

(技術資料)

放射性雑固体廃棄物のプラズマ溶融技術

A Plasma Melting System for Solid Radioactive Waste



東 康夫*(工博)
Dr. Yasuo Higashi



杉本雅彦**
Masahiko Sugimoto



藤富昌志**
Masashi Fujitomi



能浦 毅**
Tsuyoshi Noura

Kobe Steel has developed a plasma melting system for the volume reduction and stabilization of solid radioactive wastes such as concrete, insulation, filters, glass, sand etc. The main features of the system are as follows.

- 1) Non-transfer air plasma torches: 1.3MW × 2
- 2) Treatment capacity: 2 tons/batch
- 3) Waste feed: 200 liter drums
- 4) Tapping method: furnace tilting
- 5) Molten slag cooling: in the system's chambers

In this paper, an outline of the system and its first-run performance results are described.

まえがき = 原子力施設から発生する放射性固体廃棄物のうち、可燃物および難燃物については焼却処理が行われている。不燃物であるコンクリート片、工具類、金属片、廃フィルタや断熱材などは、雑固体廃棄物として大部分が未処理のまま保管管理されているのが現状である。

当社は、多種多量の雑固体廃棄物を一括処理するニーズに合わせて、プラズマ加熱による処理技術開発を行ってきた。

今回、日本原子力研究所から東海研究所内の高減容処理施設に設置する焼却・溶融設備を受注し、2003年2月に引渡しを完了した。

本報では、焼却・溶融設備のうち、プラズマ溶融設備の仕様および試運転結果を報告する。

1. プラズマ溶融設備の概要

プラズマ溶融設備では、不燃物のうち、主として施設解体で発生したコンクリート（鉄筋などの金属を含む）、焼却灰および廃フィルタなどを溶融する。

処理はバッチ式であり、2トン/バッチの処理を1日2回実施することで、4トン/日の処理を実現する。

1.1 処理の概要

廃棄物は200リットルドラム缶に内蔵された状態で、本設備と同じ建家内に設けられた一時保管設備から搬送される。1ドラム缶あたりの廃棄物重量はおおむね200kgであり、1バッチの処理に際してドラム缶10本程度を受入れる。

廃棄物はドラム缶ごとにあらかじめインプットされた廃棄物情報を処理データとして登録後、1缶ずつ炉内に投入する。ドラム缶のまま溶融できることから、廃棄物

を前処理として細断加工する必要がなく、トータルとしての処理コストを低減できる。

溶融処理が完了すると、スラグサンプリング装置にて溶湯サンプルを採取した後、炉体傾動操作による出湯を行う。溶融スラグは受容器6個に分割出湯される。スラグが注湯された受容器は、1次冷却チャンバおよび2次冷却チャンバにて約2日間冷却された後、収納容器に挿入され、再度一時保管設備に返却される。

1.2 排ガス処理の概要

焼却・溶融設備では、排ガス処理機能をプラズマ溶融炉と焼却炉とで共用している。溶融炉から排出されるガスは、焼却炉からの排ガスと合流し、2次燃焼器、排気冷却器、フィルタ類を通過した後、脱硝・ダイオキシン除去装置を経て放射性ダストおよび有害物質を除去し、施設外へ放出される。図1に本設備のプロセスフローを示す。

2. プラズマトーチの仕様

プラズマ溶融方式は、プラズマ化した高温のガス（プラズマアーク）を対象物に照射することで溶融するもので、図2に示した3種類の方法が実用化されている。

トランスファ方式（TR：移行式）とノントランスファ方式（NTR：非移行式）は、カソード（陰極）、アノード（陽極）間に高電圧を印加することで作動ガスをプラズマ化する方法である。NTRタイプは、TRタイプに比べて若干出力が低くなるものの、トーチ内に両極が配置され、炉底に電極がない分、始動性、安定性が高い。誘導プラズマ方式（RF方式）は、高周波コイルによる誘導加熱でガスをプラズマ化する方法である。主として分析装置、

