

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

Development of MHI's Induction Melting System
for Low Level Radio Active Solid Waste Treatment

原子力事業本部 村 上 督*¹
神戸造船所 橋 場 憲 司*² 福 井 裕*³
佐 藤 明 雄*⁴
技 術 本 部 峯 元 雅 樹*⁵

放射性廃棄物を対象に客先の強いニーズにこたえ、高い減容率で処理できる三菱溶融設備を開発した。溶融加熱方法として高周波誘導加熱を選定し、さらに耐火材の寿命を延ばすために、非金属廃棄物と金属廃棄物を分けて溶融する2段階溶融方式を採用した。本方式の成立性を確認するため、①実機サイズの溶融試験により機能、性能の確認をするとともに、②所定の溶融速度を達成できること（一日に2固化体を製造）、③溶融固化体に含まれる放射能が均質（変動係数が10%以下）であること、放射性核種の固化体への残留特性データの取得、④オフガス除染システムの放射能除染性能が、除染係数 DF （投入放射能/システム出口放射能）で 10^7 以上あること、等を確認した。2段階溶融方式による三菱溶融システムは、放射性廃棄物を処理するために必要な各条件を満たしており、溶融炉内耐火材の長寿命、高い減容能力を有する優れたシステムとして成立の確認を得た。

Mitsubishi Heavy Industries, Ltd., (MHI) has developed melting facilities that reduce radioactive waste volume. The system uses a high-frequency induction to separately melt nonmetallic waste in SUS containers and metallic waste. Use of system extends refractory life. To validate system feasibility, major components were tested with the following results: (1) Two 200-liter drum cans of molten solid waste are produced per work day, (2) Radioactivity in molten solid was homogeneous with a coefficient of variation $\leq 10\%$, clarifying residue properties, (3) The radioactive decontamination factor of off-gas facilities-- $DF = \text{Activity to system} \div \text{Activity at the system exit}$ --exceeded 10^7 . We confirmed system to fill the requirements for molten solid waste and have the merit of high volume-reduction and long-life refractory.

1. はじめに

発電所や各研究機関で発生した低レベル放射性固体廃棄物は、現状ドラム缶内に保管管理されている。これら廃棄物は、埋設廃棄体として安全な形態に処理された後、処分場に搬出することが予定されている。その処理方法の一つとして、減容（体積比）効果が大きく、廃棄物中の有機物の無機化が可能な溶融処理方式が注目されており、一部の発電所ではその導入が進められている。

当社では本溶融方式において、2次廃棄物の低減（耐火材の長寿命化）を図り、かつ減容率が高い放射性廃棄物の三菱溶融システムを開発した。対象とする廃棄物の組成の調査、溶融方式の選定、溶融システムの構築及び各試験による成立性の確認を行い、システムが成立することを確認した。

以下に、三菱放射性廃棄物溶融方式の概要、溶融速度等の溶融特性、溶融時に発生するオフガスからの放射性物質の除去性能及び溶融後の固化体特性（均質性、核種残留特性）を各種試験で確認し、その成果について報告する。

2. 開発のねらい

放射性廃棄物の内容調査等から、放射性廃棄物には多量（重量比で約60%程度）の金属類が含まれること及び残りの約40%は、非金属廃棄物として保温材やガラス類、その他種々の廃棄物が含まれていることが判明している。これら放射性廃棄物を溶融処理するための加熱方式として、高周波誘導加熱方式、プラズマ加熱方式及びアーク加熱方式等が考えられる。表1に放射性廃棄物を処理する観点からの各加熱方式の比較を示す。廃棄物の種類の多

さから、アーク加熱方式では、非導電性廃棄物の溶融に難があること及びプラズマ加熱方式では電極に作動ガスを使用するためにオフガス量が多く、電極の消耗量が多く保守頻度大なること等の難がある。

これらに対して、金属を短時間に加熱できること、オフガス発生量が少ないこと等から、加熱方式として、高周波誘導加熱方式を選定した。

さらに、原子力向け装置としては、発電所等で発生する廃棄物量に応じた処理能力、かつ発電所内に設置できるコンパクトな装置であること、システムの運転に伴い発生する放射性廃棄物量（2次廃棄物量）を低減すること、“溶融固化体製作マニュアル”に従うこと及び放出放射能を低減するための高性能ガス処理機能を有することが要求される。

