。

なお、本報告の内容を規制基準、評価ガイド等として審査や検査に活用する場合には、別途原子力規制委員会の判断が行われることとなります。

本報告の内容に関するご質問は、下記にお問い合わせください。

原子力規制庁 長官官房技術基盤グループ 放射線・廃棄物研究部門
〒106-8450 東京都港区六本木 1-9-9 六本木ファーストビル
電 話：03-5114-2225

溶融クリアランスに関する技術的知見の整理
-ドイツ、スウェーデン及び米国の事例調査並びに今後の検討課題-

原子力規制庁 長官官房技術基盤グループ
放射線・廃棄物研究部門

古田 美憲 吉居 大樹 仲宗根 峻也 澁谷 憲悟 酒井 宏隆

要 旨

我が国におけるクリアランス制度とは、核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律（昭和 32 年法律第 166 号）第 61 条の 2 第 1 項で定められている原子力事業者等が工場等において用いた資材等に含まれる放射性物質の放射能濃度が、原子力規制委員会の定める基準を超えないことの確認を受けて、資材等を通常の産業廃棄物として処分又は再利用できるものとして扱う制度である。放射性物質により汚染された廃棄物の再資源化については、クリアランス制度の下で既に多数の実績が蓄積されているところであり、福井県においては嶺南 E コースト計画に基づいて原子力発電所の解体廃棄物を集中処理する事業の検討が進められている。当該事業においては、原子力発電所で使用した金属を溶融施設で溶融し、インゴット化してから放射能濃度を評価する手法が検討されている。以降、金属を溶融処理した後にクリアランス制度を適用することを「溶融クリアランス」という。

令和 6 年度第 57 回原子力規制委員会（令和 7 年 1 月 29 日）において了承された「福井県クリアランス集中処理事業に係る今後の対応方針」に基づき、原子力規制庁技術基盤グループは溶融クリアランス及び放射性物質で汚染された金属の溶融処理事業に関する海外事例並びに金属溶融炉の性能に関する調査を実施した。

クリアランス制度が積極的に活用されているスウェーデン及びドイツでは、溶融処理に際して汚染のない金属を混合する意図的な希釈が法令において明確に禁止されており、溶融炉への投入物は廃棄物受入基準に基づき管理されている。原子力分野で導入実績がある高周波誘導炉を用いた溶融処理では、コバルト等は金属相に残留しやすい一方、セシウム、ストロンチウムはスラグ又はオフガス系へ移行し得ることが報告されている。誘導加熱の原理から、溶融金属に残留するコバルト等は電磁攪拌により全体的にほぼ均一な分布となるが、その均一化の程度は溶融条件、溶融炉の設計及び運転条件に依存する。したがって、溶融による核種移行及び均一化効果を前提としたサンプリングによる放射能濃度の評価を行う場合には、溶融炉ごとの実証データに基づく説明が必要と考えられる。

本技術ノートでは、国内外の事例を踏まえ、溶融クリアランスに関する技術的知見を整理し、規制側が留意すべきと考えられる内容をまとめた結果を説明する。

Technical Overview of Clearance for Melting

- Case Studies of Germany, Sweden and the United States, and Issues for Future Consideration -

FURUTA Yoshinori, YOSHII Taiki, NAKASONE Shunya, SHIBUYA Kengo,
and SAKAI Hirotaka

Division of Research for Radiation Protection and Radioactive Waste Management,
Regulatory Standard and Research Department,
Secretariat of Nuclear Regulation Authority (S/NRA/R)

Abstract

In Japan, the clearance system is a regulatory framework under which materials and other items generated at facilities operated by nuclear licensees and other entities, as stipulated in Article 61-2, paragraph (1) of the Act on the Regulation of Nuclear Source Material, Nuclear Fuel Material and Reactors (Act No. 166 of 1957), may be confirmed by the Nuclear Regulation Authority (NRA) to contain radioactive material concentrations not exceeding the criteria established. This enables such materials to be treated as eligible for disposal or reuse as ordinary industrial waste.

Concerning the radioactive waste recycling, a substantial number of achievements have already been accumulated under the clearance system. Further, Fukui Prefecture is pursuing in commercialization of a project for centralized processing of decommissioning waste from nuclear power plants according to the Reinan E-Coast Plan (hereinafter, the “Centralized Clearance Project”). Under this initiative, metals from nuclear power plants are melted in a dedicated facility, cast into ingots, and then assessed for specific activity per unit mass. In this context, “clearance for melting” refers to the clearance system application after these metal materials have undergone melting treatment.

Based on the policy direction for the Centralized Clearance Project approved at the 57th meeting of the NRA in fiscal year 2024 (held on January 29, 2025), the Technical Support Group of the NRA Secretariat conducted investigations on overseas examples of clearance for melting, businesses engaged in the melting treatment of metals contaminated with radioactive materials, and the performance characteristics of metal melting furnaces.

Intentional dilution by mixing uncontaminated metals during melting is explicitly prohibited by law in Sweden and Germany, where the clearance system is actively utilized, and input materials fed into melting furnaces are managed according to waste acceptance criteria. Radionuclides such as cobalt tend to remain in the metallic phase in melting treatment using

high-frequency induction furnaces, which have been applied in the nuclear field, whereas radionuclides, including cesium and strontium may transfer to the slag or off-gas systems. Following the induction heating principle, radionuclides such as cobalt remaining in the molten metal, are largely homogenized throughout the metal through electromagnetic stirring; however, the degree of homogenization depends on melting conditions, melting furnace design, and operating conditions. Therefore, it is necessary to provide explanations supported by empirical data when evaluating radioactivity concentrations by sampling on the premise of radionuclide migration and homogenization effects.

This technical note clarifies and summarizes crucial technical knowledge on clearance for melting, including domestic and international case studies. Further, it discusses key considerations that the regulatory authority should consider in clearance for melting.

目 次

1. はじめに	1
2. 調査の背景及び経緯.....	2
2.1 背景	2
2.2 経緯	3
2.2.1 福井県クリアランス集中処理に係る意見交換会合	3
2.2.2 今後の対応方針.....	5
2.3 本技術ノートの目的.....	7
3. 溶融クリアランスの概要.....	9
3.1 溶融クリアランスの目的	9
3.2 溶融クリアランスの工程.....	10
4. スウェーデンにおける溶融クリアランスに関する調査	13
4.1 スウェーデンにおける溶融クリアランスの概要	13
4.2 スウェーデンにおける溶融クリアランスの流れ	16
4.2.1 出荷前作業	17
4.2.2 金属スクラップの出荷及び到着	17
4.2.3 溶融前作業	18
4.2.4 溶融	19
4.2.5 処理後作業	19
4.2.6 報告	21
4.2.7 残留廃棄物の返却.....	21
4.3 スウェーデンにおける溶融クリアランスの技術的な留意事項.....	21
4.3.1 意図的な混合・希釈に係る対応	21
4.3.2 顧客からサイクライフへの情報の受渡し	22
4.3.3 溶融による核種移行効果、均一化効果	22
5. ドイツにおける溶融クリアランスに関する調査	23
5.1 ドイツにおける溶融クリアランスの概要	23
5.2 ドイツにおける溶融クリアランスの流れ	24
5.2.1 出荷前作業	27
5.2.2 対象物の出荷及び到着.....	27
5.2.3 溶融前作業	28
5.2.4 溶融	30
5.2.5 処理後作業	31
5.2.6 残留廃棄物の返却.....	34
5.3 ドイツにおける溶融クリアランスの技術的な留意事項.....	34

5.3.1	意図的な混合・希釈に係る対応	35
5.3.2	委託元からジンペルキャンプへの情報の受渡し	35
5.3.3	溶融による核種移行効果、均一化効果	36
6.	米国における放射性物質により汚染された金属の溶融処理に関する調査	39
6.1	米国における溶融処理事業の概要	39
6.2	米国における溶融処理事業の流れ	40
6.2.1	輸送規則と受入基準	40
6.2.2	到着時のチェック	41
6.2.3	溶融前作業	41
6.2.4	溶融	41
6.2.5	処理後作業及び残留廃棄物の処分	42
6.3	米国における溶融処理事業の技術的な留意事項	42
7.	金属溶融に関する高周波誘導炉の性能に係る調査	43
7.1	調査の概要	43
7.2	調査対象	43
7.3	高周波誘導炉の主な仕様及び性能	44
7.4	各メーカーの追加情報	44
7.5	高周波誘導炉の性能等に関する留意点	46
8.	まとめ	47
	参考文献一覧	52
	執筆者一覧	55

表 目 次

表 5.1	CARLA での溶融処理による放射性核種の移行挙動	37
表 6.1	ES 社の米国内の各事業拠点	39
表 7.1	調査対象メーカー及びその選定理由	43
表 8.1	溶融クリアランスにおいて規制側が留意すべきと考えられる内容	47

図 目 次

図 4.1	サイクライフの施設	13
図 4.2	輸送の様子	14
図 4.3	海上輸送された PWR 蒸気発生器の陸揚げ	15
図 4.4	金属処理施設のレイアウト	16
図 4.5	サイクライフの金属スクラップ処理プロセスの概略図	17
図 4.6	大型熱交換器の到着検査（線量率の測定）	18
図 4.7	冷間切断作業及び熱間切断作業の様子	18
図 4.8	溶融作業の様子	19
図 4.9	残留廃棄物	20
図 4.10	サンプルの写真	20
図 5.1	CARLA 施設の概要	24
図 5.2	CARLA での金属再利用におけるマテリアルフロー	25
図 5.3	中レベル放射性廃棄物用の MOSAIK®キャスク（GNS 社製品）	26
図 5.4	CARLA における処理委託物の搬入の様子	27
図 5.5	CARLA の管理区域内で行われる処理委託物の確認	29
図 5.6	CARLA において用いられている 450 t プレスカッター	29
図 5.7	CARLA 施設内にある循環式ブラスト設備	30
図 5.8	CARLA の溶融炉	31
図 5.9	インゴットの製造の様子	32
図 5.10	インゴットの鋳込み前に行うサンプリング	33
図 5.11	残留廃棄物	34

略 語 表

ADAM	Analyse und Dokumentation der Aktivitäts- und Massenströme in CARLA – Schmelzanlage (CARLA 業務管理システム)
ADR	European Agreement Concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road (欧州危険物国際道路輸送協定)
AVK	Abfallfluss - Verfolgungs- und Produkt - Kontrollsystem (廃棄物トラッキングシステム)
BWAP	Bulk Waste Assay Program (大量廃棄物分析プログラム)
BWR	Boiling Water Reactor (沸騰水型原子炉)
CARLA	Centrale Anlage zum Recyclieren Leichtaktiver Abfälle (低レベル放射性廃棄物リサイクル集中プラント)
CFR	Code of Federal Regulations (連邦規則集)
D&D	Decommissioning and Decontamination (廃止措置及び除染)
EDF	Électricité de France (フランス電力会社)
ES	EnergySolutions Services, Inc. (エナジーソリューションズ社)
GNS	Gesellschaft für Nuklear-Service mbH (原子力サービス会社)
GSG	General Safety Guide (安全指針)
GSR	General Safety Requirements (安全要件)
IAEA	International Atomic Energy Agency (国際原子力機関)
ISO	International Organization for Standardization (国際標準化機構)
ISOCS™	In-Situ Object Counting System (現場物体計数システム)
JAEA	Japan Atomic Energy Agency (国立研究開発法人日本原子力研究開発機構)
JIS	Japanese Industrial Standards (日本産業規格)
LLW	Low-Level Radioactive Waste (低レベル放射性廃棄物)
MDA	Minimum Detectable Activity (最小検出放射能)
PWR	Pressurized Water Reactor (加圧水型軽水炉)
RP	Radiation Protection (放射線防護勧告)
SCO	Surface Contaminated Objects (表面汚染物)
StrlSchV	Verordnung zum Schutz vor der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung (放射線防護令)
WAC	Waste Acceptance Criteria (廃棄物受入基準)
WAG	Waste Acceptance Guidelines (廃棄物受入ガイダンス)

用語の定義

インゴット	精錬された金属を鋳型で固めた塊
金属損失	金属の溶解過程や保持中に、本来製品となるべき金属が酸化やスラグへの巻き込みによって失われる現象
クリアランス確認	クリアランス制度における原子力規制委員会の確認
クリアランス基準	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について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として原子力規制委員会規則で定める基準（クリアランスレベル）を超えないこと
クリアランス制度	原子力事業者等が施設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について、原子力規制委員会が定める基準（クリアランスレベル）以下であることの確認を受ける制度
クリアランス対象物	クリアランス確認を受ける対象物
クリアランス認可	クリアランス制度における放射能濃度の測定及び評価の方法についての原子力規制委員会の認可
クリアランスレベル	放射能濃度確認対象物（クリアランス対象物）に含まれる放射性物質の種類が 1 種類である場合にあっては当該放射性物質に対応した規則（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（令和 2 年原子力規制委員会規則第 16 号。以下用語の定義において同じ。）別表第 2 欄に掲げる放射能濃度を、2 種類以上である場合にあっては $\sum (D_j/C_j) = 1$ となるときのそれぞれの放射性物質 j に係る D_j/C_j ここで、 D_j は放射能濃度確認対象物に含まれる評価に用いる放射性物質 j の平均放射能濃度（ここで「平均」とは算術平均をいう。）、 C_j は当該放射性物質 j に対応した規則別表第 2 欄に掲げる放射能濃度
クロスコンタミ	ある物質に付着していた放射性物質が別の物質に移動すること 特に、放射性核種の放射能濃度や核種組成比が異なる物質間で放射性物質の移動が生じ、放射性核種の放射能濃度や核種組成比が変化すること
コールド試験	放射性物質を用いずに実施する模擬試験
サンプリング	母集団から、分析、試験、調査などの目的で代表的な一部を抜き出す操作

残留廃棄物	クリアランス対象物の前処理、溶融等において生じるクリアランス確認の対象外となる放射性廃棄物
条件付クリアランス	放射性物質の物理的若しくは化学的形態とその用途又は処分手段を考慮して、特定の状況について規制機関にクリアランス基準への適用が認められること（国内では認められていない。）
スラグ	鉱石から金属を還元・精錬する際に、特定の成分が溶融・分離してできたもの
トレーサー	元素又は物質の挙動を調べるために添加する物質
ドロス	熱切断時に生じ、切断面等に付着して再凝固した溶融金属の塊
廃棄物受入基準	処理施設、処分場等において受け入れることができる廃棄物の種類、性状、形態、数量等を定めた基準
ビレット	断面が比較的小さな正方形の鋳片
評価対象核種	放射能濃度評価の対象とする核種
ブルーム	正方形の断面又は比較的大きな長方形の断面である鋳片
無条件クリアランス	材料の種類や量、再利用・再生利用、管理方法や最終処分先にいかなる制限も設けないことを前提として導出されたクリアランスレベルを根拠として規制機関にクリアランス基準への適用が認められること
溶湯	高温で溶かした金属又は合金の液体
溶融クリアランス	金属を溶融処理した後にクリアランス制度を適用すること

1. はじめに

我が国におけるクリアランス制度とは、核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律¹（以下「原子炉等規制法」という。）第 61 条の 2 第 1 項で定められている原子力事業者等が工場等において用いた資材等に含まれる放射性物質の放射能濃度が原子力規制委員会の定める基準を超えないことの確認を受けて、資材等を通常の産業廃棄物として処分又は再利用できるものとして扱う制度である。当該基準は、クリアランス制度を適用した資材等から 1 年間に受ける被ばく線量が人体への影響を無視できるように、 $10\mu\text{Sv}$ オーダー以下となる放射能濃度として定められている。