*技術開発本部 機械研究所 **エンジニアリングカンパニー 原子力本部 技術部

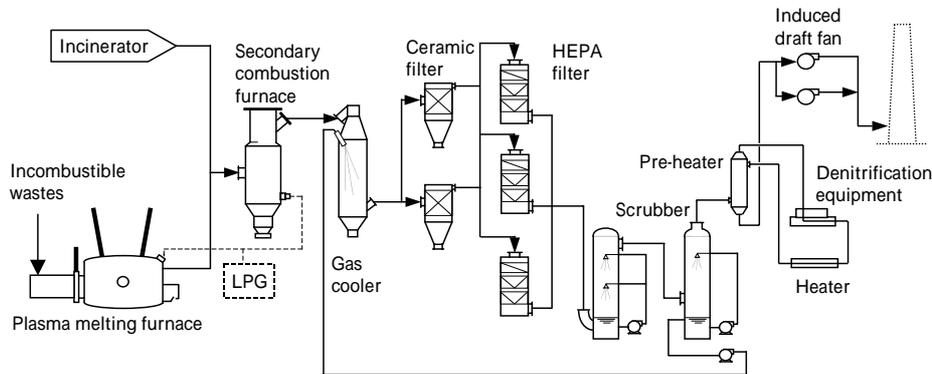


図1 焼却溶融炉のプロセスフロー
Fig. 1 Process flow of plasma and incineration furnace

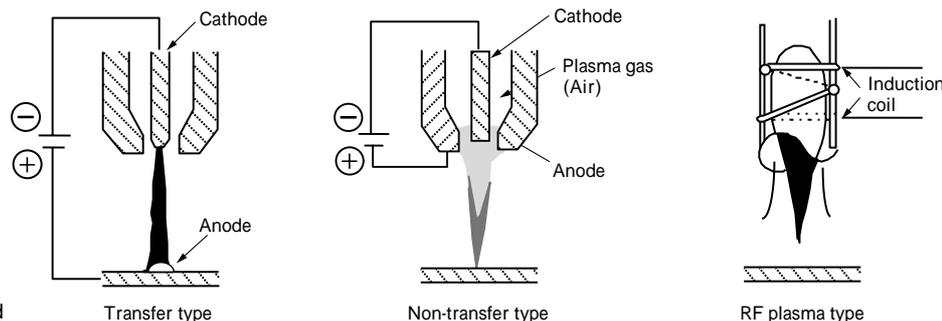


図2 プラズマアークの発生方法
Fig. 2 Plasma arc generation method



写真1 日本原子力研究所殿向け溶融炉に使用しているPT250型
プラズマトーチ
Photo 1 PT250 plasma torch used for JAERI melting furnace

合成装置に適用されており、出力が200kW程度であることから、多量の廃棄物処理への適用は困難である。

本溶融炉では、安定性を考慮してNTRタイプを採用した。なお、図中ではトーチ前側にアノードが配置されているが、当社が採用した米国 Phoenix Solutions 社製プラズマトーチは、前側に損耗のしやすいカソードを配置する(Reverse polarity)ことで保守の容易さを図っている。プラズマ作動ガスとしては、廃棄物を全量酸化させる目的で空気を使用している。

写真1にPT250型NTRプラズマトーチの写真を示す。

3. 溶融炉の仕様

プラズマ溶融炉は、耐火物がライニングされた円筒炉であり、炉体側面並びに天井が水冷されている。耐火物は処理対象廃棄物を勘案して試験を実施した結果、高ア

ルミナ系を採用した。

溶融処理はプラズマトーチを任意の場所に向けて、適宜溶解を行っていく。このため、処理にあたっては、内部状況を観察しながらトーチを操作する必要がある。

本溶融炉では、プラズマトーチはボールジョイント/昇降機構を備え、炉頂には高温炉用の炉内監視カメラを設置した。運転時にはカメラで炉内の状況を確認しながら、ジョイスティックでトーチを動かして処理を行う。

ゲート、バルブ類による出湯制御は、故障時のメンテナンスが困難になることから、本溶融炉では傾動方式を採用した。傾動角度は20°であり、低速と高速の2段切替としている。出湯管理は、出湯用の受容器を俯瞰する角度からカメラで監視しつつ、ロードセルにて出湯重量を計測している。プラズマ溶融炉の主な諸元を表1に示す。また、プラズマ溶融炉の断面を図3に示す。

4. 搬送設備の仕様

本溶融炉では、廃棄物の受入、処理後の払出のみならず、炉内への投入、出湯後の容器ハンドリングを含めて多数の搬送機器を有している。

○廃棄物投入系

一時保管設備から廃棄物を受入れ、ドラム缶ごと炉内に投入する機能をもつ。

○出湯 / 鋳型装脱着系

冷却鋳型を受容器に挿入、脱着する機能、出湯後の鋳型付受容器を搬送し、冷却する(1次冷却)機能、および1次冷却後に受容器を冷却鋳型から取外して、搬送する機能をもつ。冷却鋳型はチャンバ内でリサイクルする。

