

JAERI-Tech

JP0050825

2000-049



雑固体溶融固化体製作装置の性能確認試験と  
溶融炉耐火れんがの耐食性試験  
(受託研究)

2000年9月

磯部 元康・亀尾 裕・中塩 信行・涌井 拓治・岩田 圭司\*・木林 辰行\*  
金沢 勝雄・中島 幹雄・平林 孝匿\*

日本原子力研究所  
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。  
入手の問合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂  
郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター  
(〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内) で複写による実費頒布をおこなっ  
ております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research  
Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy  
Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195, Japan.

雑固体溶融固化体製作装置の性能確認試験と  
溶融炉耐火れんがの耐食性試験  
(受託研究)

日本原子力研究所東海研究所バックエンド技術部  
磯部 元康・亀尾 裕・中塩 信行・涌井 拓治・岩田 圭司\*\*・木林 辰行\*\*\*  
金沢 勝雄・中島 幹雄・平林 孝蔵\*

(2000年7月3日受理)

低レベル放射性雑固体廃棄物を溶融し、溶融固化体を製作するための雑固体溶融固化体製作装置を製作した。導電性るつばを用いる高周波誘導加熱方式及び高周波誘導加熱とプラズマ加熱を併用するハイブリッド加熱方式により、模擬雑固体廃棄物を溶融し、装置の性能確認を行った。本装置を用いて試作した溶融固化体は、強度を損なうような空隙もなく、溶融炉は雑固体溶融に十分な性能を有していることを確認した。また、溶融に伴って発生する放射性のダストや有害ガスの放出を抑制するための排ガス処理装置も十分に機能を果たしていることを確認した。さらに、二次廃棄物の低減のために、耐久性能の高い耐火材の選定試験を行った。各種耐火物の中から選定された  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3 \cdot \text{ZrO}_2$  系耐火れんがは、塩基度の低いスラグに対して耐食性がきわめて高いことを明らかにした。

---

本研究は、特別会計による科学技術庁からの受託研究(平成7~12年度)として実施したものである。

東海研究所：〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2-4

\* 放射線利用振興協会 \*\* 石川島播磨重工業株式会社 \*\*\* 日本ガイシ株式会社

Performance Tests of A Melting System for Miscellaneous Solid Wastes  
and Corrosion Tests of A Long-life Refractory Material  
(Contract Research)

Motoyasu ISOBE, Yutaka KAMEO, Nobuyuki NAKASHIO, Takuji WAKUI,  
Keiji IWATA\*\*, Tatsuyuki KIBAYASHI\*\*\*, Katsuo KANAZAWA,  
Mikio NAKASHIMA and Takakuni HIRABAYASHI\*

Department of Decommissioning and Waste Management  
Tokai Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received July 3, 2000)

A melting system for miscellaneous solid wastes has been constructed to study on melting techniques for low-level radioactive solid wastes. The system consists of a melting unit, which equipped with a high frequency induction furnace and a plasma torch, and an exhaust gas purification unit. The Performance test of the melting system was conducted by melting simulated miscellaneous solid wastes. Two heating methods were adopted in the test: The induction heating and the hybrid heating methods. In the former, wastes were heated in an electrical-conductive crucible with the induction furnace, and in the latter both the induction furnace and the plasma torch were used. The performance of the melting unit satisfied requirements to produce suitable molten product. The performance of the exhaust gas purification unit also satisfied requirements for suppressing release of radioactive particulate dust and/or gaseous air pollutant. Furthermore, the corrosion test for selection of a long-life refractory material was conducted for reduction of the amount of secondary wastes. An  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{Cr}_2\text{O}_3$ - $\text{ZrO}_2$  refractory material, which was selected from seven kinds of refractories, showed excellent characteristics in corrosion resistance to molten slag of low basicity.

Keywords : Low-level Radioactive Wastes, Miscellaneous Solid Wastes, Melting Unit, Exhaust Gas Purification Unit, High Frequency Induction Furnace, Plasma Torch, Hybrid Heating Method,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{Cr}_2\text{O}_3$ - $\text{ZrO}_2$  Refractory Material

---

This study was conducted during 1995 through 2000 under contract with Science and Technology Agency of Japan.

\*Radiation Application Development Association    \*\*Ishikawajima-Harima Heavy Industries CO., Ltd.  
\*\*\*NGK Insulators, Ltd.

## 目 次

1. 緒言	1
2. 雜固体溶融固化体製作装置	1
2.1. 装置の構成	1
2.1.1. 溶融装置	1
2.1.2. 排ガス処理装置	3
3. 性能確認試験	5
3.1. 溶融試験	5
3.1.1. 金属溶融	5
3.1.2. 雜固体溶融	6
3.2. 排ガス試験	6
3.2.1. CO ガス及びダイオキシン類の測定	7
4. 耐火れんがの耐食性試験	7
4.1. 耐火物の耐食性試験	7
4.2. 模擬雑固体廃棄物の溶融による耐食性確認試験	8
5. まとめ	9
謝 辞	10
参考文献	10

## Contents

1. Introduction	1
2. A Melting System for Miscellaneous Solid Wastes	1
2.1. Construction of Melting System	1
2.1.1. A Melting Unit	1
2.1.2. A Exhaust Gas Purification Unit	3
3. Performance Tests	5
3.1. Melting Tests	5
3.1.1. Melting of Metallic Wastes	5
3.1.2. Melting of Miscellaneous Solid Wastes	6
3.2. Performance Tests of Exhaust Gas Purification System	6
3.2.1. Measurements of CO Gas and Dioxin	7
4. Corrosion Resistance Tests of Refractory Bricks	7
4.1. Selection of Refractories	7
4.2. Confirmation of Corrosion Resistance of Refractory Brick	8
5. Conclusion	9
Acknowledgements	10
References	10

## Tables and Figures

Table 1	Measuring Items of Monitoring Instruments	11
Table 2	Melting Condition of Miscellaneous Solid Wastes	13
Table 3	Concentrations of CO and Dioxin in Exhaust Gas	14
Table 4	Condition of Corrosion Test	14
Table 5	Comparison of Corrosion and Osmosis Resistance of Seven Refractory Bricks Durability	15
Table 6	Condition of Melting Test for Confirming Corrosion Resistance of Al-Cr-Zr Type Refractory Bricks	15
Fig. 1	Schematic Representation of Melting System for Miscellaneous Solid Wastes	16
Fig. 2	Melting Unit (Induction Furnace)	17
Fig. 3	Melting Unit (Plasma Torch)	18
Fig. 4	Exhaust Gas Purification Unit (Secondary Combustion Chamber, Gas Cooler)	19
Fig. 5	Exhaust Gas Purification Unit (Ceramic Filter, HEPA Filter, Gas Scrubber, Reheater)	20
Fig. 6	Heating Curve in Induction Heating Mode	21
Fig. 7	Heating Curve in Hybrid Heating Mode	22
Fig. 8	Sectional View of Solidified Product	23
Fig. 9	Size and Weight of Solidified Product	24
Fig. 10	Monitoring of Concentrations of CO gas Produced in Melting of PVC Tube	25
Fig. 11	Principle of Corrosion Test Apparatus	26
Fig. 12	Change of Thickness of Refractory Bricks after Corrosion Test	27
Fig. 13	Depth Profile of Ca, Fe and Al+Cr+Zr by EDX Analysis in Refractory Brick Sample Corroded by Molten Slag	28
Fig. 14	Depth Profile of Ca, Fe and Al+Cr+Zr by EDX Analysis in Refractory Brick Sample Corroded by Molten Metal	29

This is a blank page.

## 1. 緒言

原子力施設から発生する低レベル放射性廃棄物は気体、液体、固体に区別される。このうち気体廃棄物は、フィルタ等により基準値以下の放射能濃度に浄化された後放出され、液体廃棄物は濃縮等により減容された後、セメント・アスファルト等により固化されて均質・均一固化体となる。一方、固体廃棄物のうち可燃物は焼却処理により減容され焼却灰として、また難燃物および不燃物の多くはそのままドラム缶に入れてセメント固化される。主な原子力施設に保管されている低レベル放射性廃棄物量は 200 リットルドラム缶で約 90 万本である<sup>1)</sup>。このうち発電所廃棄物については、平成 4 年度から六ヶ所低レベル放射性廃棄物埋設センターにおいて、一部浅地処分が実施されている。一方、発電所廃棄物以外の廃棄物については現在検討中であり、最終的な処分を考慮して効果的な減容処理を行うことが重要な課題となっている。

低レベル放射性雑固体廃棄物の減容処理技術のひとつである溶融処理は、処分を考慮した均質で安定な溶融固化体を製作するための技術として有望である。廃棄物の溶融技術については放射性廃棄物に限らず種々の技術開発が行われており<sup>2-4)</sup>、高周波誘導加熱やプラズマ加熱等の方法が検討されている。しかし、様々な組成の雑固体廃棄物を溶融するためには、溶融方法・溶融条件の設定、製作した溶融固化体の物性と放射性核種の閉じこめ性能、溶融時の放射性核種の移行挙動等、検討すべき課題が多い。

原研では不燃物・難燃物を含む模擬雑固体廃棄物を用いて、溶融固化体を製作するための雑固体溶融固化体製作装置を製作した。この装置を用いて、核種閉じこめ性に優れた安定な溶融固化体を製作するための溶融条件の最適化等の試験を行っている。本稿では、雑固体溶融固化体製作装置の製作と溶融装置、排ガス装置の性能、及び溶融炉の主要要素である耐火れんがの耐食性について報告する。

