

# 放射性固体廃棄物処理プロセスの調査

## 調査報告書

(核燃料サイクル開発機構 契約業務報告書)

1999年12月

株式会社 神戸製鋼所

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:

Technical Cooperation Section,

Technology Management Division,

Japan Nuclear Cycle Development Institute,

4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184,

Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)

1999

1999年12月

## 放射性固体廃棄物処理プロセスの調査

中山準平\*、杉本雅彦\*

### 要 旨

サイクル機構に貯蔵管理されている雑固体廃棄物の処理方法の選定に資するため、溶融処理を中心とした固体廃棄物の減容安定化処理技術の国内外の動向を調査した。

このうち、溶融処理プロセスについては、調査結果をもとに、溶融方式およびオフガス処理方式を分類・整理するとともに、各溶融方式に対して一定の条件を設定して処理処分コストを試算し、以下の内容を明らかにした。

- (1) 放射性金属廃棄物の溶融処理は1980年代から行われているが、雑固体廃棄物の溶融処理は、スイスと日本で処理施設が計画中であるだけで、稼働実績は無い。
- (2) 現在、雑固体廃棄物の溶融処理としては、プラズマ溶融方式と高周波誘導溶融方式が開発されている。このうち、高周波誘導溶融方式は非導電性物質の加熱方法から4方式が存在しているため、開発中の溶融方式は5種類に大別される。
- (3) 各溶融方式に対して、公開されている処理能力と既存の処理施設のコスト内訳を用いて建設コストを概算した結果、施設建設コストが約70～95億円となった。
- (4) 200リットルドラム缶を処分容器と想定した場合、充填可能な溶湯の体積は溶湯受容器および補助加熱材料によって、約70～140リットルと2倍程度異なる可能性がある。

この充填効率処分コストに直接影響を与えるため、溶融方式の選定に際しては、正確な評価が必要である。

- (5) サイクル機構の固体廃棄物に溶融処理技術を適用する場合には、各事業所で大きく組成が異なる廃棄物を処理する必要性から、これらの組成を網羅した処理能力の評価が必要となる。また、発電所廃棄物とは核種組成が異なることから、廃棄体のインベントリ評価技術を確立しておく必要がある。

---

本報告書は、株式会社神戸製鋼所が核燃料サイクル開発機構の委託により実施した業務成果に関するものである。

機構担当部課室：東海事業所 環境保全・研究開発センター 環境保全部 技術開発グループ

\* 株式会社 神戸製鋼所 エンジニアリングカンパニー エネルギー・原子力センター プラント技術部

December, 1999

## The Study for Management Process of radioactive Solid Waste

Jumpei Nakayama\* Masahiko Sugimoto\*

### ABSTRACT

For the purpose of contributing to decide treatment method for solid waste stored by JNC, a series of investigation was conducted for domestic and overseas technologies about volume-reduction and immobilization of radioactive solid waste, focused on the melting technologies.

Based on the result of investigation, melting and off-gas treatment were classified and summarized based on the result of investigation. Treatment and disposal cost for each melting method were estimated under definite conditions. Followings are obtained

- (1) Melters for radioactive metal have been in operation since 1980's. On the other hand, melter for solid waste is under construction in Japan and Switzerland, never in operation.
- (2) Plasma arc melter and induction heat melter is developed for radioactive solid waste. They are classified into 5 method since there are 4 induction heat melter is developed.
- (3) Construction cost for each kind of melter are about 700~950 million yen, estimated by using open melting capacity and cost ratio of existing facility.
- (4) Volume of the molten waste to be filled up per disposal container, supposing 200liter drum, are about 70~140liter depends on the volume of receptacle and sub-heat material. Decision of the melter need detailed estimation of filling factor since they have large effects on disposal cost.
- (5) For adopting radioactive solid waste melter, it needs to estimate of melting capacity taking consideration into wide range composition of the JNC waste. In addition, it is necessary to develop estimating method of inventory for JNC waste since radioactivity composition is differ from that of nuclear power station.

---

This work was performed by Kobe Steel, Ltd. under contract with Japan Nuclear Cycle Development Institute.

JNC Liaison : Waste Technology Development Group, Waste Management Division,  
Waste Management And Fuel Cycle Research Center, Tokai Works.

\* Plant Engineering Department, Energy & Nuclear System Center, Engineering Company,  
Kobe Steel, Ltd.

## 目次

はじめに	1
1. 国内外の廃棄物処理技術開発動向調査	1
1.1. 調査範囲	1
1.2. 調査結果の概要	2
1.3 溶融技術の調査結果	6
1.3.1 溶融技術の適用分野	6
1.3.1.1 工業炉ハンドブックによる分類	6
1.3.1.2 廃棄物ハンドブックによる分類	6
1.3.2 溶融方式の分類	7
1.4 放射性固体廃棄物への溶融技術	8
1.4.1 稼働中および計画中の固体廃棄物溶融炉	8
1.4.1.1 稼働中の廃棄物溶融炉	8
1.4.1.2 計画中の廃棄物溶融炉	8
1.4.1.3 実プラント選定のための実証設備	9
1.4.2 開発中の溶融炉	10
1.4.2.1 プラズマ溶融炉	10
1.4.2.2 高周波誘導炉	11
1.4.2.3 コールドクルーシブル溶融炉	13
1.5 焼却技術の調査結果	14
1.5.1 焼却方式の分類	14
1.5.2 従来の可燃物焼却炉	14
1.5.3 難燃物焼却炉	14
1.5.4 近年の焼却炉の動向	15
1.5.5 難燃物焼却炉の整理	16
1.5.5.1 抑制燃焼方式	16
1.5.5.2 熱分解方式	17
1.6 圧縮技術の調査結果	18

2. 廃棄物処理技術の整理	-----	48
2.1 固体廃棄物溶融処理の概略プロセス	-----	48
2.2 溶融処理の要素技術	-----	50
2.2.1 雑固体廃棄物溶融炉の整理	-----	50
2.2.1.1 処理対象および処理能力	-----	51
2.2.1.2 炉の仕様	-----	52
2.2.1.3 前処理	-----	52
2.2.1.4 廃棄体性状	-----	53
2.2.1.5 オフガス量	-----	54
2.2.1.6 消耗品	-----	54
2.2.2 オフガス処理技術の整理	-----	56
2.2.2.1 二次燃焼技術	-----	57
2.2.2.2 ガス冷却	-----	57
2.2.2.3 HCl、SO <sub>x</sub> 処理	-----	58
2.2.2.4 NO <sub>x</sub> 、ダイオキシン処理	-----	60
2.2.2.5 エアロゾル除去	-----	61

3. サイクル機構の廃棄物を対象とした処理フローの整理	77
3.1 処理フローを構成する要素	77
3.2 対象廃棄物	77
3.2.1 溶融処理	78
3.2.2 二次廃棄物処理	78
3.3. コスト評価	80
3.3.1 コスト評価の前提条件	80
3.3.1.1 標準化処理能力	80
3.3.1.2 溶融炉の基数	81
3.3.1.3 炉の仕様	82
3.3.1.4 容器の仕様	82
3.3.1.5 オフガス処理設備	83
3.3.2 コスト試算結果	84
3.3.2.1 内装設備コストの試算	84
3.3.2.2 施設建設コストの試算	86
3.3.2.3 年間運転コストの試算	86
3.4 廃棄体発生量の試算	87
3.4.1 廃棄物の充填率の設定	88
3.4.2 各処理方式に対する廃棄物発生量	89
3.4.2.1 前提条件	89
3.4.2.2 廃棄物発生量	90
3.5 処分コストの試算	91
3.6 コスト因子	92
3.7. 技術課題の抽出	94
3.7.1 溶融処理技術の特徴	94
3.7.2 経済的成立性の確認	94
3.7.3 技術的成立性の確認	95

はじめに

核燃料サイクル開発機構では、再処理工場等の核燃料サイクル関連施設の運転により発生する放射性固体廃棄物を多量に保管・管理している。これらの放射性固体廃棄物は、可燃、難燃、不燃等に区分され、かつ多種多様の放射性核種を含んでいる。

放射性固体廃棄物については、処分を考慮した廃棄体化処理を進めるため、早急に廃棄物の処理から処分に至る合理的かつ総合的な管理計画の立案と技術確立が必要である。

本書では、放射性固体廃棄物の減容安定化処理として有望な溶融処理を中心として、関連技術を調査した結果を整理する。また、この結果をもとに、サイクル機構が保有する廃棄物に対して有効な処理プロセスの評価および実用化に際して必要な技術課題の抽出を行う。

## 1. 国内外の廃棄物処理技術開発動向調査

### 1.1 調査範囲

国内外の研究機関、メーカ、電力会社等における放射性固体廃棄物の減容・安定化技術に対して、

- (1) 対象廃棄物及び関連処理技術
- (2) プロセスの開発段階
- (3) 処理コスト
- (4) 技術課題等

を公開文献等をもとに調査した。調査は次の手段で実施した。

- ① JICSTによる文献検索（1990年以降）
- ② 原子力学会予稿集（1990年以降）
- ③ 国際会議の予稿集
  - ・ ICEM '93、'95、'97、'99
  - ・ WASTE MANAGEMENT '90～'99
  - ・ Global '93、'95、'97、'99

なお、ICEMは89年から、Globalは93年からそれぞれ国際会議が始まっており、どちらも隔年ごとに開催されている。WASTE MANAGEMENTは毎年開催されている。



- 4) 関連企業、機関のホームページ
- 5) メーカー技術資料およびカタログ

これに加えて、要素技術の分類や周辺技術をとりまとめた各種ハンドブックを活用した。

## 1.2. 調査結果の概要

1.1の範囲で調査した結果について、国別に概要を示す。

### (1) スイス

スイスには4つの発電サイトがある。固体廃棄物の処理としては、各発電所ごとに減容処理施設を持たずに一カ所で集中処理することが合理的であると判断しており、PSI集中処理施設にて可燃物の焼却処理が集中的に実施されていた。ZWILAG処理施設は老朽化が進んだPSIの代替として計画され、4発電所が発電量に応じて分担出資しており、施設の場所も4サイトからほぼ等距離になる場所を選定している。

ZWILAG処理施設においては、回転炉床式プラズマ炉が採用されている。図1-1に、炉の概略図と建家の建設コストを示す。プラズマ炉の設置されるIncineration plantは、107Millionスイスフラン（1スイスフランを65円とすると、約70億円）である。ただし、廃棄体化、および廃棄体の貯蔵庫などは別建家であり、コストには含まれていない。

施設の建設は1995年から始まっている。ICEM'99における99年1月時点での情報では、99年10月にコールド試運転を開始予定であったが、間に合わないとの記載があり、1999.12.16付けのNucleonics Weekには、

- ・ スイス連邦政府の運転許認可発給 2000年3月予定
- ・ 廃棄物受入 2000年前半予定

となっており、施設は稼働していない。

### (2) 日本

日本では、各原子力施設ごとに減容処理施設を保有しており、可燃物は70年代から焼却が行われ、大きな減容効果を挙げている。一方、難燃物および不燃物は圧縮するか、無処理のままドラム缶で貯蔵されている。発電所サイトでは不燃物を溶融するプロセスが検討され、90年には東京電力福島第一発電所で高温焼却炉による不燃物溶融処理が開始された。

採用された高温焼却炉の概略を図1-2に示す。本炉は、都市ゴミ焼却炉に使用する表面溶融炉（溶融物が焼却灰の表面を流れることからの命名であり、フィルム溶融炉とも呼ばれている）と同じ技術であり、不燃物と可燃物を混合して焼却することにより発生する熱に加えて、バーナーで補助加熱を行うことで溶融を行っている。本方法では溶融に際して必ず一定量の可燃物が必要であることから、現在は運転を行っていないようである。

一方、ドラム缶等で保管されている難燃物、不燃物の廃棄体化に向けた雑固体の溶融処理が国内発電サイト、研究機関で検討されており、一部の計画が公開されている。

### (3) フランス

フランスでは、マルクルのガス炉解体を契機に1992年から1994年までINFANTE Plantにて溶融が行われた。INFANTEはフランス語で「子供」という意味であることから、本炉は小規模試験炉であることが分かる。本炉は放射性廃棄物の溶融炉としては唯一のアーク炉であり、溶融時に火柱が上がり、閉じこめが容易で無いことなど、作業環境に課題があった。

この後、COGEMA（仏核燃料公社）とEDF（仏電力庁）は49：51の資本比率でSOCODEI社を合弁で設立し、INFANTE Plantと同じマルクルに低レベル廃棄物の集中処理およびリサイクルを行うためにCENTRACO集中処理施設を建設した。

CENTRACOには、金属廃棄物リサイクルのための高周波誘導炉と可燃物、液体廃棄物を処理するための焼却炉が設置されている。本施設の概要について資料1-1に示す。CENTRACO施設の稼働状況について、RECOD'98では98年中に廃棄物を受け入れ、処理を開始すると記載があるが、その後の発表が無いことから、CENTRACOサイトへ直接状況を問い合わせた。この結果、99年に処理を開始し、焼却、溶融とも900トンの処理を行ったとの回答を得た。

焼却技術としては、 $\alpha$  廃棄物（難燃物）の処理として2種類の焼却炉が稼働している。Cadaracheにあった可燃物焼却炉は、難燃物対応を含めて1989年に大幅に改造された。抑制空気燃焼で難燃物の燃焼制御を行うために、一次燃焼室には空気量調整機能が付加され、二次燃焼室以降は大幅に改造され、二次燃焼能力の増強が図られている。また、MELOXプラントには、前述の経験を生かして、可燃物焼却炉として設置されていた火格子炉をベースにした抑制燃焼方式の横型炉が設置され、稼働中である。

これらの商用規模の焼却炉に対して、VALDUC研究センターでは廃棄物を熱分解してガスとピッチに分けてそれぞれを燃焼させる”IRISプロセス”を独自に開発しており、7kg/hと処理量は小さいものの順調に稼働している。

また、フランスはロシアと並んでコールドクルーシブル溶融炉の開発に意欲的である。現在、CEAにより直径550mmの炉が製作され、本技術の用途開発が実施されている。

#### (4) ドイツ

ドイツのSiempelkampでは、1982年に世界で始めて放射性廃棄物の溶融を開始した。本溶融炉は、原子力発電所から受け入れた金属廃棄物を再利用するのが目的であり、1995年9月の段階で約8,000トンの金属を溶融処理した。処理された金属は原子力分野に限定して再利用が行われている。主要な製品は、砂型鑄造した廃棄物容器（商標名：モザイク）が約3,000トン、遮蔽材が約4,000トン（その他が100～200トン程度）である。

#### (5) スウェーデン

スウェーデンのStudsvik社では、ドイツに次いで1987年から金属廃棄物の溶融処理を行っている。溶融は高周波誘導炉2基により行われており、ここ数年間の年間処理量は約500～800トン、これまでの処理実績は4,000～5,000トンである。Siempelkampで溶融処理された金属が原子力分野で限定再利用されているのに対して、Studsvikでは大部分が一般工業用スクラップとして無拘束再利用されている。

#### (6) ベルギー

ベルギーではCILVA処理施設において、国内の発電所からの固体廃棄物を受け入れて集中処理を行っている。同施設では、可燃物および難燃物を一括で焼却し、不燃物については、圧縮できるものは圧縮し、焼却も圧縮もできないもの（コンクリートなど）は未処理のままとしている。

#### (7) イギリス

イギリスでは現在、固体廃棄物を全て圧縮により減容処理しており、焼却処理は行われていない。処理された廃棄物はすべて、Drigg処分場へ持ち込まれている。

焼却処理はダイオキシン問題から中断されているが、廃棄物の持ち込み先であるDrigg処分場の受入に十分余裕があり、減容処理に対する緊急度が少ないことも圧縮処

理を継続している一因であると考えられる。

(8) アメリカ

アメリカではDOEの施設を数社の民間企業が請け負って、除染、解体、廃棄物処理を行っている。この内、最大の業者はSEG社（Scientific Ecology Group,Inc）であった。同社は、低レベル放射性廃棄物処理を専門に1986年に操業を開始したが、1997年にGTS Duratek社（1984年設立のGeneral Technical Service社と1983年設立のDuratek Cooperationの合併により1990年に設立）に吸収合併されている。現在は、GTS Duratek社がアメリカ最大の処理メーカーである。

GTS社では、Envikraft社（デンマーク）の焼却炉を用いて可燃物処理を実施している。また、同社では20トン処理が可能な7,200kwの高周波誘導炉による金属溶融（無拘束利用）も商業ベースで実施している。資料1-2にGTS社の処理概要を示す。

これらをまとめると、以下のことが分かる。

- (1) フランスのCENTRACO、スイスのZWILAG、ベルギーのCILVA、アメリカの民間企業など、海外では、各サイトからの廃棄物を集中処理施設で処理することで処理の合理化を図る傾向にある。
- (2) 廃棄物の溶融は、複数の国で実施されているが、雑固体廃棄物の溶融処理はスイスと日本で計画されている。

### 1.3 溶融技術の調査結果

放射性固体廃棄物の処理として、近年溶融処理技術が適用されている。ここでは、これらの廃棄物に適用されている溶融技術を確認するため、適用された技術を含めて一般産業界で使用されている溶融処理方法まで範囲を広げて技術进行分类、整理した。

#### 1.3.1 溶融技術の適用分野

溶融炉は、これまで主として金属精錬分野で使用されてきた（金属分野では通常、例えばチタン溶解などのように習慣的に「溶解」と呼ばれているが、内容は同じである）。また、溶融炉はとりわけプラズマ溶融炉が近年、都市ごみ焼却灰の処理技術として採用されている。両者は分野が全く異なることから、これらの溶融炉を統括的に分類する必要がある。

##### 1.3.1.1 工業炉ハンドブックによる分類（金属精錬中心）

同書では、一般産業に用いられている工業炉を「使用熱源の種類と加熱方式」で分類している。表1-1に分類表を示す。加熱炉は燃料加熱と電気加熱に分類されている。燃料加熱と電気加熱はそれぞれ以下の定義で直接加熱と間接加熱に細分類されている。

###### (1) 燃料加熱

燃焼火炎または燃焼生成ガスが直接被加熱材料に接する場合と間接的に伝達される場合

###### (2) 電気加熱

被加熱物に直接電流が流れることによって加熱が行われる場合と、電気ヒーターなど電気加熱によって発生した熱が被加熱物に移動することによって加熱される場合

##### 1.3.1.2 廃棄物ハンドブックによる分類（焼却灰、汚泥溶融固化）

廃棄物ハンドブックにおいては、国内で取り扱う廃棄物として都市ゴミ、産業廃棄物、特別管理廃棄物（医療廃棄物やPCBなど）について処理方法が解説されている。この中で、溶融処理は都市ゴミ焼却灰の固化処理、産業廃棄物としての汚泥処理の中で分類が行われている。都市ゴミ焼却灰および汚泥処理分野で適用されている溶融処理法の分類を表1-2に示す。

## (1) 都市ゴミ焼却灰

焼却灰およびばいじんの固化処理は、セメント固化方式、燃料溶融方式、電気溶融方式の3方式に分類されている。このうち、燃料溶融方式および電気溶融方式には以下の方法がある。

### ①燃料溶融方式

フィルム溶融炉、内部溶融炉、コークスベッド溶融炉、旋回流溶融炉が記載されている。このうち、フィルム溶融炉と内部溶融炉は溶融物の取り出し方が異なるだけである。

### ②電気溶融方式

電気アーク炉、電気抵抗炉、プラズマ溶融炉、電気加熱炉、低周波溶融炉が記載されている。電気抵抗炉と電気加熱炉は直接対象物に通電するか、容器外部で通電するかが異なっている。

## (2) 汚泥

汚泥の溶融には電気加熱式は用いられず、全て燃料溶融方式が行われている。

このため、分類は炉形式のみであり、表面溶融炉、旋回流溶融炉、コークスベッド溶融炉が記載されている。

### 1.3.2 溶融方式の分類

これらの分類からは、

- 1) 溶融方式の分類は加熱媒体により、燃料式と電気式に大別されている。
- 2) 直接加熱と間接加熱に分類している場合と炉形式で分類している場合がある。

直接加熱と間接加熱で分類する場合、直接加熱と間接加熱の定義が曖昧になる場合があることから、熱源と炉形式のみを用いて溶融炉の分類を行った。この結果を表1-3に示す。

なお、これらのハンドブックに記載の方式については、その共通性から、以下の整理をおこなった。

- ・フィルム（表面）溶融炉と内部溶融炉は溶融物の取り出し方が異なるだけであるため、一括して高温焼却炉としてまとめた。
- ・電気抵抗炉は直接対象物に通電する方法であり、電気加熱炉は間接加熱で直接通電は行わないものの、加熱方法は同じであるため抵抗加熱炉としてまとめた。

## 1.4 放射性固体廃棄物への溶融技術

表1-3の分類表に示したとおり、現在、プラズマ加熱と高周波誘導加熱が、放射性固体廃棄物の溶融処理へ適用されている。

ここでは、これらの溶融処理技術について整理する。

### 1.4.1 稼働中および計画中の固体廃棄物溶融炉

#### 1.4.1.1 稼働中の廃棄物溶融炉

放射性廃棄物の溶融は、1982年に世界ではじめてドイツのSiempelkampで開始された。その後、1987年にスウェーデンのStudsvikで溶融処理が開始され、1992年にアメリカ（SEG社、現在はGTS社）とフランス（INFANTE Plant）でそれぞれ処理が開始されている。フランスでは99年からCENTRACO炉でも処理が開始された。

これらはいずれも金属廃棄物の再利用を目的としたものであり、INFANTE Plantがアーク炉である以外は、すべて高周波誘導方式である。唯一アーク炉を採用しているINFANTE Plantはフランスに設置されているが、同じ地域に高周波誘導方式のCENTRACO炉が設置されていることから、アーク炉との比較によって高周波誘導炉が選択された可能性もある。

Siempelkamp及びStudsvikの溶融炉の仕様を資料1-3、1-4に示す。

また、フランスのCENTRACO炉の仕様を資料1-1に示す。

#### 1.4.1.2 計画中の廃棄物溶融炉

現在、計画中の溶融炉は、スイスZWILAGと、国内で計画中のプラズマ溶融炉、及び高周波誘導炉である。

##### (1) プラズマ溶融炉

ZWILAGおよび日本原子力発電敦賀発電所で計画されている溶融炉は、アメリカのRETECH社が技術開発を行い、スイスのMGC社（MOSER-GLASER Co.LTD）が実証炉を作製した回転炉床式プラズマ炉である。敦賀向け溶融炉の概略図を図1-3に示す。

本炉は炉底中心部が開口しており、溶融処理中は15～50rpmで回転することで遠心力によって溶湯を保持する。溶融処理後は、回転速度を落として開口部から出湯する。同社ではサイズの異なる溶融炉を製作しており、PACT-2、5、6、8（数字は炉内径を1/10インチ表示したものであり、PACT-8で2.1m）が存在する。

ZWILAG炉および原電敦賀炉ともPACT-8であるが、オフガス処理設備の構成には差異がある。

- ①放射性粒子の除去がZWILAGではHEPAフィルタのみであるのに対して、敦賀ではセラミックフィルタとHEPAフィルタの2段階除去を行っている。
- ②ZWILAGではスクラバで塩素、SO<sub>x</sub>などを除去したあとでHEPAフィルタを通して  
いるが、敦賀ではHEPAフィルタの後段にスクラバを設置している。

また、日本原子力研究所東海研究所にも放射性固体廃棄物の処理としてプラズマ溶融炉の導入が計画されており、現在設計が行われている。

## (2) 高周波誘導炉

複数の国内発電サイトにおいて、(株)日本ガイシによる坩堝型溶融炉が計画されている。施設の能力その他についての情報は公開されていないものの、実機ベースの試験機で行われた試験結果が学会で報告されている。

また、日本原子力研究所東海研究所にも放射性固体廃棄物の処理としてプラズマ溶融炉の他に高周波誘導炉の導入が計画されており、現在設計が行われている。高周波誘導炉は金属廃棄物の処理に、プラズマ溶融炉は金属以外の処理が行われる予定である。

### 1.4.1.3 実プラント選定のための実証設備

アメリカではDOEの軍事廃棄物(MIXED WASTE)の処理として、溶融固化が計画されている。これに関してDOEではRETECH社のプラズマ溶融炉を適用した開発を推進している。本計画は1998年のWaste Managementにて情報が公開されており(資料1-5)、回転炉床式の溶融炉とともに炉が回転しないタイプのものが並行で開発されている。



## 1.4.2 開発中の溶融炉

放射性廃棄物の溶融炉に対する開発は、実プラントと同様、プラズマ炉と高周波誘導炉に対して実施されている。その主要な分野の一つは日本国内での雑固体廃棄物溶融に対する適用であり、もう一つは次世代炉として開発中のコールドクルーシブル炉（CCIM）である。開発中の溶融炉を表1-5に示す。

### 1.4.2.1 プラズマ溶融炉

プラズマ溶融炉は表1-5で示したように、国内で3社が開発を行っている。このうち2社が実機を受注し設計、製作を行っている。

プラズマ溶融炉は高温のプラズマアークで加熱溶融するため、導電性物質に誘導電流を発生させて加熱を行う高周波誘導炉と異なり、どんなものでも加熱できる。このメリットを生かして、各社とも廃棄物をドラム缶ごと溶融することを大きな特徴として炉の設計を行っている。このため、ドラム缶内の廃棄物は、少なくとも炉の性状からは開缶選別する必要が無く、前処理負担はほとんど発生しないことが最大のメリットである。各社の炉の特徴はプラズマトーチと出湯方法に大別される。

#### (1) プラズマトーチ

3社の溶融炉はいずれもDCアークプラズマトーチを採用している。このトーチには移行式（トランスファ方式）と非移行式（ノントランスファ方式）が存在し、それぞれ長所短所がある（詳細は表2-1に記載）。各メーカーはその設計思想にもとづいてトーチを選択しており、1社が非移行式（ノントランスファ方式）、他の2社は移行式（トランスファ方式）を採用している。

#### (2) 出湯方法

出湯方法は2方式が採用されている。1社は炉体を回転させる方式を採用している。この溶融炉は炉底中心に開口部があり、溶融中は炉体を回転させて遠心力で溶湯を保持し、回転速度を低下させて出湯する方式である。これに対して、他の2社は炉体を傾動させて出湯する方式を採用している。

3社とも重量のある炉体を回転または傾動させるなど、炉が可動する点が共通しており、トンオーダーの炉体可動を実現するために強力な駆動機構が必要になる。ただし出湯にバルブ類を用いていないため、溶湯の閉塞が生じにくい等のメリットがある。

### (3) 開発段階

各社とも1MWクラスのトーチを装備する実規模試験設備を保有しており、独自に各種模擬廃棄物进行处理している。3社のうち2社が実機を設計、製作中である。

#### 1.4.2.2 高周波誘導炉

高周波誘導炉は、炉外に設置したコイルに高周波電流を通電することで高周波磁場を発生させ、誘導電流により対象物を加熱する。このため、原理的には誘導電流の流れる導電性物質（金属）が対象となる。雑固体廃棄物にはコンクリートなどの非金属、すなわち非導電性物質も含まれることから、これらを溶融するためには補助加熱手段が必要となる。

国内では、表1-5で示した4社が開発を行っている。これら4社の処理方式の特徴は非金属成分の溶融方法に集約されるため、各社ごとの溶融方法を以下に述べる。なお、溶融方法の呼称は、その特徴から本書で定義したものであり、各メーカーが名付けたものではない。

#### (1) 溶融方式

##### ① プラズマ補助加熱型

本方式では、高周波誘導炉の炉頂にプラズマトーチを設置して、非金属成分の溶融を行っている。本炉の概略図を図1-4に示す。同社は補助加熱としてのプラズマトーチに、プラズマ溶融炉で使用されているDCアークプラズマではなく、無電極の誘導結合プラズマを採用し、保守頻度の低減を図っていることが特徴である。

なお、プラズマトーチによる補助加熱は金属精錬分野でも実施例があり、高周波誘導炉による金属溶解の際、溶湯上部が冷却され凝固してしまう現象（棚吊りという）の防止に活用されている。

##### ② 坩堝型

導電性坩堝を炉内に挿入し、高周波誘導炉で坩堝を加熱することで非金属成分を溶融する方式である。本炉の概略図を図1-5に示す。この坩堝は1バッチごとに使用し、溶融後は坩堝ごと廃棄体とする。このため、坩堝は肉厚が40mm程度あり、この体積分だけ廃棄体中に鑄込める溶湯の体積が減少するものの、溶湯が炉壁と接触しないため炉内耐火物の損耗がほとんど無いことがメリットになる。

### ③分別溶融型

非金属の溶融のために炉内にステンレス容器を充填する方法であり、導電性物質である金属と非導電性物質である非金属を分別して溶融するのが大きな特徴である。

本炉の概略図および溶融処理手順を図1-6に示す。ステンレス容器充填時は非金属成分のみを溶融、出湯し、続いて金属を溶融する。ステンレス容器は金属溶融時にともに溶融され、出湯されるため、ステンレス容器が溶湯に混入する。

非金属の溶融時には、ステンレス容器充填に伴い、処理温度をステンレスの融点以下に下げる必要があることから融点降下剤が投入され、これが溶湯に混入する。ただし、この際には炉内耐火物と非金属の溶湯が接することが無いため、耐火物の寿命が長くなることがメリットとなる。

### ④黒鉛充填層型

炉内に黒鉛を充填した層を形成し、この黒鉛を誘導加熱することで非金属成分を溶融する方式である。本炉の概略図を図1-7に示す。この方式はコークスベッド溶融法(黒鉛を充填して燃料を吹き込み燃やすことで溶融を行う方式)において、黒鉛加熱方法を誘導加熱に置き換えた方法と考えられる。

充填層の黒鉛は、誘導加熱によって燃焼するため、発熱分以外に燃焼熱が炉の加熱に寄与している。ただし、黒鉛は溶融の進行に伴ってガス化溶出するため、運転にあたって定期的な補充が必要となる。溶出した黒鉛は溶湯に混入し、廃棄物が増加することが、本方式のデメリットとなる。

#### (2) 出湯方法

出湯には、スライドバルブ、フリーズバルブが採用されている。スライドバルブは、出湯口に設置された板がスライドすることで出湯、出湯停止を行うものである。フリーズバルブは出湯口に誘導コイルを設置したものである。出湯口は溶湯が凝固することで塞がっており、誘導コイルに通電することで、凝固した溶湯が加熱溶融され、開口出湯される。

なお、坩堝型では坩堝ごと溶湯を取り出すため、いわゆる出湯操作は発生しない。

また、黒鉛充填層型は唯一連続出湯方式を採用しており、現状では出湯制御方法は明らかにされていない。

### (3) 開発段階

4社はいずれも試験設備を保有しており、坩堝型および分別溶融型は電源出力、炉サイズなどから実規模試験設備であることが分かる。なお、プラズマ補助加熱型、坩堝型は実機が設計製作されている。

#### 1.4.2.3 コールドクルーシブル溶融炉

コールドクルーシブル溶融炉（CCIM：Cold Crucible Induction Melter）は、高周波誘導炉の一種であり、炉壁を水冷銅としていることが特徴である。いわゆる高周波誘導炉は炉壁がセラミック性の耐火物で覆われていることから、特に区分した。

コールドクルーシブル溶融炉は耐火物を使用しないことから、通常の耐火物炉に比べて炉本体がコンパクトであること、炉壁の損耗を大幅に低減できることがメリットである。本炉はフランス、ロシア、日本で開発が行われており、炉のサイズも内径500mmレベルの実規模相当であることから、今後の実用化が期待されている。

なお、Cruibleは坩堝を意味するが、ここでは坩堝型溶融炉における「坩堝」と区別するために炉壁と記載した。

## 1.5 焼却技術の調査結果

### 1.5.1 焼却方式の分類

燃焼は、完全燃焼に必要な空気（理論空気量）に対する実際の空気の割合（空気比）によって、

- ①過剰空気燃焼
- ②抑制空気燃焼
- ③熱分解（乾留）

の3方式に大別される。実際の焼却処理においては、未燃焼ガスが炉外へ流出するために、炉本体の後段に二次燃焼器を設置し、完全燃焼を実施している。即ち、焼却炉は3方式の一次燃焼と過剰空気燃焼による二次燃焼の組み合わせで構成される。