原子力施設の廃止措置が実施されている昨今の情勢において、放射性物質により汚染された廃棄物の再資源化については、クリアランス制度の下で既に多数の実績が蓄積されているところである。福井県では、嶺南 E コースト計画²に基づいて令和 7 年 8 月 1 日に福井県原子力リサイクルビジネス準備株式会社が設立され、原子力発電所の解体廃棄物を集中処理する事業（以下「集中クリアランス事業」という。）の検討が始められている。集中クリアランス事業においては、原子力発電所で使用した金属を専用の熔融施設で熔融し、インゴット化してから放射能濃度を評価する手法が計画されている。以降、金属を熔融処理した後にクリアランス制度を適用することを「熔融クリアランス」という。

今般、令和 6 年度第 57 回原子力規制委員会（令和 7 年 1 月 29 日）において了承された「福井県クリアランス集中処理事業に係る今後の対応方針」³に基づき、原子力規制庁技術基盤グループは熔融クリアランス及び放射性物質で汚染された金属の熔融処理事業に関する海外事例並びに金属熔融炉の性能に関する調査を実施した。

本技術ノートでは、海外における熔融処理事例及び当該事例に関する技術的知見並びに一般的な高周波誘導炉の性能を踏まえ、熔融クリアランスに関する技術的知見を整理し、規制側が留意すべきと考えられる内容をまとめることを目的とする。

ただし、本技術ノートの記載内容に関して原子力規制委員会の決定又は承認を得ているものではない。したがって、本技術ノートが今後のクリアランス制度に関する規制活動を拘束するものではない。また、福井県の主張を紹介している部分に関しては、原子力規制委員会及び原子力規制庁が当該内容に同意することを示すものではない。

2. 調査の背景及び経緯

2.1 背景

クリアランス制度における原子力規制委員会の確認（以下「クリアランス確認」という。）を受けた資材は、一般の産業廃棄物又は資材と同様の扱いとなる。特に、金属については一般の金属廃棄物と同様に鋳物工場にて溶融、再利用等が可能となることから、多数の実績が蓄積されている。

クリアランス制度の活用に向けて、福井県は嶺南地域を中心に、原子力を始め再生可能エネルギーを含む様々なエネルギーを活用した地域経済の活性化やまちづくりを目指し、人・企業・技術・資金（投資）が集まるエリア形成を図ることを基本理念として、令和 2 年度に嶺南 E コースト計画を策定した⁴。当該計画に関連して、原子力規制庁は資源エネルギー庁（以下「エネ庁」という。）と面談⁵を行い、原子力発電所で使用した金属の再利用プロセスの確立に向けたエネ庁の取組及び福井県が検討を進めている集中クリアランス事業について説明を受けた。あわせて、本件の事業化に当たって規制上の観点からの問題点等について、エネ庁及び福井県と原子力規制庁との間で意見交換する場を設けて欲しいとの要望が示された。

このような社会的状況を踏まえ、令和 5 年度第 17 回原子力規制委員会（令和 5 年 6 月 21 日）において、エネ庁及び福井県が検討している集中クリアランス事業について、事業の概要及び規制上の取り扱いを検討する上での論点等について報告がなされた⁶。報告の結果、原子力規制庁とエネ庁及び福井県、必要に応じて関係する発電用原子炉設置者との間で、公開での意見交換を行う場を設けることが了承された。

また、報告された内容において、新たに設立される事業主体（以下「新規事業主体」という。）がクリアランス確認を受ける前の溶融処理に関する技術的な論点として以下の点が挙げられた。

4. 論点等

（3）技術的な論点

① 汚染の希釈・混合

現行のクリアランス制度は、クリアランス対象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、クリアランスレベルを超える汚染のあるものをクリアランスレベル以下のものと混ぜ合わせるによ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。集中クリアランス事業の処理においてこうした希釈行為を予定していないことを確認する必要がある。

② 測定及び評価の方法等

現行の審査基準^{7、(注1)}において、放射性物質の放射能濃度の測定及び評価の方法並びに品質保証に係る審査基準を定めているが、審査基準では、溶融処理後の物で確認を行うこと、確認を行う者が発電用原子炉設置者とは異なる者であることを想定していないことから、事業の詳細説明を踏まえ、技術的な課題を整理する必要がある。

2.2 経緯

2.2.1 福井県クリアランス集中処理に係る意見交換会合

(1) 意見交換会合の結果

集中クリアランス事業における技術的論点を検討するため、原子力規制庁はエネ庁、福井県及び原子力事業者（関西電力株式会社（以下「関電」という。）、日本原子力発電株式会社（以下「原電」という。）及び国立研究開発法人日本原子力研究開発機構（以下「JAEA」という。）との間で福井県クリアランス集中処理に係る意見交換会合（以下「意見交換会合」という。）を計3回実施し、その結果を令和6年度第2回原子力規制委員会（令和6年4月10日）において報告した⁸。意見交換会合において、以下のとおり福井県から技術的な論点が示された。

3. 意見交換会合の結果

(2) 福井県及び資源エネルギー庁の説明の主なポイント

④ 技術的な論点

ア. 汚染の希釈・混合

（前略）

あえて非放射性の金属を混ぜたり、単体でクリアランスレベルを満足するとの推定ができない廃棄物を混ぜて溶融することは、汚染の意図的な混合・希釈であると考えため行わない。単体でクリアランスレベルを満足すると推定できる廃棄物同士は、混ぜて溶融することを行う。単体でクリアランスレベルを満足するか否かの推定に当たっては、通常の除染作業の効果だけでなく、溶融による核種移行効果も見込む。そのような廃棄物受入の基準（Waste Acceptance Criteria。以下「WAC」という。）を定め、WACを満足しているかを記録及び目視により確認する。

イ. 測定及び評価の方法等

○溶融による核種移行効果

クリアランス認可申請に当たっては、既往の研究結果や本事業で使用する溶融炉での試験データ等を用いて、核種の移行効果の根拠を示していく。ドイツの溶融施設でのデ

(注1) 放射性濃度についての確認を受けようとする物に含まれる放射性物質の放射能濃度の測定及び評価の方法に係る審査基準をいう。以下同じ。

ータ⁹では、1350～1500℃の条件下で、以下のような傾向が認められる。

- ・鉄族元素（Fe、Co、Ni）はほとんどが溶湯中に残留する。
- ・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する。

○溶融による均一化効果

クリアランス認可申請に当たっては、既往の研究結果^{10,11}や本事業で使用する溶融炉での試験データ等を用いて、放射能濃度が均一化することの根拠を示していく。既往の研究では、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いる。

(2) 検討すべき課題

原子力規制庁は、福井県が示した技術的な論点について、今後検討すべき課題として以下のとおり整理した⁸。

5. 今後の対応

(1) 意図的な混合・希釈をしないことの判断基準

- ・放射能濃度の異なるものを混ぜて溶融すれば、当然に放射能濃度の変化は起こる。その中で、どのようなものの溶融までを、意図的な混合・希釈に当たらないものとして認めるか。

(2) 溶融の効果の捉え方

○溶融による核種移行効果

- ・溶融による核種移行効果を見込むことを認める場合に、その効果をどのように評価するか。

○溶融による均一化効果

- ・現行の審査基準では放射能濃度が平均してクリアランスレベル以下になることだけでなく、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レベルの 10 倍を超えないこと）も要求している^(注2)。溶融によりバラツキが均一化して小さくなるが、溶融前のバラツキが小さいという要求は外してよい。また、溶融後の均一性について、何を根拠として、どのように判断するか。

(注2) 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¹³（以下「クリアランス規則」という。）第 6 条第 2 号において、「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。その上で審査基準において、この「適切なものであること」の一つの項目として、「評価単位内のいずれの測定単位においても、評価に用いる放射性物質の $\Sigma(Dj/Cj)$ が 10 を超えないこと」を要求している。

- ・溶融後の放射能濃度について、溶融による均一化効果を見込み、サンプリングにより評価単位の放射能濃度を決定する場合には、そのサンプルの代表性をどのように判断するか。

(3) その他

- ・放射能濃度確認対象物の汚染の評価に必要な情報（核種組成比、使用履歴等）は、発電用原子炉設置者から本事業の主体に確実に受け渡される必要がある。これをどのように担保するか。
- ・なお、欧州委員会の放射線防護勧告 RP89¹²に基づく、条件付きで通常とは異なる濃度基準値を設ける「条件付クリアランス」の導入は今般の検討の対象とはしない。

2.2.2 今後の対応方針

令和 6 年度第 57 回原子力規制委員会（令和 7 年 1 月 29 日）において、クリアランス集中処理事業における技術的な論点に係る対応方針が以下のとおり了承された³。

3. 技術的論点等の検討及び対応方針

(1) クリアランス規則及び審査基準であらかじめ申請前に規定する事項

① 意図的な混合・希釈に係る対応

IAEA ガイド（「Application of the Concept of Clearance」(No.GSG-18¹⁴)）によると、クリアランスレベル以下であることを満足させるために、放射性物質に汚染されているものを、汚染されていないものと意図的に混合・希釈することは適切ではないとされている。

これを踏まえれば、福井県クリアランス集中処理事業においても、新規事業主体がクリアランス対象物でない放射性物質に汚染されていない資材等を、溶融時に意図的にクリアランス対象物と混合し、クリアランスレベルを満たすように希釈することは認められないと考える。

この点、現行のクリアランス規則第 6 条第 5 号において、「放射能濃度確認対象物について、異物の混入及び放射性物質による汚染を防止するための適切な措置が講じられていること。」を要求している。当該規定における「異物の混入」とは、放射性物質に汚染されていない資材等を含めて、当該放射能濃度確認対象物とは異なるものの混入を広く含む概念であり、現行のクリアランス規則が遵守されることにより、溶融処理における意図的な混合・希釈の防止を図ることができる。

<対応方針>（委員会了承事項）

以上より、クリアランス規則の改正は要しない。

その上で、熔融処理における意図的な混合・希釈に関する考え方を明確にすることは必要であるため、以下の趣旨を審査基準に明記する。

- ・放射能濃度確認対象物についてクリアランスレベル以下であることの確認の前に熔融等の処理を行う場合は、クリアランスレベルを満たすために意図的に放射性物質によって汚染されていない資材その他の物を混合し、希釈して処理しないこと。

② クリアランスの実施にあたり必要な情報について発電用原子炉設置者から廃棄物管理事業者への受渡しを担保するための措置

新規事業主体は、熔融処理後のクリアランス認可の審査並びにクリアランス確認を円滑に進めるため、発電用原子炉設置者から、熔融処理前のクリアランス対象物について、クリアランス対象物に係る汚染の履歴、放射能濃度など必要な情報の受渡しを担保する必要がある。

この点、廃棄物管理規則^{15、(注3)}第34条第1項第11号において、原子力規制委員会の認可を受ける保安規定の記載事項として、「放射性廃棄物の受払い、運搬、廃棄その他の取扱い（事業所の外において行う場合を含む。）に関する事」と定められている。当該規定は、クリアランス対象物を含む放射性廃棄物の受入れ基準を包含する概念であることから、現行規定に基づき、廃棄物管理事業者における適切なクリアランス対象物の受入れや情報の受渡しに関する事を保安規定に記載することで確認することは可能である。

<対応方針>（委員会了承事項）

以上より、廃棄物管理規則の改正は要しない。

新規事業主体による保安規定の認可申請があった際には、クリアランス対象物を含む放射性廃棄物の受入れ・受渡しに関して必要な記載がなされていることを審査する。

（２）クリアランス認可、クリアランス確認の段階で判断する事項

① 熔融による核種移行効果、均一化効果

熔融による核種移行効果及び均一化効果については、これらの効果を見込んだ放射能濃度の計測及び評価の方法を決定するため、新規事業主体が、国内外の研究結果に加え、新たに設計・建設する熔融炉におけるデータを基に核種移行効果及び均一化効果を説明する必要がある。

例えば、原子力規制委員会が均一化効果を前提としたサンプリングによる放射能濃度の計測を妥当と判断するためには、新規事業主体が、同じ発生源からの放射能濃度確認対象物について熔融炉での一定の条件下での熔融処理後、まず、十分なサンプル数の測

^(注3) 核燃料物質又は核燃料物質によつて汚染された物の廃棄物管理の事業に関する規則をいう。以下同じ。

定単位を測定し、放射能濃度に差がないこと（溶融処理により金属が均一になったこと）を説明することが必要である。

その上で、溶融前のクリアランス対象物については、新規事業主体において、受け入れ基準に基づき、溶融後にクリアランス基準を満足することが見込まれるものを受け入れることとなるため、溶融前のクリアランス対象物に対して、クリアランス確認時の基準を適用する必要はない。したがって、現行の審査基準では、放射性物質確認対象物の放射能濃度が平均してクリアランスレベル以下になることだけでなく、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レベルの 10 倍を超えないこと）を要求しているが、当該基準を溶融処理前に適用する必要はなく、従前どおり、クリアランス確認時を基準点として適用することが適切であると考ええる。

<対応方針>（委員会了承事項）

溶融による核種移行効果、均一化効果については、クリアランス認可、クリアランス確認の段階で判断する。また、評価単位内でバラツキが小さいことの要求については、現行規定に基づき溶融処理後のクリアランス確認時を基準点として適用する。

② その他

福井県等との面談¹⁶において、汚染源の系統が特定できないようなものについて、対象物の材料組成や半減期などにより溶融後にインゴットに残ると想定される核種を絞り込んだ上で、代表サンプルにおいて、絞り込んだ核種全てを測定評価することで、クリアランスを判断する方法を認めてほしい旨の要望があった。

新規事業主体が、汚染源の系統が特定できないようなものをクリアランス対象物にしようとする場合でも、核種組成など放射能濃度確認対象物の汚染の評価に必要な情報は発電用原子炉設置者から確実に受領した上で、必要な測定の実施、評価対象核種の絞り込みの妥当性等を明確に説明することが必要である。その妥当性については、原子力規制委員会がクリアランス認可の審査において確認することとする。

2.3 本技術ノートの目的

2.2.2 にて述べた対応方針を踏まえて、原子力規制庁技術基盤グループは、安全研究として溶融クリアランスについての国外の事例、具体的にはドイツ、スウェーデン及び米国における金属溶融処理事例の調査並びに一般的な高周波誘導炉の性能に関する調査を行った。本技術ノートの目的は、今後のクリアランス認可及びクリアランス確認における行政判断に必要と考えられる技術的知見を整理し、規制側が留意すべきと考えられる内容をまとめることである。

なお、海外においてクリアランス制度が積極的に活用されている国はドイツ及びスウェーデンのみであること、米国はクリアランス制度がないが放射性物質で汚染された金属を

溶融処理して処分又は再利用する事業が実施されていることから、調査対象国として選定した。

3. 溶融クリアランスの概要

3.1 溶融クリアランスの目的

一般的に溶融処理は、金属を高温で溶融させることにより、材質の均一化、不純物の分離及び除去、減容化、再利用性の向上等を目的として実施される。また、IAEA は GSG-18¹⁴ においてクリアランス概念の適用をまとめており、その中で以下のように、各国で適用されている条件付クリアランスの一例として金属の溶融を挙げている。

(原文)

7.1. Paragraph I.13 of GSR Part 3¹⁷ states:

“Clearance may be granted by the regulatory body for specific situations, on the basis of the criteria of paras I.10 and I.11 [of GSR Part 3], with account taken of the physical or chemical form of the radioactive material, and its use or the means of its disposal⁶⁵. Such clearance levels may be specified in terms of activity concentration per unit mass or activity concentration per unit surface area.

“⁶⁵ For example, specific clearance levels may be developed for metals, for rubble from buildings and waste for disposal in landfill sites.”

Hence, the radiological basis for specific clearance is the same as for generic clearance (i.e. as described in paras I.10 and I.11 of GSR Part 3¹⁷). Examples of specific clearance that have been applied in individual States include scrap metal for recycling (melting), buildings for demolition and waste for disposal in landfill sites.