## 2. 雜固体溶融固化体製作装置

### 2.1. 装置の構成

雑固体溶融固化体製作装置の概念図を Fig. 1 に示す。雑固体溶融固化体製作装置は溶融炉を主体とした溶融装置と、溶融時に発生する有害ガスや放射性核種の大気環境への放出を抑制するための排ガス処理装置から構成されている。溶融装置のうち溶融炉、造塊装置、作業用自動装置は溶融炉チャンバ内に設置されており、運転時にはチャンバ排気系により常時排気される。排ガス処理装置は二次燃焼装置、排ガス洗浄装置等を備え、高周波誘導炉内を排気する装置である。

#### 2.1.1. 溶融装置

溶融装置は溶融炉、造塊装置、付帯装置（作業用自動装置等）、計測装置で構成される。溶融炉は高周波誘導炉とプラズマ加熱装置を備えており、本装置を用いて固体廃棄物を溶融処理する場合には、金属廃棄物については高周波誘導加熱、また非金属もしくは金属混合廃棄物については導電性るつばを利用した高周波誘導加熱かプラズマ加熱を用いることになる。また、高周波誘導

加熱とプラズマ加熱を複合して使用することも可能である。主要機器の概要を以下に述べる。

#### (1) 高周波誘導炉

定格出力 350kW (周波数 1000Hz) の高周波誘導コイルを装備したサイリスタインバータ方式の高周波誘導炉である。この出力は、金属とコンクリートを 1600°C で溶融するのに必要なエネルギーから算出した。炉内寸法は、50L ドラム缶 (外径約  $\phi$ 390mm) 及び導電性るつぼ (外径は  $\phi$ 355mm) が装荷できる大きさとし、内径  $\phi$ 490mm、高さ 590mm とした。炉容積は約 70L で、銑鉄で 550kg を溶融することができる。炉内は大気雰囲気とした。炉には炉蓋が装備されており、昇降・旋回装置により、必要に応じて使用することができる。また、溶湯を出湯するための傾動機構が備えられており、最大 105 度までの傾動が可能である。Fig. 2 に高周波誘導炉の主要部分を示す。

#### (2) プラズマ加熱装置

プラズマアークにより廃棄物を燃焼・溶融する装置である<sup>5)</sup>。プラズマトーチは水冷式直流熱陰極型トーチ方式で、トーチ先端部の取替えにより移行式または非移行式に切り換えることができる。出力は誘導溶融炉同様に必要なエネルギーを推算し、100kW (200V, 500A) とした。作動ガスはアルゴン又は窒素である。トーチ寸法は外径 50mm、長さ 1540mm (移行型) 又は 1740mm (非移行型) である。プラズマトーチは昇降・旋回装置により運転位置及び退避位置への移動が可能である。Fig. 3 にプラズマ加熱装置の主要部分を示す。

#### (3) 造塊装置

造塊装置は、溶融炉より溶湯を鋳型内に注ぎ (出湯)、冷却して溶融固化体を製作する装置である。溶融固化体と鋳型の焼付きを防止するために鋳型予熱装置を用いて予め鋳型を加熱することができる。溶湯が注ぎ込まれた鋳型を遠隔操作により所定の位置まで移動する鋳型移動装置と、油圧ジャッキにより溶融固化体を鋳型内から抜き出す脱塊装置を備えている。(Fig. 2 参照)

#### (4) 作業用自動装置

溶融試験では、RI トレーサを添加することから、模擬廃棄物の装荷、測温、サンプリング等を遠隔操作で行う必要がある。作業用自動装置は、5 種類の特殊なハンドにより、50L ドラム缶の初期装荷、追加装入、溶湯の測温・サンプリング等を遠隔自動操作により行うことができる。

#### (5) 計測装置

溶融装置の運転・監視及びデータ収集を行うための装置である。計測項目を Table 1 に示す。本装置の運転・監視及び機器間のインターロック等に必要なプロセス量を測定し、必要に応じて操作室内の制御盤・操作盤等に測定値 (電圧・電流等) を表示することができる。また、測定値に異常が生じた場合は速やかに警報を発生する。さらに計測値 (炉内温度等) をパソコンに取り込み解析ソフトを用いて解析できるようにした。

### 2.1.2. 排ガス処理装置

溶融試験では、RI トレーサの使用に加え、有機物を模擬廃棄物として使用することが考えられることから、放射性のダスト・ヒューム、可燃性・腐食性ガス等の有害ガスの発生を考慮しなければならない。従って、排ガス処理装置としては、放射性核種や有害ガスの一般環境への放出を極力低減するために、以下の要件を備えている必要がある。

- ① 未燃成分の燃焼、ダイオキシン類等の分解が可能であること。
- ② 粉塵等の除去が可能であること。
- ③ HCl、SO<sub>x</sub> 等の酸性ガスの除去できること。
- ④ RI 核種を放出基準以下に低減できること。

そのため、排ガス処理装置は二次燃焼装置、排ガス冷却装置（以上、Fig. 4）、セラミックフィルタ、高性能フィルタ、排ガス洗浄装置、排ガス加熱装置（以上、Fig. 5）の各装置を備えており、溶融炉から発生する排ガスをできる限り浄化した後、既設の排ガス設備を通して排出する構造になっている。以下に主要機器の概要を示す。

#### （1）二次燃焼装置

排ガス中の可燃成分（未燃カーボンや未燃性ガス）の燃焼およびダイオキシン類の分解を行う装置である。燃焼方式は LPG 燃焼式とし、バーナーの燃料はプロパン供給設備から、燃焼空気は燃焼空気送風機（220Nm<sup>3</sup>/h）からそれぞれ供給される。燃焼温度は出口で平均 800°C（最大 1035°C）であり、本体内部は 800°C 以上に保持される。このため、耐食・耐熱性を考慮して炭素鋼（SS400）に耐火ライニングを施工し、耐火キャスタブルと断熱ボードの二重構造とした。

#### （2）排ガス冷却装置

排ガス冷却装置は、二次燃焼装置で高温になった排ガスを後段フィルタの使用温度まで冷却するとともに、ダイオキシン類の再生成を防止することを目的とした装置である。排ガス冷却装置入口側からスプレーノズル（水噴射式）により、水を圧縮空気にて粒径 100μm 以下の水滴にして噴霧し、高温の排ガスを冷却する。なお、噴霧水の流量を調節することにより、出口温度を 230 ~ 250°C にコントロールすることが可能である。

#### （3）セラミックフィルタ

セラミックフィルタは、本体、逆洗装置、灰取出装置で構成され、高性能フィルタの前置フィルタとして、排ガス中の比較的大きな粒径の粉塵を除去する装置である。本体上部に支持プレートが取付けられ、支持プレートに 52 本の底付円筒形セラミックフィルタエレメントが懸架されている。材質は SiC で、最大気孔径 60μm、集塵効率 70% 以上（平均 0.4μm の DOP 粒子に対する効率）である。なお、エレメントの本数及び寸法（濾過面積）は、濾過速度を 3cm/sec 以下にすることを考慮して決定した。

逆洗装置は未燃ダスト等の付着物を取り除くためのものである。エレメント上部に配置された逆洗ノズルを通して圧縮空気のパルスをエレメント内部に排出し、逆洗を行う。

灰取出装置は、セラミックフィルタ底部に溜まった灰、及びエレメント破碎機により破碎した

使用済みセラミックフィルタエレメントの取り出しを行う装置である。

#### (4) 高性能フィルタ

セラミックフィルタを通過した排ガス中の微小粉塵等を除去する装置である。本体は角形高性能エアフィルタ(以下「HEPA フィルタ」という)を内蔵した箱形自立式であり、設計温度 250°C、最大排ガス量は 765Nm<sup>3</sup>/h ある。材質は排ガスに対する耐食性を考慮して SUS304L とした。本体下部の入口ノズルより導入された排ガスは HEPA フィルタにて濾過、除塵された後、上部出口ノズルより排出される。HEPA フィルタの集塵効率は 99.97%以上（平均 0.3μm の DOP 粒子に対する効率）である。

#### (5) 排ガス洗浄装置（スプレー塔+充填塔式）

排ガス洗浄装置は、排ガス中の HCl、SO<sub>x</sub> 等の有害ガスを洗浄除去する目的で設置され、高性能フィルタからの高温ガスを冷却するスプレー塔、排ガス中の HCl 等を除去する充填塔及び充填塔で発生する廃液を貯蔵する洗浄液槽から構成される。スプレー塔は、洗浄液噴霧により温度を 200°C から 70°C まで断熱冷却する。スプレー塔部の材質は排ガスに対する耐食性を考慮して SUS304L とした。充填塔では排ガスと洗浄液（苛性ソーダ水溶液）を充填物により十分接触させ HCl、SO<sub>x</sub> 等の酸性ガスを除去（除去効率：HCl 97%以上、SO<sub>x</sub> 95%以上）することができる。充填塔の材質は排ガス及び洗浄廃液に対する耐食性を考慮し、本体は SS400 に塩化ビニルラミネートを施し、充填材及びデミスターはポリプロピレンを使用した。洗浄液はチューブ式熱交換器を用いた排ガス洗浄液冷却装置で熱交換し、循環して使用される。

#### (6) 排ガス加熱装置（電気ヒータ式）

排ガス洗浄装置から流れてくる水分飽和状態の排ガスを加熱し、ダクト下流側での水分の凝縮を防止する装置である。配管に巻き付けた電気ヒータで排ガスを加熱し、入口排ガス温度 50°C に対し、出口排ガス温度を 180°C にコントロールした。なお、熱効率を良くするためヒータ外側に保温材を施工した。排ガス加熱装置を出たガスは既設の排気系に合流するが、出口排ガス温度を 280°C 以上にしなければ、合流ガスの温度が既設 HEPA フィルタの常用温度 50°C を超えることはない。

