

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

The Catalog of Solidification and Volume Reduction Technologies
for the Treatment of Radioactive Waste Generated by the Decommissioning
of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station

加藤 潤 中川 明憲 谷口 拓海 榊原 哲朗
中澤 修 目黒 義弘

Jun KATO, Akinori NAKAGAWA, Takumi TANIGUCHI, Tetsuro SAKAKIBARA
Osamu NAKAZAWA and Yoshihiro MEGURO

バックエンド研究開発部門
核燃料サイクル工学研究所
環境技術開発センター
基盤技術研究開発部

Radioactive Waste Processing and Disposal Research Department
Nuclear Backend Technology Center
Nuclear Fuel Cycle Engineering Laboratories
Sector of Decommissioning and Radioactive Waste Management

July 2017

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Review

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究連携成果展開部 研究成果管理課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方 2 番地4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Institutional Repository Section,
Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department,
Japan Atomic Energy Agency.
2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 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**

日本原子力研究開発機構 バックエンド研究開発部門 核燃料サイクル工学研究所
環境技術開発センター 基盤技術研究開発部
加藤 潤^{*1}、中川 明憲、谷口 拓海、榊原 哲朗^{*1}、中澤 修^{*1}、目黒 義弘^{+1, *1}

(2017 年 5 月 9 日受理)

福島第一原子力発電所では様々な性状の放射性廃棄物が発生している。これらの放射性廃棄物を処分するためには、廃棄物に対して減容処理や固化処理を行い、処分に適した廃棄体を作ることが必要である。また、今後の廃炉に向けた検討では、既存の処理技術が適用可能かを見極めることが必要である。そこで、今後の処理技術の選定に向けて、実規模での開発実績が確認されている国内外の放射性廃棄物の減容技術及び固化技術の文献調査を実施した。本報告書はその調査結果をまとめたものである。

対象廃棄物を均一な粉粒体・液体廃棄物と不均一な雑固体廃棄物との 2 種類に区分し、それぞれに対する減容技術、廃棄体化技術の調査を行った。その結果を、技術の名称、原理、処理能力、固化体性状などの適用性評価に必要な項目についてまとめた。

本報告書には、技術研究組合 国際廃炉研究開発機構の組合員として実施した経済産業省からの委託による、平成 25 年度「発電用原子炉等廃炉・安全技術基盤整備事業（事故廃棄物処理・処分概念構築に係る技術検討調査）」、平成 25 年度補正予算「廃炉・汚染水対策事業費補助金（事故廃棄物処理・処分技術の開発）」、平成 26 年度補正予算「廃炉・汚染水対策事業費補助金（固体廃棄物の処理・処分に関する研究開発）」に係る事業として実施した成果の一部を含む。

核燃料サイクル工学研究所 〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松 4-33

+1 バックエンド研究開発部門 廃止措置技術開発室

*1 技術研究組合 国際廃炉研究開発機構 (IRID)

**The Catalog of Solidification and Volume Reduction Technologies for the Treatment of
Radioactive Waste Generated by the Decommissioning of
Fukushima Daiichi Nuclear Power Station**

Jun KATO^{*1}, Akinori NAKAGAWA, Takumi TANIGUCHI, Tetsuro SAKAKIBARA^{*1},
Osamu NAKAZAWA^{*1} and Yoshihiro MEGURO^{+1,*1}

Radioactive Waste Processing and Disposal Research Department,
Nuclear Backend Technology Center, Nuclear Fuel Cycle Engineering Laboratories,
Sector of Decommissioning and Radioactive Waste Management
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received May 9, 2017)

Various radioactive wastes have been generated at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station(1F). To dispose of the wastes under the ground, it is necessary to manufacture a suitable waste package by solidification of the wastes including the waste volume reduction. To make the reliable future decommissioning plan of 1F, it is also necessary to check the applicability of current treatment technology for those wastes. Therefore the document survey about volume reduction and solidification technologies that have domestic or foreign experiences of practical treatment for radioactive wastes has been performed to assist the selection of suitable treatment of the wastes. This report shows the results as a catalogue form.

The 1F wastes are classified into two groups, homogeneous particulate or liquid wastes and heterogeneous solid wastes. The important items for the feasibility study such as the technology name, fundamental principle, treatment efficiency, and characteristic of solidified waste are summarized for each group.

Keywords: Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, Technology Catalogue, Solidification Technology, Volume Reduction Technology

This work includes a part of the results obtained in the works for the budget from Minister of Economy, Trade and Industry in 2013JFY, 2014JFY and 2015JFY.

+1 Decommissioning Research and Development Office, Sector of Decommissioning and Radioactive Waste Management

*1 International Research Institute for Nuclear Decommissioning (IRID)

目次

1. はじめに	1
2. 固化技術及び減容技術の調査	1
3. 技術カタログの整備	3
4. まとめ	5
参考文献	5
付録 放射性廃棄物の固化技術及び減容技術カタログ	7

Contents

1. Introduction	1
2. Survey of solidification and volume reduction technologies	1
3. Structure of catalog	3
4. Conclusion	5
References	5
Appendix The catalog of solidification and volume reduction technologies	7

表リスト

Table 2.1	調査に利用した検索サイトと対象資料	2
Table 2.2	調査対象廃棄物と実規模での開発実績のある減容技術及び固化技術	3

図リスト

Fig.3.1	技術カタログフォーマットの例	4
---------	----------------	---

1. はじめに

福島第一原子力発電所（以下、1F）では汚染水処理二次廃棄物、瓦礫・伐採木等の放射性廃棄物が発生している。また、今後 1F の廃止措置により放射性廃棄物（以下、解体廃棄物）の発生も予想される。これらの廃棄物の性状は様々であるため、その性状に応じて分類し、各分類に適用する適切な固化技術及び減容技術を選定する必要がある。「東京電力福島第一原子力発電所 1～4 号機の廃止措置等に向けた中長期ロードマップ¹⁾」の中の「固体廃棄物の保管管理、処理・処分計画」における 2017 年度末の判断ポイント（以下、HP SW-1）では、廃棄物の廃棄体化技術候補の第一次絞り込みとして、文献調査及び実験室規模の基礎試験をもとに、これらの廃棄物に対して技術的に適用可能な複数の廃棄体化技術の候補を提案するとされている。廃棄体化技術の第一次絞り込みを行うための材料となる、廃棄体の作製に必要な固化技術及びその前処理としての減容技術に関する情報を文献調査により収集し、「放射性廃棄物の固化技術及び減容技術カタログ」（以下、技術カタログ）を整備した。

1F で発生している、もしくは今後発生する廃棄物は瓦礫・伐採木や解体廃棄物を主として物量が非常に多くなることが予想されるため、より速やかな処理・処分が求められる。このため、現時点で研究段階の技術では適用が間に合わないと考えられることから、本技術カタログでは、2015 年までに国内外において実規模での運用実績が確認できる技術のみを対象とした。

様々な分野の技術調査においては、技術毎の必要情報の閲覧及び比較を容易にするため、技術を一定の技術カタログフォーマットに取りまとめている例が数多くみられる。本技術カタログでも、調査した各技術の詳細を一覧することが可能な技術カタログフォーマットに取りまとめた。

2. 固化技術及び減容技術の調査

技術カタログ整備のため、廃棄物の固化技術及び減容技術の最新動向を調査した。調査は 2012 年度より開始し²⁾、検索サイトを利用して対象資料を収集した。対象資料は書籍、学術論文、学会予稿集、国際学会プロシーディング及び研究機関等が発行している公開報告書とした。使用した検索サイトと、収集した資料及びその例を Table 2.1 に示した。

Table 2.1 調査に利用した検索サイトと対象資料

検索サイト (カッコ内は運営組織名)	対象資料
・ J-STAGE (国立研究開発法人 科学技術振興機構) ・ JOPSS (日本原子力研究開発機構、以下 JAEA) ・ SciTech Connect (米国エネルギー省、以下 DOE) ・ IAEA-INIS (国際原子力機関、以下 IAEA) ・ Google Scholar (Google Inc.) ・ Web of Science (THOMSON REUTERS) ・ Google、Yahoo 等	・ 書籍 ・ 学術論文 ・ 学会予稿集 ・ 国際学会プロシーディング ・ 研究機関等が発行している公開報告書 ・ ウェブサイト

これらの資料に記載された技術を対象として調査を行い、国内外において実規模での開発実績が確認できる技術のみを技術カタログに記載することとした。固化技術及び減容技術の調査は、まず調査対象とする廃棄物を決め、次いで調査対象廃棄物に実規模での開発実績のある技術の情報を調査するという手順で実施した。

1F の事故によって発生した廃棄物は、汚染水の除染により発生する均一な液状又は粉粒状の汚染水処理二次廃棄物、事故由来の瓦礫・伐採木、及び解体廃棄物等の不均一な雑固体廃棄物に分類される。このため、調査対象とした廃棄物は、汚染水処理二次廃棄物と性状が類似した粉粒体・液体廃棄物、及び雑固体廃棄物とした。

粉粒体・液体廃棄物に実規模での開発実績のある固化技術は 11 種類、減容技術は 4 種類であった。雑固体廃棄物に実規模での開発実績のある固化技術は 2 種類、減容技術は 6 種類であった。その内容を Table 2.2 に示す。これらの固化技術及び減容技術の文献を精読し、詳細な情報を収集した。

Table 2.2 調査対象廃棄物と実規模での開発実績のある減容技術及び固化技術

対象廃棄物	減容技術	固化技術
・粉粒体・液体 廃棄物 (汚染水処理二 次廃棄物を想 定)	・脱水処理 ・乾燥処理 ・焼却処理 ・ガス化处理	・セメント混練固化 ・ジオポリマー固化 ・水ガラス固化 ・アスファルト固化 ・プラスチック固化 ・ガラス固化 ・溶融固化 ・焼結固化 ・水熱固化 ・HIP (Hot Isostatic Pressing) 固化 ・ペレット成形・圧縮固化
・雑固体廃棄物 (瓦礫・伐採木、 解体廃棄物を 想定)	・圧縮処理 ・溶融処理 ・切断処理 ・粉碎処理 ・焼却処理 ・ガス化处理	・モルタル充填固化 ・ガラス固化

3. 技術カタログの整備

各固化技術及び減容技術ごとに、調査した情報を一覧可能な技術カタログフォーマットに集約し、技術カタログを整備した。技術カタログフォーマットの項目は IAEA における技術選定基準³⁾を参考として作成した。IAEA の技術選定基準のうち、廃棄物管理技術の選定に影響を与える技術的な情報として特に、技術開発段階、廃棄物種類、許認可の状況、技術供給者、処理量、メンテナンス性、及び使用に際しての課題に注目した。

Fig.3.1 に技術カタログフォーマットの例を示す。上記の情報と、文献から読み取れる情報に基づき、以下のような項目を設定した。

- A) 技術名称：技術の名称
- B) プロセス概要：技術の工程の概要
- C) 適用廃棄物：適用実績のある廃棄物の種類
- D) プロセスフローまたは機器概要図
 - ① 技術のプロセスフローまたは機器概要図
 - ② D①の説明

- E) 特記事項：国内での許認可の状況、技術の使用に際しての固有の課題
- F) 前処理：廃棄物に技術を適用する上で前処理により整えるべき廃棄物の条件
- G) 処理能力及び処理物の性状
- ① 処理条件：処理装置等の稼働時における温度、圧力
 - ② 処理能力：廃棄物の充填率、単位時間当たりの廃棄物処理量実績
 - ③ 処理物の性状：廃棄物固化体の圧縮強度、固化体密度、耐放射線性、耐熱性、核種浸出率、核種浸出時の分配係数
- H) 適用性評価
- ① 技術成熟度：技術開発段階、国内外での廃棄物への適用実績、技術供給者
 - ② 操作安全性：危険性の有無、安全性の度合い
 - ③ 保守性：メンテナンス性、装置等の維持管理の難易度、保守点検の利便性
 - ④ 二次廃棄物発生量：処理工程において発生する二次廃棄物の量
 - ⑤ 事故廃棄物特有事項（有害物、有機物等）に対する適用性：当該技術を 1F で発生する廃棄物に適用する際に考慮すべき特有事項。事故とは 1F の事故を指す。

アルファベット及び番号は Fig. 3.1 と対応しており、例えば、G「処理能力及び処理物の性状」の①の「処理条件」は、Fig.3.1 の G①の欄に該当する。また、それぞれの項目について技術カタログフォーマットの欄内に情報が収まりきらない場合は別表を設けて記載した。

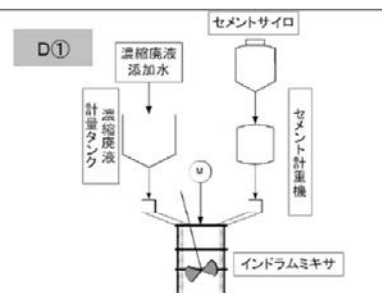
技術 No.	1	A セメント混練固化	焼却灰：水素が発生する物質（アルミニウムなど）は予め除去する必要がある。 ホウ酸塩含有廃液：Ca ²⁺ を添加してホウ酸濃度を 5 wt%以下にする必要がある ¹⁻⁴⁾ 。 硫酸塩含有廃液：Ca(OH) ₂ を添加して SO ₄ ²⁻ 濃度低下処理が必要 ¹⁻⁴⁾ 8% 3CaO・Al ₂ O ₃ セメント；SO ₄ ²⁻ 濃度が 150～1,000 ppm で使用 ¹⁻⁴⁾ 5% 3CaO・Al ₂ O ₃ セメント；SO ₄ ²⁻ 濃度が >1,000 ppm で使用 ¹⁻⁴⁾
プロセス概要		セメントが水和反応により硬化する性質を利用し、廃棄物を固化して閉じ込める技術	前処理
適用廃棄物	C	使用済みイオン交換樹脂、スラッジ、焼却灰など	F
プロセスフローまたは機器概要図	D		処理能力及び処理物の性状
特記事項	E	国内ライセンスあり（普通ポルトランドセメント、早強ポルトランドセメント、超早強ポルトランドセメント、中熱ポルトランドセメント、耐硫酸塩ポルトランドセメント、高炉スラグセメント（A種、B種、C種）） ¹⁻²⁾ 、技術固有の課題：混練時に混和材料を添加する場合がある（別表 1-2 参照 ¹⁻³⁾ ）	G
		上図は、計量した濃縮廃液及びセメント、混練水等を廃棄体容器に投入し、容器内で混練を行い廃棄体とするインドラムミキシング法を示したものである。インドラムミキシング法の他に、アウトドラムミキシング法、真空注入法など ¹⁻¹⁾ がある。詳細は別表 1-1 参照。	H

Fig.3.1 技術カタログフォーマットの例

4. まとめ

「東京電力(株)福島第一原子力発電所 1～4 号機の廃止措置等に向けた中長期ロードマップ¹⁾」の固体廃棄物の保管管理、処理・処分計画における 2017 年度末の HP SW-1 に計画されている、廃棄物の廃棄体化候補技術の第一次絞込みに向けて、1F で発生する放射性廃棄物に性状が類似した粉粒体・液体廃棄物及び雑固体廃棄物を対象廃棄物として固化技術及び減容技術について文献調査を実施し、実規模での開発実績が確認できる固化技術及び減容技術をまとめた技術カタログを整備した。

参考文献

- 1) 原子力災害対策本部東京電力福島第一原子力発電所廃炉対策推進会議, 東京電力(株)福島第一原子力発電所 1～4 号機の廃止措置等に向けた中長期ロードマップ, http://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/pdf/130627/130627_01d.pdf (参照 : 2017 年 2 月 10 日).
- 2) 核サ研福島技術開発特別チーム 駒義和ほか, 東京電力(株)福島第一原子力発電所事故に係わる廃棄物処理・処分技術開発—平成 24 年度成果報告書—, JAEA-Review 2013-064, 2014, 77p.
- 3) IAEA, Review of the factors affecting the selection and implementation of waste management technologies, IAEA-TECDOC-1096, 1999, 73p.

This is a blank page.

付録

放射性廃棄物の固化技術及び減容技術カタログ

日本原子力研究開発機構

This is a blank page.

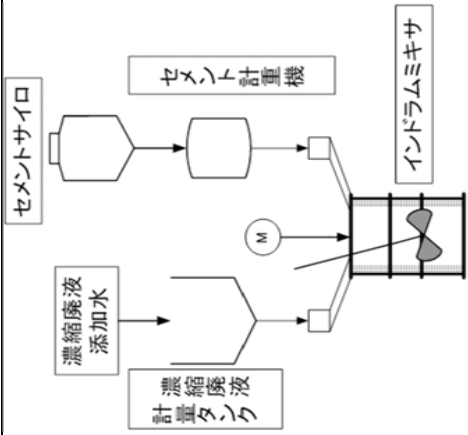
目次

1. 粉粒体・液体廃棄物の固化技術.....	11
セメント混練固化.....	13
ジオポリマー固化.....	22
水ガラス固化.....	24
アスファルト固化.....	26
プラスチック固化.....	35
ガラス固化.....	42
溶融固化.....	48
焼結固化.....	58
水熱固化.....	60
HIP (Hot Isostatic Pressing) 固化.....	68
ペレット成形・圧縮固化.....	71
2. 雑固体廃棄物の固化技術.....	73
モルタル充填固化.....	75
ガラス固化.....	79
3. 粉粒体・液体廃棄物の減容技術.....	81
脱水処理.....	83
乾燥処理.....	96
焼却処理.....	105
ガス化処理.....	111
4. 雑固体廃棄物の減容技術.....	117
圧縮処理.....	119
溶融処理.....	126

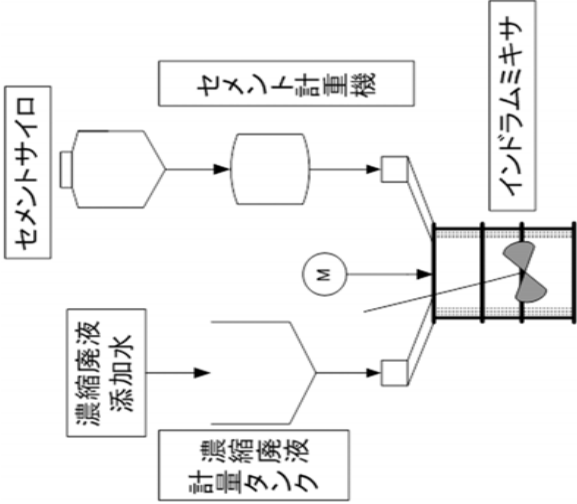
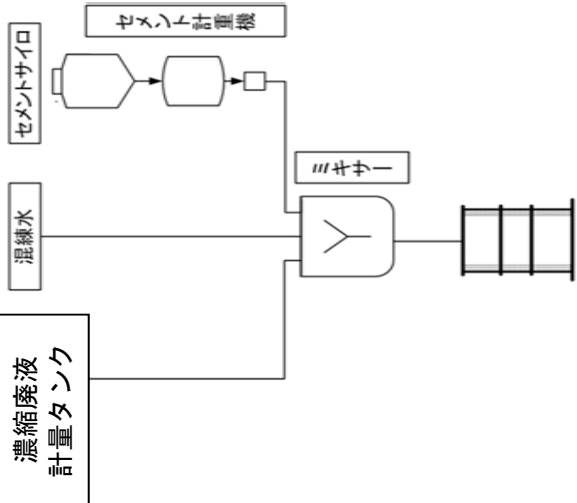
切断処理	137
粉碎処理	154
焼却処理	160
ガス化処理.....	170

1. 粉粒体・液体廃棄物の固化技術

This is a blank page.

技術 No.	1	セメント混練固化	前処理	焼却灰：水素が発生する物質（アルミニウムなど）は予め除去する必要がある。 ホウ酸塩含有廃液： Ca^{2+} を添加してホウ酸濃度を5 wt%以下にする必要がある ¹⁻⁴⁾ 。 硫酸塩含有廃液： $\text{Ca}(\text{OH})_2$ を添加して SO_4^{2-} 濃度低下処理が必要 ¹⁻⁴⁾ 。 8% $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ セメント； SO_4^{2-} 濃度が150～1,000 ppm で使用 ¹⁻⁴⁾ 。 5% $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ セメント； SO_4^{2-} 濃度が>1,000 ppm で使用 ¹⁻⁴⁾ 。
プロセス概要			処理	①処理条件 温度：常温、圧力：常圧 ②処理能力 充填率：2～66 wt% ¹⁻⁵⁾ 、国内：一、国外：別表 1-3 参照 ¹⁻⁶⁾ ③処理物の性状 圧縮強度：3.2～70 MPa ¹⁻⁵⁾ 固化体密度：1.5～2.3 t/m ³ ¹⁻⁵⁾ 耐放射線性： 10^8 Gy 程度の照射で機械的特性に変化なし ¹⁻⁴⁾ G(H_2): 0.05～0.13 ¹⁻⁴⁾ 耐熱性：長期保管時は200℃以下なら耐性あり ¹⁻⁶⁾ 熱による反応については別表 1-4 参照 ¹⁻⁴⁾ 核種浸出率：別表 1-5 参照 ^{1-5, 6, 7, 8, 9)} 分配係数：21 cm ³ /g (Cs)、11 cm ³ /g (Sr) ¹⁻¹⁰⁾
適用廃棄物		使用済みイオン交換樹脂、スラッジ、焼却灰など	処理能力及び処理物の性状	
プロセスフローまたは機器概要図			適用性評価	①技術成熟度（実績等） 国内：原子力発電所で実績多数（別表 1-1 参照） ^{1-1, 2, 11, 12, 13, 14, 15, 16)} 国外：原子力発電所及び研究機関で実績多数（別表 1-3 参照） ¹⁻⁶⁾ ②操作安全性 常温での操作であり、危険物も使用しないため安全性は高い ③保守性 加熱などの操作不要のため、装置が簡易であり、保守性は高い ④二次廃棄物発生量 一 ⑤事故廃棄物特有事項（有害物、有機物等）に対する適用性 除染装置のスラッジに対しては、CN が浸出するため、前処理として CN の分解が必要となる。
特記事項		上図は、計量した濃縮廃液及びセメント、混練水等を固化容器に入れておき、容器内で混練を行い廃棄体とするインドラムミキシング法を示したものである。 インドラムミキシング法 ¹⁻¹⁾ の他に、アウトドラムミキシング法、真空注入法など ¹⁻¹⁾ がある。詳細は別表 1-1 参照。 使用可能な固型化材（普通ポルトランドセメント、早強ポルトランドセメント、超早強ポルトランドセメント、中熱ポルトランドセメント、耐硫酸塩ポルトランドセメント、高炉スラッグセメント（A 種、B 種、C 種） ¹⁻²⁾ 、技術固有の課題：混練時に混和材料を添加する場合がある（別表 1-2 参照 ¹⁻³⁾ ）		

別表 1-1 セメント混練固化方式 1-1, 2, 11, 12, 13, 14, 15, 16)

名称	インドラムミキシング法	アウトドラムミキシング法
概要図		
説明	計量した廃棄物及びセメント、混練水等を容器に入れておき、容器内で混練を行い固化体とする。	廃棄物及びセメント、混練水等を外部ミキサーで混練し、混練物を容器に注入して固化体とする。
国内実績	東北電力（女川（濃縮廃液、使用済樹脂）） 東京電力（福島第一（濃縮廃液）、福島第二（濃縮廃液）） 中部電力（浜岡（濃縮廃液、スラッジ、濃縮廃液乾燥粉体）） 中国電力（島根（濃縮廃液、使用済樹脂、スラッジ）） 日本原子力発電（東海（蒸発固化体）、東海第二（濃縮廃液ペレット）） JAEA（再処理 LWTF（濃縮廃液）、大洗（スラッジ 1 m³/d、濃縮廃液 200 L/d））	東京電力（福島第一（濃縮廃液ペレット、高温焼却炉グラニュール、洗浄廃液）、柏崎刈羽（濃縮廃液、洗浄スラリ）） 日本原子力発電（東海第二（濃縮廃液）、敦賀（濃縮廃液））

別表 1-1 セメント混練固化方式（続き） 1-1, 2, 11, 12)

名称	真空注入法
概要図 1-17)	
説明	ドラム缶に予めセメント、混和材料等の固化材料を充填した後、ドラム缶内を真空ポンプであらかじめ減圧状態にしておき、その圧力を利用して廃棄物を吸引注入する。
国内実績	関西電力（大飯（濃縮廃液）、高浜（濃縮廃液）、美浜（濃縮廃液）） 四国電力（伊方（濃縮廃液）） 九州電力（玄海（濃縮廃液）、川内（濃縮廃液））

別表 1-2 混和材料¹⁻³⁾

種類	目的	主成分・組成
AE 剤	材料分離抵抗性・耐久性向上	樹脂酸塩系等アニオン、ノニオン系各種界面活性剤
減水剤・AE 減水剤	材料分離抵抗性・強度向上	リグニンスルホン酸塩系、オキシカルボン酸塩系など
高性能減水剤	材料分離抵抗性・強度向上	ナフタレンスルホン酸縮合物、メラミン樹脂スルホン酸塩縮合物、変性リグニンスルホン酸塩、ポリカルボン酸塩など
高性能 AE 減水剤	材料分離抵抗性・強度・耐久性向上	徐放性反応性高分子、精製リグニンスルホン酸塩など
遅延剤（超遅延剤）	凝結硬化時間調整	オキシカルボン酸塩、ケイフツ化物、ホウ酸塩など
促進剤	凝結硬化時間調整	ロダン酸塩、トリエタノールアミン、亜硝酸塩など
急結剤	凝結硬化時間調整	アルミン酸アルカリ塩・炭酸アルカリ塩、カルシウムアルミニート鉱物など
防錆剤	耐久性向上	亜硝酸塩など
気泡・発泡剤	特殊コンクリート作製	各種界面活性剤、タンパク系、金属アルミニウムなど
収縮低減剤	耐久性向上	アルキレンオキシド重合物など
防水剤	耐久性向上	ケイ酸ナトリウム、脂肪酸系、エマルジョン系など
水中コンクリート混和剤	特殊コンクリート作製	セルローズ誘導体、ポリアクリルアミドなど
膨張材	耐久性向上	アウイン系、CaO 系など
ポゾラン	材料分離抵抗性・強度・耐久性向上	フライアッシュ、シリカフェューム、火山灰などで反応性 SiO ₂ を主成分とするもの
高炉スラッグ微粉末	強度・耐久性向上	SiO ₂ -Al ₂ O ₃ -MgO-CaO 系ガラス
ケイ酸質微粉末	強度向上	石英など
高強度混和材	強度向上	無水セッコウ系など
鉱物質微粉末	材料分離抵抗性向上	CaCO ₃ など
着色材	特殊コンクリート作製	各種金属酸化物など
ポリマー混和剤	材料分離抵抗性・強度向上 特殊コンクリート作製	各種水溶性高分子、ポリマーディスパージョンなど

別表 1-3 国外のセメント混練固化施設¹⁻⁶⁾

国名	サイト	対象廃棄物	プロセス	処理能力
オーストリア	ザイベルスドルフ研究所	焼却灰、スラッジ	インドラムミキシング	—
ベルギー	原子力発電所（3基）	濃縮物、スラッジ	インドラムミキシング	2 m ³ /d
チェコ	ジェシュ研究所	濃縮物	インドラムミキシング	15 L/h
ドイツ	原子力発電所	濃縮物、スラッジ	インドラムミキシング	2～7 m ³ /shift
	ユーリッヒ研究所	濃縮物	インドラムミキシング	50 L/h
	カールスルーエ研究所	濃縮物、イオン交換樹脂	インドラムミキシング	2.8～4.2 m ³ /shift
	原子力発電所（2基：90万kW PWR）	発電所廃棄物	インドラムミキシング	3～5 m ³ /d
フランス	原子力発電所（1基：130万kW）	発電所廃棄物	アウトドラムミキシング	—
	フォントネ・オ・ローズ研究所	濃縮物	インドラムミキシング	0.3 m ³ /d
	サクレー研究所	スラッジ	ミキサー内混練	100～300 kg/d
	カダラッシュ研究所	濃縮物	インドラムミキシング	1.7 m ³ /d
インド	タラプーラ原子力発電所	スラッジ	インドラムミキシング	500 m ³ /y
	ラジャスタン原子力発電所	未処理廃棄物	インドラムミキシング	80 m ³ /y
	トロンバイ研究所	スラッジ	インドラムミキシング	225 m ³ /y
	ペッテン研究所	スラッジ	アウトドラムミキシング	5 m ³ /d
オランダ		廃液	インドラムミキシング	0.5 m ³ /d
ノルウェー	ケーラー研究所	濃縮物	インドラムミキシング	0.26 m ³ /d
南アフリカ	ペリンダバ研究所	濃縮物	廃液注入	0.175 m ³ /d

別表 1-3 国外のセメント混練固化施設（続き）

国名	サイト	対象廃棄物	プロセス	処理能力
スウェーデン	リングハルス原子力発電所 オスカルスハムン原子力発電所	濃縮物、イオン交換樹脂	インコンテナミキシング	50～500 L/container
スイス	原子力発電所（2基）	濃縮物、スラッジ、 イオン交換樹脂	インドラムミキシング	—
英国	ヒンクリーポイント原子力発電所	砂、スラッジ	インドラムミキシング	12×80 L drums/d
	トロースフィニッド原子力発電所	スラッジ	インドラムミキシング	15×80 L drums/d
米国	ローレンス研究所	濃縮物	インドラムミキシング	—
	ロスアラモス研究所	濃縮物	インドラムミキシング	3.8 m ³ /month
	ブルックヘブン研究所	濃縮物	キャスク注入	15 m ³ /6 month
	モスクワ	濃縮物	ミキサー内混練	—
旧ソ連	処分場	液体廃棄物	ミキサー内混練	15 m ³ /d

別表 1-4 セメント固化体内部の熱による反応について¹⁻⁴⁾

温度	反応
25-200℃	吸収水、細管水、結晶水の減損
25-800℃	ケイ酸カルシウム水和物及びアルミン酸カルシウム水和物の連続的放出
350-450℃	水酸化カルシウムの分解
500-800℃	炭酸カルシウムの分解

別表 1-5 セメント固化体からの核種浸出率^{1-5, 6, 7, 8, 9)}

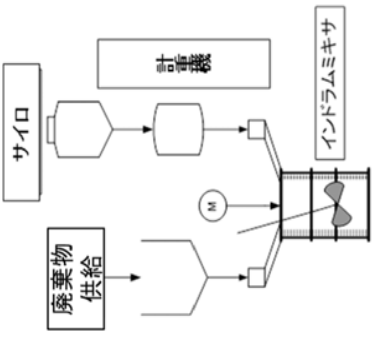
核種	試験方法	浸出率・浸出速度	備考
Co	ソックスレー浸出試験	5×10^{-2} cm/d	—
	—	2.3×10^{-6} cm/d	水/セメント比 40% 及び 50% の固化体について試験
Sr	IAEA 標準 (小型サンプル)	10^{-5} cm/d	—
	IAEA 標準 (大型サンプル)	$< 10^{-3}$ cm/d	—
Ru	—	1.01×10^{-6} cm/d	水/セメント比 35% の固化体について試験
	ソックスレー浸出試験	$10^{-2} \sim 10^{-1}$ cm/d	非放射性 Cs 使用
Cs	IAEA 標準 (小型サンプル)	10^{-3} cm/d	—
	IAEA 標準 (大型サンプル)	$10^{-3} \sim 10^{-2}$ cm/d	—
	—	$10^{-5} \sim 10^{-2}$ cm/d	—
	—	$10^{-7} \sim 10^{-4}$ cm/d	ポリマーセメント使用
Pu	IAEA 標準 (小型サンプル)	10^{-5} cm/d	—
	IAEA 標準 (大型サンプル)	$< 10^{-6}$ cm/d	—
全 β	—	1×10^{-7} g/cm ² /d	²³⁸ Pu 酸化物を 0.2~1 wt% 添加した焼却灰 65 wt% 含むペレット
全 β γ	—	2.8×10^{-4} g/cm ² /d	30% TBP、普通ポルトランドセメント、充填率 40%、30 日後浸出率
	—	$5.01 \times 10^{-4} \sim 3.48 \times 10^{-2}$ g/cm ² /d	トリウム燃料再処理廃液、普通ポルトランドセメント、充填率 40%、1~46 日後浸出率
—	—	$7.8 \times 10^{-5} \sim 6.5 \times 10^{-4}$ g/cm ² /d	イオン交換樹脂 (陰陽混合)
—	—	1.25×10^{-5} g/cm ² /d	低レベル放射性廃液、ラボスケール、普通ポルトランドセメント+20%バークキュライト、100 日後浸出率

別表 1-5 セメント固化体からの核種浸出率^{1-5, 6, 7, 8, 9)} (続き)

核種	試験方法	浸出率・浸出速度	備考
全 β γ	—	2.01×10^{-5} g/cm ² /d	低レベル放射性廃液、ラポスケール、スラグセメント、 100 日後浸出率
—	—	9.4×10^{-4} g/cm ² /d	低レベル放射性廃液、プラントスケール、 普通ポルトランドセメント+20%バーミキュライト、28 日養生、 100 日後浸出率
—	—	$1.00 \sim 1.23 \times 10^{-5}$ g/cm ² /d	低レベル放射性廃液、プラントスケール、 普通ポルトランドセメント+20%バーミキュライト、コアサン プル、 100 日後浸出率

参考文献

- 1-1) (社)日本原子力産業会議, 放射性廃棄物管理ガイドブック 1994 年版, 1994, 276p.
- 1-2) (独)原子力安全基盤機構 規格基準部, 均質・均一固化体及び充填固化体の廃棄のための確認方法について (一部改正), JNES-SS0801, 2008.
- 1-3) (社)セメント協会, C&C エンサイクロペディア[セメント・コンクリート化学の基礎解説], 2004, 279p.
- 1-4) IAEA, Improved Cement Solidification of Low and Intermediate Level Radioactive Wastes, Technical Reports Series No. 350, 1993.
- 1-5) 阪田 貞弘ほか, 放射性廃棄物処理処分に関する研究開発, 産業技術出版, 1983, 632p.
- 1-6) IAEA, Conditioning of Low- and Intermediate-Level Radioactive Wastes, Technical Reports Series No. 222, 1983.
- 1-7) 寺島 泰, 固化体中の放射性核種の浸出過程とその解析方法について, 土木学会論文報告集 第 209 号, 1973, pp. 51-61.
- 1-8) The Behaviors of Cementitious Materials in Long Term Storage and Disposal of Radioactive Waste Results of a Coordinated Research, IAEA-TECDOC-1701, 2013.
- 1-9) 秋元利之ほか, ビチューメン放射性廃棄物固化体の耐浸出性 (文献調査), JAERI-Review 99-002, 1999, 165p.
- 1-10) 堀内進ほか: 放射性廃棄物のセメントガラス固化技術, 日立評論, 1988 年 4 月号, 1988, pp. 69-74.
- 1-11) 井上亮ほか, 中部電力 (株) 浜岡原子力発電所で製作される均質・均一固化体の廃棄確認方法について, JNES-EV-2015-9005, 2014.
- 1-12) 井上亮ほか, 東京電力 (株) 柏崎刈羽原子力発電所で製作される均質・均一固化体の廃棄確認方法について, JNES-EV-2015-9006, 2014.
- 1-13) (独)原子力安全基盤機構 規格基準部, 蒸発固化体に係る廃棄確認方法について, JNES-SS0603, 2006.
- 1-14) (独)原子力安全基盤機構 規格基準部, ペレット・グラニール固化体及びペレット固化体に係る廃棄確認方法について (改定 2), JNES-SS0902, 2009.
- 1-15) 経済産業省 原子力安全・保安院, 独立行政法人日本原子力研究開発機構大洗研究開発センターの廃棄物管理事業変更許可申請の概要について, 資料第 99-2-5, 2010.
- 1-16) (独)日本原子力研究開発機構, 再処理低放射性廃液の新たな処理技術開発ー低放射性廃液のセメント固化技術の確立を目指してー, 未来を拓く原子力ー原子力機構の研究開発成果ー2010, 2010, p. 92.
- 1-17) 原子力環境整備促進・資金管理センター, 放射性廃棄物データブック 平成 17 年度版, 121p.

技術 No.	2	ジオポリマー固化	前処理	
プロセス概要		ジオポリマーと呼ばれる無機粉体 (Si と Al を含有) とアルカリ溶液 (NaOH、KOH) もしくは珪酸アルカリ溶液 (水ガラス等) を混合して固化する方法である。		—
適用廃棄物		スラッジ、イオン交換樹脂		
プロセスフロー または 機器概要図			処理能力及び処理物の性状	①処理条件 温度：常温～150℃²⁻¹⁾ 圧力：常圧²⁻¹⁾ ②処理能力 充填率：10～45 wt%²⁻²⁾、35～40 wt%²⁻³⁾ (湿潤樹脂)、 > 70 wt%²⁻³⁾ (乾燥樹脂) ③処理物の性状 圧縮強度：70～100 MPa²⁻¹⁾ (28 日材齢) 固化体密度：1.8 t/m³²⁻²⁾ 耐放射線性：γ線 1.027 MGy の照射で強度に変化なし²⁻⁴⁾ 耐熱性：800℃以上でも性能維持²⁻⁵⁾ 核種浸出率：0.03～0.65%²⁻⁴⁾
			適用性評価	①技術成熟度 (実績等) 国内：— 国外：基礎試験；米国 (ハンフォード (廃液))²⁻⁵⁾ 実証試験；ドイツ (シュレマーアルペローダ (ウラン含有スラッジ))²⁻²⁾ 商用；スロバキア (ボフニェ、核燃料原子力発電所 (スラッジ、イオン交換樹脂))²⁻³⁾、チェコ (ドゥハブニ-原子力発電所 (スラッジ、イオン交換樹脂))²⁻⁴⁾ ②操作安全性 常温での操作であり、危険物も使用しないため安全性は高い ③保守性 加熱などの操作が不要であるため、装置が簡易であり、保守性は高い ④二次廃棄物発生量 — ⑤事故廃棄物特有事項 (有害物、有機物等) に対する適用性 除染装置のスラッジに対しては、CN が浸出するため、前処理として CN の分解が必要となる。
特記事項		国内ライセンス未取得 技術固有の課題：混練条件 (廃棄物の組成影響) の最適化が必要		

参考文献

- 2-1) J. Davidovits, Properties of geopolymer cements, Alkaline Cements and Concretes, KIEV, Ukraine, 1994.
- 2-2) E. Hermann *et al.*, Solidification of various radioactive residues by GÉOPOLYMER® with special emphasis on long-term-stability, Géopolymère '99 Proceedings, 1999.
- 2-3) The Behaviors of Cementitious Materials in Long Term Storage and Disposal of Radioactive Waste Results of a Coordinated Research Project, IAEA-TECDOC-1701, 2013.
- 2-4) P. Tatransky *et al.*, Solidification of Spent Ion Exchange Resin into the SIAL® Matrix at the Dukovany NPP, Czech Republic, ICEN2013-96045, 2013.
- 2-5) R. E. Lyon *et al.*, Fire Resistant Aluminosilicate Composites, Fire and Materials, Vol. 21, 1997.
- 2-6) W. Gong *et al.*, Duralith alkali-aluminosilicate Geopolymer waste form testing for hanford secondary waste, Final Report, VSL-10R2140-1, 2011.