焼却方法の分類について表1-6にまとめた。

### 1.5.2 従来の可燃物焼却炉

可燃性固体廃棄物の焼却処理は、1970年代から行われている。

最も歴史があるのは、ドイツで開発された豎型円筒焼却炉とフランスで開発された火格子式焼却炉である。豎型円筒焼却炉を図1-8に、火格子式焼却炉を図1-9に示す。

豎型円筒焼却炉は、空気比2~3以上の過剰空気燃焼で可燃物を焼却し、排ガスの二次燃焼をセラミックフィルタで行っている。焼却炉本体が単純な円筒構造であること、セラミックフィルタを用いたことで排ガスの高温処理が行えることから注目を集めた。1976年から始まった国内発電所での焼却は、ほぼ全てがこのタイプの炉で行われている。

火格子式焼却炉は、横型の2室炉である。一次燃焼室の下部には火格子があり、ここから廃棄物に十分な空気を供給（過剰空気燃焼）して完全燃焼を行う。二次燃焼室にはSiCが充填されており、高温に維持されている。燃焼排ガスはSiC充填層で二次燃焼されるとともに、ダストの除塵も行える。

### 1.5.3 難燃物焼却炉

#### (1) 熱分解炉

ゴム、プラスチック類といった難燃物は、燃焼に伴って可燃性分解ガスが大量に発生するため、急激な燃焼を制御できないことや、分解ガスの二次燃焼能力が不足して

いることなどにより、従来は処理対象外とされてきた。

難燃物処理を目的とした焼却炉としては、1976年にドイツのユーリッヒで熱分解焼却炉が最初に開発された。図1-10に熱分解炉の概略を示す。本焼却炉では、一次燃焼を空気を遮断した熱分解（酸素濃度約10%）とし、分解ガスを燃焼室で過剰空気燃焼している。国内では動燃（現サイクル機構）ふげん発電所に設置されており、1989年に運転を開始している。本炉では、熱分解に必要な酸素の供給源として、燃焼室からの排ガスを環流している。酸素の供給源として外気を用いると、炉内の温度が低下して効率が下がるため、熱効率向上の観点から採用されている。

なお、熱分解炉の一般的な特徴は、オフガス量を低減できるメリットがある反面、可燃性分解ガスが滞留しやすいため、爆燃対策が必要になることである。

## (2) 抑制空気燃焼炉

1980年代後半には、空気比を1近辺に制御しながら燃焼を行う抑制燃焼炉が建設され、国内で2基が稼働している。このタイプの炉では、一次燃焼室で空気比1以下で抑制燃焼を行い、燃焼ガスを二次燃焼室で過剰空気完全燃焼させている。本方式は熱分解炉と異なり、可燃物焼却炉の空気比制御を変更することで対応可能なことから、フランスでは既存の火格子式焼却炉を改良して難燃物への対応を行っている例もある。

### 1.5.4 放射性廃棄物焼却炉の動向

放射性廃棄物の焼却炉として、従来は処理対象外であった塩化ビニルの焼却処理を念頭に置いた難燃物焼却炉が実用化されつつある。また、一般の焼却炉と同様に、近年規制が厳しくなったダイオキシンや、その他の排ガス処理対策が盛り込まれている。

難燃物の焼却に対しては前項に示したように、

一次燃焼 : 難燃物を空気比1以下で燃焼速度を制御しながら抑制燃焼させて  
灰化

二次燃焼 : 分解ガスを多量に含む排ガスを過剰空気により完全燃焼する方法が主体となっている。一次燃焼としては熱分解方式を採用する炉もあるが、タール分の処理を行うため、設備構成は複雑になる。

塩化ビニルの焼却処理に際しては、塩素に対する腐食性を考慮した配管材料（ライニング配管やハステロイなどの高耐食性配管）の使用や、運転停止時の炉および配管の保温機能（水分凝結の抑止）の設置など、設備寿命への配慮が必要になる。

ダイオキシン対策としては、高温燃焼（800℃以上で2秒以上の滞留）及びガスの急冷（200℃以下）が国内のガイドラインとして設定されている。実際には、温度が高いほど、ダイオキシンの発生が抑制されることから、海外では1000～1200℃の燃焼温度に設定しているケースが多い。

### 1.5.5 難燃物焼却炉の整理

難燃物焼却炉にはこれまで述べたように、抑制空気燃焼方式または熱分解方式が採用されている。ここでは、現在稼働中の難燃物焼却炉を形式毎に整理した。表1-7に難燃物焼却炉の一覧を示す。

#### 1.5.5.1 抑制燃焼方式

フランスおよびデンマーク製のものが世界各国で稼働している。

フランスではCEAが開発した焼却炉を、傘下のTECHNICATOME社、SGNが実用化して横型、縦型の3室炉として製作している。3室は一次燃焼、二次燃焼および空気希釈室から構成されており、燃焼ガスの冷却はすべて空気希釈方式を採用している。これらは微妙に形状が異なるものの、設計思想は全て同じである。

デンマークではENVIKRAFT社が多段室炉を製作している。燃焼そのものは3室炉と同様、一次燃焼、二次燃焼室であるが、二次燃焼室が多室になっていること、ガス冷却に熱交換器を使用していることが特徴である。

#### ①横型3室炉

##### 1) CADARECHE炉（CEA-TECHNICATOME社）

過剰空気燃焼炉の一次燃焼室に空気量調整機能を付加され、抑制燃焼型に改造された。また、二次燃焼室以降は燃焼能力増強のため、大幅に改造され、排ガス冷却のために空気希釈室が追加され、3室炉になった。二次燃焼室にはSiCを充填されており、荒い粒子に対する除塵効果を持たせてある。

##### 2) MELOX炉（SGN）

横型3室炉であり、 $\alpha$  廃棄物の焼却を行っている。1) で改良されたCADARECHE炉がベースであり、構造はほぼ同様であるが、灰取り出し方法は火格子を傾動するタイプである。図1-11に本焼却炉の概略図を示す。

#### ②縦型3室炉（TECHNICATOME社）

横型3室炉と同じ機能を縦型で実現した。2段の燃焼室と空気希釈室（ガス急冷機能）を持つ。SiC充填層は採用していない。図1-12に本焼却炉の概略図を示す。

### ③横型多段室炉

#### 1) CILVA炉 (ENVIKRAFT社 TYPE EK250)

図1-13に本焼却炉の概略図を示す。

一次燃焼は900～950℃で行っており、空気比は不明である。文献には燃焼と熱分解の複合と記載されており、抑制燃焼であると考えられる。二次燃焼は過剰空気燃焼であり、1050℃で2秒滞留させている。二次燃焼室には複数の仕切が設けられており、滞留時間を確保するための手段であると推定される。ガス冷却は3列の熱交換器で行い、200℃まで冷却される。

#### 2) CENTRACO炉：(ENVIKRAFT社 TYPE EK1500)

フランスの集中処理施設の可燃物焼却炉である。詳細な情報は公開されていないが、PVCは5%に制限されている。

#### 3) GTS Duratek炉：(ENVIKRAFT社 TYPE EK980)

同社は、DOEの廃棄物を請け負って集中的に処理を行うアメリカの最大手企業であり、アメリカで唯一の低レベル放射性廃棄物用の焼却炉を2基所有している。

処理対象物の内訳その他は公表されておらず、焼却炉のタイプのみがホームページで公開されている (<http://www.gtsduratek.com>)。

### 1.5.5.2 熱分解方式 (独立型3室炉)

ドイツユーリッヒの熱分解炉 (ふげんにて運転中) 以外に、フランスのVALDUC研究所で開発されたものがある。本炉は焼却プロセスを独立の3室で実施していること、炉を電気ヒータで加熱していることが大きな特徴である。本炉の概略を図1-14に示す。

1段目は550℃、5秒間で熱分解を行い、難燃物をピッチと熱分解ガスに分解する。ピッチは高酸素濃度下で900℃で燃焼し、灰化させる。熱分解ガスとピッチ燃焼ガスは1100℃で過剰空気燃焼により完全燃焼する。



## 1.6 圧縮技術の調査結果

雑固体廃棄物の圧縮処理は各国で実施されているものの、圧縮装置および圧縮施設についての情報公開は近年ほとんど行われていない。表1-8に各国で使用されている雑固体廃棄物圧縮装置についてまとめたものを掲載する。この表に記載されているように、多くの圧縮機の圧縮力は1,000～2,000トンレベルである。

なお、福島第一発電所に1989年に設置された圧縮装置は、テーパー状に圧縮する1軸3次元圧縮を採用していることが特徴である。

通常、圧縮処理はピストンと金型による単純な一軸圧縮で行われる。圧縮力が鉛直方向にかかるため、この方向の寸法は減少する。径方向については金型で規制されている。ところが、圧縮後の対象物は、圧縮直後に比べて、高さ、直径ともに若干増加する、いわゆるスプリングバック現象が発生する。200リットルドラム缶に充填された廃棄物をドラムごと圧縮して、再度200リットルドラム缶に充填するという要求に従うと、そのままでは200リットルドラム缶には充填できない。そこで、1980年代に国内では縮径機構を有するドラム缶圧縮装置の開発が行われた。図1-15に縮径機構を示す。

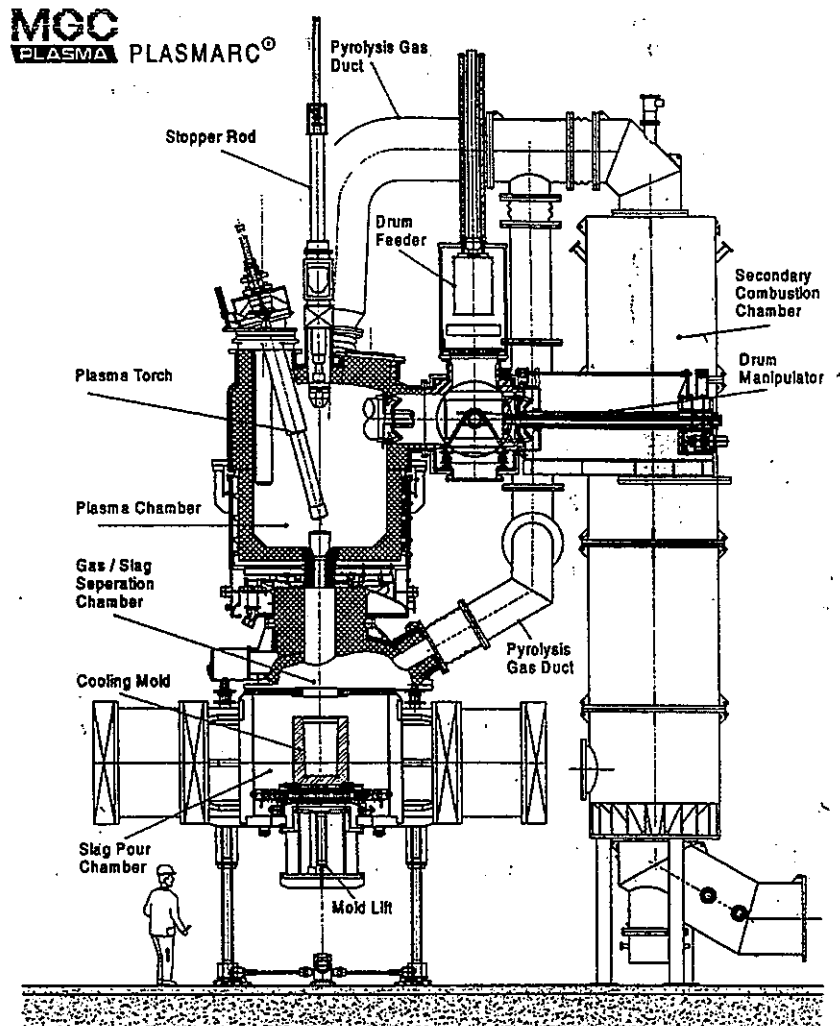
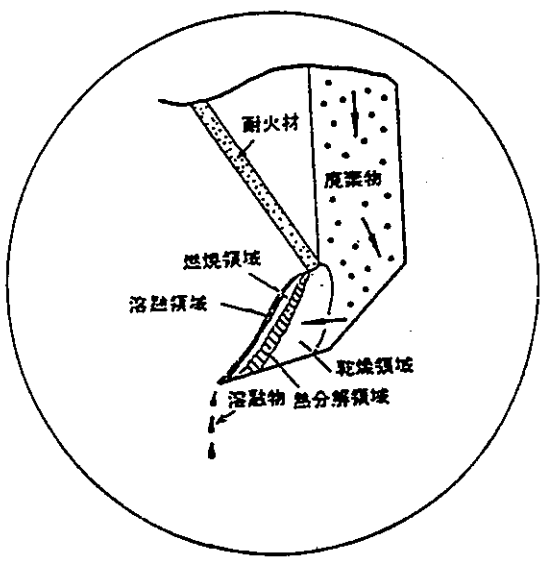
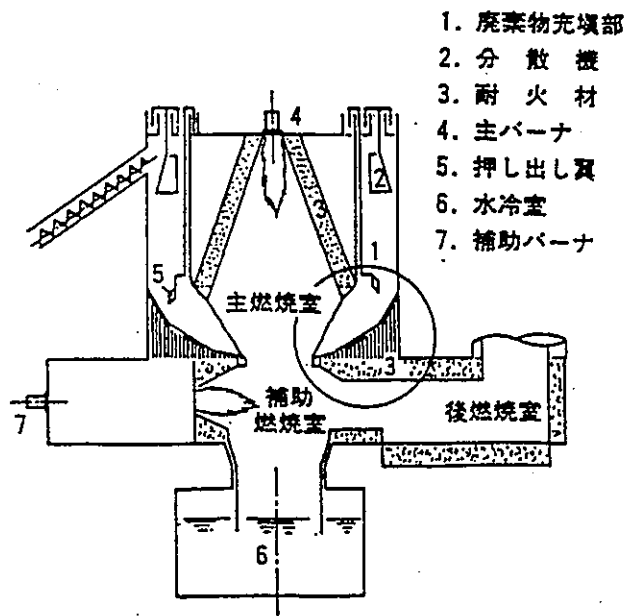
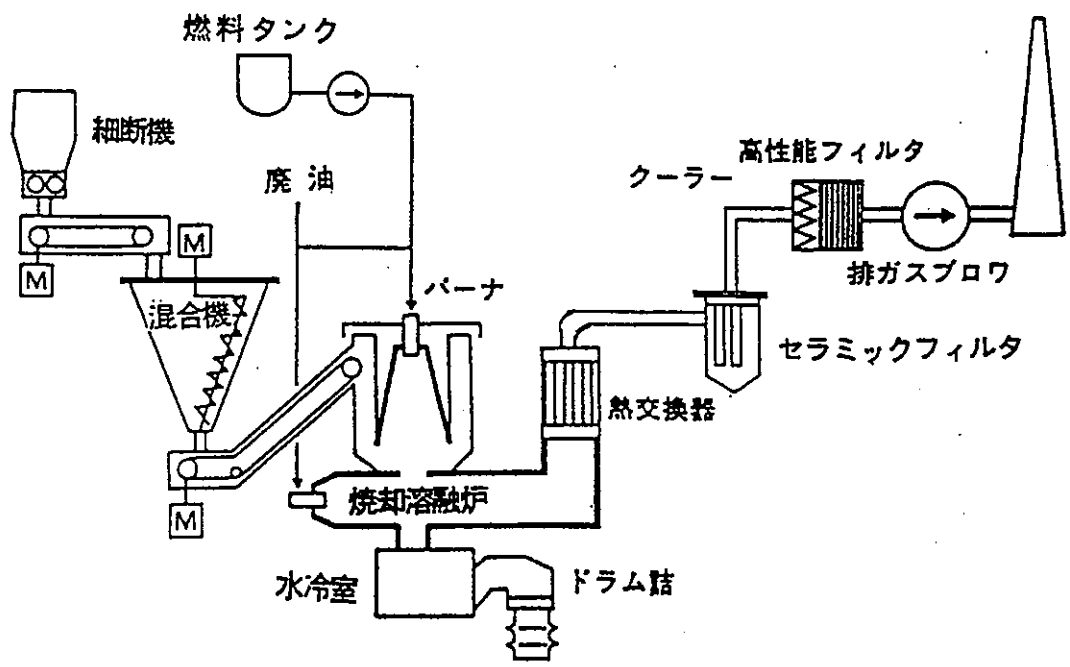


Fig. 3. Vertical cut through incineration furnace and adjacent auxiliary equipment.

Projections of Total Costs for the 6 Sub-projects per 30.09.1998

	Million CHF
Storage buildings and hot cell (without LLW building)	205
Conditioning plant (including office tract)	134
Incineration plant	107
Auxiliary building (including underground canals)	25
Security	19
Railway transfer station	10
<b>Total</b>	<b>500</b>

図1-1 ZWILAGプラズマ溶融炉の概略図と建家の建設コスト  
(出典 ICEM'99 予稿集)



(a) 高温熔融焼却炉の概略

(b) 燃焼・熔融状態

図1-2 高温焼却炉の概略図

(出典 日揮原子力技法 第3号)

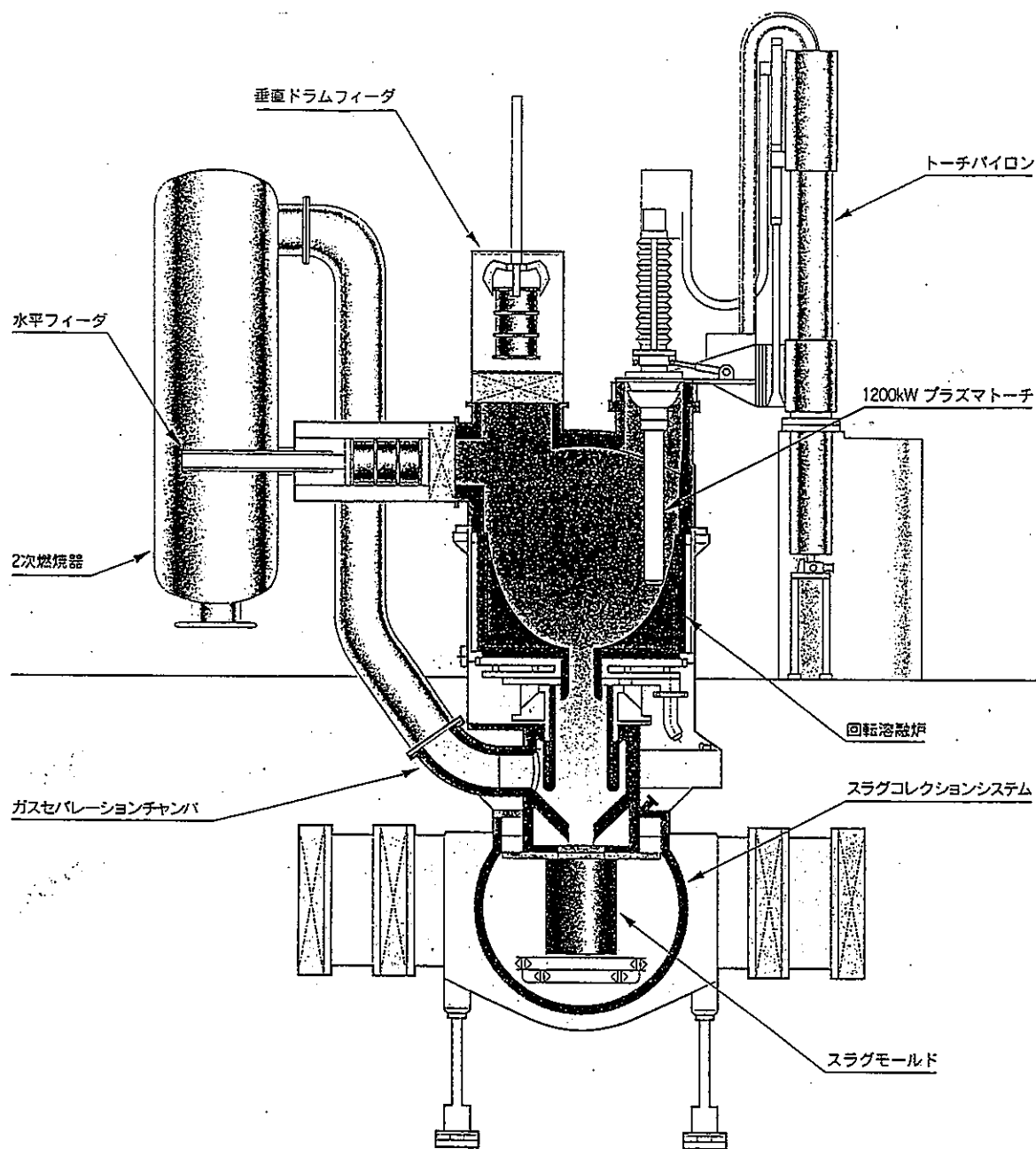


図1-3 日本原子力発電敦賀発電所向けプラズマ溶融炉の概略  
 (出典 東洋エンジニアング パンフレット)

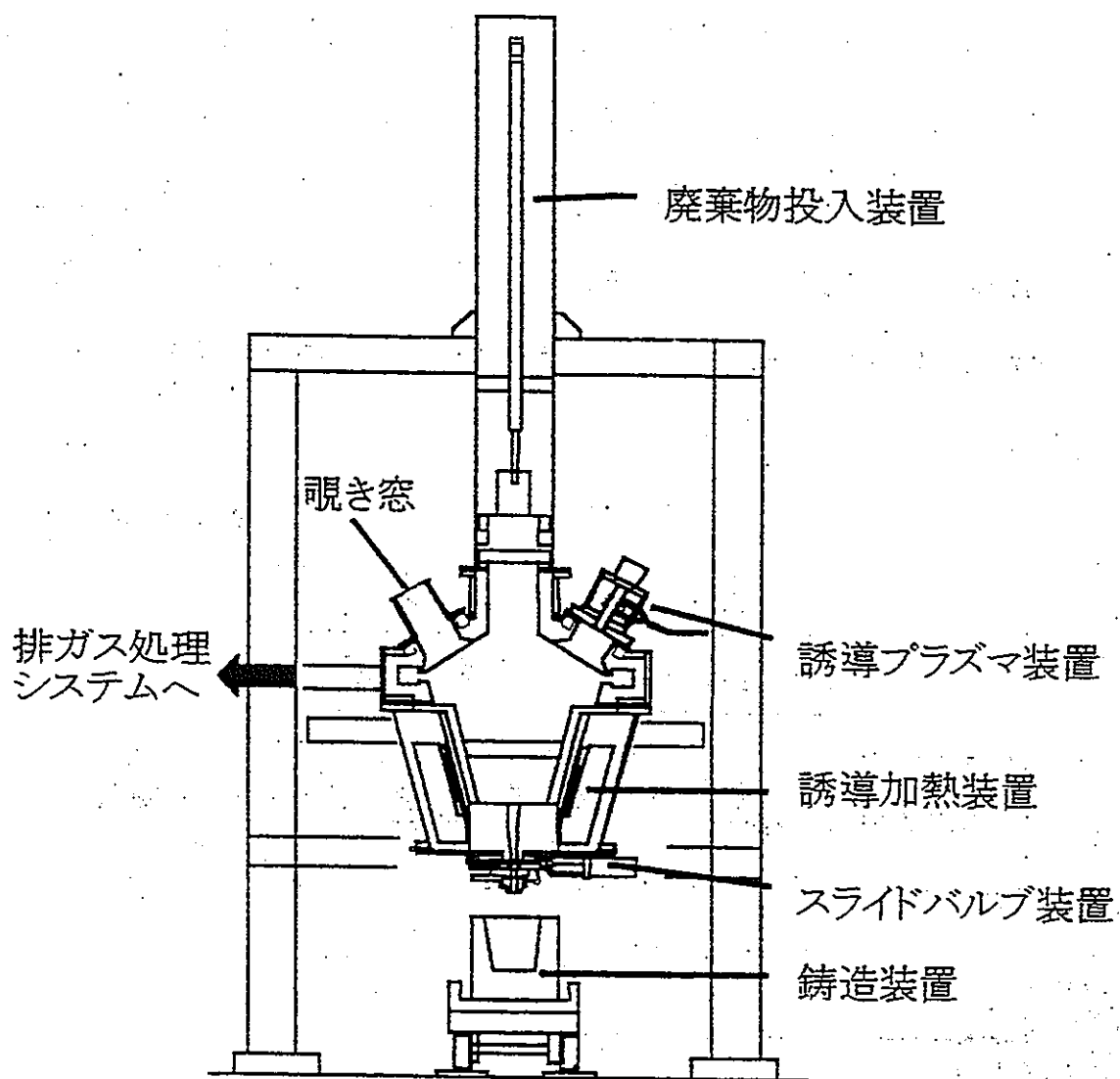


図1-4 高周波誘導炉（プラズマ補助加熱型）の概略図

（出典 日本原子力学会予稿集 98年/春）

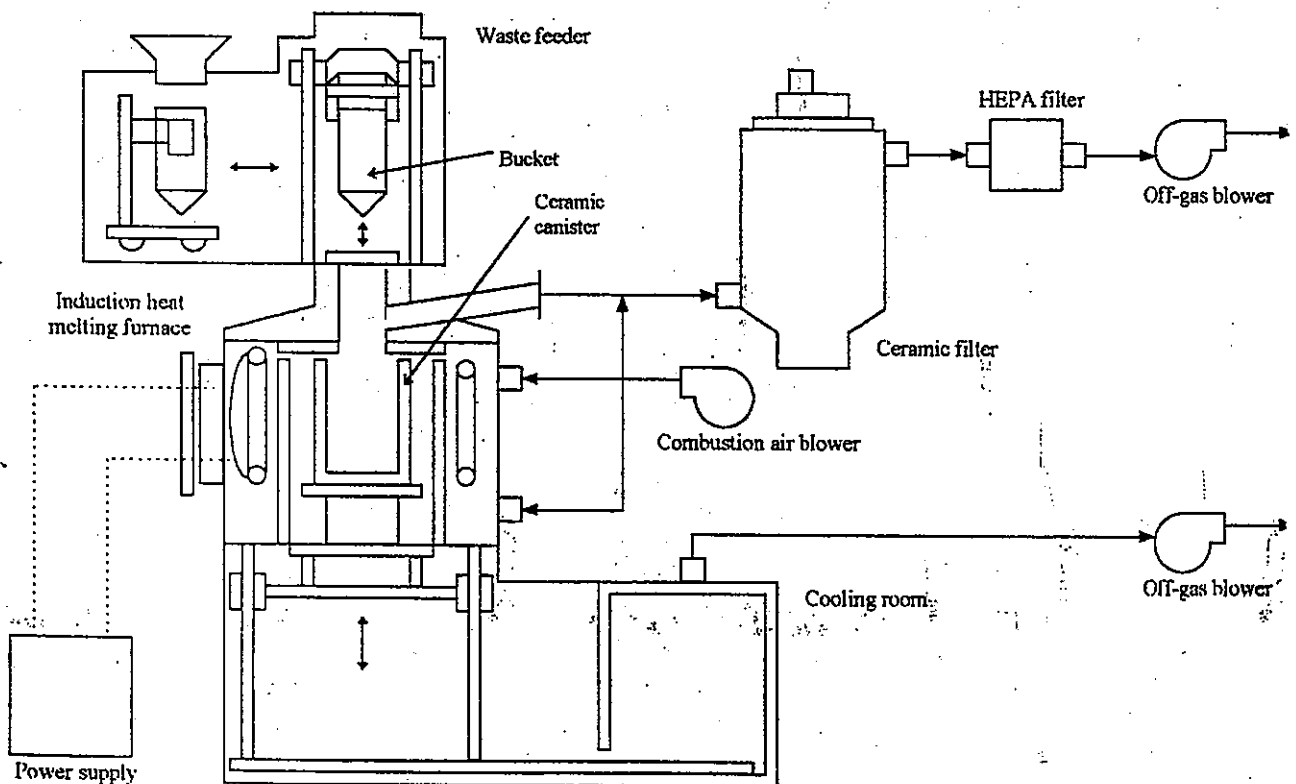


図1-5 高周波誘導炉（坩堝型）の概略図  
 (出典 ICEM'99)

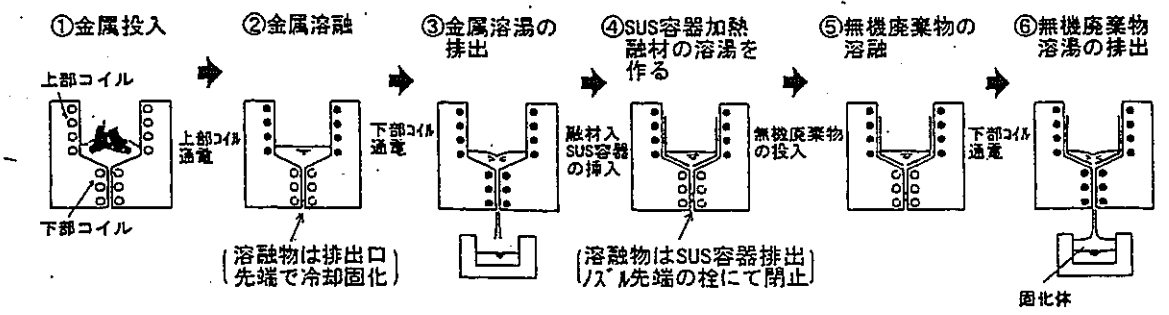
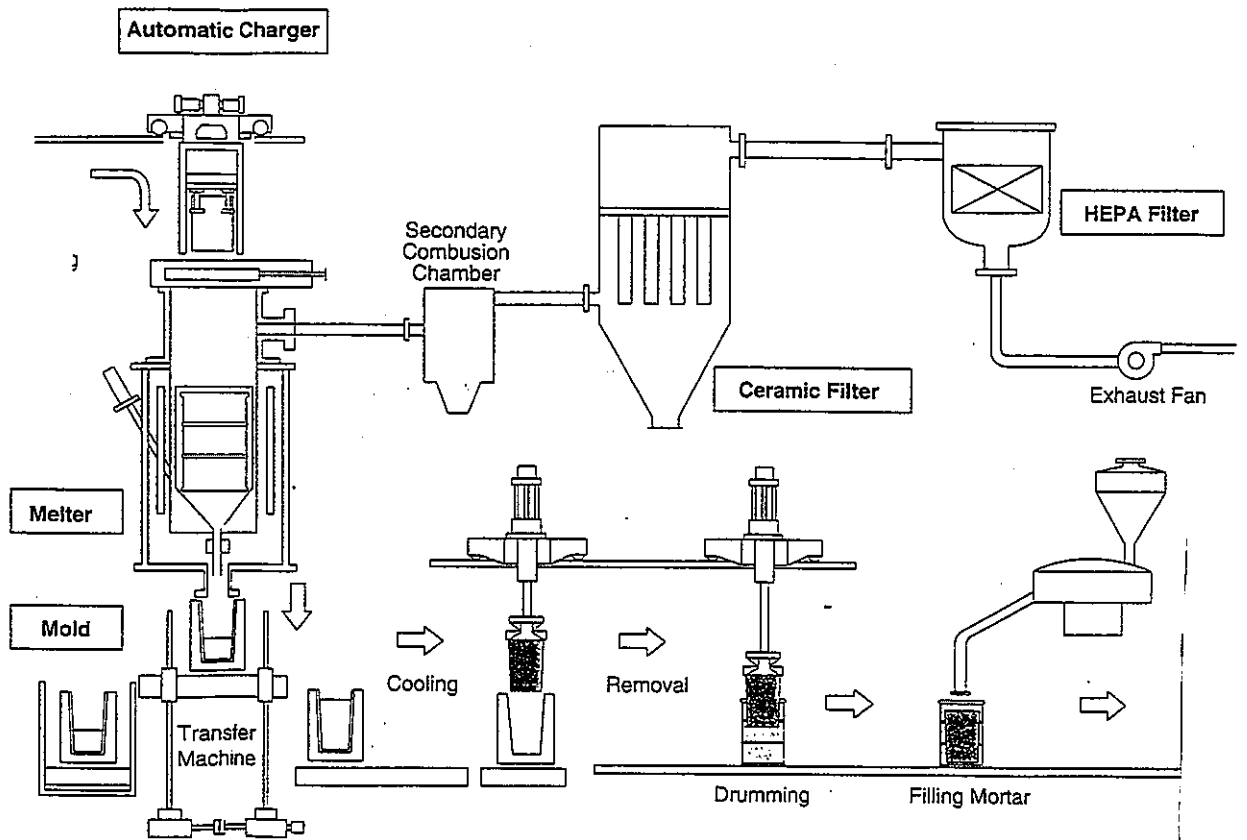