(仮訳)

7.1. GSR Part 3¹⁷ の I.13 には次のように記載されている：

「クリアランスは、I.10 項及び I.11 項の規準に基づき、当該放射性物質の物理的若しくは化学的形態とその用途又は処分手段を考慮して、特定な状況について規制機関に認められることがある⁶⁵。そのようなクリアランスレベルは、単位質量あたりの放射能濃度又は単位表面積あたりの放射能濃度として定めることがある。

⁶⁵ 例えば、金属、建物の瓦礫及び埋立処分場に処分される廃棄物について、個別のクリアランスレベルを策定してもよい。」

したがって、条件付クリアランスの放射線学的根拠は、(GSR Part 3¹⁷ の I.10 及び I.11 に記載されているとおり) 一般クリアランスと同じであり、各国で適用されている条件付クリアランスの例としては、リサイクル（溶融）されるスクラップ金属、解体される建物、埋立処分される廃棄物が挙げられる。

放射性物質を含む金属廃棄物の溶融処理に関する研究は、核種移行挙動の解明、除染技術の高度化等を目的として実施されている。核種移行については、溶融処理を実施するこ

とにより金属内部の核種分布を均一化する効果¹⁰、酸化物の生成自由エネルギーの違いを利用してウラン等の放射性核種を酸化物としてスラグ層へ移行させる効果¹⁸等が報告されている。例えば、セシウム、ストロンチウム等はスラグ又はダスト側へ移行し、コバルト等は鉄側に残ることが報告されている¹⁹。

一方、福井県は溶融クリアランスの意義を以下のとおり挙げている⁴。

2. 原子力リサイクルビジネスの概要

(1) CL 集中処理事業の運用・管理

④ 検認前溶融

- ・溶融に伴い、核種の一部は排ガスやスラグに移行することを踏まえると、考慮する核種が明確になるため、評価対象核種が絞られる。
- ・既往の認可申請案件において主要な核種として選定されている Co-60 は溶融金属中に残留し、均一に分布することから、溶湯の一部を測定単位としてサンプリングすることで評価単位全体を代表することができる。
- ・溶融に伴い減容され、インゴットとなるため扱いやすい形状になる。
- ・現状、廃棄物の形状が様々であるため、測定の不確かさを考慮した保守性を見込んだ評価手法とする必要があるが、溶融処理により測定の不確かさの小さな形状となるため、測定の精度向上が図ることができる。

3.2 溶融クリアランスの工程

溶融クリアランスの工程について、福井県の計画⁴及び国内の関連する研究成果を参考に概説する。

基本的な工程は、原子力発電所からの受入れ、開梱・必要に応じて除染、分別・細断などの前処理、溶融、測定及び評価、クリアランス確認、保管並びに搬出となる⁴。

(1) 受入れ（福井県の計画）

原子力発電所から受け入れられるクリアランス対象物は、使用履歴、核種や放射能に関する情報、形状等について事前に発電用原子炉設置者から情報が提供される。溶融施設では、WAC への適合を確認するために受入れ時に外観確認、放射線測定及び質量測定を行う。

(2) 開梱・除染（福井県の計画）

受け入れられたクリアランス対象物は、容器を開梱して取り出した後に放射能を測定される。放射能が低い場合は前処理に移り、放射能が高い場合は表面の洗浄、汚れの除去などの除染が実施される。

(3) 前処理（福井県の計画）

安全に溶融処理を行うため、以下の前処理を行う。

- ① 金属の材質による分別及び不燃物、可燃物などの非金属類の除去
- ② 大きさによる分別
- ③ 機器の細断

(4) 溶融（福井県の計画及び国内の関連する研究成果）

前処理後の金属は、溶融炉で融点以上の温度に加熱され液体化されたのち、インゴットとして再成形される。以下、金属の溶融処理に関連する研究成果を記載する。

エネ庁の委託事業報告書²⁰において、容量 2 t の高周波誘導炉を用いて原電東海発電所又は JAEA 新型転換炉原型炉ふげんでクリアランス確認を受けた金属を一般の加工事業者が溶融し、インゴットを作成した加工実証結果が報告されている。

また、JAEA のレポート²¹において、容量 4 t の高周波誘導炉を用いて約 2 t～4 t の金属廃棄物を複数本の 200 L ドラム缶に封入した状態で溶融処理したコールド試験の結果が報告されている。トレーサーとしてコバルトを添加し、サンプル間の均一性を確認するための試験を実施している。

ほかにも、旧財団法人原子力施設デコミッショニング研究協会の技術報告¹¹において、容量 500 kg の高周波誘導炉を用いて炭素鋼を溶融した試験の結果が報告されている。トレーサーとして⁶⁰Co、¹³⁷Cs 及びほかの核種を加え、サンプルの放射能濃度を分析して均一性を調査している。

いずれの例においても採用されている高周波誘導炉とは、コイルによる電磁誘導によって金属材料を溶解する誘導炉である。周囲にコイルが巻かれている耐火物性の容器に投入された金属材料は、コイルに電流を流すことで投入した金属材料の内部に渦電流が生じ、ジュール熱によって融点以上の温度に加熱されることで溶解される。

(5) 測定及び評価（福井県の計画）

溶湯中の評価対象核種が均一に分布していることを前提として、溶湯全体から一部の試料を採取し、代表サンプルとして放射能濃度を測定及び評価する。

(6) クリアランス確認（福井県の計画）

クリアランス対象物の種類及び総重量、クリアランス対象物に含まれる放射性物質の放射能濃度の測定及び評価に用いた方法、測定及び評価結果、保管場所、保管方法等が記載されたクリアランス確認申請を原子力規制委員会に提出し、クリアランス確認を受ける。

(7) 保管・搬出（福井県の計画）

クリアランス確認を受けた金属は、施設内で保管・搬出され、通常の金属と同様に処分

又は再利用が可能である。

4. スウェーデンにおける溶融クリアランスに関する調査

本項では、スウェーデンにおける溶融クリアランスの事例として、サイクライフ・スウェーデン社（Cyclife Sweden AB、以下「サイクライフ」という。）に関する調査結果を記載する。

なお、本項における調査結果は、公益財団法人原子力安全研究協会への請負調査「令和5年度溶融クリアランスに関する調査」の成果の一部である。

4.1 スウェーデンにおける溶融クリアランスの概要

サイクライフの金属処理施設は、スタズビック・グループの施設として 1987 年に稼働を開始した。その後、2016 年にスタズビック・グループからフランス電力会社（EDF）に買収され、現在は EDF グループの子会社となっており、同社は、スタズビック・テクノロジー・パーク（Studsvik Technology Park）内の敷地で、金属処理施設を運営している。この立地は、ストックホルムに近いものの人口密度は低く、着岸可能な深さの海へのアクセスを有することに基づいて選ばれており、スウェーデンの東海岸、ナイショーピング（Nyköping）市内に位置している。サイクライフの施設全景を図 4.1 に示す。



図 4.1 サイクライフの施設

Figure 4.1 Cyclife Facility

補足）写真右側の赤丸：溶融処理を行う建屋、写真下部の赤丸：海上輸送された対象物を陸揚げする港

当初、金属処理業務は、ニーズに合わせて選ばれた既存の建屋で小規模に行われていたが、いくつかの段階を経て拡張されてきた。当初は鉄鋼のみが処理対象であったが、今日

では、原子力施設に大量に存在するほとんどの種類の金属が処理対象として扱えるようになった。

サイクライフでは、長年にわたりクリアランス制度への適用や減容を目的とした溶融処理が行われ、取り扱われた金属スクラップの質量は 1987 年からの総計で 5 万 t を超えるとされている。金属スクラップの一部には除染の後、元の形状のまま放射能濃度が評価されたものもある。また、クリアランス制度への適用ではなく減容のみを目的とした溶融は、処理された金属スクラップの総量のごく一部であり、主に蒸気発生器その他管状熱交換器の管束、燃料ラックなどの放射能インベントリの高いものが対象であった。沸騰水型軽水炉（以下「BWR」という。）の蒸気ドライヤーを含むいくつかの機器のように、減容と金属中の放射性物質の均一化を目的に溶融されたものもある。最終的に処理用に出荷される金属の 95% 以上がクリアランス制度への適用の対象となっている。

溶融処理施設には陸路と海路でアクセスできる。後者は、図 4.2 に示すように、大型機器が処理のために輸送される場合に重要である。図 4.3 に海上輸送された加圧水型軽水炉（以下「PWR」という。）の蒸気発生器の陸揚げの様子を示す。



図 4.2 輸送の様子

(a)海上輸送される BWR タービンローター (b)緩衝保管に向けて輸送されるボイラー

Figure 4.2 Overview of Transportation

(a) BWR Turbine Rotor Transported by Sea (b) Boiler Transported for Interim Storage



図 4.3 海上輸送された PWR 蒸気発生器の陸揚げ

Figure 4.3 Unloading of a PWR Steam Generator Transported by Sea

図 4.4 に金属処理施設のレイアウトを示す。最も広い面積が必要とされるのは溶融前の作業である解体、選別、分別及び除染の各作業のための部屋である。解体には、プラズマ切断といった熱間切断技術のほか、バンドソーといった冷間切断技術も用いられる。溶融炉は、図 4.4 中のファーンレスホールに設置されており、3.5 t 鋼の誘導炉が 2 基設置されている。溶融炉の運転条件は、溶湯の完全な均一化を確保しつつ、核種及び不純物をスラグに移行可能であることを念頭に決定されている。

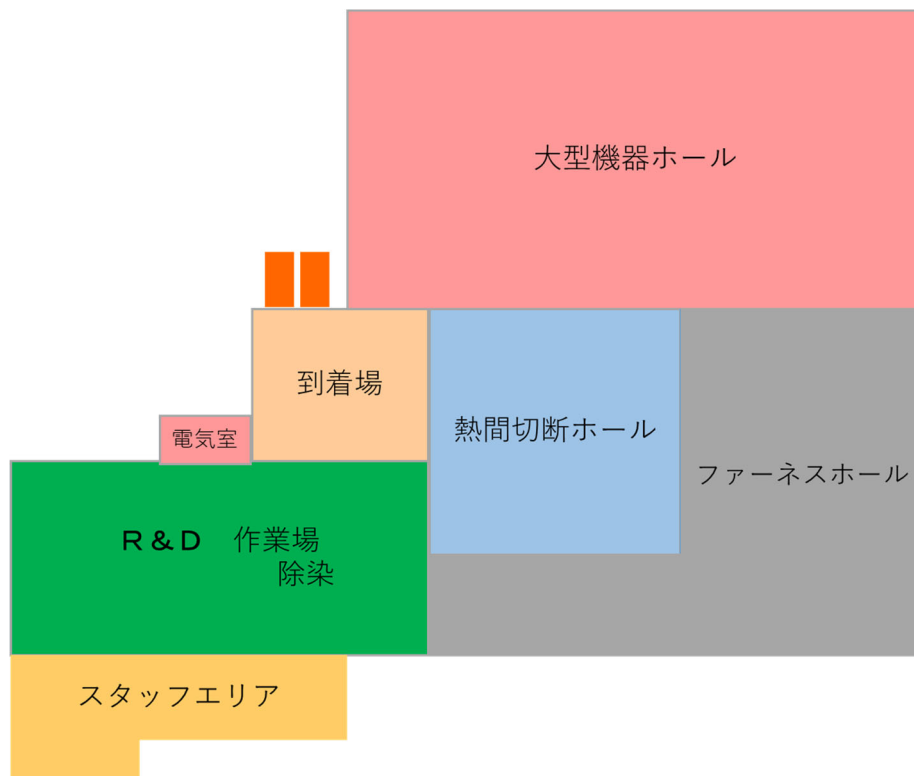


図 4.4 金属処理施設のレイアウト

Figure 4.4 Layout of the Metal Processing Facility

4.2 スウェーデンにおける溶融クリアランスの流れ

図 4.5 にサイクライフの金属スクラップの処理プロセスの概略図を示す。処理プロセスにおける典型的な工程は、以下のステップに分けられる。

- (1) 出荷前作業
- (2) 対象物の出荷及び到着
- (3) 溶融前作業
- (4) 溶融
- (5) 処理後作業
- (6) 報告
- (7) 残留廃棄物の返却

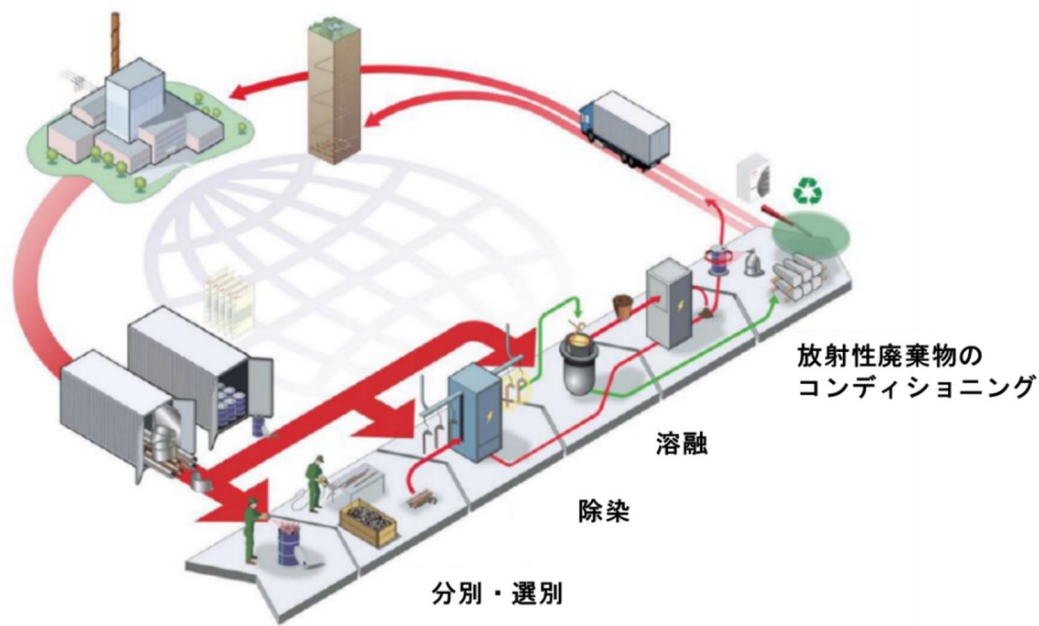


図 4.5 サイクライフの金属スクラップ処理プロセスの概略図

Figure 4.5 Schematic Diagram of Cyclife's Metal Scrap Processing

4.2.1 出荷前作業

溶融事業のプロセスは、溶融処理を希望する事業者の原子力発電所（スウェーデン国外の発電所を含む。以下「顧客」という。）において、耐用年数に達した金属材料又は機器が発生した場合にサイクライフに連絡することから始まる。このとき、顧客は対象物の放射線学的・物理学的データをサイクライフに提供し、WAC を満たしていることの確認が求められる。WAC を満たしている場合、サイクライフは顧客との協議の上で対象物を受け入れる旨の書面を作成し、顧客は対象物の出荷が可能となる。

さらに、処理後の全ての残留廃棄物が元の国に出荷できることを保証するため、顧客及び顧客の所属する国の所管官庁は「廃棄物返却保証」にそれぞれ署名する必要がある。

4.2.2 金属スクラップの出荷及び到着

金属スクラップは、顧客からサイクライフまで国際標準化機構（以下「ISO」という。）の定める海上コンテナで輸送されるか、大型機器として輸送される。大型機器の場合、外面が汚染されていないことを条件としてそのまま出荷されるか、またはオーダーメイドの防水シートに包まれて出荷される。輸送上の規制は「国連番号 2913、表面汚染物（以下「SCO」という。）（SCO-I及びSCO-II）（核分裂性物質のものを除く。）（RADIOACTIVE MATERIAL, SURFACE CONTAMINATED OBJECTS (SCO-I or SCO-II), non-fissile or fissile-excepted)」に従い SCO-I～III（表面汚染物）が該当する。なお、SCO-IIIは大型で容器に収納できない表面汚染物を指す。サイクライフに到着したとき及び輸送容器を開封するときに、必要に応