技術 No.	3	水ガラス固化	前処理	
プロセス概要		セメントガラス固化とも呼ばれており、母材としてケイ酸ナトリウム、硬化剤としてリン酸ケイ素、吸水剤としてセメントを用いる。		焼却灰：水素が発生する物質（アルミニウムなど）は予め除去する必要がある。
適用廃棄物		濃縮廃液、焼却灰など		
プロセスフロー または 機器概要図 ³⁻¹⁾			処理能力及び処理物の性状	①処理条件 温度：常温 ³⁻¹⁾ 圧力：－ ②処理能力 － ③処理物の性状 圧縮強度： 1.7×10^4 Pa 以上 ³⁻¹⁾ 固化体密度：約 1.3 t/m^3 ³⁻¹⁾ 耐放射線性： 10^6 Gy の照射で質量変化なし、強度変化 3% 以下 ³⁻¹⁾ 耐熱性： 800°C 30 分加熱で質量減少率約 1.5 wt% 以下 ³⁻¹⁾ 核種浸出率： $10^{-8} \sim 10^{-7} \text{ g/cm}^2/\text{d}$ (^{134}Cs 、 ^{60}Co) ³⁻¹⁾ 分配係数： $210 \text{ cm}^3/\text{g}$ (Cs)、 $640 \text{ cm}^3/\text{g}$ (Sr) ³⁻¹⁾
				①技術成熟度（実績等） 北陸電力（志賀）、関西電力（大飯）、四国電力（伊方） ³⁻²⁾ ②操作安全性 常温での操作であり、危険物も使用しないため安全性は高い ③保守性 加熱などの操作が不要であるため、装置が簡易であり、保守性は高い ④二次廃棄物発生量 － ⑤事故廃棄物特有事項（有害物、有機物等）に対する適用性 除染装置のスラッジに対しては、CN が浸出するため、前処理として CN の分解が必要となる。
特記事項		ペレット化された廃棄物をドラム缶へ充填し、その空際にセメントガラスを注入する。セメントガラスは、粉末状の材料と添加水を混練し、重力を利用して容器へ注入する。 国内ライセンスなし 技術固有の課題：混練条件（廃棄物の組成影響）の最適化が必要	適用性評価	

参考文献

- 3-1) 堀内進ほか：放射性廃棄物のセメントガラス固化技術，日立評論，1988年4月号，1988，pp. 69-74.
- 3-2) (社)日本原子力産業会議，放射性廃棄物管理ガイドブック 1994年版，1994，276p.

技術 No.	4	アスファルト固化	前処理	
プロセス概要		アスファルト固化法は、廃棄物を加熱・溶融したアスファルトとともに混合し、固化体内に安定に閉じ込める処理法である。		酸化剤が固化体内に存在すると、自己発熱する危険性があるため、管理する必要がある。
適用廃棄物		廃液、廃溶媒、スラッジ、イオン交換樹脂		
プロセスフロー または 機器概要図			処理能力及び処理物の性状	①処理条件 対象廃棄物や処理プロセスによって異なる。 詳細は別表 4-1 及び 4-2 参照^{4-3, 4)} ②処理能力 充填率：25～80 wt%⁴⁻¹⁾、詳細は別表 4-1 及び 4-2 参照^{4-3, 4)} ③処理物の性状 圧縮強度：0.38～2.0 MPa⁴⁻⁵⁾ 固化体密度：1.06～1.50 t/m³⁴⁻¹⁾ 耐放射線性： ・10⁶～10⁷ Gy までの照射線量まで耐性あり⁴⁻³⁾ ・10⁷ Gy を超える場合メタン、水素ガス発生 (G 値：～0.41)^{4-1, 3, 6)} 耐熱性：100℃を超えると溶解する⁴⁻³⁾ 核種浸出率：別表 4-3 参照^{4-1, 3, 7)}
			適用性評価	①技術成熟度 (実績等) 国内外の原子力業界で多数実績あり。 国内実績の詳細を別表 4-1^{1, 3, 4, 8, 9, 10)}、国外実績の詳細を 4-2^{4-1, 3, 4)}に示す。 ②操作安全性 アスファルトは可燃性 (燃焼開始点：350～380℃⁴⁻¹⁾) である 酸化剤含有により爆発の危険性あり。 ③保守性 — ④二次廃棄物発生量 — ⑤事故廃棄物特有事項 (有害物、有機物等) に対する適用性 —
特記事項		国内ライセンスあり (ストレートアスファルト、ブローンアスファルト、防水工事用アスファルト) ⁴⁻²⁾ 技術固有の課題：廃棄物が高線量である場合に放射線分解により生成するガス発生量及び膨張の確認、酸化剤含有の有無調査、固化体作製時の Cs などの核種の揮発の有無の確認		

別表 4-1 アスファルト固化方式 4-1, 3, 4, 8, 9, 10)

名称	ポット式 4-3, 7)	ドラムドライヤ式 4-8, 10)
概要図		
説明	アスファルト計量タンクで約 200℃にした溶融アスファルトを混合容器中で廃棄物と混合させる手法である。	廃棄物とアスファルトをドラムドライヤへ供給し、ミキサーの回転によって廃棄物とアスファルトを混練する手法である。混練物はドラムドライヤ下部からドラム缶などの容器へ充填される。
国内実績	なし	北海道電力 ・泊（廃棄物投入量：140 kg/h） 関西電力 ・高浜（廃棄物（濃縮廃液、イオン交換樹脂）投入量：140 kg/h） ・大飯（廃棄物（濃縮廃液）投入量：280 kg/h） 四国電力 ・伊方（廃棄物（濃縮廃液）投入量：140 kg/h） 九州電力 ・玄海（廃棄物（濃縮廃液）投入量：140 kg/h） ・川内（廃棄物投入量：140 kg/h） JAEA ・東海 原科研（廃棄物（濃縮廃液）投入量：60～100 L/h） ・大洗（廃棄物（化学沈殿スラッジ）投入量：70-80 kg/h）

別表 4-1 アスファルト固化方式（続き）

名称	薄膜蒸発式 4-3. ⑧	エクストルーダ式
概要図		
説明	廃棄物とアスファルトを遠心薄膜蒸発缶に供給し、蒸発缶内部及び加熱した壁面で廃棄物とアスファルトを混合する手法である。混合物は、蒸発缶下部からドラム缶などの容器へ充填される。	アスファルトと廃棄物を混合しながら水分を蒸発させ、エクストルーダによりアスファルト混合物が押し出されて容器に充填される。 JAEA 再処理施設では、蒸発濃縮物に対して、固化体作製量が170 kg/h（15 drums/d）、アスファルト温度が175℃、廃棄物充填率が43wt%の固化体が作製された。
国内実績	関西電力 ・ 美浜（廃棄物（濃縮廃液）投入量：200 kg/h） ・ 高浜（廃棄物（濃縮廃液）投入量：200 kg/h） 日本原子力発電 ・ 敦賀（廃棄物（濃縮廃液）投入量：200 kg/h） JAEA ・ ふげん（廃棄物（濃縮廃液、イオン交換樹脂、フィルタスラッジ）投入量：200 kg/h）	JAEA ・ 再処理施設（廃棄物（NaNO₃含有濃縮廃液）投入量：240 kg/h）

別表 4-2 国外のアスファルト固化施設 (4-1, 3, 4)

国名	サイト	対象廃棄物	プロセス	処理能力			
				廃棄物 投入量	固化体 作製量	廃棄物 充填率 (wt%)	アスファルト 温度 (°C)
オーストリア	ザイベルスドルフ研究所	蒸発濃縮物	薄膜蒸発	—	50 L/h	—	—
ベルギー	モル処理施設	蒸発濃縮物	エクストルーダ	133 kg/h	133 kg/h	40	160
		スラッジ	蒸発	200 kg/h	—	30~40	180~200
		スラッジ	ポット蒸発	—	45 L/h	—	—
カナダ	チョークリバー研究所	スラリー	薄膜蒸発	120 L/h	100 L/h	—	—
		イオン交換樹脂					
		焼却灰	リボン混合機	—	—	—	—
		乾燥廃棄物					
チェコ	ジェシュ研究所	研究所廃棄物	エクストルーダ	5 L/h	—	—	—
		中しベル廃棄物	ポット蒸発	—	—	—	—
		蒸発濃縮物	薄膜蒸発	—	—	—	—
		スラッジ					
フィンランド	オルキルオト原子力発電所	乾燥廃棄物	混合器	—	70 L/h	—	—

別表 4-2 国外のアスファルト固化施設 4-1.3.4) (続き)

国名	サイト	対象廃棄物	プロセス	処理能力			
				廃棄物 投入量	固化体 作製量	廃棄物 充填率 (wt%)	アスファルト 温度 (°C)
フランス	COGEMA (現 AREVA)	スラッジ	薄膜蒸発	—	50~70 kg/h	—	—
			エクストルーダ	—	40 kg/h	—	—
			2 段階エクストルーダ	500 L/h	—	—	—
	ラ・アーク再処理施設	再処理廃棄物	エクストルーダ	250 kg/h	110 kg/h	35~45	140
	カダラッシュ研究所	蒸発濃縮物	薄膜蒸発	—	—	—	—
		研究所廃棄物	エクストルーダ	—	—	—	—
ドイツ	バルダック研究所	蒸発濃縮物 スラッジ	薄膜蒸発	—	—	—	—
		スラッジ	エクストルーダ	250 kg/h	110 kg/h	45	160
		濃縮物	エクストルーダ	170 kg/h	60 kg/h	40~50	140
インド	タラプール処理施設	蒸発濃縮物 スラッジ イオン交換樹脂	薄膜蒸発	40 L/h	—	—	—
ポーランド	シフィエルク研究所	蒸発濃縮物	ポット蒸発	—	—	—	—

別表 4-2 国外のアスファルト固化施設 4-1.3.4) (続き)

国名	サイト	対象廃棄物	プロセス	処理能力		固化体 作製量	廃棄物 充填率 (wt%)	アスファルト温 度 (°C)
				廃棄物 投入量				
スウェーデン	バーゼベック原子力発電所	イオン交換樹脂 ろ過助剤 蒸発濃縮物	薄膜蒸発	—		80~100 L/h	—	—
		スラリー	蒸発	30~90 kg/h		—	15~25	140~180
		スラリー	薄膜蒸発	120~140 kg/h		—	57	115~125
スイス	ガスゲン原子力発電所	スラリー	薄膜蒸発	—		—	30~40	120~150
		蒸発濃縮物	エクストルーダ	100 kg/h		40 kg/h	15	150~160
		イオン交換樹脂	エクストルーダ	10 kg/h		30 kg/h	33	120
英国	研究段階	マグノックス廃棄物	エクストルーダ	—		—	—	—
米国	原子力発電所 (4 基)	発電所廃棄物	エクストルーダ	—		—	—	—
旧ソ連	CSBR	濃縮物	エクストルーダ	—		—	—	—
		スラッジ		—		—	—	—
	原子力発電所 (3 基)	発電所廃棄物	蒸発	400 kg/h		—	35~45	125~135
	レニングラード処分施設	蒸発濃縮物	ポット蒸発	—		—	—	—
	スヴェルドロフスク研究所	濃縮物	薄膜蒸発	—		—	—	—

別表 4-3 アスファルト固化体からの核種浸出率^{4-1, 3, 7)}

核種	試験方法	浸出率・浸出速度	備考
Co	IAEA 標準 (小型サンプル)	7×10^{-6} cm/d	—
	—	$1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-5}$ cm/d	BWR 蒸発濃縮廃液、浸出期間 135 日
	—	7×10^{-5} cm/d	PWR 蒸発濃縮廃液、浸出期間 123 日
	—	$5 \times 10^{-5} \sim 2 \times 10^{-4}$ cm/d	再処理蒸発濃縮廃液、浸出期間 0 日
Sr	IAEA 標準 (小型サンプル)	2×10^{-5} cm/d	—
	—	$1 \times 10^{-7} \sim 1 \times 10^{-5}$ cm/d	BWR 蒸発濃縮廃液、浸出期間 135 日
	—	2×10^{-5} cm/d	PWR 蒸発濃縮廃液、浸出期間 123 日
	—	$2 \times 10^{-6} \sim 2.4 \times 10^{-4}$ cm/d	再処理スラッジ、浸出期間 100 日
	—	4.1×10^{-5} cm/d	再処理スラッジ、浸出期間 916 日
	—	$5 \times 10^{-5} \sim 2 \times 10^{-4}$ cm/d	再処理蒸発濃縮廃液、浸出期間 0 日
	—	1×10^{-5} cm/d	再処理蒸発濃縮廃液、浸出期間 100 日
	—	8×10^{-6} cm/d	再処理蒸発濃縮廃液、浸出期間 400 日
Ru	—	$1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-5}$ cm/d	BWR 蒸発濃縮廃液、浸出期間 135 日
	—	5×10^{-5} cm/d	PWR 蒸発濃縮廃液、浸出期間 123 日
	—	$5 \times 10^{-5} \sim 2 \times 10^{-4}$ cm/d	再処理蒸発濃縮廃液、浸出期間 0 日

別表 4-3 アスファルト固化体からの核種浸出率（続き）

核種	試験方法	浸出率・浸出速度	備考
Cs	IAEA 標準（小型サンプル）	3×10^{-6} cm/d	—
	IAEA 標準（大型サンプル）	1.5×10^{-6} cm/d	—
	—	10^{-5} g/cm ² /d	固形分混入率 50wt% 固化体
	—	10^{-6} g/cm ² /d	固形分混入率 40wt% 固化体
	—	$10^{-8} \sim 10^{-5}$ cm/d	浸出期間 1 年
	—	$3 \times 10^{-8} \sim 1 \times 10^{-6}$ cm/d	BWR 蒸発濃縮廃液、浸出期間 135 日
	—	2.5×10^{-4} cm/d	PWR 蒸発濃縮廃液、浸出期間 5 日
	—	2.0×10^{-5} cm/d	PWR 蒸発濃縮廃液、浸出期間 50 日
	—	1×10^{-5} cm/d	PWR 蒸発濃縮廃液、浸出期間 100 日
	—	3×10^{-6} cm/d	PWR 蒸発濃縮廃液、浸出期間 123 日
	—	$1 \times 10^{-7} \sim 5 \times 10^{-6}$ cm/d	再処理スラッジ、浸出期間 100 日
	—	8×10^{-5} cm/d	再処理スラッジ、浸出期間 916 日
	—	1.9×10^{-5} cm/d	再処理スラッジ、浸出期間 2,370 日
	—	$5 \times 10^{-5} \sim 2 \times 10^{-4}$ cm/d	再処理蒸発濃縮廃液、浸出期間 0 日
	—	5×10^{-6} cm/d	再処理蒸発濃縮廃液、浸出期間 100 日
	—	8×10^{-7} cm/d	再処理蒸発濃縮廃液、浸出期間 400 日
Pu	IAEA 標準（小型サンプル）	$< 10^{-5}$ cm/d	—
	IAEA 標準（大型サンプル）	6×10^{-7} cm/d	—
	—	1×10^{-7} cm/d	再処理スラッジ、浸出期間 916 日
	—	3.9×10^{-9} cm/d	再処理スラッジ、浸出期間 2,370 日
	—	$2 \times 10^{-7} \sim 3 \times 10^{-6}$ cm/d	再処理蒸発濃縮廃液、浸出期間 0 日

参考文献

- 4-1) 阪田 貞弘ほか, 放射性廃棄物処理処分に関する研究開発, 産業技術出版, 1983, 632p.
- 4-2) (独) 原子力安全基盤機構 規格基準部, 均質・均一固化体及び充填固化体の廃棄のための確認方法について (一部改正), JNES-SS0801, 2008.
- 4-3) IAEA, Conditioning of Low- and Intermediate-Level Radioactive Wastes, Technical Reports Series No.222, 1983.
- 4-4) IAEA, Bituminization Process to Condition Radioactive Wastes, Technical Reports Series No.352, 1993.
- 4-5) Low-Level Radioactive Waste Volume Reductions and Stabilization Technologies Resource Manual, National Low-Level Radioactive Waste Management Program, DOE/LLW-76T, 1988.
- 4-6) J. E. Flaherty *et al.*, A calculational technique to predict combustible gas generation in sealed radioactive waste containers, DOE, DE-AC07-76ID01570, 1986.
- 4-7) 秋元利之ほか, ビチューメン放射性廃棄物固化体の耐浸出性 (文献調査), JAERI-Review 99-002, 1999, 165p.
- 4-8) (社) 日本原子力産業会議, 放射性廃棄物管理ガイドブック 1994 年版, 1994, 276p.
- 4-9) 和達嘉樹ほか, 低中レベル放射性廃棄物処理技術開発の現状, 保健物理, Vol.19, 1984, pp.375-385.
- 4-10) 木下淳一ほか, アスファルト固化体均質性確認試験, JAEA-Testing 2012-003, 2012, 29p.

技術 No.	5	プラスチック固化	前処理	処理能力及び処理物の性状	適用性評価
プロセス概要		廃棄物は乾燥で粉体化され、プラスチック系固型化材を投入することで重合固化される。			
適用廃棄物		濃縮廃液、廃溶媒、スラッジ、イオン交換樹脂			
プロセスフロー または 機器概要図 ⁵⁻¹⁾		<pre> graph TD A[乾燥した濃縮廃液] --> D[イン・ドラム混合] B[脱水したイオン交換樹脂] --> D C[脱水したスラッジ] --> D E[触媒] --> D F[促進剤] --> G[ポリエステル] G --> H[固化] D --> H H --> I[キャッピング] I --> J[保管] </pre>	熱硬化性プラスチックでは水を閉じ込めることができないため、あらかじめ脱水する必要がある。	①処理条件 熱硬化性プラスチック：常温 ⁵⁻³⁾ 熱可塑性プラスチック：180℃ ⁵⁻³⁾ ②処理能力 充填率：別表 5-1 参照 ⁵⁻¹⁾ 処理量：(国内)：東京電力 (福島第二 (560 kg/h)、柏崎刈羽 (150 kg/h))、中部電力 (浜岡 (11 本/d))、中国電力 (島根 (180 kg)) ⁵⁻⁴⁾ (国外)：別表 5-2 参照 ^{5-1,3)} ③処理物の性状 圧縮強度：0.42～5 MPa (尿素-ホルムアルデヒド)、8.8～98 MPa (ポリエステル) ⁵⁻¹⁾ 固化体密度：別表 5-3 参照 ⁵⁻¹⁾ 耐放射線性：10 ³ ～10 ⁴ Gy が上限と考えられている ⁵⁻¹⁾ 。 耐熱性：ポリエステル及びエポキシ固化体に対して、600～980℃の耐火試験を行い、炭化層の厚さが最大 5 mm ⁵⁻¹⁾ 核種浸出率：別表 5-4 参照 ⁵⁻³⁾	①技術成熟度 (実績等) 国内：東京電力 (福島第二、柏崎刈羽)、中部電力 (浜岡)、中国電力 (島根)、JAEA (東海 (基礎試験)) ^{5-4,5)} 国外：別表 5-2 参照 ^{5-1,3)} ②操作安全性 常温付近の操作であるが、触媒や促進剤と廃棄物の反応に注意が必要。 ③保守性 － ④二次廃棄物発生量 － ⑤事故廃棄物特有事項 (有害物、有機物等) に対する適用性
特記事項		国内ライセンスあり (スチレン溶解不飽和ポリエステル) ⁵⁻²⁾ 技術固有の課題：放射線分解により生成するガス発生量及び膨張の確認、固化体作製時の Cs などの核種の揮発の有無の確認			

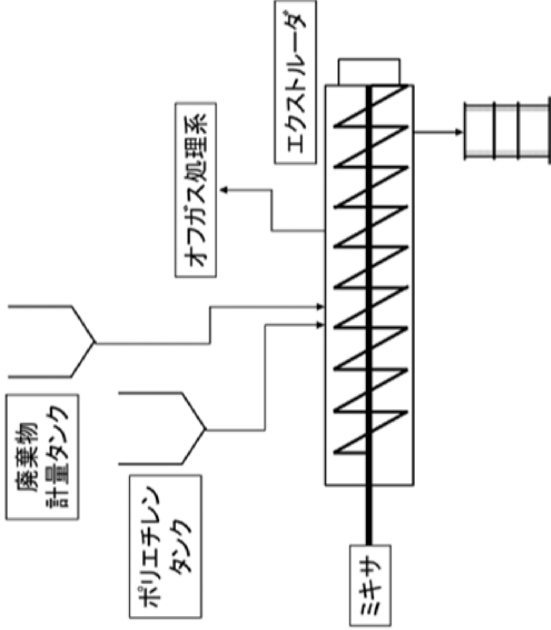
別表 5-1 プラスチック固化方式⁵⁻¹⁾

名称	ポリエステル式 (エポキシ式)	スチレン・ジビニルベンゼン式
概要図 ⁵⁻¹⁾		
説明	この方式は混合前に廃棄物を脱水するか、砂やシリカゲルといった吸着材を投入する必要がある。脱水した廃棄物を容器に入れ、固化材と混合し、触媒（アゾビスイソブチルニトリル）を加えて固化する。	この方式は混合前に廃棄物を脱水するか、バーミキュライトやシリカゲルのような吸着材を投入する必要がある。脱水した廃棄物を容器に入れ、固化材と混合し、触媒（アゾビスイソブチルニトリル）を加えて固化する。
適用廃棄物	濃縮廃液（含水率 1～2 wt%） イオン交換樹脂（含水率 40～50 wt%） スラッジ（含水率 70 wt%以下） （エポキシ式では乾燥廃棄物）	イオン交換樹脂
反応条件	室温	25℃（重合反応で 65℃まで上昇）
硬化時間	4～6 時間（エポキシ式では約 3 時間）	3～8 日
廃棄物充填率（wt%）	8～70（エポキシ式では～45）	—
特記事項	・ 二次廃棄物は攪拌翼のみ ・ スチレンモノマがあると爆発性の可能性がある。	

別表 5-1 プラスチック固化方式（続き）

名称	尿素－ホルムアルデヒド式	ポリビニルエステル式
概要図 5-1)		
説明	pH を 5～8 に調整した廃液と固化材を混合し、触媒（無機酸）を加えて pH を約 1.5 に調整する。遊離水が発生するためセルロース、粘土などの吸着材が必要となる。	廃棄物は計量タンクで計量され、あらかじめ固化材が充填された容器へ投入してよく混合させる。触媒及び促進剤を順次添加して固化する。
適用 廃棄物	濃縮廃液 イオン交換樹脂 スラッジ	濃縮廃液 スラッジ イオン交換樹脂
反応条件	25℃ pH : 1.5±0.5	温度は 100℃を超えないよう触媒・促進剤の量を調節
硬化時間	5～30 分	約 1 時間
廃棄物 充填率 (wt%)	30～70	—
特記事項	・ 低 pH のため容器腐食が課題 ・ 原料の経時劣化が課題	—

別表 5-1 プラスチック固化方式（続き）

名称	ポリエチレン式
概要図 ⁵⁻¹⁾	
説明	ペット状ポリエチレンと廃棄物をエクストルーダ内へ供給し、そこでポリエチレンの溶融、廃棄物との混合及び水分の蒸発が行われる。混合物はドラム缶などの容器に封入される。
適用 廃棄物	濃縮廃液 イオン交換樹脂 フィルタ助剤
反応条件	約 180℃に加熱したポリエチレンと廃棄物を混合する。
硬化時間	—
廃棄物 充填率 (wt%)	30～70
特記事項	—

別表 5-2 国外のプラスチック固化施設^{5-1, 3)}

国名	サイト	対象廃棄物	プロセス	処理能力	
				廃棄物投入量	固化体作製量
アルゼンチン	アトゥチャ原子力発電所	濃縮廃液	ポリエチレン	15 L/h	—
ドイツ	カールスルーエ研究所	イオン交換樹脂	スチレン・ジビニルベンゼン	1～2 m³/d	—
フランス	ゲルノーブル研究所	濃縮物	ポリエステル	30 L/h	—
		スラッジ			
		イオン交換樹脂			
オランダ	シヨール原子力発電所	プラント廃棄物	ポリエステル	60 L/h	—
	アルデンス原子力発電所	プラント廃棄物	ポリエステル	100 kg/d	1 drum/d
	ボルセラ原子力発電所	濃縮廃液	ポリエチレン	10 L/h	—
スイス	ベツナウ原子力発電所	イオン交換樹脂	スチレン・ジビニルベンゼン	—	20～25 drums/d
米国	ダウ・ケミカル（開発者）	プラント廃棄物	ポリビニルエステル	—	6 drums/h
		イオン交換樹脂			
		フィルタ助剤			
	ダグラス・ユナイテッド（開発者）	硫酸塩、ホウ酸塩	尿素-ホルムアルデヒド	—	—
		イオン交換樹脂			
		スラッジ			
	ゼネラル・エレクトリック（開発者）	濃縮廃液	エポキシ	—	—
		スラッジ			
		イオン交換樹脂			
		除染廃液			
	オークリッジ研究所	焼却灰	ポリエチレン	—	—
		廃溶媒			

別表 5-3 プラスチック固化体の密度⁵⁻¹⁾

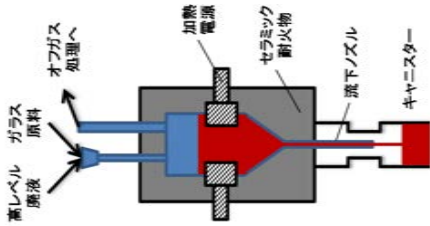
固型化材名称	密度 (t/m ³)
ポリエチレン	～1.1
尿素－ホルムアルデヒド樹脂	1.0～1.3
ポリエステル樹脂	1.04～1.3
エポキシ樹脂	～1.1

別表 5-4 プラスチック固化体からの核種浸出率⁵⁻³⁾

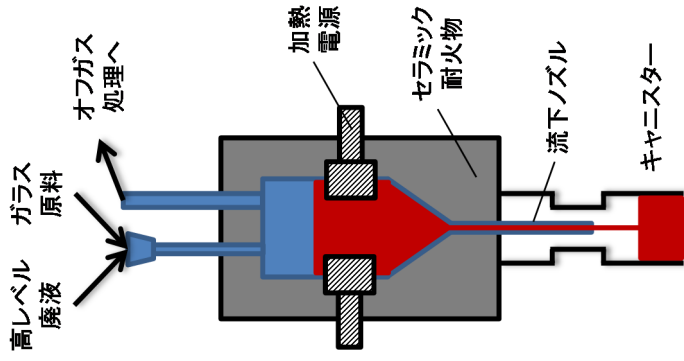
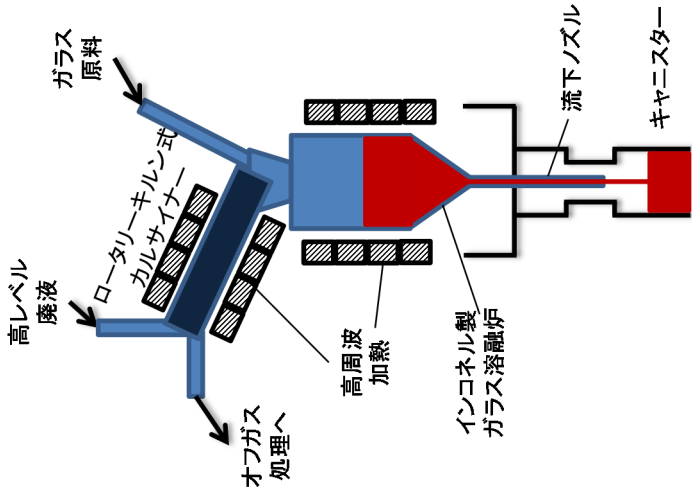
固型化材名称	核種	試験方法	浸出率・浸出速度
ポリエステル	Co	IAEA 標準 (小型サンプル)	$7 \times 10^{-7} \sim 1 \times 10^{-5}$ cm/d
	Sr	IAEA 標準 (小型サンプル)	$3 \times 10^{-6} \sim 5 \times 10^{-6}$ cm/d
	Cs	IAEA 標準 (小型サンプル)	$1.3 \times 10^{-7} \sim 5 \times 10^{-6}$ cm/d
尿素－ホルムアルデヒド	Co	IAEA 標準 (小型サンプル)	1.8×10^{-5} g/cm ² /d
	Sr	IAEA 標準 (小型サンプル)	1×10^{-4} g/cm ² /d
	Cs	IAEA 標準 (小型サンプル)	8×10^{-3} g/cm ² /d

参考文献

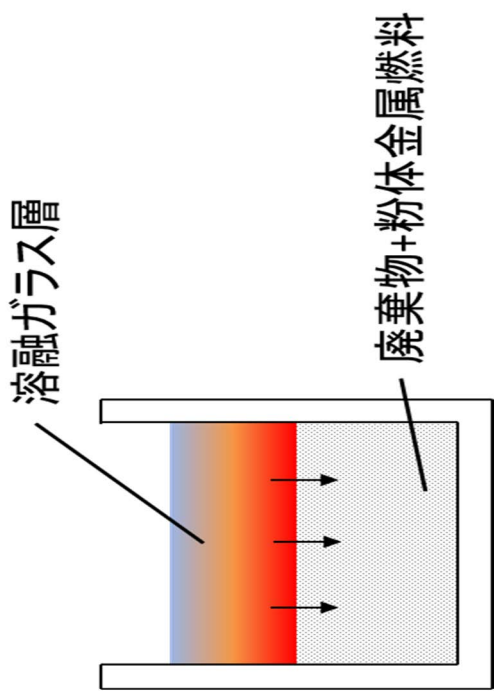
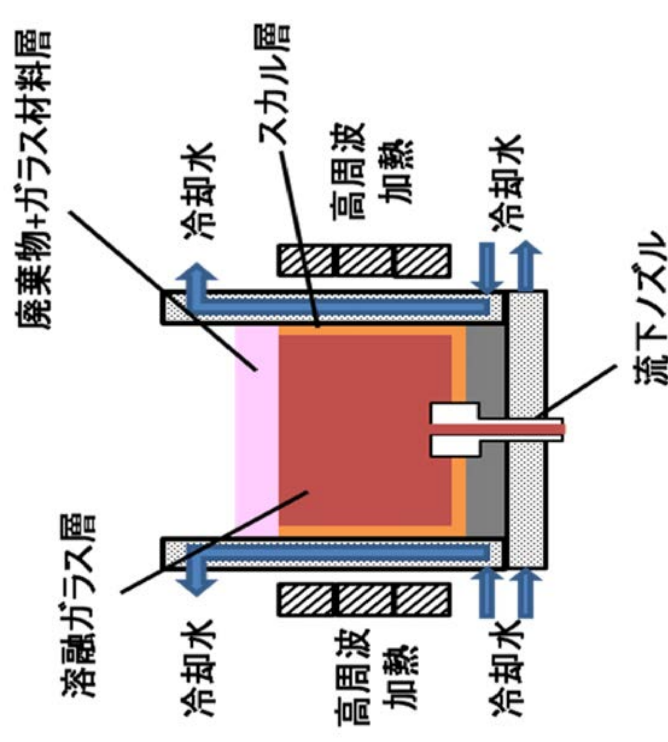
- 5-1) 阪田 貞弘ほか, 放射性廃棄物処理処分に関する研究開発, 産業技術出版, 1983, 632p.
- 5-2) (独)原子力安全基盤機構 規格基準部, 均質・均一固化体及び充填固化体の廃棄のための確認方法について (一部改正), JNES-SS0801, 2008.
- 5-3) IAEA, Conditioning of Low- and Intermediate-Level Radioactive Wastes, Technical Reports Series No.222, 1983.
- 5-4) (社)日本原子力産業会議, 放射性廃棄物管理ガイドブック 1994 年版, 1994, 276p.
- 5-5) 安藤博ほか, 再処理低レベル放射性廃棄物のガラスチック固化基礎研究, PNC-TJ101 84-15, 1984, 362p.

技術 No.	6	ガラス固化	前処理
プロセス概要		ガラス形成剤と廃棄物を混合して、加熱・溶融し、冷却固化する方法である。	—
適用廃棄物		固体廃棄物、廃液、焼却灰	①処理条件 温度：高レベル放射性廃液；1,100～1,250℃⁶⁻¹⁾、CCIM；>3,000℃⁶⁻²⁾ 圧力：— ②処理能力 充填率：9～30 wt%⁶⁻³⁾ 処理量：高レベル放射性廃液；別表 6-2 参照⁶⁻²⁾、低レベル放射性廃棄物；25 kg/h (JHCM、CCIM)⁶⁻²⁾、10 L/30 min (PMF)⁶⁻⁴⁾ ③処理物の性状 引張強度：50 MPa⁶⁻³⁾ 固化体密度：2.5～3.0 t/m³⁶⁻³⁾ 耐放射線性：α線照射に対して体積変化率1.2%程度⁶⁻³⁾ 耐熱性：熱膨張係数；8～12×10⁻⁶ /°C⁶⁻³⁾ 核種浸出率：10⁻⁴ g/cm²/d (ソックスレー浸出試験)、1年間浸漬で重量変化なし⁶⁻³⁾
プロセスフローまたは機器概要図 ⁶⁻¹⁾		 液体または溶融した廃棄物をガラス原料と混合し、固化する手法である。ガラス原料にはホウケイ酸系やリン酸系などがある。固化プロセスとしては、高レベル廃液固化に使用されている液体供給直接通電セラミックメルト（LFCM）方式とマルクール（AVM）またはラ・アーク（AVH）方式がある⁶⁻¹⁾。上の図はLFCMの概要を示したものである。低レベル放射性廃棄物に対する固化プロセスは、LFCM方式と同様のジュール加熱（JHCM）方式、粉末金属燃料を用いた自己進行型ガラス固化（PMF）方式及び水冷する誘導加熱（CCIM）方式がある⁶⁻²⁾。ガラス固化方式の詳細は別表 6-1 参照。	①技術成熟度（実績等） 高レベル放射性廃液：国内外で実績多数（詳細は別表 6-2 参照^{6-1, 5)}） 低レベル放射性廃棄物：国外で実績あり（詳細は別表 6-2) ②操作安全性 高温処理のため火災等の潜在的リスクが高いが、危険物の使用はなし ③保守性 高温処理であるため、炉壁の損傷による定期的なメンテナンスや揮発性核種を捕集するオフガス系のメンテナンスが必要となる。 ④二次廃棄物発生量 メンテナンス時に発生する炉壁材やオフガス系のフィルタなど ⑤事故廃棄物特有事項（有害物、有機物等）に対する適用性 加熱処理のため、有機物等は分解できる。
特記事項		技術固有の課題：固化体作製時の Cs などの核種の移行率評価、処理条件での NaCl 挙動の確認	適用性評価

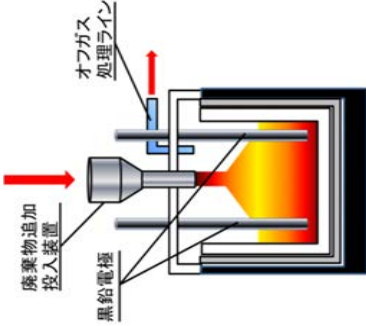
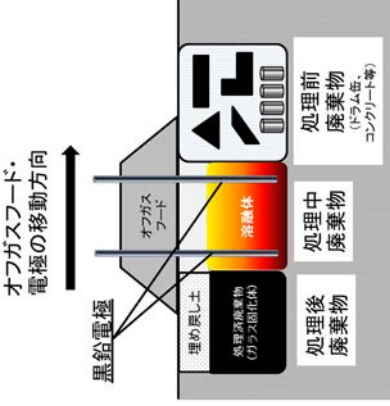
別表 6-1 ガラス固化方式^{6-1, 2)}

名称	LFCM 式 ⁶⁻¹⁾	AVM (AVH) 式 ⁶⁻¹⁾
概要図		
説明	ホウケイ酸ガラスの繊維を円柱状に成型したカートリッジに高レベル廃液を注下し、セラミックメタル内に落下させる。直接通電のジュール発熱により温度が維持される。溶解したガラスは、炉下部に設けられた円筒型のステンレス鋼製キャニスターに流し込まれる。	蒸発・乾燥・か焼し、核分裂生成物を粉末化する。次に、粉末状FPにホウケイ酸ガラス原料を加え、その混合物をインコネル製のガラス溶融炉のなかで溶融する（約1,150℃）。溶融したガラス状物質をLFCM法と同じように、炉下部に設置したキャニスターのなかに注ぎ込み、固化させる。

別表 6-1 ガラス固化方式（続き）

名称	PMF 式 ⁶⁻⁴⁾	CCIM 式 ⁶⁻²⁾
概要図 	二重壁のるつぽに廃棄物、粉体金属燃料及びガラス材料を混合したものを入る。表面に点火すると、自動的に反応が進行し、混合物がガラス化される。	
説明	二重壁のるつぽに廃棄物、粉体金属燃料及びガラス材料を混合したものを入る。表面に点火すると、自動的に反応が進行し、混合物がガラス化される。	廃棄物とガラス材料をるつぽに投入し、高周波による誘導加熱で溶融・固化する手法である。るつぽの炉壁内には冷却水を流通させるチューブを通し、炉壁を冷却することで、ガラス溶融体に温度の低いスカル層を形成させ、高温による腐食を防止することができる。

別表 6-1 ガラス固化方式（続き）

名称	GeoMeIt®式 ⁶⁻¹⁰⁾	地下平面その場ガラス固化 (ISV) 法 ⁶⁻¹⁰⁾
概要図		
説明	廃棄物を耐熱処理済みの容器に投入し、そこにガラス形成材として土等を投入する。容器内に黒鉛電極を挿入してオフガス処理状態を保ちながら通電し、ジュール熱で容器の内容物を溶融する。廃棄物を逐次追加投入し、最終的に容器内にガラス固化体を作成する。作成したガラス固化体を容器ごと、または容器から取り出して処分することを目的としている。	掘り返したコンクリートピットの天井を取り外し、その中の廃棄物に直接ガラス形成材（土等）を投入する。そこに黒鉛電極を挿入してオフガス処理状態を保ちながら通電し、ジュール熱で内容物を溶融することで最終的にガラス固化体を作成する。作成したガラス固化体は埋め戻す。
実績	・セラフィールドサイト（英国：英国立原子力研究所・KURION）⁶⁻¹¹⁾ - 対象廃棄物：マグノックス燃料の模擬スラッジ、汚染土壌 ・ハンフォードサイト（米国：パシフィックノースウエスト国立研究所・AMEC）⁶⁻¹²⁾ - 対象廃棄物：低レベル廃棄物（放射性廃液）模擬物 - 処理量：6.4 t/d (56 t/210 h) ・他、一般廃棄物における商業規模の実績多数⁶⁻¹³⁾。	・マラリンガサイト（オーストラリア：AMEC・Geosafe）⁶⁻¹⁴⁾ - 対象廃棄物：混合超ウラン廃棄物（鉄鋼ガレキ、鉛ブロック、コンクリート板、電線、機械類、汚染土壌） - 処理量：300-600 t/ピット、11 ピット、計 5400 t （最大処理能力：100 t/d) ・他、一般廃棄物における商業規模の実績多数⁶⁻¹³⁾。
備考	ICV = In-Container Vitrification.	・ピット内の廃棄物が爆発の恐れのある物質を含まないことを確認する必要がある。ISV = In situ Vitrification.