図1-6 高周波誘導炉（分別溶融型）の概略図および溶融手順

（出典 上段：三菱重工業（株）パンフレット、下段：日本原子力学会予稿集 99年/秋）

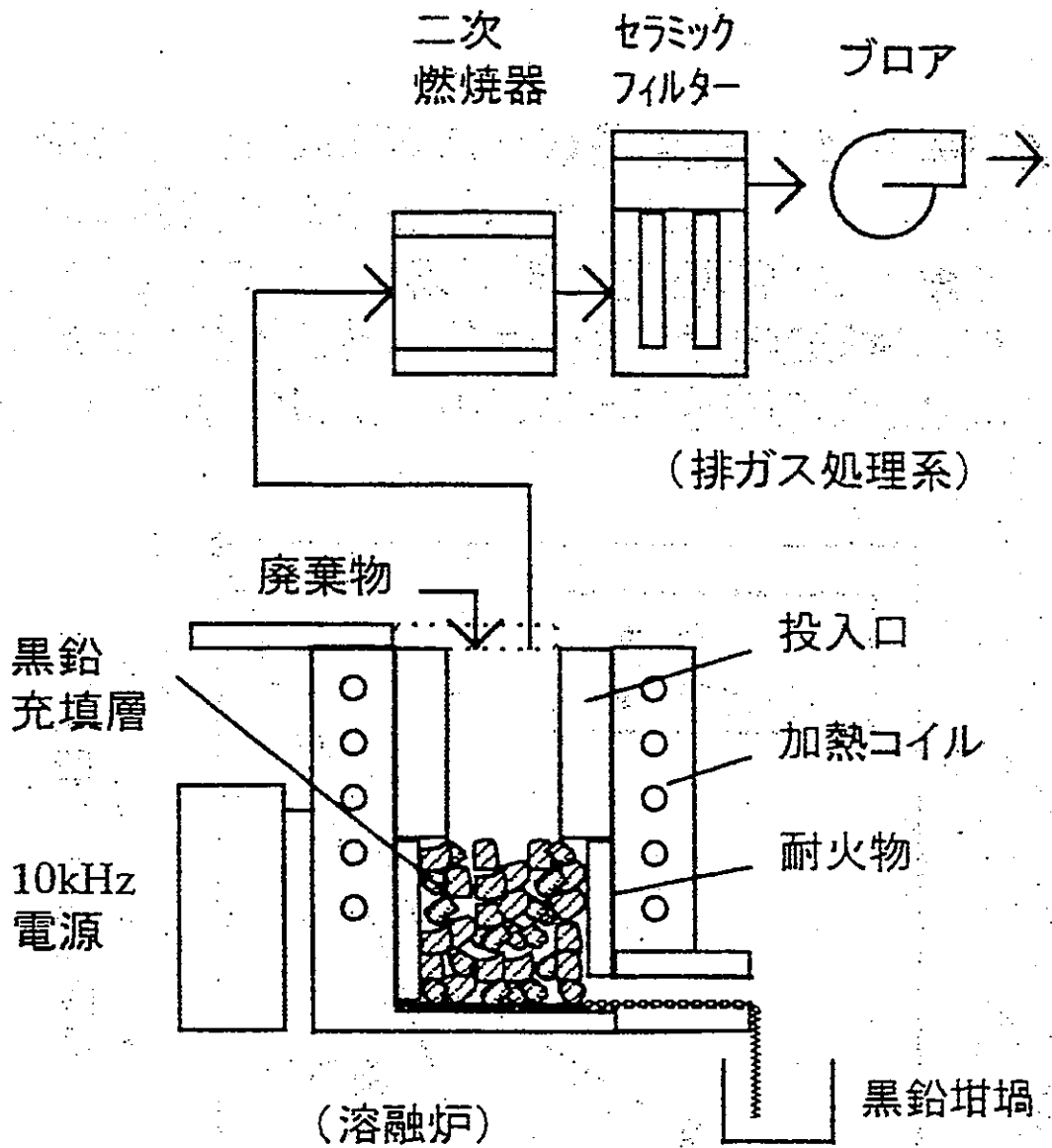


図1-7 高周波誘導炉（黒鉛充填層型）の概略図

(出典 日本原子力学会予稿集 99年/春)



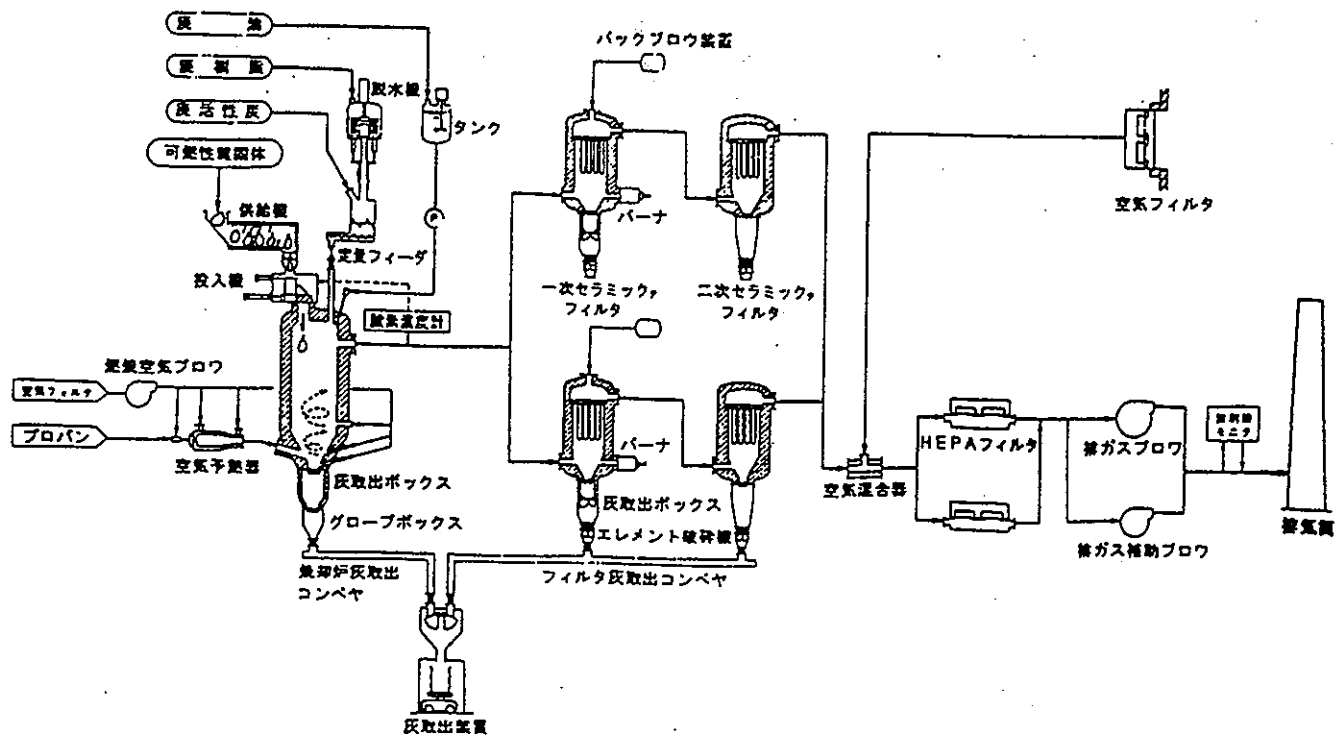
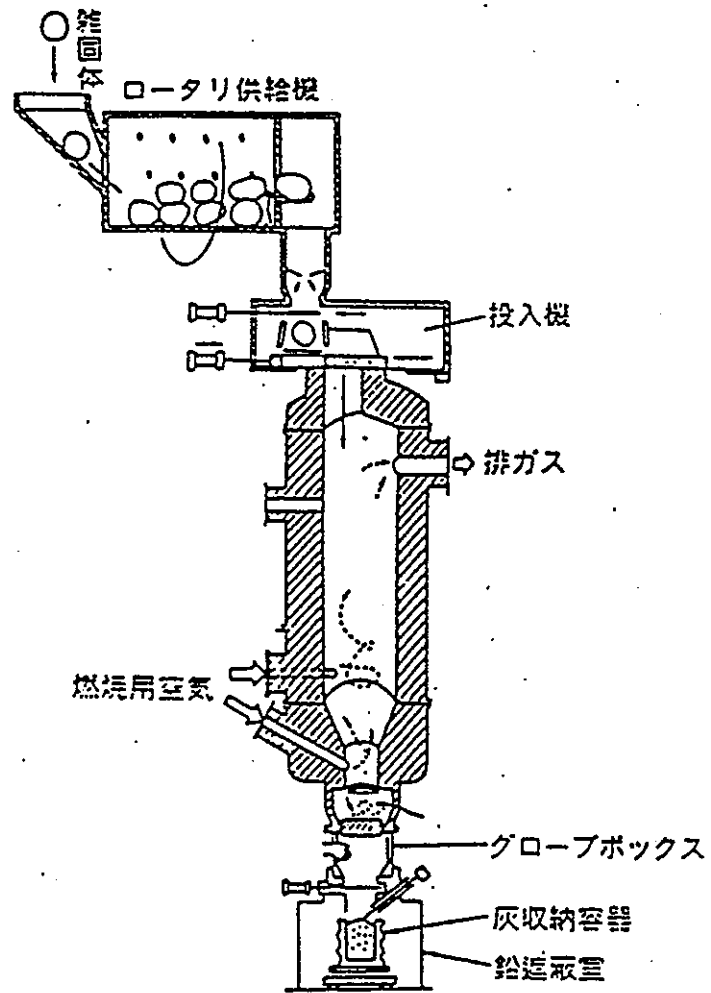
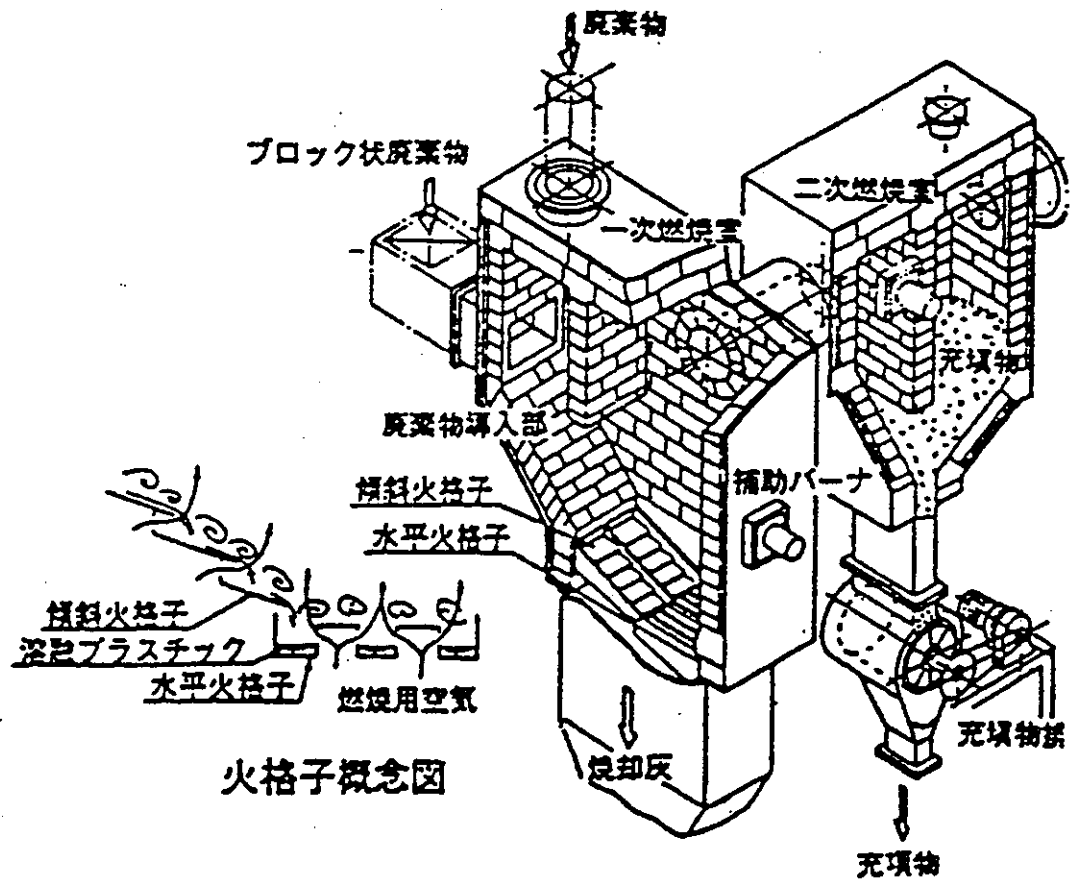


図1-8 豎型円筒焼却炉の概略図

(出典 デコミッションング技報 第8号)



火格子概念図

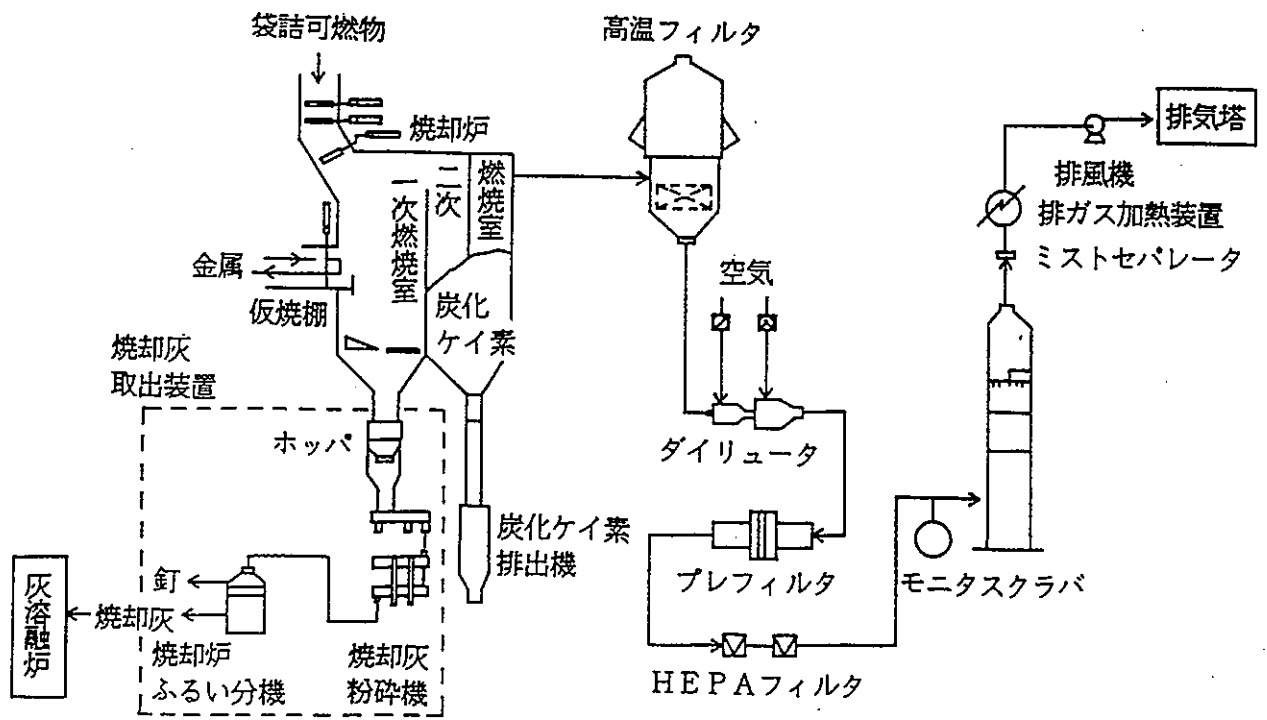


図1-9 火格子式焼却炉の概略図

(出典 放射性廃棄物管理 日本の技術開発と計画)

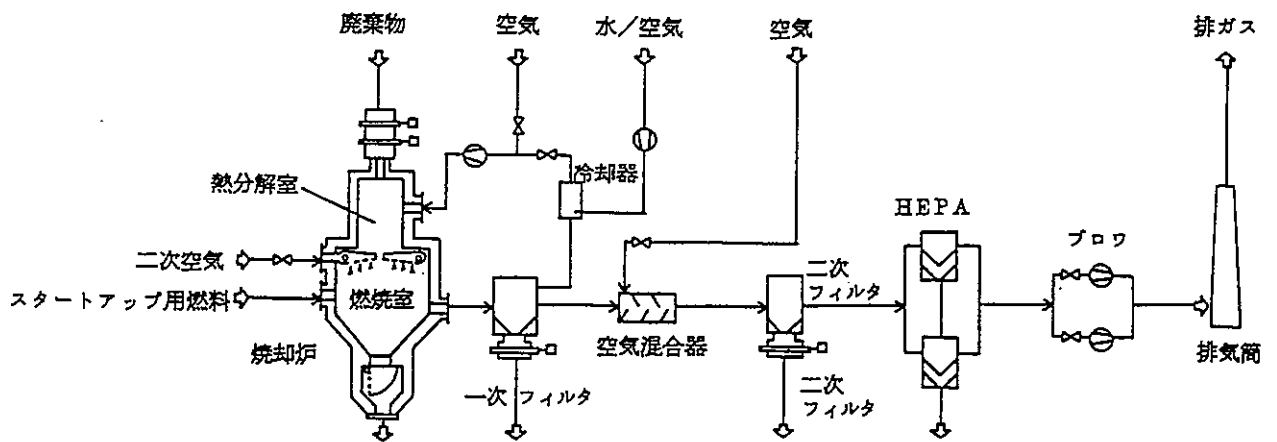
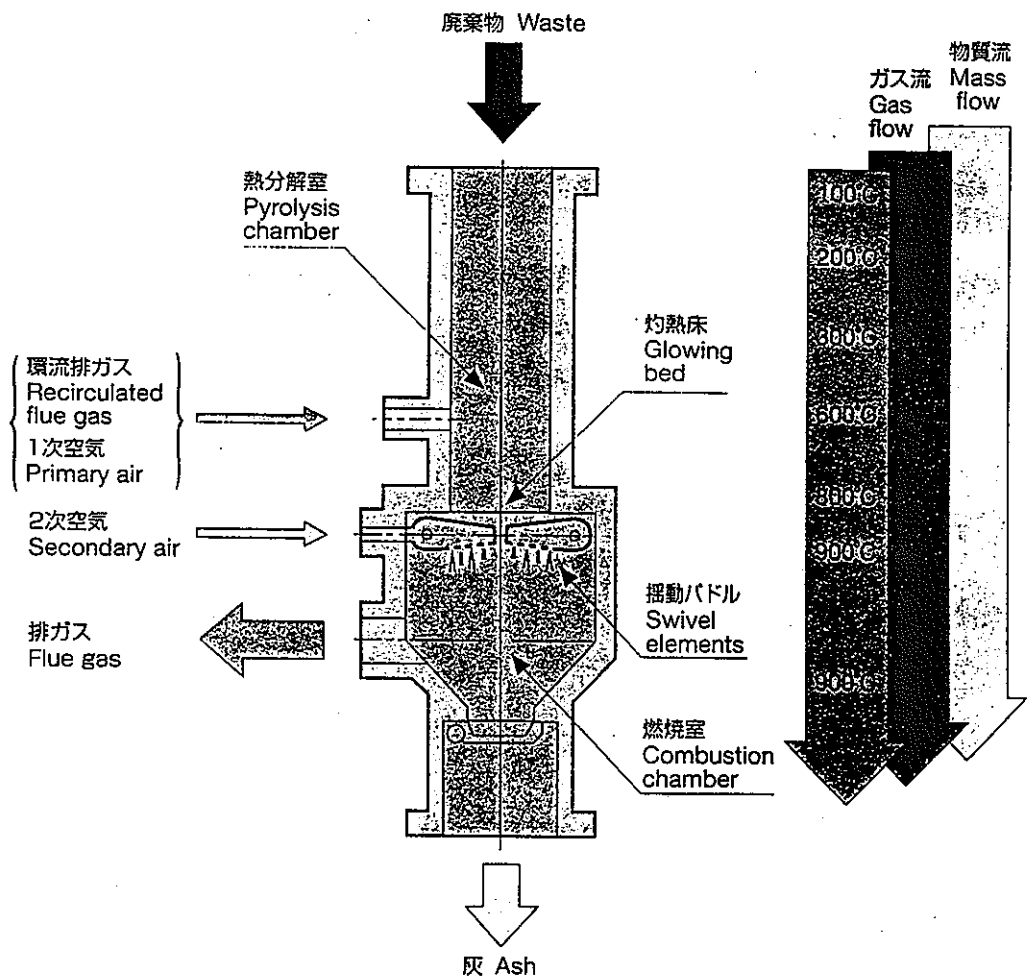


図1-10 熱分解炉の概略図

(出典 三井造船 パンフレット)

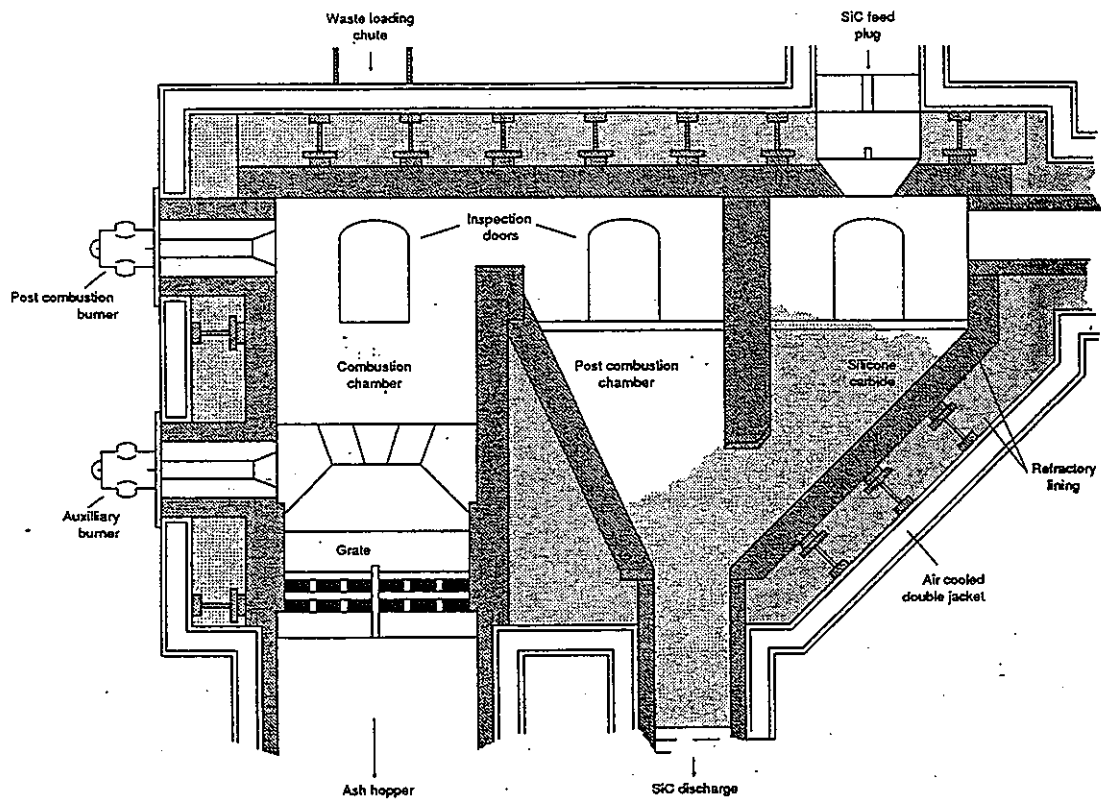


図1-11 横型3室炉 (MELOX) の概略図

(出典 Int Conf and Tech Expo on Future Nuclear Systems 1993 予稿集)

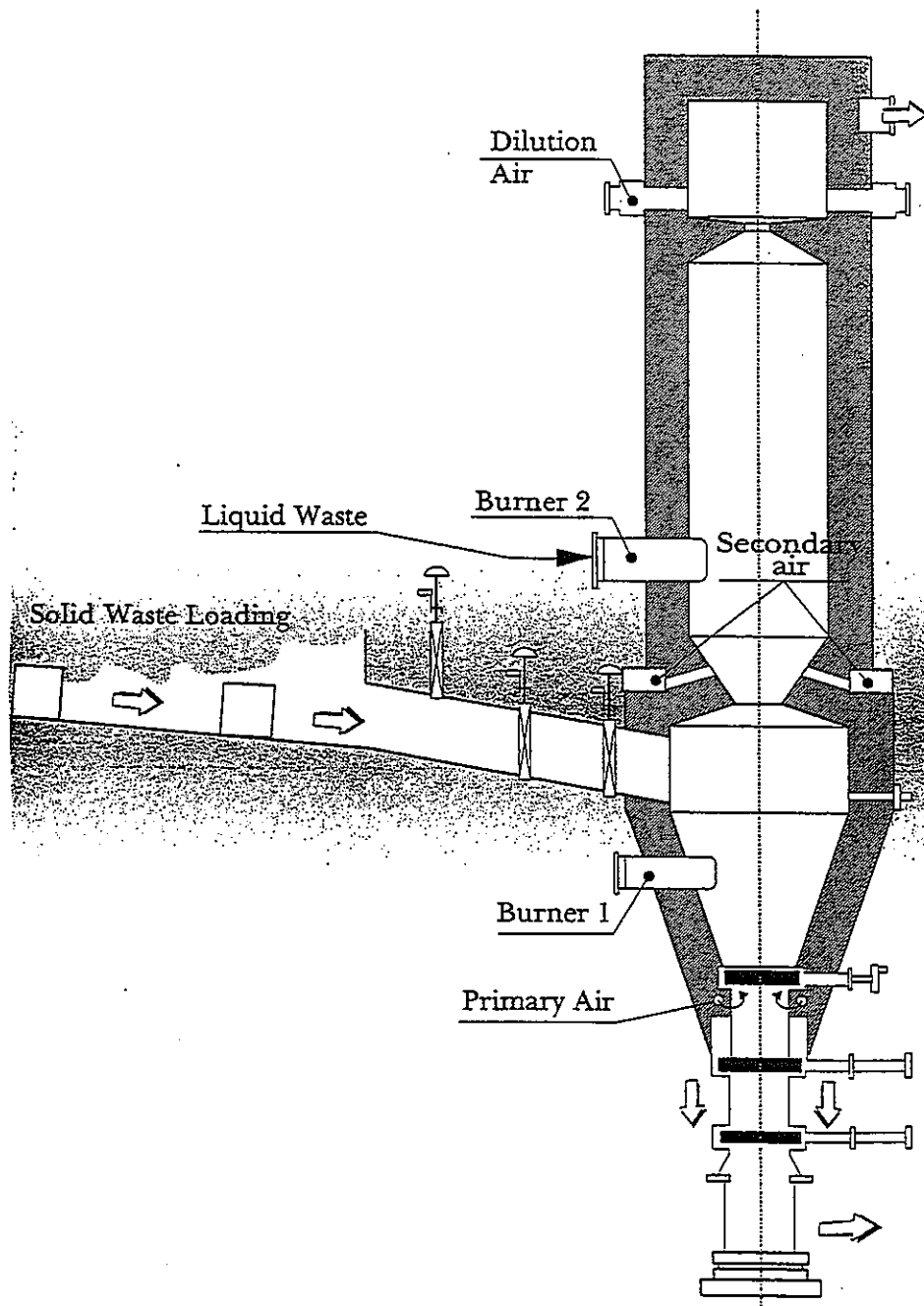


図1-12 豎型3室炉 (VATAN) の概略図  
 (出典 TECHNICALTOME社パンフレット)

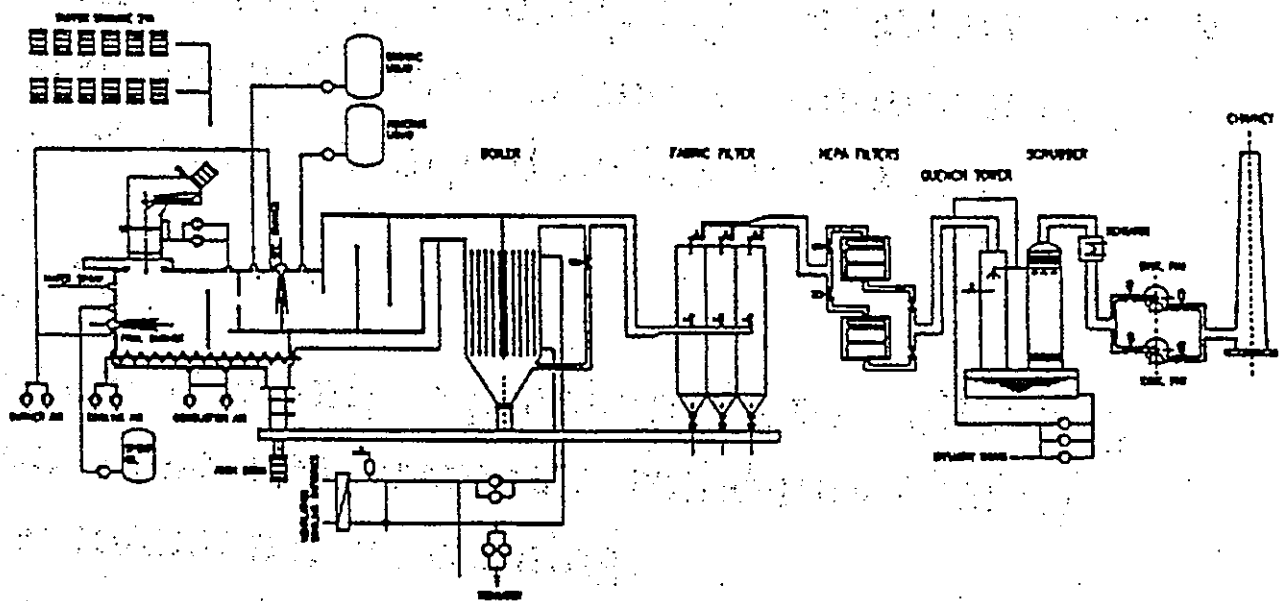


図1-13 横型多段室炉（CILVA）の概略図

（出典 Int Conf Inciner Therm Treat Technol 1997 予稿集）

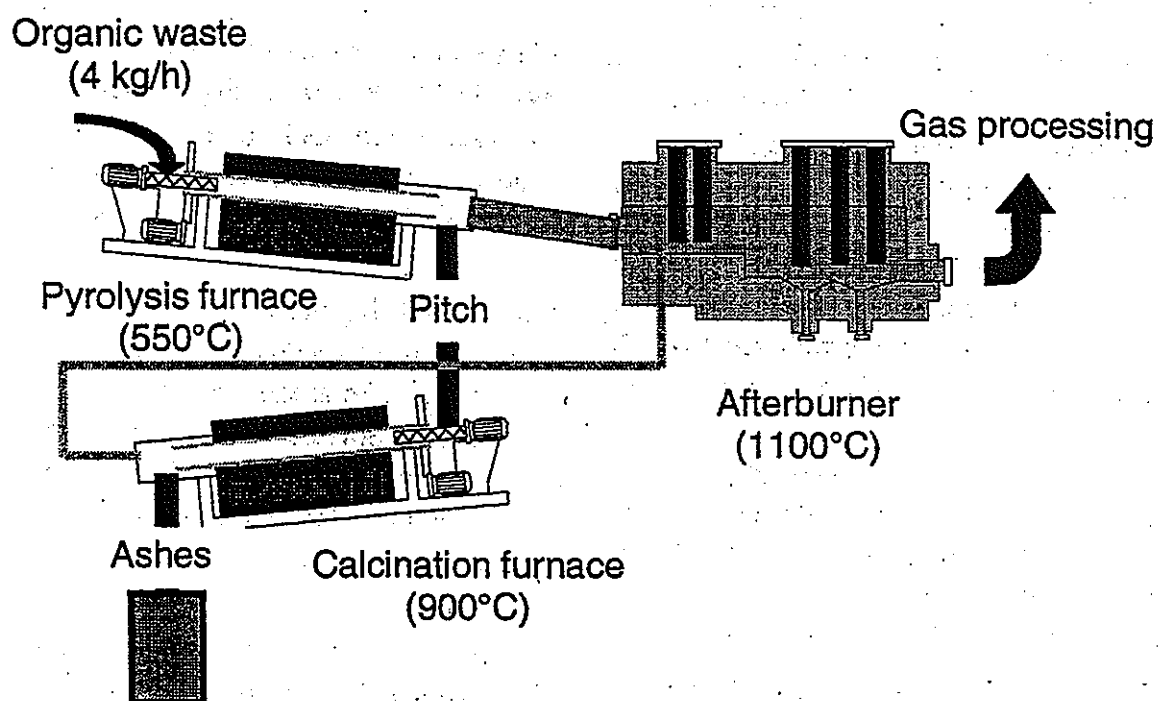


図1-14 熱分解炉 (VALDUC) の概略図  
(出典 ICEM'99 予稿集)