#### (7) 計測装置

排ガス処理装置の運転・監視及びデータ収集を行うための装置である。また、溶融炉から有害ガス及び放射性のダスト等が発生することを考慮して、溶融炉排気系の排ガスをリアルタイムでサンプリング・分析し、有害成分 (CO、CO<sub>2</sub>、O<sub>2</sub>、HCl、NO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub>) の監視と記録を行う排ガス分析装置と、ダスト等の固体成分を等速吸引法によりサンプリングするダストサンプリング装置も備えている。計測項目を Table 1 に示す。必要に応じて操作室内の制御盤・操作盤等に測定値を表示することができる。

### 3. 性能確認試験

#### 3.1. 溶融試験

雑固体溶融固化体製作装置は高周波誘導炉とプラズマ加熱装置を備えており、金属・非金属に関係なく様々な廃棄物の溶融が可能である。本装置を用いた溶融固化体の製作方法としては、加熱方式と固化方式の組み合わせにより以下のような方法が考えられる。

##### (a) 高周波誘導加熱方式 I

処理対象：金属廃棄物

特徴：誘導電流によるジュール熱で導電体を加熱するため、廃棄物に良導電体が50%以上含まれている必要がある。溶融物は溶融炉を傾動させて鋳型に注ぎ冷却固化させる（鋳型内固化）。

##### (b) 高周波誘導加熱方式 II（導電性るつぼ加熱）

処理対象：廃棄物組成に関係なく処理可能

特徴：導電性るつぼを誘導電流により加熱し、廃棄物を間接的に加熱・溶融する。溶融物はるつぼ内で冷却固化する（るつぼ内固化）。

##### (c) ハイブリッド加熱方式（プラズマ+高周波誘導）

処理対象：金属混合廃棄物

特徴：プラズマ加熱と高周波誘導加熱を併用して使用する複合加熱方式である。るつぼ内固化、鋳型内固化ともに可能である。但し、導電性るつぼはプラズマの高温に耐えられないため使用できない。

##### (d) プラズマ加熱方式

処理対象：非金属廃棄物

特徴：プラズマの高温フレームを廃棄物に直接当てて溶融するため溶融対象物を選ばず、かつ迅速な溶融が行える。るつぼ内固化、鋳型内固化ともに可能である。

性能確認試験では、高周波誘導炉加熱方式 I により金属溶融試験を行い、高周波誘導加熱方式 II とハイブリッド加熱方式により模擬雑固体廃棄物を溶融して、雑固体溶融固化体製作装置の性能確認を行った。

#### 3.1.1. 金属溶融

高周波誘導炉の性能確認のために、金属のみの溶融試験を行った。なお、この溶融は耐火物の焼結もかねて行った。模擬廃棄物として銑鉄 300kg を初期装荷し、1 時間で 700°Cまで昇温した。700°Cで 30 分間保持した後、再び昇温し、1000°C、1200°C、1400°Cの各温度でそれぞれ 1 時間保持した。急激な温度変化による耐火物の破損を少なくするため、各保持温度間の昇温時間は 1 時間とした。温度は溶湯中に測温棒を入れて測定した。初期装荷銑鉄は約 1100°Cで溶け始め、1200°Cに到達後約 30 分程度で完全に溶融した。そこで銑鉄 250kg を数回に分けて追加装入した。1400°Cで 1 時間保持した後、鋳型に出湯し冷却固化した。溶融試験では、高周波誘導炉を予め定めた昇温プログラムに沿って温度制御できること、および金属廃棄物（銑鉄 550kg）を溶け残り

なく鋳型内へ出湯できることを確認した。

### 3.1.2. 雜固体溶融

雑固体廃棄物の溶融試験は高周波誘導加熱方式Ⅱとハイブリッド加熱方式を用いて行った。溶融条件を Table 2 に示す。模擬廃棄物の組成は金属約 80wt%と雑固体廃棄物としてコンクリート、保温材、ガラスを約 20wt%とした。

高周波誘導加熱方式Ⅱの場合の加熱曲線を Fig. 6 に示す。温度はるつぼ外周に取り付けた B 型熱電対で連続的に測定したが、溶湯温度はこの熱電対で測定された温度より高いので、別に測温棒による溶湯温度の測定も行った。るつぼ外周温度が 1550°C のとき、測温棒で測定した溶湯温度は 1680°C であった。

模擬廃棄物としてコンクリート、保温材、ガラスを約 17kg と金属 5kg を初期装荷し、約 90 分間で目標温度（1550°C）まで昇温した。初期装荷分が完全に溶解した後、保温材 8kg と金属 86kg を数回に分けて追加装入した。このとき、比重が小さい保温材が溶湯に浮かないように保温材—金属の順で交互に装入した。模擬廃棄物を全て投入し、完全溶解を確認した後、化学トレーサ（Co、Cs）を投入した。Cs は揮発性が高いので、化学トレーサの投入から溶融終了までの時間をできるだけ短くすることを考慮した。約 70 分溶融状態を保持した後、加熱を停止して溶融炉内で冷却固化した。

ハイブリッド加熱方式の場合の加熱曲線を Fig. 7 に示す。模擬廃棄物として金属約 98kg とコンクリート、保温材、ガラス約 20kg を初期装荷した。金属が多いのは高周波誘導加熱による昇温を行うためである。測温棒により溶湯温度を確認しながら昇温し、約 90 分間で目標温度（1600°C）に到達した。溶湯に保温材と金属を追加装入し、溶湯に浮かんだ保温材をプラズマ加熱により溶かす作業を繰り返した。追加装入した保温材 8kg と金属 4kg を完全に溶融した後、化学トレーサ（Co、Cs）を投入した。溶融状態を約 70 分間保持した後、誘導炉とプラズマを停止し、鋳型に出湯し冷却固化した。

製作した溶融固化体の写真を Fig. 8 に、溶融固化体重量・寸法を Fig. 9 に示す。高周波誘導加熱方式Ⅱにより製作した試験体の表面を目視観察した結果、未溶融物や有害な空隙は認められず、スラグ層はガラス状になっていた。金属層は中央部に凝固収縮に伴うひけすが認められたが、ひけすはスラグで満たされており、溶融固化体の強度を損なうような損傷ではなく良好な溶融固化体であった。また、ハイブリッド加熱方式で製作した試験体も同様に目視観察した結果、若干の気泡が認められたが、溶融固化体の強度を損なうような空隙はなく、どちらの溶融方式でも良好な溶融固化体を製作できることがわかった。

### 3.2. 排ガス試験

雑固体溶融固化体製作装置では、模擬廃棄物として塩化ビニール、ポリエチレン等を使用することから、CO ガス、ダイオキシン等の発生を考慮する必要があり、これらを安全に処理するための排ガス処理装置を設置している。これらの装置の機能を評価するために CO ガス、ダイオキシン類の測定を行った。

### 3.2.1. CO ガス及びダイオキシン類の測定

炭素鋼（約 75wt%）とコンクリート・保温材・ガラス（約 25wt%）の模擬廃棄物 125kg を初期装荷し、ハイブリッド加熱方式で昇温を開始して 90 分間で目標温度の約 1600°Cに達した後、有機物（硬質塩化ビニール配管）250g を 5 分間隔で計 6 回投入した。排ガス中の CO 濃度の変化は、溶融炉出口に設置したガス分析器 1 と排ガス処理装置の出口に設置したガス分析器 2 で測定した (Fig. 1 参照)。結果を Fig. 10 に示す。CO の測定には赤外線吸収法を用いた CO 分析計を使用した。有機物の投入により、溶融炉出口ではピーク値で 1000~1600ppm の CO ガスが 6 回（有機物投入回数と同じ）確認され、排ガス処理装置を運転しなかった時の約 6 倍の CO ガスが発生していることが分かった。しかし、排ガス処理設備出口では、CO ガス量は 0~300ppm まで低下した。また、別に「JIS K 0098.7.1」分析方法で測定した CO ガス濃度も、溶融炉出口で平均 933ppm であったが、Fig. 1 に示す既設 HEPA フィルタ出口（サンプリングポート）では平均 0.3ppm まで低下しており、本排ガス装置は十分に機能を満たしていることが分かった。

排ガス中のダイオキシン濃度は溶融炉出口と既設 HEPA フィルタ出口で測定した。分析は厚生省生活衛生局水道環境部環境整備課「廃棄物処理におけるダイオキシン類標準測定分析マニュアル」に基づいて行った。結果を Table 3 に示す。溶融炉出口では 1800ng-TEQ/ Nm<sup>3</sup> であったダイオキシン類濃度が HEPA フィルタ出口では 0.019 ng-TEQ/ Nm<sup>3</sup> となった。

厚生省が定めた新ガイドライン（1997 年 1 月）によれば、都市ゴミ焼却炉からのダイオキシン類の排出基準は、新設連続式焼却炉では 0.1ng-TEQ/ Nm<sup>3</sup>、既設連続式焼却炉では旧ガイドラインの 0.5ng-TEQ/Nm<sup>3</sup> となっており、本排ガス処理装置の HEPA フィルタ出口での濃度 0.019ng-TEQ/ Nm<sup>3</sup> はその基準を十分に満たしている。

また同時に、排ガス処理装置の出口において、HCl、SO<sub>x</sub> の濃度測定も行ったが、両者ともに検出されなかったことから、排ガス処理装置は十分に機能していると考えられる。