別表 6-2 国内外の高レベル放射性廃液固化施設^{6-1,5)}

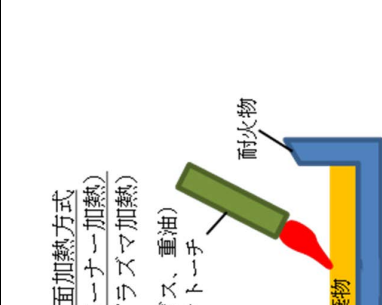
国名	サイト	プロセス	ガラス製造能力 (kg/h)	実績
ドイツ (ベルギー)	カールスルーエ研究所	LFCM	7	—
	モル処理施設	LFCM	31	1985～1991年で約2,100本の固化体製造
フランス	ラ・アーク研究所	AVH	15	1989～1992年で約1,300本の固化体製造
	マルクール研究所	AVM	25	1978～1991年で約1,900本の固化体製造
日本	JAEA 東海 TVF	LFCM	8.8	1995～2013年で247本の固化体製造 ⁶⁻⁶⁾
	日本原燃 (JNFL) 六ヶ所	LFCM	—	—
英国	セラフィールド	AVH	25	1990～1992年で約160本の固化体製造
	バットル PNL	LFCM	15	1984年より固化体製造開始
米国	ハンフォード	LFCM	45	1994年時点で建設中
	サバンナリバー	LFCM	104	1994年時点で施設試験中
	ウエストバレー	LFCM	45	1994年時点で施設建設中

別表 6-3 国外の低レベル放射性廃棄物ガラス固化施設⁶⁻²⁾

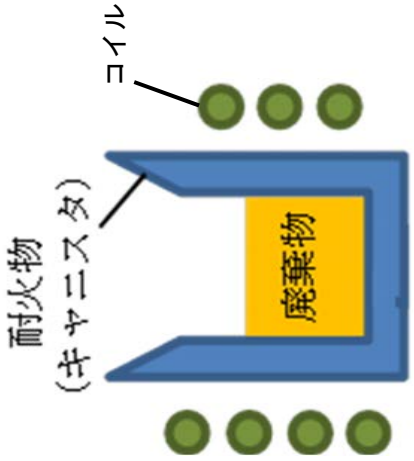
国名	サイト	プロセス	処理量 (kg/h)	対象廃棄物	実績
フランス	マルクール	CCIM	15～20 ⁶⁻⁷⁾	焼却灰	実証規模
イタリア	サルジア	CCIM	—	—	建設中 (2006年)
韓国	ウルチン (ハヌル)	CCIM	20 ⁶⁻⁸⁾	可燃物、イオン交換樹脂	2009～2013年で271本のドラム缶を処理 ⁶⁻⁹⁾
ロシア	ラドン	CCIM	75 (連続式)	—	1999年運転開始
	トーチ	PMF	10 (バッチ式)	—	2001年運転開始
スロバキア	—	JHCM	—	—	1996年運転開始
米国	ハンフォード	JHCM	—	—	2005年運転開始

参考文献

- 6-1) (社)日本原子力産業会議, 放射性廃棄物管理ガイドブック 1994 年版, 1994, 276p.
- 6-2) IAEA, Application of Thermal Technologies for Processing of Radioactive Waste, IAEA-TECDOC-1527, 2006.
- 6-3) 阪田貞弘ほか, 放射性廃棄物処理処分に關する研究開発, 産業技術出版, 1983, 632p.
- 6-4) M. I. Ojovan and W. E. Lee, Self sustaining vitrification for immobilization of radioactive and toxic waste, Glass Technol., 2003.
- 6-5) 第 7 回 再処理・リサイクル部会セミナーテキスト, 海外のガラス固化技術, 日本原子力学会 再処理・リサイクル部会, 2011.
- 6-6) K. Sasage, *et al.*, Development of Vitrification Technology at JAEA, 2013 ISRSM proceedings, 2013.
- 6-7) A. Jouan, *et al.*, Conditioning Process for Incinerator Ashes, Treatment and Conditioning of Radioactive Incinerator Ashes, 1990.
- 6-8) K. H. Yang, *et al.*, Commissioning Tests of the Ulsin LLW Vitrification Facility in Korea, WM2009 Proceedings, 2009.
- 6-9) H. J. Jo and C. H. Kim, Radioactive Waste Vitrification by Using Cold Crucible Induction Melter, 2013 ISRSM proceedings, 2013.
- 6-10) L. E. Thompson, MIXED WASTE TREATMENT COST ANALYSES FOR A RANGE OF GEOMELT VITRIFICATION PROCESS CONFIGURATIONS, WM2002 Conference Proceedings, 2002.
- 6-11) KURION VEORIA Home Page, <http://www.kurionveolia.com/our-expertise/case-studies/sellafield-uk> (accessed 2017 年 4 月 20 日).
- 6-12) K. S. Witwer, *et al.*, Hanford's Supplemental Treatment Project: Full-Scale Integrated Testing of In-Container-Vitrification and a 10,000-Liter Dryer, WM2008 Conference proceedings, 2008.
- 6-13) L. Thompson, *et al.*, FINAL RESULTS FROM THE IN SITU VITRIFICATION TREATMENT AT MARALINGA, WM2000 Conference, proceedings, 2000.
- 6-14) J. Vijgen, *et al.*, GeoMelt® - Annex to POPs Technology Specification and Data Sheet, The International HCH & Pesticides Association homepage, <http://www.ihpa.info/resources/library/> (accessed 2016 年 10 月 18 日).

技術 No.	7	溶融固化	前処理	
プロセス概要		廃棄物を加熱し、溶融状態にした後に冷却固化することで、廃棄物を減容・安定化する方法である		
適用廃棄物		焼却灰、スラッジなど		
プロセスフローまたは機器概要図			処理能力及び処理物の性状	①処理条件 温度： 高周波誘導加熱：1,300～1,500℃⁷⁻²⁾ プラズマ加熱：1,550～1,650℃⁷⁻³⁾ マイクロ波加熱：1,200～1,400℃⁷⁻²⁾ 圧力：－ ②処理能力 別表 7-1 参照 ③処理物の性状 別表 7-1 参照 ①技術成熟度 (実績等) 別表 7-1 参照 ②操作安全性 加熱するため燃料費などの処理コストが必要 高温溶融物を扱うための耐火物など設備の建設・維持コストが必要。 ③保守性 高温処理であるため、炉壁の損傷による定期的なメンテナンスや揮発性核種を捕集するオフガス系のメンテナンスが必要となる。 ④二次廃棄物発生量 処理を行うことで、処理設備の耐火物など難処理の二次廃棄物が発生。 ⑤事故廃棄物特有事項 (有害物、有機物等) に対する適用性 加熱処理のため、有機物等は分解できる。
適用性評価				
適用性評価				
適用性評価				
適用性評価				

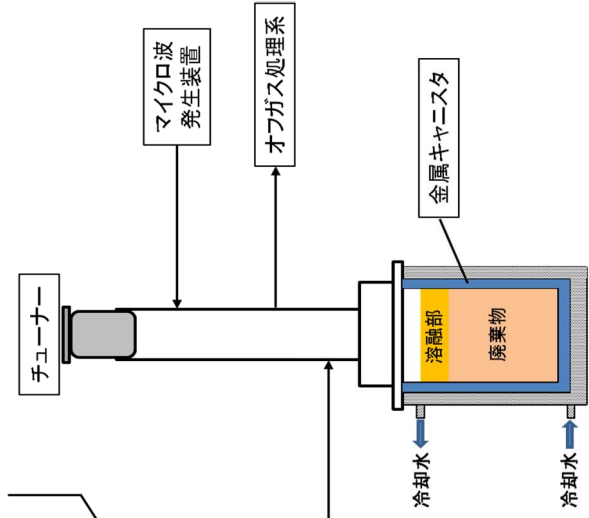
別表 7-1 溶融固化方式（原子力産業）

名称	電気加熱式	
	高周波誘導加熱式	
概要図		
説明	加熱対象物の周囲の外部コイルから高周波を印加することで磁界を発生させ、磁界によって発生する誘導電流によって対象物を加熱・溶融する方式である。対象物は導電体である必要がある。	
実績	・日揮⁷⁻⁴⁾ - 対象：焼却灰 - 処理量：30 kg/h - 温度：1,300～1,500℃ - 圧縮強度：400 MPa ・日本ガイシ（パイロットプラント）⁷⁻⁵⁾ - 対象：可燃物、廃樹脂、廃油焼却灰 - 処理量：25～60 kg/h - 周波数：3,000 Hz（出力：100 kW） - 温度：1,400℃ - 圧縮強度：80～120 MPa	

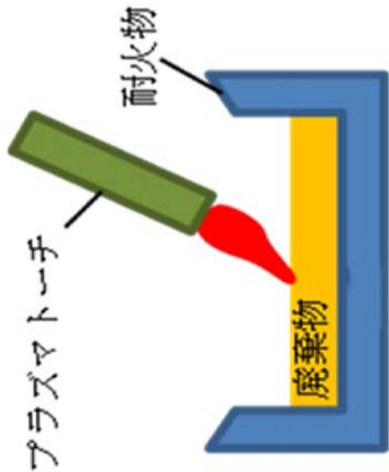
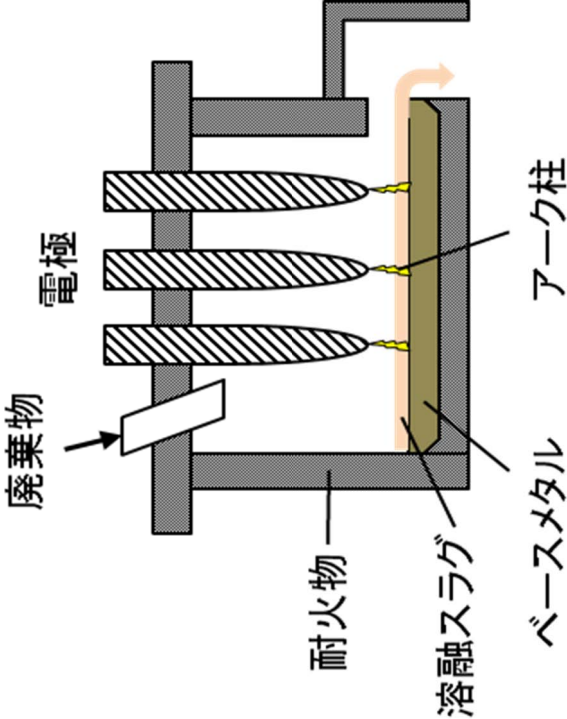
別表 7-1 溶融固化方式（原子力産業）（続き）

名称	電気加熱式	
	プラズマ加熱式	
概要図		
説明	プラズマトーチでプラズマアークを発生させ、その熱によって廃棄物を加熱・溶融する方式である。トーチの形式として、トーチと加熱対象物の間に高電圧を印可する移行式及びトーチ内に電極に高電圧を印可する非移行式の2種類がある。移行式は出力を大きくすることができ、処理量を多くすることが可能。非移行式は移行式と比較して出力が小さいが、始動性、安定性に優れる⁶⁾。	
実績	・ JAEA（東海 高減容）⁷⁻³⁾ 対象：焼却灰（PVC、ゴム、セルロース、ポリエチレン）、処理量：4 t/d、2 t/batch 加熱出力：非移行式 1.3 MW×2 基 ・ 電力中央研究所（横須賀）⁷⁻⁷⁾ 対象：雑固体（金属：飛灰=10：3）、処理量：13 kg/batch 加熱出力：100 kW 圧縮強度：50 MPa 以上 浸出率：Re: 5.86×10^{-5} g/cm²/d (28 日間浸出)、Co/Ni: 10^{-5} g/cm²/d 未満、Sr/Cs: 10^{-7} g/cm²/d 未満、Nb/Ce: 10^{-8} g/cm²/d 未満 ・ JAEA（基礎研究）⁷⁻⁸⁾ 対象：雑固体（コンクリート：模擬灰=70：30）、処理量：3 kg/batch 加熱出力：非移行式 50 kW 圧縮強度：85～310 MPa	

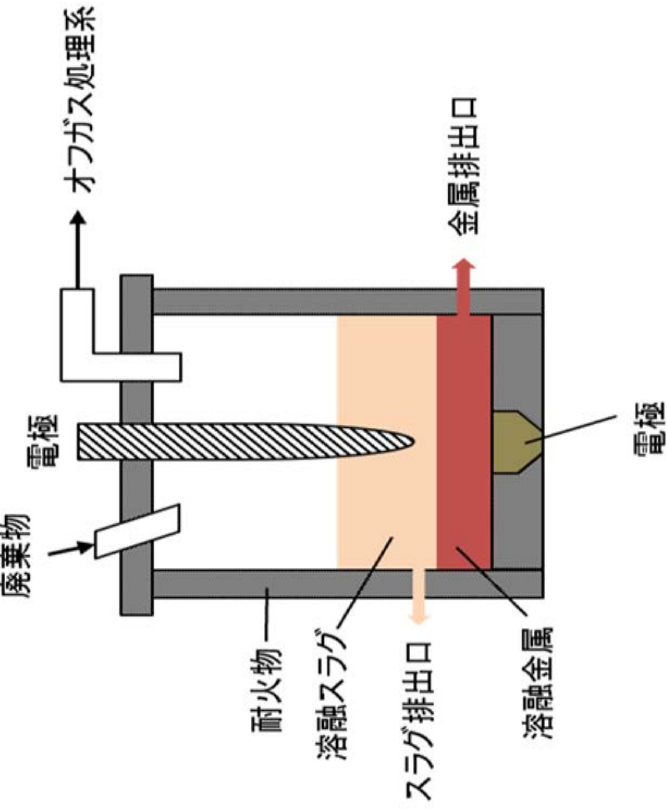
別表 7-1 溶融固化方式（原子力産業）（続き）

名称	電気加熱式 マイクロ波溶融式
概要図 ⁷⁻²⁾	
説明	廃棄物にマイクロ波を照射し、廃棄物表面の電荷の振動によって熱エネルギーを発生させて溶融する方式である。加熱対象物は誘電体である必要があり、金属はマイクロ波を反射するため適用できない。
実績	・ JAEA（東海 PWTF）⁷⁻³⁾ 対象：プルトニウム含有焼却灰 処理量：2～4 kg/h、周波数：2,450 MHz（出力：最大 10 kW） 浸出率：10^{-5} g/cm²/d 程度 ・ JAEA（大洗）⁷⁻⁹⁾ 対象：紙、布、酢酸ビニルシート等焼却灰 処理量：60 kg/d、周波数：915±25 MHz（出力：0～25 kW） 圧縮強度：30 MPa 以上

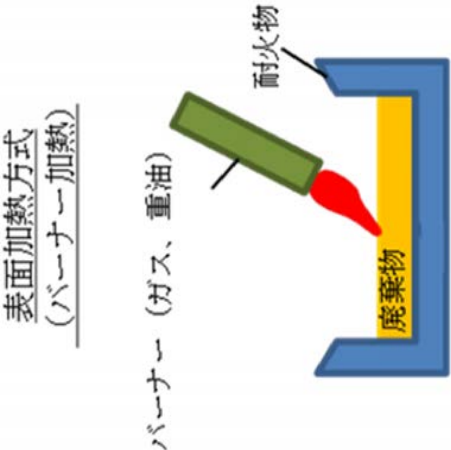
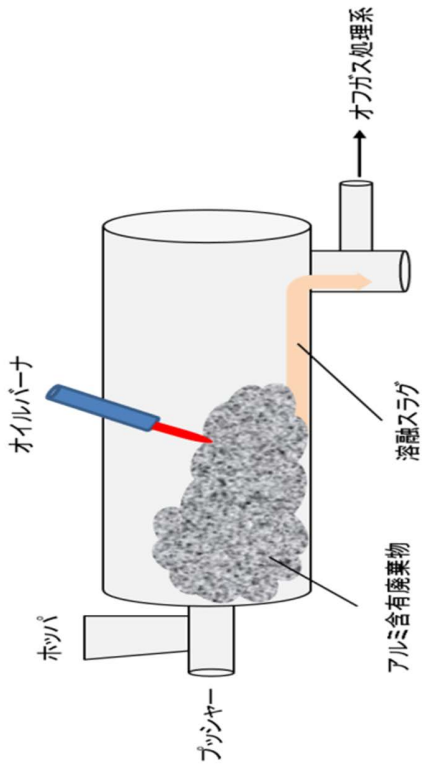
別表 7-1 溶融固化方式（一般産業）

電気加熱式	
名称	プラズマ式
概要図	
	直流アーク中にプラズマガスを流入させ、プラズマを発生させ、プラズマの熱で溶融する方式である。
	地方公共団体を中心に多数の導入実績あり
説明 7-10, 11)	
	炉内の電極と炉底のベースメタル間でアークを発生させ、その熱で溶融する方式である。
	地方公共団体を中心に多数の導入実績あり
実績 7-10)	

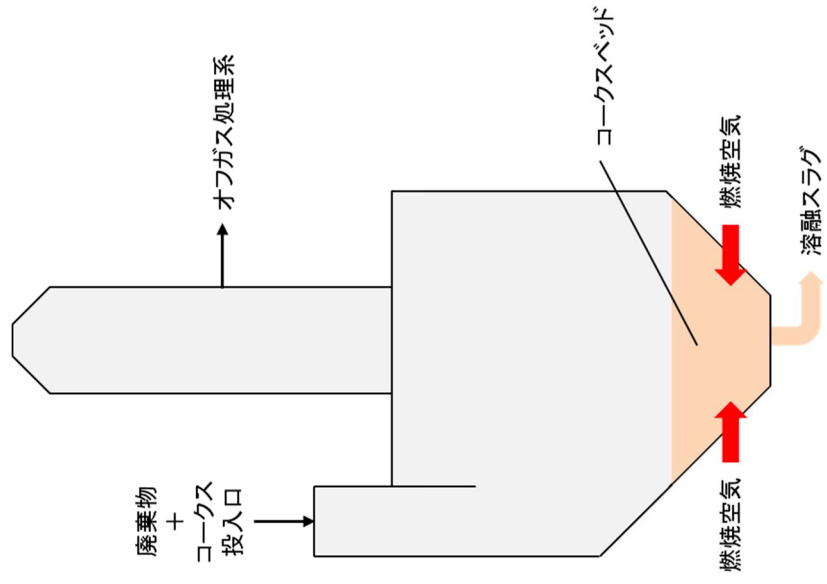
別表 7-1 溶融固化方式（一般産業）（続き）

名称	電気加熱式
	電気抵抗式
概要図 ⁷⁻¹⁰⁾	
説明 ^{7-10, 11)}	炉内に装入した電極に電圧を印可して、電極間の廃棄物から発生するジュール熱により溶融する方式である。直流・交流の2種類があり、上図は炉体上部と炉底の電極間で電流を流す直流方式の概要図である。交流方式は、炉上部に複数の電極を設置してその電極間に電流を流す方式である。
実績 ⁷⁻¹⁰⁾	地方公共団体を中心に多数の導入実績あり

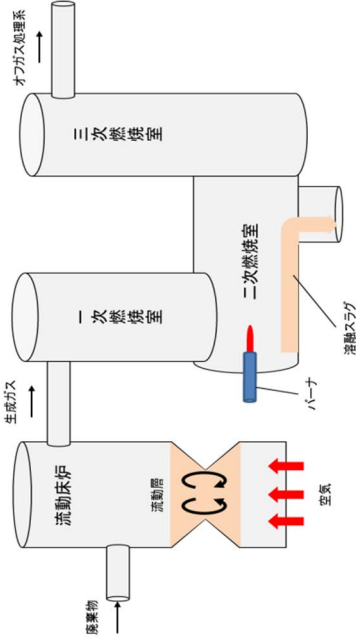
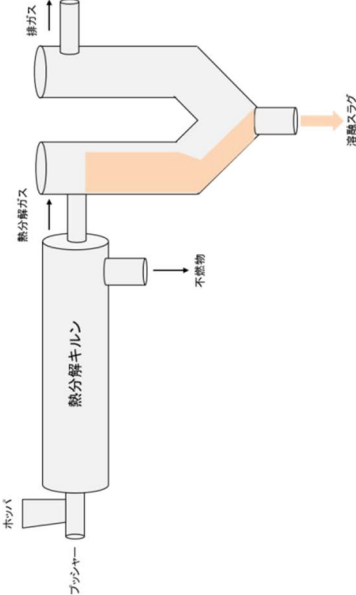
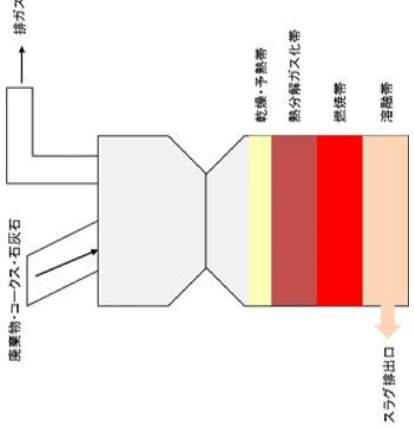
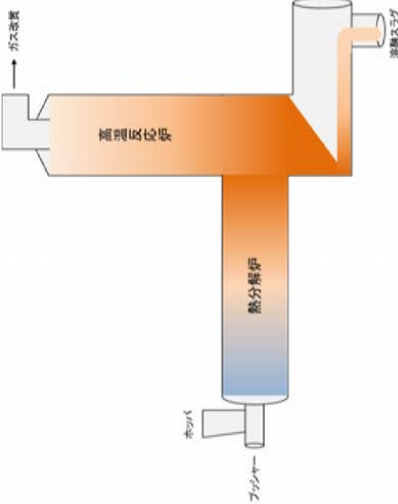
別表 7-1 溶融固化方式（一般産業）（続き）

	燃料加熱式	テルミット式 ⁷⁻¹⁰⁾
名称	表面加熱式	
概要図		
説明^{7-10, 11)}	燃料（ガス、灯油など）をバーナーで燃焼させ、その熱で廃棄物表面から溶融する方式である。複数の炉型が開発されており、炉体が固定されている固定式、炉体を回転させ均等に溶融することができる回転式、バーナー火炎の放射熱で溶融する反射式、バーナー燃焼ガスとの交流接触により溶融する輻射式などがある。	廃棄物にアルミニウムを添加して着火することによる化学反応熱を利用して溶融する方式である。
実績⁷⁻¹⁰⁾	地方公共団体を中心に多数の導入実績あり	

別表 7-1 溶融固化方式（一般産業）（続き）

名称	燃料加熱式	
	コークスベッド式	
概要図 7-10)		
	説明 7-10, 11) コークスを燃焼させ、その熱によって廃棄物を溶融する方式である。 実績 7-10) 地方公共団体を中心に多数の導入実績あり	

別表 7-1 溶融固化方式（一般産業）（続き）

ガス化溶融式	
名称	
概要図	 流動床式 7-10
	 キルン式 7-10
	 シャフト炉式 7-10
実績	 ガス改質式 7-10
	ガス化炉または熱分解炉で廃棄物をガス化・分解し、発生した熱分解ガスの燃焼熱を利用して廃棄物の残渣（炭化物、焼却灰など）を溶融させる方式である。ガス化の方式により、流動床式、キルン式、シャフト炉式及びガス改質式などに分類される。
地方公共団体を中心に多数の導入実績あり	

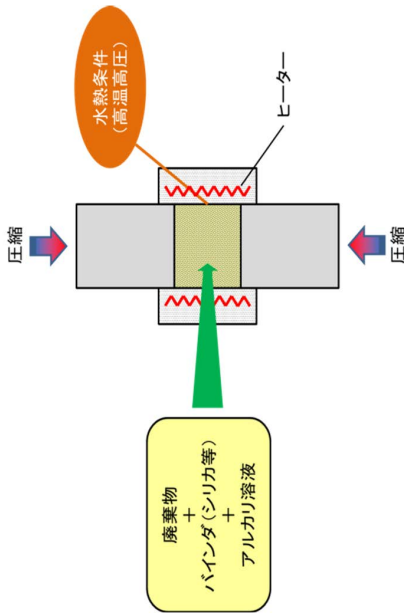
参考文献

- 7-1) 中五月ほか, ガザキプラントシステム (株) における発電所廃止措置及び廃棄物処理技術, デコミッションング技報 第34号, 2006, pp.2-17.
- 7-2) IAEA, Status of Technology for Volume Reduction and Treatment of Low and Intermediate Level Solid Radioactive Waste, Technical Reports Series No.360, 1994.
- 7-3) N. Nakashio, *et al.*, Trial Operation of the Advanced Volume Reduction Facilities for LLW at JAEA, J. Nuc. Sci. Tech., Vol.44, No.3, 2007, pp.441-447.
- 7-4) R. Koughout and M. Garamszeghy, Treatment and Conditioning of Solid Radioactive Wastes utilizing Modern Technologies, Management of Low and Intermediate Level Radioactive Waste 1988, 1989.
- 7-5) Y. Karita, *et al.*, The Induction Heat Melting/Solidification System for Low Level Radioactive Incinerator Ash, Treatment and Conditioning of Radioactive Incinerator Ashes, 1990.
- 7-6) 東康夫ほか, 放射性固体廃棄物のプラズマ溶融技術, 神戸製鋼技報 Vol.53, No.3, 2003, pp.61-65.
- 7-7) 安井晋示ほか, 低レベル放射性雑固体廃棄物処理へのプラズマ溶融法の適用性評価 溶融固化体の物性と溶融時に核種挙動に与える炉内雰囲気ガス条件の影響, 日本原子力学会誌 Vol.41, No.1, 1999, pp.39-47.
- 7-8) 中塩信行ほか, 不燃性雑固体廃棄物の溶融処理技術開発—雑固体溶融固化体特性試験—, JAEA-Review 2007-005, 2007, 35p.
- 7-9) 天澤弘也ほか, 原研大洗研究所における可燃物固体廃棄物焼却処理の管理システム, 保健物理, 26, 1991, pp.47-58.
- 7-10) 埼玉県環境部資源循環推進課, 埼玉県溶融スラグ有効利用指針 資料編, 2007.
- 7-11) 井上里志, 廃棄物焼却溶融システムの開発に関する研究 : 灰中未燃分の積極活用を志向した直結型焼却溶融システムの実用化, 博士学位論文, 2008.

技術 No.		8	焼結固化	前処理	
プロセス概要 適用廃棄物			粉末状の廃棄物を圧縮等により成形し、その後 1000℃程度で焼成することで、固化化する処理方法である。 濃縮物、焼却灰、乾燥スラッジなど	処理能力及び処理物の性状	焼結の前段階として、圧縮工程が必要となる。
					①処理条件 温度：焼成時 1,000℃程度 ⁸⁻¹⁾ 圧力：ペレット作製時 35 MPa ⁸⁻¹⁾ ②処理能力 充填率：90～95wt% ⁸⁻²⁾ 、処理量：2 kg/h ⁸⁻²⁾ ③処理物の性状 圧縮強度：1,000～2,000 MPa ⁸⁻²⁾ 固化体密度：3.5～5.5 t/m ³ ⁸⁻²⁾ 耐放射線性：2×10 ⁹ Gy の照射 (²⁴² Cm) で変化なし ⁸⁻²⁾ 、 2.5×10 ¹⁷ Gy の照射 (²³⁸ Pu 8% ドープ) で変化なし ⁸⁻²⁾ 耐熱性：－ 核種浸出率： 5×10 ⁻⁸ ～5×10 ⁻⁶ g/cm ² /d (Pu、室温条件) ⁸⁻²⁾ 2×10 ⁻⁴ g/cm ² /d (Pu、200℃、80 気圧条件) ⁸⁻²⁾ ①技術成熟度（実績等） 国内：下水汚泥焼却灰の焼成（一般廃棄物） ^{8-3,4)} 、セシウム吸着ゼオライトの焼成（研究段階） ⁸⁻⁵⁾ 国外：カールスルーエ研究所（ドイツ） ⁸⁻²⁾ ②操作安全性 粉体を扱うため、飛散による汚染の可能性あり 加熱するため、潜在的な火災リスクあり ③保守性 加熱をするため、設備維持費や燃料費等が発生する。 ④二次廃棄物発生量 － ⑤事故廃棄物特有事項（有害物、有機物等）に対する適用性 加熱処理のため、有機物等は分解できる。
特記事項			技術固有の課題：固化体作製時の Cs などの核種の移行率評価	適用性評価	

参考文献

- 8-1) 福島支援本部 環境支援部ほか、土壌の原位置加熱による放射性セシウムの除去可能性の検討, JAEA-Research 2011-026, 2011, 74p.
- 8-2) 阪田貞弘ほか、放射性廃棄物処理処分に関する研究開発, 産業技術出版, 1983, 632p.
- 8-3) 高橋秀典ほか、下水汚泥の焼却灰を焼結した赤レンガの黒芯の生成機構, J. Soc. Mat. Sci. Japan, Vol. 46, No. 7 1997, pp. 834-838.
- 8-4) 原圭史郎ほか、東京都区部の下水汚泥処理・再資源化におけるエネルギー消費分析, 環境システム研究論文集 Vol. 30, 2002, pp. 371-378.
- 8-5) 三村均ほか、(1) ゼオライトによる放射性核種の選択的分離・固化, J. ION EXCHANGE, Vol. 22, No. 3, 2011, pp. 96-107.

技術 No.	9	水熱固化	前処理	オートクレーブへの廃棄物の充填
プロセス概要		廃棄物とアルカリ溶液をオートクレーブと呼ばれる密閉容器に封入し、水熱条件下で廃棄物を結晶化させる方法である。	処理	
適用廃棄物		廃溶媒、焼却灰	処理能力及び処理物の性状	①処理条件 温度：300～350℃ ⁹⁻¹⁾ 圧力：20～30 MPa ⁹⁻¹⁾ ②処理能力 焼却灰の固化試験における条件 ⁹⁻²⁾ （その他の例は別表 9-1 参照 ⁹⁻³⁾ ） 温度：300℃、圧力：28 MPa、処理時間：8 h/batch 処理量：2 kg/batch ③処理物の性状 圧縮強度：120～200 MPa（高レベル放射性廃棄物の模擬物） ⁹⁻¹⁾ その他の廃棄物は別表 9-2 参照 ^{9-2, 3)} 固化体密度：別表 9-2 参照 ^{9-2, 3)} 耐放射線性：別表 9-2 参照 ^{9-2, 3)} 耐熱性：別表 9-2 参照 ^{9-2, 3)} 核種浸出率：別表 9-2 参照 ^{9-2, 3)} ①技術成熟度（実績等） 高知大学：高レベル放射性廃棄物の模擬物（研究段階） ⁹⁻¹⁾ 三井造船：焼却灰（工学試験段階） ⁹⁻²⁾ JAEA：30 mmφ及び100 mmφ規模 ⁹⁻³⁾ ②操作安全性 高温処理のため、火災などの潜在的リスクが高いが、危険物使用なし。 ③保守性 加熱するため燃料費などがかなり処理コストが高い。 高温、高圧処理であるため設備の建設・維持にかかるコストも高い。 ④二次廃棄物発生量 処理を行うことで、処理設備の耐熱物などの二次廃棄物が発生。 ⑤事故廃棄物特有事項（有害物、有機物等）に対する適用性 加熱処理のため、有機物等は分解できる。 密閉系であるため、揮発性核種が揮散しない。
プロセスフロー または 機器概要図			適用性評価	
特記事項		対象廃棄物とアルカリ溶液をオートクレーブに封入し、圧力容器外部から内部蒸気圧よりも高い圧力で機械的に加圧することにより、粒子間隙に存在する水を圧縮容器内にある水の逃げ場へ搾り出し緻密化させると同時に、熱水の作用により粉末粒子間を結合させ、廃棄物を結晶化させることで機械的強度の高い成形体を作成する技術である。 ⁹⁻¹⁾ 技術固有の課題：固化体作製時のCsなどの核種の移行率評価、固化処理条件の調査		

別表 9-1 水熱固化処理条件⁹⁻³⁾

対象廃棄物	処理条件					充填率 (wt%)	減容比
	温度 (°C)	圧力 (MPa)	反応時間	固化助剤	アルカリ		
硝酸塩含有廃液 (30φ×30 mm)	250	約 30	20～60 分	ガラス系材料	NaOH	—	—
スラッジ廃液 (30φ×30 mm)	250	約 30	20～60 分	シラス	NaOH	—	—
PbI ₂ 廃液 (30φ×30 mm)	250	約 30	20～60 分	シラス	Al (OH) ₃	—	—
焼却灰 (20φ×20 mm)	300	約 35	20 分	SiO ₂ (25 wt%)	5N NaOH (100 mL/kg)	—	4.5
ヨウ素フィルタ (20φ×20 mm)	300	約 35	20 分	なし	Ba (OH) ₂ ・8H ₂ O (200 g/kg)	—	1.7
シリカゲル (ST) (20φ×20 mm)	300	約 35	20 分	なし	Ca (OH) ₂ (0.5 kg/kg)	—	1.1
シリカゲル (Kr) (20φ×20 mm)	300	約 35	20 分	なし	Ca (OH) ₂ (0.5 kg/kg)	—	1.05
廃 AgS (20φ×20 程度 mm)	300～350	約 35	20 分	バインダ (0.25 g/g-廃 AgS)	Ca (OH) ₂ (0.3～0.5 g/g-廃 AgS)	—	1.14
廃 AgA (20φ×20 程度 mm)	300～350	約 35	20 分	—	Ca (OH) ₂ (0.3～0.5 g/g-廃 AgA)	—	0.94
低レベル廃液乾燥粉体 (20φ×30 程度 mm)	250	約 25	20 分	ホウケイ酸ガラス (39 wt%)	アルカリ溶液 (26 wt%)	35	—

別表 9-1 水熱固化処理条件⁹⁻³⁾ (続き)

対象廃棄物	処理条件						充填率 (wt%)	減容比
	温度 (°C)	圧力 (MPa)	反応時間	固化助剤	アルカリ			
廃活性炭 (20φ×30 程度 mm)	300	約 35	20 分	ホウケイ酸ガラス (83 wt%)	アルカリ溶液 (7 wt%)		10	—
廃砂 (20φ×30 程度 mm)	300	約 35	20 分	ホウケイ酸ガラス (53.5 wt%)	アルカリ溶液 (16.5 wt%)		30	—
廃シリカゲル (100 mmφ)	300	25	1 時間	—	Ba(OH) ₂ ・8H ₂ O (12 wt%)		74	1.32
模擬低レベル濃縮廃液 核種除去スラッジ (100 mmφ)	300	25	1 時間	シリカゲル、ケイ砂 アンスラサイト、砂	NaOH		—	3.3
Fe ₂ O ₃ (95 wt%)	400	200 (HIP)	1 時間	—	—		95	5.2
	400	200 (HIP)	1 時間	—	NaOH (2.5 wt%)		95	6.1
Fe ₂ O ₃ (99 wt%)	600	200 (HIP)	1 時間	—	—		99	5.2
AgI	400	200 (HIP)	1 時間	—	—		95	1.4
鉄沈殿スラッジ	400	200 (HIP)	1 時間	—	—		95	1.7
AgX (30φ×49 mm)	400	50~100	—	—	—		66.7~100	2.04~3.08
AgZ (30φ×71 mm)	400	50~100	—	—	—		66.7~100	1.45~1.78
AgS (30φ×40.0~50.2 mm)	400	50~100	—	—	—		66.7~100	1.71~2.15
炭酸吸収トバモライト (30φ×100 mm)	400	50~100	—	—	—		66.7~100	2.35~2.93
焼却灰	400	200 (HIP)	1 時間	—	NaOH (0~1 wt%)		95	4.15~4.17

別表 9-1 水熱固化処理条件⁹⁻³⁾ (続き)

対象廃棄物	処理条件					充填率 (wt%)	減容比
	温度 (°C)	圧力 (MPa)	反応時間	固化助剤	アルカリ		
模擬廃溶媒処理残渣	400	200 (HIP)	1 時間	—	NaOH (0～1 wt%)	95	3.64～3.98
放射性焼却灰 (20φ × 約 30 mm)	300	35	20 分	ガラス添加剤 (15 wt%)	NaOH (10 wt%)	75	—
乾留分解生成物 (リン酸塩粉末) 焼却灰 (50φ × 100 mm)	300～330	35	30 分	ガラス添加剤 (15 wt%)	NaOH (10 wt%)	75	—
乾留分解生成物 (リン酸塩粉末) 焼却灰 (180φ × 360 mm)	330	35	60 分	ガラス添加剤 (15 wt%)	NaOH (10 wt%)	75	—
焼却灰 (250φ × 370 mm)	250～300	35	120 分	ガラス添加剤 (15 wt%)	NaOH (10 wt%)	75	—
乾留分解生成物 (リン酸塩粉末) (250φ × 370 mm)	250～300	35	120 分	ガラス添加剤 (16 wt%)	NaOH (10 wt%)	74	—

別表 9-2 水熱固化体特性^{9-2, 3)}

対象廃棄物	減容比	圧縮強度 (MPa)	密度 (t/m ³)	耐放射線性	耐熱性	浸出率 (g/cm ² /d)
硝酸塩含有廃液 (30φ×30 mm)	—	>500	—	問題なし	>600°Cでひび割れ 800°Cまで着火せず	3.3×10^{-6}
スラッジ廃液 (30φ×30 mm)	—	>500	—	問題なし	>600°Cでひび割れ 800°Cまで着火せず	3.3×10^{-5}
PbI ₂ 廃液 (30φ×30 mm)	—	>500	—	問題なし	>600°Cでひび割れ 800°Cまで着火せず	3.3×10^{-5}
焼却灰 (20φ×20 mm)	4.5	約 36	約 1.8	良好	良好	10^{-6} (Ru, Cs)
ヨウ素フィルタ (20φ×20 mm)	1.7	約 20	約 2.1	良好	良好	10^{-5}
シリカゲル (ST) (20φ×20 mm)	1.1	約 27	約 1.2	良好	良好	浸出性は時間比例 浸出率は低下
シリカゲル (Kr) (20φ×20 mm)	1.05	約 64	約 1.1	良好	良好	浸出性は時間比例
廃 AgS (20φ×20 程度 mm)	1.14	約 33	1.42	—	良好	2.36×10^{-5} (Si) 1.19×10^{-5} (Ca) $<3.37 \times 10^{-7}$ (Ag) 3.37×10^{-6} (I)
廃 AgA (20φ×20 程度 mm)	0.94	約 23	1.91	—	良好	7.96×10^{-6} (Al) 7.39×10^{-5} (Ca) $<3.41 \times 10^{-7}$ (Ag) $<1.17 \times 10^{-6}$ (I)

別表 9-2 水熱固化体特性^{9-2, 3)} (続き)

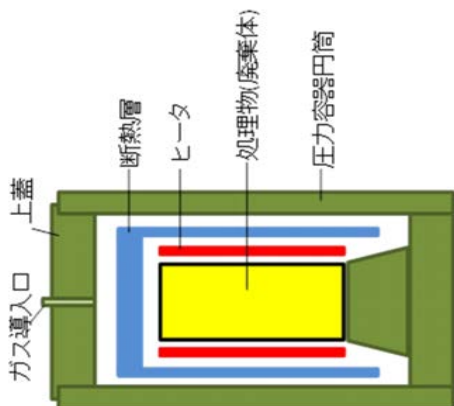
対象廃棄物	減容比	圧縮強度 (MPa)	密度 (t/m ³)	耐放射線性	耐熱性	浸出率 (g/cm ² /d)
低レベル廃液乾燥粉末 (20φ×30程度 mm)	—	約 26	約 1.98	—	—	—
廃活性炭 (20φ×30程度 mm)	—	約 29	約 1.99	—	—	—
廃砂 (20φ×30程度 mm)	—	約 19	約 1.89	—	—	—
廃シリカゲル (100 mmφ)	1.32	10.3	1.3	—	—	2.4×10 ⁻⁴
模擬低レベル濃縮廃液 核種除去スラッジ (100 mmφ)	3.3	99.4	—	—	—	—
Fe ₂ O ₃ (95 wt%)	5.2	—	3.73	—	—	—
	6.1	—	4.40	—	—	—
Fe ₂ O ₃ (99 wt%)	5.2	—	3.75	—	—	—
AgI	1.4	—	4.89	—	—	—
鉄沈殿スラッジ	1.7	—	2.23	—	—	—
AgX (30φ×49 mm)	2.04~3.08	23.1~107.5	2.03~2.99	—	—	—
AgZ (30φ×71 mm)	1.45~1.78	11.5~39.5	1.15~1.43	—	—	—
AgS (30φ×40.0~50.2 mm)	1.71~2.15	19.0~52.2	1.11~1.43	—	—	—
炭酸吸収トバモライト (30φ×100 mm)	2.35~2.93	68.0~88.5	1.27~1.94	—	—	—
焼却灰	4.15~4.17	17.2~47.7	1.75~1.76	—	—	—

別表 9-2 水熱固化体特性^{9-2,3)} (続き)

対象廃棄物	減容比	圧縮強度 (MPa)	密度 (t/m ³)	耐放射線性	耐熱性	浸出率 (g/cm ² /d)
模擬廃溶媒処理残渣	3.64～3.98	31.6～34.4	2.33～2.55	—	—	—
放射性焼却灰 (20φ×約30 mm)	—	—	約2	—	—	<5×10 ⁻⁶ (⁵⁴ Mn) <5×10 ⁻⁷ (⁶⁰ Co) 1×10 ⁻⁵ (¹³⁷ Cs)
乾留分解生成物 (リン酸塩粉末) 焼却灰 (50φ×100 mm)	—	30～40	1.8～1.9	10 ⁷ Gy 変化なし	—	2～8×10 ⁻⁵
乾留分解生成物 (リン酸塩粉末) 焼却灰 (180φ×360 mm)	—	30～40	1.9～2.1	—	—	—
焼却灰 (250φ×370 mm)	—	10～34	1.7	—	—	固相 Cs 濃度/液相 Cs 濃度 ≥ 1,000
乾留分解生成物 (リン酸塩粉末) (250φ×370 mm)	—	10～34	1.7	—	—	固相 Cs 濃度/液相 Cs 濃度 ≥ 300

参考文献

- 9-1) K. Yanagisawa, *et al.*, Immobilization of Radioactive Waste in Hydrothermal Synthetic Rock(III), Journal of Nuclear Science and Technology, Vol.23, No.6, pp.550-558, 1986.
- 9-2) 森恵次郎ほか, 低レベル放射性廃棄物の水熱固化処理システムの開発, 三井造船技報 第172号 別冊, 2001, pp.54-58.
- 9-3) 福本雅弘ほか, 低レベル放射性廃棄物の水熱固化に関する研究, PNC-TN8410 96-055, 1998, 147p.