じて検証測定が行われる（図 4.6 参照）。

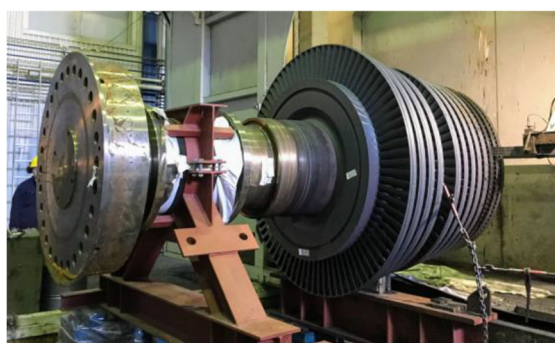


図 4.6 大型熱交換器の到着検査（線量率の測定）

Figure 4.6 Incoming Inspection of a Large Heat Exchanger (Dose Rate Measurement)

4.2.3 溶融前作業

溶融前作業は、金属スクラップの物理的及び放射線学的特性によって異なる。解体、分別・選別作業、除染、塗装及びその他表面コーティングを除去することを目的とした様々な種類の作業が行われる。冷間切断作業及び熱間切断作業の様子を図 4.7 に示す。



(a)



(b)

図 4.7 冷間切断作業及び熱間切断作業の様子

(a)冷間切断作業 (b)熱間切断作業

Figure 4.7 Cold Cutting and Hot Cutting Operations

(a) Cold Cutting Operation (b) Hot Cutting Operation

^{60}Co のように溶融処理を行っても金属から分離できない核種については、溶融前の除染により金属スクラップ中の残留放射能をクリアランスレベル以下に低減しておく必要があ

る。このため、除染作業の後に目視検査と検証測定が行われる。

また、溶融炉への投入前に、金属スクラップ中に密閉区画がないことを確認するための安全検査が必要である。水その他液体又は空気を満たされた密閉区画は、溶融作業において非常に危険な状況を引き起こす可能性がある。

4.2.4 溶融

金属処理施設の誘導炉での溶融プロセスにより金属を均一化し、特定の主要核種をスラグ又はオフガスフィルターに移行させる。サンプリングは、スラグ除去後と溶融金属の casting 前に実施される。その結果から、採取されたサンプルの放射能濃度が溶融バッチ全体の代表値として扱われる。図 4.8 に炉からのスラグ除去作業及びサンプリング工程の様子を示す。

なお、一つの溶融処理工程では、一つの顧客からの金属スクラップのみを投入することとなっている。



(a)



(b)

図 4.8 溶融作業の様子

(a)スラグ除去作業 (b)サンプルの casting 作業

Figure 4.8 Melting Operations

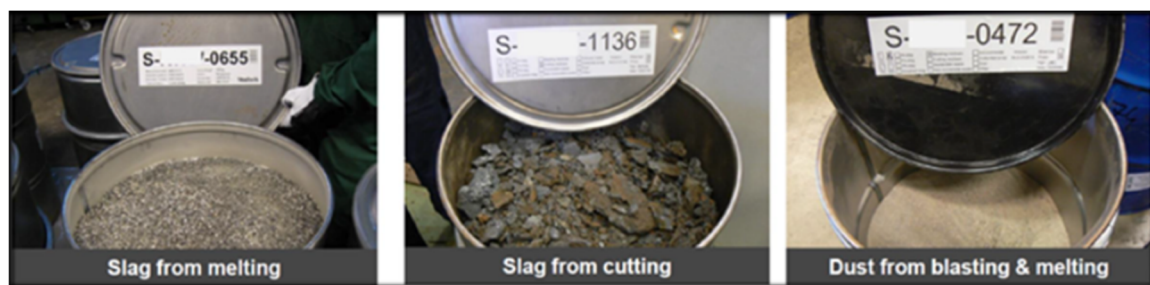
(a) Slag Removal Operation (b) Sample Casting Operation

4.2.5 処理後作業

(1) 残留廃棄物の管理

処理作業からの残留廃棄物（溶融スラグ、切断残渣、フィルターダスト、ブラスト残渣、個人防護具、可燃廃棄物、処理後の作業エリアの清掃廃棄物、消耗工具（旋盤）及び炉のライニング材が該当する。質量は、初期質量の約 5%である。）は回収された後、ドラム缶その他適切なパッケージに梱包される。測定されたガンマ線放出核種の含有量、線量率、質量及び梱包内の充填レベルが記録され、保管容器にラベルとして貼付される。図 4.9 に

残留廃棄物の写真を示す。



(a)

(b)

(c)

図 4.9 残留廃棄物

(a)溶融からのスラグ (b)切断からのスラグ (c)ブラスティングと溶融からのダスト

Figure 4.9 Residual Waste

(a) Slag Generated from Melting (b) Slag Generated from Cutting (c) Dust Generated from Blasting and Melting

(2) クリアランス制度への適用

4.2.4 に示したサンプリングにより、1 つの溶融バッチから 3 つのサンプルが採取される。1 つはサイクライフによる放射能評価に、もう 1 つは顧客用に、最後の 1 つは予備として扱われる。採取されたサンプルは、機械加工により図 4.10 のような円柱形に成型され、ガンマ線測定に用いられる、また、機械加工に伴って発生した切削くずは、必要に応じてアルファ線及びベータ線測定に用いられる。



(a)

(b)

(c)

図 4.10 サンプルの写真

(a)試料の鋳造 (b)試料の概観 (c)試料のガンマ線測定

Figure 4.10 Photograph of Samples

(a) Sample Casting (b) Overview of the Sample (c) Gamma-ray Measurement of the Sample

放射線測定では、測定時間は放射性核種のインベントリと必要な最小検出放射能 (MDA) によって異なるが、少なくとも 3,600 秒である。分析結果は、個別の核種組成比とともに、インゴット中の残存放射能総量の評価に用いられ、放射能濃度がクリアランスレベル以下であれば、当該インゴットは無条件クリアランス又は条件付クリアランス^(注4)が可能となり、新しい製品の製造のために再利用される。放射能濃度評価のプロセスを完了する前に、インゴットの表面汚染が調査される。この表面測定は、インゴット表面にホットスポットが含まれていないことを確認するための測定である。

顧客から出荷された金属スクラップは、残留廃棄物を含めてクリアランス制度への適用が完了するまで顧客の所有物である。もし、なんらかの理由でインゴットがクリアランス制度の対象にならない場合、インゴットは顧客に返却される。

4.2.6 報告

一連の処理工程の結果は、処理報告書に記録される。当該報告書には、実施された作業、生成されたインゴット並びに発生した残留廃棄物に関する放射線学的及び物理学的データが記載される。当該報告書は、残留廃棄物の送還準備及び一連のプロセス終了の基礎となる。

4.2.7 残留廃棄物の返却

クリアランス制度への適用の対象とならない残留廃棄物及び汚染された消耗品は、暫定的な貯蔵の後、最終処分のために顧客に返却される。

4.3 スウェーデンにおける溶融クリアランスの技術的な留意事項

4.2 ではスウェーデンにおける溶融クリアランスの概要を述べた。4.3 では、意図的な混合・希釈に係る対応、顧客からサイクリーフへの情報の受渡し及び溶融による核種移行、均一化の3点を、規制における技術的な留意事項として抽出、整理した。なお、整理結果を踏まえて日本で溶融クリアランスを実施する場合に規制側が着目すべき点については、8.に記載している。

4.3.1 意図的な混合・希釈に係る対応

スウェーデンにおけるクリアランス制度に関する規制「スウェーデン放射線安全機関の放射線防護法からの免除および物質、建屋構築物、区域のクリアランスに関する規則」²²では、放射能濃度評価における意図的な希釈を禁止している。これを受けてサイクリーフでは、溶融処理においては、処理のために出荷された材料のみを含むよう定めている。つま

(注4) GSR-3¹⁷によると、条件付クリアランスとは「クリアランスは、I.10 項及び I.11 項の規準に基づき、当該放射性物質の物理的若しくは化学的形態とその用途又は処分手段を考慮して、特定な状況について規制機関に認められることがある」こととされている。

り、放射性物質によって汚染されていない（清浄な）金属を溶融炉に投入することは禁止している。また、上述のとおり一つの溶融処理工程では、一つの顧客からの金属スクラップを投入することとしており、もし複数の顧客の金属スクラップが混合して溶融炉に投入された場合は逸脱事象として扱われる。なお、過去にそのような事例は発生していない。

4.3.2 顧客からサイクライフへの情報の受渡し

サイクライフでは、あらかじめ受入可能な金属スクラップの特性を WAC として文書化しており、これに基づいて金属スクラップの受入れを行っている。このため、顧客は自社の金属スクラップが WAC に該当するか否か判断し、WAC を満たすものだけをサイクライフに搬入することが溶融事業の契約事項の一部となっている。このような契約形態をとることで、金属スクラップが WAC を満たすものであることが示されると同時に、サイクライフにとっては溶融処理に必要な情報を確実に得ることができる仕組みとなっている。

4.3.3 溶融による核種移行効果、均一化効果

サイクライフが炉の種類を誘導炉とした理由は、溶湯の均一化を確保するためであった。また、サンプルの代表性の検証を目的として、インゴットの ISOCS™ 測定を実施し、採取したサンプルの分析結果と比較している。ただし、この測定はあくまでもサンプルの代表性の検証を確認するためのものであり、日常的な手順ではない点に注意が必要である。クリアランスに対する判断は、サンプルの分析結果、難測定核種との相関及び不確かさの考慮に基づいて行われる。再利用に先立ち、インゴットの表面汚染が測定され、サイクライフが自主的に定めた値（スウェーデンにおいて定められている表面汚染に関するクリアランスレベルより低い値である。）を超える表面汚染がないことを確認する。この表面汚染検査は、インゴット表面にホットスポットがないことを確認するものである。

これらの表面測定についての説明は、規制機関と共有されている。また、上述のサンプルの代表性の検証を目的とした測定の結果も規制機関と共有されている。

5. ドイツにおける溶融クリアランスに関する調査

本項では、ドイツにおける溶融クリアランスの事例として、ジンペルカンブ・メタロジ一社（Siempelkamp Giesserei GmbH、以下「ジンペルカンブ」という。）の低レベル放射性廃棄物リサイクル集中プラント（以下「CARLA」という。）に関する調査結果を記載する。

なお、本項における調査結果は、公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センターへの請負調査「令和6年度ドイツにおける溶融クリアランスに関する調査」の成果の一部及び規制機関である連邦環境・自然保護・原子力安全省（Bundesministerium für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit）に対して原子力規制庁職員自らが現地を訪問、聴取した結果の一部である。

5.1 ドイツにおける溶融クリアランスの概要

ジンペルカンブの金属溶融施設は、ドイツ西部のノルトライン＝ヴェストファーレン州に属する都市であるクレフェルトにある。クレフェルトに本社を置くジンペルカンブ・グループ（G.Siempelkamp GmbH & Co. KG）は、機械・プラントエンジニアリングとファウンダリ（鋳造）を二本柱とした事業を展開している。ジンペルカンブの鋳造事業部門にはグループ企業2社が関与しており、グループ持株会社による経営の元にあるジンペルカンブ・ジゼレイ社（以下「ジゼレイ社」という。）とジンペルカンブが共同でサービスを担当している。放射性物質で汚染された金属スクラップの溶融処理は、CARLAで行われている。CARLAの建屋は、ジゼレイ社の工場敷地内の中央部にあるが、その事業運営はジンペルカンブが担当している。CARLAの立地状況と施設建屋の構造を図5.1に示す。

CARLAは、1989年から稼働しており、2024年時点で年間約2,000tの汚染金属スクラップの溶融実績を有する。こうした汚染金属スクラップの溶融は、ジゼレイ社の工場施設で行われている非原子力業界由来の金属スクラップの取扱いとは完全に切り離されている。すなわち、CARLAの事業は、汚染金属スクラップを購入・取得しているが、ジゼレイ社自らクリアランス制度へ適用するために、それらを製品鋳造の鉄源にすることを目的にしている。ジンペルカンブは、溶融による減容、除染を通じて、委託元又は自社以外の第三者による再利用を可能とするサービス、又は残存する放射能を合金相に閉じ込めるなどの処理サービスを提供している。委託元には、ドイツ国内だけでなく、スペイン、イタリア、オランダ、ベルギー、オーストリア、スイス、英国及びフランスがある。また、処理委託物が発生する施設には、原子力発電所が最も多く、放射性同位体元素を扱う研究施設、核燃料製造施設、ウラン濃縮施設及び廃棄物管理施設も含まれる。CARLAで製造されるインゴットは、金属材料としての成分調整はしておらず、原材料として市場調達できる半製品（ブルームやビレット）のような品質ではないため、製品原料の一部として使うには再溶融が不可欠である。

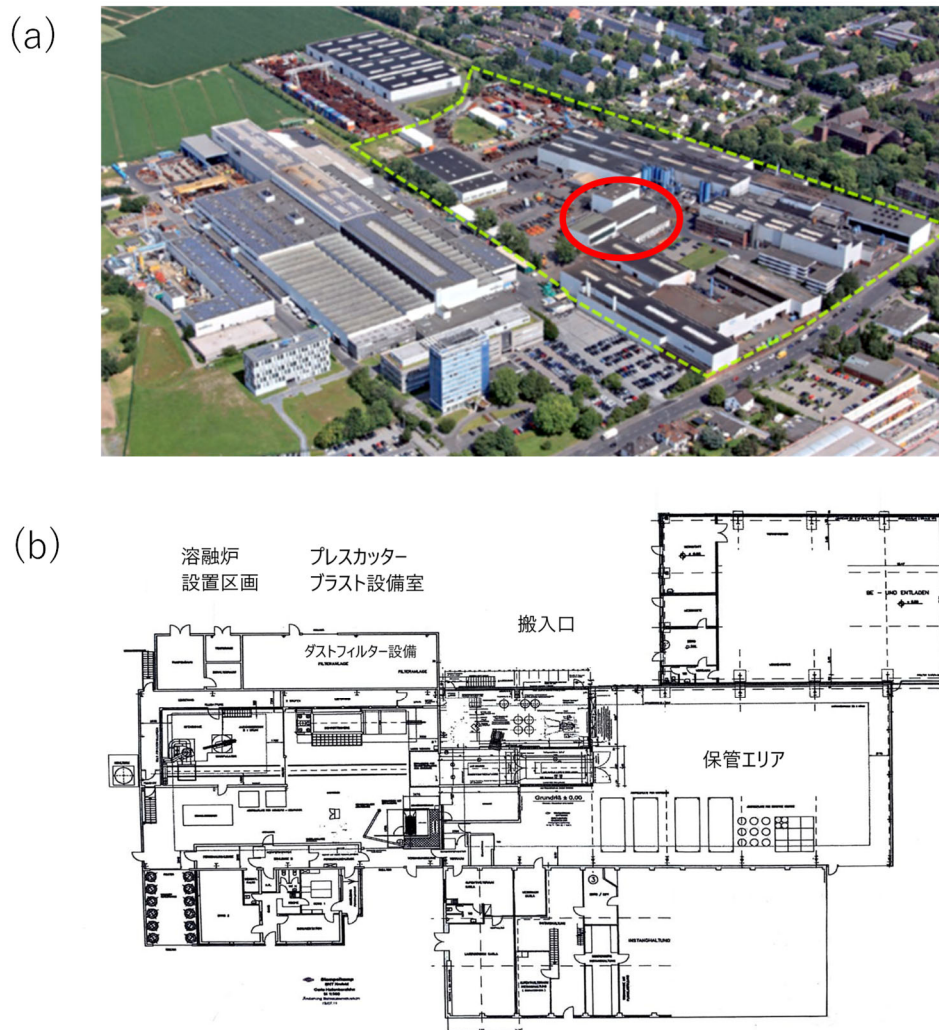


図 5.1 CARLA 施設の概要

(a)ジゼレイ社の敷地の空撮写真 (b)CARLA 建屋の内部構造

Figure 5.1 Overview of the CARLA Facility

(a) Aerial View of the Giesserei Site (b) Internal Structure of the CARLA Facility