## 4. 耐火れんがの耐食性試験

一般的に、溶融炉で使用される耐火物の耐食性は溶融温度が 1450~1500°Cを超えると急激に悪くなるため<sup>6)</sup>、耐食性の高いものを使用することが重要である。雑固体溶融固化体製作装置では 1600°C以上の高温で雑固体廃棄物を溶融するので、スラグに対する耐食性が重要となってくる。このため、溶融時の耐火れんがのスラグによる侵食性とスラグの浸透性について検討した。耐火物には特徴の異なる種々のものがあるが、その耐食性は耐火物の組成・形状、スラグの塩基度・成分、使用条件等に大きく影響される<sup>7)</sup>。このため、模擬廃棄物の性状及び溶融条件から、溶融炉耐火物の候補を 7 種類選択し、それらについて耐食性試験を行い、その結果をもとに耐火物を選定・施工して、模擬雑固体廃棄物を溶融し、耐食性の確認を行った。

### 4.1. 耐火物の耐食性試験

本装置を用いて模擬雑固体廃棄物の溶融試験を行う場合には、高周波誘導加熱とプラズマ加熱を併用したハイブリッド方式を用いて、大気雰囲気下で約 6 時間の運転が見込まれる。溶融する

模擬廃棄物は原子力発電所から出る固体状廃棄物を模擬したものでコンクリート・ガラス・ケイ酸カルシウムで構成される。この場合のスラグの塩基度は0.2~0.8程度と推定されるので、低塩基度のスラグに対して耐食性が高いアルミナ系の耐火物を中心に、7種類の耐火物を選定した。

耐食性試験は誘導炉内張り侵食試験及び回転侵食試験の2種類の方法で行った<sup>8)</sup>。それぞれの侵食試験で用いた炉の概略をFig.11に示した。侵食試験用の耐火物はれんがに成型して炉の内壁に用いた。バック材として不定形のスタンプ材を使用した。誘導炉内張り侵食試験では、銑鉄11kgを偏芯回転している高周波誘導炉で溶融し、銑鉄が完全に溶解した後、侵食剤（塩基度0.2）200gを1時間毎に2回投入した。溶融は1600~1650°Cで2時間行った。回転侵食試験では、侵食剤として塩基度0.2のモルタルと川砂を入れ、炉を回転しながらバーナーで炉内部を加熱昇温した。1700~1750°Cで40分間保持した後、1300°Cまで降温し、侵食剤1kgを追加投入後、再び1700~1750°Cまで昇温し、40分間保持した。これをさらに8回繰り返し行った。試験条件をTable 4に示す。

侵食性は試験前後のれんがの厚みを測定することにより評価した。浸透性は、れんが断面を目視により確認して行った。耐食性試験の結果をTable 5に示す。耐侵食性が優っていたのはZrO<sub>2</sub>系れんがとAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·ZrO<sub>2</sub>系れんがであったが、ZrO<sub>2</sub>系れんがは亀裂によるスラグの浸透が認められたため、耐侵食性・耐浸透性共に良好であったAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·ZrO<sub>2</sub>系れんがを炉壁材として使用することとした。

#### 4.2. 模擬雑固体廃棄物の溶融による耐食性確認試験

耐食性試験により、選定したAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·ZrO<sub>2</sub>系れんがを本装置に施工して、模擬雑固体廃棄物の溶融を行い、スラグによる侵食性及びスラグの浸透性を評価した。また、炉底は常時金属に接触しているのでスラグに対する耐食性は考慮しなくてもよいことから、一般に金属溶融で使用されているAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·MgO系のスタンプ材を使用した。試験条件をTable 6に示す。模擬雑固体廃棄物をハイブリッド加熱方式により溶融し、溶湯を出湯した後、炉内直径の変化をスラグ層接触部、金属層接触部、金属層接触下部で測定することによりスラグ侵食性を評価した。溶融は6回行った。溶融終了後、各測定部位よりサンプルを切り出しエネルギー分散型X線分析(EDX)を行った。

スラグ侵食性の測定結果をFig.12に示す。横軸は溶融の回数を示し、縦軸は溶融後の炉内表面について、初期表面からの変化の大きさを示している。また、炉の口から底面までの深さの変化も併せて示した。金属接触部は溶融毎に数ミリずつ侵食が起きていることが分かる。6回の溶融後は16mmの侵食が生じていた。特に、底面に近い金属層接触下部では23mmの侵食が認められた。一方、スラグ接触部では炉内直径は減少する傾向が見られたが、これはスラグが付着して残っているためと考えられ、侵食は認められなかった。このことから、塩基度の低いスラグに対してはAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·ZrO<sub>2</sub>系耐火物の耐食性がきわめて高いことがわかった。また炉の深さはほとんど変化がないことから、炉底に用いたAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·MgO系のスタンプ材は金属溶融に適していることが確認された。

6回の溶融試験終了後に各測定部位よりサンプルを切り出し、EDX分析を行った結果をFig.13(スラグ接触部)とFig.14(金属接触部)に示す。縦軸はスラグ成分のひとつであるカルシウム

(Ca)、耐火物成分のアルミニウム・クロム・ジルコニウム (Al+Cr+Zr)、及び金属成分である鉄 (Fe) の相対濃度を示している。横軸の原点は溶融終了後の表面の位置である。スラグ接触部では、表面から約 3mm 付近までは Ca と Al+Cr+Zr がそれぞれ十数%存在しているが、Ca は表面から 4mm 付近でほとんど検出されなくなり、逆に Al+Cr+Zr は表面から 4mm 以上で約 60% と一定になった。このことから、スラグ接触部では耐火物表面にスラグが付着しており、表面から約 4mm の位置が耐火物表面と付着スラグ層との界面に相当するものと考えられる。この界面の位置は、耐食性試験前のれんがの厚さから求めた初期表面の位置とほぼ一致しており、スラグによる耐火物の侵食はほとんどないことが分かる。また、表面から 4mm 以降では Ca と Fe が検出されないことから、耐火物へのスラグの浸透もないことが分かった。3~4mm 付近にある Fe の小さいピークは金属成分が出湯時に付着したものと考えられる。

一方、金属接触部でも、表面から 2mm 程度まで約 2% の Fe 及び約 20% の Ca が検出され、スラグ及び金属の付着が観測された。表面から 3mm 付近で Al+Cr+Zr がほぼ耐火物組成になり、この位置が耐火物表面と付着スラグ層との界面に相当するものと考えられる。この界面の位置は、耐食性試験前のれんがの厚さから求めた初期表面の位置と比べると、約 27mm の侵食が起きたことを示している。また、約 8mm 付近まで Fe と Ca がわずかに観測されたことから、耐火物へのスラグと金属の浸透も起こっていることが分かった。

以上の結果から、 $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3 \cdot \text{ZrO}_2$  系耐火物は塩基度の低いスラグに対して耐食性がきわめて高く、雑固体溶融固化体製作装置に用いる耐火物として十分な性能を有していることが分かった。

## 5. まとめ

雑固体廃棄物を溶融処理し、溶融固化体を製作するための雑固体溶融固化体製作装置を製作した。本装置は高周波誘導炉とプラズマ加熱装置を組み合わせた溶融装置と、有害ガス放出抑制のための排ガス処理装置から構成されている。金属、コンクリート等を組み合わせた模擬雑固体廃棄物の溶融試験を行い、本装置の性能確認を行った。試作した溶融固化体は強度を損なうような有害な空隙もなく、溶融炉の機能は十分に満足すべきものであった。また、溶融に伴って発生する放射性のダストやヒューム、及び CO ガス、ダイオキシン等の有害ガスの放出を基準値以下に抑制することができ、排ガス処理装置が十分に機能を果たしていることを確認した。また、各種耐火物の中から選定した  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3 \cdot \text{ZrO}_2$  系耐火れんがの耐食性試験を行い、塩基度の低いスラグに対して耐食性がきわめて高いことを明らかにした。れんがの耐久性は二次廃棄物の低減のために重要である。

今後、雑固体溶融固化体製作装置を用いることにより、核種閉じこめ性に優れた安定な溶融固化体を製作するための溶融条件の最適化試験を行い、低レベル放射性廃棄物の溶融処理装置による減容安定化処理の技術開発に資することができる。

## 謝辞

本報告をまとめるにあたって、雑固体溶融固化体製作装置の設計、製作及びデータ収集等において、御協力を頂きました廃棄物処理技術試験室の各氏に感謝いたします。

## 参考文献

- 1) 原子力委員会編：原子力白書(平成 10 年度版), P.233 (1998).
- 2) 東 康雄：溶融塩および高温化学, 39(3), 213 (1996).
- 3) 山崎 誠一郎,他：火力原子力発電, 50(11), 34 (1999).
- 4) 安井 晋示,他：日本原子力学会誌, 41(1), 39 (1999).
- 5) プラズマ材料科学ハンドブック：日本学術振興会, プラズマ材料科学, 第 153 委員会(1992).
- 6) 鋳鉄溶解ハンドブック：日本鋳物協会編, 丸善, (1983).
- 7) 耐火物技術協会編：耐火物手帳, P.2 (1999).
- 8) 耐火物技術協会編：耐火物手帳, P.59 (1999).