表1 溶融加熱方式の比較
Comparison of heating procedure

	高周波誘導加熱方式	プラズマ加熱方式	アーク加熱方式
大容量化	原理的に可能 ◎	原理的に可能 ◎	原理的に可能 ◎
選別簡素化	原理的に可能 ◎	原理的に可能 ◎	原理的に可能 ◎
運転性	安定運転可 ○	安定運転可 ○	不導体の溶融難 △
長寿命化/ 簡易保守化	電極なし保守不要／るつば保守要 ○	消耗電極保守要／るつば保守要 △	電極消耗継足し要／るつば保守要 △
オフガス量 削減化	加熱分解ガスとインリークエアのみ ○	プラズマガスで増大 △	黒鉛電極消耗ガスで増大 △
総合評価	◎	○	△

注) ◎: 優 ○: 良 △: 可

*1 原子力技術センター新型炉・燃料サイクル技術部
燃料サイクル技術課主務

*2 原子力プラント技術部新型炉・燃料サイクル技術課主査

*3 原子力プラント技術部新型炉・燃料サイクル技術課

*4 原子力設計部機器設計二課

*5 高砂研究所原子力研究推進室主査 工博

これらを考慮して、以下の開発目標を設定した。

(1) 熔融処理能力

一日の作業時間（8時間）で200 lドラム缶に入るサイズの固化体2体分（年間発生量を上回る量）の廃棄物を熔融できること、具体的には、廃棄物熔融処理速度として、金属廃棄物 377 kg/h 以上、非金属廃棄物 155 kg/h 以上あること。

(2) 耐火材の長寿命化

取替え後の耐火材は、新たな放射性廃棄物になることから極力少なくすること。具体的には、年一回の定期検査のときに耐火材を交換する、すなわち、耐火材の交換は、一年に一回で済むこと（年間200日稼働の条件とする）。

(3) 溶湯の排出

傾動方式に比べ、省スペースを図れる下部排出を採用した。本方式に対する目標は、下部より溶湯物を安定して排出できること。

(4) 固化体の均質性

放射性廃棄物の固化体を処分するために、熔融後の固化体が放射能的に均質である必要がある。具体的には、固化体に含まれる放射能濃度の変動係数（標準偏差/平均濃度）が10%以下であること。

(5) 放射能除去性能

オフガス系の放射能除去性能は、除染係数 DF が 10^7 以上であること。

目標の確認手段は、小型の熔融炉（ベンチ炉）等での熔融特性試験、放射性核種を用いた各データ取得のための放射能挙動確認試験及びこれら成果に基づく、システム実証のためのパイロット試験によって、開発を進めた。

3. 三菱熔融システムの特徴

三菱熔融方式によるシステム基本構成を図1に示す。放射性廃棄物には、金属分と非金属分が含まれており、これら成分を同時に熔融した場合、一般に両者の溶湯に良好な耐食性を示す耐火材はなく、寿命が極端に短くなる。したがって、三菱熔融システムでは、金属廃棄物と非金属廃棄物を分離して熔融する方式を採用した。非金属廃棄物は、高周波誘導加熱で直接加熱されないため、ステンレス製容器（以下、SUS容器と称す）内に入れ、SUS容器

からの間接加熱により熔融する。また、非金属廃棄物中には、SUS容器よりも高融点のもの（例えば、けい酸カルシウム系の保温材は、融点約 1450°C ）が存在するために、融剤を入れ、その融点を下げて熔融する。これにより、その他非金属廃棄物の融点も下がり、熔融速度が向上する。

熔融炉で溶かした廃棄物は、炉底部に設けた排出し口より排出する。排出しには、フリーズバルブの原理を採用している。すなわち、炉内で溶かした廃棄物は、排出し口内で冷却固化され、炉底排出し口をプラグする。廃棄物を完全に熔融し、溶湯を排出するときには、プラグ部が、周囲に配置された高周波誘導コイルで、加熱再熔融され、溶湯を排出する。なお、排出し口には、プラグ分の導電性の有無に関係なく、高周波誘導加熱可能なように導電性のスリーブを設けている。

熔融時に発生するオフガス中に含まれる放射能は、オフガス系より、所定の除染係数 DF 以上まで除去される。放射能除去方式は、2次廃棄物の発生が少なく、高効率の除去が期待できるセラミックフィルタ及び微粒子フィルタ（High Efficiency Particulate Air Filter、以下 HEPA と称す）の組合せを基本構成とする乾式処理を採用した。廃棄物より発生するオフガス中に酸性ガス等が多量に含まれる場合には、スクラバによる除去等を、オプションとして用意している。