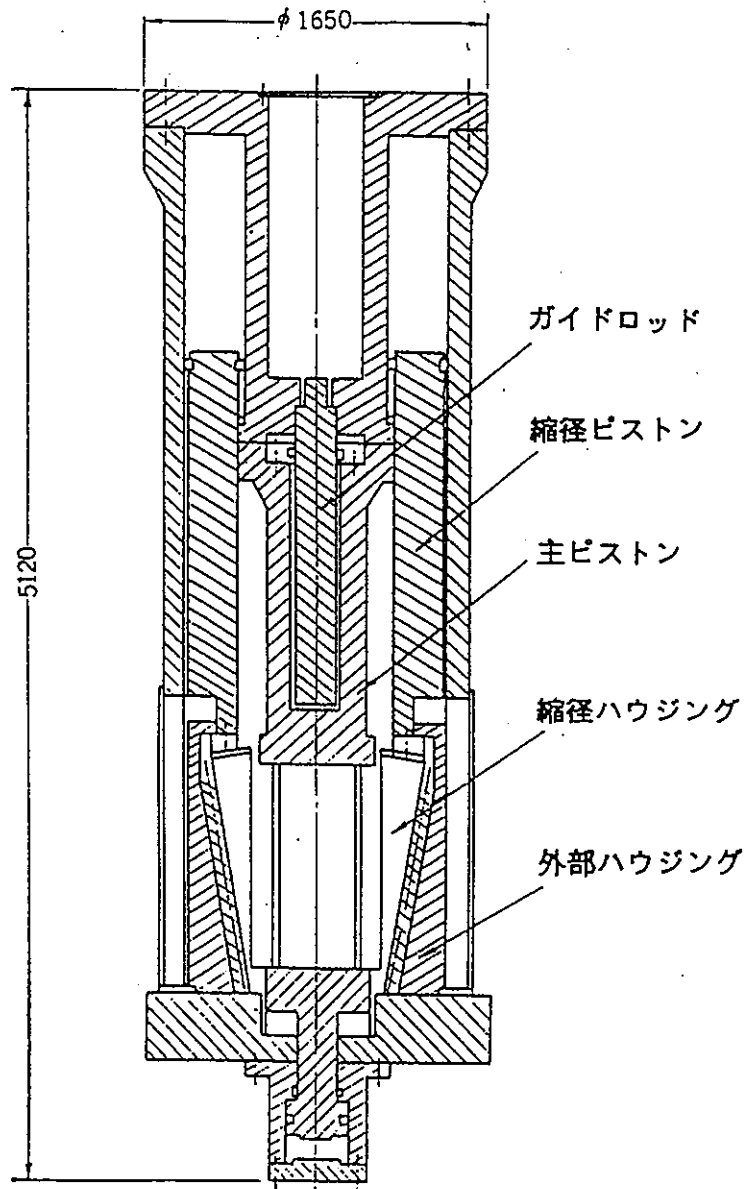


図1-15 縮径機構の概略図

(出典 放射性廃棄物管理 日本の技術開発と計画)



表1-1 工業炉の加熱方式の分類表

(出典 工業炉ハンドブック)

エネルギー源, 発熱方法 など		炉の用途 (例)				
		直接加熱方式	間接加熱方式			
燃 料	固体	石炭, コークス 溶解炭素など	精練 (鉍石還元) 製鋼 (転炉・平炉) 鍛造			
	液体	重油 灯油など	圧延 鍛造 焼入れ 焼戻し	ラジアントチューブ, レトルト, マッフルなどを使って 無酸化および光輝熱処理 浸炭 浸炭窒化 軟窒化 塩浴熱処理 ろう付け 焼結 脱ガス 乾留 蒸留 熱風発生 溶解		
	気体	天然ガス LPG・COG 副成ガスなど	焼ならし 焼なまし 焼成 焼付け 乾燥 熱風発生			
	廃棄物 (各種燃料を助燃)		焼却 (蒸気発生など)			
電	抵抗加熱		直接 通電	圧延 鍛造 パテンティング ガラス溶融 塩浴処理 黒鉛化 電気ボイラ	金属発熱体 非金属発熱体	上記のほかに 真空熱処理 炭素流動層加熱 赤外線加熱
	誘導加熱	高周波	急速加熱 表面焼入れ ろう付け 半導体熱処理 溶解 圧延 鍛造		高純度シリコンの単結晶引上げ 超硬工具の焼結 (黒鉛スリーブを加熱)	
		低周波	溶解 精練 圧延 鍛造			
	アーク加熱		アーク電流が加熱材料を流れる		アーク電流が加熱材料を流れない	
気	電子ビーム加熱		製鋼 ESR カーバイド製造 フェロアロイ製造 アルミ電解 空中窒素固定		非鉄金属溶解	
	電子ビーム加熱		高融点金属および高純度合金の 溶解 金属の蒸着			
	プラズマ加熱		製鋼 高融点金属の溶解 鉍石還元 化合物の合成または分解ガス化			

表1-2 都市ゴミ焼却灰および汚泥処理分野における溶融炉の分類

(出典 廃棄物ハンドブック)

1) 都市ゴミ焼却灰

	溶融固化方式	焼却灰+ばいじん	ばいじん
燃料式溶融炉	(1) フィルム溶融炉	○	○
	(2) 内部溶融炉	○	
	(3) コークスベッド溶融炉	○	
	(4) 旋回流溶融炉		○
電気溶融炉	(5) 電気アーク炉	○	
	(6) 電気抵抗炉	○	○
	(7) プラズマ溶融炉	○	
	(8) 電気加熱炉		○
	(9) 低周波誘導炉	○	

2) 汚泥処理

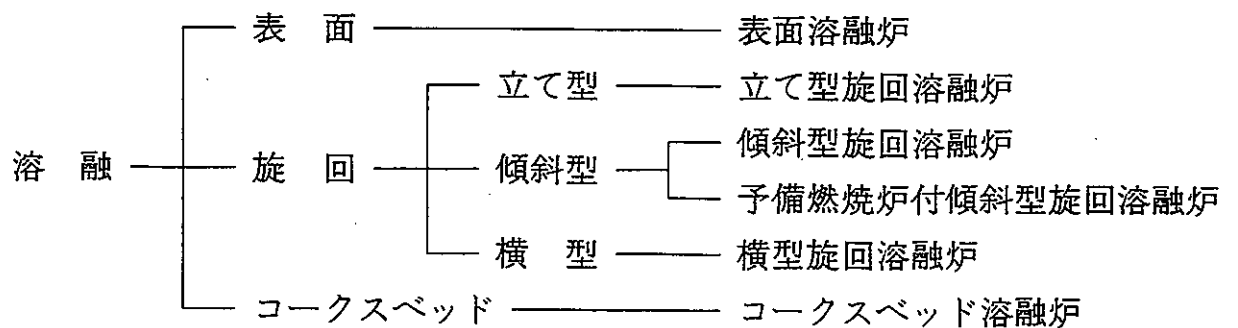


表1-3 溶融方式の分類表

熱源	加熱方式	加熱原理	一般用途例	放射性廃棄物への適用例	雑固体処理の開発
燃料溶融	旋回溶融炉	対象物と空気を旋回させて燃焼する。燃料は主としてLPG。溶融物は炉内壁に溶着し、流下	焼却灰、汚泥溶融		
	コークスベッド炉	対象物とコークスを交互に炉内に投入し、通気性の確保とエネルギー供給を実施			
	高温焼却炉	焼却物表面をバーナーで補助加熱する。溶融物が廃棄物表面を流れるため、表面溶融またはフィルム溶融とも呼ばれる。			
電気溶融	アーク加熱炉	炉内に挿入した黒鉛電極と処理対象金属間に電流を通じてアークを発生させ、対象物を溶融する。	金属精錬	フランスでガス炉の解体に際して金属廃棄物処理に適用実績有り。	現在は未実施
	プラズマ加熱炉	プラズマアークを直接照射して加熱する。直流型(移行式、非移行式)、誘導型がある。	焼却灰溶融	スイスで運用予定。DOEで計画中国内では雑固体廃棄物に対して、スイスと同型炉が計画中	実施中
	抵抗加熱炉	電極を炉内に挿入し、通電することでジュール熱により加熱溶融する。	金属精錬	エレクトロスラグ溶融炉(ESR)でPu系金属溶融処理に稼働中	
	マイクロ波溶融炉	マグネトロンによりマイクロ波を照射し、誘電体の誘電分極の遅れによる自己摩擦で加熱させ、溶融する。	焼却灰溶融	PWTFなどで灰溶融処理に稼働中	
	誘導加熱炉 (高周波、低周波)	交流電源とコイルにより交番磁場を発生させ、導体に生じる誘導電流で加熱溶解する。耐火物炉と水冷銅式(コルト・クルーブル)がある。	金属精錬	海外では金属廃棄物のみを対象に稼働中。国内では、雑固体廃棄物溶融への適用が開発され、一部計画	実施中

表1-4 (1) 稼働中および計画中の固体廃棄物溶融炉

加熱方式		プラズマ炉				
設置場所		ZWILAG (スイス)	原電敦賀	DOE	DOE	
製造メーカー		MGC-RETECH社 (アメリカ) 溶融炉: PACT-8	TEC-RETECH社 (アメリカ) 溶融炉: PACT-8	SAIC-RETECH社 (アメリカ) 溶融炉: PACT-8	SAIC-RETECH社 (アメリカ)	
対象廃棄物	発生元	発電所の雑固体廃棄物		DOEのMIX WASTE (軍事廃棄物)		
	内 訳	ドラム缶単位で 混合廃棄物: 900本 コンクリート、スラッシュ: 223本 フィルタ、樹脂等: 105本 金属: 167本	金属: 45% 無機物: 38% (コンクリ、断熱材、フィルタ) PVC、ゴム、レジン: 25% 焼却灰: 約1%	記載無し		
	処理量	200literドラムで年間1400本	約600kg/h	約600kg/h	約500kg/h	
受入基準		記載無し				
溶融処理	電源仕様	1.2MW DCプラズマ (トランスファ型=移行式)				
	雰囲気	作動ガスによりN2雰囲気	-	作動ガスによりN2雰囲気		
	出 湯	回転炉床の回転速度を低下させて、炉の中心の開口部から出湯			-	
オフガス処理	プロセス	二次燃焼器→熱交換器→水噴霧 →スクラバ→HEPA→ファン →触媒脱硝→排気筒	二次燃焼器→水噴霧→セラミックフィルタ →HEPA→脱硝→スクラバ→ファン →排気筒	二次燃焼器→水噴霧→ダストコレクタ →PRE→HEPA→脱硝→スクラバ →デミスタ→ファン→脱硝→排気筒	二次燃焼器→水噴霧→バグフィルタ →PRE→HEPA→脱硝 →スクラバ →デミスタ→ヒーター→ファン →排気筒	
	二次燃焼条件	1200℃以上2秒以上			-	
	オフガス冷却	熱交換器: 1200→450℃ 水噴霧: 450→70℃	水噴霧 (一部文献には熱交換器記載あり)	水噴霧	水噴霧	
	フィルタ	HEPAフィルタのみ	セラミックフィルタ+HEPAフィルタ	ダストコレクタ + PRE + HEPA	バグフィルタ + PRE+ HEPA	
	塩素処理	スクラバ				
	NOx処理	脱硝塔		文献には記載無し		
	排気量	-				
状 況	99年初頭の段階で建設中	国内の雑固体用として唯一情報開示	98年のWaste managementにて情報開示。現在プロセス選定中。			

表1-4 (2) 稼働中および計画中の固体廃棄物溶融炉

加熱方式		高周波誘導炉			
設置場所		国内発電サイト (計画中)	CENTRACO (フランス)	Siempelkamp (ドイツ)	Studsvik (スウェーデン)
製造メーカー		日本ガイシ	いずれも金属再利用に使用している溶融炉であり、製造メーカー、炉の詳細構成ともに不明		
対象廃棄物	発生元	発電所の雑固体廃棄物		再利用対象金属廃棄物	
	内 訳	記載無し	炭素鋼 非鉄金属は5%以内	炭素鋼、ステンレス鋼 銅、真鍮、アルミ、鉛 (ただし、鉄、鉛、非鉄金属の 混合物は選別される)	--
	処理量	標準組成で170kg/h	4000kg/chargeで1日二回運転	一次：3t/ハッチ、二次：15 t/ハッチ	3t/ハッチ
受入基準		--	$\alpha$ : 370Bq/g $\beta\gamma$ : 20000Bq/g	$\alpha$ : 200Bq/g $\beta\gamma$ : 200Bq/g	--
溶融処理	電源仕様	600kW,850Hz	--	--	--
	雰囲気	--			
	出 湯	坩堝ごと取り出し	遠心鑄造でドラムを製作するため、底 部からの出湯と推定	--	--
オフガス処理	プロセス	試験設備では セラミックフィルタ→HEPA→ファン	--	--	--
	二次燃焼条件	--	--	--	--
	オフガス冷却	--	--	--	--
	フィルタ	セラミックフィルタ+HEPAフィルタ	--	サイクロン+パケフィルタ+HEPA	--
	塩素処理	--	--	--	--
	NOx処理	--	--	--	--
	排気量	200Nm <sup>3</sup> /h	--	プロア容量は15000m <sup>3</sup> /hx2	--
状 況	国内発電所に設置計画中	99年から処理を開始し、これまでに約 900トンの処理を実施した。	1982年から実用化開始。放射性金属廃 棄物専用設備は1989年に導入	1987年から実用化開始。1992年までに 約1800トン溶融再利用	

表1-5 開発中の固体廃棄物溶融炉

加熱方式	プラズマ炉			高周波誘導炉				
	DC移行式	DC非移行式	DC移行式	プラズマ補助加熱式	坩堝式	分別溶融式	黒鉛充填式	水冷坩堝式
採用メーカー	東洋エンジニアリング	神戸製鋼	川崎重工	三菱マテリアル	日本ガイシ	三菱重工	日立製作所	CEA,ロシア、神戸製鋼、住友金属
特徴	溶融中は炉が回転し、遠心力で溶融物を炉内保持	炉体を傾動する方式に加えて、溶湯を冷却凝固で保持し、プラズマ照射で出湯する（セルファッピング）方式も開発。	炉体を傾動する方式である。	高周波誘導炉とプラズマを併用	導電性坩堝の誘導加熱で非金属溶融に対応	金属廃棄物と非金属を分別することが特徴。非金属溶融時はSUS製容器により間接加熱	黒鉛充填層により非金属加熱に対応。唯一連続出湯である。	水冷銅の坩堝（コールドクーリング）とし、耐火物交換の必要が無い
廃棄物投入形態	炉頂から投入	側面から投入		炉頂から投入	坩堝へ投入	炉頂から投入		
溶融～出湯	回転炉床の回転速度を低下させて、炉の中心の開口部から出湯	一括溶融後、炉体を傾動させて、炉側面から出湯		炉底のスライドバルブ操作により出湯	坩堝ごとリフトの昇降操作で取出	金属を溶融し、下部から出湯、SUS容器挿入して非金属廃棄物溶融。出湯はフリーズバルブ操作で実施	溶融物は連続的に出湯されていくため、溶融の進行状態に合わせて連続投入	炉の底部より出湯
開発状況	実機製作中	実機製作中	実規模試験設備を保有	実機製作中	実機製作中	実規模試験設備を保有	開発初期段階と推定	CEA、ロシアは実規模設備にて実証試験中

表1-6 焼却方式の分類

方 式	過剰空気燃焼	抑制空気燃焼	熱分解
	一次燃焼	抑制空気燃焼	熱分解
	過剰空気燃焼		
特 徴	可燃物焼却炉として使用する上では最も処理能力が高く、本方式の代表的である堅型円筒炉は国内発電所の殆どが採用している。	空気比1以下で焼却する方法であり、プラスチックなどの熱量の高い物質を燃焼速度を制御しながら燃焼	高温での熱分解により処理する方式である。対象物は固体（灰）、液体（タール分）、気体（未燃焼ガス）になり、灰以外を二次燃焼
一次燃焼空気比 注1)	2～3	1.2～1.3程度	0.5程度
オフガス量 注2)	最も多い	中間	最も少ない
プロセス	最も簡便	簡便	最も複雑
難燃物焼却への適用性	急激な燃焼により、大きな圧力変動が生じるため、不向き	空気量を絞るため燃焼時間が長くなるが、燃焼安定度、炉内圧変動は小	熱分解に時間が掛かるが、適用性は高い
難燃物焼却への対応	現実的には難燃物が混入しているケースがあるものの、既存の堅型円筒炉では処理対象外である。既存炉での焼却試験も行われているが、混焼比率は著しく制限	PVCを焼却する場合には、塩素による腐食対策を実施する必要がある。ガス冷却に熱交換器を使用しているものは、腐食対策を行いにくく、塩化物の投入が3%程度に制限	原理的に難燃物の焼却を目的としたものである。VULDUC炉では塩素除去にCaO、塩素腐食対策として系統保温と有機リンを吹き込みが報告されている。
実用化例	堅型円筒炉、回転火格子炉など、最も実績が豊富である。	横型3室炉、堅型3室炉、横型多室炉	ユーリッヒ式熱分解炉（ふげん）、VALDUC炉
評価	燃焼制御の観点から、難燃物用としては成立しない。	十分な塩化物対策を講じることで技術的に成立する。	十分な塩化物、爆燃対策を講じることで技術的に成立する。

注1) 本来、空気比による区別は1以上、1以下、空気遮断となるが、ここでは実プラントの例を使用

注2) オフガス冷却方式（空気希釈or水噴霧）により、大きく変動する。本比較は同一方式と仮定した場合の評価

表1-7 難燃物焼却炉の一覧

一次燃焼方式		過剰空気燃焼	熱分解炉	抑制空気燃焼				
型式		豎型円筒炉など	独立3室炉	豎型3室炉	横型3室炉		横型多段室炉	
設置場所		国内で多数	VALDUC	BATAN	CADARECHE	MELOX	CILVA	CENTRACO
製造メーカー			CEA	フランス TECHNICATOME社	フランス TECHNICATOME社改 造	CEA-SGN	デンマーク ENVIKRAFT社 EK250	デンマーク ENVIKRAFT社 EK1500
処理対象	発生源	発電所の可難燃物	α 廃棄物	発電所の可難燃物	—	MOX燃料プラントの α 廃棄物	発電所の可難燃物	発電所の可難燃物
	内訳	ポリエチレン：約50% 紙、布類：約40% その他：10%程度 塩ビは数%に制限	PVC：50% ゴム類：35% (ラテックス、ネオプレン) セロース：10% ポリエチレン：5%	PVC：25% ポリエチレン：15% 綿、紙、木：58% (セロース) 不燃物：2%	—	PVC：48.5% ネオプレン：17% その他は不明	PVC：平均3% その他は不明	塩化物は5%以内 硫黄は11%以内 その他は不明
能力	処理量	50～150kg/h	7kg/h	50kg/h	18kg/h	20kg/h	100kg/h	固体：620kg/h 液体：300kg/h
燃焼	一次燃焼	800～1100℃ 過剰空気燃焼 (空気比2～3)	550℃、N <sub>2</sub> 雰囲気 で熱分解し、ピッチとガスに 分離 (電気炉)	850～1000℃で空気比 1.2程度で燃焼	800～900℃ではほぼ空気 比1で燃焼	800～1000℃	900～950℃で抑制空気燃焼 (文献には熱分解と過剰空気燃焼と記載)	
	二次燃焼	一次CFにて700～800 ℃で実施	ピッチ：900℃ 過剰空気燃焼 ガス：1100℃	1050～1100℃で2秒間 滞留	1050℃で2秒間滞留	800～1000℃	1050℃で2秒間滞留	
ガス処理	ガス冷却	二次CF通過後に 空気希釈	熱交換器で冷却	空気希釈により180℃に 冷却	二次燃焼室にて荒除塵後、空気希釈		二次燃焼後、熱交換器で200℃へ急冷	
	塩素処理	無し	CaOバグフィルタ (130℃)	スクラバ		バグフィルタ	スクラバ	
	排気量	—	—	6000～7000Nm <sup>3</sup> /h	4,000Nm <sup>3</sup> /h	—	2,500Nm <sup>3</sup> /h	16,000Nm <sup>3</sup> /h



表1-8 世界の固体廃棄物圧縮装置

(出典 放射性廃棄物管理 日本の技術開発と計画)

国	所在	施設	型	最大圧縮力	廃棄物	減容比*
仏	La Manche	処分場	固定式	400t	雑低レベル	5
独	Brunsbüttel	発電所	可搬式	2000t	" (180 ℓ 缶)	3 ~ 4
	Karlsruhe 他	研究所	固定式	1500t	" (180 ℓ 缶)	3 ~ 10
	Essen	サービス会社	可搬式	1500t	" (220 ℓ 缶)	3 ~ 10
伊	Casaccia	研究所	固定式	1500t	"	3 ~ 6
蘭	Petten	中間貯蔵所	固定式	1500t	" (100 ℓ 缶)	5 ~ 10
スペイン		各所	可搬式	1200t	"	3 ~ 6
英	Dounreay	研究所	可搬式	2000t	"	5 ~ 10
米	各所	中央処理施設	固定式	2000~5000t	" (80 & 220 ℓ 缶)	
日	東電福島第一	発電所	固定式	1000t	" (200 ℓ 缶)	3 ~ 10

## 資料1-1 CENTRACO集中処理施設の概要

(出典 SOCODEI社パンフレット)

### Melting & recycling

The melting unit is designed to process 4500 metric tons of scrap metal a year in 24/24 operation. The volume reduction factor reaches 10:1 when casting ingots and 20:1 when recycling steel. It includes three sub-units for waste preparation, melting, and manufacturing of recycled products. Melting is performed in an induction furnace with a load capacity of 4000 kg. Recycling, which is a key SOCODEI objective, is achieved through horizontal centrifugation technology. Centrifugation is commonly used in conventional foundry practice: molten metal is poured into a tubular cask rotating at high speed and flattened against the cask wall. Then tubes are cut in half and assembled with uncontaminated bottoms and covers. Two products are eventually manufactured: biological shields and 400-liter shielded drums used for conditioning of ashes produced by the incinerating unit. When the metallurgical properties of the melt do not meet welding and quenching standards for recycling, the molten metal is cast in molds to produce ingots.

### Incineration

The incineration unit is designed to process 5000 metric tons a year in 24/24 operation: 3500 tons of solid combustible waste and 1500 tons of liquid waste. It consists of four sub-units: waste reception and reconditioning, incineration, off-gas treatment and ash conditioning.

The reconditioning sub-unit enables SOCODEI to accept waste conditioned in many different forms, including metallic or incinerable drums and tanks, in a variety of sizes.

The incinerator is a three-chamber static furnace — combustion by partial pyrolysis, post-combustion under excess air and a 12-second residence time at a temperature exceeding 1100°C — similar to an industrial or domestic waste treatment plant.

Its processing capacity is 620 kg/h of solid combustible waste and 300 kg/h of liquid waste.

Flue gases are filtered and purified to ensure nonradioactive and chemically purified off-gas. The system was designed in compliance with the most recent international standards for incineration technology.

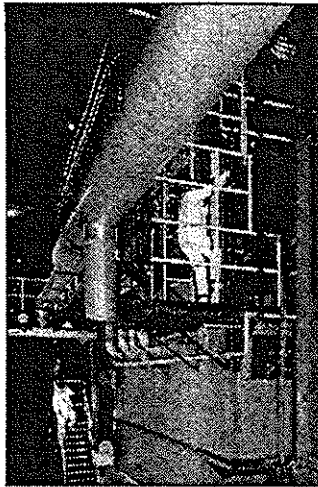
The resulting bottom and fly ashes are encapsulated in a hydraulic binder and conditioned in compliance with shallow land disposal criteria in shielded drums produced in the melting unit.

資料1-2 GTS Duratek社の概要

(出典 GTS社ホームページ <http://www.gtsduratek.com>)

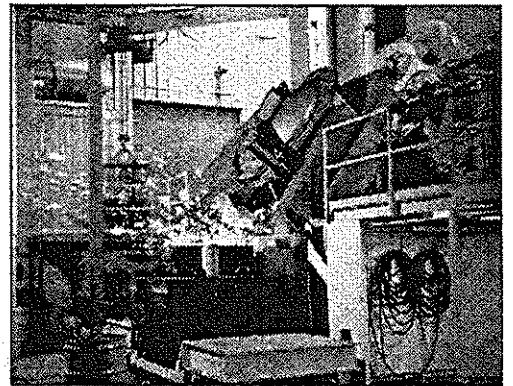
# Radioactive Waste Processing

*Located in Tennessee, GTS Duratek's Bear Creek facility is the nation's largest commercial processor of low-level radioactive waste*



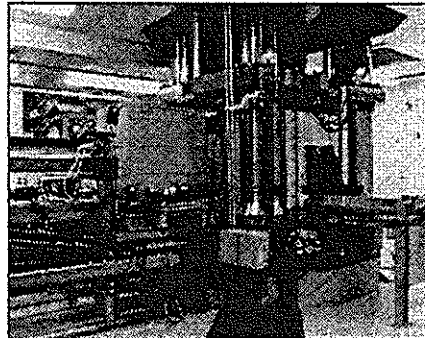
### Incineration

Bear Creek's two incinerators — the only ones licensed in the U.S. for commercial radioactive waste processing — burn dry active waste at a rate of 1,600 pounds per hour with volume reductions of approximately 100:1. The process is also ideal for nonhazardous waste oils and other contaminated liquids.



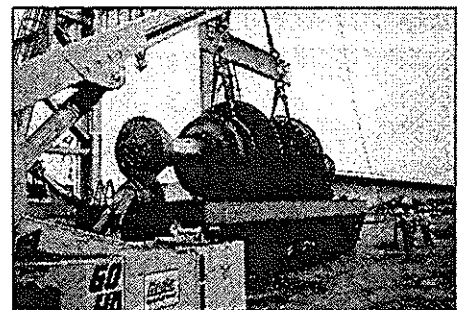
**Metal Melt:** Our 20-ton, 7,200 kW electric-induction furnace operates exclusively for melting and recycling radioactively contaminated metal, eliminating (1) liability for the original waste generator, and (2) burial costs. Metal melting is the best alternative for metals that cannot be economically decontaminated to levels low enough for free release.

**ULTRACompaction**  
Bear Creek operates a 5,000-ton waste compactor, the largest, commercially available in the nation. The ULTRACompactor is the only supercompactor that has the ability to process boxes (38 ft<sup>3</sup>) for large components, as well as various sizes of drums.



**Green Is Clean:** This waste assay program provides a highly reliable survey and free release service for many types of noncontaminated / potentially clean materials. The scanning system surveys and free releases a variety of light or dense noncontaminated materials, including paper, plastic, wood, resins, soils, rubble, grit, dried sludges, asphalt, metal and concrete debris, and charcoal.

**Large Component Processing**  
Bear Creek receives large components at its Memphis facility by rail, barge, or road. Cutting them down to size, it transports the material to Bear Creek for processing.



Corporate Headquarters  
10100 Old Columbia Road; Columbia, MD 21046  
410/312-5100; Fax 410/290-9070  
[www.gtsduratek.com](http://www.gtsduratek.com)

## 資料1-3 Siempelkamp 溶融炉の仕様

(出典 Siempelkamp社のパンフレット)

### Conditions for Acceptance

Regulation:  
SIEMPELKAMP licences and specifications

### Conditions for Licences

Handling and storing licence according to § 3  
StrlSchV (German Radiation Protection Ordinance)

Deliverable activity levels:  
beta/gamma activity max. 200 Bq/g  
alpha activity max. 200 Bq/g  
nuclear fuels max. 100 Bq/g  
and max. 3 g/100 kg

Specific activity determined by method licensed by  
the authorities

Contamination on package surface according to  
StrlSchV/GGVS (Ordinance on Transportation of  
Dangerous Goods on Public Roads)

Listing of all nuclides contributing > 1% to total  
activity

Dose rate of the packages:  
surface 1 m distance  
containers max. 100 µSv/h max. 25 µSv/h  
drums max. 100 µSv/h max. 25 µSv/h

### Conditions for acceptance

Materials:  
steel  
stainless steel  
copper  
brass  
aluminium  
lead

Other materials of use in the foundry like charcoal,  
graphite

Materials to be separated:  
pumps  
engines/motors  
steel/lead/non-ferrous material mixes  
composite materials of all kinds

### Waste Treatment

Specific waste collection by each customer

Packing in units provided by the customer, mainly  
T180, T150 or 200-l-drums

Transfer of contamination from pipes and bag  
filters < 50 Bq/g  
(usually 5–30 Bq/g during the first charges)

Back shipment to customer

shipment of wastes:  
dust < 0.2% of weight  
slag < 1.2% of weight  
furnace lining < 0.6% of weight  
filters < 0.2% of weight  
floor sweepings < 0.2% of weight

### Uses

Free use according to recommendations by  
Radiation Protection Commission

general applications < 0.1 Bq/g  
industrial applications < 1.0 Bq/g

Contamination:  
beta/gamma activity < 0.5 Bq/cm<sup>2</sup>  
alpha activity < 0.05 Bq/cm<sup>2</sup>

Intermediate storage for radiologic decay.  
Secondary melt for products to be used in nuclear  
technology

Impurities:  
organic impurities < 1% of weight  
no remaining water inclusions  
no explosives  
no encapsuled voids

Shipping in accepted packages:  
like 200-l-drums or direct delivery in containers

Declaration of contents on stickers and in lists

Advance notification of responsible authorities in  
due time

#### 資料1-4 Studsvik溶融炉の仕様

(出典 Studsvik社のホームページ<http://www.studsvik.se/radwaste/index.html>)

##### **Delivery of scrap to Studsvik**

Entire large components for decontamination, segmentation and melting.  
Scrap metal in 20 or 10-ft containers, drums or similar.

##### **Delivery specifications**

Metals as: stainless steel, carbon steel, aluminum, copper and brass.

No residuals of liquids, toxic and organic.

Surface dose rate: < 0.5 mSv/h (after decontamination)

##### **Decontamination**

Decontamination applies as option before melting.

##### **Radiological specifications for releasing of ingots for unrestricted use**

Alfa-nuclides: < 100 Bq/kg

Gamma/Beta-nuclides: < 1000 Bq/kg

##### **Ingots**

Weight: 120 - 650 kg

*Option 1:*

Back to customer.

*Option 2:*

Storage, for max 20 years to reach the release levels, recycling.

##### **Secondary waste**

Slag, filter dust, outsourced material - back to customer in drums or containers.

##### **Documentation**

Final report to customer after completion of each melting campaign

## 資料1-5 DOEのMIXED WASTEに対するプラズマ溶融炉の適用

(出典 Waste Management '98)

### RECENT WORK WITH ROTARY HEARTH SYSTEMS

As Retech was building a production-size system (PACT-8) for the Pit 9 program (ref. 4), we took a critical look at the Pit 9 PACT-8 design with regard to operational and maintenance issues. The reason for this critical review was to identify areas where improvements could be made to ensure the operational availability of the melter over a one year time span. The Pit 9 inventory was estimated to be 1,060,000 pounds of waste to be treated during the first phase of design in April 1994 (this was labeled the 30 % design phase). This was then planned to be accomplished in eleven 100-hour campaigns. At the 90% design phase submittal in November 1996, the estimate of Pit 9 material to be treated had grown to 3,920,000 pounds. To accomplish this in one year will require forty 100-hour campaigns. It became very clear to the design review team that the operational availability of the melter had become an important factor to successful completion of melter operations in one year.

Two important areas were identified which could significantly impact operational availability. The first was the need for quick and reliable starting of the plasma arc torch given the potentially wide compositional range of the feed material. The schedule could not tolerate long pre-heat cycles prior to starting the plasma arc torch. The second was to confirm the durability of the refractory system selected including the refractory lined slag-pouring throat. Also, the schedule could not withstand a complete replacement of the primary chamber refractory during the one year of melter operations.