○2次冷却 / 収納払出系

鋳型装脱着系から搬送されてきた受容器をさらに冷却

表 1 プラズマ溶融炉の主な仕様

Table 1 Main specification of plasma melting furnace

Items	Specifications
Dimension of furnace Outer diameter Outer height	Approx. 3 000mm Approx. 3 500mm
Material Main shell Support	SS400 + Refractory lining SS400
Water cooling Furnace bottom Furnace roof and side wall	Non cooling Cooled by water jacket
Others Waste drum feeder Plasma torch Plasma torch operating Molten slag sampling equipment Preheating burner Furnace tilting Tapping funnel	Drum pusher with air cylinder PT250 non transfer type torch × 2 Ball joint/elevator (Three dimensional moving) Motor driven remote operation LPG burner Hydraulic cylinder, Max. tilting angle 20 degrees Casting iron

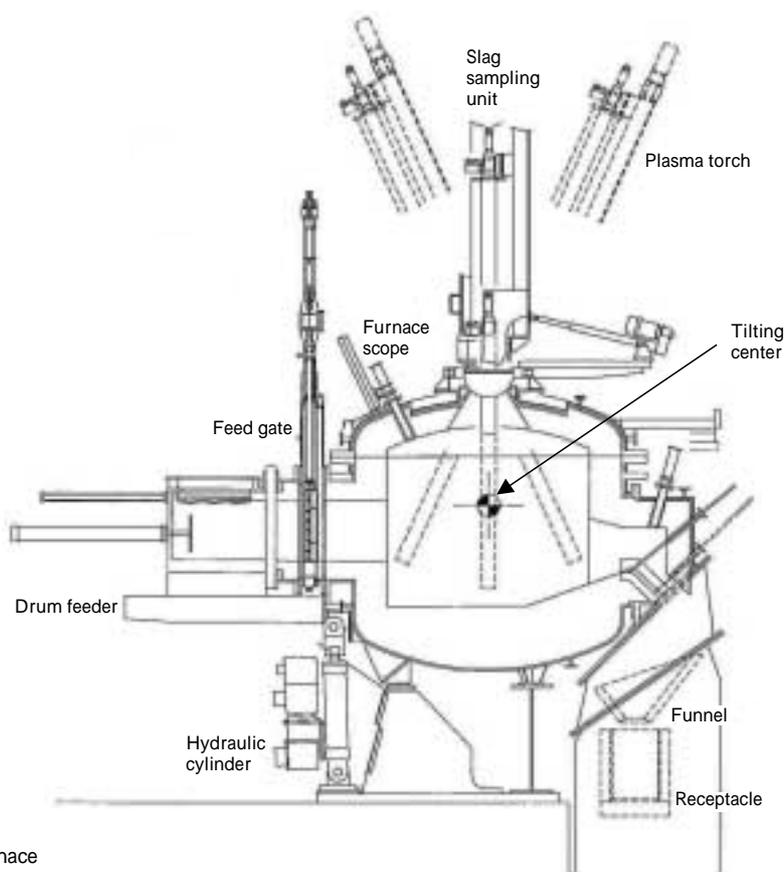


図 3 プラズマ溶融炉の概略図
Fig. 3 Schematic drawing of plasma furnace

する機能，および受容器を収納容器(200リットルドラム缶)に収納して，一時保管設備へ再度払出す機能をもつ。

出湯 / 鑄型装脱着系および2次冷却 / 収納払出系は，放射性物質である溶融スラグをハンドリングすることから，チャンバ構造としている。1次冷却チャンバでは，出湯後のスラグ受容器を最大12個(2バッチ分)收容することから，事前に行った熱解析により，壁面を水冷している。また，出湯後の容器の搬送機器については全て耐熱仕様とし，搬送制御に用いるセンサ(光電センサ)については，ケーブルをグラスファイバ製とした。

写真2に，チャンバの外観(2次冷却チャンバ)を示す。

5. 試運転の結果

溶融炉本体および搬送設備の冷間試運転は，2002年秋

より開始し，11月にはおおむね終了した。プラズマトーチについては電源の調整を並行して実施し，他設備の試運転が終了した段階からトーチ点火試験，溶融処理運転へと移行した。

5.1 プラズマトーチの特性試験

プラズマトーチの出力は，電流と電圧の積になる。電流値は電源で設定することによる固定値となるが，電圧は，Anode-cathode間の距離，電極の形状，プラズマガス流量などにより決定される。また，プラズマガス流量は，アーク付着点を決定する因子となるため，運転条件の選定には，これらパラメータの調整が必要となる。