Table 1 Measuring Items of Monitoring Instruments

Measuring Items		Range of Measurement
Inverter	Output voltage	0~1000V
	Output current	0~700A
	Input power	0~500kw
Thyristor Inverter	Outlet temperature of cooling water	0~100°C
Furnace	Outlet temperature of cooling water	0~100°C
	Bottom refractory temperature	0~1200°C
	Bottom refractory temperature	0~600°C
	Furnace atmospheric temperature	0~1200°C
	Off gas temperature	0~1200°C
	Off gas flow rate	0~500Nm <sup>3</sup> /h
	Off gas pressure	-500~0 mmAq
	Concentration of CO (high)	0~30%
	Concentration of O <sub>2</sub>	0~25%
	Concentration of CO (low)	0~5000ppm
	Concentration of CO <sub>2</sub>	0~20%
	Atmospheric temperature (outside)	0~50°C
Furnace chamber	Atmospheric temperature (inside)	0~100°C
	Off gas flow rate (duct)	0~10000Nm <sup>3</sup> /h
	Pressure (duct)	-1500~0 mmAq
Plasma	Output voltage of electric power unit	0~400V
	Output current of electric power unit	0~600A
Plasma torch	Ar gas flow rate	0~500NL/m
	N <sub>2</sub> gas flow rate	0~500NL/m
	Inlet flow rate of cooling water	0~200L/m
	Inlet temperature of cooling water	0~100°C
	Outlet temperature of cooling water (cathode)	0~100°C
	Outlet temperature of cooling water (anode)	0~100°C
	Distance of Insertion	-600~500mm

Table 1 (Continued)

Measuring Items		Range of Measurement
Secondary combustion chamber	Outlet gas temperature	0~1300°C
	Propane gas flow rate	0~12m <sup>3</sup> /h
	Air flow rate	0~300m <sup>3</sup> /h
Gas cooler	Outlet gas temperature	0~400°C
	Flow rate of spray	0~300L/h
	Outlet flow rate of cooling water	0~30m <sup>3</sup> /h
Ceramic filter	Differential pressure	0~1000 mmAq
	Outlet gas pressure	-1000~0 mmAq
Ceramic filter	surface dose equivalent	0~100 μSv/h
HEPA filter	Inlet gas temperature	0~400°C
	Differential pressure	0~200 mmAq
	Differential pressure	0~100 mmAq
	Outlet gas temperature	0~100°C
Gas scrubber	Outlet gas temperature	0~400°C
	Level of NaOH solution	0~1000mm
Reheater	Outlet gas temperature	0~300°C
	Outlet gas flow rate	0~800Nm <sup>3</sup> /h
Bag filter	Outlet gas temperature	0~100°C
	Differential pressure	0~180 mmAq
	surface dose equivalent	0~10 μSv/h
Blower	Gas flow rete (outlet)	0~12000Nm <sup>3</sup> /h
	Gas temperature (outlet)	0~100°C
	Gas pressure (outlet)	0~300 mmAq
Ceramic filter(inlet) HEPA filter (inlet) Reheater (outlet)	Concentration of CO	0~5000ppm
	Concentration of CO <sub>2</sub>	0~20%
	Concentration of O <sub>2</sub>	0~25%
	Concentration of NOx	0~10000ppm
	Concentration of SOx	0~200ppm
	Concentration of HCl	0~5000ppm

Table 2 Melting condition of miscellaneous solid wastes

	Heating method	
	Induction heating	Hybrid
Composition of simulated solid wastes (wt%)		
Carbon steel pipes	73	72
Stainless bolt and nuts	2	2
Aluminum sheet	2	2
Copper wires	2	3
Concrete	3	3
Calcium silicate heat insulator	8	8
Glass	10	10
Weight of deoxidizer (Fe-Si) ≈ 1	—	2kg
Total weight of wastes (kg)	118.85	132.87
Resistance welding time (min)	247	274
Temperature holding time (min) ≈ 2	128	73
Holding temperature	Average 1500°C (outside the crucible) Maximum 1658°C (molten)	Average 1610°C (molten) Maximum 1667°C (molten)

※ 1 Deoxidizer is not included

※ 2 The period from injection stable tracers electric power off

Table 3 Concentrations of CO and dioxin in exhaust gas

Sampling point	Concentrations	
	Dioxin (ng·TEQ/Nm <sup>3</sup> )	CO (ppm)
Outlet of the furnace	1800	933
Outlet of the HEPA filter	0.019	0.3

Toxic equivalents : 2,3,7,8-T4CDD Toxic equivalents(ng·TEQ/ Nm<sup>3</sup>)

Table 4 Condition of corrosion test

	Rotary corrosion test	induction furnace test
Device	Oxygen-propane heating rotary furnace	Off-center rotary furnace with induction heating
Material	—	Pig iron 11kg
Corrosive	Mortar + river gravel (1kg/1h) [CaO/SiO <sub>2</sub> =0.2]	Mortar + river gravel (200g/1h) [CaO/SiO <sub>2</sub> =0.2]
Temperature	1700~1750°C	1600~1650°C
Duration	40min(Keep)×10 step	120min
Rotation speed	4rpm (drum)	40rpm(off-center)

Table 5 Comparison of corrosion and osmosis resistance  
of seven refractory bricks

Refractories(brick)	Corrosion	Osmosis
SiC	✗(oxidation)	○
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - SiC	△(metal Corrosion)	○
ZrO <sub>2</sub>	◎	△(cracks)
MgO · Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	○	✗
MgO · Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	✗	✗
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · ZrO <sub>2</sub>	◎	○
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	○	✗

Mark ◎ : Excellent    ○ : Good    △ : Not good    ✗ : Bad

Table 6 Condition of melting test for confirming corrosion resistance of  
Al-Cr-Zr type refractory bricks

	Condition
Number of test	6 step
Simulated solid waste	Metal(75wt%) : carbon steel, stainless steel , copper wire , aluminum sheet Non-metal(25wt%) : concrete,glass, calcium silicate heat insulator
Heating mode	Hybrid
Duration	4.2~6 hours/test
Temperature	Average 1600°C (Maximum 1720°C)
Slag basicity	CaO/SiO <sub>2</sub> =0.3~0.5

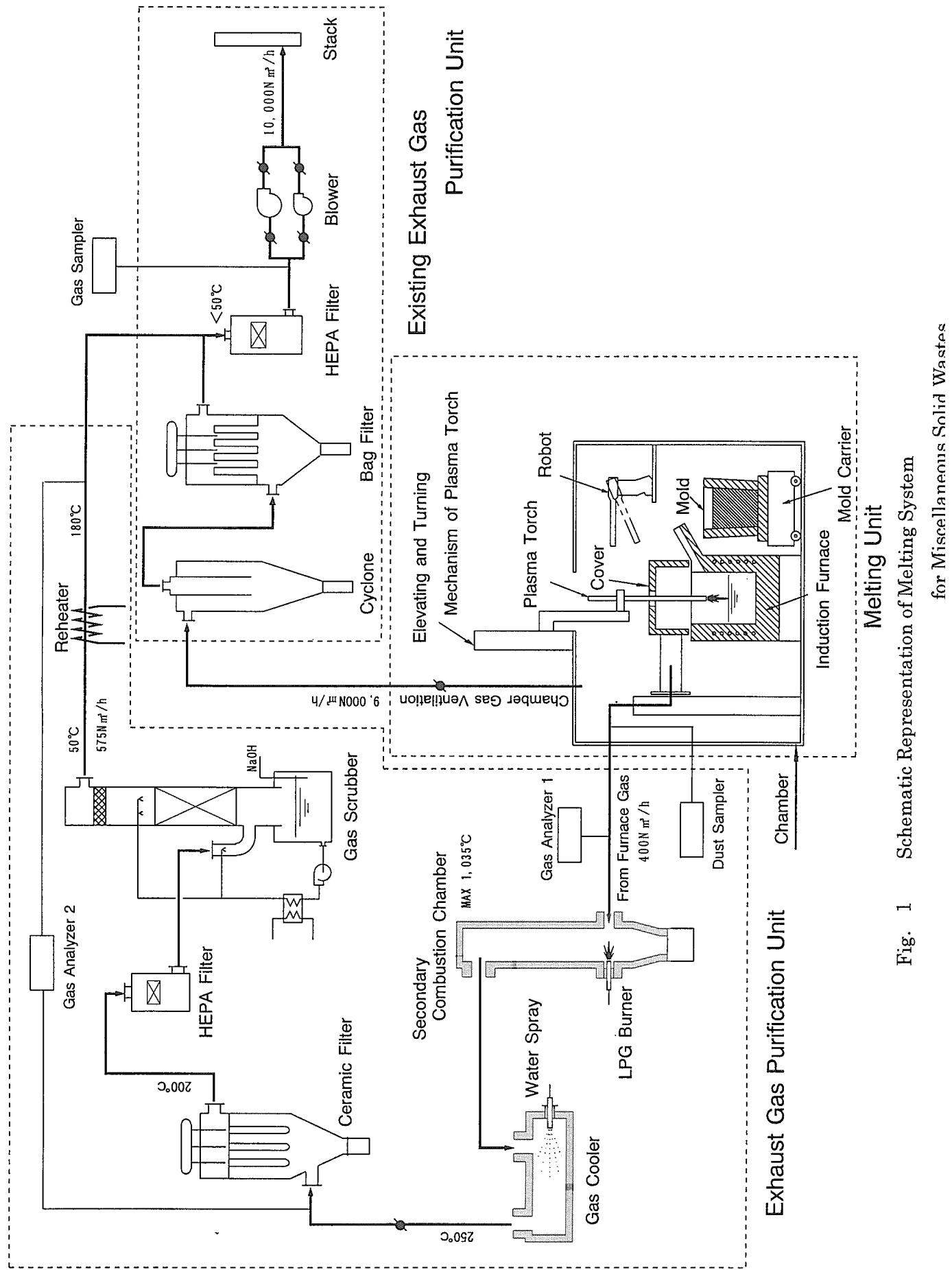


Fig. 1 Schematic Representation of Melting System  
for Miscellaneous Solid Wastes