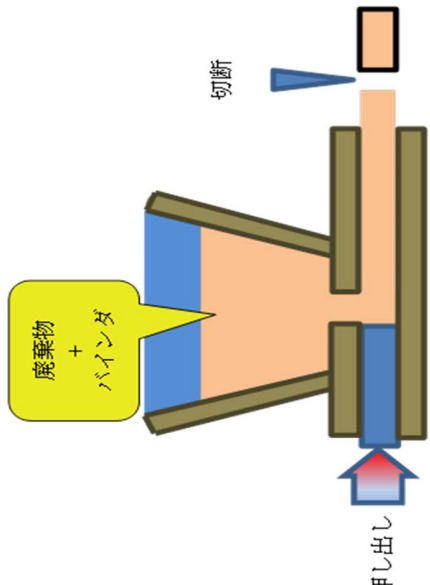
技術 No.	10	HIP (Hot Isostatic Pressing) 固化	前処理	ガス成分の除去及び金属カプセルへの密封充填
プロセス概要		廃棄物を火成岩の形成過程と同等の高温高压条件下で処理することにより、固化体を作製する手法である。	前処理	
適用廃棄物		廃銀吸着材	処理能力及び処理物の性状	①処理条件 温度：数 100～2,000℃¹⁰⁻¹⁾ 圧力：数 10～200 MPa¹⁰⁻¹⁾ (圧力媒体：Ar, N₂ など) ②処理能力 処理量：10 kg/h¹⁰⁻²⁾、充填率：75 wt%¹⁰⁻³⁾、60-90 wt%¹⁰⁻⁴⁾ 減重率：15-45 wt%¹⁰⁻⁴⁾、48 wt%¹⁰⁻⁵⁾、59 wt%¹⁰⁻³⁾、 処理室寸法：φ1,200 mm×1,200 mm¹⁰⁻¹⁾ ③処理物の性状 圧縮強度：167～216 MPa¹⁰⁻⁵⁾ 固化体密度：2.4 t/m³¹⁰⁻³⁾、2.59 t/m³¹⁰⁻⁵⁾ 耐放射線性：密度；～1.5%低下 (スーパーカルサイン固化体 2.6×10¹⁹ α/cm²)¹⁰⁻⁶⁾、体積；1.38～7.37%増大¹⁰⁻⁷⁾ (シンロック B, C 固化体 1 MeV 以上中性子 6.1～27.3×10¹⁹ n/cm²)¹⁰⁻⁷⁾ 膨張率 4%以上はクラックが発生するが、浸出への影響なし¹⁰⁻⁷⁾ 耐熱性 (熱膨張率)：5×10⁻⁶ /°C¹⁰⁻²⁾ 浸出率：1.7×10⁻⁸ g/cm²/d (ヨウ素)、6.8×10⁻⁸ g/cm²/d (ケイ素)¹⁰⁻⁸⁾
プロセスフローまたは機器概要図 ¹⁰⁻⁵⁾		 数 100～2,000℃の高温と数 10～200 MPa の等方的な圧力を被処理体に加えて処理する。通常は Ar など のガスを圧力媒体として等方的な圧力を加える。処理条件が天然に存在していることから、長期間安定な固化体を作製できる¹⁰⁻¹⁾。	適用性評価	①技術成熟度 (実績等) 国内外の実績については別表 10-1 参照^{10-1, 2)} ②操作安全性 高温・高压処理のため火災などの潜在的リスクが高いが、危険物使用なし ③保守性 加熱するため燃料費などがかかり処理コストが高い。 高温・高压処理であるため設備の建設・維持にかかるコストが高い。 ④二次廃棄物発生量 処理を行うことで、処理設備の耐熱物などの二次廃棄物が発生。 ⑤事故廃棄物特有事項 (有害物、有機物等) に対する適用性 加熱処理のため、有機物等は分解できる。 密閉系であるため、揮発性核種が揮散しない。
特記事項		技術固有の課題：固化体作製時の Cs などの核種の移行率評価		

別表 10-1 国内外の HIP 固化実績^{10-1, 2)}

国名	サイト・実施主体	処理能力 (kg/h)	実績
オーストラリア	ルーカスハイツ (ANST)	10	パイロットプラントスケール
中国	—	—	化学的安定性と処理について研究
フランス	マルクール	—	2 交代勤務×15 日間≒1,700 kg 処理 ¹⁰⁻⁹⁾
日本	神戸製鋼所	—	一般産業界にて粉末材料の加圧焼結、焼結品の残留空孔の除去などに利用
ロシア	Minatom	—	パイロットプラントスケール
英国	セラフィールド (Nexia Solutions)	—	2005 年に 5 t のブルトニウム廃棄物を処理
米国	アルゴンヌ研究所	—	1997 年に商用スケール運転

参考文献

- 10-1) 株式会社神戸製鋼所ウェブサイト, <http://www.kobelco.co.jp/machinery/products/ip/technology/hip.html>.
- 10-2) IAEA, Application of Thermal Technologies for Processing of Radioactive Waste, IAEA-TECDOC-1527, 2006.
- 10-3) S. G. Johnson, *et al.*, Characterization and Durability Testing of a Glass-Bonded Ceramic Waste Form, 100th Annual Meeting of American Ceramic Society, 1998.
- 10-4) Overview of the High Level Waste (HLW) Program at the Idaho National Laboratory (INL) Site, US-DOE Environmental Management, 2008.
- 10-5) 和田隆太郎ほか, HIP 法による岩石固化体の製造, 日本原子力学会論文誌, Vol. 3, 2004, pp. 165-173.
- 10-6) 藤原啓司ほか, 放射性ヨウ素を含む廃棄物(3)HIP 法によるヨウ素固定化技術, 原子力バックエンド研究, Vol. 6 No. 1, 1999, pp. 59-62.
- 10-7) J. E. Mendel, *et al.*, Materials Characterization Center A State-of-the-Art Review of Materials Properties of Nuclear Waste Forms, PNL-3802, 1981.
- 10-8) J. L. Woolfrey, *et al.*, Accelerated Irradiation Testing of Synroc and Its Constituent Materials Using Fast Neutrons, J.Nuc.Mat 108&109, 1982, pp. 739-747.
- 10-9) A. Jouan, *et al.*, Conditioning Process for Incinerator Ashes, CEA-COCONF-11419, Treatment and Conditioning of Radioactive Incinerator Ashes, 1990.

技術No.	11	ペレット成形・圧縮固化	前処理	廃棄物を乾燥、粉体化させる必要がある ¹¹⁻¹⁾ 。
プロセス概要		廃棄物に少量のバインダを添加して、常温で加圧しペレット化する方法である。	処理能力及び処理物の性状	①処理条件 温度：150～250℃ ¹¹⁻²⁾ 圧力：177～344 MPa ¹¹⁻²⁾ （一般産業で3.9 MPa程度の例あり ¹¹⁻³⁾ ） 寸法（造粒機）：30×20×10 mm ¹¹⁻¹⁾ 寸法（スクリー押出機）：13φ×15 mm ¹¹⁻¹⁾
適用廃棄物		廃液の乾燥粉体、焼却灰、スラッジ、汚染土壌		②処理能力 減容率：1/10～1/7 ¹¹⁻¹⁾ 東京電力（福島第一、335 kg/h） ¹¹⁻⁴⁾ 日本原子力発電（東海第二、200 kg/h） ¹¹⁻⁴⁾ 、米国エネルギー省（マウンド研究所、充填率65 wt%） ¹¹⁻⁵⁾
プロセスフローまたは機器概要図				③処理物の性状 廃棄物充填量：95～190 kg ¹¹⁻⁶⁾ 圧縮強度（セメント混練固化体）：9.2～14.7 MPa ¹¹⁻⁶⁾ 固化体密度（セメント混練固化体）：0.70～1.36 t/m ³ ¹¹⁻⁶⁾ 耐放射線性：－（セメント混練固化参照） 耐熱性：－（セメント混練固化参照） 核種浸出率：1×10 ⁻⁷ g/cm ² /d (²³⁸ Pu) ¹¹⁻⁵⁾
特記事項		濃縮廃液を、乾燥機により水分を除去し乾燥させた後、造粒設備によって粒状に圧縮成型しペレット（造粒固化体）とする処理方法である。造粒機とスクリー押出し機を用いた方法がある ¹¹⁻¹⁾ 。 技術固有の課題：高圧下での反応における組成変動等の影響解明、ペレットに水分が含まれていると水素が発生する	適用性評価	①技術成熟度（実績等） 原子力産業：東京電力（福島第一） ¹¹⁻⁴⁾ 、日本原子力発電（東海第二） ¹¹⁻⁴⁾ 、マウンド研究所（米国、パイロットスケール） ^{11-2, 5)} 一般産業：水処理汚泥処理 ¹¹⁻³⁾ ②操作安全性 粉体を扱うため飛散による汚染の可能性あり。危険物の使用はなし。 ③保守性 耐圧設備の建設・維持にかかるコストが高い。 ④二次廃棄物発生量 － ⑤事故廃棄物特有事項（有害物、有機物等）に対する適用性 スラリー状廃棄物の減容化と安定貯蔵が可能である。

参考文献

- 11-1) 和達嘉樹ほか、低中レベル放射性廃棄物処理技術開発の現状、保健物理、Vol. 19, 1984, pp. 375-385.
- 11-2) L. R. Dole, OVERVIEW OF THE APPLICATIONS OF CEMENT-BASED IMMOBILIZATION TECHNOLOGIES DEVELOPED AT U. S. DOE FACILITIES, U. S. DOE CONF-850314-62, 1985.
- 11-3) 原子力機構 福島技術本部：平成 23 年度除染技術実証事業（環境省受託事業）報告書、付録 2 個別試験結果と評価詳細、2-6 株式会社 鴻池組, 2012.
- 11-4) (社)日本原子力産業会議、放射性廃棄物管理ハンドブック 1994 年版, 1994, 276p.
- 11-5) 阪田 貞弘ほか、放射性廃棄物処理処分に関する研究開発、産業技術出版, 1983, 632p.
- 11-6) (独) 原子力安全基盤機構 廃棄物燃料輸送安全部、ペレット・グラニュール固化体及びペレット固化体に係る廃棄確認方法について（改訂 2）, JNES-SS0902, 2009.

2. 雑固体廃棄物の固化技術

This is a blank page.

技術 No.	12	モルタル充填固化	前処理	適用性評価
プロセス概要		セメントが水と反応し硬化する性質を利用し、廃棄物を固化し閉じ込める技術である。		
適用廃棄物		金属、保温材、フィルタ、コンクリート片、プラスチック製品、塩化ビニル製品、土砂、溶融体、圧縮体など ¹²⁻¹⁾		セメント、混練水等を外部ミキサーで混練し、廃棄物を充填した容器（ドラム缶等）へ注入して廃棄体とする。
プロセスフローまたは機器概要図				
特記事項			国内ライセンスあり（普通ポルトランドセメント、早強ポルトランドセメント、超早強ポルトランドセメント、中庸熱ポルトランドセメント、耐硫酸塩ポルトランドセメント、高炉スラグセメント（A種、B種、C種））¹²⁻²⁾、技術固有の課題：混練時に混和材料を添加する場合がある。（詳細はセメント混練固化の別表 1-2 参照）	国内ライセンスあり（普通ポルトランドセメント、早強ポルトランドセメント、超早強ポルトランドセメント、中庸熱ポルトランドセメント、耐硫酸塩ポルトランドセメント、高炉スラグセメント（A種、B種、C種））¹²⁻²⁾、技術固有の課題：混練時に混和材料を添加する場合がある。（詳細はセメント混練固化の別表 1-2 参照）
			水素発生によって固化体が膨張して強度が低下するため、廃棄体中の水素発生物質（アルミニウムなど）は 40 wt%以下にする必要がある¹²⁻¹⁾。 セルロースが大量に含まれていると放射性物質の溶解度が上昇するため廃棄体中のセルロース量を 0.5 wt%以下にする必要がある¹²⁻¹⁾。	①処理条件 温度：常温 圧力：常圧 ②処理能力 － ③処理物の性状 圧縮強度：別表 12-1 参照¹²⁻¹⁾ 固化体密度：－ 耐放射線性：セメント混練固化参照 耐熱性：セメント混練固化参照 核種浸出率：セメント混練固化参照
			①技術成熟度（実績等） 国内外の原子力施設に対する実績多数 詳細は別表 12-2 参照 ②操作安全性 常温・常圧での操作であり、危険物も使用しないため安全性は高い。 ③保守性 加熱などの操作が不要のため、装置が簡易であり、保守性は高い。 ④二次廃棄物発生量 － ⑤事故廃棄物特有事項（有害物、有機物等）に対する適用性 －	①技術成熟度（実績等） 国内外の原子力施設に対する実績多数 詳細は別表 12-2 参照 ②操作安全性 常温・常圧での操作であり、危険物も使用しないため安全性は高い。 ③保守性 加熱などの操作が不要のため、装置が簡易であり、保守性は高い。 ④二次廃棄物発生量 － ⑤事故廃棄物特有事項（有害物、有機物等）に対する適用性 －

別表 12-1 モルタル充填固化体の一軸圧縮強度¹²⁻¹⁾

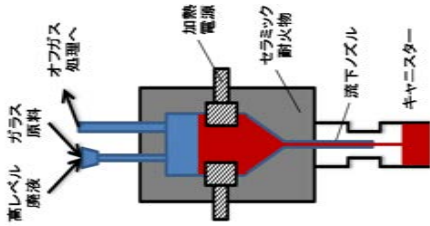
対象廃棄物	収納容器	一軸圧縮強度 (MPa)
金属類	ドラム缶	27.24
	内籠容器	29.79
プラスチック類	ドラム缶	29.40
	ドラム缶	30.97
圧縮体	ドラム缶	31.46
熔融体	ドラム缶	31.46

別表 12-2 国内外のモルタル充填固化施設^{12-2, 3, 4)}

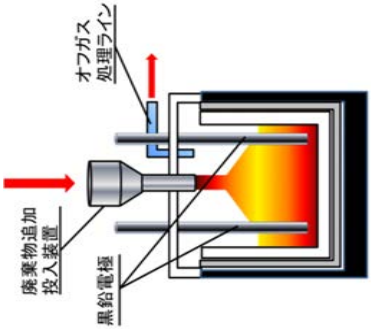
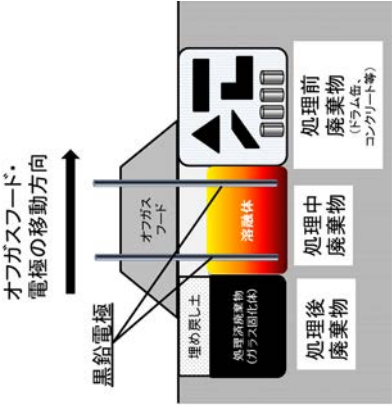
国名	サイト	対象廃棄物	プロセス	処理能力
日本	女川原子力発電所	発電所廃棄物	—	—
	福島第一原子力発電所	発電所廃棄物	—	—
	福島第二原子力発電所	発電所廃棄物	—	—
	浜岡原子力発電所	発電所廃棄物	—	—
	島根原子力発電所	発電所廃棄物	—	—
	東海第二発電所	発電所廃棄物	—	—
	敦賀発電所	発電所廃棄物	—	—
	志賀原子力発電所	発電所廃棄物	—	—
	泊発電所	発電所廃棄物	—	—
	美浜発電所	発電所廃棄物	—	—
	大飯発電所	発電所廃棄物	—	—
	伊方発電所	発電所廃棄物	—	—
	玄海原子力発電所	発電所廃棄物	—	—
	川内原子力発電所	発電所廃棄物	—	—
	東海発電所	発電所廃棄物	—	—
	COGEMA（現 AREVA）（マルクール）	固体廃棄物	—	6 m ³ /d
	ラ・アーグ	固体廃棄物	—	4 m ³ /d
フランス	ラ・マンシェ中央貯蔵施設 1 号	圧縮物	インドラム固化	20 m ³ /d
		前処理済廃棄物	充填固化	20 m ³ /d

参考文献

- 12-1) 北海道電力・東北電力・東京電力・中部電力・北陸電力・関西電力・中国電力・四国電力・九州電力・日本原子力発電, 充填固化体の標準的な製作方法 (改訂4版), 2006.
- 12-2) (独) 原子力安全基盤機構 規格基準部, 均質・均一固化体及び充填固化体の廃棄のための確認方法について (一部改正), JNES-SS0801, 2008.
- 12-3) (社) 日本原子力産業会議, 放射性廃棄物管理ガイドブック 1994 年版, 1994, 276p.
- 12-4) IAEA, Conditioning of Low- and Intermediate-Level Radioactive Wastes, Technical Reports Series No. 222, 1983.

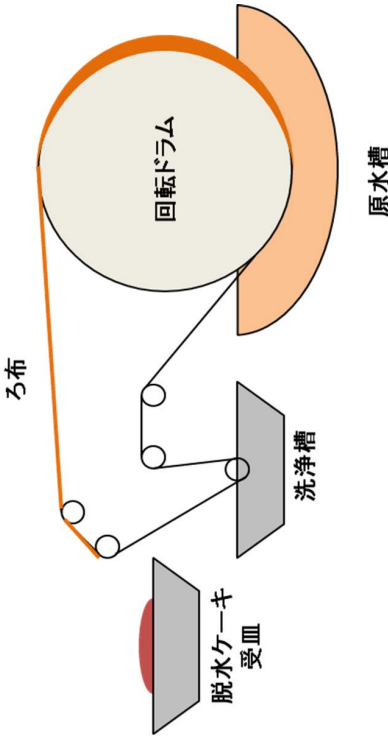
技術 No.	13	ガラス固化	前処理
プロセス概要	ガラス形成剤と廃棄物を混合して、加熱・溶融し、冷却固化する方法である。		
適用廃棄物	汚染土壌、金属、コンクリート、スラッジ		
プロセスフロー または 機器概要図 ⁶⁻¹⁾			①処理条件 温度：高レベル放射性廃液；1,100～1,250℃⁶⁻¹⁾、GCIM；>3,000℃⁶⁻²⁾ 圧力：－ ②処理物の性状 充填率：9～30 wt%⁶⁻³⁾ 処理量：高レベル放射性廃液；別表 6-2 参照⁶⁻²⁾、低レベル放射性廃棄物；25 kg/h (JHCM, GCIM)⁶⁻²⁾、10 L/30 min (PMF)⁶⁻⁴⁾ ③処理物の性状 引張強度：50 MPa⁶⁻³⁾ 固化体密度：2.5～3.0 t/m³⁶⁻³⁾ 耐放射線性：α線照射に対して体積変化率1.2%程度⁶⁻³⁾ 耐熱性：熱膨張係数；8～12×10⁻⁶ /°C⁶⁻³⁾ 核種浸出率：10⁻⁴ g/cm²/d (ソックスレー浸出試験)、1 年間浸漬で重量変化なし⁶⁻³⁾
	液体または溶融した廃棄物をガラス原料と混合し、固化する手法である。ガラス原料にはホウケイ酸系やリン酸系などがある。雑固体廃棄物へ適用するための方式として、容器内の廃棄物を添加したガラス形成材とともに溶融する GeoMelt 方式がある⁶⁻¹⁰⁾。ガラス固化方式の詳細は別表 13-1 参照。		①技術成熟度（実績等） 高レベル放射性廃液：国内外で実績多数（詳細は別表 6-2 参照^{6-1,5)}） 低レベル放射性廃棄物：国外で実績あり（詳細は別表 6-3 参照⁶⁻²⁾） ②操作安全性 高温処理のため火災等の潜在的风险が高いが、危険物の使用はなし。 ③保守性 高温処理であるため、炉壁の損傷による定期的なメンテナンスや揮発性核種を捕集するオフガス系のメンテナンスが必要となる。 ④二次廃棄物発生量 メンテナンス時に発生する炉壁材やオフガス系のフィルタなど ⑤事故廃棄物特有事項（有害物、有機物等）に対する適用性 加熱処理のため、有機物等は分解できる。
特記事項	技術固有の課題：固化体作製時の Cs などの核種の移行率評価、処理条件での NaCl 挙動		

別表 13-1 ガラス固化方式

名称	GeoMelt®式 ⁶⁻¹⁰⁾	
	容器内ガラス固化(ICV)法 ⁶⁻¹⁰⁾	地下平面その場ガラス固化(ISV)法 ⁶⁻¹⁰⁾
概要図		
説明	廃棄物を耐熱処理済みの容器に投入し、そこにガラス形成材として土等を投入する。容器内に黒鉛電極を挿入してオフガス処理状態を保ちながら通電し、ジュール熱で容器の内容物を溶融する。廃棄物を逐次追加投入し、最終的に容器内にガラス固化体を作成する。作成したガラス固化体を容器ごと、または容器から取り出して処分することを目的としている。	
実績	・セラフィールドサイト（英国：英国立原子力研究所・KURION）⁶⁻¹¹⁾ - 対象廃棄物：マグノックス燃料の模擬スラッジ、汚染土壌 ・ハンフォードサイト（米国：パシフィックノースウエスト国立研究所・AMEC）⁶⁻¹²⁾ - 対象廃棄物：低レベル廃棄物（放射性廃液）模擬物 - 処理量：6.4t/d (56 t/210 h) ・他、一般廃棄物における商業規模の実績多数⁶⁻¹³⁾。 ICV = In-Container Vittrification.	・マラリンガサイト（オーストラリア：AMEC・Geosafe）⁶⁻¹⁴⁾ - 対象廃棄物：混合超ウラン廃棄物（鉄鋼ガレキ、鉛ブロック、コンクリート板、電線、機械類、汚染土壌） - 処理量：300-600 t/ピット、11 ピット、計 5400 t （最大処理能力：100 t/d） ・他、一般廃棄物における商業規模の実績多数⁶⁻¹³⁾。
備考	・ピット内の廃棄物が爆発の恐れのある物質を含まないことを確認する必要がある。ISV = In situ Vittrification.	

3. 粉粒体・液体廃棄物の減容技術

This is a blank page.

技術 No.	14	脱水処理	前処理	脱水効率を高めるために、供給溶液の pH 調整や凝集剤の添加を行う場合がある。
プロセス概要		スラッジや凝集沈殿物と水分を分離することによって減容し、固化体化処理に適した性状とする処理方法である。		
適用廃棄物		スラッジ、凝集沈殿物		
プロセスフロー または 機器概要図 ¹⁴⁻³⁾			処理能力及び処理物の性状	①処理条件 処理方式によって異なる。 詳細は別表 14-1 参照 ^{14-1, 2, 3, 4)} ②処理能力 処理方式によって異なる。 詳細は別表 14-1 参照 ^{14-1, 2, 3, 4)} ③処理物の性状 処理方式によって異なる。 詳細は別表 14-1 参照 ^{14-1, 2, 3, 4)}
特記事項		上図は、回転真空炉による脱水処理を示したものである。回転ドラム内を減圧し、ドラム表面のろ布によって固形分と液体分を分離する。脱水処理方法には、他に、加圧ろ過、遠心分離、凍結融解などの方式があり、用途によって適したものが選択される。脱水方式の詳細については別表 14-1 参照 ^{14-1, 2, 3, 4)} 。 技術固有の課題：脱水効率を高めるために凝集剤を添加する場合がある、凝集剤の種類については別表 14-2 参照 ¹⁴⁻⁵⁾	適用性評価	①技術成熟度（実績等） 一般産業にて多数の導入実績あり。 原子力産業では一部の方式が導入されている。 詳細は別表 14-1 参照 ^{14-1, 2, 3, 4)} 。 ②操作安全性 常温での操作であり、危険物も使用しないため安全性は高い。 ③保守性 ・加圧形式や回転形式があり、定期的なメンテナンスが必要。 ・メンテナンスが自動化可能な形式も存在する。 ④二次廃棄物発生量 ろ布、回転による摩耗物、洗浄水など ⑤事故廃棄物特有事項（有害物、有機物等）に対する適用性 スラッジ、スラリー等の水分を多く含む廃棄物の減容に適用できる。

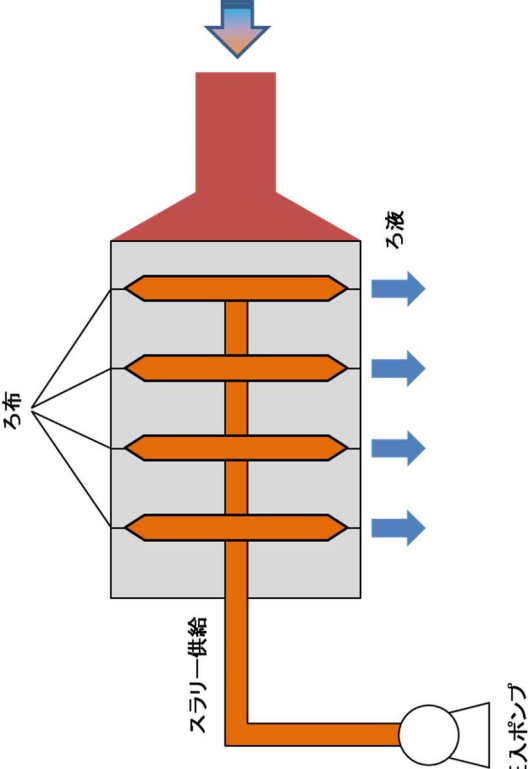
別表 14-1 脱水方式^{14-1, 2, 3, 4)}

ろ過方式	
名称	回転真空ろ過 ¹⁴⁻³⁾
概要図	
説明	ろ布や金属フィルタを備えた回転ドラム内を減圧することで、固形分をろ布等に吸着させる方式である。吸着させた固形分は、書き出し装置によって排出される。
処理物含水率	60～80 wt% (初期固形分 1～10 wt%)
実績	・一般産業にて多数の実績あり (詳細は別表 14-1 (a) 参照) - ろ過面積 : 0.5～100 m² - 供給液固形物粒子径 : 10～100 μm (推奨)
	回転ベルト上へスラリーを供給し、ベルトの下部に設置されたバキュームパン内を減圧することによって固形分を分離する手法である。
	30～70 wt%
	・ドイツ (原子力発電所) : 乾燥機能付加タイプ ・一般産業にて多数の実績あり (詳細は別表 14-1 (a) 参照) - ろ過面積 : 120 m² - 供給液固形物粒子径 : 10～100 μm (推奨)

別表 14-1 (a) 真空ろ過方式の導入実績¹⁴⁻³⁾

対象	濃度 (W/V %)	含水率 (% WetBase)	ろ過速度 (kg/m ² /h)	助剤 (% SS)
炭酸カルシウム	23	34	24	—
酸化鉄	12	49	58	—
石炭粉スラリー	29	38	100	—
医薬品スラリー	2	58	21	—
窯業原料	31	30	47	—
石膏	20	10	350	—
染料	5	72	25	—
水酸化ニッケル	9	16	140	—
ホワイトカーボン	7	85	53	—
樹脂スラリー	10	29	400	—
下水混合生汚泥	5	82	20	塩鉄 10/消石灰 30
砂利洗浄廃水	33	43	154	消石灰 7
フライアッシュ	20	27	135	—

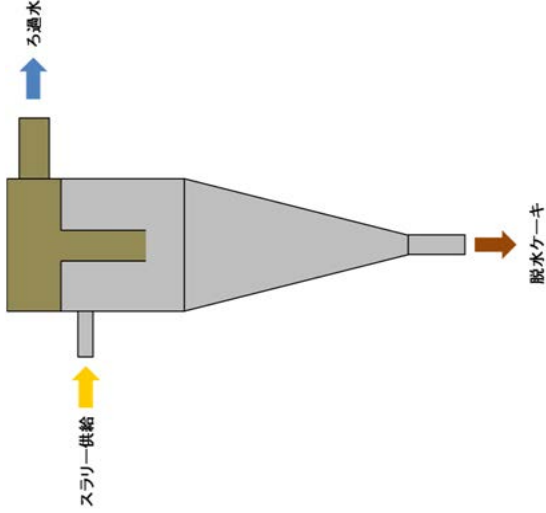
別表 14-1 脱水方式 (続き)

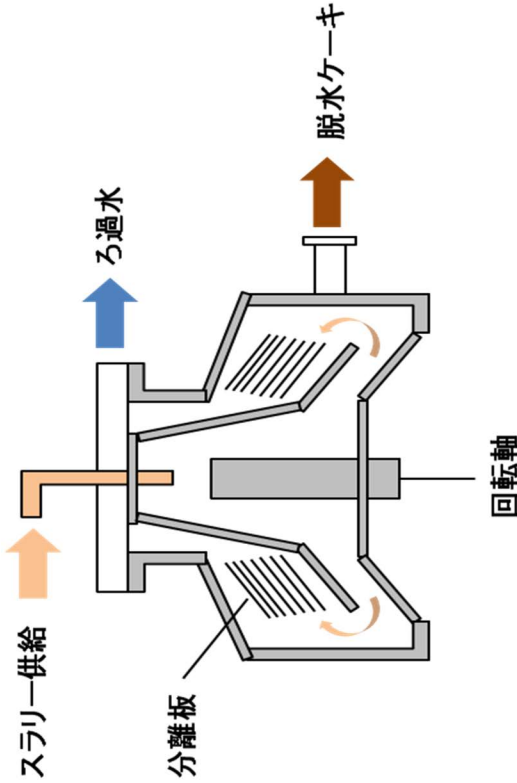
名称	ろ過方式	
	加圧ろ過	
概要図 ¹⁴⁻²⁾		
説明	スラリーをろ布の間に設置し、両側から圧力をかけ、液体成分と固体成分を分離する方法である。バッチ式と連続式がある。	
処理物 含水率	30～70 wt%	
実績	・ ドイツ (原子力発電所) : 乾燥機能付加タイプ ・ 一般産業で多数実績あり 対象 : あらゆる産業におけるスラリーの固液分離 寸法 : 170×170 mm～2,000×2,000 mm ろ過面積 : 1,190 m² (最大) 圧搾圧力 : 0.4～2.5 MPa (一般)、4～6 MPa (最大)	

別表 14-1 脱水方式（続き）

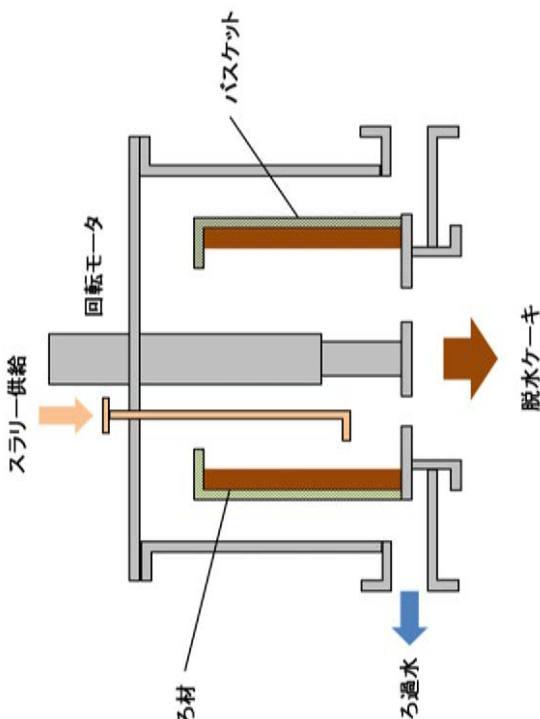
遠心沈降方式	
名称	単円筒式 (14-3)
概要図	
説明	スラリーはバスケットの回転による遠心力により固体と液体に分離され、固形分はバスケット壁面に堆積し、分離液はバスケット外部へ排出される。低速型と高速型がある。
処理物 含水率	—
実績	低速型 対象：上下水汚泥濃縮 寸法：2,200φ×2,200H mm（最大） 遠心効果：400（大型）～2,000（小型）G 高速型 対象：劣化油の清浄、血液分離、溶剤の清澄など 寸法：120φ mm（最大） 遠心効果：20,000 G（最大） 処理量：約 2 m³/h
	毎分 4,000～6,000 回転の遠心力を用いて固体と液体を分離する方式であり、脱水ケーキはスクリーコンベヤによって集積される。 10～95 wt%（初期固形分 0.01～1 wt%、処理量（スラリー）1～5 m³/h） ・米国（原子力発電所） ・英国（ハーウエル） ・一般産業 対象：汚泥の脱水、タールスラッジの分離、水-油の分離など 寸法：150～600φ mm 遠心効果：3,100～4,600 G 処理量：1～60 m³/h

別表 14-1 脱水方式（続き）

遠心方式	
名称	サイクロン式 ^{14-2,3)}
概要図	
説明	流入する液体の旋回力による分離を行う方式である。
処理物 含水率	—
実績	対象：前濃縮、分級 寸法：10～500 φ mm（円筒部） 遠心効果：— 処理量：0.1～250 m³/h

遠心方式	
名称	分離版式 ¹⁴⁻³⁾
概要図	
説明	回転体内部に円錐台状の分離版を多数（中型で100～150枚）配置したもので、単円筒では分離が不十分である場合や処理量が多い場合に使用される。
処理物 含水率	—
実績	対象：油の清浄・清澄、薬品製造、菌体の分離、クロレラやタンパクの濃縮 寸法：150～500 φ mm 遠心効果：5,000（4,000）～9,000（9,000） G（rpm） 処理量：約20 m³/h（液-液分離）、60～200 m³/h（固-液分離）

別表 14-1 脱水方式（続き）

名称	遠心方式	
	遠心ろ過	
概要図 14-3)		
説明	バスケットの回転による遠心力による沈降分離とろ材による固形分の捕捉分離を組み合わせた方式である。バッチ型（上部排出、下部排出、側部排出）、押出型、スクリーン排出型、自動排出型及び振動排出型がある。	
処理物 含水率	—	
実績	・一般産業にて多数の実績あり。 供給液固形物濃度：数%～40%（推奨） 供給液固形物粒度：30 μm 以上（推奨） 詳細は別表 14-1 (b) 参照	

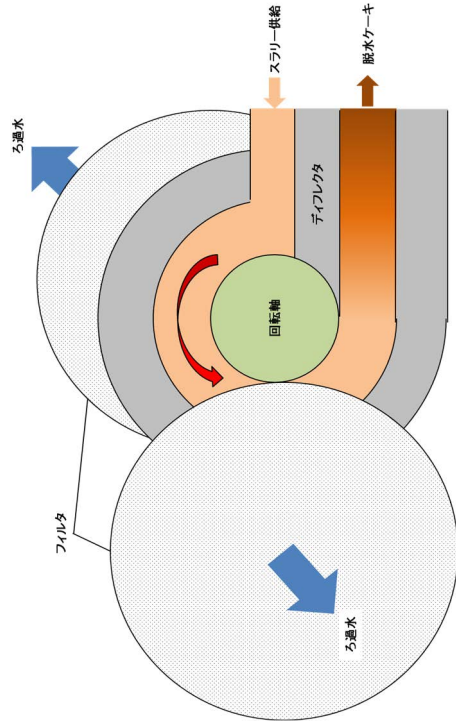
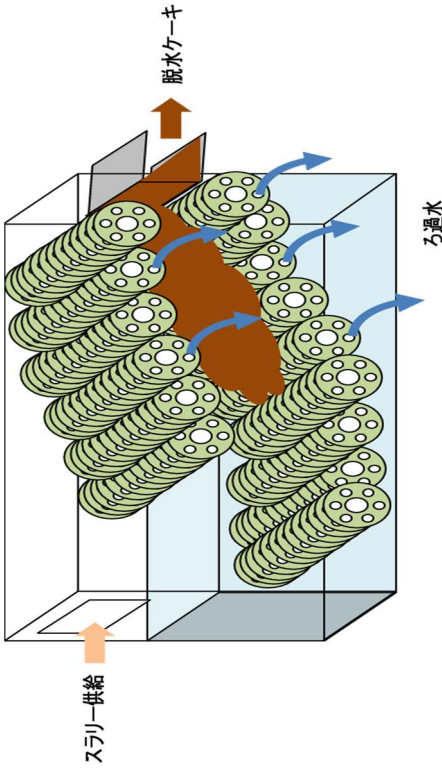
別表 14-1 (b) 遠心ろ過方式の導入実績¹⁴⁻³⁾

形式	対象	寸法 (mm)	遠心効果 G (rpm)	処理量
バッチ型	上部排出	250～2,800 φ	240～1,300 (400～3,000)	—
	下部排出	600～1,800 φ	550～800 (800～1,600)	—
	側部排出	240～2,000 φ	700～2,000	—
押出型	繊維洗浄液、化学薬品洗浄液 肥料処理、油回収、繊維・チップ脱水	200～1,400 φ	350～1,500	20 t/h (尿素処理)
スクリーパー排出型	肥料処理	200～800 φ	1,000～2,000	5～6 t/h (硫酸アンモニウム処理) 含水率：0.2～0.4 %
自動排出型	糖蜜処理	380～1,020 φ	2,000	8～13 t/h
振動排出型	石炭脱水処理	1,000～1,300 φ	100	90～110 t/h

別表 14-1 脱水方式（続き）

圧搾方式	
名称	ベルトプレス 14-2.3)
概要図	
説明	供給したスラリーは重力脱水部で遊離水を分離し、圧搾部で脱水する。
処理物 含水率	76 % 原液：濃度 2.5 %の汚泥を 15 m ³ /h で供給 高分子凝集剤（添加率 0.8 %）：粉末 3 kg/h+溶解液 1.5 m ³ /h ろ布洗浄水：21 m ³ /h
実績	・一般産業で多数の実績あり - 対象：汚泥 - 寸法：有効ろ布幅 0.5～3.0 m - 圧搾圧力：0.2～0.3 MPa - ろ布速度：0.3～3.0 m/min
スクリュープレス 14-3)	
概要図	
説明	供給したスラリーは低速回転するスクリュープにより移送され、容積変化による内部圧力の上昇により圧搾脱水する。
処理物 含水率	74～84 %
実績	・一般産業で多数の実績あり - 対象：果汁、魚肉、製紙関連の原液処理、汚泥の脱水 - 寸法：100～1,200 φ mm（スクリュープレス） - 原液供給圧力：3～50 kPa - 押圧板圧力：50～300 kPa - スクリュープ回転速度：0.1～3.0 rpm - 処理量：10～1,800 kg-Dry Solid/h

別表 14-1 脱水方式（続き）

圧搾方式	
名称	回転加圧 14-3)
概要図	
説明	外輪と内輪の間にスラリーを供給し、回転軸の回転によって圧搾脱水する手法である。外輪と内輪は2枚のフィルタによって挟まれており、ろ過水はフィルタを通して系外へ排出される。
処理物 含水率	76～81 %
実績	・一般産業で実績あり - 対象：有機汚泥の脱水 - 寸法：1,200 mm（フィルタ直径） - 原液供給圧力：約 10～100 kPa（出口では背圧板により～600 kPaの圧力が加えられる。） - 回転軸回転数：0.5～1.5 rpm - 処理量：50～120 kg/m²/h
	
	薄肉の円盤を多数組み合わせたろ過体を上下に配置し、供給されたスラリーはろ過体間を通してろ過しながら圧搾脱水される。
	75～85 % ・一般産業で実績あり - 対象：有機汚泥の脱水 - 寸法：— - ろ過回転数：0.2～1.5 rpm

別表 14-1 脱水方式（続き）

名称	凍結融解方式
概要図 ¹⁴⁻⁴⁾	スラリー貯槽 冷却/加熱媒体循環装置 凍結融解槽 脱水ケーキ
説明	コロイドを-15~-20℃で凍結させ、その後融解させることでコロイドを凝集させて回収する方式である。ろ過や遠心分離の前処理として使用される。
処理物含水率	88 wt%（初期固形分 6 wt%）
実績	・ ベルギー（モル） ・ 英国（ハーウエル）