The approach taken to address these two important areas was a Retech funded program using our pilot scale PACT-2 in Ukiah, CA. The program consisted of parallel efforts to accumulate hours on a scaled down refractory system and to develop a reliable torch starting technique. A wide range of feed materials were processed in the PACT-2 over a twelve month time span to determine the effect on durability of the centrifuge refractory. Torch starting techniques were also evaluated in relation to component life.

The principal findings of this one year program were very encouraging. Through appropriate refractory selection, geometric design, and operational technique using the centrifuge and plasma arc torch, a sacrificial refractory layer (i.e. a slag skull) was able to be built up to enhance refractory life in the bottom and on the walls of the centrifuge. This slag skull protects the electrically conductive refractory in the centrifuge bottom from significant deterioration during waste processing. It also helps to shield the hot refractory lined throat from direct arc impingement thereby enhancing the throat life. Operational parameters were developed for the plasma arc torch which utilized standard torch parts. System start-up and shut-down procedures were also developed to enhance starting the plasma arc torch without the need for an auxiliary device such as a grounding rod, second plasma arc torch or an oxy-fuel burner. This program provided very useful insights for operating and optimizing a production scale system.

In July 1997 the pilot scale development work was confirmed during a shakedown test of the Pit 9 PACT-8. During this test we demonstrated the ability to start the plasma arc torch without an auxiliary device. During about 60 hours of torch operation, we demonstrated the ability to start on a slag layer and confirmed that throat erosion was minimal. We also successfully poured four drums of vitrified waste to a desired height and weight within 41 gallon capacity molds.

This operating experience is being incorporated into design and procedures of other systems.

### RECENT WORK WITH A FIXED HEARTH SYSTEM

The Plasma Hearth Process (PHP) is a fixed hearth plasma processing system that was developed by SAIC, Retech, and the Department of Energy (DOE). The PHP technology has been developed to provide efficient treatment of DOE's stored mixed waste. The PHP technology is applicable to the treatment of a wide range of waste types that are currently being generated and stored throughout the DOE complex. The development program has included the construction of four PHP systems - two 200 kW bench-scale systems, one 1,200 kW demonstration test unit, and one 1,200 kW pilot-plant system. The bench-scale systems process feed materials contained in 1-gallon steel cans or introduced through an auger feed system. The demonstration test unit processed feed materials contained in standard 30-gallon steel drums. The pilot-plant system is designed to process feed materials contained in standard 55-gallon steel drums. The PHP systems have processed a wide range of simulated wastes including combustible waste, non-combustible scrap, inorganic sludge, organic sludge, cemented sludge, and heterogeneous debris. Whole, unopened containers are slowly fed to the system and "drip melted" to form a pool of molten slag and molten metal. Organic materials and volatile species are gasified and fully oxidized in a secondary combustion chamber. The resulting offgas is cooled, filtered, and cleaned in an air pollution control system.

The technology is currently transitioning from the research and development phase to the implementation phase. During this transition, Department of Energy support has decreased and private sector support has increased. Currently, SAIC and BNFL Inc. are conducting tests on the PHP Pilot Plant located at Retech's facility in Ukiah, CA. During June of 1997, the system was operated for 101 hours (plasma torch operating time) and processed 11,600 kg of simulated waste (ref. 5). The simulated waste consisted of drums of soil; soil and metal; soil, metal, and wood; and simulated debris waste. During this test, 39 drums of simulated waste and 17 empty drums were processed. A total of 11 drums of slag were produced. The slag had a total mass of 7200 kg and a volume of 2.7 m<sup>3</sup>. The average time to process a single drum was 1 hour. The feed material throughput ranged from 135 to 375 kg/hr with an average feed rate of 250 kg/hr. During this test the offgas was sampled to obtain baseline data for the emissions of cadmium, chromium, lead, nickel, particulate, hydrogen chloride (HCl), carbon monoxide, and nitrogen oxides. The emissions for all of these regulated compounds were very low. The system consistently removed 99.98% of the HCl which resulted in emissions of less than 0.0007 kg/hr. The particulate emissions were below the method detection limit, which was two orders of magnitude below the regulatory limit. The metals emissions were all at least an order of magnitude below the regulatory limits. Carbon monoxide emissions were fairly constant at 4 ppmv. This indicated excellent combustion (previous testing had indicated greater than six 9's DRE for hazardous organic compounds). The nitrogen oxide emissions varied depending on the feed material but were below regulatory limits.

During December of 1997, the system was operated for 102 hours (plasma torch operating time) and processed 11,600kg of simulated waste. The feed material consisted of drums of simulated debris waste. During this test, 89 drums of simulated waste and 23 empty drums were processed. A total of 16 drums of slag were produced. The slag had a total mass of 8300 kg and a volume of 3.3 m<sup>3</sup>. The average time to process a single drum was 37 minutes. The feed material throughput ranged from 85 to 390 kg/hr with an average feed rate of 200 kg/hr. Although the throughput rate of this test was lower than the previous test, the feed material was less dense and the volumetric throughput was doubled. It is expected that with minor system changes the volumetric throughput can be doubled again, resulting in 55-gallon drum processing times on the order of 15 minutes.

## 2. 廃棄物処理技術の整理

前章では、固体廃棄物の処理技術についての調査結果をまとめた。ここでは、熔融処理技術の調査結果を中心として、その要素技術を整理することとする。

### 2.1 固体廃棄物熔融処理の概略プロセス

図2-1に固体廃棄物の減容処理プロセスの概略フローを示す。各工程の概略は以下の通りである。

#### 1) 受入廃棄物確認

廃棄物貯蔵施設に保管管理されている廃棄物を、熔融処理施設に受け入れる際に重量、内容物、放射能量、表面線量などを測定する。

#### 2) 前処理

容器に充填された廃棄物を開梱し、必要に応じて分類を行う。熔融処理を行う場合は処理対象が焼却などに比べて広範となるが、熔融処理設備の能力から対象外となる廃棄物が存在するときに、この段階で除去を行う。前処理段階で行う操作としては、以下が必要となる。

##### ①処理対象外廃棄物の除去

一般に熔融処理は、対象物の融点が処理温度以下であれば処理が可能となる。ただし、誘導加熱のように基本的な処理対象が金属である場合などは、非金属の熔融に対して金属容器や導電性坩堝などによる補助加熱を行っているため、非金属廃棄物の混入割合に制限が加えられる可能性がある。また、金属と非金属を分離して処理する分別熔融法の場合は、この段階で両者を分離する。

なお、焼却炉の場合はプラスチックなどの不燃物や、腐食の原因となる塩化物に制限が加えられている。これらの制限は燃焼方式とオフガス処理設備の性能に依存することが多い。このため、熔融炉の調査結果では明確になっていないものの、熔融炉の場合にもオフガス処理設備の観点から難燃物の混入に制限が加えられる場合がある。

##### ②熔融炉サイズにあわせた細断

受入時の廃棄物は保管管理中の廃棄物容器に充填できるサイズ以下となっている。熔融炉サイズがこの容器よりも小さい場合は、前処理の段階で廃棄物を炉に投入できるサイズまで細断する必要が生じる。

### ③安全上の処置作業

溶融処理は焼却と同様、高温処理であるため、揮発性物質や引火性物質などを投入すると炉内で爆発する危険がある。また、処理対象物に水分が多い場合は、水蒸気の発生により溶湯が突沸したり、炉内圧の著しい上昇のため負圧維持が困難になるだけでなく、塩化物が存在する場合に腐食が起こりやすくなるなど多くの弊害がある。このため、廃棄物の含水率が高い場合には前処理として乾燥処理を行い、溶融炉の安定運転を図ることが望ましい。

### 3) 溶融

雑固体廃棄物の溶融処理は今回の調査の結果、どのメーカーもプラズマ溶融炉または高周波誘導炉のどちらかを採用して技術開発を行っている。プラズマ溶融炉については、基本構成に差は無いものの、高周波誘導炉は非金属の溶融に対して各社とも独自の方法でこれを実現している。

溶融処理された廃棄物は溶湯として、炉から排出される。溶湯は冷却を行うために受容器（鋳型）に注入される。受容器に注入された溶湯は冷却された後で引き抜くことが困難であるため、容器ごと次工程へ流れる。

### 4) 廃棄体化

受容器に注入された溶湯は冷却された後、処分容器（200リットルドラム缶）に充填される。鋳型と廃棄用ドラム缶の間には隙間が生じるために、鋳型充填後のドラムにはモルタルが充填された後、蓋締めされ、廃棄体となる。

### 5) 廃棄体確認

廃棄体は、受入時と同様に、重量、放射能量、表面汚染などを廃棄体に求められるデータを全て測定され、廃棄可能であることが確認され、搬出される。

### 6) 二次廃棄物処理

溶融処理では高温のオフガスが発生するため、焼却炉と同様のオフガス処理が必要となる。また、オフガス冷却に伴って発生する二次廃液、オフガス中の酸性成分を中和する際に発生する塩類などは、二次廃棄物としての処理が必要となる。



さらに炉の運転に伴って発生する消耗品（代表的なものとして炉壁に使用する耐火物）なども二次廃棄物として何らかの処理が必要になる。

## 2.2 溶融処理の要素技術

溶融処理の概略プロセスを、受入廃棄物確認から二次廃棄物処理の6つの工程に大別した。これらの工程にはその機能を実現するために機器が設置され、全体として処理プロセスが構築される。このうち、溶融処理に特有な機器は溶融炉と二次廃棄物処理設備（主としてオフガス処理）であり、他のプロセスは既設廃棄物処理施設に採用されている設備と同様の機器構成となる。

ここでは、溶融処理技術の中核を構成する溶融炉について、現在開発中の技術を整理する。また、溶融処理設備において処理対象に制限を与える可能性があることからオフガス処理技術についても要素技術を整理した。

### 2.2.1 雑固体廃棄物溶融炉の整理

現在開発中の雑固体廃棄物溶融炉は、プラズマ溶融炉と高周波誘導炉のみであり、以下のように分類できる。

#### (1) プラズマ溶融炉

プラズマ溶融炉の中心機器であるプラズマトーチについて、その特徴を表2-1に示すとともに、プラズマ発生状況を図2-2に示した。現在開発中のプラズマ溶融炉には、すべてDCアークプラズマトーチ（移行式と非移行式）が採用されている。両者とも一長一短があるものの、現在開発中の炉はいずれも同程度の出力であり、大きな差は無い。また、炉のサイズ、処理能力とも同等であることから、以降の整理ではプラズマ溶融炉は1種類として取り扱うものとした。

#### (2) 高周波誘導炉

非金属を溶融するための補助加熱方法として、以下の方法が開発中（一部は実機的设计製作中）されている。

- ①誘導プラズマによる補助加熱（プラズマ補助加熱型）
- ②導電性坩堝による間接加熱（坩堝型）
- ③非金属を分別し、SUS容器による間接加熱（分別溶融型）
- ④黒鉛充填層による間接加熱（黒鉛充填層型）

これらは全く方式が異なるものと考えられるため、4種類の炉は独立した種類と位置づけられる。

プラズマ炉と4種類の高周波誘導炉について、表2-2に調査結果をまとめた。

#### 2.2.1.1 処理対象および処理能力

プラズマ炉の処理能力は500kg/h程度である。また、処理対象として無機物や不燃物などが50%以上混入している。これは炉のサイズ、電源出力ともに大きいこと、プラズマトーチを動かすことで廃棄物にエネルギーを集中できることでロスが少ないことが大きな要因である。

高周波誘導炉の場合は、45kg~260kg/hと処理量は大きく異なっている。これらの差異は方式によるものではなく、溶融炉のサイズおよび処理対象物の組成の違いによると思われる。実際、同じ炉であっても、単一組成に対する試験結果として坩堝型では金属単体で260g/h、保温材のみで80kg/h、黒鉛充填層型では金属単体で140g/h、保温材のみで45kg/hとの値が報告されている。どちらも金属の処理能力は保温材のおおよそ3倍程度となっていることがわかる。

図2-3に各方式の処理能力をまとめた。横軸は組成比であり、廃棄物組成としては保温材と金属のデータを主として用いた。プラズマ炉の場合は単一成分の処理データが公開されていないため、金属と非金属（無機物と可燃物を含む）の比率を使用している。0%は全て保温材の場合であり、100%は全て金属の場合である。坩堝型の3条件での処理速度をプロットすると、3点がほぼ同一直線上に並んでいることが分かる。

実際の溶融処理においては、対象廃棄物は保温材と金属に限定されるわけではなく、特に融点の高い無機物及び可燃物は処理速度を大きく低下させると考えられる。一例としてプラズマ補助加熱型では、難燃物が2%入っただけで処理速度が半分に低下しているとの報告がある。また、坩堝型でもセラミックフィルターエレメントと保温材の混合物を処理した場合には処理速度が61kg/hまで低下している。

### 2.2.1.2 炉の仕様

プラズマ炉はトーチ用電源として1~1.2MW程度を使用している。この出力は、現在市販されているプラズマトーチとしては最大級のものである。

高周波溶融炉は坩堝型と分別溶融型がともに600kWの電源を使用している。また、プラズマ補助加熱型は250kW（誘導プラズマ分は100kW）、黒鉛充填層型は100kWである。表2-3に高周波誘導炉の標準的な特性を示した。600kWの高周波誘導炉は通常、1バッチあたり1,000~1,500kg程度の容量を持っていることが分かる。この容量は金属ベースで算出されていることから、比重の軽い非金属を処理する場合には、同容量でも処理重量は低下する。

坩堝型は実規模サイズの導電性坩堝を用いて処理していること、分別溶融型はパイロット試験設備として実規模ベースで製作されていることから、実機も同出力の電源コイルが適用されることが考えられる。

一方、プラズマ補助加熱型、黒鉛充填層型はどちらも小型試験設備であり、電源出力が小さいが、両者とも補助加熱容器を使用していないことからスケールアップは十分可能である。実際、1日4トンの処理能力を有するプラズマ補助加熱型炉が計画(資料2-1)されている。

### 2.2.1.3 前処理

前処理には炉の形式に依存しない安全上の選別と、各炉型に特有の選別、廃棄物の細断処理が存在する。特に分別溶融型の場合、金属と非金属を分けて溶融するため、前処理においてはこれらを事前に選別しておく必要がある。

廃棄物の切断は、炉のサイズによって決定されることが考えられるが、どの程度の前処理が必要かは明らかにされていない。また、坩堝型の場合は、他の方法と異なり、導電性坩堝がそのまま溶湯の受容器を兼ねることから、突沸などにより溶湯が坩堝から溢れないようにする必要がある。このため、坩堝サイズ以外に溶湯漏洩防止の観点からも細断サイズ、投入間隔が決まる可能性がある。

なお、プラズマ炉はドラム缶ごと溶融することも可能であり、安全上の選別が必要となるものの、廃棄物の細断は基本的に不要である。

#### 2.2.1.4 廃棄体性状

溶融処理によって、廃棄物は成分が均一な固化体になる。ただし、これをドラム缶に充填した廃棄体には炉形式により、補助加熱容器などの様々な材料が同伴する。

##### ①溶湯受容器

導電性坩堝を溶融時に使用し、溶湯受容器と兼用する坩堝型を除く炉は、いずれも溶湯のみが炉から排出される。溶湯は1500℃程度であることから、これを冷却凝固させる工程が必要となる。溶湯を金属容器で受ける場合、この容器を冷却しても、変形や変色などが発生することから、これをそのまま処分容器として使用することは困難であると考えられる。

このため、溶融処理にあたっては、処分容器とは別に、溶湯を受ける専用容器が必要となる。溶湯受容器は処分容器に充填する必要があるため、処分容器として200リットルドラム缶を想定する場合には、ドラム缶に充填できることがサイズ上の制約となる。

##### ②補助加熱材料などの混入

非金属溶融の手段として金属容器や黒鉛などを加熱媒体として使用する高周波誘導炉の場合は、これらが廃棄物とともに溶融され、混入する。

分別溶融型では非金属溶融時にステンレス容器を設置する。非金属は誘導加熱されたステンレス容器の発熱で溶融、出湯される。非金属の中でもステンレスより融点の高い物質は多々存在することから、非金属溶融時には融点降下剤を投入することで、炉内温度をステンレスの融点以下で運転している。

このため、非金属廃棄物の溶湯には融点降下剤が混入する。また、非金属の出湯後は、金属廃棄物を充填し、ステンレス容器ごと溶融処理するため、金属廃棄物の溶湯にはステンレス容器が混入することになる。

黒鉛充填層型は、黒鉛充填層を誘導加熱することで非金属を溶融しており、溶融処理の進行に伴って、黒鉛自身が溶融する。消費量が不明であるため、混入率は分からないものの、黒鉛は二次廃棄物として溶湯に混入することになる。

### ③ 1 廃棄体あたりの廃棄物充填量

前述のように、溶融固化体を処分容器に充填する場合には、溶湯受容器と二次廃棄物が占める体積を考慮しなければならない。溶湯受容器のサイズについて公開されているのは坩堝型の導電性坩堝のみである。坩堝型溶融炉に使用する導電性坩堝の概略図を図2-4に示す。容器と溶湯を合わせた体積は約160リットルであり、治具で掴んで200リットルドラム缶に充填することを想定して選定されたサイズであると考えられる。容器そのもの（導電性セラミック）は厚みが41mmとなるために、容器材料が占有する体積は約60リットルになり、廃棄物は100リットル程度しか充填できないことになる。

#### 2.2.1.5 オフガス量

オフガス量が公開されているのは坩堝型のみであり、 $200\text{Nm}^3/\text{h}$ である。ただし、この値は金属と不燃物の処理を行う実規模試験設備での実績であり、可燃物や難燃物を処理する場合には大きく増加すると考えられる。

可難燃物を処理対象とした場合のオフガス量を検討する。原電敦賀向けプラズマ炉では処理能力 $500\text{kg}/\text{h}$ に対して25%が可難燃物と設定されている。即ち単位時間当たりで考えると、可燃物や難燃物を $125\text{kg}/\text{h}$ で処理を行うことになる。オフガスが可燃、難燃物の処理に伴って発生すると考えると、この処理能力はCILVA焼却炉の処理能力（ $100\text{kg}/\text{h}$ ）と同等の値である。

2.2.2.2で述べるようにオフガス発生量はガス冷却方式によって変動するため、正確な値では無いものの、CILVA焼却炉のオフガス量が $2,500\text{Nm}^3/\text{h}$ であることから、可燃・難燃物の処理を行う場合は、少なくともこれと同程度の能力が必要になると考えられる。

#### 2.2.1.6 消耗品

消耗品としては、炉の運転で損耗する保守用消耗品と、運転に比例して必要な消耗品が存在する。

##### ①耐火物

耐火物の材料およびその寿命については、各方式とも言及していない。耐火物は炉のサイズにより使用量が異なるが、トンオーダーで使用されるため、寿命が短いと短期間に大量の廃棄物が新たに発生する。

耐火物はシリカ、アルミナなどのセラミックであるため、その寿命は溶湯による浸食とスポーリング（機械的および熱的衝撃による破壊）が要因となる。溶融炉はその運転上、溶融、出湯を繰り返すことによりサーマルサイクルが頻繁であり、浸食よりもスポーリングが支配的であると考えられる。スポーリングは突然起こるため、寿命評価が難しく、通常の腐食のように設定寿命に応じた腐食しるを取る方法では対応が行えない。また、一般産業で使用されている溶融炉では、製鉄の溶鉱炉、灰溶融炉など対象物は一定であり、その性状を考慮した耐火物材料の選定を行うことで長期間の使用が可能である。これに対して、雑固体廃棄物は金属、不燃物など対象が多種多様である。一般的に、耐火物は金属材料に適したものとガラスなどのセラミック系の材料に適したものがあり、両者に対して耐久性の高い耐火物は存在しないのが現状である。

このため、雑固体廃棄物溶融炉では、運転を24hとしたり、運転停止時にもヒーター等で炉の温度をある温度以上に保持するなどの対応をすることが望ましい。

## ②プラズマトーチ電極

プラズマ炉は電極間にアークを飛ばすため、運転に伴って電極が消耗する。電極の寿命は作動ガス、使用条件によって異なるが、500～1,000h程度が限度であると考えられる。交換の際には、プラズマトーチを溶融炉から取り外す必要があるため、トーチは予備品を設けて、運転に支障を及ぼさないような配慮が必要となる。

なお、プラズマ補助加熱型炉に使用されている誘導プラズマトーチは、無電極のため電極交換は不要であるが、出力が100～200kW程度のものしか市販されていない。

## ③容器、加熱材料類

廃棄体性状で述べたとおり、処理を行う上では溶湯を受ける容器や非金属溶融を行うための補助加熱材料が必要となる。各溶融炉形式で必要となる受容器、補助加熱材料は以下のとおりである。

プラズマ炉	：溶湯受容器
プラズマ補助加熱型	：溶湯受容器
坩堝型	：導電性坩堝（溶湯受容器兼用）
分別溶融型	：溶湯受容器、非金属加熱用SUS容器、融点降下剤
黒鉛充填層型	：溶湯受容器（黒鉛製）、非金属加熱用黒鉛

## 2.2.2 オフガス処理技術の整理

現在開発中の溶融炉については、それらが試験設備であることから、オフガス処理設備に対する具体的な情報は公開されていない。

ここでは、オフガス処理については焼却炉に適用されている各種処理方法を整理することとした。オフガス処理には以下の工程が必要となる。

### (1) 二次燃焼

炉から出たカーボンや一酸化炭素などの未燃焼成分を燃焼させる。ダイオキシン対策から、少なくとも国内では800℃以上の温度で2秒以上滞留させることが必要となる(資料2-2)。なお、ヨーロッパでは1000℃～1200℃としているところが多い。

### (2) ガス冷却

二次燃焼後の高温のガスを冷却する。従来、ガス冷却は後段の設備に負担をかけないことが目的であったため、冷却速度については特に制限が無かった。実際、竪型焼却炉では一段目のセラミックフィルタで行い、ガス冷却は二次セラミックフィルタのさらに後段であった。しかし、ダイオキシンは完全燃焼しても250～600℃程度の温度領域で再生成されることから、現在はその対策として二次燃焼後のガスを200℃程度まで冷却することが要求されている。

### (3) HCl、SO<sub>x</sub>処理

HCl、SO<sub>x</sub>は酸性ガスであり、大気汚染防止法で放出が制限されている。これらは基本的にアルカリを用いて中和することで除去を行う。

### (4) NO<sub>x</sub>、ダイオキシン処理

NO<sub>x</sub>も同様に放出が制限されている。NO<sub>x</sub>は空気中の窒素が高温で酸化されることで発生するため、還元することで再びN<sub>2</sub>に戻すことになる。

ダイオキシンは二次燃焼による完全燃焼および、ガス急冷により発生を大幅に抑制できるものの、さらに放出量を低減する必要がある場合には、触媒などによる分解を実施する必要がある。

### (5) エアロゾル除去

放射性物質を取り扱う施設の排気系には放射性粒子を除去するために必ず設置されており、排気されるガスによって設定されたDFを確保するために必要な段数が設定されている。

以下、各処理技術を分類、整理する。

#### 2.2.2.1 二次燃焼

二次燃焼技術を表2-4に示す。二次燃焼としては、ほとんどの場合、バーナーによる燃料加熱が行われる。燃料としては重油などの液体燃料またはLPGなどの気体燃料が用いられている。

また、燃焼は加熱した雰囲気中に空気を吹き込むことでも実現できるため電気加熱式も考えられ、実際にフランスVALDUCの熱分解炉において使用されている。ただし、VALDUCの炉の処理能力は7kg/hと小さい上、熱分解炉でありガス量が少ないことから、電気加熱の商用規模の炉への適用は加熱容量の確保の点で困難であると考えられる。

#### 2.2.2.2 ガス冷却

ガス冷却には空気希釈方式、水噴霧方式と熱交換器方式がある。各方式の特徴について表2-5に示す。

##### (1) 空気希釈方式

空気希釈方式は高温のガスに常温の空気をブローで送り込み混合希釈することで冷却を行う方法であり、構造が簡単であることから堅型焼却炉を中心に広く用いられてきた。ただし、冷却には多量の空気が必要となり、例えば1000℃のオフガスを200℃まで冷却するためにはオフガスの約4倍の空気が必要となり、結果としてオフガス量

(Nm<sup>3</sup>/h換算)は5倍程度に増加する。従来の堅型焼却炉では、オフガスの急冷が求められていなかったため、ガス冷却は2段のセラミックフィルタを通過した後で行われてきた。ガス冷却が二次燃焼直後となる場合、スクラバやNO<sub>x</sub>除去などプロセス機器全体の容量が増加するため、機器の設置スペースと設備コストの上昇を招くことになる。

##### (2) 水噴霧方式

水噴霧方式はオフガスに直接水をスプレーし、その潜熱により冷却する方法である。水の比熱、蒸発熱、水蒸気の比熱を用いた計算では空気1Nm<sup>3</sup>を1,000℃から200℃へ冷却するのに水は約1/1000m<sup>3</sup>程度必要である。水は蒸発すると体積が約1,000倍に膨張するため、冷却によってオフガスは水蒸気により2倍程度に増加する。ガスの湿度が高くなると配管の腐食の原因となり、HClやSO<sub>x</sub>などが共存する場合、腐食は特に顕著になる。このため、水噴霧装置の直後で凝縮水およびHCl、SO<sub>x</sub>を除去し、この間の配管は



高耐食性材料を使用する必要がある。凝縮水回収後はオフガス量は再び減少し元にもどるため、その後の設備容量は増加しない。

### (3) 熱交換器方式

熱交換器方式はオフガスを熱交換器に通し、間接的に水冷する方式であり、ボイラー方式とも呼ばれる。冷却水が水蒸気となるため熱回収を行え、プロセス後段の加熱源として用いることで省エネが行える。このため、都市ゴミ焼却炉などで採用されている他、放射性廃棄物焼却炉としてもデンマークENVIKRAFT社が採用している。

ただし、熱交換器は熱伝導の良い金属を利用するために腐食には弱く、実際、同社の難燃物焼却炉はいずれも塩化物の混入を数%に制限している。

#### 2.2.2.3 HCl、SO<sub>x</sub>処理

HClおよびSO<sub>x</sub>は中和反応によって塩素および硫酸分を回収する。回収方法はCaCO<sub>3</sub>、Ca(OH)<sub>2</sub>、CaOなどのアルカリを粉体として噴霧する乾式法、粉体に水分を加えてスラリー状にして噴霧する半乾式法およびNaOHなどのアルカリ水溶液中にオフガスを通過させる湿式法が存在する。表2-6に各方式の特徴を示した。

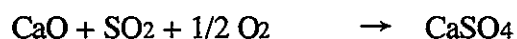
##### (1) 乾式法

アルカリ粉体を吹き込み、中和反応生成物を回収する。吹き込む場所としてはバグフィルタ方式が最も効率が高い。各アルカリ粉体を用いた乾式法による中和反応を以下に示す。

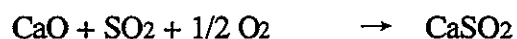
###### ①消石灰の場合



###### ②炭酸カルシウムの場合



###### ③生石灰の場合



乾式処理を方針としているVULDUC、MELOXではバグフィルタとともに適用されている。VULDUCの場合はHCl 400gに対してCaO 1kgを使用しており、反応率は約30%である。

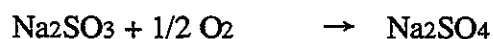
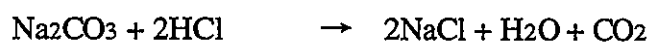
## (2) 半乾式法

乾式法との違いは、粉体に湿分を持たせてスラリー状にしていることである。ノズルの閉塞が起きやすい上、除去率が50%程度と低く、最近では都市ゴミ焼却炉での採用例は少ない。

## (3) 湿式法

アルカリ水溶液を吸収塔に噴霧し、反応生成物をNaCl、Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>などの溶液で回収する方法である。NaOHはオフガス中に多量にあるCO<sub>2</sub>を吸収してNa<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>として溶液中に溶解し、これがHCl、SO<sub>x</sub>と反応する。

NaOHを用いた湿式法による中和反応を以下に示す。



排ガスは増湿冷却されて水分飽和ガスとなるので、除湿/再加熱のプロセスを介して大気中に放出する必要があること、廃液処理が必要となることなど、プロセスは最も複雑となる。

海外では乾式法の実績があり、バグフィルタ方式の場合に除去効率が高い。また国内でも都市ゴミ焼却炉ではバグフィルタが広く使用されており、実績が多い。一方、国内の放射性廃棄物処理施設では、バグフィルタの使用実績が無いいため、採用し難い。従って、現実的には、HCl、SO<sub>x</sub>処理には湿式法が適用されると考えられる。

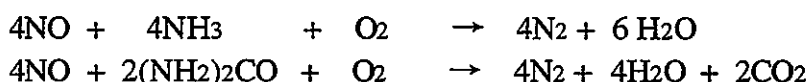
#### 2.2.2.4 NO<sub>x</sub>、ダイオキシン処理

NO<sub>x</sub>除去は大別して無触媒脱硝と触媒脱硝があり、近年、活性コークス法が開発されてきた。これらの比較表を表2-7に示す。

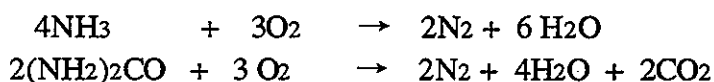
##### (1) 無触媒脱硝法

無触媒脱硝は、高温域（800～900℃）に還元剤としてアンモニア（ガス、水溶液）や尿素を噴霧し、NO<sub>x</sub>をN<sub>2</sub>に還元する方法である。

以下に脱硝反応を示す。



ただし、NH<sub>3</sub>や(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>COは、高温で、脱硝反応の他に、燃焼反応が併発して、消失する。したがって、反応率は100%とはならない。



設備構成は簡単であり、安価なため、簡易脱硝法として一般に広く用いられている。

##### (2) 触媒脱硝法

本方式の脱硝原理は、無触媒脱硝法と同じであるが、無触媒脱硝法が気相反応に依存し高温ガス領域で行われるのに対して、脱硝触媒を利用して低温ガス領域（200～350℃）で処理が行われる。

触媒活性体として酸化タングステン（WO<sub>3</sub>）、酸化バナジウム（V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>）などを主成分とし、酸化チタン（TiO<sub>2</sub>）を担体として構成される。形状は主としてハニカム状のものが使用されている。本反応は触媒反応であるため、無触媒反応と異なり、大幅に反応速度が高い状態で反応が進行するため、NH<sub>3</sub>の利用率はほぼ100%に達する。

触媒はHClによる被毒はないが、SO<sub>3</sub>によって性能低下する。これはSO<sub>3</sub>が還元剤として注入されるNH<sub>3</sub>と反応してNH<sub>4</sub>HSO<sub>4</sub>や(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>を生成し、触媒を被覆するからである。

本触媒は脱硝反応に寄与するのみならず、ダイオキシン類の酸化分解にも触媒作用を持っている。

### (3) 活性コークス法

活性炭とコークスの中間の性能を持つ活性コークスを触媒として使用する方法である。活性コークスは、脱硝触媒として作用するだけでなく、本来の吸着剤としての特性により、ダイオキシンや低沸点有害物質を吸着除去する能力も持ち合わせている。

脱硝方式のうち、活性コークス法はダイオキシンの吸着機能を、触媒脱硝法はダイオキシンの酸化分解作用を有する。ダイオキシンの発生は、主として高温燃焼と急冷による燃焼制御（ガイドラインで設定）によって、かなりの低減が行える。一方、放出基準が改正され、より厳しい対応を求められる場合には、わずかながら発生したダイオキシンを何らかの手段で除去して排気を行わなければならない、酸化分解の可能な触媒脱硝法が大きなメリットを有する。

#### 2.2.2.5 エアロゾル除去

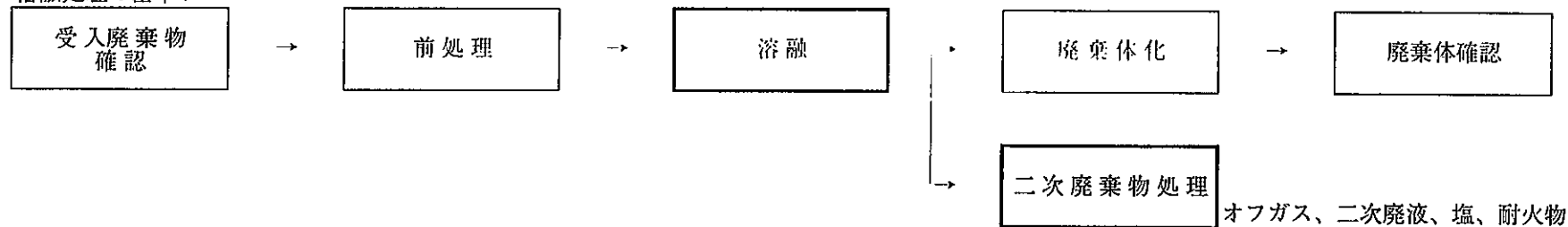
エアロゾル除去方式を表2-8に示す。都市ゴミ焼却炉では、排ガス中のダストを除去する目的で集塵装置が設置されており、電気集塵機とバグフィルタが用いられている。