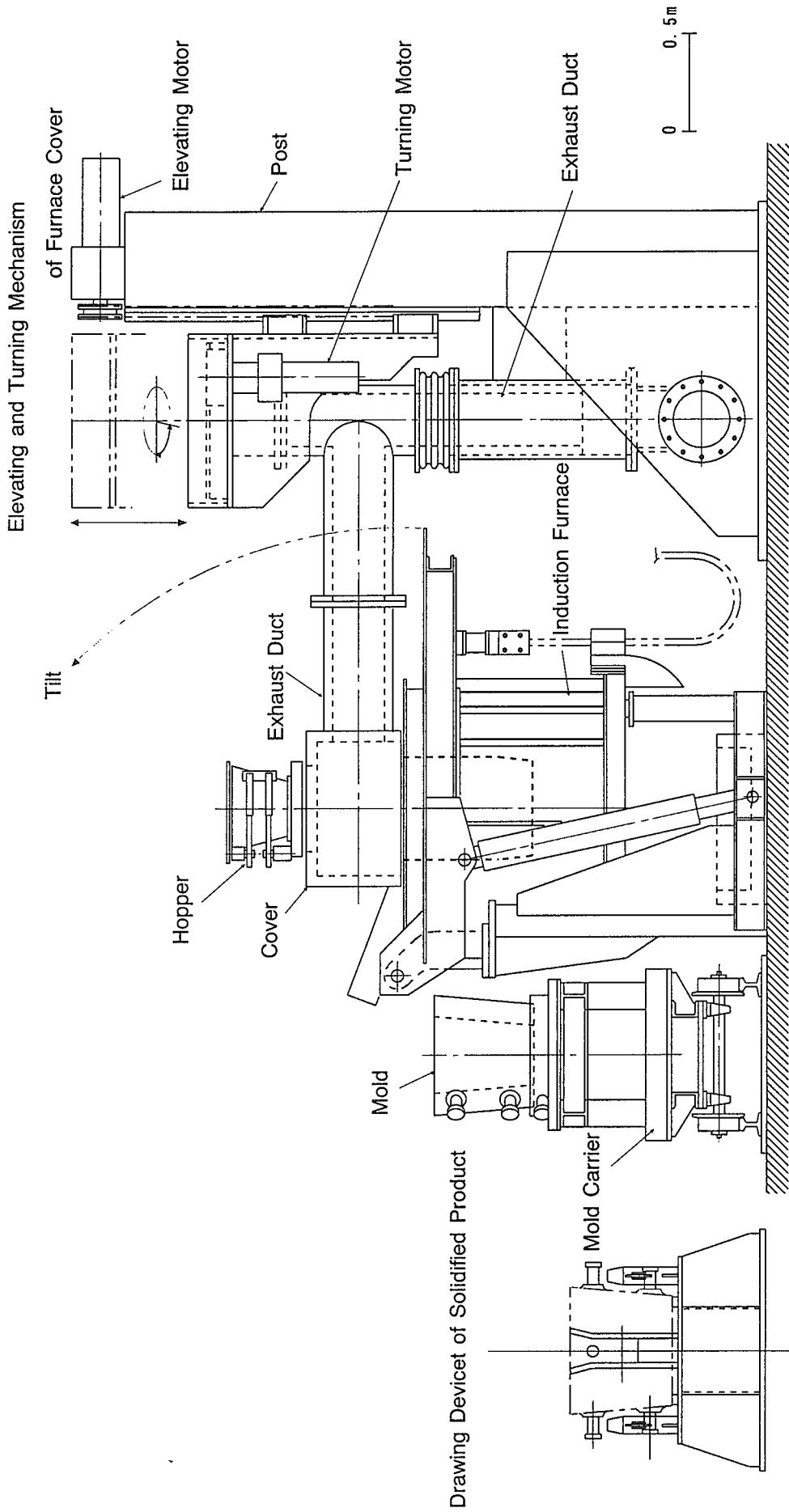


Fig. 2 Melting Unit (Induction Furnace)

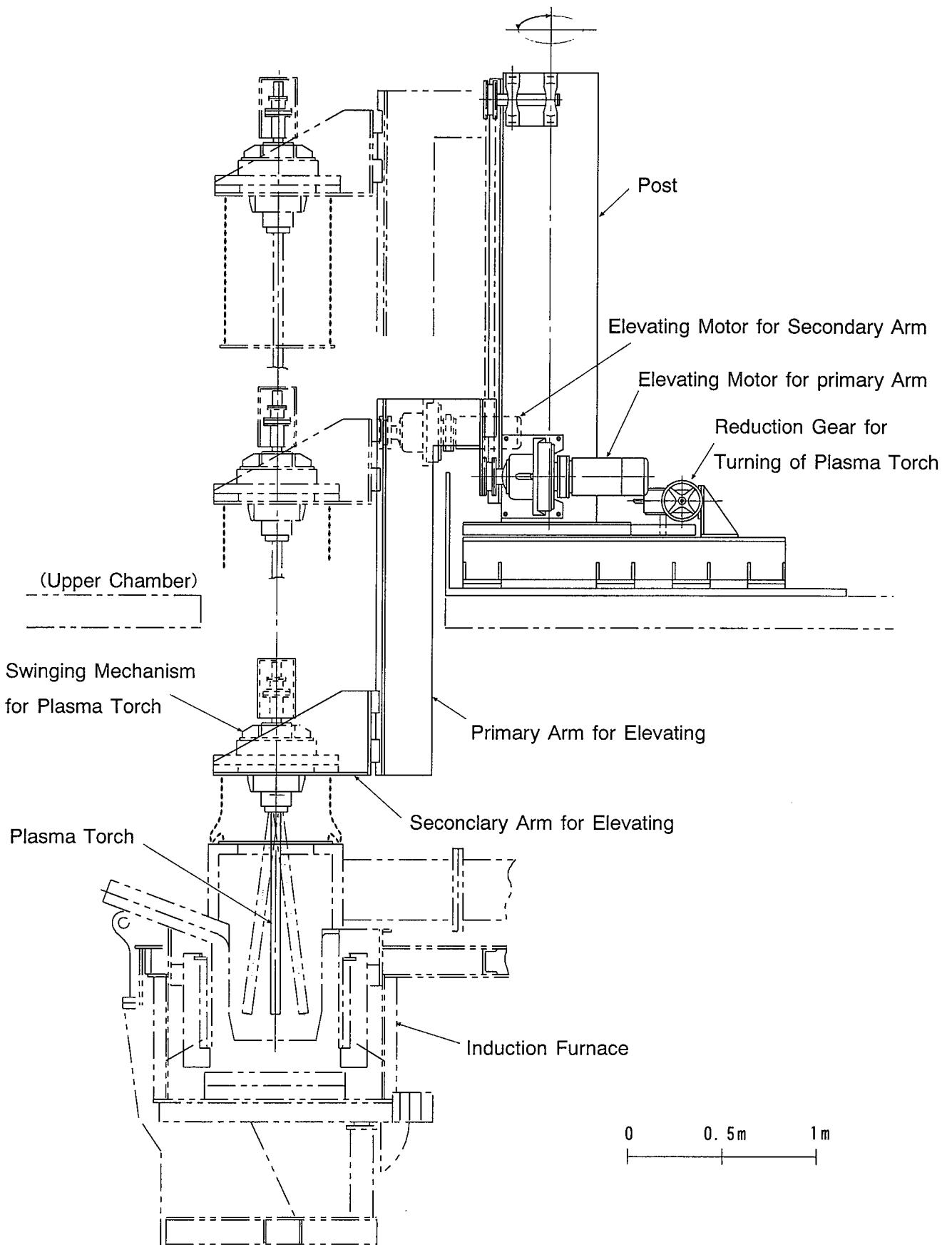


Fig. 3 Melting Unit (Plasma Torch)