なお，プラズマガス流量が一定の場合には，Anodeにおけるアーク付着点が一定領域に留まることから，プラズマガス流量は一定の範囲で周期的に変動させることによって損耗箇所を分散させ，電極寿命の延長を図っている。



写真2 搬送用チャンバの一例(2次冷却チャンバ)
Photo 2 Material handling chamber (ex. secondary cooling chamber)

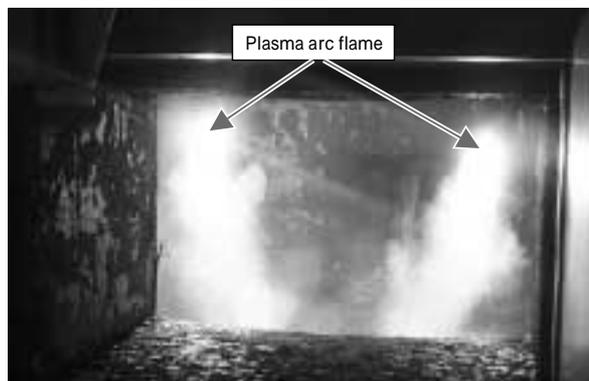


写真3 プラズマアークの火炎(ドラム投入器から撮影)
Photo 3 Plasma arc flame (view from drum feeder)

図4にプラズマ電流を一定値に固定した際のガス流量と電圧の関係を示す。この相関から、最大出力1.3MWを得るために、

プラズマ電流：1 400A

プラズマガス流量：～3 400l/min

を初期条件として設定した。

プラズマアークおよび電極へのアーク付着状態をそれぞれ写真3および写真4に示す。

5.2 模擬廃棄物溶融試験

(1) 概要

溶融炉の性能確認として、模擬廃棄物を用いた溶融試験(2トン/バッチ)を実施した。廃棄物は、表2に記載の標準組成をもとに200リットルドラム缶単位で製作し、1缶あたりの重量は約200kgとしている。雑多なものとしては、可燃物、HEPAフィルタエレメントなどを混在させている。

なお、初期に実施した少量の溶融試験において、溶融したコンクリートの粘性が非常に高く、プラズマトーチの熱が拡散しないこと、出湯時の湯切れが良好でないことが確認されたため、以降の運転においては粘性改善のためのフラックスを添加している。

試験は実際の操作を模擬する形で行うこととし、炉内はあらかじめLPGバーナで予熱し、廃棄物投入前にプラズマトーチに切替えて炉内温度を十分に上げた。ドラム缶は1本ずつ投入し、ドラム缶の形が崩れた時点で次のドラム缶を投入した。ドラム缶の投入はおおむね15分間隔で行っており、炉内の状況を見ながらトーチを駆動、全体を溶融させた。



写真4 陰極(前部電極)におけるプラズマアーク痕の付着状況
Photo 4 Plasma arc attachment at cathode (front electrode)

表2 溶融炉で処理を行う標準的な廃棄物組成
Table 2 Standard waste composition for melting furnace

Weight of waste (kg/batch)					
Concrete	Steel	Ash	Carbon	Miscellaneous	Total
1 635	325	30	2	8	2 000

(2) 炉内負圧維持

プラズマトーチを点火した直後は、溶融炉の内圧が上昇するが、炉内を-1kPa程度の負圧に設定しておけば、常時負圧を確保できる。

(3) 炉内可視化の状況

写真5に溶融中の炉内監視カメラの映像を示す。炉内監視カメラを見ながら、プラズマトーチ駆動用のジョイスティックは容易に操作できる。

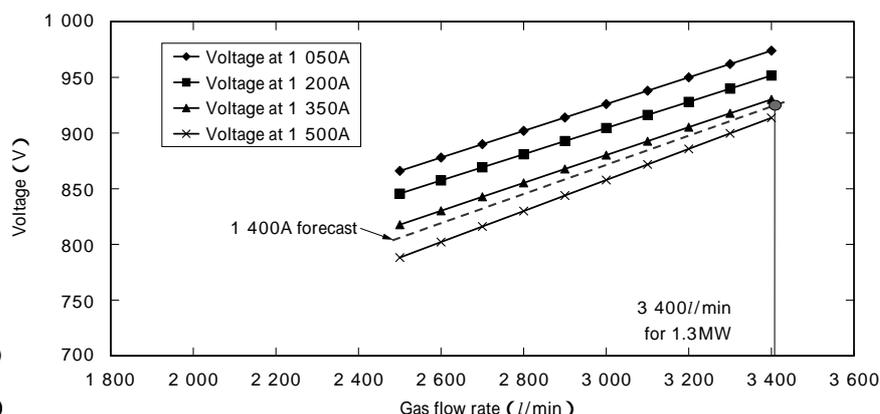


図4 プラズマガス流量と電圧の相関
(図中の点は測定から求めた平均値である)