熔融炉への廃棄物の投入は、炉頂から、自動投入装置にて行う。本装置は、投入容器を介して、若しくはドラム缶内に入れて直接、廃棄物を炉内に6～7分間隔で投入する。

熔融炉から排出された溶湯は、熔融炉直下に設けられた鑄型に受ける。鑄型内で冷却固化された廃棄物（固化体）は、最終的には、200 lドラム缶に詰められ処分される。現状はドラム缶を想定した鑄型を計画しているが、この鑄型を変更することにより、種々の形状の廃棄物を製作可能である。

4. 試験結果及び考察

4.1 熔融特性試験

熔融特性試験は、ベンチ炉等を用いて、熔融特性（各種廃棄物の熔融性、熔融速度）の測定、金属やスラグ溶湯の炉底排出し口からの排出性の確認、またスケール効果を確認するために中型の試験炉を使用し熔融速度の確認等を実施した。

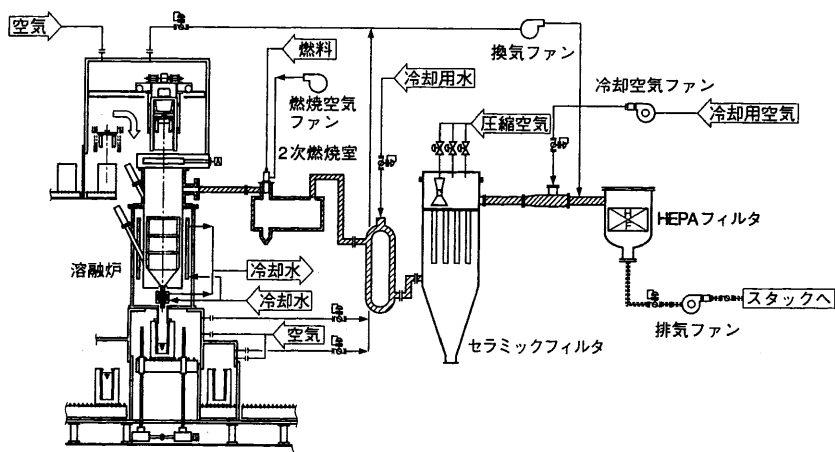


図1 三菱熔融方式によるシステム基本構成 三菱熔融方式による熔融炉、オフガス系（セラミックフィルタと HEPA の組合せ）、熔融炉への廃棄物の投入系、熔融後の溶湯排出受けまでのシステム構成を示す。
MHI type induction melting process flow diagram

表2 ベンチ炉及び中型の試験炉の主要諸元及び試験結果
Major specification and experimental results of bench-scale and middle-scale melters

試験炉 主要諸元			
高周波誘導加熱熔融炉	周波数	出力	炉内サイズ
ベンチ炉	1~3 kHz	70 kW	φ 200
中型の試験炉	1 kHz	600 kW	φ 600
試験結果			
試験設備	溶融物	溶融温度	溶融速度 (実機換算)
ベンチ炉	保温材 (+融剤) 3.5 kg	1300°C	124 kg/h
中型の試験炉	保温材 (+融剤) 58 kg	1300°C	226 kg/h

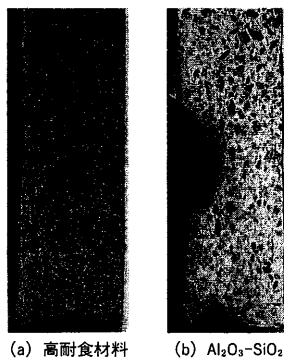
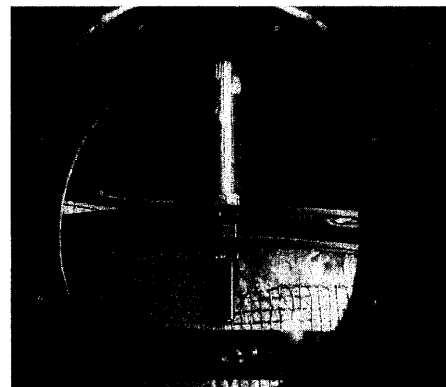


図2 耐火材耐食試験結果
溶湯との耐食試験後の耐火材の断面を示す。
Corrosion test result for refractories



(a) 金属拔出し状況



(b) 非金属（スラグ）拔出し状況

図3 溶湯の下部拔出し状況 溶融炉で溶融した金属分、非金属分を炉の下部より拔出している状況を示す。
Withdrawal of melting material from bottom of melter