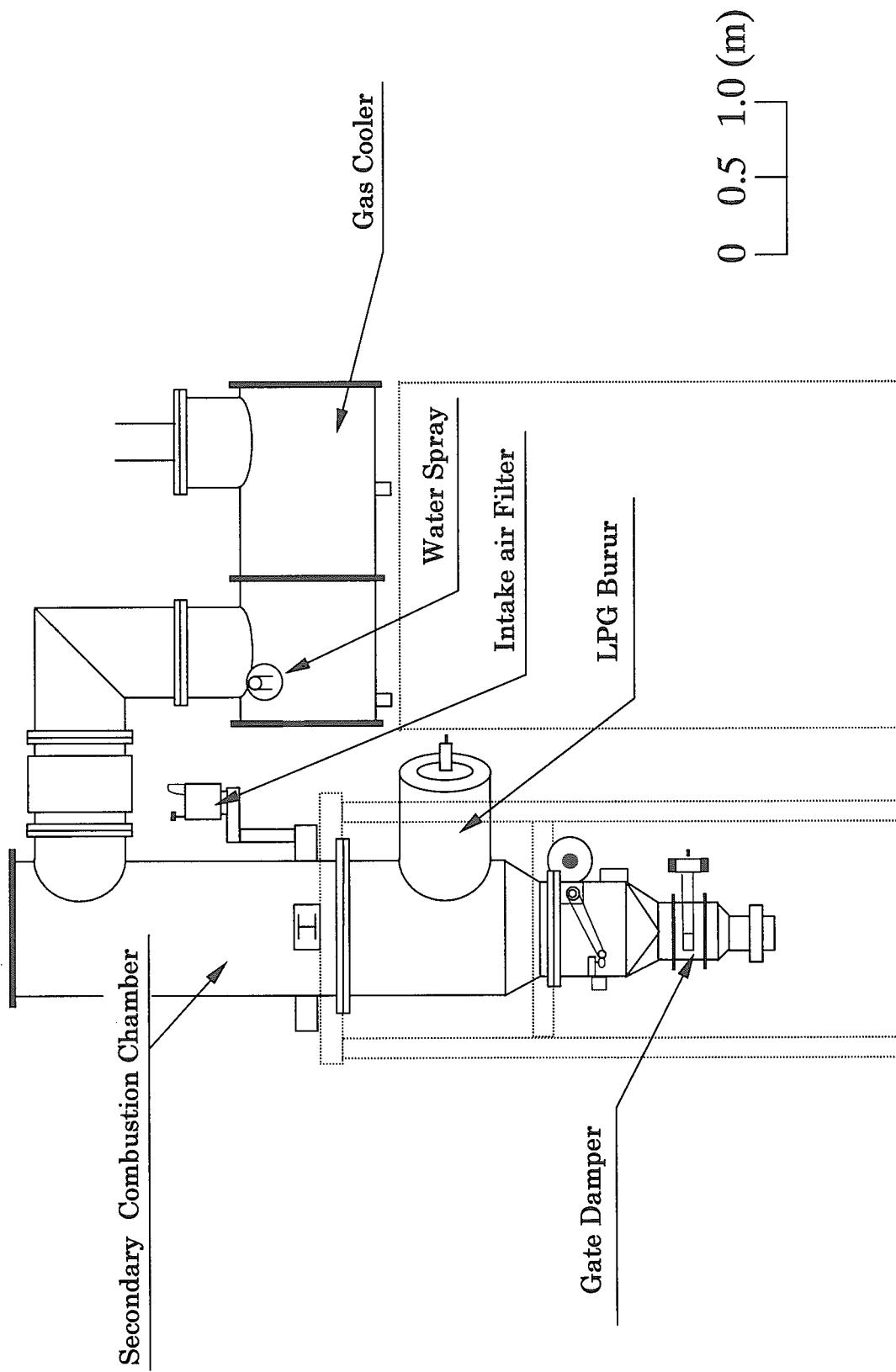


Fig. 4 Exhaust Gas Purification Unit  
(Secondary Combustion Chamber, Gas Cooler)

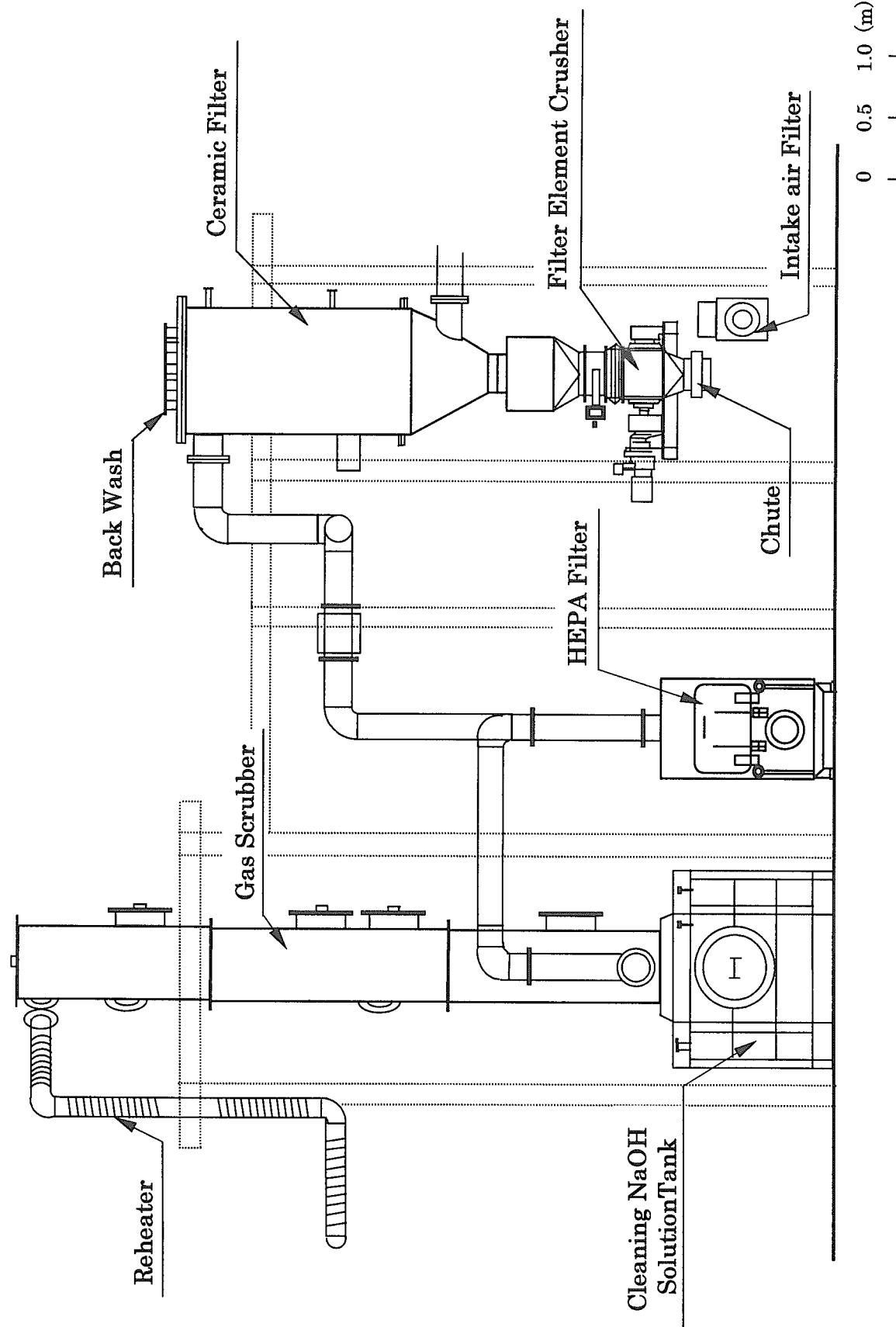


Fig. 5 Exhaust Gas Purification Unit  
(Ceramic Filter,HEPA Filter,Gas Scrubber,Reheater)