これまで述べたオフガス処理工程のうち、HCl、SO<sub>x</sub>処理とNO<sub>x</sub>、ダイオキシン処理として乾式処理を行う際にはバグフィルタを利用する方式がある。このため、これらの工程に乾式処理を選定して、バグフィルタと組み合わせることで、総乾式処理などの合理的な処理が行えるため、バグフィルタは現在、よく使用されている。

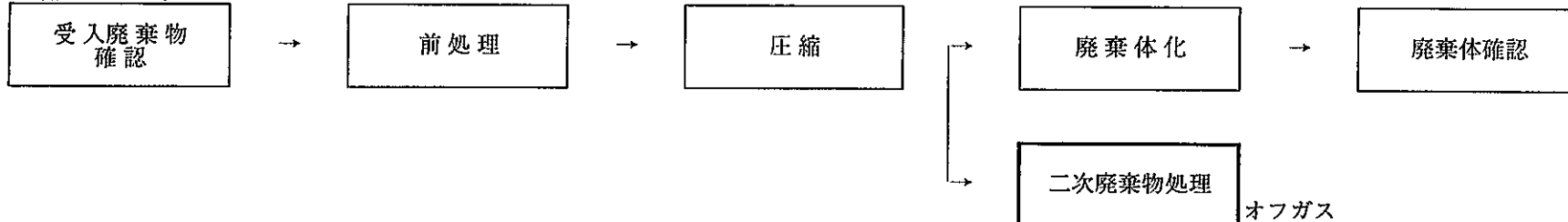
このうち、放射性ダストの除去としては、フランスの焼却炉（VALDUC、MELOX）の一部ではバグフィルタ方式が採用されている。バグフィルタの最大のメリットは、各種薬剤をプレコートしたり、フィルタ直前で粉体を噴霧することでHCl、SO<sub>x</sub>処理などが行える点にある。一方、国内ではセラミックフィルタとHEPAフィルタ（HEPAフィルタ使用時には粗除塵としてプレフィルタが使用されている）のみが使用されている。

国内の原子力施設ではバグフィルタの実績は無く、また、海外での実績も炉の容量が小さい（VALDUC：7kg/h、MELOX：20kg/h）ことから、これらの焼却炉とオフガス量が大きく異なる雑固体廃棄物溶融炉への適用は困難であると考えられる。

溶融処理の基本フロー



圧縮処理の基本フロー



モルタル充填の基本フロー



図2-1 固体廃棄物の減容処理プロセスの概略フロー

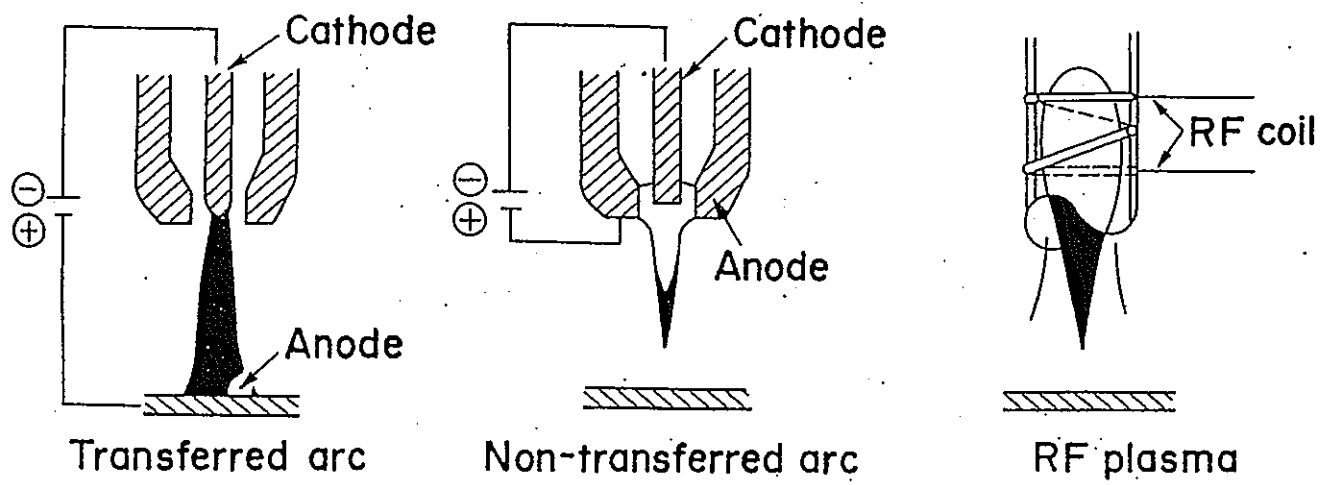


図2-2 プラズマトーチの概略図

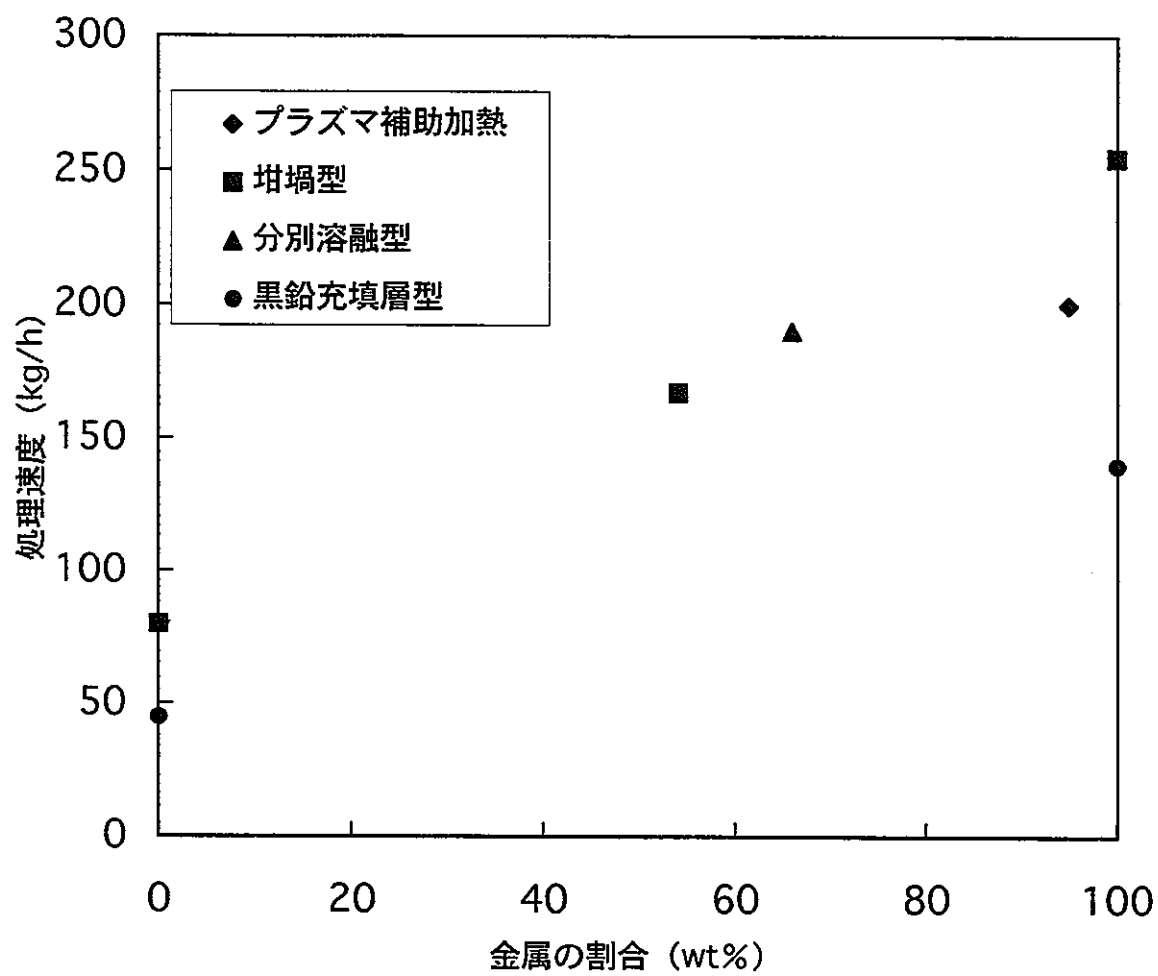
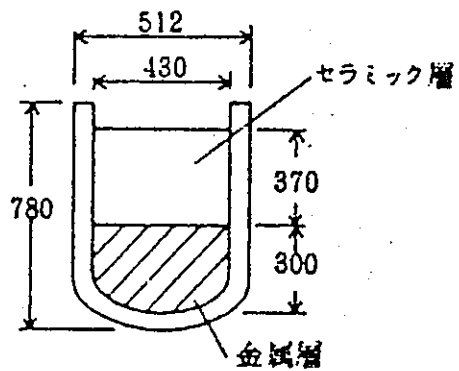


図2-3 各溶融方式の処理能力



セラミック層	150kg (2.8kg/ℓ)	
金属層	336kg (7.7kg/ℓ)	
キャニスタ	130kg	—
合計	616kg	—

図2-4 坩堝型溶融炉に使用する導電性坩堝の概略図  
(出典 デコミッションング技報 第8号)



表2-1、プラズマトーチの分類

プラズマトーチ	DCアーク非移行式 (ノントランスファー型)	DCアーク移行式 (トランスファー型)	誘導結合型 (RF)
プラズマ発生原理	トーチ内の陽極と陰極間にアークを発生させ作動ガスをプラズマ化	トーチには陰極のみを持ち、熔融対象物を陽極してアークを発生させ作動ガスをプラズマ化	石英管の水冷トーチ内に作動ガスを流し、管外の高周波コイルで誘導加熱してプラズマ化
特徴	トーチ内でアーク放電を発生させており、プラズマの発生・持続がトーチで完結	両極間に発生する電流によりジュール加熱が行えるため、非移行式に比べて20%程度効率が高い	無電極であり、電極消耗による溶解対象物の汚染が無いため、高純度物質の合成に利用されている
一般用途	金属精錬、都市ゴミ (灰) 熔融		分析機器、半導体製造
出力	1MWクラスが市販		200KWクラスが市販
プラズマ安定度	陽極と陰極がトーチ内で完結しており、最も安定	炉側にある陽極が絶縁されるとプラズマが不安定になる	炉が接地されると、アークが飛ばなくなる。
保守性	定期的な電極交換が必要 (500時間程度が寿命)		無電極のため定期的な部品交換は不要
適用性	プラズマトーチのみで廃棄物の熔融が可能である。		出力が小さいものの保守が殆ど不要なため、補助加熱に適している

表2-2 (1) 固体廃棄物溶融炉の調査結果

加熱方式	プラズマ炉	高周波誘導炉				
		プラズマ補助加熱型 (ハイブリッド)	坩堝型	分別溶融型	黒鉛充填層型	
対象廃棄物	可燃燃物、金属、非金属全て処理可能である。	補助加熱用の誘導プラズマにより非金属の溶融に対応。可燃燃物混入を想定した試験も実施	導電性坩堝を誘導加熱することで非金属の溶融に対応。保温材の溶融試験を実施	非金属の溶融は、炉に充填したSUS容器を誘導加熱することで対応。保温材58kgを試験的に処理	黒鉛充填層を誘導加熱することで非金属の溶融に対応	
処理能力	500~600kg/h	100kg/h	167kg/h (標準組成) 金属のみ: 260kg/h、保温材のみ: 80kg/h	190kg/h (金属・非金属を合わせて)	金属: 140kg/h 保温材: 45kg/h	
処理の内訳	処理量	-	400kg	500kg (坩堝重量は除く)	金属426kg、非金属214kg	-
	標準組成	金属: 45% 無機物: 38% (コンクリ、断熱材、フィルム) PVC、ゴム、樹脂: 25% 焼却灰: 約1% *文献により、若干の差異有り	炭素鋼: 90% 無機物: 5% (コンクリ) ポリエチレン、塩ビ: 5%	金属: 54% 無機物: 44% (コンクリ、断熱材、フィルム) 焼却灰: 2% *可燃物は含んでいない	不明 (金属と非金属を別バッチで溶融。非金属としては保温材を使用)	不明 (試験では金属と保温材を使用)
	処理時間	-	4.0h (可燃物無しの場合2.0h)	3.0h	-	-
炉の仕様	電源	DCプラズマ電源 1000KW~1200kW	高周波電源250KW 誘導プラズマ電源100kW	高周波電源 850Hz-600KW	高周波電源 1000Hz-600KW	高周波電源 10000Hz-100KW
	炉サイズ	内径約2m、高さ2m程度 (メーカーによって差異有り)	-	坩堝: 外径512mm 高さ780mm 厚さ41mm 炉のサイズは不明	内径650mm、高さ2100mm (パワフル試験設備)	-
前処理	安全上の選別	スプレー缶など爆発の危険性のある廃棄物を選別し、除去 (穴を空けてガスを抜くなどで対応)				
	炉形式上の選別	不要		溶融方式上、金属と非金属を分離		不要
	廃棄物切断サイズ	ドラム缶単位での処理を行うため、切断処理は不要	-	-	-	-

表2-2 (2) 固体廃棄物溶融炉の調査結果

加熱方式		プラズマ炉	高周波誘導炉			
			プラズマ補助加熱型 (ハイブリッド)	坩堝型	分別溶融型	黒鉛充填層型
廃棄体性状	出湯時の形態	SUS等の受容器に出湯		坩堝 (60liter) に廃棄物100literが充填されて坩堝ごと取出	SUS等の受容器に出湯 (加熱用SUS容器は金属廃棄物)	黒鉛坩堝に出湯
	廃棄体性状	金属製受容器+廃棄物 (金属、スラグ同ハッチ)		坩堝60liter+ 廃棄物100liter (金属、スラグ同ハッチ)	金属受容器+廃棄物 (金属とスラグ別ハッチ)	黒鉛坩堝+廃棄物 (金属、スラグ同ハッチ)
	1ドラムの廃棄物量	-		100liter	-	-
ガス量	プロセスガス量	1MWトーチの作動ガス400Nm <sup>3</sup> /h程度と推定	補助プラズマを100KWクラスとすると、最大で50Nm <sup>3</sup> /h程度と推定	プラズマ作動ガスは不要		
	換気量	-	-	約200Nm <sup>3</sup> /h (可燃物対象外)	-	-
	トータル排気量	可燃・難燃物を処理する場合は2000~3000Nm <sup>3</sup> /hは必要になると推定される 注1)				
消耗品	機器保守	プラズマトーチ電極 (500h程度で交換)	プラズマトーチ電極は無電極のため電極交換は無い	特になし		
	耐火物	定期的な保守 (交換) が必要		坩堝が耐火物を兼ねるので、基本的には交換は無し	定期的な保守 (交換) が必要	
	容器類	廃棄物受容器: 1廃棄体につき、受容器1本必要		1廃棄体につき坩堝1本必要。	加熱用SUS容器: 金属溶融1ハッチに1本必要 廃棄物受容器: 1廃棄体に1本必要 融点硬化材: 非金属溶融1ハッチに必要	1廃棄体につき黒鉛坩堝1本必要。 また、炉内に充填する黒鉛も消耗する。
開発段階	状況	国内外で実機が設計製作中	試験機: 小規模レベル 実機: 設計製作中	国内で実機が設計製作中	パイロットプラントによる確認段階 (ほぼ実機レベル)	開発初期の段階と推定 (出力100kWクラスから)
	課題 (推定)	保守性向上 (耐火物寿命) や廃棄体特性向上など運用面での開発へ移行	実機は金属主体。誘導プラズマトーチは出力が小さいため、不燃物比が高い場合の対応は前処理負担を含めて課題	可燃・難燃物に対する対応が課題。また、充填率向上 (坩堝肉厚低減) が望まれる。	可燃・難燃物への対応が課題	実規模サイズでの確認試験の実施が課題

注1) 処理量500kgの25%が可燃物であり、125kg/hの処理が必要。100kg/hの可燃物焼却炉の排気量を適用

表2-3 高周波誘導炉の標準的な特性

(出典 工業炉ハンドブック)

高周波出力 (kW)	定格周波数 (kHz)	炉容量 (kg)	電力原単位 (kWh/t)	溶解時間 (min)
15	10	10		
30	10	25		
50	3	30	1,000	35
		50	1,030	60
100	3	50	860	25
		100	900	55
		150	940	85
150	1	150	800	95
		300	850	100
300	1	300	720	45
		500	750	75
600	0.5	1,000	700	65
		1,500	720	100
900	0.5	1,500	670	60
		2,000	680	80
1,200	0.5	2,000	650	65
		3,000	660	99
1,500	0.5	3,000	640	77
		5,000	650	130
1,800	0.5	5,000	620	103
		8,000	630	168
2,400	0.5	8,000	600	120
		10,000	620	155

(注) 特性値は鋼を1,600°Cまで連続溶解する場合で、装入・除滓などのむだ時間は含まない。

表2-4 二次燃焼技術の分類

	バーナー加熱方式	電気加熱方式
方法	ガスに重油やガス等の燃料と空気を吹き込んで未燃焼分を燃焼させる方式	ガスに空気を混合して電気ヒーターで加熱し、ガス中の未燃焼分を空気で酸化させる方式
主要機器	空気供給装置、パイロットバーナー、メインバーナー等	空気供給装置、加熱炉体、空気導入口等
実施例	通常の二次燃焼はほぼ全てがこの方式を採用している。	VALDUCで採用例がある。
プロセス制御	空気量で燃焼温度を制御するため、精密な制御は行えない。	空気量とともに、電気ヒーターの通電電流で温度制御が可能であり、制御性は良い。
適用	二次燃焼はガスが一定の速度で通過することから短時間で 行う必要があること、電気式とことなり熱効率が高いこと から、通常二次燃焼の場合は本方法が用いられている。	電気加熱により未燃焼ガスを酸化させる本プロセスは、燃 焼と異なり反応が穏やかである。VALDUCでは、難燃物を 熱分解しており、オフガス発生量も少ないことから本方法 が成立するものの、多量のガスを瞬時に燃焼させる場合は 本法では追いつかないと考えられる。

表2-5 ガス冷却技術の分類

	空気希釈方式	水噴霧方式	熱交換器方式
方法	二次燃焼後の排ガスを常温の空気と混合希釈することで冷却する。	二次燃焼後の排ガスに冷却塔で水噴霧を行い、冷却する。	二次燃焼後の排ガスを熱交換器を通して間接的に水冷却する。
主要機器	フィルタ、ダクト、プロア、希釈チャンバ等	冷却塔、冷却水貯槽、スプレーポンプ等	熱交換器、高圧蒸気溜め、復水器など
実施例	縦型焼却炉で実績多数。都市ゴミでは採用無し。	ZWILAG、DOEなどの回転プラズマ炉	横型多段室焼却炉（BNVICRAFT社製）
プロセス制御	希釈空気の割合が多く、実オフガスの圧力および温度変動を吸収するため、制御性は良い。	水の噴霧量が少ないと冷却効果が下がり、多すぎると水分が再凝結して配管腐食の原因になるなど、制御は困難である。	熱交換器と蒸気加熱器を循環する冷却水の圧力、温度制御がメインであり、制御性は良い
二次廃液	無し	オフガス量の約1/1000	無し（ボイラー水は循環系のため）
オフガス量増加率	約5倍	1	1
腐食への影響	乾式方式であり影響は無い	スプレー水が配管途中で凝縮するため、腐食の原因になる。	間接冷却であり影響は無い
塩化物への対応	空気希釈チャンバ、冷却塔内は耐火物貼りとなり、塩化物による腐食対策が実施できる。また、冷却後はHCl除去までの高耐食性材料にすることで対応可能。		熱交換器には、熱伝導率の高い銅やアルミ等が使用され、ガス経路も絞られることにより塩素吸着が起こりくなり、著しく腐食されると考えられる。
保守	空気混合用ノズルの閉塞が考えられるが、乾式処理のため保守はほとんど必要ない	スプレーノズルの閉塞時には部品交換が必要。	塩素成分により熱交換機が腐食した場合はユニットごと交換となる。
適用	オフガス量、設置スペースに対する制限をクリアできれば、保守の面でメリットは大きい。特に、乾式ガス処理と組み合わせた総乾式処理にすると二次廃液の発生が無くなり設備の簡略化が可能になる。	処理後のガスは湿分が高いため、腐食の問題を伴う。また、バグフィルタとの組み合わせは閉塞が顕著になるため適用しがたいと推定される。一方、スクラバによる湿式ガス処理と組み合わせると、機能共有の合理的な設計が行え、メリットがある。	本方式を採用している焼却炉では塩化物混入比が3～5%に制限されており、塩化物処理は困難であると推定される。

表2-6 HCl、SOx処理技術の分類

	乾式法	半乾式法	湿式法
方法	CaCO <sub>3</sub> 、Ca(OH) <sub>2</sub> 、CaOなどのアルカリ粉体を吹き込み、反応生成物（CaCl <sub>2</sub> 、CaSO <sub>4</sub> ）を回収する。吹き込む場所として、炉内や電気集塵機、バグフィルタ前の煙道などがあるが、バグフィルタ方式が最も効率が 高い。	CaCO <sub>3</sub> 、Ca(OH) <sub>2</sub> 、CaOなどをアルカリスラリーとして噴霧して、反応生成物を回収する。吹き込む場所は乾式法と同様である。	NaOHなどのアルカリ水溶液を吸収塔に噴霧し、反応生成物をNaCl、Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> などの溶液として回収する方法である。
主要機器	アルカリ粉体貯槽、フィーダ、ポンプ	アルカリ粉体貯槽、スラリータンク、ポンプ	洗浄塔、アルカリ水溶液貯槽、凝縮器、塩固化設備
実施例	VULDUC、MELOXで採用。都市ゴミ焼却炉では実績多数。	都市ゴミ焼却炉で一部あるが、最近は行われていない。	各国の焼却炉、溶融炉で実績多数
二次廃棄物	VULDUCの場合はHCl 400gに対してCaO 1kgを使用しており、反応率は約30%である。即ち、反応に必要な量の二倍以上の未反応粉体が二次廃棄物として発生する。	半乾式の反応効率、除去性能は乾式とほぼ同等であるため、同程度の未反応スラリーが二次廃棄物として発生する。	乾式処理、半乾式と反応率は同等であるが、反応生成物を含んだアルカリ水溶液が二次廃棄物となるため、蒸発処理にて固形化して回収する必要がある。
腐食への影響	乾式方式であり影響は無い	スラリー中の若干の水分が配管途中で凝結するため、腐食の原因になる。	洗浄塔は湿分が高く、腐食の可能性が高い。このため、内壁は腐食を考慮した材質を選定する必要がある。
適用	空気希釈によるガス冷却と組み合わせたバグフィルタ方式が総乾式処理プロセスとして実施されている。一方、湿式ガス冷却との組み合わせはフィルタ閉塞頻度の上昇から採用し難いと考えられる。	ノズル閉塞時の保守を考慮して、都市ゴミ用でも採用例は多くは無い。保守のデメリットを考えると、原子力分野では積極的に採用するメリットは無いと考えられる。	除去性能は最も高く、都市ゴミ焼却炉では大都市近郊など規制の厳しい場合に適用されている。原子力分野では最も実績があり、空気希釈、熱交換器など全ての様々なガス冷却と組み合わせられている。

表2-7 NOx、ダイオキシン処理技術の分類

	無触媒脱硝法	触媒脱硝法	活性コークス法
方法	NH3ガス、NH3水を噴霧してNOxを選択還元する方法であり、高温反応であるため、焼却炉への直接吹き込みなどが行われている。	無触媒法と同じ反応を、酸化タングステン (WO3)、酸化バナジウム (V2O5) などの触媒を利用して、低温で行う方法	活性炭とコークスの中間の性能を持つ吸着材である活性コークスを触媒として使用する方法
酸性ガスによる影響	NH3は脱硝反応および燃焼反応として消失する以外に後流にリークする。この際、HClが存在すると反応して白煙の原因となるNH4Clを生成する。	脱硝触媒はSO3によって性能低下があるものの、HClによる被毒は無いこと。	
使用温度	800℃～900℃	200～350℃	150～200℃
脱硝率	30～40%	60～80%	60～80%
ダイオキシン除去	不可	脱硝触媒によりダイオキシンが酸化分解	活性コークスによりダイオキシンを吸着除去可能
適用	ダイオキシン抑制のためのガス冷却を行った後の設置はできない。またダイオキシン抑制効果が無いことから積極的に採用するメリットは無いと考えられる。	ガス冷却処理後に200℃程度までオフガスを加熱することで採用できる。また、ダイオキシンを分解できるため、二次燃焼およびガス冷却で抑制できなかったダイオキシンの処理が行えるなどメリットは大きい。	無触媒脱硝法よりも低温でNOx除去が可能であるものの、ダイオキシンの分解は行えないため、ダイオキシン吸着後の活性コークスを再度処理する必要がある、メリットは薄いと考えられる。



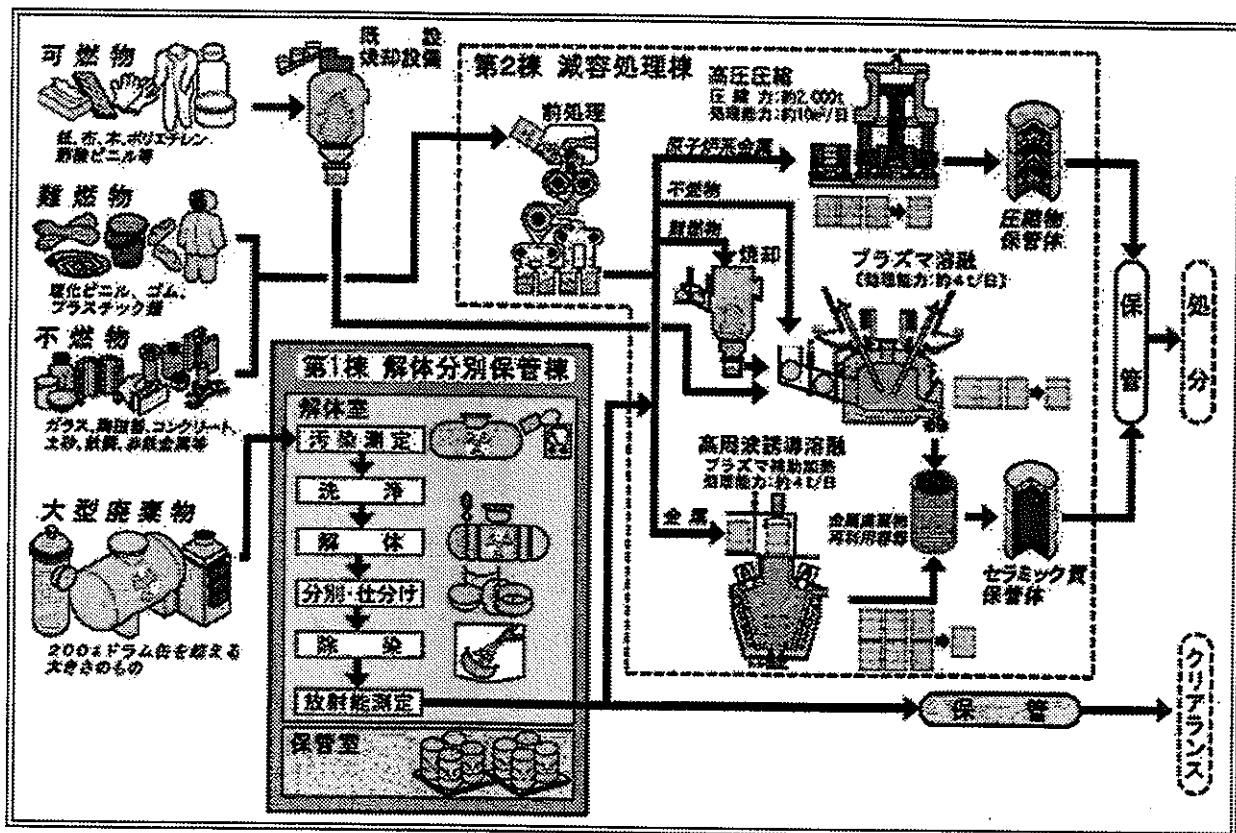
表2-8 エアロゾル除去技術の分類

	バグフィルタ	セラミックフィルタ	HEPAフィルタ
方法	布等で膜を形成しろ過する方法で、焼却炉等で用いられている。	アルミナ、シリコンカーバイド等のセラミック粒子を焼結により、あるいはセラミックファイバーを圧縮により棒状の元素に成形したものである。	セルロースあるいはガラス繊維を漉いて作ったひだのあるろ紙であり、通常、箱状にユニット化されている。
特徴	一般に逆洗機能が付けられており、ダスト濃度の高い条件でも長時間使用できる。	逆洗機能を付ければ、ダスト濃度の高い条件でも長時間使用できる。	多段で用いることができ、除染性能が高い。DFは1段目が1000以上、2段目以降が100以上期待できる。メーカーによって異なるが適用範囲は200℃以下である。ダスト濃度の高い条件では使用できない。
ダスト処理	一般に逆洗機能が付けられており、ダスト濃度の高い条件でも長時間使用できる。	逆洗機能を付ければ、ダスト濃度の高い条件でも長時間使用できる。	本来、微粒子を除去するために開発されており、前段にプレフィルタを設置してダスト除去を行っているが、濃度が高いと目詰まりを起こして使用できなくなる。通常逆洗は行えない。
DF	10程度	2段でDF10E5程度を実現可能	2段でDF10E5程度を実現可能
使用温度	100℃未満であることが多い	900℃	メーカーによって異なるが適用範囲は200℃以下
適用	放射能の除染性能が要求されるオフガス系統には向いていない。	除染性能、許容温度ともに優れており、焼却、熔融のオフガス処理に最適である。	セラミックフィルタの後段でさらに除染性能が必要な場合に適している。

資料2-1 日本原子力研究所の廃棄物溶融計画

(出典 日本原子力研究所ホームページ <http://www.jaeri.go.jp/>)

高減容処理施設による低レベル  
固体廃棄物処理処分の概念



## 資料2-2 国内のダイオキシン対策ガイドライン

(出典 厚生省ホームページ

<http://www.mhw.go.jp/search/docj/houdou/0908/h0825-1.html>)

平成9年8月25日(月)

### 廃棄物焼却に係るダイオキシン削減のための規制措置について

#### ○廃棄物焼却に伴うダイオキシンの排出を削減するため、廃棄物処理法

(廃棄物の処理及び清掃に関する法律)に基づく廃棄物処理法施行令(政令)及び廃棄物処理法施行規則(省令)を改正し、8月29日に公布する。

○今回の政令及び省令の改正は、ダイオキシン削減の観点から焼却施設の構造・維持管理基準を見直すほか、小規模施設に対する規制強化のために許可対象範囲の見直し(構造・維持管理基準の適用対象施設の拡大)や、野焼き防止のために処理基準の明確化等を行うものであり、本年12月1日から施行することとしている。(概要は別添参照)

\*構造・維持管理基準及び処理基準に違反した場合は改善命令等の対象となり、この命令違反は罰則で担保。

○また、今回の改正では、併せて、ミニ処分場に対する規制を強化するため、最終処分場の裾きりを撤廃している。(別添)廃棄物処理法に基づく政省令改正の概要について

#### 1. 構造・維持管理基準の強化(厚生省令)

廃棄物焼却施設から排出されるダイオキシンを削減するため、許可対象施設の構造基準及び維持管理基準を強化。改正後の新規の許可施設に適用される基準は以下のとおり。(既存の許可施設には経過措置あり。)