別表 14-2 凝集剤の種類¹⁴⁻⁵⁾

大分類	小分類	物質
無機系	無機塩	硫酸アルミニウム、硫酸第一鉄、硫酸第二鉄、アルミン酸ナトリウム、塩化第二鉄、塩化亜鉛、その他
	酸	硫酸、塩酸、二酸化炭素
	アルカリ	炭酸ナトリウム、水酸化ナトリウム、水酸化カルシウム
	金属電解産物	電解水酸化アルミニウム、電解水酸化鉄
	固体微粉	カオリン、ベントナイト、酸性白土、カーボンブラック、フライアッシュ
	その他	活性ケイ酸
	陰イオン性	ラウリン酸ナトリウム、ステアリン酸ナトリウム、オレイン酸ナトリウム、ドデシルベンゼンスルホン酸ナトリウム、ロジン酸ナトリウム、その他
界面活性剤	陽イオン性	酢酸ドデシルアミン、酢酸オクタデアルアミン、酢酸ロジンアミン、オクタデシル・トリメチル塩化アンモニウム、オクタデシル・ジメチル・ベンジル塩化アンモニウム、その他
	低重合度（陰イオン性）	アルギン酸ナトリウム、CMC-Na、その他
高分子凝集剤	低重合度（陽イオン性）	水溶性アニリン樹脂塩酸塩、ポリチオ尿素酢酸塩、ポリエチレンアミノトリアゾール・ポリビニル・ベンジル・トリメチル塩化アンモニウム、その他
	低重合度（非イオン性）	デンプン、水溶性尿素樹脂、その他
	低重合度（両性）	ゼラチン、その他
	低重合度（陰イオン性）	ポリアクリル酸ナトリウム、マレイン酸共有重合物塩、ポリアクリルアミド部分加水分解物塩、その他
	低重合度（陽イオン性）	ポリエチレンイミン、ビニルピリジン共有重合物塩、その他
	低重合度（非イオン性）	ポリアクリルアミド、ポリオキシエチレン

参考文献

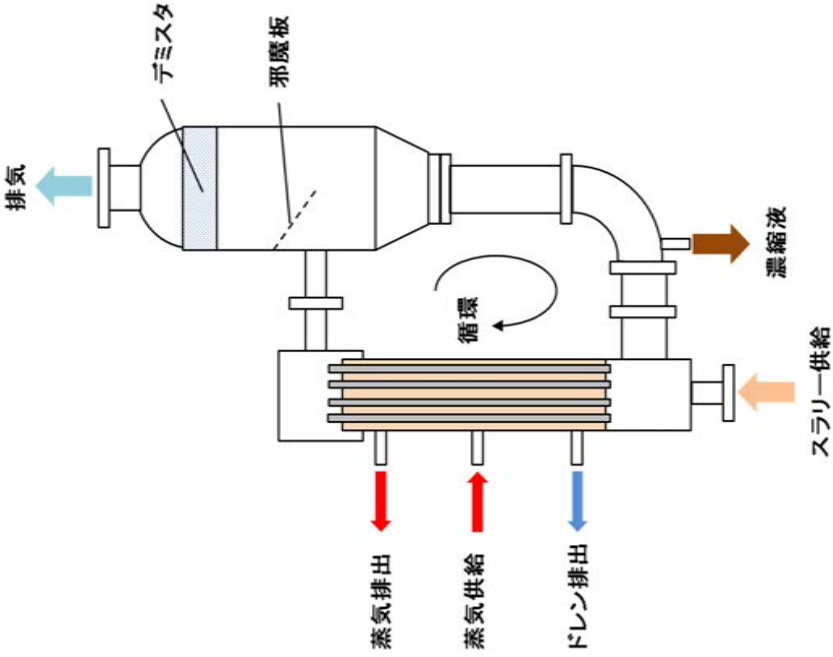
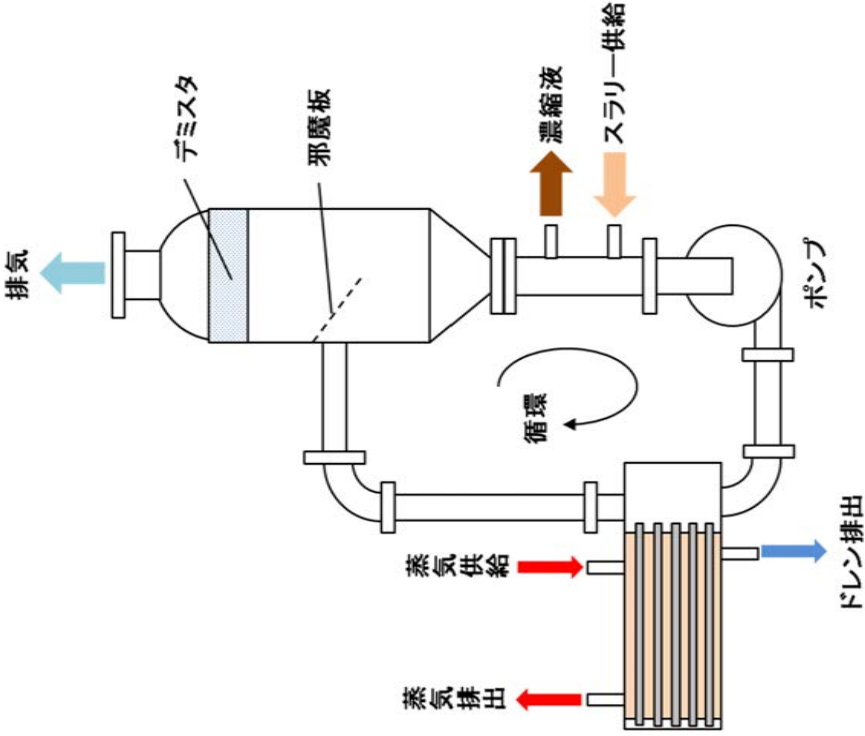
- 14-1) IAEA, Conditioning of Low- and Intermediate-Level Radioactive Wastes, Technical Reports Series No.222, 1983.
- 14-2) 分離技術会, 分離技術シリーズ14 ユーザーのための実用固液分離技術 日本液体清澄化技術工業会編, 2010.
- 14-3) 長瀬洋一, 薄井洋基, 濾過脱水・スラリー処理技術, 化学工業社, 2004.
- 14-4) 山口幹昌ほか, 省エネルギー型汚泥処理システムー凍結融脱水システムとサイホン式濾過濃縮装置ー, 富士時報 Vol. 76 No. 2, 2003, pp. 137-141.
- 14-5) 野田道宏, 高分子凝集剤の種類と作用機構, 高分子, 1968, pp. 404-412.

技術 No.	15		乾燥処理	
プロセス概要			水溶性物質や不溶性の固形物から加熱によって水分を蒸発させて減容を図る処理方法である。	乾燥処理の前に濃縮工程が入る場合がある。
適用廃棄物			スラッジ、濃縮物、イオン交換樹脂	①処理条件 各処理方式で異なる。 別表 15-2 参照 ^{15-1, 2, 3, 4)} ②処理能力 各処理方式で異なる。 詳細は別表 15-2 参照 ^{15-1, 2, 3, 4)} ③処理物の性状 含水率（乾燥）：1～5 wt%¹⁵⁻¹⁾ 除染係数：10⁴～10⁶ ¹⁵⁻¹⁾
プロセスフローまたは機器概要図 ¹⁵⁻³⁾				①技術成熟度（実績等） 国内：－ 国外：各方式について多数の導入実績あり。 詳細は別表 15-2 参照 ^{15-1, 2, 3, 4)} ②操作安全性 乾燥する場合、ダストが発生するため閉じ込め機能が必要。 ③保守性 装置腐食、錆、阻害物質の発生などの問題がある。 ④二次廃棄物発生量 － ⑤事故廃棄物特有事項（有害物、有機物等）に対する適用性 水分を多く含む除染装置のスラッジや多核種除去設備のスラリーの減容に効果があると考えられる。
特記事項			処理方式には、蒸発濃縮方式（ポット式、カランドリア式、サモサイフオン式、強制攪拌式、真空蒸発式）、薄膜蒸発方式（薄膜式、遠心薄膜式）、ドラムドライヤ方式、流動床加熱方式などがある ^{15-1, 2, 3, 4)}。上図はポット式のプロセスについて示したものである。各方式についての詳細は、別表 15-1 に示す。	適用性評価

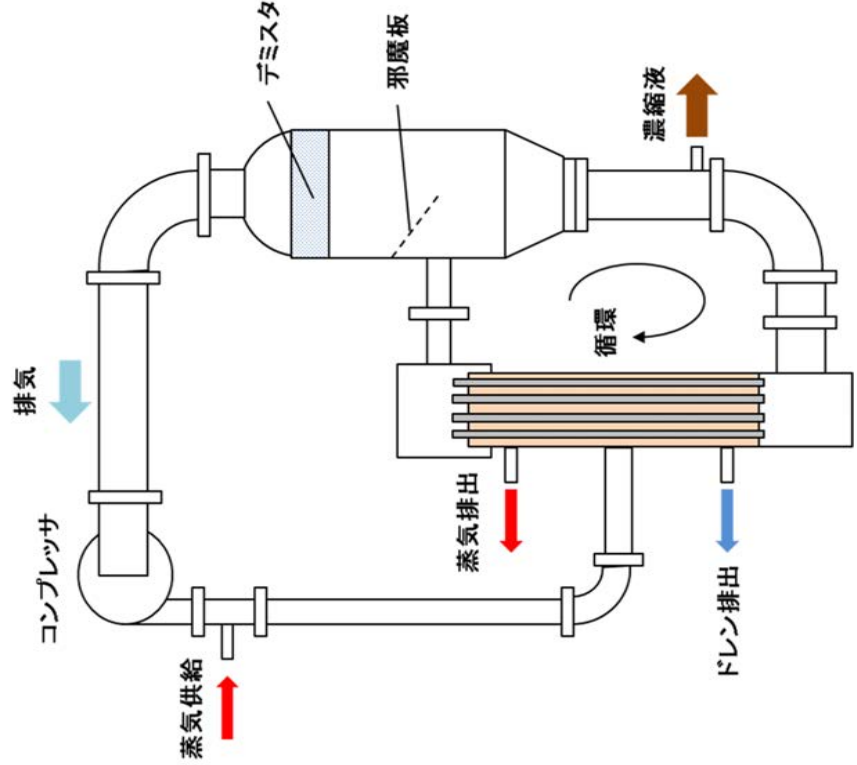
別表 15-1 乾燥方式 15-1, 2, 3, 4)

名称	蒸発濃縮方式	カランドリア式 15-3)
概要図		
説明	加熱管に蒸気を供給することによって、ポット内の液体を蒸発させる方式である。この方式は処理量が少ない場合に採用されることが多い。	容器（カランドリア）内に蒸気供給用の配管を通し、その熱によって容器内の液体を蒸発させる方式である。

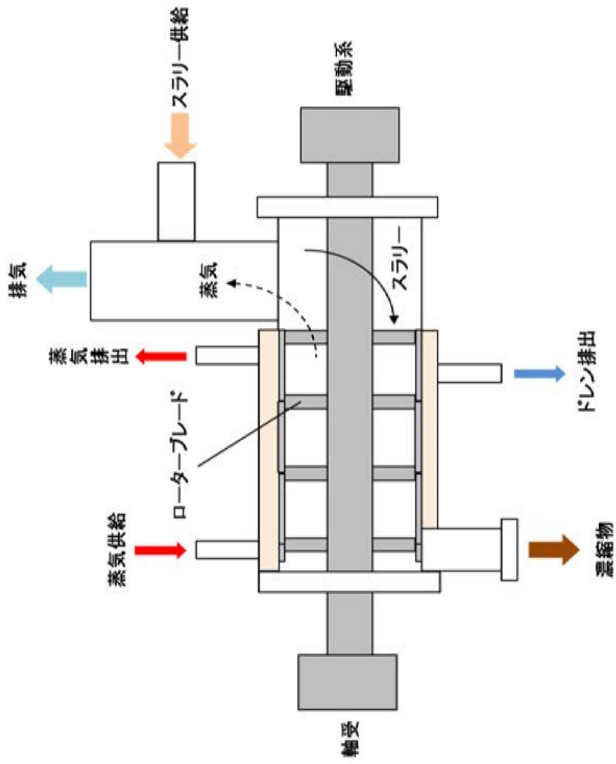
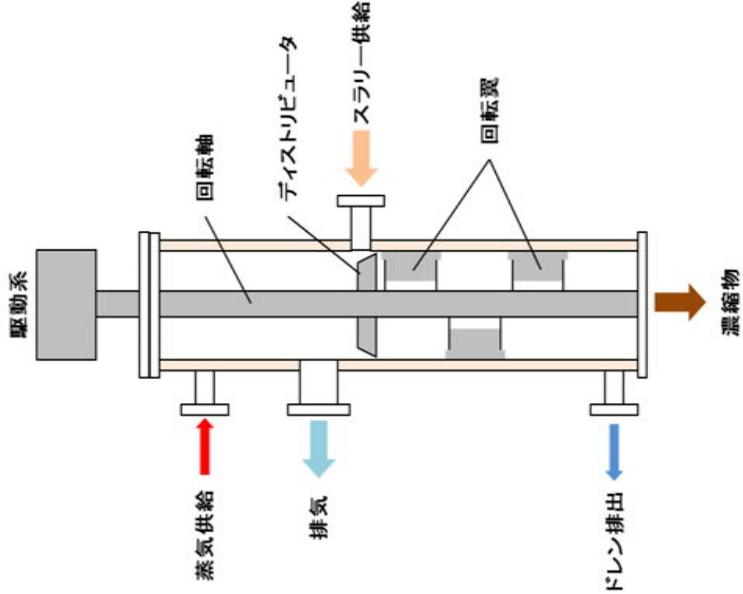
別表 15-1 乾燥方式（続き）

蒸発濃縮方式		強制循環式 ¹⁵⁻²⁾	
名称	自然循環（サーモサイフォン）式 ¹⁵⁻²⁾	強制循環式 ¹⁵⁻²⁾	
概要図			自然循環式のシステムにポンプを加えて、液体を強制的に循環させる方式である。
説明	自然循環式の多くは縦に長い加熱部分を有する。加熱配管中を液体が上昇する形式と液体を上部から供給する下降式の２種類がある。		

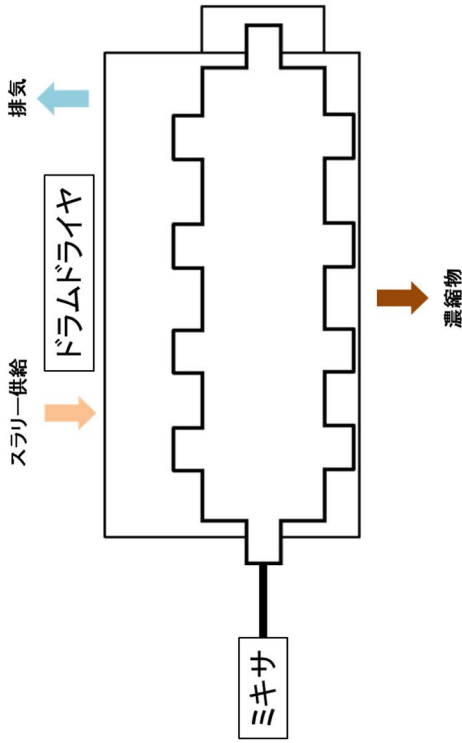
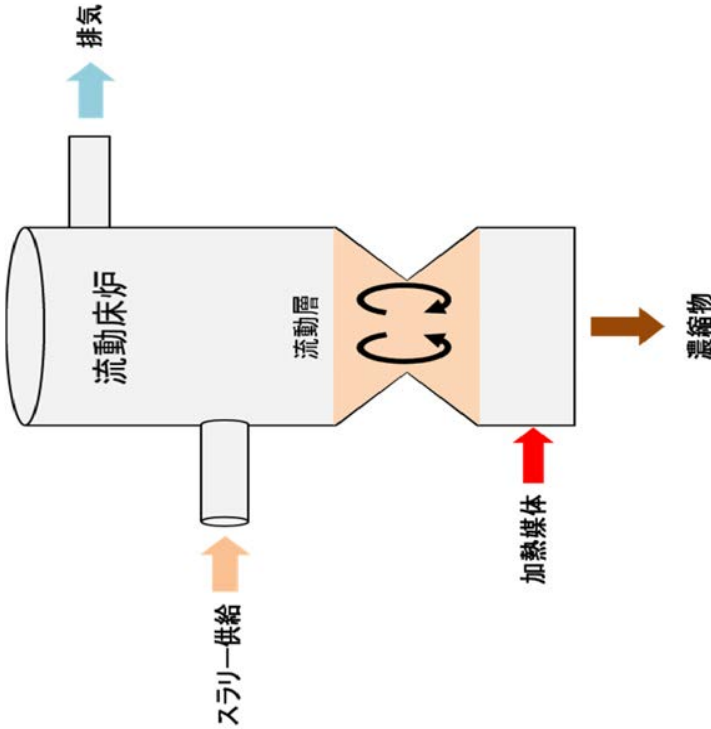
別表 15-1 脱水方式（続き）

名称	蒸気濃縮方式
	蒸気圧縮方式
概要図 ¹⁵⁻²⁾	
	加熱により発生した蒸気をコンプレッサで圧縮してもう一度液体の加熱に使用する方式である。他の蒸気濃縮方式よりも約 80% エネルギーを削減できる。
説明	

別表 15-1 乾燥方式（続き）

名称	薄膜蒸発方式	
	薄膜式 (15-2.3)	遠心薄膜式 (15-4)
概要図		
説明	供給されたスラリーは、蒸気で加熱されたジャケットと接触することによって水分が蒸発する。加熱部に付着した濃縮物はローターブレードによってそぎ落とされ、回収される。	供給したスラリーは装置壁面を伝い、蒸気で加熱されたジャケットと接触することで水分が蒸発する。壁面に付着した濃縮物は、回転軸の回転による遠心力接触する回転翼によってそぎ落とされ、回収される。

別表 15-1 乾燥方式（続き）

名称	ドラムドライヤ式 ¹⁵⁻¹⁾	流動床加熱式 ¹⁵⁻²⁾
概要図		
説明	ドラムドライヤ上部からスラリーを供給し、加熱されたミキサによって水分を蒸発させ、ドライヤ下部から濃縮物を抜き出す方式である。	流動層にスラリーを供給し、空気などの加熱媒体によって水分を蒸発させ、炉底部から濃縮物を抜き出す方式である。

別表 15-2 国外の蒸発濃縮装置の導入実績^{15-1, 2, 3, 4)}

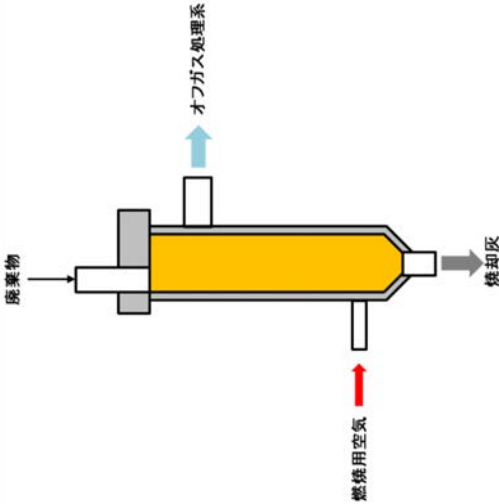
国名	サイト	蒸発形式	対象廃棄物	処理条件	処理能力 (m ³ /h)	除染係数	減容比
フィンランド	ロビーサ原子力発電所	堅型自然循環	汚水、再生廃液、 除染廃液	常圧	6	10 ⁵	200
フランス	カダラッシュ	堅型自然循環	液体廃棄物	常圧	1～2	10 ⁵	—
	フォントネ・オ・ローズ サクレ						
デンマーク	リソ	堅型強制循環	有機物含有廃液	常圧	2	10 ⁵	160
ドイツ	ユーリッヒ	堅型強制循環 (2段)	研究廃液+洗濯廃液 0.1～3 g-塩/L	常圧	5(1段目) 2(2段目)	10 ⁵ (1段目) 5×10 ⁴ (2段目)	400 (1段目) 200 (2段目)
		堅型自然循環	中レベル液体廃棄物 50 g-塩/L	常圧	～1	10 ⁵	10～20
	カールスルーエ	堅型強制循環	低レベル液体廃棄物 3 g-塩/L	常圧	4.5	10 ⁵	100～200
		堅型強制循環 (2段)	液体廃棄物	常圧	2	10 ⁶ ～10 ⁷	—
	ネッカーヴェストハイム 原子力発電所	堅型自然循環	1 g-塩/L	常圧	2	2×10 ⁴	200～500
	ビュルガッセン 原子力発電所	堅型自然循環	研究廃液・除染廃液 5 g-塩/L	常圧	3.6	10 ² ～10 ³	500 (改修時 100～200)
	ニューケム	堅型強制循環	低・中レベル濃縮物 35%固形物	真空	0.05～ 0.5	—	—

別表 15-2 国外の蒸発濃縮装置の導入実績（続き）

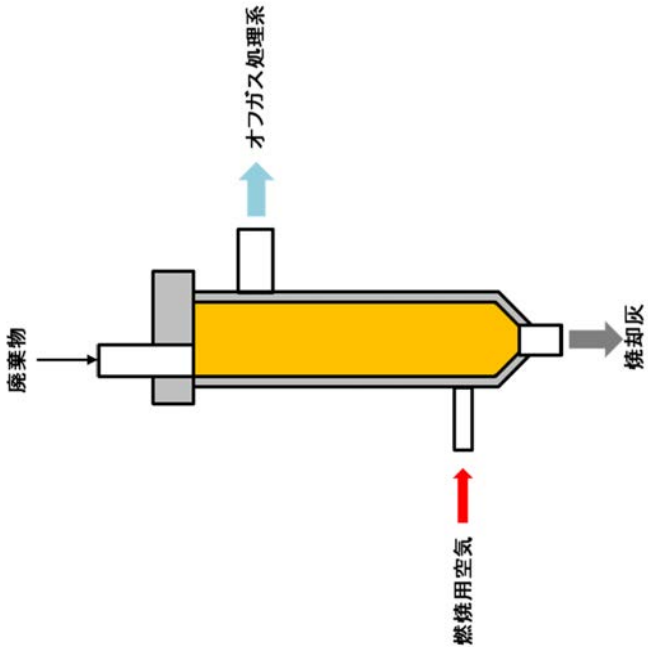
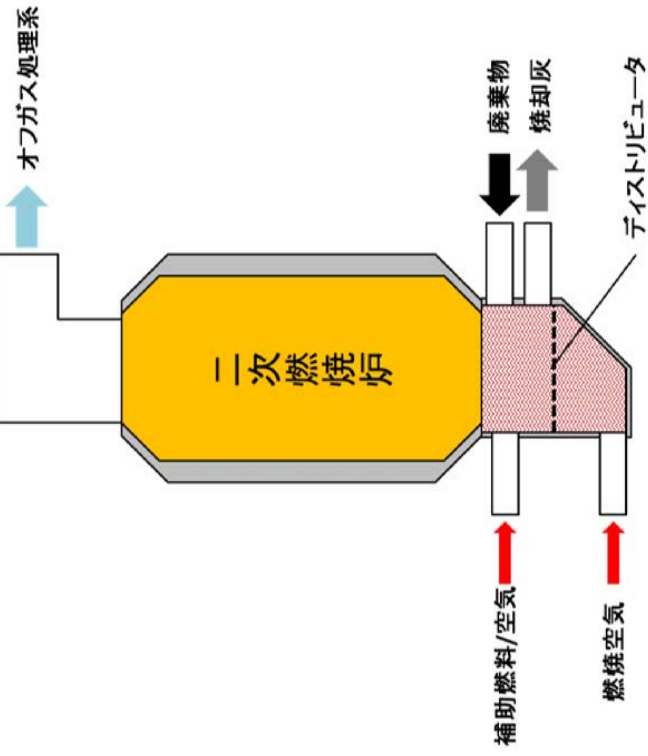
国名	サイト	蒸発形式	対象廃棄物	処理条件	処理能力 (m ³ /h)	除染係数	減容比
スイス	ガスゲン原子力発電所	縦型自然循環	研究所・洗濯ドレン排水	常圧	8	10 ⁵	300
英国	ウィンズケール	縦型自然循環	2N 硝酸+25,000 ppm	—	1	4 × 10 ² ~ 4 × 10 ⁴	100
		横型自然循環	0.3 M NaNO ₃ +0.02 NaOH	—	2.3	10 ⁶ ~ 10 ⁷	—
	ライムリック原子力発電所	横型強制循環	樹脂再生廃液、洗濯ドレン排水、除染廃液	—	4.1	10 ⁴ ~ 10 ⁵	—
	ポイントビーチ原子力発電所	横型強制循環	再生廃液、研究所ドレン排水、高固形分	微加圧 (0.2 MPa)	7.6	10 ⁴	—

参考文献

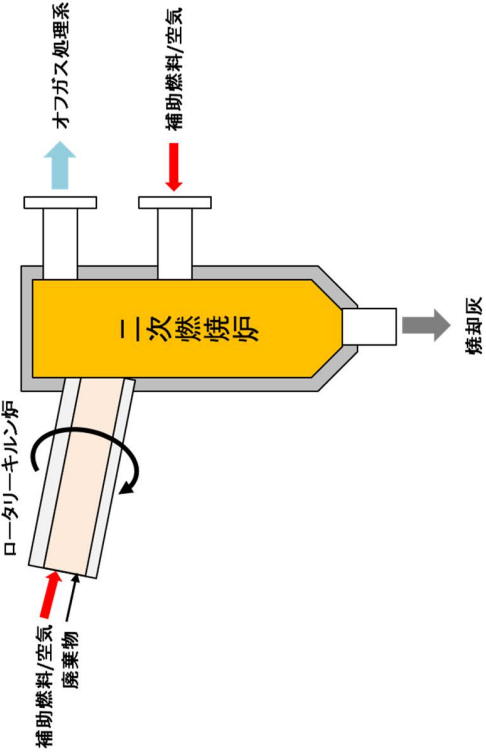
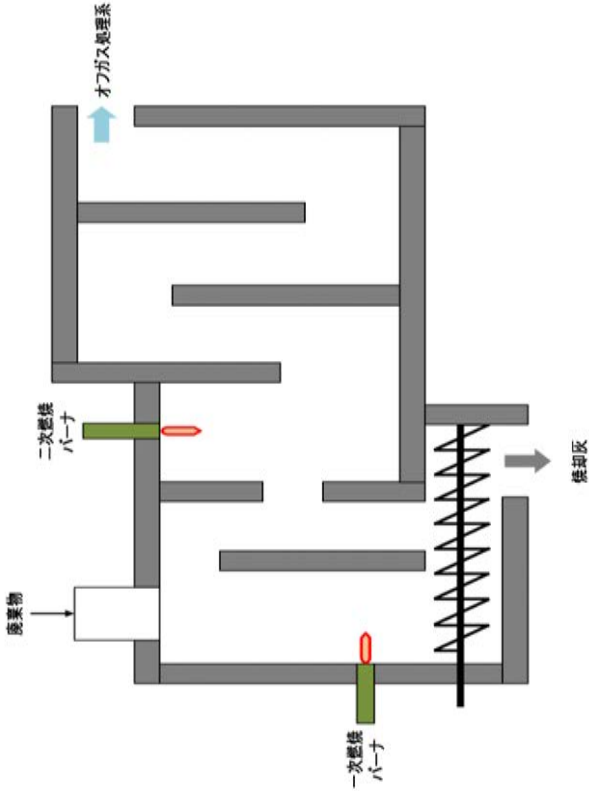
- 15-1) IAEA, Conditioning of Low- and Intermediate-Level Radioactive Wastes, Technical Reports Series No.222, 1983.
- 15-2) H. W. Godbee, Use of Evaporation for the Treatment of Liquids in the Nuclear Industry, ORNL-4790, 1973.
- 15-3) IAEA, Treatment of Low- and Intermediate-Level Liquid Radioactive Wastes, Technical Reports Series No.236, 1984.
- 15-4) 千野耕一ほか, 遠心薄膜蒸発器の粉末化性能, (I) 溶液の乾燥粉末化, 日本原子力学会誌 Vol.25, No.1, 1983, pp.69-75.

技術 No.	16	焼却処理	前処理	処理時に関与する物（スプレー缶や水分を多く含むもの）は予め取り除いておく必要がある。
プロセス概要	廃棄物を高温で燃焼させることによって減容するほか、有機物を分解する手法である。			
適用廃棄物	スラリー、廃油、廃溶媒、廃活性炭、廃樹脂			
プロセスフロー または 機器概要図 ¹⁶⁻¹⁾			処理能力及び処理物の性状	①処理条件 ・過剰空気燃焼方式 - 温度：800～1,100℃ ¹⁶⁻²⁾ - 空気比：2～3 ¹⁶⁻¹⁾ ・抑制空気燃焼方式 - 温度：600～800℃（一次燃焼）、1,000～1,200℃（二次燃焼） ¹⁶⁻²⁾ - 空気比：1.2～1.3 ¹⁶⁻¹⁾ ②処理能力 ・過剰空気燃焼方式 - 炉形式によって異なる。詳細は別表 16-1 参照 ・抑制空気燃焼方式 - 炉形式によって異なる。詳細は別表 16-1 参照 ③処理物の性状 無機物（焼却灰、炭化物等）
	焼却処理は、完全燃焼に必要な空気量に対する実際の空気量の割合によって過剰空気燃焼方式と抑制空気燃焼方式に分類される。粉粒体・液体廃棄物に対しては、過剰空気燃焼方式には、堅型円筒炉、流動床炉などがあり、抑制空気燃焼方式にはロータリーキルン炉、横型多段室炉（シルバ炉、セントロコ炉）などがある ^{16-1, 2)}。上図は、堅型円筒焼却炉の概要を示したものである。各炉式の詳細については、別表 16-1 に示す。		適用性評価	①技術成熟度（実績等） 国内外で実績多数。詳細は別表 16-1, 2 参照 ②操作安全性 高温処理のため、火災などの潜在的风险が高いが、危険物使用なし。 ③保守性 加熱するため燃料費などがかなり処理コストが高い。耐火物など設備の建設・維持にかかるコストが高い。 ④二次廃棄物発生量 処理設備の耐火物などの二次廃棄物が発生 ⑤事故廃棄物特有事項（有害物、有機物等）に対する適用性 加熱処理のため、有機物等は分解できる。
	技術固有の課題：固化体作製時の Cs などの核種の移行率評価、処理条件での NaCl 挙動の確認（残存する海水成分のプロセスに及ぼす影響の確認が必要）			
特記事項				

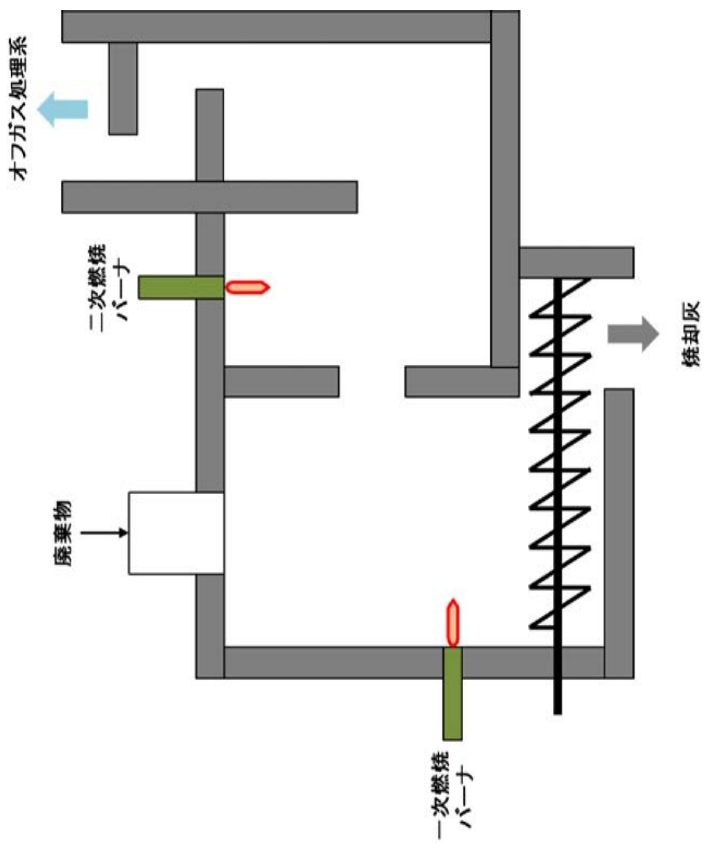
別表 16-1 焼却方式 ^{16-1, 2)}

名称	過剰空気燃焼方式	流動床炉 ¹⁶⁻²⁾
概要図		
説明	固定式の炉底上で廃棄物を燃焼させ、炉が停止した後に炉床を反転して焼却灰を排出する手法である。	廃棄物と燃焼空気を流動材中（砂やアルミナなど）へ導入して、廃棄物のガス化・燃焼を行い、未燃ガスは二次燃焼炉で完全燃焼させる方式である。
実績	・ ドイツ（カールスルーエ） ¹⁶⁻²⁾ - 対象： 固体・液体廃棄物 - 温度： 約 800～1,100℃ - 処理量： 150～200 kg/h まで可能	・ 米国（ロッキーフラッツ） ^{16-2, 3)} - 処理量： 80 kg/h ・ 米国（サインマイル[®] イント、バイロン、ブレイドウッド、マクガイア） ¹⁶⁻³⁾ - 処理量： 92 kg/h

別表 16-1 焼却方式（続き）

抑制空気焼却方式			
名称	ロータリーキルン炉 16-2)	横型多段室炉（シルババ） 16-1, 4)	
概要図			
説明	廃棄物をキルン内でガス化・燃焼し、未燃ガスや排ガスを二次燃焼炉へ導入して残留有機成分を完全燃焼させる方式である。液体から大型固体廃棄物まで幅広い性状の廃棄物へ適用できる。	二次燃焼バーナーより後段には炉室が多数配置されており、ガスの滞留時間を確保して未燃ガスを完全燃焼させる方式である。	
実績	・米国（ロッキーフラッツ、アイダホ研究所）^{16-2, 3)} - 処理量：40 kg/h ・米国（オークリッジ研究所）¹⁶⁻²⁾ - 対象：PCB、ウラン含有廃棄物	・ベルギー（シルババ処理施設）^{16-1, 4)} - 対象：固体、液体、イオン交換樹脂（PVC 含有率；平均 3%） - 温度：900～950℃（一次燃焼）、1,050℃（二次燃焼） - 処理量：固体 80～100 kg/h、液体 50 kg/h	

別表 16-1 焼却方式（続き）

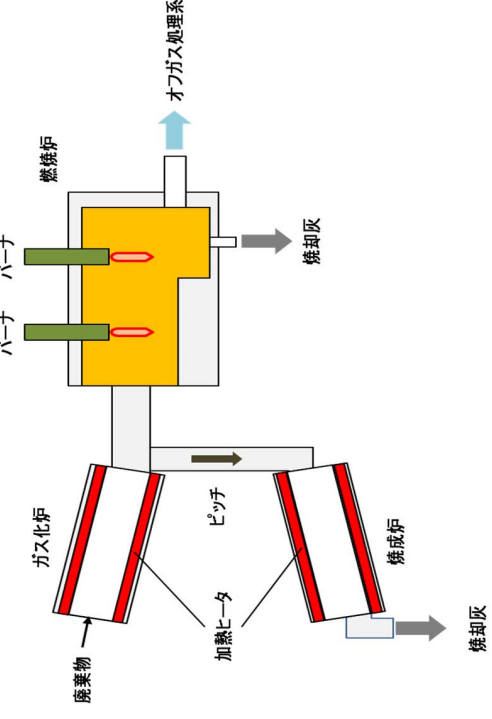
名称	抑制空気燃焼方式 横型多段室炉（セントロコ炉）	
概要図 ¹⁶⁻⁴⁾		
説明	二次燃焼炉の炉室の配置が異なる他は、基本的な構造はシルバ炉と同様である。	
実績	・フランス（セントロコ廃棄物処理施設）^{16-1, 4)} - 対象：発電所可燃物（塩化物含有率<5%、硫黄含有率<1%） - 温度：900～950℃（一次燃焼）、1,050℃（二次燃焼） - 処理量：固体 620 kg/h、液体 300 kg/h	

別表 16-2 国外の粉粒体・液体廃棄物焼却炉導入実績 ^{16-2, 4)}

国名	サイト	炉形式	対象物	処理能力
フランス	カダラッシュ	横型炉	液体、有機塩素系及び有機リン系廃棄物	50 L/h
イタリア	イスプラ	液中燃焼炉	有機廃液	25 L/h
オランダ	コブラ	—	液体廃棄物、動物屍体	60 kg/h Solid 40 L/h Liquid
ロシア	ラドン	—	—	100 kg/h Solid 20 L/h Liquid
スロバキア	ボフニチェ原子力発電所	—	—	50 kg/h Solid 10 kg/h Liquid
スペイン	エル・ガブリエル処分場	—	—	50 kg/h Solid 50 kg/h Liquid
ウクライナ	ザポリージャ原子力発電所	—	—	40 kg/h Solid 20 kg/h Liquid
米国	サバンナリバー	—	Purex 廃溶媒、低レベル混合廃棄物	400 kg/h Solid 450 kg/h Liquid

参考文献

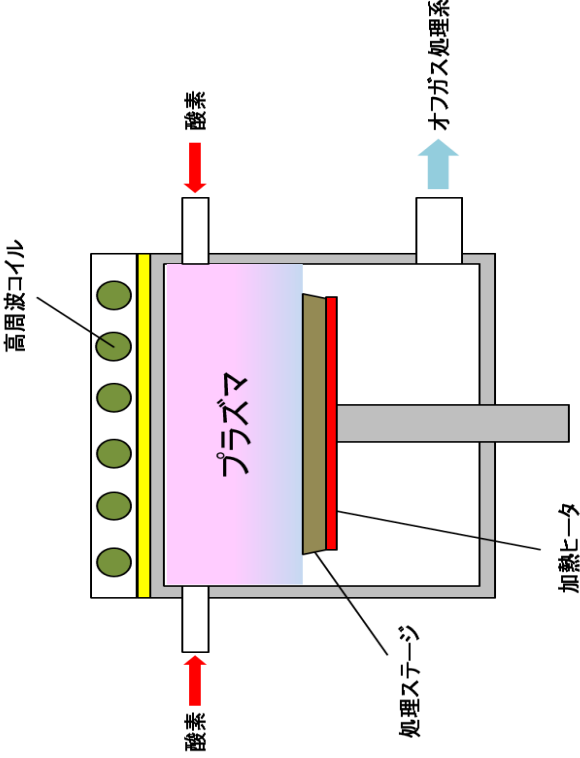
- 16-1) 中山準平, 杉本雅彦, 放射性固体廃棄物処理プロセスの調査 調査報告書, JNC-TJ 8420 2000-007, 1999, 104p.
- 16-2) IAEA, Status of Technology for Volume Reduction and Treatment of Low and Intermediate Level Solid Radioactive Waste, Technical Reports Series No.360, 1994.
- 16-3) IAEA, Treatment of Low- and Intermediate-Level Solid Radioactive Wastes, Technical Reports Series No.223, 1983.
- 16-4) IAEA, Application of Thermal Technologies for Processing of Radioactive Waste, IAEA-TECDOC-1527, 2006.