試験に用いたベンチ炉及び中型の試験炉の主要諸元を表2に示す。これらの溶融炉を用いて、以下の試験成果を得た。

(1) 廃棄物の溶融特性

融剤を所定量入れ、SUS容器からの間接加熱により、非金属廃棄物が約1300℃以下で溶融することを確認した。ただし、多量のコンクリート及びセラミックフィルタエレメントについては、融剤量を調整する。

(2) 溶融速度

ベンチ炉〔実機（目標の処理速度を有する溶融炉）における有効加熱面積の約1/36〕及び中型の試験炉（実機における有効加熱面積の約1/4）を用いた非金属廃棄物の溶融試験を実施した結果、実機換算での溶融速度は、それぞれ124 kg/h及び226 kg/hであった。溶融炉は、大型化によって、溶融速度が増加する傾向を示す。これは、大量の廃棄物を入れることにより、廃棄物が自重で溶湯に浸漬し、伝熱特性が向上することによるものと考えている。

金属廃棄物についても、中型の試験炉を用いて、最も溶けにくい条件として、最低重量（約110 kg）の金属が所定の時間内（一時間以内）に溶融することを確認した。

これら成果から、実機として内径φ600程度の炉であれば、目標の溶融速度を達成できることを確認した。

(3) 耐火材の寿命

2段階溶融方式で耐火材が接触する溶湯に対して、23種類の耐火材から、最も腐食量の少ないものを選定した。本耐火材に対して長時間耐食試験を実施、年間200日稼働（400固化体製作）の条件の下、一年に一回の交換で済むことを確認した。

図2に1600℃の溶湯に、5時間接触した後の耐火材の侵食状況を示す。選定した耐火材は、ほとんど侵食を受けていないことが分かる。

(4) 溶湯の炉底よりの拔出し

金属溶湯、スラグ溶湯それぞれにおいて、拔出し性能（フリースドバルブの機能）を確認した。図3に溶湯の炉底よりの拔出し状況を示す。

4.2 放射能挙動試験

オフガス系の性能を確認し、放射性核種に関するデータを取得するため、溶融炉からセラミックフィルタ、HEPAまでを模擬した試験装置を製作した。

本装置により、金属廃棄物及び非金属廃棄物に対して、放射性核種をトレーサとした模擬廃棄物の溶融試験を実施し、除染性能

として $DF \geq 10^7$ を得、目標値を確保できることを確認した。試験の条件及び結果を表3に示す。

また本試験にて製作した溶融固化体の均質性を確認した。その結果を表4に示す。またスケール効果を確認するため、中型の溶融炉を用いて、固化体の均質性を確認した。中型の溶融炉の場合は、非放射性のCoとCsをトレーサとして用い、それぞれ変動係数9.0%及び8.2%を得た。いずれの結果においても、それぞれ固化体中の異なる位置から採取した試料中の放射能濃度の平均濃度/標準偏差で定義される変動係数が10%以下となり、固化体が均質であることを確認した。

固化体を廃棄する場合、含有放射エネルギーを評価する必要がある。固化体中へ捕獲された放射エネルギーを核種ごとに測定し、表4に示す結果を得た。

4.3 パイロット試験

パイロット試験における目的は、現在までに得られた各性能が実機レベルにおいても同等の性能を有すること及び設備の運転性、操作性を確認し、システムとしての確証を行うことである。

したがって、パイロット試験設備は、実機と同様の設計（構成機器、寸法、材料、処理能力、運転操作性、ただし放射能を除く）を行った。設備構成は、実機性能の実証に必要な溶融システムの主要部である廃棄物の溶融炉への自動投入、溶融、溶融物の排出、固化及び取出しを模擬した。

溶融炉の主要仕様は、出力：600 kW、周波数：1 kHz、炉内寸法：φ650×H2100であり、金属、非金属合せた溶融速度は、約190 kg/hである。

設備全体の外観を図4に示す。

本設備による各種試験を実施し、所定の性能、機能を満足することを確認した。

溶融速度は、非金属廃棄物に対して、155 kg/h以上の性能を有することを確認した。溶融に引続き溶湯の下部拔出しを実施し、安定して拔出しできることを確認した。図3に拔出しの状況を示す。

溶融性能に関しては、試験による確認に加えて、電磁解析から熱解析までの一連の解析システムを構築し、評価を実施した。システムの基本構成は、はん用コードPHOTO-EDDY（電磁解析）とABAQUS（熱解析）より構成される。電磁解析により、被溶融物の発熱分布を求め、熱解析により、温度分布を求める。被溶融物として、SUS容器を加熱した場合の解析による結果の一例（磁場解析例）を図5に示す。解析により求めたSUS容器の温度分布