補足) 破線内がジゼレイ社の敷地、赤枠内部の建屋が CARLA

5.2 ドイツにおける溶融クリアランスの流れ

CARLA での溶融処理によって製造されるインゴットが取り得るルートを図 5.2 に示す。商業契約の締結後、委託元から処理委託物の放射能や寸法に関する情報がジンペルカンプに提供される。委託元から受領した処理対象物は、必要に応じて切断又は分別した後、溶融処理を行ってインゴットが製造される。ジンペルカンプは、インゴットの放射能分析と化学分析を行う。

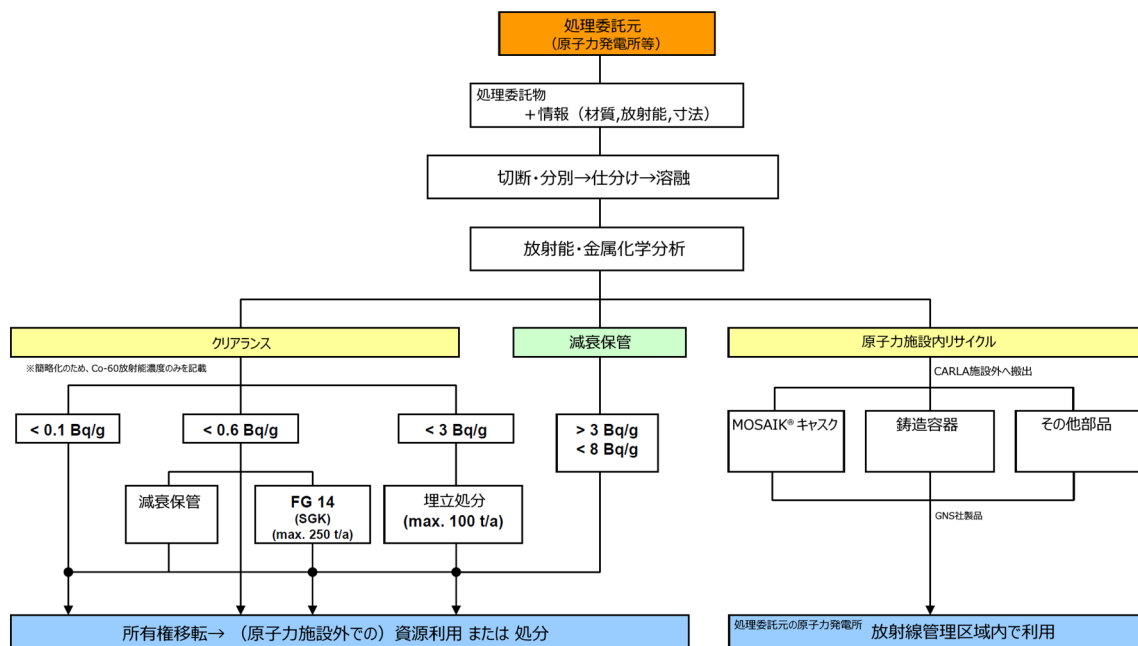


図 5.2 CARLA での金属再利用におけるマテリアルフロー

Figure 5.2 Material Flow for Metal Recycling at the CARLA Facility

委託元がクリアランス手続を進める場合、放射線防護令（以下「StrlSchV」という。）に基づく仕向先ルートは、インゴットの放射能濃度によって 4 つの選択肢がある。

- (1) 無条件クリアランス（StrlSchV 附則 4 の表 1 第 3 欄、 ^{60}Co : 0.1 Bq/g 以下）
- (2) 「再利用する金属スクラップ」としての条件付クリアランス（StrlSchV 附則 4 の表 1 第 14 欄、 ^{60}Co : 0.6 Bq/g 以下）
- (3) 「埋立処分する年間 100 t までの固体物」としての条件付クリアランス（StrlSchV 附則 4 の表 1 第 8 欄、 ^{60}Co : 6 Bq/g 以下）
- (4) 減衰保管（20 年以内）後、上記(1)、(2)、(3)のいずれかのクリアランス ^{60}Co : 3 Bq/g ~ 8 Bq/g

(1)は無条件クリアランスのクリアランスレベルを遵守できる場合であり、インゴットの仕向先には特段の制約はない。

(2)の場合には、StrlSchV 附則 8 第 G 部の規定により、適格な仕向先は当該インゴットと他の金属との混合割合を 1:10 とすることが保証できる精錬所又は年間処理量が 40,000 t 以上の精錬所でなければならない。

なお、ジンペルカンブも適格な仕向先の一つである。同社は、CARLA での溶融の委託元に対し、金属スクラップの再利用を目的とした条件付クリアランスの仕向先を自社施設とする有料オプション（他委託元のものも含めて年間 250 t まで）を提供している。

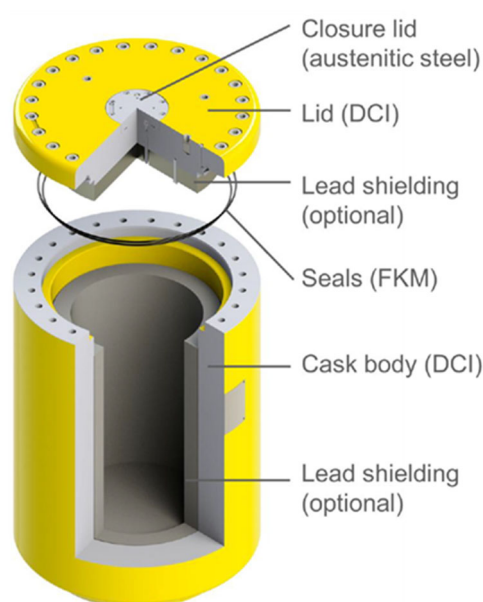
(3)は産業廃棄物としての埋立処分であり、これは資源の再利用とらないが、委託元が行うクリアランス手続で選択可能なルートの一つである。ただし、払出し量に年間 100 t の

上限があるため、委託元にとっては量的な面で魅力に乏しい。

(4)は含まれる放射性核種の半減期に応じて減衰保管した後に、(1)、(2)又は(3)のいずれかのルートを採用するものである。

さらに、ジンペルカンプでは、ドイツの原子力サービス社^(注5)（以下「GNS 社」という。）との商業契約に基づき、CARLA とは別の自社施設において、放射性廃棄物用の金属容器の鑄造業務を受託している。

GNS 社が原子力発電所に納入する代表的な製品として MOSAIK[®]キャスクと呼ばれる円筒形金属製容器がある。この容器は炉内構造物、廃樹脂、スラッジ等の中レベル放射性廃棄物用に開発されたものであり、1980 年代からドイツの原子力発電所で共通的に使用されている。国内外を含め、9,000 体を超える利用実績がある。また、MOSAIK[®]キャスクは、低中レベル放射性廃棄物処分場（Konrad 処分場、2027 年操業開始予定）に収容する処分容器として承認を受けている。MOSAIK[®]キャスクの仕様を図 5.3 に示す。



本体材質：ダクタイル鋳鉄（DCI）
外形寸法：Φ 1,060 mm × H 1,500 mm
容器厚さ：160 mm
鉛遮蔽：0 mm～120 mm の範囲で選択可
空質量：5,730 kg（鉛遮蔽なしの場合）

図 5.3 中レベル放射性廃棄物用の MOSAIK[®]キャスク（GNS 社製品）

Figure 5.3 MOSAIK[®] Cask for Intermediate-Level Radioactive Waste (GNS Product)

ジンペルカンプによれば、委託元から受け取った金属スクラップについて、必ず MOSAIK[®]キャスクの原料とするために熔融処理を行うといった、用途を指定するルールはない。一方で、その委託元に納入するキャスクの数と納期の情報が GNS 社を通じて提供される。ジンペルカンプでは、①CARLA 熔融処理レポートは受入れコンテナ単位で完結するように作成する必要があること、②金属スクラップの委託元と MOSAIK[®]キャスク納入

^(注5) ドイツの原子力発電事業者 4 社が共同で設立した株式会社であり、原子力発電所の運転・廃止措置で発生する放射性廃棄物管理に関わる各種サービスを提供している。GNS 社は、放射性廃棄物の処理設備の開発のほか、高線量の放射性廃棄物の貯蔵・処分に用いる各種の容器を開発・供給する役割を担っている。

先を同じとする、という 2 つの条件を満たすように作業スケジュールが組まれる。

また、MOSAIK[®]キャスク等の原子力施設内における再利用のルートが存在することによって CARLA で溶融処理量が確保できており、事業継続する上で重要であるとしている。

5.2.1 出荷前作業

CARLA での処理委託物の受入れ時の荷姿は、標準的な ISO コンテナ（20 ft のハーフコンテナ又はフルハイトコンテナ、最大質量 24 t）であり、トラック輸送で持ち込まれる。放射性資材の輸送は、欧州危険物国際道路輸送協定（以下「ADR」という。）に基づく規制下で行われている。発送側（委託元）は一定の手順に従って輸送パッケージの放射能濃度を決定する必要があるほか、コンテナごとに詳細なリストを作成する必要がある。リスト記載事項には、コンテナの識別番号、総質量（グロス質量、コンテナ質量を除いた正味質量）、収納物の説明、全放射能、核種別の放射能濃度及び表面線量率（コンテナ表面から 0 m と 1 m 距離での線量率）がある。

5.2.2 対象物の出荷及び到着

コンテナ内の処理委託物は、通常、処理委託元でドラム缶や鉄箱に小分けされている。大量のバルク材の場合には、ISO コンテナにバラ積みした状態で受け入れることもある。輸送業者からの受取り時には、輸送物（ISO コンテナ）の識別番号を確認するほか、コンテナの表面線量を測定する。その後、図 5.4 に示すとおりジゼレイ社敷地内のコンテナヤードで保管する。



(a)



(b)

図 5.4 CARLA における処理委託物の搬入の様子

(a)コンテナの受入の様子 (b)保管の様子

Figure 5.4 Receipt of Consigned Materials for Processing at CARLA

(a) Receipt of Containers (b) Storage Conditions

処理委託物の取扱いにおける放射線安全の観点から、受入れ単位（ISO コンテナなど）での平均値として、以下の条件が設定されている。

- (1) 受入れ単位当たりの全核種の放射能濃度が1,000 Bq/g未満であること
- (2) ただし、 ^3H , ^{14}C , ^{55}Fe , ^{63}Ni については10,000 Bq/gまで許容される
- (3) 核分裂性核種を含む場合、資材100 kg当たり当該核種が15 g未満であること

条件(2)は、CARLA の操業経験を踏まえて管轄当局と協議して認められた条件であり、条件(1)を満たさない場合に適用される。条件(3)は、CARLA が原子力法（Atomgesetz）に基づく許認可を受けた施設ではないことと関係している。

高温で行われる溶融処理の安全確保に関する要件には、以下のものがある。

- (1) 乾燥しており、水分、油分を含まないこと。
- (2) 有機物（保護用の透明プラスチックシートやゴム等）はバッチ当たり 1 質量%未満であること。
- (3) グリース又はニスが入ったスズ製の缶を入れないこと。
- (4) 爆発するおそれがあるものを入れないこと。
- (5) 密閉された空洞がないこと（サポート部材で使われる中空管にはあらかじめ穴をあける。）。

ジンペルキャンプでは、委託元に対して、最低でも溶融炉 1 バッチの量になるように、また可能な限り金属種類別に分けて搬出するよう要請しており、鉄の場合には最低でも 3 t である。なお、銅と真鍮の場合は合計で 3 t、アルミニウムの場合は 0.7 t である。

5.2.3 溶融前作業

(1) 目視確認と分別

CARLA の管理区域内では一つのコンテナに収納されていた金属スクラップだけを取り扱うように運用することにより、クロスコンタミを防止している。次のコンテナの作業に着手する前には、施設内を清掃する。金属スクラップは、委託元でドラム缶や鉄箱等の小分け容器に分別されているが、ジンペルキャンプ側でも委託元が提供した情報と現物を照合して確認する（図 5.5 参照）。具体的には、以下の内容を入念に確認する。

- ① 作業時の放射線安全
- ② 溶融時に危険となる密閉空洞の有無、分別状況

小分け容器の表面線量率が事前情報より高い場合や処理委託物の取り違いや異常が疑われる場合には、処理対象から外して委託元に送り返す。ジンペルキャンプでは、委託元に金属種類別の分別を依頼しているが、溶融鑄造に関係する専門的な観点から、CARLA 誘導炉での溶融に適さないパーツを分解し、より分けている。例えば、誘導加熱を阻害する卑金属、液体鉄に移行しやすい硫黄を含むゴム部品がある。



図 5.5 CARLA の管理区域内で行われる処理委託物の確認

Figure 5.5 Verification of Consigned Materials within the Controlled Area of CARLA

(2) 切断

金属スクラップは、熔融炉に投入できるサイズにあらかじめ調整する必要がある。投入可能な金属片は長さ 1,500 mm 未満、断面が 500 mm×500 mm 未満である。ジンペルカンブでは委託元にあらかじめサイズ条件を満たして搬出するよう要請しているが、委託元との契約内容に基づき CARLA 側においても適宜切断を行う。切断にはコールドカットを優先し、450 t プレスカッター（図 5.6 参照）やワイヤーロープソーを使用する。必要な場合にはプラズマカッターやガスバーナーによるサーマルカットを行い、溶断時に発生するスラグは酸化物であるため熔融炉に投入せず、残留廃棄物として委託元に返却する。



図 5.6 CARLA において用いられている 450 t プレスカッター

Figure 5.6 450-Ton Press Cutter Used at the CARLA Facility

(3) ブラスト除染

製造されるインゴットがクリアランスレベルを満たすように、CARLA 管理区域内に設

置してある循環式ブラスト装置により金属スクラップの表面除染を行う（図 5.7 参照）。ブラスト材にはスチールビーズを使用しており、表面に付着した汚染物を剥離くずとして金属スクラップから取り除くことによって除染する。剥離くずは気流で回収し、受入れ単位（ISO コンテナなど）での処理が終了した時点でサンプリングし、分析レポートの作成のために放射能濃度の測定を行う。剥離くずは残留廃棄物として委託元に返却される。ブラスト材は複数の処理対象物の除染に繰り返し使用された後、最終的に処理対象物とともに熔融炉で処理される。ブラスト材の量は、熔融炉 1 バッチ分（約 3 t）と比較してわずかであり、意図的な希釈とは考えられていない。



図 5.7 CARLA 施設内にある循環式ブラスト設備

Figure 5.7 Recirculating Blasting System Installed in the CARLA Facility

5.2.4 熔融

ジンペルキャンプでは、委託元に対して、可能な限り金属種類別に分別した状態の金属を最低でも熔融炉 1 バッチの量に調整して搬出するよう要請している。1 バッチの量は鉄の場合には最低でも 3 t である。