Fig. 4 Relation of plasma gas flow rate and voltage
(Plot was average value using measured data)

(4) プラズマトーチ駆動装置の操作範囲

2本のプラズマトーチ駆動装置により、炉内のほぼ全域を照射できることが確認できた。また、万一のときのトーチ引抜き操作確認も行った。

(5) スラグサンプリング装置

出湯前にスラグサンプリング装置により、問題なくサンプリングが行えた。

(6) 出湯操作性

出湯管理は、出湯用の受容器を俯瞰する角度からカメラで監視しつつ、ロードセルにて出湯重量を計測している。写真6に出湯時のカメラ映像を示す。

出湯は受容器6個に分割するため、傾動操作を合計6回実施した。傾動速度は、前半の4回は低速、溶湯ヘッドが下がる後半2回は高速で行った。湯面の上昇速度は、出湯の初期と終期とで異なるが、いずれの場合も運転員が湯面位置を監視し、傾動停止操作をできる程度であった。1回の出湯に要する時間はおおむね3分程度であった。

(7) 漏斗（ファンネル）の機能

出湯したスラグを受容器に導くための治具として鑄鋼製の漏斗を設けており、これによるスラグ飛散防止機能を確認した。また、漏斗内表面に付着したスラグの剥離性も良好である。

(8) 固化体の性状

出湯直後の溶湯からはガス発生などによる湯面上昇、泡立ちなどの現象は見られなかった。

出湯後のスラグは、冷却固化後にサンプル採取を行い、主要成分の変動を測定した。固化体は全量酸化されており、おおむね均質であった。写真7に固化体の外観を示す。

(9) 排ガス処理性能

本試験中には、排ガス処理系各部におけるCO濃度、NO_x濃度を測定しており、いずれの値も許容値以下であった。

なお、一連の試運転が終了した段階で炉内耐火物を観察したが、補修を要する損耗、剥離などは生じていなかった。

(10) 搬送設備の機能確認



写真5 溶融中の炉内状況（炉内監視カメラからの映像）
Photo 5 Furnace inside during melting (view of furnace scope)

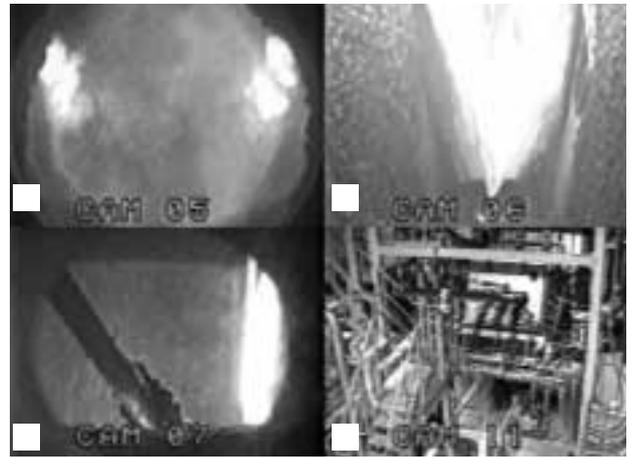


写真6 溶融スラグの出湯状況
(炉内, 出湯口, 受容器, 炉体後部)
Photo 6 Tapping out the molten slag
(Furnace inside, Tapping area, Receptacle, Furnace back view)



写真7 溶融固化されたコンクリート廃棄物
Photo 7 Solidified concrete waste

2日間で4バッチの運転をすることにより、1次冷却チャンバ内に12個、2次冷却チャンバ内に12個の合計24個の固化体を搬送・冷却できることを確認した。

むすび = NTR型プラズマトーチ2本を有するプラズマ溶融炉の試運転で、コンクリート、金属、可燃物混在の雑固体廃棄物を2トン/バッチで処理した。固化体は全量化学的に安定な酸化物で、かつおおむね均質であった。

今後はプラズマトーチの運転を継続し、電極寿命を正確に把握する一方、スラグ粘性の改善などを行い、合理的な運転・保守方法を確立する。

最後に、本設備の試運転および各種データ取得にあたり、日本原子力研究所東海研究所バックエンド技術部に絶大なる協力を頂いたことを深く感謝する。