##### (1)構造基準(改正後の主なもの)

- (1)外気と遮断された状態で定量ずつ連続的に廃棄物を燃焼室に投入できる供給装置の設置
- (2)次の要件を備えた燃焼室の設置

- ・燃焼ガスの温度が800℃以上の状態で2秒以上滞留
- ・外気と遮断
- ・助燃装置の設置
- ・燃焼に必要な空気を供給できる設備の設置

- (3)燃焼ガスの温度をおおむね200℃以下に冷却できる冷却設備の設置
- (4)ばいじんを除去する高度の機能を有する排ガス処理設備の設置
- (5)燃焼ガス温度及び排ガス中の一酸化炭素濃度の連続測定・記録のための装置の設置
- (6)ばいじんを焼却灰と分離して排出・貯留できる設備の設置

##### (2)維持管理基準(改正後の主なもの)

- (1)燃焼室への廃棄物の投入は、定量ずつ連続的に行うこと。
- (2)燃焼室中の燃焼ガス温度を800℃以上に保つこと。
- (3)焼却灰の熟しやく減量を10%以下とすること。
- (4)運転開始時には炉温を速やかに上昇させ、運転停止時には炉温を高温に保ち廃棄物を燃焼し尽くすこと。
- (5)集じん器に流入する燃焼ガスの温度をおおむね200℃以下に冷却すること。
- (6)冷却設備等にたい積したばいじんを除去すること。
- (7)排ガス中の一酸化炭素濃度を100ppm以下とすること。
- (8)排ガス中のダイオキシン濃度を次の基準以下とすること。

燃焼室の 処理能力	新設の基準	既設の基準		
		1年後まで	1～5年後	5年後以降
4 t/h以上	0.1 ng/m <sup>3</sup>	基準の適用 を猶予	80 ng/m <sup>3</sup>	1 ng/m <sup>3</sup>
2 t/h～4 t/h	1 ng/m <sup>3</sup>			5 ng/m <sup>3</sup>
2 t/h未満	5 ng/m <sup>3</sup>			10 ng/m <sup>3</sup>

(注)ダイオキシン濃度は毒性等量濃度に換算したもの。

- (9)燃焼ガス温度及び排ガス中の一酸化炭素濃度を連続的に測定・記録すること。
- (10)排ガス中のダイオキシン濃度を年1回以上測定・記録すること。
- (11)ばいじんを焼却灰と分離して排出・貯留すること。

\*構造・維持管理基準に違反した場合には使用停止命令・改善命令の対象となる。この命令違反には、1年以下の懲役又は100万円(廃棄物処理法改正により300万円に引上げ)以下の罰金が設けられている。

#### 2. 許可対象範囲の見直し(政令)

小規模施設に対する規制を強化するため、許可対象範囲を見直す。

- (1)許可対象施設の裾きりの引下げ(原則:5 t/日→200kg/時間)

### 3. サイクル機構の廃棄物を対象とした処理フローの整理

前章では、固体廃棄物の溶融処理技術として、溶融炉とオフガス処理設備の技術を整理分類した。ここでは、これら整理された技術をサイクル機構の廃棄物に適用した場合の処理フローを整理し、コスト評価を行うとともに、技術課題を摘出する。

#### 3.1 処理フローを構成する要素

固体廃棄物の溶融処理は、2.1で述べたとおり、以下の主要工程により構成される。

- 1) 受入廃棄物確認
- 2) 前処理
- 3) 溶融
- 4) 廃棄体化
- 5) 廃棄体確認
- 6) 二次廃棄物処理

#### 3.2 対象廃棄物

サイクル機構の廃棄物は、その性状に応じて分類されている。廃棄物は可燃物、難燃物、不燃物をさらに詳細に分類している。分類は施設ごとに異なるものの、概ね以下に大別される。

難燃物Ⅰ：ゴム類

難燃物Ⅱ：塩化ビニル類

不燃物Ⅰ：金属類（配管、電気製品など）

不燃物Ⅱ：無機物類（ガラス・コンクリート、焼却灰、土砂）

不燃物Ⅲ：その他（木枠、金属枠のフィルタなどの異種材料の混合廃棄物）

これらの雑固体廃棄物の処理として溶融処理を採用する場合、既設（もしくは計画中）の焼却炉の処理能力と相関して、以下のケースが想定される。実際には、無処理（ドラム缶に直接モルタルを充填する方法）や圧縮処理などを併用して、例えば不燃物の処理を性状によって複数の手段で処理する方法なども考えられるが、ここでは考慮していない。

ケース1) 不燃物のみを溶融処理する場合

ケース2) 不燃物と難燃物を溶融処理する場合

ケース3) 不燃物、難燃物、可燃物を溶融処理する場合

実際には各事業所には焼却炉が設置されており、少なくとも可燃物の焼却処理は行えると考えられる。一方、塩化ビニルを含めた難燃物の処理は一部混焼にとどまっていることから、対象廃棄物は難燃物と不燃物と想定する。

### 3.2.1 溶融処理

現在、開発中の5種類の雑固体廃棄物溶融炉では、不燃物（金属と無機物）を主体とした処理試験が実施されている。可・難燃物の処理は、プラズマ炉とプラズマ補助加熱型での試験結果が報告されているのみである。プラズマ炉はもともと高温のアーケで加熱を行っているため、これらの方式で可・難燃物の処理が行えることは原理的に自明である。

一方、他の3方式（坩堝型、分別溶融型、黒鉛充填層型）においても、溶湯の中に可・難燃物を投入すれば、熱分解は行えると考えられる。

従って、可・難燃物を含めた雑固体廃棄物については、処理能力は明らかではないものの、いずれの溶融方式であっても処理は可能であると考えられる。

### 3.2.2 二次廃棄物処理

二次廃棄物の処理としてはオフガス処理、廃液処理の他、保守で発生した固体廃棄物の減容処理が存在する。ここでの二次廃棄物処理はオフガス処理のみを対象とし、廃液処理は考慮しないものとする。また、保守で発生した固体廃棄物としては炉内耐火物が主体と考えられる。耐火物の処理については、廃棄体の発生量の項目で考慮するため、ここでは除外した。

オフガス処理方法は、前章のごとく、二次燃焼、ガス冷却、HCl/SO<sub>x</sub>処理、NO<sub>x</sub>/ダイオキシン処理、エアロゾル除去の5工程に分類できる。

二次燃焼器としては、2.2.1.5で述べたようにオフガス容量が2,500m<sup>3</sup>/h程度となることから、加熱は燃料式バーナーを選定するものとする。

ガス冷却は、塩化ビニルなどを処理することで発生する塩素分による腐食を考慮すると熱交換器は採用に不安が残るため、空気希釈か水噴霧のどちらかを選択するもの

とする。この2方式は、オフガス量が異なることと湿式か乾式かの差になるため、設計条件（スタックへの放出量、凝縮水の処理）に合わせて選択することになる。

HCl、SO<sub>x</sub>処理はスクラバによる湿式を採用するものとする。HClは塩化ビニルから発生し、SO<sub>x</sub>はゴム類の成分である硫黄分の燃焼で発生する。このため、処理対象廃棄物に難燃物が含まれる場合には、本工程が必要となるものの、難燃物を処理対象外とする場合には不要となることが考えられる。なお、エアロゾル除去をHCl、SO<sub>x</sub>処理の前段で実施すれば、処理に伴って発生した塩類を非放射性廃棄物として処理できる可能性がある。

NO<sub>x</sub>、ダイオキシン処理としては、ダイオキシン分解能力を有することから、規制を考慮して、触媒脱硝酸法を採用することとする。

これらの機器を組み合わせることで、熔融炉のオフガス処理は十分可能である。

### 3.3. コスト評価

各溶融方式について、溶融処理コストを評価した。コスト評価は以下の項目に対して実施するものとした。

#### (1) 溶融処理施設建設コスト

建設に際しては、コストを内装設備、建家建築関連、電気設備、換気空調・給排水設備、付属設備等製作据付工事に分類した。

算出にあたっては、内装設備のコストを算出した結果と、既設処理施設における内装設備コストに対する各コスト項目の比率を用いることで推定を行うものとした。

#### (2) 年間運転コスト

年間運転コストとしては、電力費、人件費、保守費、容器消耗品費、雑消耗品費を算出する。算出は(1)で算出した建設コストを用いて、各項目の比率を用いて行った。

#### 3.3.1 コスト評価の前提条件

各溶融方式は公開されている処理能力に差異がある。また、溶融炉以外の機器については仕様が明確でないため、内装設備のコスト評価にあたっては、各方式の処理能力を一定にするとともに、溶融以外の各工程に対しても同一条件を設定しておくことが必要となる。

コスト評価の前提条件を表3-1にまとめた。

##### 3.3.1.1 標準化処理能力

対象廃棄物は、各方式での溶融試験に用いられている金属と無機物とし、その比率をそれぞれ50%ずつとした。各方式の処理能力設定根拠は以下のとおりである。

##### ① 坩堝型

270kgの炭素鋼に不燃物230kg（HEPAフィルタ、保温剤、コンクリート、焼却灰）が混在した廃棄物を167kg/hで処理している。この比率はほぼ50%ずつであるため、この値を処理能力として採用した。

##### ② 分別溶融型

金属と非金属を合わせて190kg/hの処理能力を有することが明らかにされている。その内訳は金属426kg、非金属214kgとされているため、金属と非金属の処理能力は同一では無いと考えられるものの、金属、非金属1バッチの計2バッチで1固化体を作製することが前提条件のため、190kg/hを処理能力として採用した。

### ③プラズマ補助加熱型

金属90%、不燃物5%、可・難燃物5%の廃棄物を100kg/hで処理している。

ただし、処理時間の半分は可・難燃物の処理に費やされているため、金属と不燃物の処理のみであれば、200kg/hとなる（この場合、金属90：不燃物5なので、金属比約95%）。

坩堝型では、図2-2に示したとおり、炭素鋼は保温材の約3倍の処理速度であること、処理速度と金属-非金属比率をプロットしたグラフで3点がほぼ同一線上にあることから、処理速度 $Y$  (kg/h) と廃棄物中の金属比率 $X$  (wt%) は、 $Y=aX+b$ の単純な一次式で表される。 $Y(x)=aX+b$ とすると上記の関係から、 $Y(100)=3Y(0)$ となり、 $b=50a$  即ち、 $Y(x)=aX+50a$ と表せる。

この関係を本方式に適用すると、 $200=95a+50a$ から、 $a=1.4$   
金属比50%の場合の処理速度は  $Y(50)=1.4 \times 50 + 50 \times 1.4 = 140$  (kg/h) と推定した。

### ④黒鉛充填層型

金属のみで140kg/h、保温材のみで45kg/hであることから、③と同様に考えて95kg/hとした。

### ⑤プラズマ炉

プラズマ炉では、金属、非金属、可・難燃物が混合した廃棄物について500kg/h～600kg/h程度の処理能力が報告されている。プラズマ炉は加熱方法が高周波誘導炉と異なり、坩堝型の結果をもとにした推定はそのまま適用できない。

本処理能力は処理対象として25%の可・難燃物を含んだ場合であることから、ここでは、500kg/hと設定した。

#### 3.3.1.2 溶融炉の基数

溶融処理に必要な能力を500kg/hと設定しているため、現状の文献値をもとにした標準化処理能力で500kg/hを実現できるのはプラズマ炉のみである。このため、他方式の炉は、必要な基数を設置することで、設定した処理能力を達成するものとした。この結果、プラズマ補助加熱型は4基、坩堝型と分別溶融型は3基、黒鉛充填層型は6基の溶融炉を設置するものと仮定している。

なお、実際には坩堝型以外の3方式は500kg/hまでのスケールアップは可能であり、



溶融炉1基での処理は十分実現可能である（坩堝型はそのコンセプトから1バッチ1固化体であり、複数の坩堝の1溶融炉での同時処理には検討を要する）。

### 3.3.1.3 炉の仕様

各方式とも加熱用電源出力は明らかになっている。

炉のサイズは分別溶融型のみ明らかになっているため、他の方式については、電源出力などから推定を行った。また、溶融炉の主要な消耗品である炉内耐火物量は、推定した炉サイズをもとに、施工厚みを一律30cmと仮定して算出した。算出過程を表3-1'に示す。本計算では耐火物量は約1トンから7トンと、炉サイズに伴って大きな差が生じている。

### 3.3.1.4 容器の仕様

溶湯受容器や、非金属を溶融する際に使用する加熱用容器については、そのサイズが明らかになっておらず、唯一情報が公開されているのは、坩堝型で使用する導電性坩堝のみである。導電性坩堝は外径512mm、高さ780mm、厚さ41mmであり、容器160リットルに対して容器そのものの占有体積が約60リットルである。一方、200リットルドラム缶のサイズは内径567mm、深さ830mmである。ここでは、本値を用いて、他方式で使用する容器サイズについて仮定を行った。

#### ①溶湯受容器

坩堝型溶融炉に採用されている導電性坩堝の体積160リットル（内、容器占有体積60リットル）は、坩堝を治具で掴んで200リットルドラム缶に充填する作業を考慮した場合、妥当な数値と考えられる。このため、溶湯受容器の体積は、これと同一条件であるとして、160リットルに設定した。ただし、坩堝材質は非金属加熱のための発熱量確保、またはセラミックであるための強度確保のいずれかの理由で、41mmが算出されている。

これに対して、溶湯受容器は、金属製であり、かつ冷却されることから、これほどの厚みは必要では無いと考えられる。ここでは当社の試験実績から厚みを10mmと仮定し、容器占有体積を14リットルとした。

なお、黒鉛充填層型では、溶湯受容器の材質を黒鉛製としているため、本容器については導電性坩堝と同じ厚みと考えて、容器占有体積を60リットルに仮定した。

## ②加熱用SUS容器

分別熔融型では、非金属熔融時に、SUS製容器を充填する。この容器は、導電性坩堝と同様に非金属加熱のための発熱量確保が必要である。ここでは、加熱用SUS容器の占有体積を溶湯受容器と同じく10リットルと仮定した。

これらの推定容器占有体積と溶湯体積の関係を図3-1に示した。

## ③融点降下剤、黒鉛充填層など

分別熔融型では非金属熔融時の熔融温度をSUS製容器の融点以下に制御するため、融点降下剤を使用している。融点降下剤の材質については明らかではないが、保温剤は一般的にケイ酸カルシウムであり、この融点を1300℃以下（SUS熔融温度よりも十分低温）とするためには、状態図から

- ・ Na<sub>2</sub>Oの場合：約15wt% （Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>で約30wt%）
- ・ B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の場合：約20wt%

が必要と考えられる。Na<sub>2</sub>Oの場合、降下剤の材料をNa<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>とすると、約30wt%投入する必要がある。Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>の密度は2.53 (g/cc) であり、熔融対象の非金属と大きな差は無いと考えられるので、体積比も約30vol%と考えられる。分別熔融型では非金属87リットルが1ドラムに充填されているとの記載があるため、融点降下剤は87×0.3=26リットルと仮定する。

また、黒鉛充填層型における黒鉛は熔融の進行とともに自らも溶出し、溶湯に混入する。黒鉛の消費率は不明であるが、ここでは融点降下剤と同じであると仮定して26リットルとした。

### 3.3.1.5 オフガス処理設備

オフガス処理設備は、処理するガスの性状によって大きく変動する。熔融炉の条件設定の際には対象廃棄物を金属と無機物として、処理能力を設定した。金属と無機物主体では難燃物、とりわけ塩化物や硫黄が含まれないことになり、HCl、SO<sub>x</sub>処理が不要となる。ここでは、保守的条件として、難燃物焼却炉相当のオフガス処理設備を想定した。

なお、プラズマ炉は作動ガスが必要であり、高周波熔融炉に比べてオフガス量が増加するが、ここでは100kg/hの難燃物焼却炉のオフガス量から2,000Nm<sup>3</sup>/hと仮定した。

### 3.3.2 コスト試算結果

雑固体廃棄物の溶融処理に必要なコストを前項の仮定にもとづいて試算する。

試算する対象は、施設の建設コストと年間運転コストである。コスト試算にあたっては、将来の廃棄体処分の際に大きなコスト因子となる減容比についても検討を行った。

#### 3.3.2.1 内装設備コストの試算

前述の前提条件を用いて、内装設備のコストを試算した。試算にあたっては、各工程（受入廃棄物確認、前処理、溶融、廃棄体化、廃棄体確認、二次廃棄物処理）に必要な主要機器を抽出し、機器の設計・エンジニアリング費用、機器製造コスト、設置工事コストを割り振った。

なお、試算にあたっては比較のために圧縮処理と無処理（モルタル直接充填）の2方式についても評価を行った。内装設備コストの試算結果を表3-2に示す。

##### ①受入廃棄物確認

重量、放射能、表面汚染などの廃棄物の受け入れ時データを測定するとともに、安全上の選別として、爆発する可能性のあるスプレー缶などを事前に選別し、前処理で除去を行うためのX線CT検査装置を設置する。また、ドラムのハンドリングに必要なクレーン類を保有する。これらの合計コストは約8億円と積算した。

これらの工程は圧縮、モルタル充填も共通である。

##### ②前処理

開梱、選別を行う機器として、蓋開機、ドラム傾転機、ホイスト、マニピュレータの他、高周波誘導炉では、廃棄物の細断のための切断機が必要となる。主要機器の合計コストは炉の形式により若干変動し、約3～5億円となった。

圧縮処理ではプラズマ炉と同様に前処理での切断作業は不要となり、プラズマ炉と同程度となった。また、モルタル充填では、蓋開けとドラム移送のみであるため、1億円程度になる。

##### ③溶融

主要機器は溶融炉本体と電源である。コスト試算の前提条件に従って、処理能力500kg/hを現状の装置で実施するために必要な炉の基数を設定しており、炉の基数に応じて設備コストが増加し、約14億～30億と大きな差が発生した。ただし、実機的设计

では、要求処理能力に合わせたサイズで炉の設計・製作を行うため、このような差は発生しないものと考えられる。

圧縮処理には、3,000トンクラスのプレス機を導入するものとしてコスト評価を行っている。

#### ④廃棄体化

溶湯受容器を200リットルドラム缶に充填するためのハンドリング機器とモルタル充填、蓋締機が主要な機器となる。モルタル充填は熔融処理と比べて所要時間が短いと考えられるため、各熔融方式では炉の基数が異なり、ドラム本数にも差があるものの、1基で処理が行えるため、各方式とも共通の設備容量となる。

従って設備コストに差は発生せず、4億円程度となった。

#### ⑤廃棄体確認

基本的には受け入れ時の廃棄物確認と同様の測定を行うため、機器を共通に使用するものとしてコストを試算した。具体的には搬出用ハンドリング機器類のみを製作するものとする。この結果、コストは2億円程度となった。

#### ⑥二次廃棄物処理

オフガス処理設備としては、保守条件として難燃物処理を想定したため、二次燃焼、ガス冷却、エアロゾル除去、HCl/SO<sub>x</sub>処理、NO<sub>x</sub>/ダイオキシン処理の機能が必要となる。これらの機能を実現するにはそれぞれ、複数の機器が選定可能であるものの、ここではそれぞれの機能に対して機器を選定した上でコスト評価を行った。ガス冷却には水噴霧方式、HCl/SO<sub>x</sub>処理にはスクラバ、NO<sub>x</sub>/ダイオキシン処理には触媒脱硝塔を採用した。また、オフガス処理に必要なブローも抽出した。熔融処理方式は異なるものの、オフガス量を一定に設定しているため、コストは約19億円で全て共通となった。

これらの合計額が内装設備のコストとなる。総コストはプラズマ熔融炉の50億から黒鉛充填層型の69億まで、20億円近い差が発生した。しかし、コスト差の約20億円は熔融炉の基数に起因するものであり、予め500kg/hを1基で処理するものとして各方式とも炉を設計した場合には、この差は縮小する。

また、圧縮処理施設の場合は熔融の半分程度の約32億、モルタル充填施設の場合は

さらにその半分の約18億と、内装設備コストは大きく低下する結果となった。

### 3.3.2.2 施設建設コストの試算

施設建設コストの正確な算出には、設計業務が不可欠であり、本業務の範囲での実施は困難である。このため、既設の廃棄物処理施設における、内装設備とその他の設備コストの比率を用いて、簡便に建設コストを試算した。既設の廃棄物処理施設の建設コスト額およびそれぞれの内装設備に対する比率を用いて、内装設備費から他のコストを試算した。この施設の主要設備工事費（機器と工事の費用の合計）は施設建設コスト全体の7割を占めている。ここでは、以下のとおり、

- ・ 建家建築関連工事：内装設備費の22%
- ・ 電気設備関連工事：内装設備費の8%
- ・ 換気空調・給排水設備工事：内装設備費の7%
- ・ 付属設備等製作据付関連工事：内装設備費の2%

（ただし、いずれも機器の値段と工事費用を含む）

とそれぞれ仮定し、この工事費用をすべて合計したものを施設建設コストとした。この結果を表3-3に示す。熔融処理施設の場合は、プラズマ炉の約70億円から黒鉛充填層型の約96億円まで幅が出ているが、この差は内装設備によるコスト差がそのまま拡大したためであり、熔融炉の基数を正しく設定することで、コスト差は修正される。なお、圧縮処理施設、モルタル充填施設の場合は約44億円および約25億円となった。

### 3.3.2.3 年間運転コストの試算

既設処理施設の運転には、電力などの光熱費、人件費、保守点検費が主要コストとして必要になるため、これらを試算した。

#### (1) 光熱費

光熱費の代表として電力費用を試算した。各方式毎の電力費を比較するため、一般の電力費用と熔融炉の電力費用を別に計算した。一般の電力費用は施設内のプロセス機器、照明などであり、既設処理施設と熔融処理施設の建設コストの比から、全方式一律に電力消費量を年間4,000MWhと設定し、電力料金を乗じて算出した。また、熔融炉の電力費用は、炉の電源出力に運転時間（1日8h稼働、年間200日運転）と電力料金を乗じて算出した。

## (2) 人件費

人件費は運転要員数に比例する。運転に際しては、廃棄物の細断作業の有無により、前処理作業の負荷がプラズマと高周波誘導炉で異なることから、人件費は前処理作業とその他の運転に分けて記載した。

参考にした既設処理施設では運転要員が39名である。この施設は建設コストが熔融施設の5倍と大きく異なることから、熔融処理施設の一般運転要員数は20名で一律とした。また、前処理運転では細断作業の負荷を見込んで、プラズマ炉は4名、その他の処理施設は6名とした。

## (3) 保守費

熔融炉ならびに焼却炉などに特有の保守項目として、耐火物の交換作業がある。そこで、耐火物交換費用とその他の保守費用を別に考えるものとした。

耐火物交換コストは発生する耐火物量に比例すると仮定した。各熔融炉1基あたりに必要な耐火物量に必要な基数を乗じると、1回の耐火物交換量が算出される。これに耐火物交換頻度（回/年）を乗じることで年間の耐火物交換量（すなわち耐火物発生量）が算出され、これに単位重量あたりのコストを乗じて計算した。

その他の保守費用は、既設処理施設の総保守費用の施設建設費に対する比率が約2%であることから、同様に施設建設費の2%と推定した。

## 3.4 廃棄体発生量の試算

雑固体廃棄物を減容処理する上で、処理コストは主として処理施設の建設コストとその運転費用で表される。一方、実際に廃棄物を熔融処理して廃棄体を作製した後は、廃棄体の一時貯蔵など保管費用、将来の処分施設への運搬、埋設などの処分費用が発生する。これらのコストは廃棄体の物量に直接比例して発生するものと考えられるため、在庫廃棄物の処理に伴って発生する廃棄体の本数は処分コストに直接影響する。

減容処理を行う場合、熔融処理は、圧縮やモルタル充填に比べて減容比が大きいため、廃棄物相当分のみで比べればもっとも体積が減少する。一方、二次廃棄物の発生は複雑なプロセスである熔融が最も多い上、熔融方式によっても大きな差が発生すると考えられる。

ここでは、各処理方式について、廃棄物の充填率、保守頻度を想定した上で、廃棄体の発生量を試算する。

### 3.4.1 廃棄物の充填率の設定

減容比は処理前後の体積比で定義されるが、処理前の状態により値が大きく変動する。例えば、処理前の廃棄物が事前に圧縮充填されていれば、密度（かさ密度）が大きく、減容比はそれほど大きくはならない。一方、ドラム缶にわずかな廃棄物が充填されていて大部分が空隙であるような場合は、減容比は極めて大きくなる。

実際の廃棄物はドラム缶ごとにすべて充填率が異なっており、減容比は処理バッチごとに異なる。

図3-2に各処理方式による廃棄体イメージを示す。

#### (1) 減容処理による減容比

ドラム缶内には充填されている廃棄物の真密度を  $\rho_1$ 、かさ密度を  $\rho_2$  とする。溶融処理を行うと廃棄物は真密度まで減容され、溶湯部の密度は真密度の  $\rho_1$  となり、ドラム缶と溶湯の体積を比べた減容比は  $\rho_1/\rho_2$  となる。この比を考えると、廃棄物が真密度に達する溶融処理が最も減容比が大きいことになる。

なお、減容比は  $\rho_1/\rho_2$  と表しており、定量的な数値としていない。これは廃棄物をドラム缶にどの程度充填したかによって  $\rho_2$  が変動するためである。減容比を具体的に数値化する場合は事前に対象廃棄物を設定することで  $\rho_2$  が定義されるが、実際に廃棄物の  $\rho_2$  は一定では無いため、数値化は行っていない。

#### (2) 処分容器への充填効率

溶融処理の場合は、溶湯の処分容器への充填効率は100%では無い（例えば増埧型では50%、他の方式でもせいぜい80%程度）。

また、圧縮処理の場合は内容物の組成や圧縮力によって変動するものの、処理後の真密度比はおおよそ0.6から0.7程度になると考えられるが、縮径機能（1章参照）を有する圧縮設備を使用することで径方向の空隙の少ない状態での充填が可能になる。

モルタル充填の場合は、減容性が無く、減容比は1である。

#### (3) 実際の減容比

実際の減容比は処理による減容比に処分容器への充填効率を乗じたものとなる。

### 3.4.2 各処理方式に対する廃棄物発生量

各処理方式に対して、処理する廃棄物の組成、容器占有体積などを仮定して、減容処理に伴って発生する廃棄体の本数について検討した。

#### 3.4.2.1 前提条件

##### (1) 廃棄物の仕様

廃棄物は200リットルドラム缶に充填されているものとし、1ドラムには金属と無機物が重量比1：1で計200kgが充填されているものとする。

金属と無機物の平均密度を5と仮定すると、ドラム中の廃棄物占有体積は40リットルとなる。

##### (2) 減容比

減容比は、通常、処理前後の廃棄物の体積比で表される。ここでは、体積比と等価である真密度比を使って、減容比を表すことにした。

処理前の廃棄物はかさ密度が1で真密度は5となるので、真密度比は0.2となる。処理後の真密度比は溶融の場合1、圧縮の場合は0.6、モルタルの場合は変化が無く0.2となる。このため、減容比は処理後の真密度比を処理前の真密度比0.2で除することで表され、溶融で5、圧縮で3、モルタル充填は1となる。

##### (3) 処理能力

コストの前提条件として、処理能力を500kg/hと設定し、この処理量を確保するために、各溶融方式では必要な炉の基数を設定するものとした。この場合、処理能力に直接基数を乗じると500kg/hを越えるものもあるが、一律500kg/hと設定し条件を同じにした。圧縮処理およびモルタル充填はどちらも1基とした。

運転を1日8h、年間200日とすると、年間の処理能力は800トンとなり、200リットルドラム換算で4,000本となる。

##### (4) 充填率

正味の廃棄物を200リットルドラム缶にどれだけ充填できるかを表したものである。溶融処理の場合は図に示した数値を採用している。また、圧縮処理は160リットルとした。



### 3.4.2.2 廃棄物発生量

廃棄物の発生量試算結果を表3-4に示す。

#### (1) 廃棄物による処分容器本数

各方式により減容処理された後の廃棄物体積は、

$$(\text{処理後の体積}) = (\text{ドラム缶1本あたりの体積}) \times (\text{処理本数}) \div (\text{減容比})$$

となるため、溶融で16万リットル、圧縮で26万リットル、モルタル充填の場合は変化無く80万リットルとなる。

これを処分容器（200リットルドラム缶）に充填する場合のドラム本数は、処理後の廃棄物体積を収納効率で除することで算出されるため、溶融処理でも各方式により差異が発生する。この差は増埒や加熱用容器などにより生じたものである。

#### (2) 二次廃棄物による処分容器本数

二次廃棄物としては溶融炉の保守作業で発生する廃耐火物について試算した。

一年間に発生する耐火物量は、各溶融炉で使用する耐火物量とその寿命から決定される。ここでは耐火物の寿命として、直接溶湯と接しない増埒式を10年、非金属溶融時には溶湯と接しない分別溶融炉を1年、その他の溶融炉の場合は半年とした。

発生した耐火物は融点が高いため、使用後の処理としては溶融を行わないものとした。この場合には圧縮処理とモルタル充填が想定されるが、ここではモルタル充填を行うと仮定している。

充填効率は200リットルドラム缶に対して30%、耐火物の密度を3とすると、1ドラムあたり180kg充填できる計算となるため、発生した耐火物重量を180kgで除することで、耐火物により発生する廃棄体の本数を試算した。

この結果、耐火物によって年間10～70本程度の廃棄体が発生する。

### (3) トータル廃棄体本数

同一条件の廃棄物ドラムを年間4,000本処理することで、各減容方式により発生する総廃棄体本数は(1)と(2)で計算したドラム発生本数の合計となる。溶融処理の場合は1,169～2,235本と処理方式により2倍ものの差異が発生した。これらは溶湯受容器と補助加熱材料が処分容器中に占める体積差による充填効率の差に起因するものであり、耐火物による差異は60本程度と大きくない。

一方、圧縮処理では1,667本となり、坩堝型、黒鉛充填層型と遜色のない値となった。これは減容性に劣る圧縮処理が縮径圧縮を用いることで充填効率を高められる一方で、占有体積の大きな坩堝を使用した溶融方式(坩堝型、黒鉛充填層型)の充填効率が低いため生じた現象である。

## 3.5 処分コストの試算

減容処理によって廃棄体化された固体廃棄物は、処分が行われる。処分費用については、処分場の建設費用、廃棄体の運搬、埋設費用などが決まっておらず、廃棄体一本あたりの処分単価は不明である。

平成10年9月の総合エネルギー調査会原子力部会の中間報告では、発電所から発生するLLW廃棄物の処分費用を2,800,000円/m<sup>3</sup>、輸送費を900,000円/m<sup>3</sup>としており、合計は3,700,000円/m<sup>3</sup>となる。この値を参考として用いると、処分費用は、740,000円/ドラム缶となる。

### (1) 処理期間

30年間処理を行うものとする。本試算では年間4,000本のドラム缶を処理するものと設定していることから、30年間での処理本数は、120,000本となる。

### (2) 廃棄体発生本数

120,000本の廃棄物を減容処理することで発生する廃棄体本数は、それぞれ以下のようになる。

溶融処理	: 35,000～67,000本
圧縮処理	: 50,000本
モルタル充填	: 120,000本

### (3) 処分費用

発生本数に処分単価740,000円/本を乗じると、各処理方式に必要な処分費用は以下のようになる。

溶融処理 : 260～496億円

圧縮処理 : 370億円

モルタル充填 : 888億円

これらの金額は、処理コストより一桁大きい。また、溶融処理であっても充填率が低下する場合には圧縮処理と比べて減容比が向上しないことが懸念される。

### 3.6 コスト因子

雑固体廃棄物の減容処理として、溶融、圧縮、モルタル充填の処理コストおよび処分コストを種々の仮定をおいて試算した。30年間運転する場合の処理コストは建家建設コストと30年間の運転コストの合計であり、

溶融処理 : 250～350億円

圧縮処理 : 190億円

モルタル充填 : 160億円

処分コストは、

溶融処理 : 260～496億円

圧縮処理 : 370億円

モルタル充填 : 888億円

となる。処理コストは簡便なプロセスを用いるモルタル充填が安価であるものの、処分コストは廃棄体の本数により処理コスト以上の差異が発生する。このことから、処理処分をトータルで考えた場合は、減容効果の高い溶融処理プロセスがもっとも経済的であることが分かる。

また、複数の溶融方式による処理処分コストの差異は、

(1) 溶融炉の基数による差異

(2) 処分容器への充填効率による差異

に集約される。従って、経済的な処理処分を行うためには、両者を改善することが必要である。

本試算では発電所から発生するLLW廃棄体の処分単価740,000円を参考にしたため、溶融方式によるコスト差異は処理、処分とも100億円程度と同程度になっている。しかしながら、本試算では各溶融方式での炉の基数は、現在、各社が公開している処理能力をもとに設定している。このため、廃棄物ドラムの本数と処理期間を設定し、これを満足する処理能力を有する実機を設計すれば、基数が縮小するとの予測から、(1)の差異は現実的にはコストに大きな影響を与えないと考えられる。