なお、銅と真鍮の場合は合計で 3 t、アルミニウムは 0.7 t であり、アルミニウムの場合には、熔融炉内に小型るつぼを設置して溶解する。

溶解工程では、金属スクラップを電磁誘導加熱方式の誘導炉（容量 3.2 t）に投入し、液体化した金属を電磁攪拌することによって均一にする。図 5.8 に示すとおり、金属スクラップの熔融炉への投入はマニピュレータによる遠隔操作で行っており、投入作業中は熔融炉設置エリアへの作業員の立入りを禁止している。



図 5.8 CARLA の溶融炉

Figure 5.8 Melting Furnace at CARLA

金属の溶解作業では炉の温度管理が重要であり、炉のセンサーで投入物の質量と温度をモニタリングしながら作業を進める。溶融炉の上部に設置されたカメラを通じてオペレータは炉内の状態を目視で確認できる。

一般の電気炉製鋼の場合には、溶解金属に酸素を吹き込むなどの酸化精錬・還元精錬の工程が続くが、CARLA では特段の精錬を行っていない。そのような精錬工程は、CARLA 製インゴットのクリアランス又は原子力施設内における再利用の仕向先での工業製品製造プロセスで行われることになる。

なお、表面塗装がある金属スクラップの溶融については、塗装は炉内ですぐに燃焼してインゴットの金属組成に影響しないことから、塗装を事前に剥ぎ取る工程は行わないとのことであった。ただし、難燃のゴムに含まれる硫黄は溶湯に溶けるため、ゴムワッシャーのような小さなゴム製品でも事前に取り除く。

5.2.5 処理後作業

(1) 残留廃棄物の管理

一般的に、溶湯温度が高くなりすぎると金属が酸化してスラグとなる。運用経験からの統計データとして、スラグ量は受入れ金属スクラップ質量の 3%~4%、ダスト量は約 1%である。ジンペルカンブによれば、CARLA の誘導炉で生じるスラグの大部分は黒色の金属酸化物であり、鉄鉱石から銑鉄を生産する高炉で生じるスラグ（高炉スラグと呼ばれ、鉄鉱石に含まれるケイ素等、コークス灰、副原料の石灰石などが混じったもの）とは化学組成が大きく異なるとされている。

(2) クリアランス手続き

溶融炉の誘導加熱制御と各所温度センサーで炉内温度を確認し、金属の液状化を確認し

た後、スラグ除去とサンプリングを行う（図 5.9(a)参照）。溶融炉を傾けて溶湯を鑄型に流し込む方法により、1 体当たり約 500 kg の円柱状インゴットを鑄造する（図 5.9(b)参照）。

インゴット鑄込みには、砂型ではなく、繰り返し使用できる鑄型を使用しており、鋼鉄製円筒内に耐火性のある陶器（るつぽ）を収めた構造である。るつぽはインゴット約 100 体の製造に耐える。鑄型内の溶湯が固まる前に、金属製ハンドルを付ける。約 1 日の空冷後にインゴットを鑄型から取り外し、表面に付着している鑄造バリやるつぽ材料を CARLA 内のブラスト装置で除去する。その後、本体に識別 ID をペイント書きし、ハンドルに識別 ID を刻印した金属プレートを取り付ける。

インゴットは、再利用の経路が決まるまで CARLA 屋外の保管エリアに移される。減衰保管するインゴットは屋根付きの区画に置かれるが、それ以外のインゴットは屋外で保管されている。保管エリアは金網フェンスで囲まれており、施錠管理されている。



(a)



(b)

図 5.9 インゴットの製造の様子

(a)インゴットの鑄込み (b)製品化したインゴット

Figure 5.9 Ingot Production Process

(a) Ingot Casting (b) Ingot Product

ジンペルカンプは、委託元との契約に基づき、申告時に金属スクラップ中に存在するとされた核種の放射能について、CARLA における処理後にインゴット、スラグ及びダストにどのように再分布・移行したかを記載した分析レポートを作成する。

分析レポートの作成に必要なデータを取得するために、インゴットの鑄込み前に、溶湯から取り除いたスラグ及び溶湯の一部をサンプリングする。

図 5.10 に示すとおり、スラグサンプルは、ハンマーで砕いて粉末状にして空冷した後、プラスチック容器に入れて識別番号を記載する。溶湯サンプルは、小さな型枠に流し入れ、冷却後、機械切削によって標準的なメダル型の放射線分析試料（直径 50 mm×厚さ 10 mm）

に加工し、識別番号を刻印する。

溶湯サンプルについては、以下の分析を実施する。

- ① ガンマ線スペクトロメトリーによる放射能分析
- ② 金属化学組成分析

金属化学組成分析には、メダル型放射線分析試料の加工時に生じる切削くずを使用する。鋳型から抜いてブラスティングしたインゴットの表面汚染については、スミア試験又はサーベイメータによる直接測定によって確認する。このような放射能分析及び金属化学組成分析は CARLA の分析ラボで実施しており、ドイツ認定評議会（Deutsche Akkreditierungsstelle）から ISO/IEC 17025（試験所及び校正機関の能力に関する一般要求事項）のラボラトリ認定を取得している。

ジンペルカンプによると、同社の操業経験に基づき、約 3 t の溶融バッチについて溶湯サンプルは 1 つで代表できる。ただし、クリアランス手続を行う委託元との契約に基づき、委託元、管轄当局（州の自治体又は広域自治体の行政部局）又は専門家による検査のために追加サンプルを取得、作製する場合がある。



(a)

(b)

図 5.10 インゴットの鋳込み前に行うサンプリング

(a)スラグを粉末状にする様子 (b)溶湯サンプルを採取する様子

Figure 5.10 Sampling before Ingot Casting

(a) Slag Pulverization Process (b) Sampling of Molten Metal

クリアランス手続に関する申請はその金属スクラップが発生した原子力施設の放射線防護責任者が行うものであり、ジンペルカンプは申請を代行できない。つまり、ジンペルカンプが放射能濃度を測定・分析したレポート内容を確認して、第三者へインゴット所有権を移転する判断を行う「クリアランス手続」は委託元が行うものである。その一方で、ジンペルカンプ社自身も、放射線防護法の許認可取得者であるので、クリアランスレベル

を下回るインゴットを市場にリリースできるライセンスを保有している。したがって、インゴットの所有権がジンペルカンプに移転された後であれば、同社がインゴットを市場にリリースすることができるようになっている。

5.2.6 残留廃棄物の返却

ブラスト除染で生じる剥離くず、溶融工程で副産物として生じるスラグ、換気フィルタシステムから回収されるダストは、残留廃棄物として処理委託元に返還する（図 5.11 参照）。CARLA 操業の許認可条件により、その返還は 1 年以内に行う必要がある。ジンペルカンプによると、多くの委託元は返還物を圧縮して 200 L ドラム缶に収納することを要望しているため、残留廃棄物の収納には 180 L ドラム缶を使用している。180 L ドラム缶を 200 L ドラム缶に収納して返還する場合もある。これらを委託元が用意する輸送コンテナに収納して発送する。残留廃棄物の輸送は、ジンペルカンプが荷主となる。180 L ドラム及び輸送コンテナの表面線量を測定・記録し、ADR に基づく輸送に関する許可手続きを行う。



(a)



(b)

図 5.11 残留廃棄物

(a)スラグの写真 (b)バグフィルタのダスト

Figure 5.11 Residual Waste

(a) Photograph of Slag (b) Bag Filter Dust

5.3 ドイツにおける溶融クリアランスの技術的な留意事項

5.2 では、ドイツにおける溶融クリアランスの概要を述べた。5.3 では、意図的な混合・希釈に係る対応、委託元からジンペルカンプへの情報の受渡し及び溶融による核種移行、均一化について、規制の観点における技術的な留意事項を整理した。なお、整理結果を踏まえて日本で溶融クリアランスを実施する場合に規制側が着目すべき点については、8.に記載している。

5.3.1 意図的な混合・希釈に係る対応

CARLA における溶融処理量の 94%を占める鉄材の場合には、特定の放射性元素のスラグ移行を促す調整剤（スラグの粘度（塩基性度）を下げて排出しやすくするもの）を使用していない。ただし、ウラン汚染のある鉄スクラップの場合には、自社で開発した添加剤（溶湯の特性の改善を目的としたもの）を使用する。また、 $\beta\gamma$ 核種で汚染された非鉄金属（アルミ、銅、真鍮、鉛）を処理する場合には、不純物の分離を良くするために添加剤を使用する場合がある。ジンペルカンプは、添加剤の投入はインゴットを有為にかさ増しするものではないことから「意図的な希釈」に該当しないと整理している。

CARLA でのインゴット casting は、委託元から受入れた金属スクラップだけが処理対象であり、汚染のない金属を混ぜることはない。また、一般の casting メーカーの溶融工程では鉄の炭素量を高めるために加炭剤（練炭）が使用されるが、CARLA ではそのような加炭剤も使用していない。

CARLA での溶融では、ねずみ鉄（FC 材）やダクタイル鉄（FCD 材）のような特定種類の鉄の製造を意図していない。鉄の製造では、炭素含有量や合金内の炭素析出状態（片状、球状）を調製する必要があるが、CARLA の溶融工程では炭素の量や析出状態の調製は行っておらず、鑄型に流し込んで自然冷却するだけである。そのため、CARLA では溶融時に空気と触れた炭素が燃えて脱炭し、結果として炭素含有量が低く、硬いインゴットになる。

資源としての再利用が可能なインゴットを製造する上では、溶融炉に投入する金属を種類別に厳密に分けることが重要である。このような分別は CARLA だけでなく一般の金属リサイクル業者においても、炭素鋼とステンレス鋼（クロム、ニッケル、モリブデンを含む合金）に対して一般的に行われている。なお、ジンペルカンプが対象物を選別・分別できる範囲は、受入れコンテナ単位のみである。また、放射能濃度については、 ^{60}Co の放射能濃度とクリアランスレベルとの関係のみを考えれば十分な場合がほとんどである。そのため、溶融前のブラスト除染に注力することが重要である。

5.3.2 委託元からジンペルカンプへの情報の受渡し

原子力発電所等の処理委託者（荷主）が第三者の輸送事業者へ委託した輸送物の受入れに関しては、ADR の規制下で行われるため、コンテナ単位で輸送パッケージの放射能濃度のほか、コンテナ収納物に関する詳細リストが処理委託者から輸送事業者へ受け渡される。リスト記載事項には、コンテナの識別番号、総質量（グロス質量、コンテナ質量を除いた正味質量）、収納物の説明、全放射能、核種別の放射能濃度、表面線量率（コンテナ表面から 0 m と 1 m 距離での線量率）がある。これらの情報については、輸送委託者が輸送に必要な申請を行うタイミングでジンペルカンプにオンラインシステムで提供する。

輸送が行われる前に、委託元とジンペルカンプの間で商業契約に基づく事前合意が必要のため、CARLA での処理に必要なインプット情報は、輸送の開始よりも早い段階で引渡

される。処理委託物に関する情報は、GNS 社が運用する廃棄物トラッキングシステム（以下「AVK」という。）を通じて、ジンペルカンプの CARLA 業務管理システム（以下「ADAM」という。）にオンラインで取り込まれる。CARLA での処理で製造されるインゴット及び副産物の情報は、ADAM 上で作成し、AVK を通じて処理委託元に提供される。

5.3.3 溶融による核種移行効果、均一化効果

委託元が溶融処理委託を検討する際の判断材料として、ジンペルカンプは委託元向けに、インゴット及び副産物への放射性核種の移行挙動に関する情報を提供している（表 5.1 参照）。これらの移行割合は、CARLA での実績を元に作成したものであるが、ジンペルカンプが溶融処理の全ての結果に対してそれらを保証するものではない点に注意が必要である。以下、ジンペルカンプによる CARLA での溶融処理の特徴である。

- (1) 鉄は、溶融炉の適切な温度管理によってスラグ化せず、ほぼ全てをインゴットとして資源化できる。
- (2) ウランによって汚染された鋼鉄容器（六フッ化ウランの輸送シリンダ等）は、添加剤を用いることで高い除染効果（DF=100）を期待できる。
- (3) 核燃料に由来する核種のうち、ストロンチウム、セシウムの除染効果は高い。ユーロピウムも除染できるが、セリウム、ルテニウム、アンチモンはインゴットに残りやすい。
- (4) 腐食生成物に起因するコバルト、ニッケル、マンガン、亜鉛は、インゴットに残りやすい。溶融による ^{60}Co の除染効果は低いので、インゴットの放射能濃度を低くするには事前のブラスト除染が重要となる。

表 5.1 CARLA での溶融処理による放射性核種の移行挙動

Table 5.1 Migration Behavior of Radionuclides during Melting Treatment at the CARLA Facility

元素 (放射性核種の質量数)	移行割合 (%)		
	インゴット	スラグ	ダスト
α 核種とその娘核種			
U (235, 238)	1	99	
Pu (241)	1	99	
Am (241)	1	99	
Th (231, 234)	1	99	
Pa (234m)	1	99	
$\beta\gamma$ 核種			
Fe (55)	100	< 1	-
Co (60)	88	11	1
Ni (63)	90	10	-
Sr (90)	< 1	97	2
Cs (134, 137)	< 1	60	40
Ag (110m)	< 1	32	68
Eu (152, 154)	4	95	1
Ce (144)	50	50	< 1
Mn (54)	60	39	1
Zn (65)	36	12	52
C (14)	-	5	95
Zr (95)	28	72	-
Ru (103, 106)	67	< 1	33
Sb (125)	95	4	1
Nb (95, 96)	81	17	2

ジンペルキャンプでは、溶湯における核種の均一性について、溶湯サンプルや鑄造模型・試作品を対象として様々な破壊試験・非破壊試験を実施しており、核種の均一性に関する研究を古くから行ってきた。ジンペルキャンプは、核種の均一なインゴットを製造するには、溶解工程で①溶湯を均一にする以外にも、鑄込み工程において②鑄型に流す溶湯の温度、③鑄型の温度管理、④鑄型に流す溶湯流し込み速度、などの複数の要因が関係すると考えている。

ジンペルキャンプからの指摘として、「溶融炉」は専門メーカーがユーザのニーズに合うように個別に設計、製造するものであり、加熱装置のスペックが同じでも、それを使って製造する物の品質まで全く同じになることを炉メーカーが保証するわけではない点が強調された。つまり、誘導炉のスペックのみならず、誘導炉オペレータの知識・経験と技量も重要である。

ただし、CARLA でのインゴットの鑄込み工程では、鑄型の温度制御はしておらず、溶湯温度と流し込み速度を工夫するだけである。インゴットの鑄型に近い部分と中心部では冷

え方に差があるので、例えば、液体金属に溶けていた空気が金属の冷却に伴って脱ガスして、インゴットの内部に空洞（鑄巣）が生じる可能性がある。工業製品の場合には鑄造欠陥は製品検査で排除するが、当該インゴットは「一般材料用の鑄塊」としての扱いであるため問題にならない。

6. 米国における放射性物質により汚染された金属の溶融処理に関する調査

本項では、米国における溶融処理事業の事例として、エナジーソリューションズ社（以下「ES 社」という。）に関する調査結果を記載する。

なお、本項における調査結果は、日本エヌ・ユー・エス株式会社への請負調査「令和 7 年度米国における放射性物質により汚染された金属の溶融処理に関する調査」の成果の一部である。

米国にはクリアランス制度が存在せず、管理区域内での再利用に限られているが、放射性物質により汚染された金属スクラップを溶融処理して製品化する点はスウェーデン及びドイツにおける溶融クリアランスと共通であると考え、ES 社について調査した。

6.1 米国における溶融処理事業の概要

ES 社は、米国ユタ州ソルトレイクシティに本社を置く原子力サービス企業である。放射性廃棄物の管理・処理を専門とし、米国及びカナダの政府機関（国立研究所）、原子力発電所、研究施設、医療機関等を相手にビジネスを展開している（以下 ES 社が金属スクラップを受け取る主体を「発生元」という。）。