技術 No.	17	ガス化処理	前処理	処理時に問題となる物（スプレー缶や水分を多く含むもの）は予め取り除いておく必要がある。
プロセス概要		空気を遮断した状態で廃棄物を加熱し、ガス化・減容する手法である。		
適用廃棄物		廃油、廃溶媒、廃活性炭、廃樹脂		
プロセスフロー または 機器概要図 ^{17-1, 4)}			処理能力及び処理物の性状	①処理条件 温度：500～600℃¹⁷⁻⁴⁾ 空気比：0.5 程度¹⁷⁻¹⁾ ②処理能力 各方式によって異なる。 詳細は別表 17-1 参照 ③処理物の性状 無機物（ピッチ、タール等）
		ガス化処理方式は、加熱することにより廃棄物をガス化・分解する手法である。熱分解方式として独立 3 室炉 (Valdug 炉)¹⁷⁻¹⁾、ペブルベッド反応炉 (Nukem 炉)¹⁷⁻²⁾、減圧酸素プラズマ炉¹⁷⁻³⁾、熱分解ガス化焼却炉¹⁷⁻¹⁾などがある。また、水蒸気改質方式として流動床式¹⁷⁻⁴⁾、スクリーフフィーダ式¹⁷⁻⁵⁾がある。上図は独立 3 室炉の概要を示したものである。各方式の詳細については、別表 17-1 参照。	適用性評価	①技術成熟度（実績等） 国内外で実績多数 詳細は別表 17-1 参照 ②操作安全性 可燃性ガスが滞留しやすいため、爆燃対策が必要となる。 ③保守性 加熱するため燃料費などがかなり処理コストが高い。 耐火物など設備の建設・維持にかかるコストが高い。 ④二次廃棄物発生量 処理設備の耐火物など難処理の二次廃棄物が発生 ⑤事故廃棄物特有事項（有害物、有機物等）に対する適用性 加熱処理のため、有機物等は分解できる。
特記事項		技術固有の課題：固化体作製時の Cs などの核種の移行率評価、処理条件での NaCl 挙動の確認（残存する海水成分のプロセスに及ぼす影響の確認が必要）		

別表 17-1 ガス化方式

熱分解方式	
名称	ペブルベッド反応炉 (Nukem 炉) ¹⁷⁻²⁾
概要図	廃棄物を水酸化カルシウムや水酸化マグネシウムのペブル（丸石）が充填された反応炉へ導入し、ガス化・分解を行う手法である。 ・ドイツ（ニューケム）¹⁷⁻²⁾ - 対象：TBP 廃溶媒、イオン交換樹脂 - 温度：400～600℃（熱分解） 900～1,100℃（二次燃焼（酸素濃度<6%）） - 処理量：15～30 kg/h（TBP）、30～50 kg/h（イオン交換樹脂） - 減容率：約 45%（TBP）、約 75%（イオン交換樹脂）
説明	廃棄物をガス化する炉、未燃ガスを完全燃焼させる炉及び残渣に未燃成分を燃焼させる炉の独立した3炉を用いる手法である。
実績	・フランス（ヴァルドック）¹⁷⁻¹⁾ - 対象：α 廃棄物（PVC、ゴム類、セルロース、ポリエチレン） - 温度：550℃（窒素雰囲気熱分解）、900～1,000℃（二次燃焼） - 処理量：7 kg/h

別表 17-1 ガス化方式（続き）

名称	熱分解方式 減圧酸素プラズマ	
概要図 ¹⁷⁻³⁾		
説明	廃棄物を処理ステージ上で加熱してガス化し、処理ステージ上部に発生させた酸素プラズマによって発生ガスを酸化分解させる手法である。	
実績	・日本（富士電機）¹⁷⁻³⁾ - 対象：イオン交換樹脂 - 温度：400℃（熱分解）、700℃（酸化分解） - 減容比：約 20 - 装置サイズ：口径約φ750 mm	

別表 17-1 ガス化方式（続き）

名称	水蒸気改質方式	
	流動床式 ¹⁷⁻⁴⁾	スクリーフィーダ式 ¹⁷⁻⁵⁾
概要図		
説明	廃棄物と過熱水蒸気を流動材中（砂やアルミナなど）へ導入し、廃棄物のガス化・ガス改質を行い、改質ガスは二次燃焼炉で完全燃焼させ、残渣は流動材と同時に回収する手法である。	
実績	・ 米国（アーウイン）¹⁷⁻⁴⁾ 対象：イオン交換樹脂 処理量：0.25 kg/h 減容比：70（減重率：30）	・ 日本（JAEA 東海）¹⁷⁻⁵⁾ 対象：TBP 廃溶媒 温度：750℃（最高使用温度） 処理量：3 kg/h ガス化率：99.6%

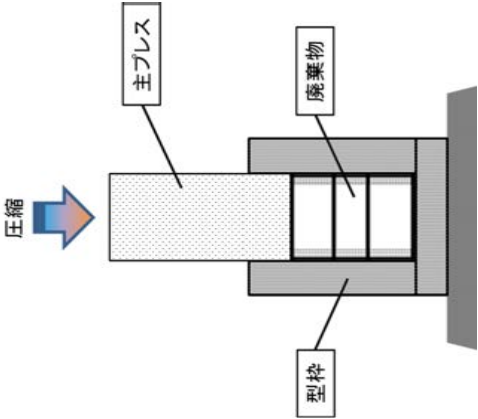
参考文献

- 17-1) 中山準平, 杉本雅彦, 放射性固体廃棄物処理プロセスの調査 調査報告書, JNC-TJ 8420 2000-007, 1999, 104p.
- 17-2) Pyrolysis of Radioactive Organic Waste, NUKEM Technologies GmbH, 2007.
- 17-3) 藤沢盛夫ほか, 放射性廃棄物処理・処分技術, 富士時報 Vol. 76, No. 6, 2003, pp. 345-352.
- 17-4) IAEA, Application of Thermal Technologies for Processing of Radioactive Waste, IAEA-TECDOC-1527, 2006.
- 17-5) 中川明憲ほか, 水蒸気改質処理法によるウランで汚染された廃 TBP/n-ドデカン処理技術開発, JAEA-Technology 2010-014, 2010, 46p.

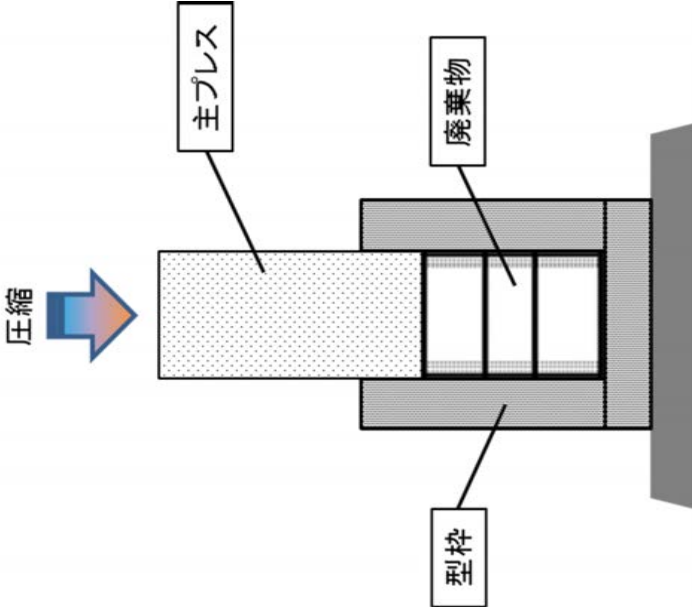
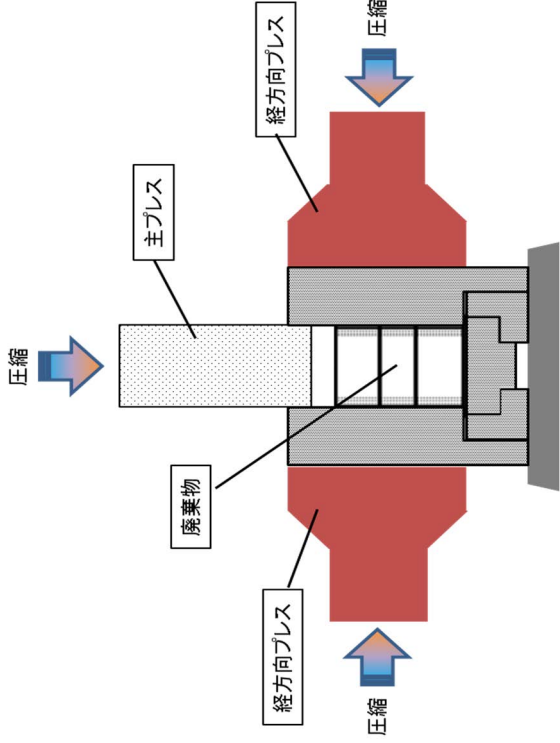
This is a blank page.

4. 雑固体廃棄物の減容技術

This is a blank page.

技術 No.	18	圧縮処理	前処理	
	プロセス概要	圧縮装置を用いて乾燥した固体廃棄物（主に廃棄物を収納したドラム缶）を圧縮減容する処理方法である。		—
	適用廃棄物	金属類、非金属類（塩化ビニル類、プラスチック類、ゴム類、保温材類、フィルタ類） ¹⁸⁻¹⁾		
	プロセスフローまたは機器概要図 ^{18-1, 3)}		処理能力及び処理物の性状	①処理条件 温度：常温 圧力：低圧圧縮：1,000 t 以下、高圧圧縮：1,000 t 超¹⁸⁻⁵⁾ ②処理能力 減容率： 低圧圧縮：2～5¹⁸⁻⁵⁾ 高圧圧縮：5～10¹⁸⁻⁶⁾ ③処理物の性状 圧縮強度：30.97 MPa（モルタル充填固化体）¹⁸⁻⁷⁾ 固化体密度：— 耐放射線性：技術 No. 12 モルタル充填固化参照 耐熱性：技術 No. 12 モルタル充填固化参照 核種浸出率：技術 No. 12 モルタル充填固化参照 ①技術成熟度（実績等） 国内外の原子力施設に対する実績多数 詳細は別表 18-2 参照^{18-2, 3, 4, 5, 6, 8)} ②操作安全性 常温で操作可能であり、オフガスの発生もない。 ③保守性 設備費及び運転費が安価 ④二次廃棄物発生量 ほとんど発生しない。 ⑤事故廃棄物特有事項（有害物、有機物等）に対する適用性 可燃、難燃、不燃のいずれの廃棄物にも適用可能。
	特記事項	圧縮装置は、圧縮方式の違いにより一軸油圧式圧縮^{18-2, 3)}及び三軸油圧式圧縮¹⁸⁻⁴⁾に分類される。上図は一軸圧縮装置の概要を示したものである。圧縮方式の詳細については別表 18-1 参照。 技術固有の課題：放射能濃度測定（推定）方法の確立が必要、有害物質の安定化方法の確立が必要。	適用性評価	

別表 18-1 圧縮方式 18-2, 3, 4)

名称	一軸油圧圧縮 18-1, 3)	三軸油圧圧縮 18-4)
概要図		
説明	特殊な金型を用いてドラム缶の径方向を圧縮し、その後 1,000 t 以上の圧縮力でドラム缶の軸方向を圧縮して、廃棄物を減容する。	ドラム缶の径方向に対して、成形圧縮処理（一軸目）及び縮径圧縮処理（二軸目）を連続的に行い、径方向を圧縮する。その後、成形圧縮と縮径圧縮をかけた状態で 1,000 t 以上の垂直圧縮力でドラム缶の軸方向の圧縮を行い、廃棄物を減容する。
国内実績	東京電力（福島第一） 四国電力（伊方）	JAEA（東海 高減容）

別表 18-2 国内外の圧縮処理施設 18-2.3.4.5.6.8)

国名	サイト	対象廃棄物	圧縮加重		減容率	処理量	圧縮対象物
			t	MPa			
オーストリア	ザイベルスドルフ	—	100	—	4~6	—	100 L ドラム缶
							200 L ドラム缶
ベルギー	—	低レベル、 β γ	1,500	—	—	—	—
	シルバ	低レベル、 β γ	2,000	—	—	—	—
	モル	モルタル充填固化体	—	—	2	—	—
カナダ	ブルース	—	—	0.45	4~5	—	—
		—	—	0.85	9	4,000 m ³ /y	—
フランス	マルクール	—	60	3	4	15,000 m ³	100 L ドラム缶
	ラ・マンシェ	—	400	3	3~5	5,000 m ³	100 L ドラム缶
	カダラッシュ	—	250	4	4	1,000 m ³	100 L ドラム缶
		β γ	1,000	—	—	—	—
	ラ・アーグ	β γ	1,500	—	—	—	—
	スレーヌ	—	1,500	—	—	—	—

別表 18-2 国内外の圧縮処理施設 18-2.3.4.5.6.8) (続き)

国名	サイト	対象廃棄物	圧縮加重		減容率	処理量	圧縮対象物
			t	MPa			
ドイツ	カールスルーエ	—	300	15	4	120 m³/y	200 L ドラム缶
		低レベル、β γ	1,500	—	—	—	—
	ブルンスビュッテル	低レベル、β γ	2,000	—	—	—	—
	ユーリッヒ	低レベル、β γ	1,500	—	—	—	—
インド	カールシュタイン	焼却灰	1,500	—	—	—	—
	トロンベイ	—	5	—	5	—	—
イタリア	イスプラ	—	50	7.1	5	—	50 L ドラム缶
	ピサ	—	20	—	4	—	580 L ドラム缶
	カサツチア	低レベル、β γ	1,500	—	—	—	—
		低レベル、β γ	2,000	—	—	—	—

別表 18-2 国内外の圧縮処理施設 18-2, 3, 4, 5, 6, 8) (続き)

国名	サイト	対象廃棄物	圧縮加重		減容率	処理量	圧縮対象物
			t	MPa			
日本	福島第一	低レベル	1,000	30	—	—	200 L ドラム缶
	伊方	低レベル	1,500	30	—	—	155 L ドラム缶
		—	200	—	—	—	—
	泊	—	200	—	—	—	—
	敦賀	—	200	—	—	—	—
	高浜	—	200	—	—	—	—
	大飯	—	200	—	—	—	—
	川内	—	200	—	—	—	—
	JAEA 東海 高減容	金属	2,000	—	—	50 drums/d	200 L ドラム缶
	JAEA 東海 原科研	—	—	—	5	—	—
オランダ	ペッテン	—	90	5.6	3	5 m³/h	100 L ドラム缶 200 L ドラム缶
		低レベル、β γ (モルタル充填固化体)	1,500	80	10 (5)	2.5 m³/h	100 L ドラム缶
ノルウェー	ケーラー	—	5	0.2	5	—	200 L ドラム缶
南アフリカ	ペリンダバ	—	6	0.45	—	—	—
スイス	ビューレンリンゲン	—	100	5.5	4~6	200 m³/y	100 L ドラム缶

別表 18-2 国内外の圧縮処理施設 18-2.3.4.5.6.8) (続き)

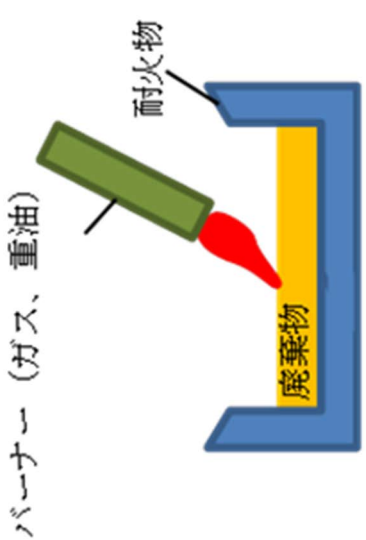
国名	サイト	対象廃棄物	圧縮加重		減容率	処理量	圧縮対象物
			t	MPa			
英国	ハーウェル	—	17	—	3	750 m ³ /y	100 L ドラム缶
		—	80	—	3~7	600 m ³ /y	650 L 容器
	アルダーマストン	—	10	—	3~5	550 m ³ /y	100 L ドラム缶
	ドーンレイ	低レベル、β γ	2,000	—	—	—	—
米国	リバモア	—	4.5	2	4	—	200 L ドラム缶
	アルゴンヌ	—	—	—	4	—	専用容器
	オークリッジ	—	—	—	9	850 m ³ /y	425 L 容器
		—	5,000	—	—	—	—
		—	1,500	—	—	—	—
	アイダホ	—	2,000	—	—	—	—
		—	50	—	10	—	400 L 容器
		低レベル、β γ	1,500	—	—	—	—
	シカゴ	低レベル、β γ	1,200	—	—	—	—
	ウエストバレー	低レベル、β γ	1,500	—	—	—	—
	ハンフォード	低レベル、β γ	2,000	—	—	—	—
	レッドウイング	低レベル、β γ	2,000	—	—	—	—
	ロッキーフラッツ	TRU	2,000	—	—	—	—

参考文献

- 18-1) 四国電力（株）伊方発電所の高圧圧縮廃棄体に係る廃棄確認方法について, JNES-SS-1003, 2011.
- 18-2) 東京電力株式会社, 高圧圧縮廃棄体の充填性試験結果について, 2000.
- 18-3) 四国電力株式会社, 1,500 トン高圧圧縮廃棄体の充填性試験結果について, 2009.
- 18-4) N. Nakashio, *et al.*, Trial Operation of the Advanced Volume Reduction Facilities for LLW at JAEA, J. Nuc. Sci. Tech, Vol. 44, No. 3, 2007, pp. 441-447.
- 18-5) IAEA, Status of Technology for Volume Reduction and Treatment of Low and Intermediate Level Solid Radioactive Waste, Technical Reports Series No. 360, 1994.
- 18-6) (社)日本原子力産業会議, 放射性廃棄物管理ハンドブック 1994 年版, 1994, 276p.
- 18-7) 北海道電力・東北電力・東京電力・中部電力・北陸電力・関西電力・中国電力・四国電力・九州電力・日本原子力発電, 充填固化体の標準的な製作方法 (改訂 4 版), 2006.
- 18-8) IAEA, Treatment of Low and Intermediate Level Solid Radioactive Waste, Technical Reports Series No. 223, 1983.

技術 No.	19	溶融処理	前処理	
プロセス概要		廃棄物を加熱し、溶融状態にした後に冷却固化することとで、廃棄物を減容・安定化する方法である。		—
適用廃棄物		金属、雑固体廃棄物		①処理条件 温度：処理対象廃棄物によるが一般的には以下の通り 高周波誘導加熱：1,300～1,500℃ ¹⁹⁻²⁾ プラズマ加熱：1,550～1,650℃ ¹⁹⁻³⁾ 圧力：— ②処理能力 減容量：5～20（金属） ¹⁹⁻⁴⁾ 、詳細は別表 13-1 参照。 ③処理物の性状
プロセスフロー または 機器概要図		高周波誘導加熱 耐火物 (キヤニスタ) 廃棄物 コイル 表面加熱方式 (バーナー加熱) (プラズマ加熱) 耐火物 廃棄物 バーナー (ガス、重油) プラズマトーチ	処理能力及び処理物の性状	圧縮強度：31.46 MPa（モルタル充填固化体） ¹⁹⁻⁵⁾ 固化体密度：— 耐放射線性：技術 No. 12 モルタル充填固化参照 耐熱性：技術 No. 12 モルタル充填固化参照 核種浸出率：技術 No. 12 モルタル充填固化参照
特記事項		溶融処理の方式としては、高周波誘導加熱、プラズマ加熱、ジュール加熱、コールドクルーシブル加熱（ガラス固化 CCIM 参照）などがある ¹⁹⁻¹⁾ 。上図では、高周波誘導加熱、バーナー加熱及びプラズマ加熱の概要を示した。各方式の詳細については、別表 19-1 に示す。 技術固有の課題：固化体作製時の Cs などの核種の移行率評価、処理条件での NaCl 挙動の確認（残存する海水成分のプロセスに及ぼす影響の確認が必要）	適用性評価	①技術成熟度（実績等） 国内：原子力業界及び一般産業界で多数の実績あり。詳細は別表 19-1 参照。 国外：高周波誘導加熱による金属溶融の実績については別表 19-2 参照 ②操作安全性 高温処理のため、火災などの潜在的リスクが高いが、危険物使用なし。 ③保守性 加熱するため燃料費などがかかり処理コストが高い。 溶融物を扱うための耐火物など設備の建設・維持コストも高い。 ④二次廃棄物発生量 処理を行うことで、処理設備の耐火物など難処理の二次廃棄物が発生（金属：2～5wt%程度） ¹⁹⁻⁴⁾ 。 ⑤事故廃棄物特有事項（有害物、有機物等）に対する適用性 加熱処理のため、有機物等は分解できる。

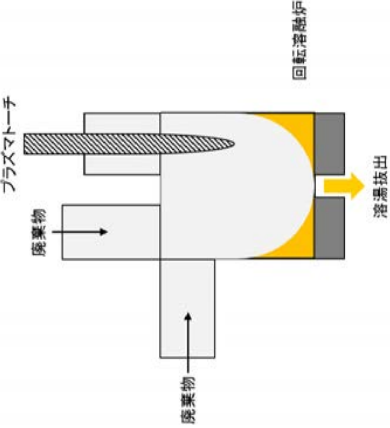
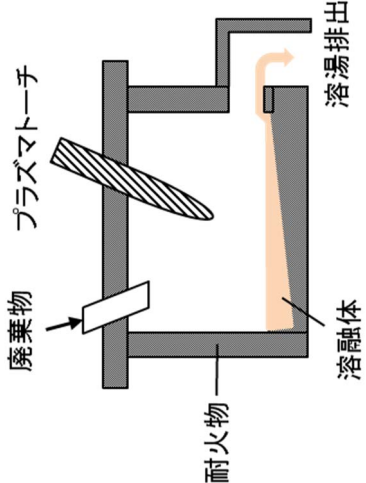
別表 19-1 溶融処理方式

名称	燃料加熱式 高温焼却炉
概要図	
説明	可燃物と不燃物を混合し、約 1500℃で焼却・溶融して、溶融物を水中に滴下して安定なガラス状グラニュール（ポーラスな粒状物）として取り出す方式である。
実績	・ベルギー（ベルギー中央研究所）¹⁹⁻⁴⁾ - 対象物：軽金属、フィルタ、保温材、可燃物 - 温度：1,500℃以上 - 減容率：3～5（軽金属、フィルタ、保温材）、99（可燃物） - 処理量：50 kg/h ・東京電力（福島第一）¹⁹⁻⁶⁾ - 対象物：不燃物、可燃物 ・九州電力（玄海）¹⁹⁻⁷⁾

別表 19-1 溶融処理方式（続き）

電気加熱式	
名称	エレクトロスラグ炉 19-9, 10)
概要図	
説明	炉内に設置した電極によって対象物に直接電流を流し、電気抵抗によるジュール熱で加熱、溶融する方式である。廃棄物は炉内のバケットから投入される。
実績	・ JAEA（東海 PWTF） 19-2, 9, 10) 対象物：細片化した金属 温度：1,700～1,850℃ 電極：タングステン 処理量：100 kg/batch 装置規模：水冷銅鑄型 220 mm×380 mm

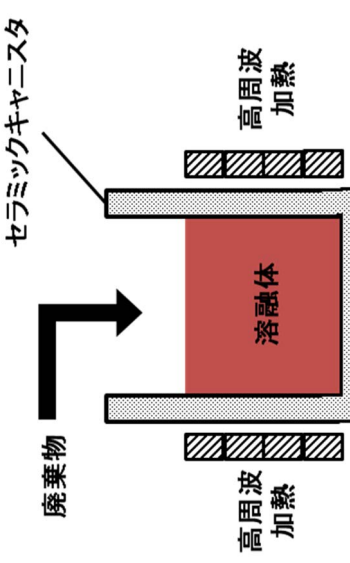
別表 19-1 溶融処理方式（続き）

名称		電気加熱式	
		回転炉床プラズマ式 ^{19-11, 12)}	傾動炉床プラズマ式 ¹⁹⁻¹³⁾
概要図			プラズマアークを廃棄物へ照射して加熱、溶融する。溶融中は炉体が回転することによる遠心力で溶湯を保持し、溶融終了後に回転を止めることで炉底の排出口から溶湯を抜き出す方式である。
説明	プラズマアークを廃棄物へ照射して加熱、溶融する。溶融中は炉体が回転することによる遠心力で溶湯を保持し、溶融終了後に回転を止めることで炉底の排出口から溶湯を抜き出す方式である。		プラズマアークを廃棄物へ照射して加熱、溶融する。溶融終了後に炉体を傾けることによって溶湯を排出する方式である。
実績	・ スイス（ZWILAG）^{19-4, 11)} - 対象物：金属、コンクリート、砂利、可燃物 - 処理量：不燃物 300 kg/h、可燃物 200 kg/h、溶融温度：1,400℃ - 減容率：6（金属、ガレキ） ・ 日本原子力発電（敦賀）^{19-11, 12)} - 対象物：金属、コンクリート、保温材、フィルタ、PVC、ゴム、イオン交換樹脂、焼却灰 - 処理量：約 600 kg/h、約 710 kg/batch、5～10 固化体/d - 減容率：約 6 - プラズマトーチ出力：1.5 MW - 溶融炉内径：2.1 m、回転速度：40 rpm ・ 米国（DOE アイダホ）：TRU 汚染土壌、金属¹⁹⁻¹¹⁾ ・ フランス（CEA カダラッシュ）：TRU、β γ 廃棄物（試験機）¹⁹⁻¹¹⁾ ・ 米国、スイス及びドイツにて一般産業への導入実績あり¹⁹⁻¹¹⁾	・ 一般産業界では導入実績多数¹⁹⁻¹³⁾ ・ 研究開発段階¹⁹⁻⁶⁾	

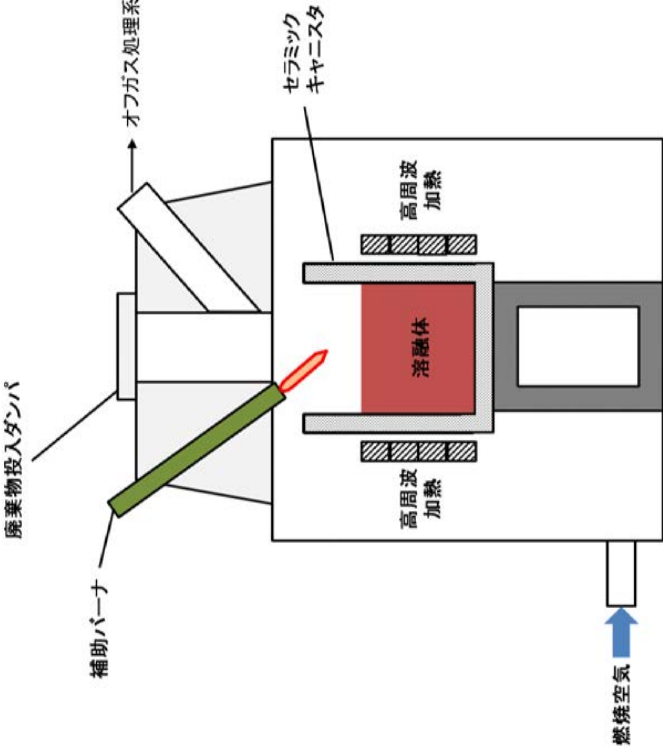
別表 19-1 溶融処理方式（続き）

電気加熱式	
名称	シャフトプラズマ式 ¹⁹⁻⁴⁾
概要図	
説明	煙突型のプラズマ溶融炉である。煙突の上から廃棄物を投入し、炉底に取り付けられたプラズマトーチで廃棄物を溶融する方式である。
実績	・ロシア (SIA RADON)¹⁹⁻⁴⁾ - 対象物：雑固体廃棄物 - 出力：100～150 kW - 温度：1,500～1,800℃ - 処理量：200～250 kg/h - 減容率：10 (混合廃棄物) - 装置サイズ：12×18×12 m
	セルフタッピングプラズマ式¹⁹⁻³⁾ ・韓国 (KHNP)¹⁹⁻¹⁴⁾ 対象物：コンクリート、土壌、金属スクラップ 加熱出力：移行・非移行デュアル式 500 kW 処理量：100 kg/h ・JAEA (東海 高減容)¹⁹⁻³⁾ 対象：焼却灰 (PVC、ゴム、セルロース、ポリエチレン) 処理量：4 t/d、2 t/batch 加熱出力：非移行式 1.3 MW×2 基

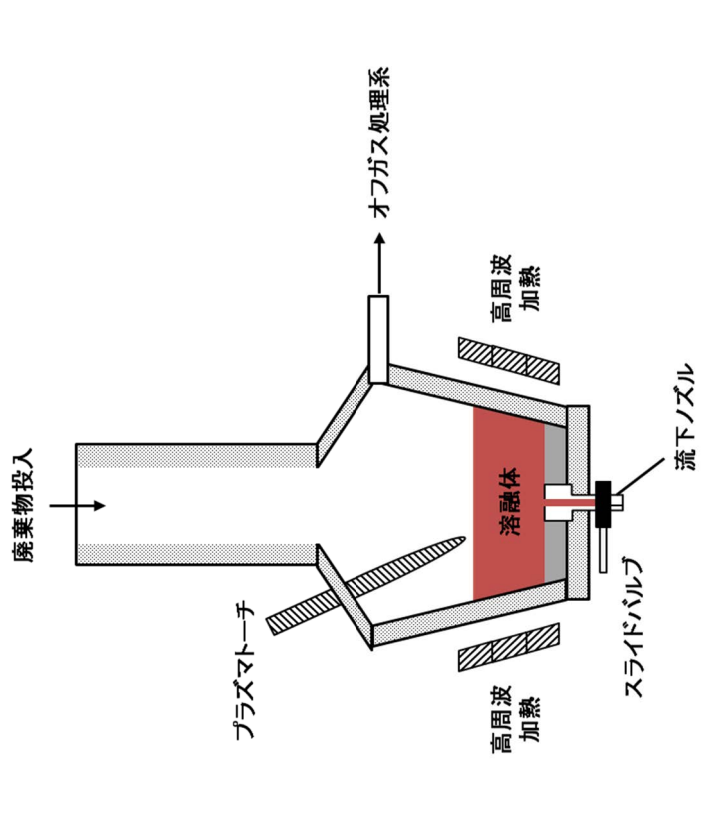
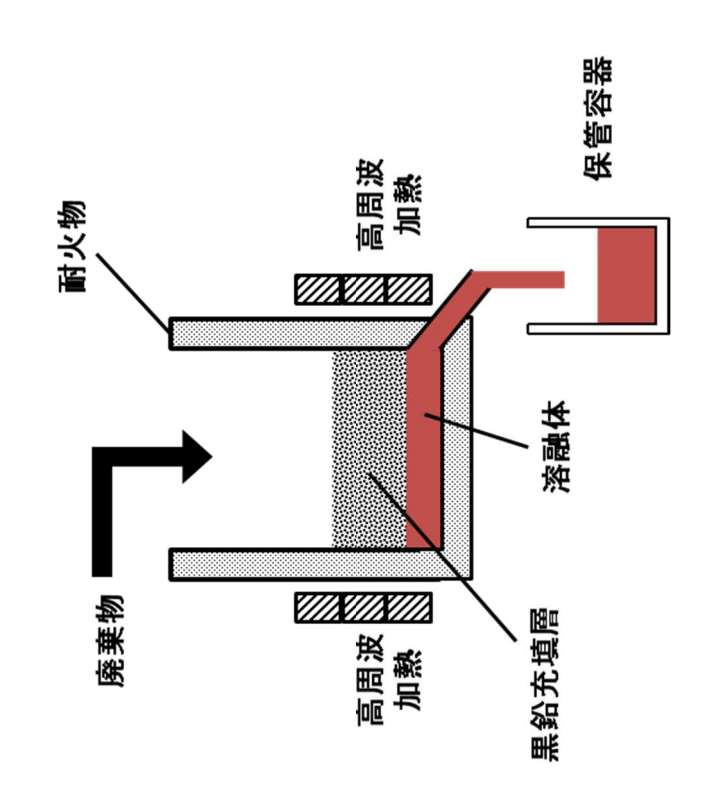
別表 19-1 溶融処理方式（続き）

名称	電気加熱式	
	内容器高周波加熱式	
概要図 ^{19-11, 16)}		
説明	導電性内容器（るつぽ）に廃棄物を入れ、内容器ごと誘導電流によって加熱、溶融する方式である。るつぽごと加熱することで非導電性物質を溶融することができる。	
実績	・日本ガイシ（ラボスケール）¹⁹⁻¹⁵⁾ 対象廃棄物：炭素鋼、フィルタ、保温材、可燃物 温度：1,500℃（キャニスタ外面）、処理量：125 kg/h（キャニスタ容量：120 L） 減容率：6 周波数：500～1,000 Hz（出力最大 600 kW） ・関西電力（美浜）¹⁹⁻¹¹⁾ 対象廃棄物：雑固体廃棄物、処理量：約 150 kg/h、減容率：3 ・中国電力（島根）¹⁹⁻¹¹⁾ 対象廃棄物：雑固体廃棄物 処理量：3 drums/d（12 時間運転）、減容率：3～4 ・中部電力（浜岡）¹⁹⁻¹¹⁾ 対象廃棄物：雑固体廃棄物 処理量：約 150 kg/h、6 drums/d（24 時間運転）、減容率：約 4 ・九州電力（玄海）¹⁹⁻¹⁶⁾ 対象廃棄物：雑固体廃棄物 処理量：約 150 kg/h	

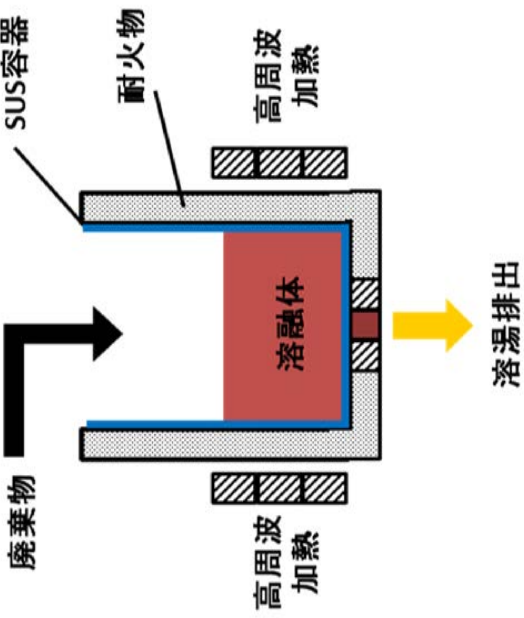
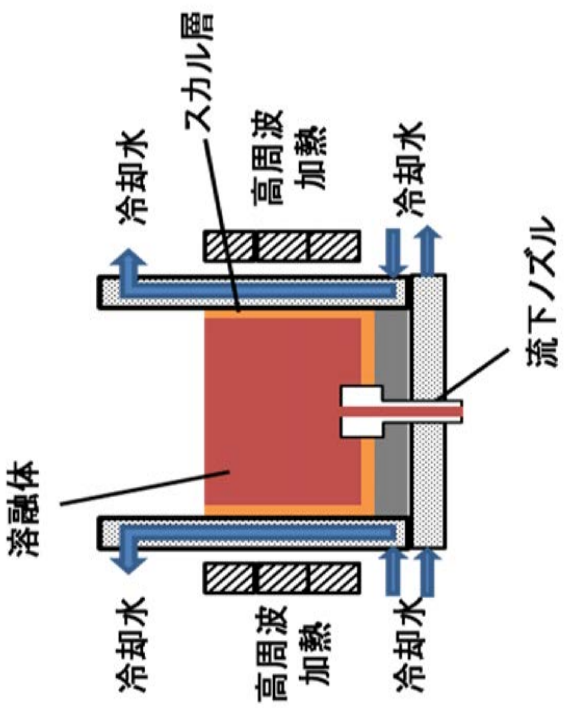
別表 19-1 溶融処理方式（続き）

名称	電気加熱式	
概要図 19-17)	バーナ補助高周波加熱式 	
説明	導電性内容器（るつぼ）に廃棄物を入れ、内容器ごと誘導電流によって加熱、溶融する方式である。補助バーナを用いることで溶融体表面のスラグも溶融することができる。	
実績	・ 日本原子力発電（東海・東海第二）¹⁹⁻¹⁷⁾ 対象物：配管、保温材、塩ビ、コンクリート片 温度：1,500℃（キャニスタ表面） 出力：最大 600 kW キャニスタ容量：150 L 処理量：約 250 kg/h 処理時間：約 3 時間	

別表 19-1 溶融処理方式（続き）

電気加熱式		電気加熱式	
名称	プラズマ補助高周波加熱式 ¹⁹⁻⁶⁾	発熱体内包高周波加熱式 ¹⁹⁻⁶⁾	
概要図			炉内に黒鉛などの導電性物質の発熱体を充填し、誘導加熱された発熱体により廃棄物を溶融する方式である。
説明	高周波誘導炉の上部にプラズマトーチを設置することで、溶湯上部の非導電性物質を含むスラグ層も加熱、溶融する方式である。		
実績	・ JAEA（東海 高減容）¹⁹⁻³⁾ 対象物：金属 処理量：4 t/d, 4 t/batch 出力：1.2 MW 溶湯受容器：外径 530 mm × 高さ 800 mm 鋳塊：外径 400 mm × 高さ 700 mm		・ 研究開発段階¹⁹⁻⁶⁾

別表 19-1 溶融処理方式（続き）

名称	電気加熱式	CCIM 式 ¹⁹⁻⁴⁾
概要図		
説明	ステンレス製容器内へ非導電性物質を充填して、容器が溶融しない温度で誘導加熱する。その後金属廃棄物を投入して昇温し、ステンレス容器ごと金属を溶融する方式である。上図は、溶湯排出口まわりにコイルを設置することで、高周波の印可によって出湯を制御する方式である。	廃棄物を炉内へ投入し、誘導電流により直接加熱して溶融する方式である。炉壁内に冷却水を導通させることで溶融体との間にスカル層を形成し、炉壁の高温腐食を防止することができる。
実績	・実規模試験段階¹⁹⁻⁶⁾	・フランス (GEA)¹⁹⁻²⁾ 対象：ハル・エンドピース 温度：1,400～1,500℃ 雰囲気：不活性ガス雰囲気

別表 19-2 海外の高周波誘導加熱による金属溶融の実績 (19-4, 11)

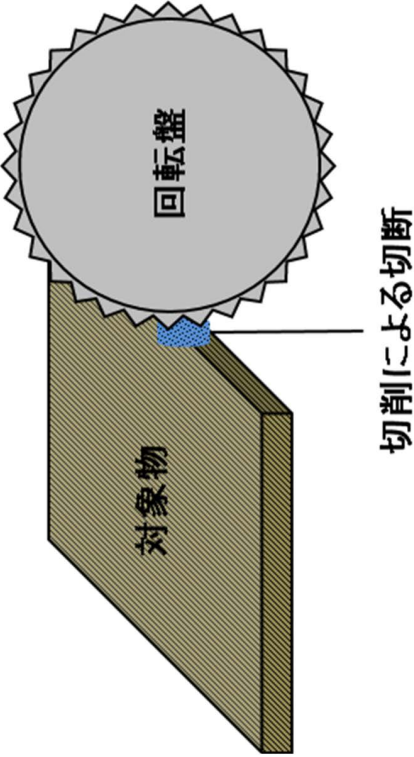
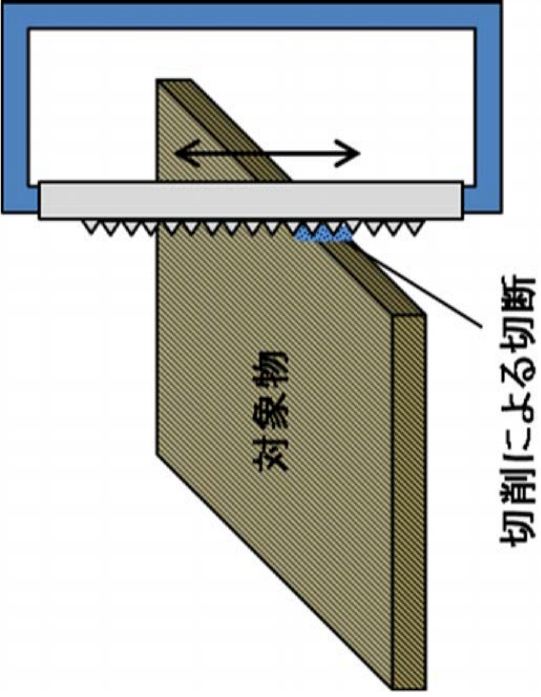
国名	サイト (実施主体)	対象廃棄物	処理量	出力	溶融温度 (°C)	二次廃棄物
フランス	セントラコ (Socodel)	炭素鋼、ステンレス鋼、 非鉄金属 (Pb 他)	4 t/batch 2 batch/d	—	1,600	耐火物 ダスト排ガス
ドイツ	カーラ (Siempelkamp)	炭素鋼、ステンレス鋼、 アルミニウム、銅、鉛	3.2 t/batch 3 batch/d	1.5 MW	1,350~1,500	耐火物 ダスト排ガス
ロシア	サンクトペテルブルク (Ecomet-S)	炭素鋼、ステンレス鋼、 非鉄金属	2.5 t/batch	—	—	—
スウェーデン	ニチヨピン (Studsvik)	炭素鋼、ステンレス鋼、 アルミニウム、真鍮、銅、鉛	3.5 t/batch	1.2 MW	—	2~5%発生 (顧客返還)
英国	カーペンハースト (Urenco)	炭素鋼、ステンレス鋼、 アルミニウム、真鍮、銅	4 t/batch	—	1,600	耐火物 ダスト排ガス
米国	ベアクリーク (Duratek)	炭素鋼、ステンレス鋼、 アルミニウム、銅、チタン	20 t/batch	8.6 MW	1,500	耐火物 (7 t/month)