一方、サイクル機構の廃棄物は、発電所のLLWと異なり、TRU廃棄物が含まれていることから、廃棄体の基準およびこれに対応する埋設基準が明確になっていないのが現状である。このため、処分単価が本仮定より上昇することは避けられず、上昇幅が大きい場合には処分コストは大幅に増大する。

処分コストに対してもっとも影響を及ぼすのはいうまでも無く廃棄体の本数であるため、溶融方式の選定にあたっては、処分容器への充填効率をもっとも高い溶融方式を選定することが有効である。

### 3.7. 技術課題の抽出

#### 3.7.1 溶融処理技術の特徴

雑固体廃棄物を溶融処理する場合の処理処分コストを試算し、圧縮法およびモルタル充填法と比較した。この結果、溶融処理は以下の特徴を有することを確認した。

- ①現在、プラズマ炉と高周波誘導炉が開発されている。高周波誘導炉の場合は補助加熱を利用するなどの手段が必要となるものの、どの方式でも処理は可能である
- ②可燃物および難燃物を処理することは想定されておらず、これらを処理する場合は現在公開されている処理能力が低下することが予想される
- ③設備コスト、運転コストともに高いため、初期投資は大きいものの、減容性はもっとも優れている
- ④補助加熱容器類、耐火物などが処理に伴って発生すること、溶湯の処分容器へ充填効率の値によっては、圧縮処理に対するメリットが薄れる可能性がある

ことが明らかになった。溶融処理を固体廃棄物処理に適用するにあたっては、技術的および経済的な成立性を以下の観点から確認する必要がある。

#### 3.7.2 経済的成立性の確認

##### (1) 対象廃棄物の設定

サイクル機構の廃棄物を処理する場合、在庫廃棄物量とその処理開始時期、処理期間中の廃棄物発生量を総合的に考慮することにより、処理能力が設定される。溶融処理の場合、鉛、亜鉛などの低沸点金属は処理してもオフガス中に移行し、フィルタなどで回収されるため、溶融固化体にはできない。

また、耐火物などの高融点材料、可・難燃物は処理時間を大幅に増加させるため、これらを処理対象とする場合の影響を把握しておかないと、溶融処理が設計段階で設定された処理能力に達しないことが懸念される。

従って、これら高融点材料、可・難燃物の処理能力に及ぼす影響評価および評価の結果処理対象外となった廃棄物の処理方法を別途検討する必要がある。

## (2) 補助加熱材料、耐火物の発生量の把握

どのような溶融処理法を採用するかは、「処理に伴って発生する廃棄物と充填効率の2点を考慮したトータルな減容比」によって判断されるべきである。溶融処理の場合は、非金属の処理に供する補助加熱容器、融点降下剤などの補助加熱材料と溶融炉内壁に設置する耐火物が処理に伴って発生する。現在開発中の溶融方式は、それぞれ独自の廃棄物組成で開発が行われているため、(1)で選定された対象廃棄物を処理する場合、補助加熱材料、耐火物の正確な発生量を把握する必要がある。

とりわけ、耐火物に関しては、使用量が多いことと、交換の際には作業者が被ばくすることから、寿命の延長が望まれる。耐火物はセラミックであるため、いわゆる劣化により寿命が訪れる場合だけでなく、廃棄物、とりわけスラグ層からの核種移行が想定される。核種移行の結果、放射能濃度が高まった場合には、劣化寿命の前であっても交換を行わなければならない場合が発生する。このため、耐火物の寿命評価は材料劣化と核種移行率の両面からの検討が必要になる。

### 3.7.3 技術的成立性の確認

雑固体廃棄物の溶融処理は国内メーカーが主体となって、プラズマ炉と高周波誘導炉に対して技術開発が進められている。この結果、試験設備の規模は様々であるものの、不燃物の処理に対しては両方式とも、プロセスの基本的な成立性は既に確認されているものと考えられる。

ただし、これらは先行プラントの廃棄物を想定して行われたものであり、廃棄物組成やこれまでの保管管理状況が発電所廃棄物と異なるサイクル機構の廃棄物に対しては、以下の要素技術を開発する必要がある。

#### (1) 廃棄物組成変動と処理能力の相関データ取得

現在開発中の各溶融方式はいずれも特定の廃棄物を選定して処理能力を評価しており、金属廃棄物としては炭素鋼、ステンレス鋼以外は考慮されていない。一方、サイクル機構の廃棄物は機械類のように金属に可燃、難燃物が混在した廃棄物が多量に存在している上、事業所および施設単位で廃棄物組成が異なっている。可・難燃物が混入した場合には処理能力が低下することが想定されるため、発電所廃棄物よりも広範な条件での処理能力評価を実施する必要がある。

## (2) 溶湯の出湯制御技術の確証

現在、出湯には炉を可動させるものの他、スライドバルブやフリーズドバルブなどの技術が開発されているが、溶湯の成分（粘性、バルブ類との固着性）が異なる場合には、制御が困難になるケースが懸念される。また、溶湯受容器の体積は処分容器の200リットルドラム缶サイズにより200リットル以下に制限を受ける一方で、溶融炉には廃棄物在庫量から設定される所定の処理能力が要求される。これらの要因により、溶融1バッチで複数の溶湯受容器に出湯する場合には、溶湯を飛散させずに各受容器に注ぎ分ける技術を開発する必要がある。

## (3) 廃棄体のインベントリ評価技術

均一な固化体となった廃棄体は廃棄体確認の工程で、処分基準に合致していることを確認する必要があり、廃棄体ごとに放射エネルギーを測定する。

インベントリ評価には、破壊分析と非破壊分析があり、溶融処理の場合には成分を均一にできることから、両手法とも適用できる。ただし、大量の廃棄体を経済的に評価する観点からは作製された廃棄体をオンラインで非破壊分析する方法が望まれる。非破壊分析の1手法として、予め核種組成が判明している場合にはスケーリングファクター法が有効であるものの、サイクル機構の廃棄物は再処理に伴って核種が多種の工程に分配されていることから、適用は困難である。このため、将来設定される処分基準を満たすことを確認できる非破壊分析によるインベントリ評価技術の開発を行っておく必要がある。

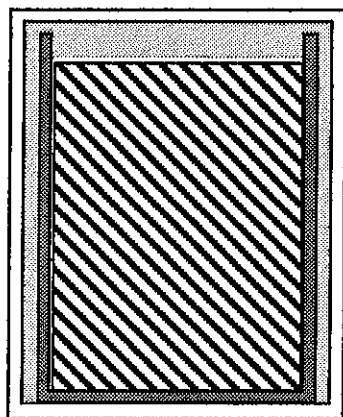
## 参考文献

- 1) 放射性廃棄物管理 日本の技術開発と計画 日本原子力産業会議 (1997)
- 2) Hansrudolf Lutz, ZWILAG—THE SWISS COMPLEX FOR CENTRAL INTERIM STORAGE OF ALL CATEGORIES OF RADIOACTIVE WASTE AND FOR LLW-TREATMENT, ICEM'99 (1999)
- 3) 梅村昭男、放射性金属廃棄物の溶融・有効利用技術の開発、デコミッショニング技報No.11 (1994)
- 4) 川野忠昭、欧州主要国における原子炉廃止措置の状況、季報エネルギー総合工学 (1996)
- 5) MELTING-RECYCLING & INCINERATION FACILITIES SOCODEI社パンフレット (1997)
- 6) Siempelkamp社パンフレット (1994)
- 7) Melting and recycling of Radioactive Contaminated Scrap Metal, Studsvik radwaste社ホームページ (1999)
- 8) 廃棄物ハンドブック 廃棄物学会 (1996)
- 9) 工業炉ハンドブック 日本工業炉協会編 (1997)
- 10) 栗林 浩、柴田節夫他、日揮原子力技法 第3号 (1987)
- 11) 辻 行人、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 第73巻9号 (1997)
- 12) 辻 行人、回転炉床式プラズマ溶融炉の開発、デコミッショニング技報No.9 (1993)
- 13) 浜中祐一他、回転炉床式プラズマ溶融設備—実証試験と設備概要—日本原子力学会「1998秋の大会」予稿集L14
- 14) 回転炉床式プラズマ溶融処理システム 東洋エンジニアリング (株) パンフレット
- 15) R.E.Haun et al, PRODUCTION SCALE PLASMA ARC TREATMENT SYSTEMS, Waste Management 98'
- 16) 村田、草場他、雑固体廃棄物処理向けプラズマ—誘導溶融炉の開発 日本原子力学会「1998春の年会」予稿集K33
- 17) Toichiro Sasaki et al, DEVELOPMENT OF AN INDUCTION HEAT MELTING SYSTEM, ICEM'99 (1999)
- 18) 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No.8 (1993)



- 19) 谷本浩一他、三菱型放射性廃棄物溶融システムおよびパイロット試験、  
日本原子力学会「1999秋の大会」予稿集L16
- 20) Tadashi Murakami et al, DEVELOPMENT OF MHI'S INDUCTION MELTING SYSTEM  
FOR LOW LEVEL RADIO ACTIVE SOLID WASTE TREATMENT, ICEM'99 (1999)
- 21) 村上他、高周波誘導加熱方式による放射性廃棄物溶融システムの開発  
三菱重工技報Vol.36 No.2 (1999)
- 22) MITSUBISHI MELTING SYSTEM for RADIOACTIVE SOLID WASTES、  
三菱重工業 (株) パンフレット
- 23) 雑固体廃棄物連続溶融炉の開発 (第1報) —システムの概要—、  
日本原子力学会「1999秋春の年会」予稿集M21
- 24) A.Jouan, INDUSTRIAL WASTE VITRIFICATION USING THE COLD CRUCIBLE  
MELTER, Waste Management 98'
- 25) Igor Sobolev et al, COLD CURCIBLE VITRIFICATION OF RADIOACTIVE WASTE  
Waste Management 97'
- 26) 三井-ユーリッヒ式放射性廃棄物焼却処理システム 三井造船 (株) パンフレット
- 27) G.Le Blaye et al, INTEGRATED MANAGEMENT OF ALPHA WASETES IN THE FUEL  
CYCLE Application to combustible wasetes from the Melox plant , Int Conf and Tech Expo  
on Future Nuclear Systems (1993)
- 28) J. Deckers et al, FIRST OPERATION EXPERICNECE OF THE CILVA INCINERATOR  
FOR RADIOACTIVE WASTE TREATMENT, Int Conf on Incineration and Thermal  
Treatment Techonologies. (1997)
- 29) F.Lemort et al, INCINERATION OF CHLORINATED ORGANIC NUCLEAR WASTE  
IN SITU SUBSTITUTION OF PHOSPHATES FOR CHLORIDES, ICEM'99 (1999)
- 30) 電気工学ハンドブック 電気学会 (1981)

プラズマ炉  
プラズマ補助加熱型

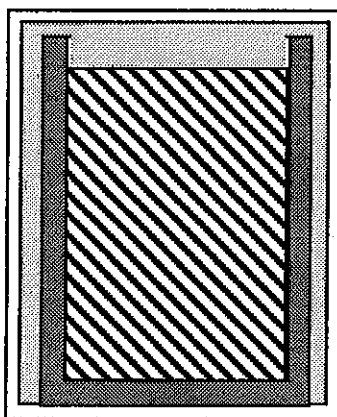


溶湯 : 146liter

受容器 : 14liter

モルタル : 40liter

坩堝型

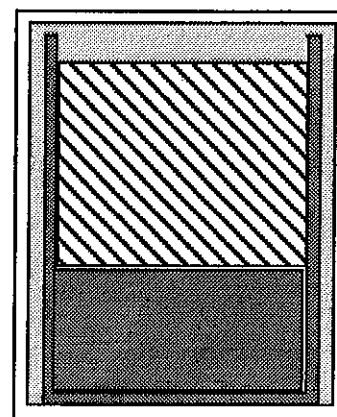


溶湯 : 100liter

坩堝 : 60liter

モルタル : 40liter

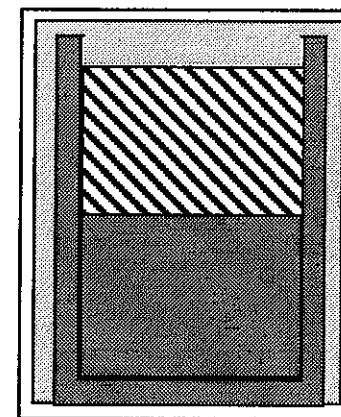
分別溶融型



溶湯 : 106liter

受容器 : 14liter  
加熱用容器 : 14liter  
融点降下剤 : 26liter  
モルタル : 40liter

黒鉛充填層型



溶湯 : 74liter \*

黒鉛坩堝 : 60liter  
黒鉛充填層 : 26liter

モルタル : 40liter

図3-1 推定容器占有体積と溶湯体積の関係

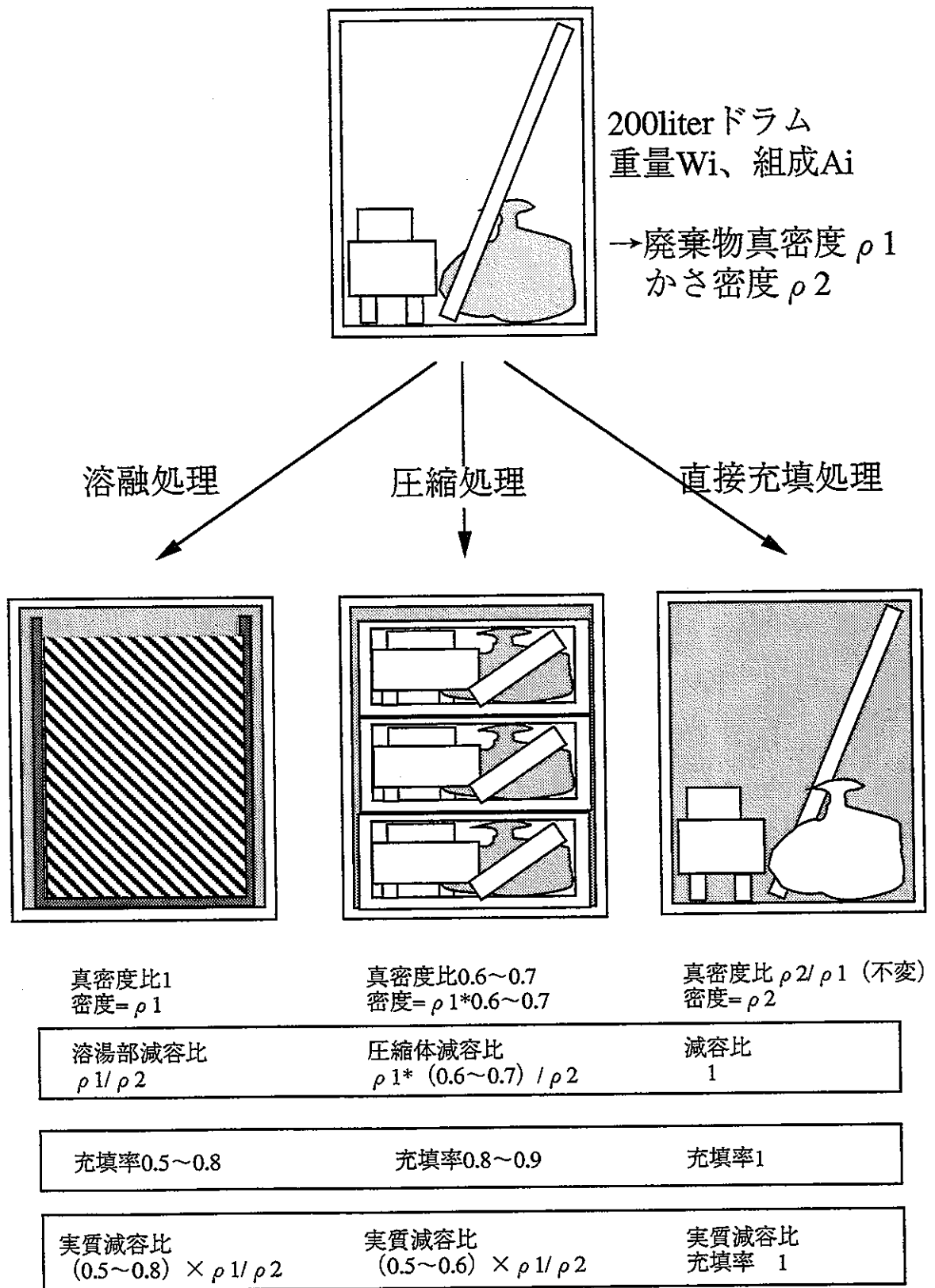


図3-2 各処理方式による廃棄体イメージ

表3-1 コスト評価の前提条件

加熱方式	プラズマ炉	高周波誘導炉			
		プラズマ補助加熱型 (ハイブリッド)	坩堝型	分別熔融型	黒鉛充填層型
対象廃棄物	金属50%、非金属（不燃物）50% を想定				
要求処理能力	500kg/h（1日8h運転で4t/dayに相当） を想定				

現状処理能力	500～600kg/h	100kg/h (金属90:不燃物5:可燃5) 200kg/h (金属と不燃物)	167kg/h (標準組成) 金属のみ: 260kg/h 保温材のみ: 80kg/h	190kg/h (金属・非金属を合わせて)	金属: 140kg/h 保温材: 45kg/h
標準化処理能力 (推定値)	500kg/h	140kg/h	167kg/h	190kg/h	95kg/h
必要基数 注1)	1基	4基	3基	3基	6基

注1) 坩堝型以外の高周波誘導炉はどれもスケールアップが可能であり、実規模では本試算での基数とは異なる。

炉の仕様	電源	DCプラズマ電源 1000KW～1200kW	高周波電源250KW 誘導プラズマ電源100kW	高周波電源 850Hz-600KW	高周波電源 1000Hz-600KW	高周波電源 10000Hz-100KW
	炉サイズ (推定)	内径約1.5m、高さ1.4mと推定	内径0.9m、高さ0.9mと推定	内径1m、高さ1.6mと推定	内径650mm、高さ2100mm (ハット試験設備)	内径0.4m、高さ1.4mと推定
	耐火物厚み	30cmと設定				
	耐火物量	6.6トン	1.9トン	4.2トン	3.4トン	1.1トン
容器仕様	廃棄物体積	160literと想定 (200literドラムに充填する際のチャッキング部を考慮)				
	坩堝	不要	60liter 注2)	不要		
	加熱用SUS容器	不要	不要	14literと推定 注3)	不要	
	その他の補助加熱材料	不要	不要	融点降下剤26literと推定 注4)	黒鉛充填層26literと推定 注5)	
	溶湯受容器	14literと推定 注3)	不要	不要	14literと推定 注3)	60literと推定 注5)
廃棄物体積 (推定値)	146liter	100liter	106liter	74liter		
ワカス処理	換気量	排気量 2,000Nm <sup>3</sup> /hと設定				

注2) 坩堝: 外径512mm、高さ780mm、厚さ41mmで容器占有体積を計算

注3) 坩堝と同外径、高さで厚みを10mmと仮定して計算

注4) メーカーカタログにある非金属分87リットルに対して30vol%必要と仮定して計算

注5) 黒鉛充填層消費量は融点降下剤と同じであり、黒鉛坩堝は注2の坩堝と同寸法と仮定した

表3-1' 炉内耐火物量の試算結果

① 坩堝型：内径1m、高さ1.6mと仮定（坩堝外径0.5m、高さ0.8mのそれぞれ2倍）

(1)	耐火物厚み (m)	0.3	
(2)	溶融炉の外径 (m)	1.6	
(3)	溶融炉の高さ (m)	2.2	
(4)	溶融炉の内径 (m)	1.0	(2)-(1)×2
(5)	溶融炉の内高 (m)	1.6	(3)-(1)×2
(6)	炉内容積 (liter)	1256.0	$1/4 \times \pi \times \text{内径}^2 \times \text{内高}$
(7)	耐火物側面積 (m <sup>2</sup> )	3.1	$\pi \times \text{内径} \times (\text{内高} - 2 \times \text{耐火物厚み})$
(8)	耐火物上下面積 (m <sup>2</sup> )	1.6	$2 \times 1/4 \times \pi \times \text{内径}^2$
(9)	合計耐火物面積 (m <sup>2</sup> )	4.7	(7)+(8)
(10)	耐火物体積 (m <sup>3</sup> )	1.4	(1)×(8)
(11)	耐火物重量 (ton)	4.2	(9)×密度、密度は3とした

② 分別溶融型：文献値を使用

(1)	耐火物厚み (m)	0.3	
(2)	溶融炉の外径 (m)	1.3	
(3)	溶融炉の高さ (m)	2.7	
(4)	溶融炉の内径 (m)	0.7	(2)-(1)×2
(5)	溶融炉の内高 (m)	2.1	(3)-(1)×2
(6)	炉内容積 (liter)	696.5	$1/4 \times \pi \times \text{内径}^2 \times \text{内高}$
(7)	耐火物側面積 (m <sup>2</sup> )	3.1	$\pi \times \text{内径} \times (\text{内高} - 2 \times \text{耐火物厚み})$
(8)	耐火物上下面積 (m <sup>2</sup> )	0.7	$2 \times 1/4 \times \pi \times \text{内径}^2$
(9)	合計耐火物面積 (m <sup>2</sup> )	3.7	(7)+(8)
(10)	耐火物体積 (m <sup>3</sup> )	1.1	(1)×(8)
(11)	耐火物重量 (ton)	3.4	(9)×密度、密度は3とした

③ プラズマ補助加熱型：1バッチ処理量から推定

(1)	耐火物厚み (m)	0.3	
(2)	溶融炉の外径 (m)	1.5	
(3)	溶融炉の高さ (m)	1.5	
(4)	溶融炉の内径 (m)	0.9	(2)-(1)×2
(5)	溶融炉の内高 (m)	0.9	(3)-(1)×2
(6)	炉内容積 (liter)	572.3	$1/4 \times \pi \times \text{内径}^2 \times \text{内高}$
(7)	耐火物側面積 (m <sup>2</sup> )	0.8	$\pi \times \text{内径} \times (\text{内高} - 2 \times \text{耐火物厚み})$
(8)	耐火物上下面積 (m <sup>2</sup> )	1.3	$2 \times 1/4 \times \pi \times \text{内径}^2$
(9)	合計耐火物面積 (m <sup>2</sup> )	2.1	(7)+(8)
(10)	耐火物体積 (m <sup>3</sup> )	0.6	(1)×(8)
(11)	耐火物重量 (ton)	1.9	(9)×密度、密度は3とした

④ 黒鉛充填層型：電源出力から推定

(1)	耐火物厚み (m)	0.3	
(2)	溶融炉の外径 (m)	1.0	
(3)	溶融炉の高さ (m)	2.0	
(4)	溶融炉の内径 (m)	0.4	(2)-(1)×2
(5)	溶融炉の内高 (m)	1.4	(3)-(1)×2
(6)	炉内容積 (liter)	175.8	$1/4 \times \pi \times \text{内径}^2 \times \text{内高}$
(7)	耐火物側面積 (m <sup>2</sup> )	1.0	$\pi \times \text{内径} \times (\text{内高} - 2 \times \text{耐火物厚み})$
(8)	耐火物上下面積 (m <sup>2</sup> )	0.3	$2 \times 1/4 \times \pi \times \text{内径}^2$
(9)	合計耐火物面積 (m <sup>2</sup> )	1.3	(7)+(8)
(10)	耐火物体積 (m <sup>3</sup> )	0.4	(1)×(8)
(11)	耐火物重量 (ton)	1.1	(9)×密度、密度は3とした

⑤ プラズマ炉：外径、高さともに2m程度と仮定

(1)	耐火物厚み (m)	0.3	
(2)	溶融炉の外径 (m)	2.1	
(3)	溶融炉の高さ (m)	2.0	
(4)	溶融炉の内径 (m)	1.5	(2)-(1)×2
(5)	溶融炉の内高 (m)	1.4	(3)-(1)×2
(6)	炉内容積 (liter)	2472.8	$1/4 \times \pi \times \text{内径}^2 \times \text{内高}$
(7)	耐火物側面積 (m <sup>2</sup> )	3.8	$\pi \times \text{内径} \times (\text{内高} - 2 \times \text{耐火物厚み})$
(8)	耐火物上下面積 (m <sup>2</sup> )	3.5	$2 \times 1/4 \times \pi \times \text{内径}^2$
(9)	合計耐火物面積 (m <sup>2</sup> )	7.3	(7)+(8)
(10)	耐火物体積 (m <sup>3</sup> )	2.2	(1)×(8)
(11)	耐火物重量 (ton)	6.6	(9)×密度、密度は3とした

表3-2 内装設備コストの試算結果

大分類	小分類	内容	主要機器	試算のための概略仕様	プラズマ炉	高周波誘導炉				高圧縮	モルタル充填
					プラズマ補助	坩堝型	分別溶解型	黒鉛充填層			
受入廃棄物 確認	性状測定	搬入、ハンドリング	ドラムクレーン		8.2	8.2	8.2	8.2	8.2	8.2	8.2
		外観観察	ITV								
		重量測定	ドラム計量機								
		放射能測定 (βγ、Pu)	γ線及び中性子検出器								
		表面汚染測定	スミヤ検査装置								
	金属、危険物測定	X線CT検査装置									
その他	補助機器	制御機器、補機類									
				小計							
前処理	開梱	蓋開け	蓋開機		4.0	5.1	5.1	5.1	5.1	3.1	1.2
		内容物取り出し	ドラム傾転機								
	選別	大型金属除去	ホイスト								
		金属片除去	MSマニピレータ								
	水分除去 充填	乾燥	乾燥機								
		切断	切断機								
ハンドリング	容器への充填	MSマニピレータ、袋詰機									
その他	工種内コンベア移送	各種コンベア、リフト									
				補助機器、補機類							
				小計							
溶解	投入	廃棄物の炉への投入	ホイスト		13.6	23.7	17.5	15.7	30.6	10.9	0.0
		フィーダ									
	溶解	溶解処理	溶解炉 (圧縮機) 本体	直径2m、高さ2mを基準							
			耐火物	直径2m、高さ2mを基準							
			プラズマトーチ	形式による価格変動無と仮定							
		DC電源 (DCプラズマ用)	1MW基準								
	AC電源 (高周波)	1MW基準									
性状測定	サンプリング	サンプルリフト									
固化	固化体冷却	鋳型、冷却器									
その他	補助機器	制御機器、補機類									
				小計							
廃棄体化	ドラム充填	ハンドリング、挿入	ドラムクレーン		3.9	3.9	3.9	3.9	3.9	3.9	3.9
		モルタル充填	モルタル注入機								
	閉蓋	蓋締機									
その他	補助機器	制御機器、補機類									
				小計							
廃棄体確認	性状測定	外観観察	ITV		2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
		重量測定	ドラム計量機	廃棄物確認用機器と共用							
		放射能測定 (βγ、Pu)	γ線及び中性子検出器	廃棄物確認用機器と共用							
		表面汚染測定	スミヤ検査装置	廃棄物確認用機器と共用							
	ハンドリング、搬出	ドラムクレーン	廃棄物確認用機器と共用								
その他	補助機器	制御機器、補機類									
				小計							
二次廃棄物 処理	ガス処理	二次燃焼	二次燃焼器	φ2600x5000	18.9	18.9	18.9	18.9	18.9	3.5	2.3
		ガス冷却	水噴霧 (ケリングター)	φ1600x4000							
		エアロゾル除去	セラミックフィルタ	2000m <sup>3</sup> /h x 2							
			HEPAフィルタ	1000m <sup>3</sup> /hx3							
			HCL、SOx除去	スクラバ							
		NOx、ダイオキシン除去	触媒脱硝塔	触媒式							
その他	換気	プロア	2000Nm <sup>3</sup> /hx4600mmAq								
				補助機器							
				制御機器、補機類							
				小計							
主要機器の合計					50.6	61.8	55.6	53.8	68.7	31.6	17.6

表3-3 各処理方式による施設建設コストおよび年間運転コスト

大分類	内 容	試算のために仮定した概略仕様	プラズマ炉	高周波誘導炉				高圧縮	モルタル充填
				プラズマ補助 (ハイブリット)	坩堝	分別溶融	黒鉛充填層		
建設 コスト	内装設備	500kg/hとして基数を設定した 注1)	50.6	61.8	55.6	53.8	68.7	31.6	17.6
	建家建築関連工事	内装設備費の22%と仮定	11.1	13.6	12.2	11.8	15.1	7.0	3.9
	電気設備関連工事	内装設備費の8%と仮定	4.0	4.9	4.4	4.3	5.5	2.5	1.4
	換気空調・給排水設備 工事	内装設備費の7%と仮定	3.5	4.3	3.9	3.8	4.8	2.2	1.2
	付属設備等製作据付 工事	内装設備費の2%と仮定	1.0	1.2	1.1	1.1	1.4	0.6	0.4
小 計			70.3	85.9	77.3	74.8	95.5	43.9	24.5

注1) 実証設備の処理能力をベースとして基数を設定したために、小規模装置の場合は内装設備費が上昇した。実機ベースで積算することで、この差異は低減する。

年間運転 コスト	電力費	共通設備	施設（建設費350億、電力消費量20000MWhを参考に、建設費1/5から、4000MWhとした。12円/KWhとして計算	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
		溶融炉	各溶融炉の電源電力（一部推定）をもとに、8hx200日運転とした。12円/KWhとして計算	0.2	0.4	0.3	0.3	0.1	0.1	0.1
	人件費	前処理	プラズマは4名、高周波は6名増加とした。0.1億円/人で計算	0.4	0.4	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
		運転	運転要因は20名とした。0.1億円/人で計算	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
	保守費	耐火物	耐火物交換費は耐火物量に比例するとして、0.05を乗じた	0.7	0.8	0.1	0.5	0.7	0.0	0.0
		その他	耐火物以外の保守費は建設費の2%とした。	1.4	1.7	1.5	1.5	1.9	0.9	0.5
	容器消耗品費	溶湯SUS容器1本3万円、加熱用SUS容器1本5万円、坩堝1本10万円と仮定	0.3	0.3	1.6	1.2	2.2	0.0	0.0	
	雑消耗品費	施設建設費の0.5%とした。	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.2	0.1	
小 計			3.5	4.0	4.4	4.4	6.0	1.9	1.4	

表3-4 各処理方式による廃棄物の発生量試算結果

大分類	内 容	試算のために仮定した概略仕様	プラズマ炉	高周波誘導炉			高圧縮	モルタル充填	
				プラズマ補助 (ハイブリット)	坩堝	分別溶融			黒鉛充填層
廃棄物仕様	ドラム中の廃棄物重量 (kg)	金属：無機物=1：1、1ドラムあたり200kg充填を設定	200	200	200	200	200	200	
	廃棄物の体積 (liter)	平均密度5を設定。200literドラムで真密度比0.2、かさ密度1	40	40	40	40	40	40	
減容比	減容比 (liter/h)	真密度比：溶融処理：1、高圧縮：0.6、モルタル充填：0.2	5.0	5.0	5.0	5.0	3.0	1.0	
処理能力	標準化処理能力 (kg/h)	一律に設定	500	500	500	500	500	500	
	年間処理重量 (ton/年)	8h x 200日運転を仮定	800	800	800	800	800	800	
	年間処理本数 (本/年)		4000	4000	4000	4000	4000	4000	
収納効率	廃棄物体積 (liter/本)	溶融、圧縮では廃棄物+容器で160literと仮定	146	146	100	106	74	160	-
廃棄物発生量	処理後廃棄物体積 (liter/年)		160000	160000	160000	160000	160000	266667	800000
	年間ドラム発生量 (本/年)	200literドラム缶換算	1096	1096	1600	1509	2162	1667	4000
	耐火物発生量 (ton/年)	耐火物の寿命は坩堝10年、分別1年、他は半年として計算	13.2	15.2	2.5	10.2	13.2	0	0
	耐火物ドラム発生量 (本/年)	耐火物密度3として、200literドラム缶に30%充填 (180kg)	73	84	14	57	73	0	0
	耐火物量/廃棄物量 (kg/ton)		17	19	3	13	17	0	0
	合計ドラム発生量 (本/年)	溶融廃棄物+耐火物ドラム合計	1169	1180	1614	1566	2235	1667	4000