ES 社は表 6.1 に示すとおり、廃止措置及び除染（以下「D&D」という。）に関する事業本部、廃棄物処理（溶融処理事業はこの一部に含まれる。）、物流（輸送、梱包及びロジスティクス支援）関連、原子力関連サービス（原子力発電所の運転・保守に関する支援、設備の改修、運転期間延長、新規施設の建設及び廃止措置に関するプロジェクトの管理）、低レベル放射性廃棄物（以下「LLW」という。）の処分場を運営している。

表 6.1 ES 社の米国内の各事業拠点

Table 6.1 Business Sites of Energy Solutions Inc. within the United States

サービス	所在地
本社	ユタ州ソルトレイクシティ
D&D 事業本部	ノースカロライナ州シャーロット
廃棄物処理	テネシー州オークリッジ（ベア・クリーク）、メンフィス、アーウィン
物流	ペンシルベニア州ウェックスフォード テネシー州クリントン
原子力関連サービス	サウスカロライナ州エイキン ジョージア州タッカー
LLW 処分場	サウスカロライナ州バーンウェル ユタ州クライブ

表 6.1 のうち、金属スクラップの溶融処理に関する施設は、テネシー州にあるベア・ク

リーク及びメンフィスの両処理施設である。なお、アーウィンの処理施設は、使用済みのイオン交換樹脂の処理に特化した施設であるため、本整理では除外した。

ベア・クリークの施設は金属溶融のほか、圧縮、焼却、水分除去、高レベル放射性廃棄物濾過処理といった減容化処理を行っている。施設全体での年間の放射性廃棄物処理量は、13,000 tを超える。金属溶融処理では誘導溶融炉を使用しており、発生元から一度に 600 t ～900 t 程度の金属を受け入れ、溶融処理を行っている。溶融金属は鋳型で成形・製品化され、例えば米国国立高エネルギー物理学研究所の加速器用の 10 t の遮蔽ブロックとして放射線管理区域内で再利用されている。

メンフィスの施設では、大型機器を小さくするための切断設備、除染設備、倉庫を有している。

6.2 米国における溶融処理事業の流れ

金属スクラップは、梱包なしで出荷される大型機器とみなされない限り、長さ 20 ft 又は 40 ft の ISO 貨物コンテナに積み込まれた状態で搬入される。この時点で輸送規則（49 CFR 173²³）を満たしている場合、追加の遮蔽なく輸送できる。コンテナは、クラス 7 貨物として陸路、鉄道、海外航船により米国の港に輸送される。港での引き渡しをもって、廃棄物は ES 社の所有物となる。ES 社の施設搬入時に、輸送書類及び契約要件の確認を行う。その後、切断、除染、選別を経て、放射線管理施設で使用される製品の仕様に適合するように溶融処理される。

溶融工程から発生した残留廃棄物は、ES 社の放射性廃棄物として処分される。また、溶融処理以外の工程（圧縮、焼却又は輸送・処分のために再梱包されるもの）で発生した廃棄物については、米国規制による無制限放出要件（Bulk Waste Assay Program（以下「BWAP」という。）と呼ばれる州の規制当局により承認された評価プログラムであり、許認可管理下で LLW を評価し、規制基準以下と確認されたものに限り、条件付きで一般の産業廃棄物として処分可能とする制度。無条件クリアランスとは異なる制度である点に注意が必要である。）を満たすものに限り、ES 社では一般廃棄物の埋立処分場において処分している。

6.2.1 輸送規則と受入基準

6.2 に示したとおり、発生元から ES 社施設まで金属スクラップを輸送するに当たって、輸送規則が適用される。具体的には、49 CFR 173.403 及び 173.427 に基づき SCO に分類される。SCO は、I 及び II に分類され、輸送時の容器、表示及び線量率制限等の要件が決定される。

ベア・クリーク処理施設及びメンフィス処理施設とも WAC を定めている（それぞれベア・クリーク：Waste Acceptance Guidelines（以下「WAG」という。）、メンフィス：Waste Acceptance Guidelines at the Memphis Facilities）。両者とも表面線量率、表面汚染密度、放射能濃度（全核種の総放射能濃度に加えて、³H、¹⁴C といった特定の核種の放射能濃度）を定

めている。

6.2.2 到着時のチェック

ES 社では、金属スクラップの受入れ時に放射線分析及び金属化学的分析を実施し、発生元から提供された情報と一致していることを確認している。金属スクラップの受入れ可否の判断基準として、以前は WAG の規定に基づいて判断していた。現在は、発生元との契約の一環として、発生元から提供されたデータを用いて「材料データパッケージ」を作成し、当該データパッケージを WAG として活用している。

ES 社では、金属スクラップの受入れ及び溶融前の作業に必要な情報について、発生元から以下のような三段階のプロセスで提供を受けている。

- (1) 契約に基づいて、受け入れるインベントリを合意する。
- (2) 出荷前に、各金属スクラップが材料データパッケージに準拠し、認可要件を満たしていることを確認する。
- (3) 施設での受入れ時に、出荷前に承認された書類に金属スクラップが準拠していることを確認する。

ベア・クリーク及びメンフィスの各処理施設に輸送される材料は、WAG 又は契約に基づく材料データパッケージに準拠していることが実証される必要がある。

6.2.3 溶融前作業

ES 社では溶融時に再利用先が求める放射線及び金属化学的仕様を満たす製品を製造するように、金属スクラップの切断、除染、選別を行っている。そのため、各作業の工程の具体は、受領した金属スクラップと製造する製品（再利用先に納入する製品）に基づいて計画されている。製品は、除染により表面汚染等を低減した上で、WAG 及び製品仕様に適合する範囲で放射性物質の残存を許容した状態で管理されている。

6.2.4 溶融

溶融対象の金属は主には鉄系金属であるが、ほぼ全ての金属（液体金属、自然発火性のものを除く。）を対象としている。ただし、受入可能な量は、金属の種類によって異なる。溶融炉にはジュール加熱式誘導溶解炉を用いている。溶融炉に投入可能な金属の量及びスラグに核種を移行させることを目的とした調整材の詳細は、非公開とされている。

なお、ES 社では異なる発生元からの金属スクラップを混合して溶融することを前提としている。発生元から提供されるデータに基づいて投入する金属スクラップの配合を調整し、再利用先が提示する製品仕様を満たすように溶融工程中也サンプリングを行いつつ溶融処理を行っている。

6.2.5 処理後作業及び残留廃棄物の処分

ES 社では溶融処理を終えた全ての製品の放射能濃度を評価している。また、製品の輸送のため、輸送規則への適用を確認するために表面汚染密度についても評価を行っている。

溶融処理工程から発生する残留廃棄物については、処分場の WAC を満たすことを確認するための評価が行われる。特に、BWAP により処分できるものについては、一般廃棄物の埋立処分場であるカーター・バレー埋立処分場での処分が可能とされている。

6.3 米国における溶融処理事業の技術的な留意事項

6.2 では、米国における溶融処理事業の概要を述べた。米国にはクリアランス制度がなく、管理区域内での再利用に限られていることから、6.3 では 4.3 及び 5.3 とは異なる観点として複数の発生元からの金属スクラップの同時溶融において、規制側が留意すべき事項について記載する。なお、整理結果を踏まえて日本で溶融クリアランスを実施する場合に規制側が着目すべき点については、8.に記載している。

6.2 のとおり、ES 社では複数の発生元からの金属スクラップを同時に溶融炉に投入、製品化している。スウェーデン及びドイツではクリアランス制度への適用を目的とした溶融処理であったことから、溶融処理は一つの顧客からの金属スクラップに限定するとともに、溶融後のインゴットはクリアランスレベルを満たすように除染及び溶融処理が行われていた。一方で ES 社の場合は再利用先が提示する製品仕様に沿った製品を製作することが目的であり、当該製品は管理区域内で再利用されることから、スウェーデン及びドイツの場合とは除染及び溶融処理の目的が大きく異なっている。

複数の発生元からの金属スクラップを同時に溶融炉に投入する場合、投入する金属スクラップに付着している放射性物質の放射能、難測定核種の核種組成比が大きく異なる可能性のあるものを溶融・均一化することになる。これは、スウェーデン及びドイツの場合よりも考慮すべき核種の種類が増えることが予想されるため、あらかじめ金属スクラップに付着した放射性物質についての詳細なデータを用意しておくことが必要である。このような詳細なデータは WAC の一環として溶融施設側にて要求しておくことが望ましく、ES 社の材料パッケージはそのような詳細なデータの提供を WAC の一つとして扱っているものと考えられる。

7. 金属溶融に関する高周波誘導炉の性能に係る調査

本項では、金属の溶融処理において一般的に使用されている高周波誘導炉の概要、性能及び使用実績に関する調査結果を記載する。

なお、本項における調査結果は、日本エヌ・ユー・エス株式会社への請負調査「令和 7 年度金属溶融に関する高周波誘導炉の性能に関する調査」の成果の一部である。

7.1 調査の概要

本調査は、金属溶融処理に広く使用されている高周波誘導炉を対象に、装置の概要、性能特性、設計思想及び適用実績を把握することを目的として実施した。特に、炉容量 3.5 t ～10 t 級の高周波誘導炉を主な対象とし、国内外メーカーの製品仕様及び公開情報を基に溶融性能、運用上の制約等を整理した。

7.2 調査対象

調査対象について、炉容量 3.5 t ～10 t の製品を扱っているメーカーを製品情報から確認し、国内外合わせて 6 社を調査対象とした。

なお、国内で原子力分野での溶融炉適用の例が少ないことから、炉容量 3.5 t 未満でも、原子力分野で実績のあるメーカーを含めることとした。

調査対象のうち海外メーカーについては、誘導溶解炉の国際市場調査²⁴で Inductotherm Group、ABP Induction Systems GmbH、OTTO Junker GmbH に 2 社を加えた 5 社でシェアの約 36%を占めており、また、別の調査会社が実施した市場調査²⁵においても 3 社は主要メーカーとして挙げられていることから、調査対象への選定として妥当と考えられる。

また、国内メーカーについては、国内市場調査に係る公開情報が確認できなかったため、溶融炉及び対象炉容量の明示並びに原子力分野での実績を考慮し、シンフォニアエンジニアリング株式会社、富士電機株式会社及び日本ガイシ株式会社を選定した。表 7.1 に調査対象メーカー及び選定理由を示す。

表 7.1 調査対象メーカー及びその選定理由

Table 7.1 Target Manufacturers and Reasons for Their Selection

調査対象メーカー	選定理由
シンフォニアエンジニアリング株式会社 (日本)	対象炉容量の製品を製造しているため。
富士電機株式会社 (日本)	対象炉容量の製品を製造しているため。
日本ガイシ株式会社 (日本)	対象炉容量は製造していないが、国内において原子力分野での導入実績があるため。
Inductotherm Group (米国)	対象炉容量の製品を製造しているため。

ABP Induction Systems GmbH（ドイツ）	対象炉容量の製品を製造しているため。
OTTO Junker GmbH（ドイツ）	対象炉容量の製品を製造しているため。

7.3 高周波誘導炉の主な仕様及び性能

各メーカーの公開情報を基に、高周波誘導炉の主な仕様及び性能を以下に記載する。

なお、高周波誘導炉は、誘導加熱による直接加熱方式であり、熱効率が高く、金属損失が比較的小さいことが特徴である。

(1) 基本仕様

- ① 炉容量：15 kg～100 t
- ② 周波数帯域：100 Hz～500 Hz

(2) 溶融性能

- ① 最大溶解温度：鋳鋼で 1,500℃～1,650℃
- ② エネルギー消費量：鋼材で 465 kWh/kg～600 kWh/kg

(3) 化学成分の均一性（富士電機株式会社のみ記載があった。）

電磁攪拌により、化学成分はマクロレベルでは概ね均一となる。また、酸化物は均一にならず、表面（スラグ）に集中し、一部は金属内に残留する。

(4) 温度管理

溶解中の連続温度測定はほぼ不可能であり、溶解完了後に作業員が測定する方式が主流である。

7.4 各メーカーの追加情報

公開されているカタログ等以外の技術情報を各メーカーへ問い合わせた結果、複数のメーカーから共通して、溶解対象、溶解プロセス、設置及び運転条件により性能等が変動するとの回答があった。特に調査項目のうち溶融性能が変動し、例として最大溶解温度については、鋳鋼では 1,600℃以上であるのに対して、鉄では 1,500℃以下との違いがあり、また、溶解速度についても要求される炉容量や使用可能な電力量等により変わるとの回答があった。

したがって、今回入手した情報については、当該製品の標準用途での性能範囲の情報であることに留意する必要がある。

以下に各メーカーへ問い合わせた結果の概要を記載する。

(1) シンフォニアエンジニアリング株式会社

ホームページ及び公式カタログにおいて対象炉容量を掲載しているが、近年炉容量 3 t 以下までの小型製品の製作に留め、それ以上の大型製品の製作は中止している。

(2) 富士電機株式会社

JAEA における金属溶融設備^{26, 27, 28}の納入実績はあるものの、鑄造業界で使用されている一般的な製品の納入のみであり、製品自体にミルシート、耐震強度などの原子力設計基準を対応させるのは不可である。

(3) 日本ガイシ株式会社

製品については、原子力発電所で用いられている日本産業規格（JIS）に基づいて製作された 200 L ドラム缶へ溶融物を充填することが目的であり、調査対象とした炉容量の場合は現在の設備仕様の拡大で対応するのは難しく、新しい設備が必要となる可能性が高い。

(4) Inductotherm Group

以下に該当する場合には協力しない。②の理由により、少量でも放射性物質を扱う場合には協力しない。

① 誘導加熱炉は、基本的にほとんどの金属を溶解可能であるが、対象金属として爆発が見込まれる金属（例：マグネシウム）が想定される場合、対応不可である。

※誘導加熱炉は炉容量が決まっても、対象金属により設備構成が大幅に変わることからオーダーメイドでの製造となり、通常、導入先とのヒアリングにて事前に対象金属を確認した上で判断しており、爆発が見込まれる金属の使用が想定される可能性がある場合は断っている。

② 溶融対象がクリアランス対象として、市場に流通する程度の放射能濃度であったとしても、現地でのメンテナンス、工場修理等に対応できない。

(5) ABP Induction Systems GmbH

メーカー公式カタログに沿った回答があった。一部、それ以外の炉容量、周波数帯域などの技術情報についても回答があった。

(6) OTTO Junker GmbH

製品について、恒常的なメンテナンスの観点から、溶融対象金属の放射能濃度により納入可否が異なる。その基準は以下のとおり。

① 1 Bq/g 以下の鋼スクラップ：メーカーとして問題なし。

② 1 Bq/g～1,000 Bq/g の鋼スクラップ：対応可能だが、メーカー側で追加保険の加入要。

③ 1,000 Bq/g 超の鋼スクラップ：メーカーの保険の適用範囲外のため、対応不可。

7.5 高周波誘導炉の性能等に関する留意点

調査内容を整理した結果から、高周波誘導炉の性能等に関する留意点として以下の内容が考えられる。

- (1) 高周波誘導炉は鑄造業界で使用されている。製品を製造するための手段として用いていることから、目的とする製品の品質により要求される高周波誘導炉の性能（電力投入量、対象物、炉容量等）についても大きく変わることを。
- (2) 溶湯温度が目標温度に到達することが重要であり、溶融過程においては、誘導加熱の原理から電磁攪拌により全体的にほぼ均一になることから、温度及び成分の均一性について厳格な基準を設けていないこと。
- (3) 一般的な高周波誘導炉の製品においては、原子力分野の設計基準（ミルシート、耐震強度等）に対応することが難しいこと。
- (4) メンテナンスの面から炉体のオーバーホールが定期的が発生し、大型機器の搬入及び搬出を要することから、設置作業で用いた揚重装置等がその後も恒常的に必要であること。
- (5) 溶融対象として亜鉛やマグネシウム等が混在する場合は、コイル短絡や爆発への対策が必要であること。