参考文献

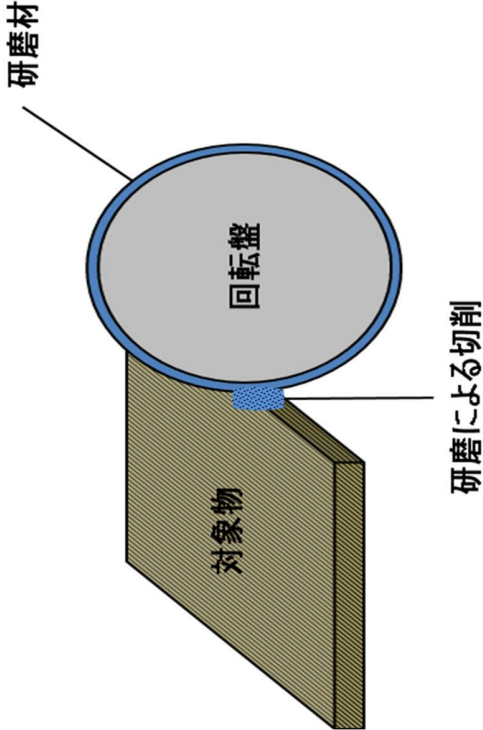
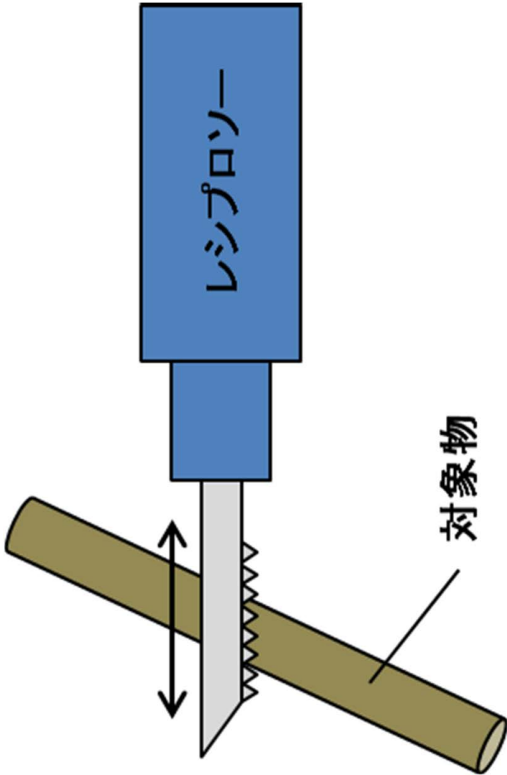
- 19-1) 武中五月ほか、ガザキ・ランドシステム（株）における発電所廃止措置及び廃棄物処理技術、デコミッショニング技報 第34号、2006、pp. 2-17.
- 19-2) IAEA, Status of Technology for Volume Reduction and Treatment of Low and Intermediate Level Solid Radioactive Waste, Technical Reports Series No. 360, 1994
- 19-3) N. Nakashio, *et al.*, Trial Operation of the Advanced Volume Reduction Facilities for LLW at JAEA, J.Nuc.Sci.Tech., Vol. 44, No. 3, 2007, pp. 441-447.
- 19-4) IAEA, Application of Thermal Technologies for Processing of Radioactive Waste, IAEA-TECDOC-1527, 2006.
- 19-5) 北海道電力・東北電力・東京電力・中部電力・北陸電力・関西電力・中国電力・四国電力・九州電力・日本原子力発電、充填固化体の標準的な製作方法（改訂4版）、2006.
- 19-6) 中山準平、杉本雅彦、放射性廃棄物処理プロセスの調査 調査報告書、JNC-TJ 8420 2000-007, 1999, 104p.
- 19-7) (社)日本原子力産業会議、放射性廃棄物管理ハンドブック 1994年版、1994, 276p.
- 19-8) J. Feaugas, *et al.*, Experiment with Melting Beta and Gamma Contaminated Metals, International Conference on Decommissioning of Nuclear Installations, 1994.
- 19-9) 阪田貞弘ほか、放射性廃棄物処理処に関する研究開発、産業技術出版, 1983, 632p.
- 19-10) A. Ochiai, *et al.*, Treatment of Plutonium-Contaminated Metallic Waste by the Electro-Slag Melting Method, Conditioning of Radioactive Wastes for Storage and Disposal, 1982.
- 19-11) (独)原子力安全基盤機構、平成14年度原子力利用安全対策等委託費のうち放射性廃棄物関係（低レベル放射性廃棄物の確認方法に関する調査研究）報告書、2003.
- 19-12) 辻行人、6. 回転炉床式プラズマ炉を用いた低レベル放射性廃棄物の溶融処理、プラズマ・核融合学会誌 73, 9, 1997.
- 19-13) 埼玉県環境部資源循環推進課、埼玉県溶融スラグ有効利用指針 資料編, 2007.
- 19-14) H. J. Cho and C. W. Kim, Radioactive Waste Vitrification by Using Plasma Torch Melter (PTM), 2013 ISRS proceedings, 2013.
- 19-15) 刈田陽一、放射性廃棄物処理技術の開発-日本ガイシの開発技術-, デコミッショニング技報 第8号, 1993, pp. 40-65.
- 19-16) 玄海原子力発電所における気体及び液体廃棄物処理設備共用化等に係わる原子炉設置変更許可申請について、九州電力株式会社, 2002.
- 19-17) 日本原子力発電（株）東海発電所の充填固化体に係る廃棄物確認方法について、（独）原子力安全基盤機構 規格基準部, JNES-SS-0613, 2006.

技術 No.	20	切断処理	前処理	
プロセス概要		容器に充填するためや焼却などの処理を行うために、大型の廃棄物を切断・細断する処理方法である。	前処理	—
適用廃棄物		金属、プラスチック、コンクリート	処理能力及び処理物の性状	①処理条件 温度：常温～数万℃（プラズマアーク切断）^{20-1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8)} 圧力：常圧 周囲環境：気中/水中^{20-1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8)} 装置規模：9.1 m×4.6 m×4.6 m（ロスアラモス研究所）²⁰⁻¹⁾ ②処理能力 手法によって異なる。 詳細は別表 20-1 参照^{20-1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8)} ③処理物の性状 処理前後で変化なし。
プロセスフロー または 機器概要図 ²⁰⁻⁵⁾		処理方式には対象物を機械的に切断する手法（丸鋸、糸鋸、研磨切断機、レシプロソー、チェーンソー、シアーカータター、ウオータージェット切断、爆破切断等）と熱によって対象物を溶断する手法（電気アーク切断、アセチレントーチ切断、プラズマアーク切断、アークソー、テルミット反応ランス、レーザーカッター等）がある。上図は、丸鋸による機械的切断を示したものである。その他の切断方式については、別表 20-1 参照^{20-1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8)}。	適用性評価	①技術成熟度（実績等） 国内外の原子力施設で導入実績多数 詳細は別表 20-1 参照^{20-1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8)} ②操作安全性 手法によっては、高温での溶断や粉じんの発生がある。 ③保守性 設備費及び運転費が安価 ④二次廃棄物発生量 手法によっては、切断ダスト、ドロス、冷却水、潤滑剤、誘電流体等が発生する。 ⑤事故廃棄物特有事項（有害物、有機物等）に対する適用性 原子炉内構造物や建屋コンクリートの解体に適用できると考えられる。
特記事項		—		

別表 20-1 切断方式 20-1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8)

名称	丸鋸 20-5)	機械的切断方式 糸鋸 20-5)
概要図	 切削による切断	 切削による切断
説明	回転運動する装置に円形の鋸を設置し、対象物を鋸引きによって切断する手法である。対象が金属の場合火花が発生するほか、切断速度に応じた微粉が発生する。	往復運動する装置に両端を固定した鋸を設置し、対象物を鋸引きによって切断する手法である。対象が金属の場合火花が発生するほか、切断速度に応じた微粉が発生する。
実績	・英国（ドーンレイ） 対象物：施設解体鋼材	・米国（シッピングポート） 対象物：アルミ材、軟鋼材 処理量（大型の場合）：軟鋼棒 90 cm²/min、配管 110 cm²/min 二次廃棄物：切断ダスト、ドロス、冷却水、潤滑剤、誘電流体等

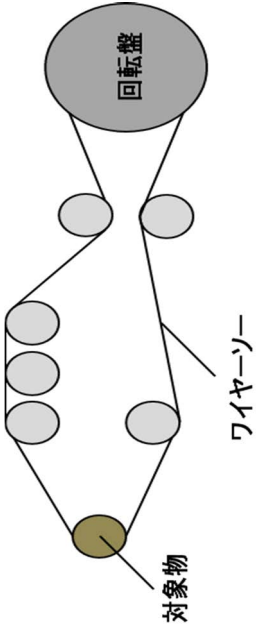
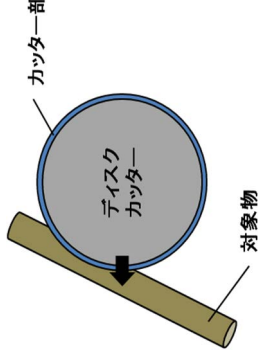
別表 20-1 切断方式（続き）

名称		機械的切断方式	
		研磨切断機 20-5)	レシプロソー 20-5)
概要図			
説明	回転盤の円周の研磨材（酸化アルミニウム粉末または炭化珪素粉末混合樹脂）によって対象物を切断する方式である。携帯型や固定型があり、遠隔操作にも適するが対象が金属の場合、火花が発生し、切断速度に応じた微粉が発生する。		往復運動する装置に一端を固定しない鋸を設置し、対象物を鋸引きによって切断する手法である。直径が 20 cm 以下の長い金属を切断する際に使用され、切断速度が低速の場合は微粉発生量を低減することができる。
国内実績	原子力産業で適用実績あり。 対象物：鋼管、棒鋼など 処理量：直径約 15 cm の棒鋼を 2 分で切断 二次廃棄物：切断ダスト、ドロス、冷却水、潤滑剤、誘電流体等		・米国（パシフィックノースウェスト） 対象物：ホットセル内部部材 処理量：－ 二次廃棄物：切断ダスト、ドロス、冷却水、潤滑剤、誘電流体等

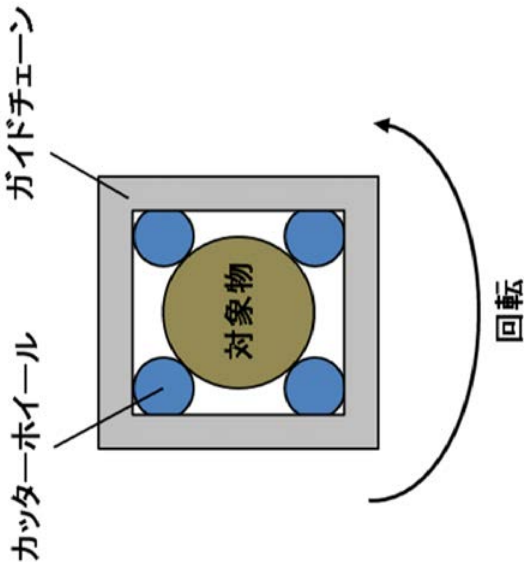
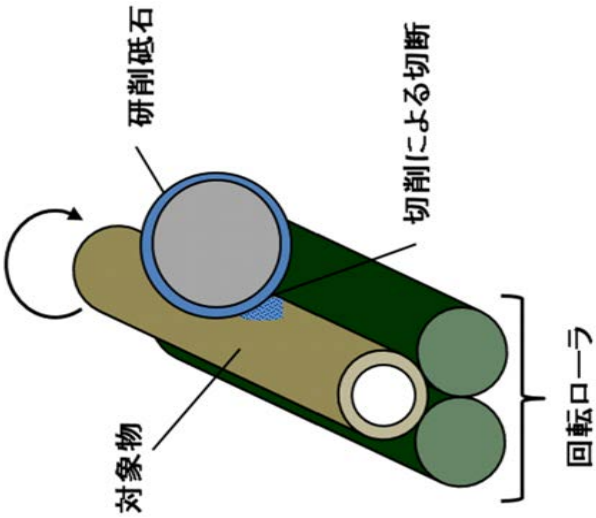
別表 20-1 切断方式（続き）

機械的切断方式	
名称	ニブラ 20-5)
概要図	
説明	回転体にチェーンを巻きつけ、対象物を鋸引きによって切削・切断する手法である。繊維質の廃棄物を高速で切断する際に使用されるが、切断の際に多量の切断片が発生する。
実績	・ 英国（ドーンレイ） 対象物：施設解体鋼材 ・ ドイツ（グンドレミンゲン、ニーダーライヒバッハ） 対象物：生体遮へいコンクリート ・ 米国（フォートセントブレイン） 対象物：生体遮へいコンクリート

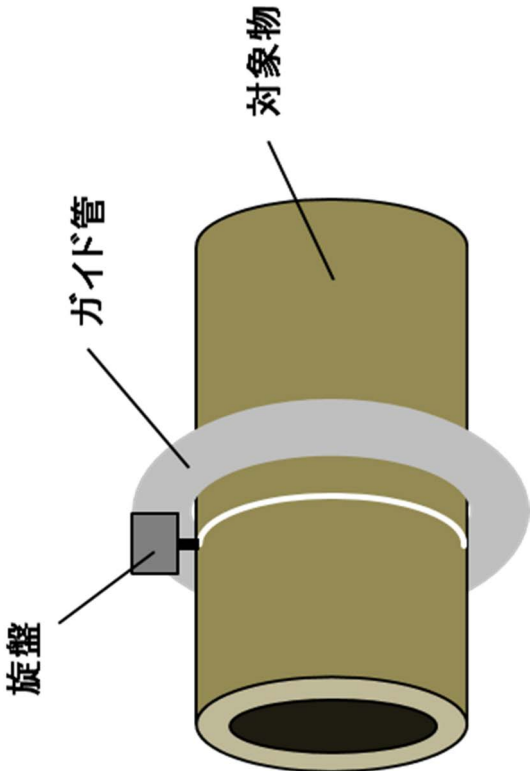
別表 20-1 切断方式（続き）

名称	機械的切断方式	
	ワイヤーソー ²⁰⁻⁵⁾	ディスクカッター ²⁰⁻⁵⁾
概要図		
説明	切断子（ダイヤモンド等）とスペーサを数珠繋ぎのワイヤーとし、このワイヤーを引き回すことで対象を切断する手法である。	円板状のカッター刃を対象物に押し付け、切断する方式であり、遠隔操作が可能である。塑性変形により切断するため、切粉がほとんど発生しない。
実績	・米国（セイコア、ミルストーン、インディアンポイント、サンオノフレ、スタズビック、フォートセントブレイン） - 対象物：熱交換器管束（セコシア、ミルストーン、スタズビック）、復水器管束（インディアンポイント）、蒸気発生器本体（サンオノフレ） - 処理量（スタズビック）：直径 2.5 m 熱交換器管束、直径 2 cm ステンレス鋼管 4,000 本、直径 12 cm 炭素鋼管 1 本 - 処理時間：ワイヤー循環速度 25 cm/s 以下で約 17 時間 - 二次廃棄物：切断ダスト、ドロス、冷却水、潤滑油、誘電流体 ・ドイツ（グンドレミンゲン、ニーダーライヒバッハ） - 対象物：生体遮へいコンクリート - 処理量：引張切断 3 m²/h、押切切断 1 m²/h - 削孔φ 75～100 mm で 1～2 m/h、φ 200 mm で 0.5 m/h - 二次廃棄物：粉塵 1～180 μm	・日本（JPDR） - 対象物：原子炉圧力容器接続配管、生体遮へいコンクリート - 処理量：厚さ 33.3 mm の 300A 配管に対して 28 min 厚さ 17.4 mm の 300A 配管に対して 2.5 min - 生体遮へいコンクリートに対してコアボーリング併用で 1.3 m³/h

別表 20-1 切断方式（続き）

機械的切断方式	
名称	ロータリーカッター ²⁰⁻⁵⁾
概要図	
説明	カッターホイールが配管円周上を移動し、切断を行う手法である。カッターホイールはガイドチェーンにより固定される。カッター刃の種類によって切断深さを変えることができ、遠隔操作も可能である。 原子力産業にて適用実績あり。 対象物：配管、円筒容器 処理量：炭素鋼では1回あたり2 cm 程度切削可能 二次廃棄物：切断ダスト、ドロス、潤滑剤、誘電流体等
実績	 原子力産業では導入実績なし。 一般産業界では導入実績多数

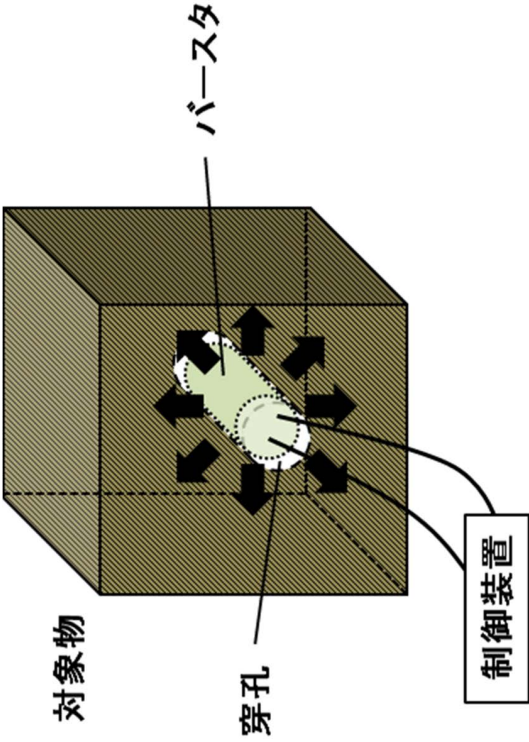
別表 20-1 切断方式（続き）

機械的切断方式	
名称	クラムシエル型旋盤 20-5)
概要 図	
説明	配管の円周上に旋盤が設置され、回転することにより自動的に回転半径を縮小させて切断する手法であり、外径約 3～100 cm、肉厚約 15 cm までの配管が切断可能である。遠隔操作が可能である。
実績	原子力産業にて適用実績あり。 対象物：配管、円筒容器 処理量：－ 二次廃棄物：切断条件により切粉が発生

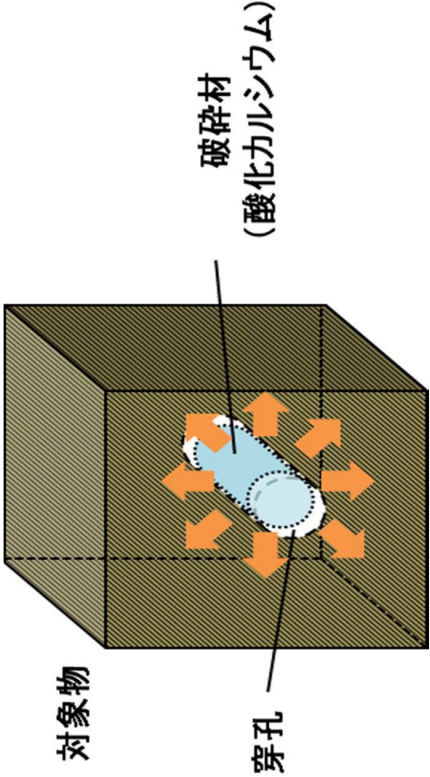
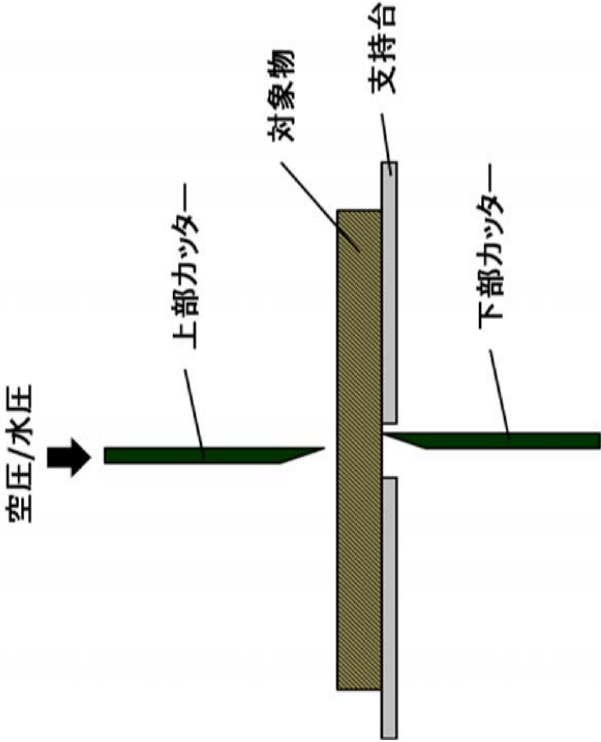
別表 20-1 切断方式（続き）

機械的切断方式	
名称	コアボーリング ²⁰⁻⁵⁾ ブレーカ ²⁰⁻⁵⁾
概要図	
説明	鋼製のノミを空気圧あるいは油圧で振動させ、その衝撃で対象物を破砕する手法である。携帯可能な小型のものから重機で使用する大型のものがある。
実績	・ 日本（JPDR、JRR-3） 対象物：生体遮へいコンクリート 処理量：20～30 m³/d（50 m³/d（1.5t クラス重機）） 二次廃棄物：粉塵が発生する。（廃棄物体積が約2倍となる） ・ 米国（エルリバー） ・ 日本（JPDR、JRR-3） 対象物：生体遮へいコンクリート（JPDR） 炉体コンクリート床の縁切り 処理量： 110 mm φ × 1,550 mmL（直径 30 mm 鉄筋含む）に対して 60 分で貫通 150 mm φ × 1,200 mmL（直径 22 mm 鉄筋含む）に対して 39 分で貫通 二次廃棄物：乾式ならば冷却水は不要

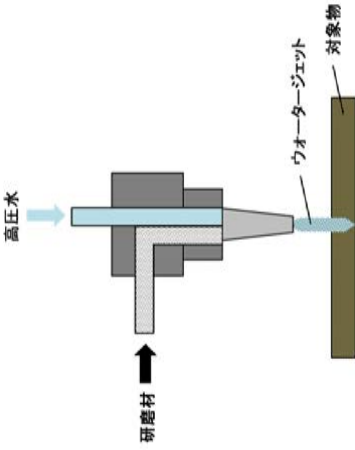
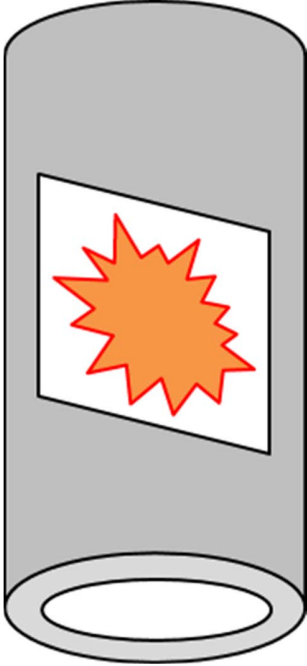
別表 20-1 切断方式（続き）

機械的切断方式	
名称	圧碎機 ²⁰⁻⁵⁾
概要図	
説明	穿孔したコンクリートに油圧シリンダを内蔵したバースタを挿入し、孔を押し広げること対象物を破砕する手法である。対象物を剥離するためには、二次破砕が必要となる。 一般産業界では、湿式穿孔との併用で実績あり。 対象物：建屋構造コンクリート 処理量：バースタ拡大ストローク 55 mm 破砕圧 250 t/バースタ（最大） 孔径 200 mm（最大）
実績	一般産業界では実績多数。 対象物：建屋構造コンクリート 処理量：30～40 m³/d 刃先開口幅：30～230 cm 程度 二次廃棄物：粉塵が発生する。（廃棄物体積が約 2 倍となる）

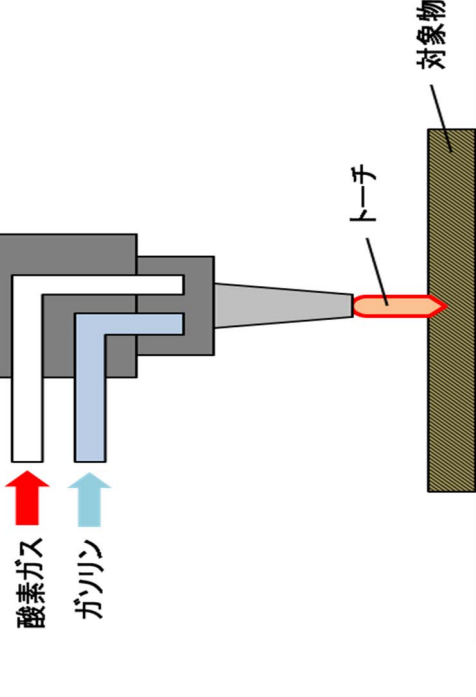
別表 20-1 切断方式（続き）

名称	静的破砕材 ²⁰⁻⁵⁾	機械的切断方式
概要図		
説明	対象物を削孔し、その孔に酸化カルシウムを主成分とする破砕材を充填して、破砕材の膨張圧によって対象を破砕する手法である。対象物を剥離するためには、二次破砕が必要となる。 一般工事における適用実績あり。	直径が10 cm以上の配管や直径が数cmの金属柱の切断に使用される。切断時に二次廃棄物である微粉が発生しないという特徴がある。
実績		・ベルギー（モル）（簡易圧縮装置と併用） 対象物：燃料要素構造材、溶解槽、廃棄物収納容器 処理量：－ 切断圧力：560 kN

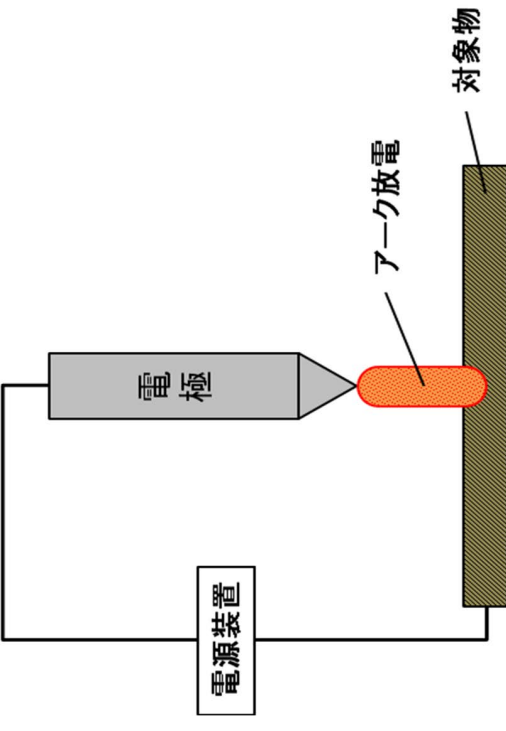
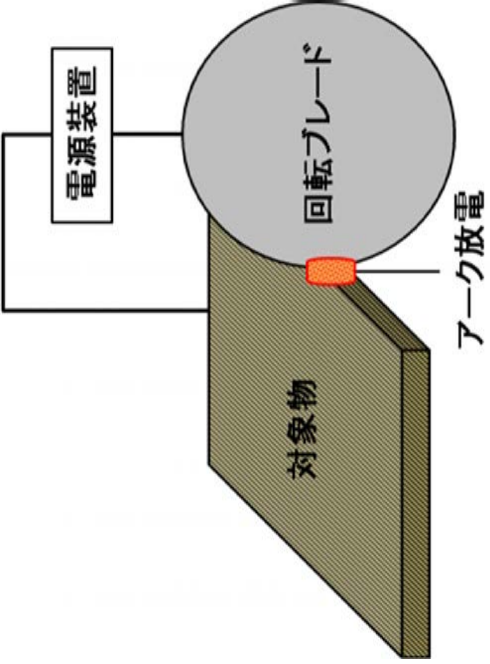
別表 20-1 切断方式（続き）

機械的切断方式			
名称	アブレイシブウォータージェット切断 ²⁰⁻⁵⁾	爆破切断 ²⁰⁻⁵⁾	
概要図			
説明	高圧水（200～300 MPa）中に研磨材を混入させ、対象物に噴射することで切断する手法である。	対象が金属の場合、爆発のエネルギー及び被覆金属による衝撃を利用して対象を破断するものであり、厚さ 15 cm 程度の金属の切断に使用される。コンクリートの場合、削孔に爆薬を装填して爆破させるものである。どちらの場合も遠隔操作は可能である。	
実績	・ 日本 - 対象物：生体遮へいコンクリート（JPDR） - シュラウド（福島第一 2 号機） - 処理量：75 mm ステンレス鋼に対して、約 75 mm/min（福島第一） 212 日間で 24.7 t を切断（JPDR） - 二次廃棄物：研磨材（スチールグリッド）1～2 kg/min（福島第一） ・ 米国（コネティカットヤンキー）	・ 日本（JPDR） - 対象物：ステンレス製配管、生体遮へいコンクリート - 処理量：厚さ 5.1 mm40A 配管に対して、爆薬 10 g - 厚さ 7.6 mm80A 配管に対して、爆薬 50 g - 生体遮へいコンクリート 1,398 t に対して 147 回爆破 - 二次廃棄物：10～200 g/m³（平均 58 g/m³）の粉塵が発生 ・ 米国（エルクリバー） - 対象物：生体遮へいコンクリート ・ ドイツ（ニーダーライヒバツハ） - 対象物：生体遮へいコンクリート	

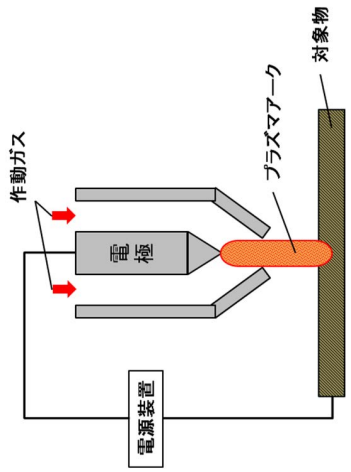
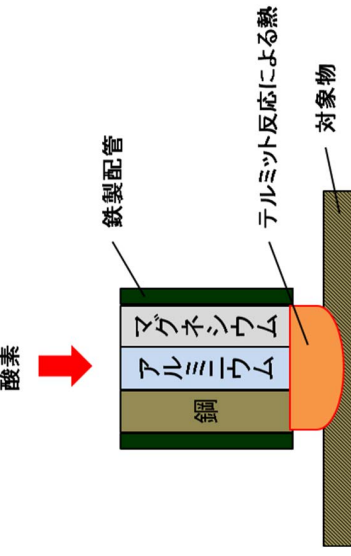
別表 20-1 切断方式（続き）

熱的切断方式	
名称	酸素トーチ切断 ²⁰⁻⁵⁾
概要図	
説明	酸素と燃料を対象物へ噴射・発火させて対象を溶融・切断する方式である。大型の金属廃棄物の切断に使用され、高速切断に適しており使用方法も簡便である。切断時に微粉が発生するため、周囲に可燃物が存在すると火災の危険性がある。 ・米国（アルゴンヌ、アイダホ、ハンフォード、オークリッジ、ポーツマス、サンオノフレ、サバンナリバー、ウエストバレー） 対象物：容器及び一般構造の板材 処理量：炭素鋼 2.5～4.5 cm² に対して 380 cm/h 炭素鋼 11.5 cm² に対して 130 cm/h 二次廃棄物：切断粉塵
実績	・ドイツ（カールスルーエ多目的原子炉、グライフスバルト） 対象物：原子炉圧力容器 処理量：炭素鋼 5～50 mm² に対して、0.1 から 1 m/min 二次廃棄物：ドロス、フェーム

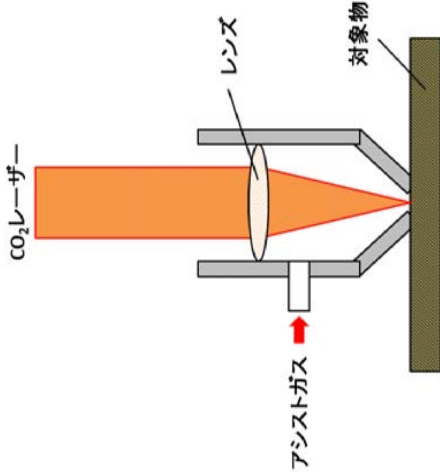
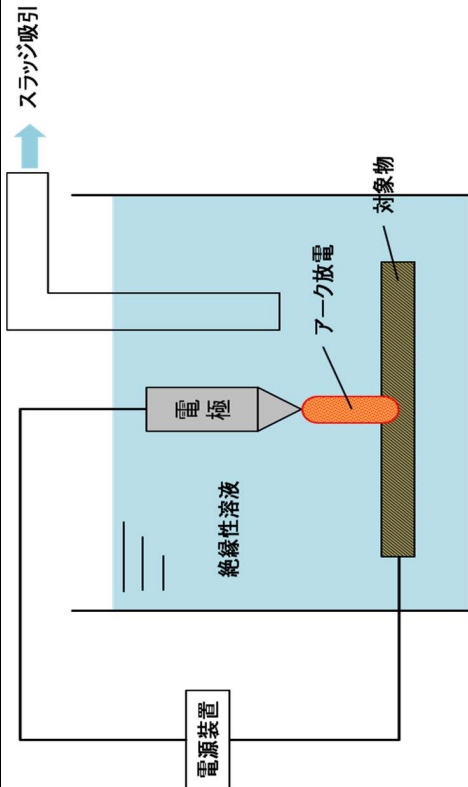
別表 20-1 切断方式（続き）

熱的切断方式	
名称	アーケ切断 20-5)
概要図	アーケソー切断 20-5)
	
説明 電極と対象物との間に直流電圧を印加した、アーケ放電によって発生した熱により対象物を溶融・切断する方式である。大型の金属廃棄物（厚さ数 mm）の切断に使用される。高速切断に適しており使用方法も簡便であるが、切断時に微粉が発生するため、周囲に可燃物が存在すると火災の危険性がある。	回転する電極と対象物との間に直流電圧を印加した、アーケ放電によって発生した熱により対象物を溶融し、ソーブレードによって溶融物を除去・切断する方式である。 厚さ 90 cm 程度の金属の切断の使用され、遠隔操作性にも優れる。
実績 原子力業界における実績は特になし。 一般産業界では使用実績多数。	・日本（JPDR） 対象物：原子炉圧力容器胴部 処理量：ステンレス鋼内張炭素鋼 250 mmt に対して 40 mm/min（気中） ステンレス鋼内張炭素鋼 200 mmt に対して 60 mm/min（水中） 二次廃棄物：水中浮遊物、ドロス

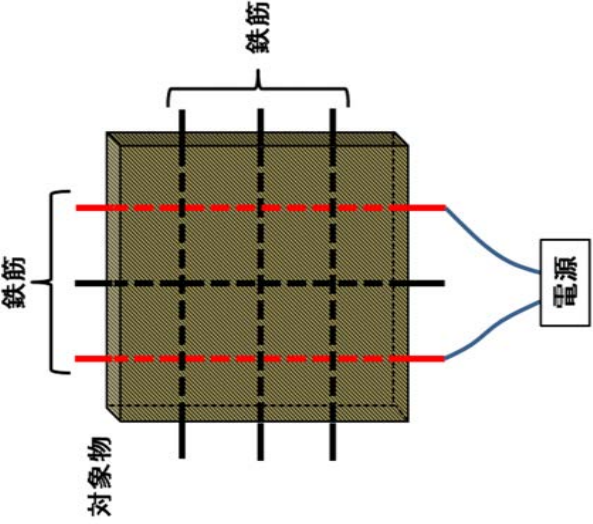
別表 20-1 切断方式（続き）

熱的切断方式	
名称	プラズマアーク切断 ²⁰⁻⁵⁾
概要図	
説明	電極と対象物の間にアーク電流を発生させ、作動ガスから高温プラズマ流を生成させ、アークとプラズマの熱によって対象物を溶融・切断する方式であり、気中及び水中での切断が可能である。厚さ 15 cm 程度の金属の切断に使用され、遠隔操作性にも優れる。
実績	・ 日本（JPDR、福島第一 3 号機シュラウド） - 対象物：炉内構造物 - 処理量：ステンレス鋼 130 mm² に対して 75 mm/min（水中） ステンレス鋼 230 mm² に対して 50 mm/min（気中） - 二次廃棄物量：ドロス 35 kg ・ 米国（EBWR、エルクリバー、ヤンキーロー） ・ 英国（ウィンズケール） ・ ドイツ（グンドレミンゲン、グライフスバルト、多目的研究炉） ・ フランス（マルケール） ・ ベルギー（BR-3、モル）
	テルミット反応ランス切断²⁰⁻⁵⁾ 
	鋼、アルミニウム及びマグネシウムのワイヤを鉄製配管に詰め、配管先端のテルミット反応により切断する方式である。すべての厚みの金属の切断に使用されるが、遠隔操作には不向きである。
	・ 英国（ウィンズケール） - 対象物：生体遮へい体（鋼＋コンクリート）6 ブロック - 処理量：30.48 cm/min（直径 2.5 cm 程度の穴あけ）

別表 20-1 切断方式（続き）

熱的切断方式	
名称	CO ₂ レーザー切断 ²⁰⁻⁵⁾
概要 図	
説明	CO₂ ガスから発生させたレーザーを熱源として物質を溶解・切断する方式である。レーザー照射の際には圧縮空気や酸素ガス等のアシストガスを加えることもできる。5 cm 程度の金属の切断の使用されるが遠隔操作には不向きである。
実績	原子力業界における実績は特になし。一般産業界では使用実績多数 対象物：炭素鋼、ステンレス鋼 処理量：10～840 mm/min (30～200 mmt ステンレス鋼) (気中) 20～30 mm/min (200～300 mmt ステンレス鋼) (気中) 10～260 mm/min (30～150 mmt ステンレス鋼) (水中) 二次廃棄物量： 気中浮遊物 510 g/m、ドロス 3.6 kg/m (気中) 気中浮遊物 16 g/m、水中浮遊物 780 g/m、ドロス 1.0 kg/m (水中)
	放電加工切断 (Electro-Discharge Machining) ²⁰⁻⁵⁾
	
	絶縁性溶液中で電極と対象物との間に電圧を印加してアークを生させ、その熱で対象物表面から小片を剥離させる手法である。
	・日本（福島第一 3 号機シュラウド） ・ベルギー（BR-3） ・その他（PWR 炉心下部プレート改造） 対象物：原子炉炉内構造物（ステンレス鋼、インコネル） 処理量：約 82 cm²/s 二次廃棄物：切断ダスト、ドロス、冷却水、潤滑剤、誘電流体等

別表 20-1 切断方式（続き）

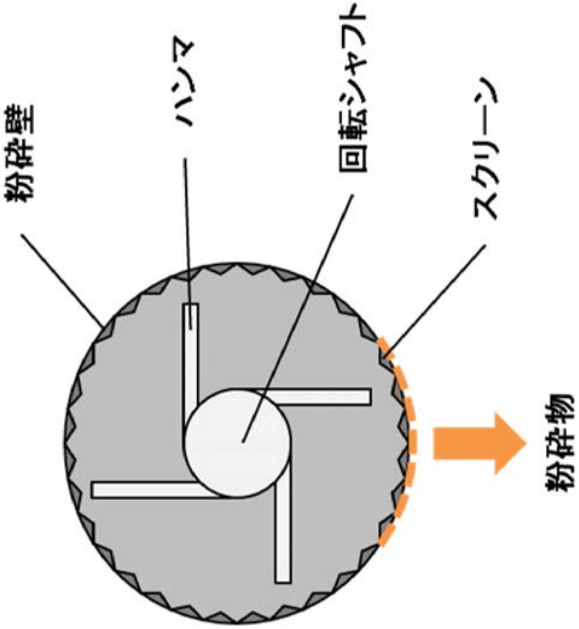
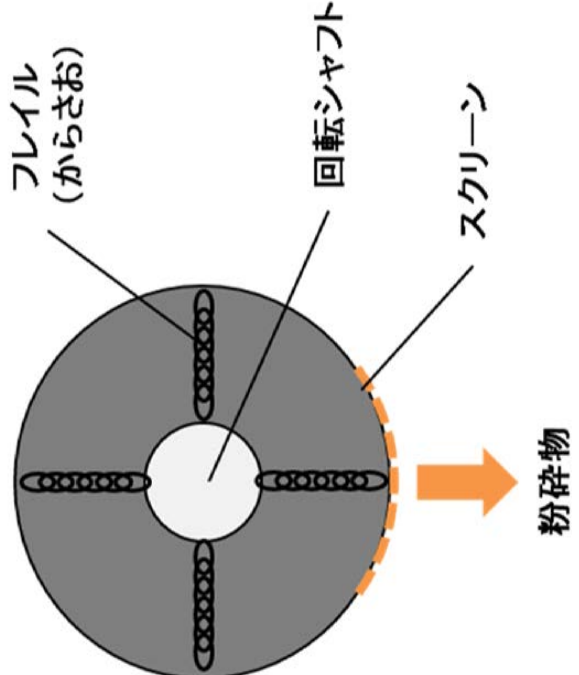
名称	熱的切断方式 直接通電/電磁誘導法	
概要図 20-5)		
説明	鉄筋端部からの電流または対象物表面にコイルを設置しての誘導電流によって鉄筋を加熱し、その熱によって周囲の対象物を破砕する手法である。上図は直接通電方式について示したものである。対象物を剥離するためには、二次破砕が必要となる。	
実績	原子力産業では導入実績なし 一般産業界では導入実績多数 対象物：鉄筋コンクリート 処理量：装置 1 台あたり 20～40 m²/d	

参考文献

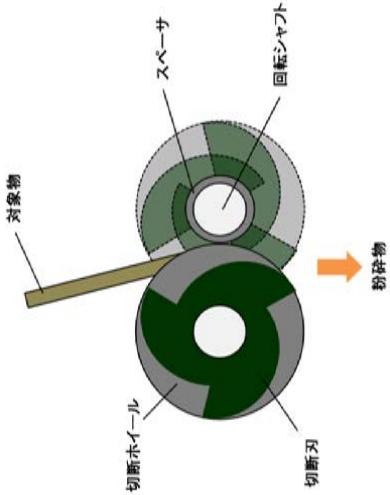
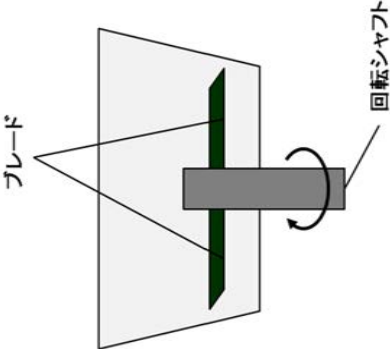
- 20-1) Low-Level Radioactive Waste Volume Reduction and Stabilization Technologies Resource Manual, National Low-Level Radioactive Waste Management Program, DOE/LLW-76T, 1988.
- 20-2) IAEA, Status of Technology for Volume Reduction and Treatment of Low and Intermediate Level Solid Radioactive Waste, Technical Reports Series No. 360, 1994.
- 20-3) IAEA, Techniques and Practices for Pretreatment of Low and Intermediate Level Solid and Liquid Radioactive Waste, Technical Reports Series No. 272, 1987.
- 20-4) IAEA, Treatment of Low- and Intermediate-Level Solid Radioactive Wastes, Technical Reports Series No. 223, 1983.
- 20-5) (財)原子力発電技術機構 廃止措置技術総合調査委員会, 廃止措置技術ハンドブック 除染・解体・再利用編, 2007
- 20-6) 宮坂靖彦, 原子炉施設デコミッショニングにおける最近の解体技術動向, デコミッショニング技法 第25号, 2002, pp. 36-51.
- 20-7) 宮坂靖彦, 米国の発電用原子炉デコミッショニングの最新動向, デコミッショニング技法 第21号, 2000, pp. 21-34.
- 20-8) J. Broothaerts, *et al.*, Industrial Experience Gained in the Decontamination and Partial Dismantling of a Shut-down Reprocessing Plant, Decommissioning of Nuclear Facilities, IAEA-SM-234/40, 1979.