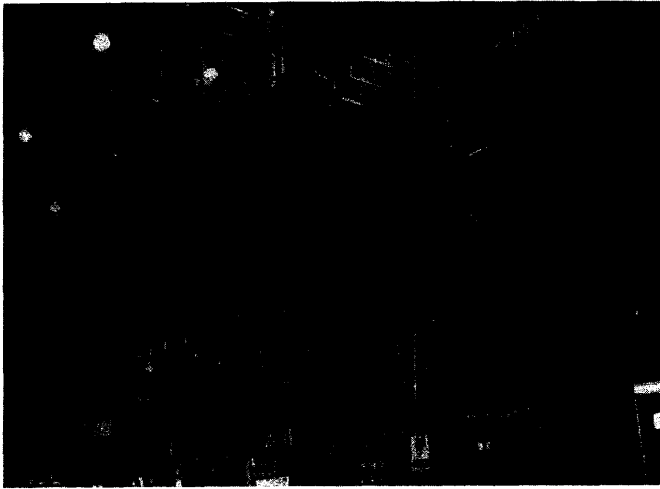


図4 パイロット試験設備 実機と同じ処理能力を有するパイロット試験装置を示す。
View of pilot-scale system

表4 熔融固化体への核種残存率及び均質性
Properties of radioactive residue and variation
in molten solid waste

熔融対象物	核種	均質性(変動係数)	残存率
スラグ	Co-60	10 %	31 %
	Cs-137	4 %	28 %
金属	Co-60	2 %	98 %
	Cs-137	—	< 1 %

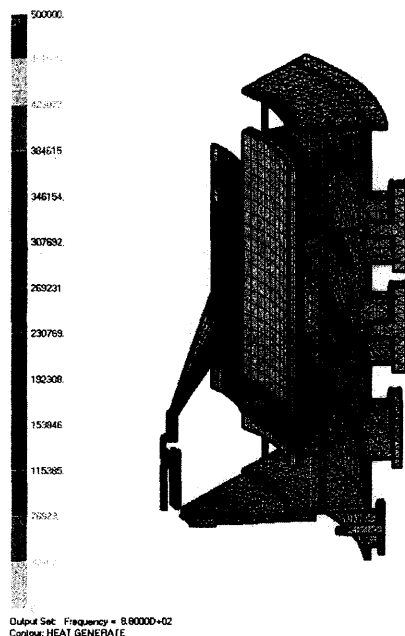


図5 熔融炉解析システムによる解析結果例(電磁解析)
Result of electromagnetic analysis for SUS container

と試験により求めた温度分布は、最大約 20 % 程度以下の誤差の範囲内で、両者は良く一致した。

表3 放射能除染性能試験条件及び結果

Experimental conditions and results of decontamination for off-gas system

試験条件

	非金属(スラグ)成分	金属成分
熔融温度	1 300°C	1 500°C
被熔融物	保温材+融剤 (約 1.5 kg)	炭素鋼 (約 9 kg)
トレーサ	RI (Co-60, Cs-137), (塩化物)	
オフガス流量	24 Nm ³ /h	
セラミックフィルタ温度	800°C	

試験結果

対象物	熔融温度 (SUS 容器温度)	C/F 温度	除染係数 DF	
			Co	Cs
非金属(スラグ)成分	1 300°C*	800°C	$\geq 1 \times 10^7$	$\geq 1 \times 10^7$
金属成分	1 500°C	800°C	$\geq 1 \times 10^7$	$\geq 1 \times 10^7$

*：非金属(スラグ)成分の熔融温度は SUS 容器温度を示す。



図6 熔融固化体の拔出し状況 鋳型から熔融固化体を拔出した状況を示す。
Molten solid waste from mold

前記に加えて、廃棄物の投入系、溶湯受けに対しても操作性、運転性に関する試験を実施した。廃棄物の自動投入では、高温運転中の熔融炉に所定(6～7分間に一回)の時間内に廃棄物を投入できること、溶湯受けでは、拔出した溶湯を鋳型で冷却固化し、鋳型から拔出せることを確認した。図6に拔出した固化体の例を示す。

固化体は、2層から成り、上部には非金属成分が、下部には金属成分が均一な層を構成している。

5. ま と め

各種熔融特性試験、放射能挙動確認試験、パイロット試験等によって、熔融炉内耐火材の長寿命と高い減容能力を有する優れたシステムとして三菱熔融システムの成立性を確認するとともに、安全審査に必要なデータを取得した。今後は、三菱熔融システムの更なる高度化を目指して、運転性、保守性の向上にかかる研究を継続していく予定である。