8. まとめ

本技術ノートでは、溶融クリアランスに関する技術的知見の把握を目的に、スウェーデン、ドイツ及び米国における溶融処理事例並びに高周波誘導炉の性能について概説した。

今回の調査にて得られた情報を基に規制側が留意すべき事項を整理した内容を表 8.1 に示す。溶融クリアランスの検討に当たって、受入れ時に必要な材質や汚染履歴、溶融対象の金属を発生させる事業者（以下「発生元事業者」という。）から提供される放射能濃度などの情報、発生元事業者ごとに区別又は混合して溶融する方法、意図的な希釈防止、残留廃棄物の適正処理、記録保存等が規制側の留意すべき事項になると考えられる。

表 8.1 溶融クリアランスにおいて規制側が留意すべきと考えられる内容

Table 8.1 Matters Considered to Require Attention by the Regulatory Authority in Clearance for Melting

溶融クリアランスに必要と考えられる項目	規制側が留意すべきと考えられる内容
輸送上の規制	・発生元事業者から溶融施設（廃棄物管理施設）までの輸送については、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²⁹などの関係法令及び保安規定に基づいていること。 ・クリアランス確認後の溶融施設からの輸送については、原子力規制委員会の管轄外となり、その他の国内の法令に従うこと。
クリアランス申請の主体	・原子力事業者等^(注6)であること。
受け入れた金属スクラップの所有権	・溶融処理担当となる廃棄事業者と金属スクラップを所有する発生元事業者との間の受入れ等に関する取決めが定められていることが望ましい。 ・残留廃棄物、クリアランス対象物にしない資材等の返却に関する取り決めが定められていること。
WAC の内容	・発生元事業者から提供される情報に基づいて、金属スクラップが溶融施設側の処

(注6) 製錬事業者、加工事業者、試験研究用等原子炉設置者、外国原子力船運航者、発電用原子炉設置者、使用済燃料貯蔵事業者、再処理事業者、廃棄事業者及び使用者（旧製錬事業者等、旧加工事業者等、旧試験研究用等原子炉設置者等、旧発電用原子炉設置者等、旧使用済燃料貯蔵事業者等、旧再処理事業者等、旧廃棄事業者等及び旧使用者等を含む。）

	理能力の範囲内であるかを確認できる項目が WAC に記載されていることが望ましい。 ・ 例として、第二種廃棄物埋設事業に係る廃棄物埋設施設における保安規定の審査基準³⁰に定められている第二種廃棄物埋設事業におけるコンクリート等廃棄物に係る WAC を参考にした場合、少なくとも以下の項目が WAC に記載されていることが望ましい。 (1) 放射性廃棄物の種類に関すること (2) 放射能濃度 (3) 廃棄物管理施設の安全機能を損なうおそれのある物質の性質及び量に関すること
発生元事業者から提供される情報	・ 熔融後のインゴットの放射能濃度を評価する観点から必要な情報（具体的には、金属スクラップの材質、汚染の履歴、質量、核種組成比等）が明確化されていること。 ・ 熔融施設における作業員の安全の確保の観点から、線量率及び密閉空洞の有無に関するデータが明確化されていること。
処理方式	・ 金属の種類、使用場所、汚染状況等による区分が明確であること。 ・ 熔融施設側がスウェーデン及びドイツのような孤立キャンペーン（一度に熔融する対象を一つの発生元事業者からの金属スクラップに限定する方法）を採用するのであれば、異なる履歴をもつ金属スクラップが混在しないようにする管理体制が採用されていること。 ・ 米国のような混合を前提とした方式を採用する場合も同様に、熔融炉に投入した金属スクラップがどの発生元事業者からのもの

	のであるかを明確化する方法（意図しない発生元事業者からの金属スクラップの混同を防ぐ管理方法）について、適切な管理体制が採用されていること。
溶融金属	・発生元事業者及び汚染の履歴が明確である金属スクラップであること。 ・金属の種類に応じて投入可能なスクラップの質量（1 バッチ当たりの質量）が変わることが予想されるため、均一性を確保する観点から、金属の種類に応じて運転条件をどのように変更するか、溶融施設側が把握・管理していること。
切断、除染	・溶融、運搬等に適したサイズになるように切断されていること。あわせて、切断により発生する廃棄物（例えば、熱間切断によるスラグ、ドロス）の取扱いについて廃棄施設の要否を含めて明確化されていること。 ・除染においては、除染係数といった除染の能力を溶融施設側が把握・管理していること。
溶融炉の種類	・一般的に、目的とする製品の品質により要求される溶融炉の性能が大きく変わるため、溶融炉の仕様が一般的又は特定の条件になるか明確にされていること。
放射能濃度の評価	・サンプリングの方法、サンプルの代表性、分析方法が妥当であること（分析方法の信頼性、測定器の信頼性、評価核種の選定方法等）。 ・検出器の選定、評価対象核種の選定、換算係数の設定方法、難測定核種の評価方法等が妥当であること。
インゴットの均一性	・溶湯から放射能濃度評価のサンプリングをする場合は、溶湯内において評価対象核種の分布が均一であること（溶融処理

	に必要な運転条件として、あらかじめ溶融施設側がその根拠となるデータを提示できること)。
意図的な希釈	・インゴットのかさ増しを行わないという観点から、溶融炉に投入する金属スクラップの種類が明確化されていること。 ・意図的な希釈について、審査基準⁷から該当部分を引用。 放射能濃度確認対象物がクリアランスレベル以下であることを確認する前に放射能濃度確認対象物について溶融その他性状の変更を伴う処理（以下「溶融等」という。）をする場合は、溶融等をしても放射能濃度がクリアランスレベル以下になる見込みのない資材その他の物を、クリアランスレベル以下とする目的で、意図的に放射性物質によって汚染されていない物等と混合し、又は希釈することを防止するために必要な措置が講じられていることの確認が必要
調整剤・添加剤の使用	・調整剤・添加剤の投入が、意図的に放射性物質によって汚染されていない物等との混合には該当しないこと。 ・投入する調整剤・添加剤により移行する核種とその移行率を溶融施設側が把握・管理し、意図的な希釈であるインゴットのかさ増しに該当しないことを規制側に示していること。
残留廃棄物の内容	・溶融不適物（発生量が少ない銅、アルミ等）、ダスト等が想定されていること。 ・スウェーデンの結果から、溶融処理工程から発生する様々な廃棄物が残留廃棄物に該当することが予想される。廃棄施設の要否など廃棄物管理事業に関する法令との整合性が図られていること。

残留廃棄物の扱い	・ 廃棄物の状態（気体、液体又は固体）に応じた廃棄については、廃棄物管理事業に関する法令との整合性が図られていること。
報告書の内容、送付先	・ 関係法令で規定されている記録が保存されていること。
再利用先	・ 原子力規制委員会の管轄外となり、その他の国内の法令に従うこと。

溶融処理は、核種移行による分離効果を有し、廃棄物の減容化及び資源の再利用に関する観点から有望な技術であることから、福井県原子力リサイクルビジネス準備株式会社にて実施に向けた検討が進められている。一方で、廃棄物の適切な処理、溶融炉の性能確保等の課題も存在する。特に、溶融による核種移行及び均一化効果を前提としたサンプリングによる放射能濃度の評価を行う場合には、溶融条件、溶融炉の設計及び運転条件に依存することから溶融炉ごとの実証データに基づく説明が必要と考えられる。

今後のクリアランス認可及びクリアランス確認の段階で判断を要する溶融による核種移行効果及び均一化効果については、調査を続ける必要がある。

参考文献一覧

- 1 核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律，昭和 32 年法律第 166 号.
- 2 福井県，嶺南 E コースト計画推進会議，福井県庁エネルギー課，2025-11-25，
<https://www.pref.fukui.lg.jp/doc/dengen/shinkeikaku/suishinkaigi.html>，(2026-07-13 確認).
- 3 原子力規制庁，福井県クリアランス集中処理事業に係る今後の対応方針，令和 6 年度第 57 回原子力規制委員会，資料 3，2025-01-29，
<https://www.da.nra.go.jp/view/NRA100007702?contents=NRA100007702-004-003#pdf=NRA100007702-004-003>，(2026-07-13 確認).
- 4 福井県，原子力リサイクルビジネス（クリアランス集中処理事業）について，第 1 回福井県クリアランス集中処理事業に係る意見交換会合，資料 1，2023-07-31，
<https://www.da.nra.go.jp/view/NRA022010065?contents=NRA022010065-002-003#pdf=NRA022010065-002-003>，(2026-07-13 確認).
- 5 福井県におけるクリアランス事業に係る情報交換，原子力規制委員会 被規制者等及びノーリターナルルール対象組織等との面談記録，2023-03-28，
<https://www.da.nra.go.jp/detail/NRA033000375>，(2026-07-13 確認).
- 6 原子力規制庁，原子力発電所の解体廃棄物の集中クリアランス事業に関する今後の対応，令和 5 年度第 17 回原子力規制委員会，資料 3，2025-06-21，
<https://www.da.nra.go.jp/view/NRA001001031?contents=NRA001001031-002-004#pdf=NRA001001031-002-004>，(2026-07-13 確認).
- 7 原子力規制委員会，放射性濃度についての確認を受けようとする物に含まれる放射性物質の放射能濃度の測定及び評価の方法に係る審査基準，原規規発第 1909112 号，2025-06-25，<https://www.nra.go.jp/data/000322932.pdf>，(2026-07-13 確認).
- 8 原子力規制庁，福井県クリアランス集中処理に係る意見交換会合の結果報告，令和 6 年度第 2 回原子力規制委員会，資料 1，2024-04-10，
<https://www.da.nra.go.jp/view/NRA100000760?contents=NRA100000760-004-002#pdf=NRA100000760-004-002>，(2026-07-13 確認).
- 9 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, Studsvik Symposium, Recycling of Metals, April 8-10, 2014.
- 10 Nobuyuki Nakashio, Takeshi Osugi, Hirokatsu Iseda, Toshio Touhei, Tomoyuki Sudo, Joji Ishikawa, Motoyuki Mitsuda, Tomohiko Yokobori, Kazushige Kozawa, Toshiyuki Momma, Minoru Okoshi, The verification tests of the melting conditions for homogenization of metallic LLW at the JAEA, Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 53, No. 1,

- 139–145, 2015, doi:10.1080/00223131.2015.1023756.
- 11 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, 新谷英友, Ed., 財団法人原子力施設デコミッションング研究協会, pp. 41-50, 1993,
https://randec.securesite.jp/publish/documents/gihou/Decommissioning%20gihou_09.pdf,
(2026-07-13 確認).
 - 12 European Communities, Recommended radiological protection criteria for the recycling of metals from the dismantling of nuclear installations, Radiation Protection 89, 1998,
https://www.researchgate.net/publication/291350333_Recommended_radiological_protection_criteria_for_the_recycling_of_metals_from_the_dismantling_of_nuclear_installations,
(2026-07-13 確認).
 - 13 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, 令和 2 年原子力規制委員会規則第 16 号.
 - 14 International Atomic Energy Agency, Application of the Concept of Clearance, IAEA General Safety Guide No. GSG-18, 2023.
 - 15 核燃料物質又は核燃料物質によつて汚染された物の廃棄物管理の事業に関する規則, 昭和 63 年総理府令第 47 号.
 - 16 クリアランス集中処理事業に関する資源エネルギー庁、福井県等との面談, 原子力規制委員会 被規制者等及びノーリターンルール対象組織等との面談記録, 2024-07-31, <https://www.da.nra.go.jp/detail/NRA100004440>, (2026-07-13 確認).
 - 17 International Atomic Energy Agency, Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards, IAEA General Safety Requirements No. GSR Part 3, 2014.
 - 18 核燃料サイクル開発機構, ウラン系低レベル放射性金属廃棄物の溶融除染技術開発, サイクル機構技報 No.14, 2002, <https://rdreview.jaea.go.jp/gihou/pdf2/n14-06.pdf>, (2026-07-13 確認).
 - 19 東京電力ホールディングス株式会社, 溶融設備の検討状況について, 原子力規制委員会 第 115 回特定原子力施設監視・評価検討会, 資料 2-4, 2024-12-16,
<https://www.da.nra.go.jp/view/NRA100007024?contents=NRA100007024-002-006#pdf=NRA100007024-002-006>, (2026-07-13 確認).
 - 20 株式会社ピー・ティー・ピー, 令和 3 年度低レベル放射性廃棄物の処分に関する技術開発事業（原子力発電所等金属廃棄物利用技術確証試験）報告書, 2022,
<https://warp.ndl.go.jp/web/20250902024852/https://www.enecho.meti.go.jp/category/electri>

- city_and_gas/nuclear/rw/library/2021/3fy_clearance.pdf, (2026-07-13 確認).
- 21 国立研究開発法人原子力研究開発機構, 高減容処理施設の建設整備及び運転管理について, JAEA-Technology 2007-038, 2007,
<https://jopss.jaea.go.jp/search/servlet/search?5007738>, (2026-07-13 確認).
 - 22 Swedish Radiation Safety Authority, SSMFS 2018:3 Strålsäkerhetsmyndighetens föreskrifter om undantag från strålskyddslagen och om friklassning av material, byggnadsstrukturer och områden, 2018,
<https://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/publikationer/foreskrifter/ssmfs-2018/ssmfs-20183>, (2026-07-13 確認).
 - 23 U.S. Department of Transportation, 49 CFR Part 173 –SHIPPERS– GENERAL REQUIREMENTS FOR SHIPMENTS AND PACKAGINGS, 70 FR 56098, 2005.
 - 24 APO Research, Inc, Global Induction Melting Furnaces Market Analysis and Forecast 2026-2032, 2026, <https://www.aporesearch.com/reports/machinery-and-equipment/induction-melting-furnaces/1738047002>, (2026-07-13 確認).
 - 25 QY Research, Melting And Induction Furnaces - Global Market Share and Ranking, Overall Sales and Demand Forecast 2025-2031, 2025,
<https://www.qyresearch.co.jp/reports/1546925/melting-and-induction-furnaces>, (2026-07-13 確認).
 - 26 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構, 金属熔融処理, 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 放射性廃棄物の管理,
https://www.jaea.go.jp/04/ntokai/backend/backend_01_02_05.html, (2026-07-13 確認).
 - 27 国立研究開発法人原子力研究開発機構, 金属熔融設備における成型工程の合理化のための設備改善, JAEA-Technology 2009-031, 2009,
<https://jopss.jaea.go.jp/search/servlet/search?5019408>, (2026-07-13 確認).
 - 28 国立研究開発法人原子力研究開発機構, 金属熔融設備における成型工程の合理化の検証, JAEA-Technology 2010-008, 2010,
<https://jopss.jaea.go.jp/search/servlet/search?5024359>, (2026-07-13 確認).
 - 29 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, 昭和 53 年総理府令第 57 号.
 - 30 原子力規制委員会, 第二種廃棄物埋設事業に係る廃棄物埋設施設における保安規定の審査基準, 原管廃発第 1311278 号, 2025-02-05,
<https://www.nra.go.jp/data/000298845.pdf>, (2026-07-13 確認).

執筆者一覧

原子力規制庁 長官官房 技術基盤グループ 放射線・廃棄物研究部門

古田 美憲 副主任技術研究調査官

吉居 大樹 副主任技術研究調査官

仲宗根 峻也 技術研究調査官

澁谷 憲悟 上席技術研究調査官

酒井 宏隆 安全技術管理官（放射線・廃棄物担当）