技術 No.	21	粉砕処理	前処理	
プロセス概要		焼却などの減容処理を行うための前処理や減容率を改善するために、廃棄物を粉砕する処理方法である。		—
適用廃棄物		可燃物（木材、プラスチック類、紙・布類） 不燃物（ガラス、コンクリート、セラミックス、炭素製品など）		—
プロセスフロー または 機器概要図			処理能力及び処理物特性	①処理条件 温度：常温 圧力：常圧 ②処理能力 減容率：1.5～5 ²¹⁻¹⁾ 装置規模：80×130 cm ²¹⁻³⁾ ③処理物の性状 処理前後で変化なし。
		処理方式は対象物を機械的に粉砕する手法（ハンマミル、フレイルミル、シアー粉砕機、ブレードグラインダジョーグラインダ、ローグラインダ等）である。上図は、ハンマミル（グラインダ）による機械的粉砕を示したものである。その他の粉砕方式については、別表21-1参照 ^{21-1, 2, 3, 4, 5)} 。	適用性評価	①技術成熟度（実績等） 国内外の原子力施設で導入実績多数 詳細は別表21-1, 2 参照 ^{21-1, 2, 3, 4, 5)} ②操作安全性 常温で操作可能であり、オフガスの発生もない。 ③保守性 設備費及び運転費が安価 ④二次廃棄物発生量 — ⑤事故廃棄物特有事項（有害物、有機物等）に対する適用性 ガレキ、伐採木の減容に効果があると考えられる。
特記事項		—		—

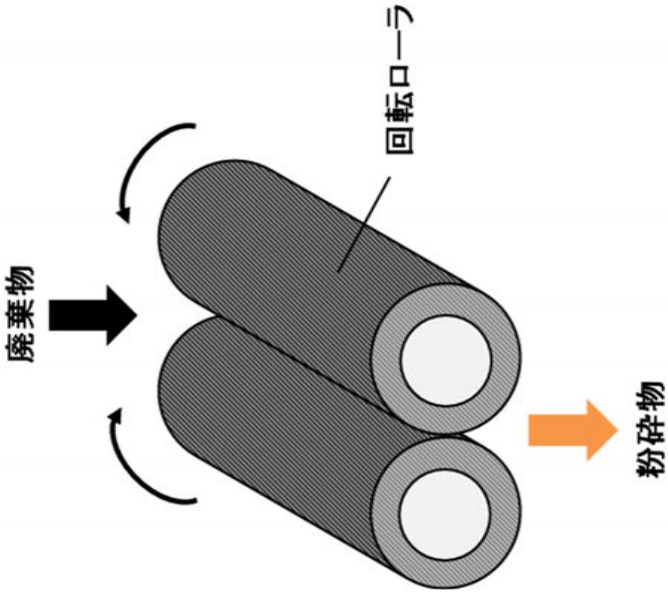
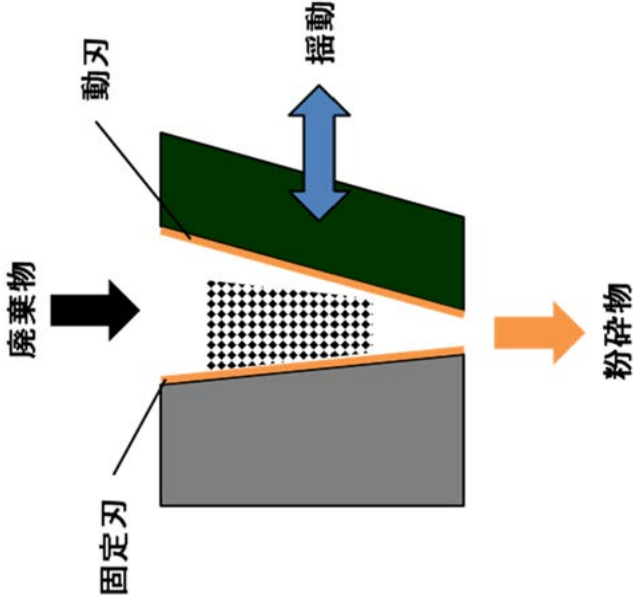
別表 21-1 粉砕方式 (21-1, 2, 3, 4, 5)

名称	ハンマミル (グラインダ)	フレイルミル
概要図		
説明	回転シャフトにハンマを取り付けて回転させることで、対象物を粉砕壁に叩きつけて粉砕する手法である。3, 600 rpm の高速回転で粉砕することが可能である。ハンマをカッター等と交換することにより粒径を調整することができる。	回転シャフトにフレイル (からさお) を取り付けて回転させることで、からさおの打撃によって対象物を粉砕する手法である。
実績	一般産業界では実績多数 爆発防止やメンテナンスの観点から原子力業界では利用は控えられている。 対象物：雑固体廃棄物、木材	一般産業界では実績多数 爆発防止やメンテナンスの観点から原子力業界では利用は控えられている。 対象物：雑固体廃棄物、木材

別表 21-1 粉砕方式（続き）

名称	シアー（カッター）粉砕機 ²¹⁻¹	ブレードグラインダ
概要図		
説明	切断刃の付いた回転シャフトを回転させ、互い違いに設置した切断ホイールで対象物を切断・粉砕する手法である。10～80 rpm の低速・大トルクで回転させることで金属を切断することも可能である。 ・ 米国 パシフィックノースウェスト 対象物：可燃性雑固体、セル廃棄物、HEPA（木製、金属製） 処理量：19～80 kg/h チョークリバー、サバンナリバー 対象物：TRU 廃棄物（木材、金属、封入ボックス） ブルンスウィック 対象物：硬質プラスチック、木材、ガラス、金属 ・ ベルギー（ドエル原子力発電所） 対象物：可燃性雑固体 処理量：2 t/h	ブレードの付いた回転シャフトを回転させ、対象物を切断。粉砕する手法である。
実績	放射性廃棄物の処理に適用可能 対象物：プラスチック、布類、ガラス、セラミックス ・ 日本（中部電力（浜岡）） 対象物：バグフィルター 処理量：45 秒/個 回転数：3,000 rpm 回転刃：200 mmφ×5 mm	

別表 21-1 粉碎方式（続き）

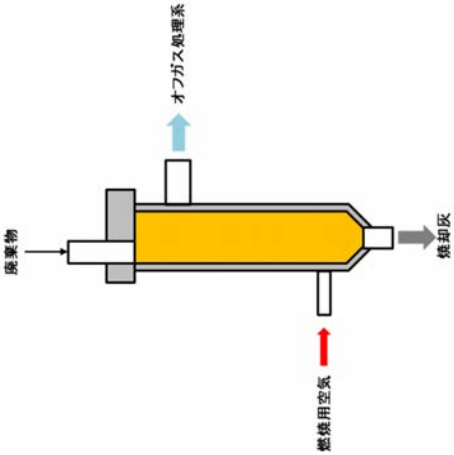
名称	ローラグラインダ	ジョーグラインダ
概要図		
説明	回転するローラ対へ廃棄物を投入し、回転による圧力で対象物を粉碎する手法である。 放射性廃棄物の処理に適用可能 対象物：不燃性廃棄物	固定刃と動刃の間に廃棄物を投入し、動刃の揺動による圧力で対象物を粉碎する手法である。 放射性廃棄物の処理に適用可能 対象物：不燃性廃棄物
実績	放射性廃棄物の処理に適用可能 対象物：不燃性廃棄物	放射性廃棄物の処理に適用可能 対象物：不燃性廃棄物

別表 21-2 国外の粉砕機導入実績 21-1, 2, 3, 4, 5)

国名	サイト	対象廃棄物	備考
ベルギー	モル	プラスチック、紙、布、ガラス、金属	－
	サクレー	高線量金属	－
フランス	カダラッシュ	Pu 含有廃棄物 (ガラス、鋼材、PVC、ポリエチレン、布等)	凍結粉砕法 (－150℃)
ドイツ	アルケム	有機固体廃棄物	－
	カールスルーエ	フィルタ	－
オランダ	ペッテン	シンチレーションバイアル	－
	ハーウェル	プラスチック	－
		ガラス	－
英国	アルダーマストン	ガラス	
	ハンフォード	一般廃棄物	－

参考文献

- 21-1) Low-Level Radioactive Waste Volume Reduction and Stabilization Technologies Resource Manual, National Low-Level Radioactive Waste Management Program, DOE/LLW-76T, 1988.
- 21-2) IAEA, Status of Technology for Volume Reduction and Treatment of Low and Intermediate Level Solid Radioactive Waste, Technical Reports Series No. 360, 1994.
- 21-3) IAEA, Techniques and Practices for Pretreatment of Low and Intermediate Level Solid and Liquid Radioactive Waste, Technical Reports Series No. 272, 1987.
- 21-4) IAEA, Treatment of Low- and Intermediate-Level Solid Radioactive Wastes, Technical Reports Series No. 223, 1983.
- 21-5) 原子力発電所換気系フィルターの減容処理, 中部電力技術開発ニュース 63 号, 1995, pp. 15-16.

技術 No.	22	焼却処理	前処理	
プロセス概要		可燃性や難燃性廃棄物を高温で燃焼させることによって減容するほか、有機物を分解する手法である。		
適用廃棄物		可燃性雑固体（紙、布、ポリエチレン、木材等）、難燃性雑固体（プラスチック、塩ビ、ゴム類等）、		
			処理能力及び処理物特性 ①処理条件 ・過剰空気燃焼方式 温度：800～1,100℃²²⁻³⁾ 空気比：2～3²²⁻¹⁾ ・抑制空気燃焼方式 温度：600～800℃（一次燃焼）、1,000～1,200℃（二次燃焼）²²⁻³⁾ 空気比：1.2～1.3²²⁻¹⁾ ②処理能力 ・過剰空気燃焼方式 炉形式によって異なる。詳細は別表 22-1 参照 ・抑制空気燃焼方式 炉形式によって異なる。詳細は別表 22-1 参照 ③処理物の性状 無機物（焼却灰、炭化物等） ①技術成熟度（実績等） 国内外で実績多数。詳細は別表 22-1 参照 ②操作安全性 高温処理であるため、火災などの潜在的リスクが高いが、危険物の使用はなし。 ③保守性 加熱するため燃料費などがかなり処理コストが高い。 耐火物など設備の建設・維持にかかるコストが高い。 ④二次廃棄物発生量 処理設備の耐火物などの二次廃棄物が発生 ⑤事故廃棄物特有事項（有害物、有機物等）に対する適用性 加熱処理のため、有機物等は分解できる。	
		焼却処理は、完全燃焼に必要な空気量に対する実際の空気量の割合によって過剰空気燃焼方式と抑制空気燃焼方式に分類される。過剰空気燃焼方式には、火格子炉、堅型円筒炉、水冷ジャケット式堅型円筒炉などがあり、抑制空気燃焼方式には堅型3室炉（Batan 炉）、横型3室炉（Melox 炉）、横型多段室炉（シルバ炉、セントロコ炉）などがある^{22-1, 2)}。各炉式の詳細については、別表 22-1 に示す。	適用性評価	
特記事項		技術固有の課題：固化体作製時の Gs などの核種の移行率評価、処理条件での NaCl 挙動の確認（残存する海水成分のプロセスに及ぼす影響の確認が必要）		

別表 22-1 焼却方式

名称	過剰空気燃焼方式	
	火格子炉 22-1, 2)	堅型円筒炉 22-1)
概要図		
説明	一次燃焼室では火格子上で廃棄物を燃焼させ、二次燃焼室では充填物（SiC など）によって比較的大きな粒子状物質を捕集する手法である。	固定式の炉底上で廃棄物を燃焼させ、炉が停止した後に炉床を反転して焼却灰を排出する手法である。
実績	・ JAEA（東海 PWTF）22-2) - 対象：可燃物、HEPA フィルタ（不燃物の仮焼も可能） - 温度：約 800～1,000℃ - 圧力：工程室内より 350 Pa 負圧 - 処理量：200 kg/d - 減容比：約 40	・ ドイツ（カールスルーエ）22-3) - 対象：固体・液体廃棄物 - 温度：約 800～1,100℃ - 処理量：150～200 kg/h まで可能 ・ その他国内外の原子力施設で実績多数 22-3, 4, 5) - 詳細は別表 22-1 (a) 参照

別表 22-1(a) 国内外の堅型円筒炉導入実績 22-3, 4, 5)

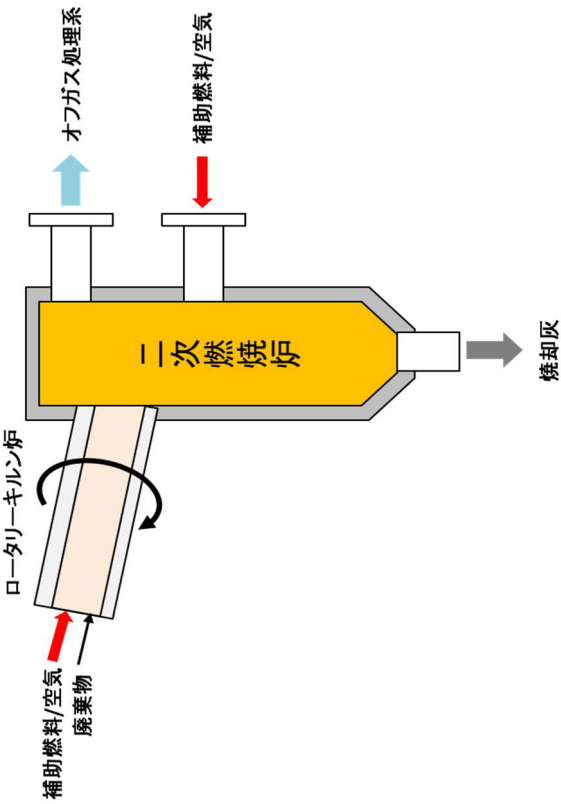
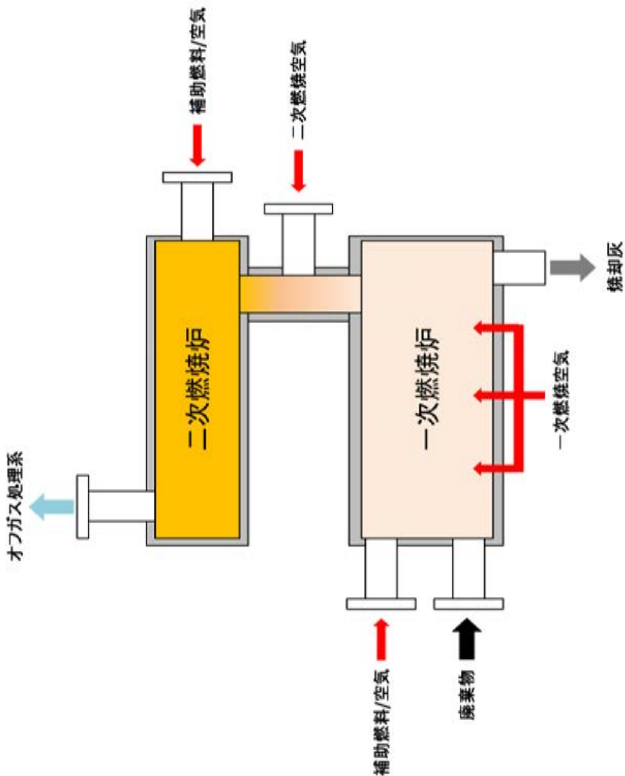
国名	サイト	処理量
オーストリア	ザイベルスドルフ	40 kg/h
スウェーデン	スタズビック	150 kg/h
スイス	ビューレンリンゲン	25 kg/h
日本	北海道電力 泊	75 kg/h
	東北電力 女川	50 kg/h
	東京電力 福島第一	100, 150 kg/h
	東京電力 福島第二	100 kg/h
	東京電力 柏崎刈羽	150 kg/h
	関西電力 高浜	75 kg/h
	関西電力 大飯	30 kg/h
	中国電力 島根	75 kg/h
	九州電力 川内	75 kg/h
	日本原子力発電 東海第二	100 kg/h
	RI 協会 盛岡	75 kg/h
	JAEA 大洗	100 kg/h

別表 22-1 焼却方式（続き）

過剰空気燃焼方式	
名称	流動床炉 22-3)
概要図	
説明	廃棄物と燃焼空気を流動材中（砂やアルミナなど）へ導入して、廃棄物のガス化・燃焼を行い、未燃ガスは二次燃焼炉で完全燃焼させる方式である。
実績	・米国（ロッキーフラッツ） 22-3, 4) - 処理量：80 kg/h ・米国（ナインマイルポイント、バイロン、ブレイドウッド、マクガイア） 22-4) - 処理量：92 kg/h

過剰空気燃焼方式	
名称	水冷ジャケット式堅型円筒炉 22-1)
概要図	
説明	基本的な構造は堅型円筒炉と同様であるが、炉床以外は水冷ジャケット構造となっており、炉壁温度を下げることで塩素含有難燃物（塩ビ、ゴム等）を焼却できる。
実績	・ JAEA（東海 PWTF） 22-2) - 対象：塩ビ、ゴム類 - 温度：約 500℃ - 圧力：工程室内より 4 kPa 負圧 - 処理量：5 drums/d - 減容比：約 20

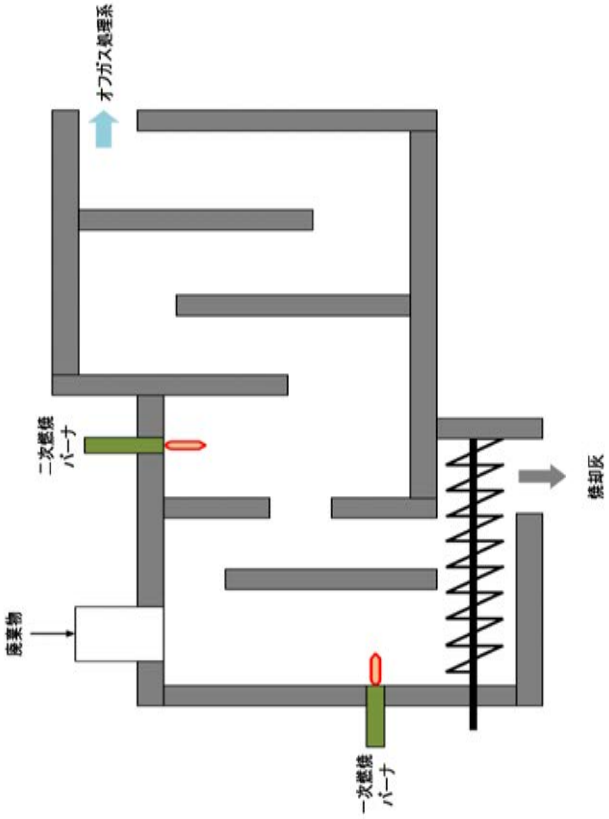
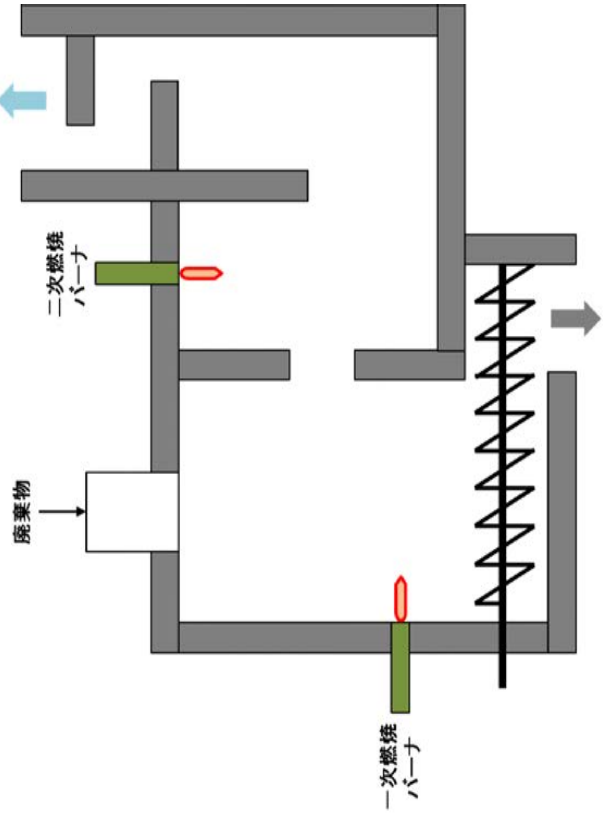
別表 22-1 焼却方式（続き）

名称	抑制空気焼焼方式	2 室炉 22-3)
概要図		
説明	廃棄物をキルン内でガス化・燃焼し、未燃ガスや排ガスを二次燃焼炉へ導入して残留有機成分を完全燃焼させる方式である。液体から大型固体廃棄物まで幅広い性状の廃棄物へ適用できる。	一次燃焼炉では抑制空気条件下で廃棄物の燃焼を行い、発生したガスを二次燃焼炉で完全燃焼させる方式である。
実績	・米国（ロッキーフラッツ、アイダホ研究所）^{22-3, 4)} 処理量：40 kg/h ・米国（オークリッジ研究所）²²⁻³⁾ 対象：PCB、ウラン含有廃棄物	・英国（ウィンズケール）²²⁻⁴⁾ 対象：Pu 含有廃棄物 処理量：5 kg/h

別表 22-1 焼却方式（続き）

名称	縦型 3 室炉（Vatan 炉） ²²⁻¹⁾	横型 3 室炉（Melox 炉） ²²⁻¹⁾
概要図		
説明	固定式の炉底上で、抑制空気条件で廃棄物の燃焼を行い、発生したガスは上方の 2 室炉で燃焼させる方式である。	火格子炉を抑制空気条件で運用する方式である。基本的な構造は過剰空気燃焼方式の火格子炉と同様である。
実績	・フランス（ムネ・シュル・ヴァタン）²²⁻¹⁾ 対象：PVC、ポリエチレン、紙、綿、木、不燃物 温度：850～1,000℃（一次燃焼）、1,050～1,100℃（二次燃焼） 処理量：50 kg/h	・フランス（メロックス）²²⁻¹⁾ 対象：MOX 燃料プラントのα廃棄物（PVC、ネオプレン） 温度：800～1,000℃（一次・二次燃焼） 処理量：20 kg/h

別表 22-1 焼却方式（続き）

名称	抑制空気燃焼方式	
概要図	 横型多段室炉（シルババ） 22-1)	 横型多段室炉（セントラコ炉） 22-5)
説明	二次燃焼バーナより後段には炉室が多数配置されており、ガスの滞留時間を確保して未燃ガスを完全燃焼させる方式である。	二次燃焼炉の炉室の配置が異なる他は、基本的な構造はシルババと同様である。
実績	・ベルギー（シルババ処理施設） 22-1, 5) 対象：固体、液体、イオン交換樹脂（PVC含有率；平均3%） 温度：900～950℃（一次燃焼）、1,050℃（二次燃焼） 処理量：固体 80～100 kg/h、液体 50 kg/h	・フランス（セントラコ廃棄物処理施設） 22-1, 5) 対象：発電所可燃物（塩化物含有率<5%、硫黄含有率<11%） 温度：900～950℃（一次燃焼）、1,050℃（二次燃焼） 処理量：固体 620 kg/h、液体 300 kg/h

別表 22-2 国内外の焼却炉導入実績 22-4, 5, 6, 7)

国名	サイト	炉形式	対象物	処理能力
インド	バーバ原子力研究所	—	—	50 kg/h
	カダラッシュ	縦型 2 室炉	—	30 kg/h
フランス	フォントネ・オ・ローズ	2 段炉	動物屍体	50 kg/h
	マルクール	2 段炉	—	80 kg/h
イタリア	カサッチア	縦型 2 室炉	—	20 kg/h
日本	JAEA (東海 再処理)	—	—	400 kg/d 20 kg/d
	JAEA (東海 高減容)	抑制空気固定床炉	PVC、ゴム、セルロース、ポリエチレン	130 kg/h
オランダ	コブラ	—	液体廃棄物 動物屍体	60 kg/h Solid 40 L/h Liquid
ロシア	ラドン	—	—	100 kg/h Solid 20 L/h Liquid
スロバキア	ボフニチェ原子力発電所	—	—	50 kg/h Solid 10 kg/h Liquid
スペイン	エル・ガブリエル処分場	—	—	50 kg/h Solid 50 kg/h Liquid
英国	ヒンクレーポイント	横型過剰空気炉	—	70 kg/h

別表 22-2 国内外の焼却炉導入実績 22-4, 5, 6, 7) (続き)

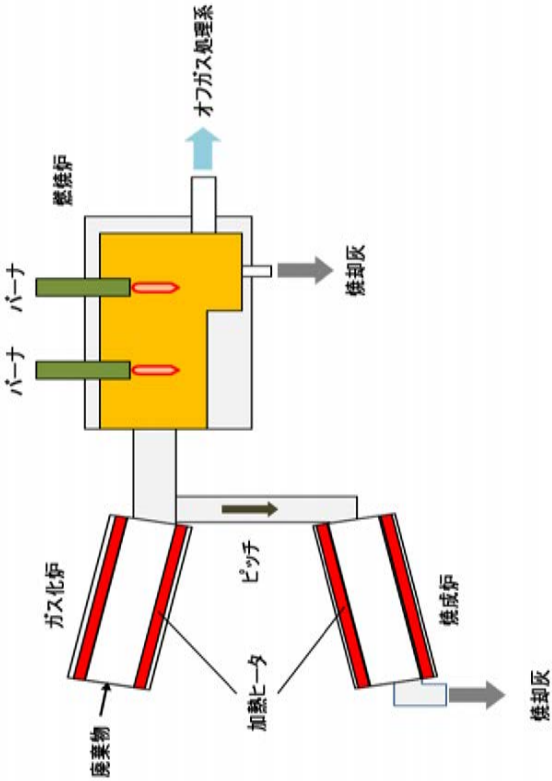
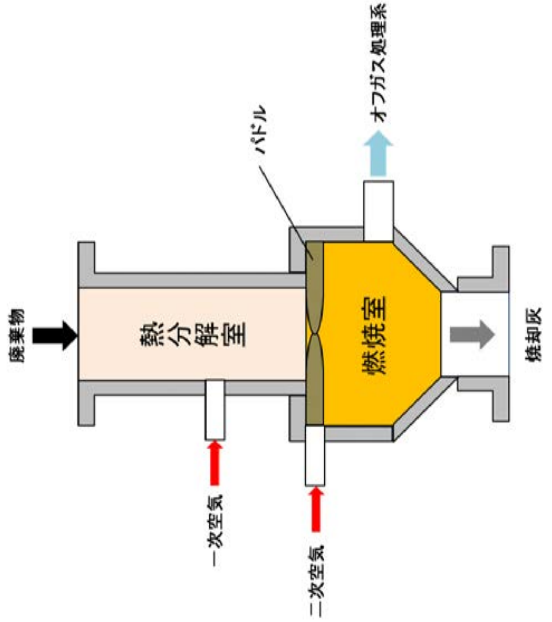
国名	サイト	炉形式	対象物	処理能力
ウクライナ	ザポリージャ原子力発電所	—	—	40 kg/h Solid 20 kg/h Liquid
米国	ロッキーフラッツ	揺動炉	—	100 kg/h
	サバンナリバー	—	Purex 廃溶媒、低レベル混合廃棄物	400 kg/h Solid 450 kg/h Liquid
	オークリッジ	—	—	約 400 kg/h × 2 基

参考文献

- 22-1) 中山準平, 杉本雅彦, 放射性廃棄物処理プロセスの調査 調査報告書, JNC-TJ 8420 2000-007, 1999, 104p.
- 22-2) 福井雅裕ほか, プルトニウム廃棄物処理開発施設の概要と減容・安定化処理の運転実績, デコミッションング技報 第29号, 2004, pp. 2-12.
- 22-3) IAEA, Status of Technology for Volume Reduction and Treatment of Low and Intermediate Level Solid Radioactive Waste, Technical Reports Series No. 360, 1994.
- 22-4) IAEA, Treatment of Low- and Intermediate-Level Solid Radioactive Wastes, Technical Reports Series No. 223, 1983.
- 22-5) IAEA, Application of Thermal Technologies for Processing of Radioactive Waste, IAEA-TECDOC-1527, 2006.
- 22-6) 山内孝道ほか, 東海再処理施設の安全性確認に関する報告書 (業務報告), JNC-TN8440 99-002, 1999, 366p.
- 22-7) N. Nakashio, *et al.*, Trial Operation of the Advanced Volume Reduction Facilities for LLW at JAEA, J.Nuc.Sci.Tech., Vol. 44, No. 3, 2007, pp. 441-447.

技術 No.	23	ガス化処理		前処理	処理能力及び処理物特性	適用性評価
プロセス概要	適用廃棄物	空気を遮断した状態で廃棄物を加熱し、ガス化・減容する手段である。 難燃性雑固体（プラスチック、塩ビ、ゴム類等）		処理時に問題となる物（スプレー缶や水分を多く含むもの）は予め取り除いておく必要がある。		
プロセスフロー または 機器概要図 ^{23-1, 2)}		①処理条件 温度：500～600℃ ²³⁻²⁾ 空気比：0.5 程度 ²³⁻¹⁾ ②処理能力 各方式によって異なる。 詳細は別表 23-1 参照 ③処理物の性状 無機物（ピッチ、タール等）				
		①技術成熟度（実績等） 国内外で実績多数 詳細は別表 23-1 参照 ②操作安全性 可燃性ガスが滞留しやすいため、爆燃対策が必要となる。 ③保守性 加熱するため燃料費などがかなり処理コストが高い。 耐火物など設備の建設・維持にかかるコストが高い。 ④二次廃棄物発生量 処理設備の耐火物など難処理の二次廃棄物が発生 ⑤事故廃棄物特有事項（有害物、有機物等）に対する適用性 加熱処理のため、有機物等は分解できる。				
		特記事項				

別表 23-1 ガス化方式

熱分解方式	
名称	熱分解ガス化焼却炉 ²³⁻¹⁾
概要図	
	
	23-1)を参考に作成
説明	廃棄物をガス化する炉、未燃ガスを完全燃焼させる炉及び残渣に未燃成分を燃焼させる炉の独立した3炉を用いる手法である。
実績	・ フランス (ヴァルドック) ²³⁻¹⁾ - 対象 : α 廃棄物 (PVC、ゴム類、セルロース、ポリエチレン) - 温度 : 550°C (窒素雰囲気熱分解)、$900\sim 1,000^{\circ}\text{C}$ (二次燃焼) - 処理量 : 7 kg/h ・ カナダ (ブルース原子力発電所、チヨークリバー) ²³⁻³⁾ - 処理量 : $2,270\text{ kg/batch}$ (ブルース原子力発電所) $1,135\text{ kg/batch}$ (チヨークリバー) ・ ドイツ (ユーリッヒ研究所) ²³⁻³⁾ - 処理量 : 100 kg/h ・ 日本 (JAEA ふげん) ²³⁻¹⁾ 酸素濃度約 10%の雰囲気熱分解

別表 23-1 ガス化方式（続き）

熱分解方式	
名称	スラグ焼却炉 23-4)
概要図	
説明	炉上部から廃棄物を投入し、150℃程度で熱分解させる。発生したガスは二次燃焼炉で完全燃焼させ、炉底へ落下した固形分はプラズマバーナによってスラグ化される。
実績	・ベルギー（モル）^{23-3, 4)} 処理量：100 kg/h ・日本（実証規模）²³⁻⁴⁾ 処理量：120 kg/h ・ロシア（ザゴルスク）²³⁻⁴⁾ 温度：約 150℃（熱分解）、1,450℃（プラズマバーナ） 処理量：60 kg/h（パイロットプラント）、200 kg/h（計画） 装置規模：3 m（炉高）、0.12 m²（炉断面積） 処理物組成：金属 20%、石材 15%、スラグ 20～30%、密度 1.4～1.7

参考文献

- 23-1) 中山準平, 杉本雅彦, 放射性固体廃棄物処理プロセスの調査 調査報告書, JNC-TJ 8420 2000-007, 1999, 104p.
- 23-2) IAEA, Application of Thermal Technologies for Processing of Radioactive Waste, IAEA-TECDOC-1527, 2006.
- 23-3) IAEA, Treatment of Low- and Intermediate-Level Solid Radioactive Wastes, Technical Reports Series No. 223, 1983.
- 23-4) IAEA, Status of Technology for Volume Reduction and Treatment of Low and Intermediate Level Solid Radioactive Waste, Technical Reports Series No. 360, 1994.

This is a blank page.

国際単位系 (SI)

表 1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質량	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表 2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立方メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比体積	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 ^(a) , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率 ^(b)	(数字の) 1	1
比透磁率 ^(b)	(数字の) 1	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。

(b) これらは無次元量あるいは次元 1 をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の 1 は通常は表記しない。

表 3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(c)	1 ^(b)	m ² /m ²
周波数	ヘルツ ^(d)	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m kg s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ kg s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m ² kg s ⁻²
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C		s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ⁻² kg ⁻¹ s ⁴ A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻²
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V	m ⁻² kg ⁻¹ s ³ A ²
磁束	ウェーバ	Wb	Vs	m ² kg s ⁻² A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg s ⁻² A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² kg s ⁻² A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光束度	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd
照射度	ルクス	lx	lm/m ²	m ⁻² cd
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	m ² s ⁻²
酸素活性化	カタール	kat		s ⁻¹ mol

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。

(b) ラジアンとステラジアンは数字の 1 に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の 1 は明示されない。

(c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。

(d) ヘルツは周期現象についてののみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてののみ使用される。

(e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。

(f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。

(g) 単位シーベルト (PV, 2002, 70, 205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表 4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘着力のモーメント	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
表面張力	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² =s ⁻²
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
比エネルギー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電荷密度	ジュール毎平方メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
表面電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
誘電率	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
透磁率	ファラド毎メートル	F/m	m ⁻³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²
モルエネルギー	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
吸収線量率	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
放射線強度	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射輝度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ m ⁻² kg s ⁻³ =m ² kg s ⁻³
酵素活性濃度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² sr)	m ² m ⁻² kg s ⁻³ =kg s ⁻³
	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ⁻³ s ⁻¹ mol

表 5. SI 接頭語

乗数	名称	記号	乗数	名称	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ⁻¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表 6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60 s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	′	1′=(1/60)°=(π/10 800) rad
秒	″	1″=(1/60)′=(π/648 000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1 L=1 l=1 dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ kg

表 7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位で表される数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m

表 8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1 MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322 Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1 nm=100 pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852 m
バイン	b	1 b=100 fm ² =(10 ¹² cm) ² =10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600) m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的な関係は、 対数量の定義に依存。
ベレル	B	
デシベル	dB	

表 9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1 Pa s
ストークス	St	1 St=1 cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1 cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻²
フオット	ph	1 ph=1 cd sr cm ⁻² =10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1 cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1 Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(a)	Oe	1 Oe Δ (10 ³ /4 π) A m ⁻¹

(a) 3 元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 Δ 」は対応関係を示すものである。

表 10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1 cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	f	1 フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1 メートル系カラット=0.2 g=2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カロリ	cal	1 cal=4.1858 J (「15°C」カロリ), 4.1868 J (「IT」カロリ), 4.184 J (「熱化学」カロリ)
ミクロン	μ	1 μ=1 μm=10 ⁻⁶ m