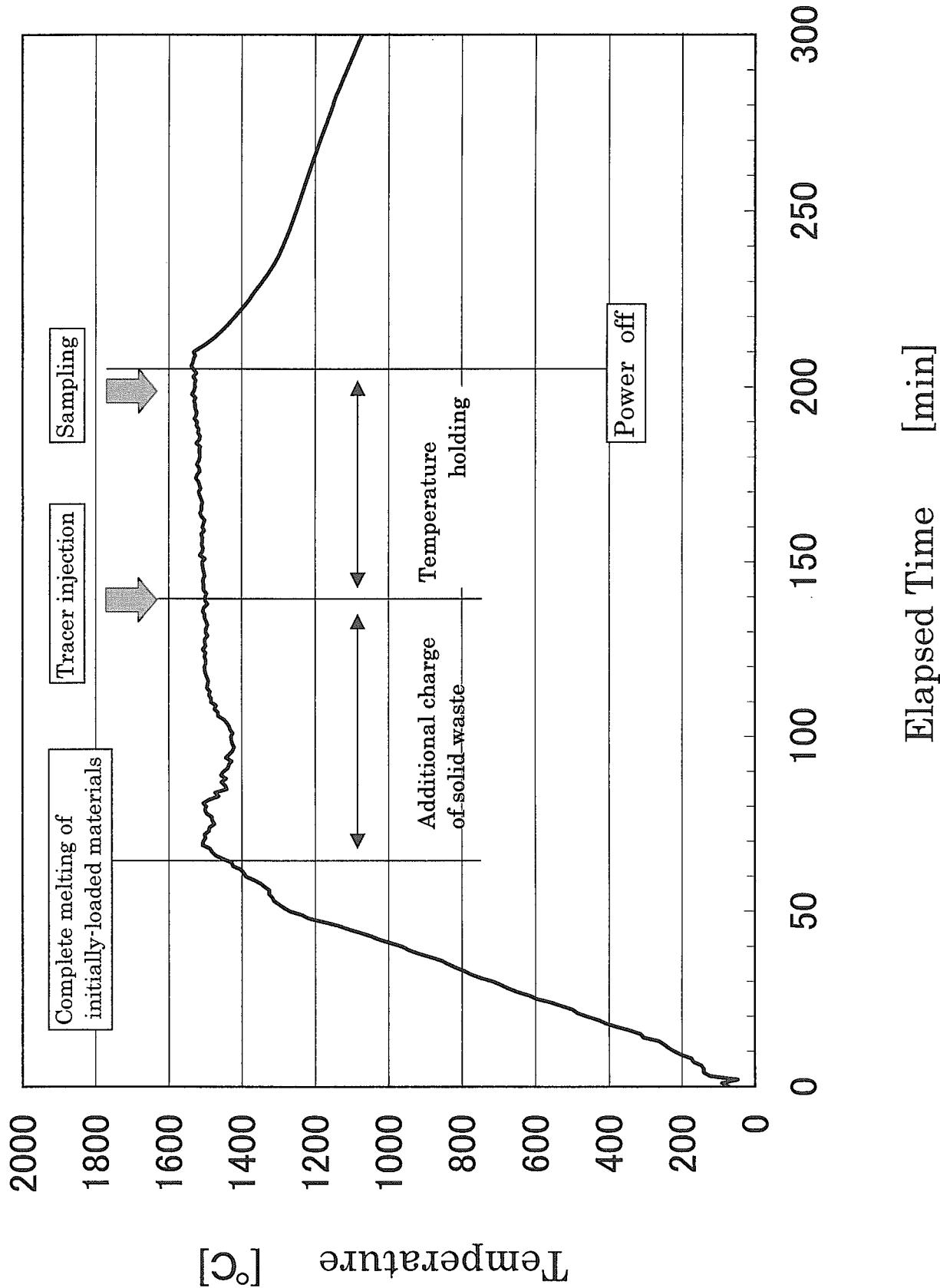


Fig. 6 Heating Curve in Induction heating mode

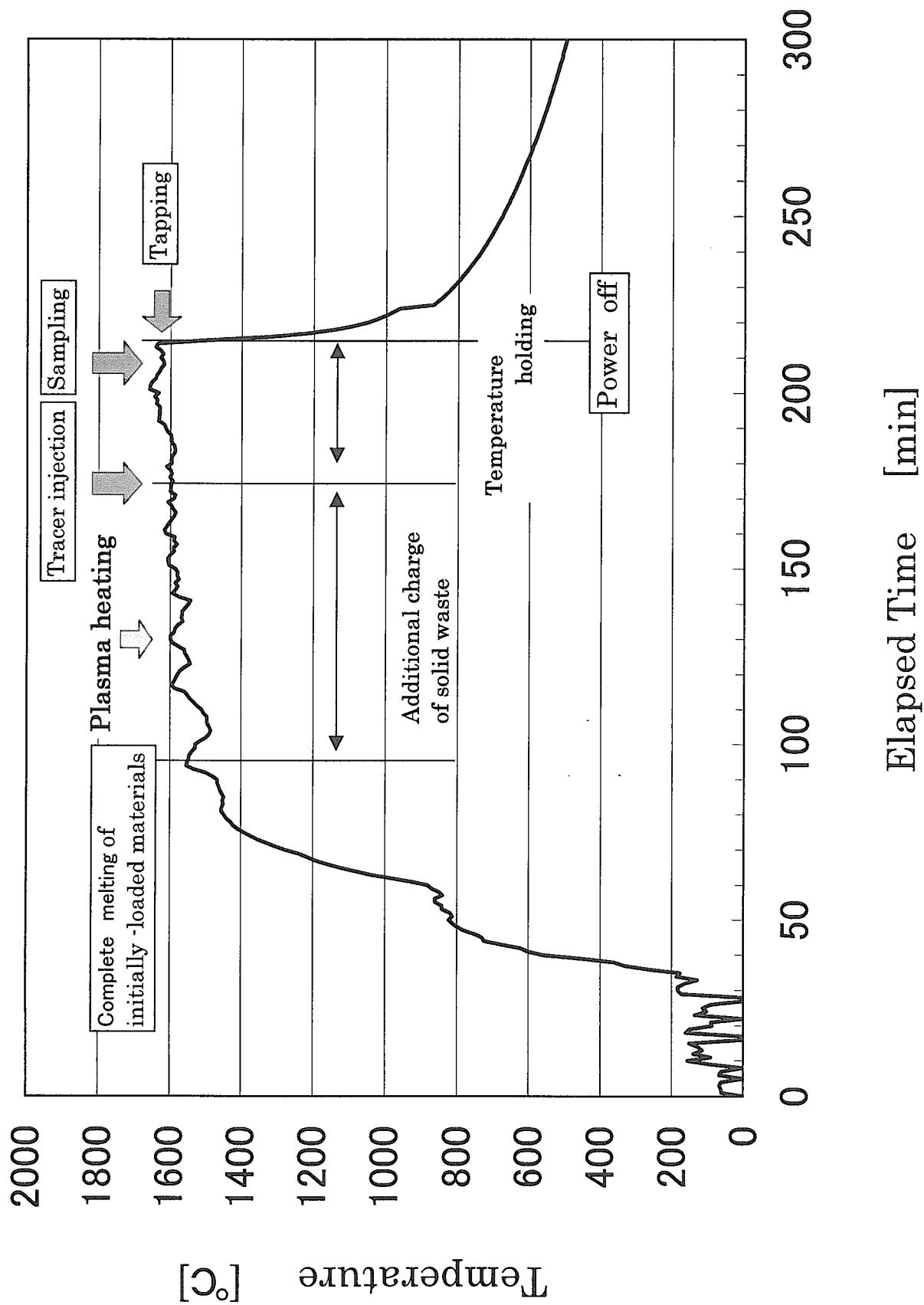
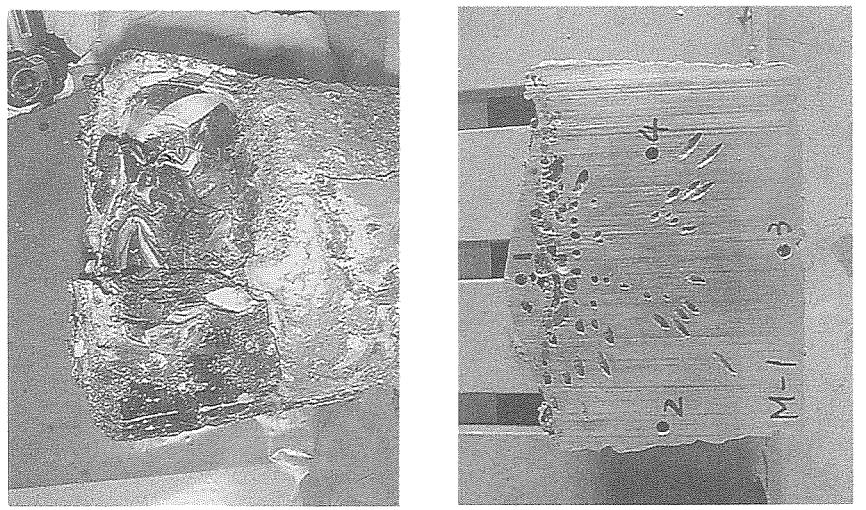


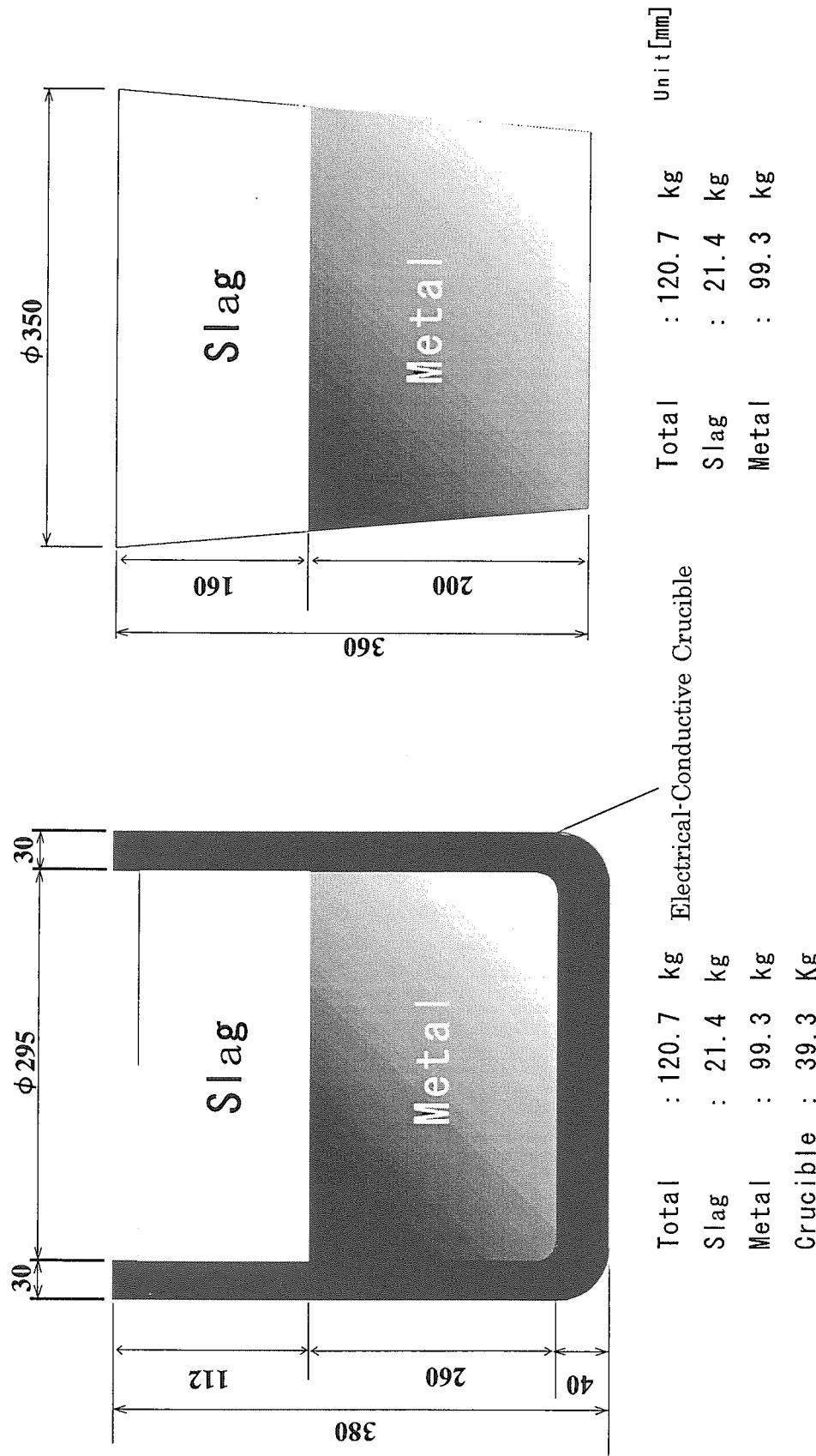
Fig. 7 Heating Curve in Hybrid heating mode



Hybrid mode

Induction heating mode

Fig. 8 Sectional View of solidified Product



Induction Heating mode

Hybrid mode

Fig. 9 Size and Weight of solidified Product

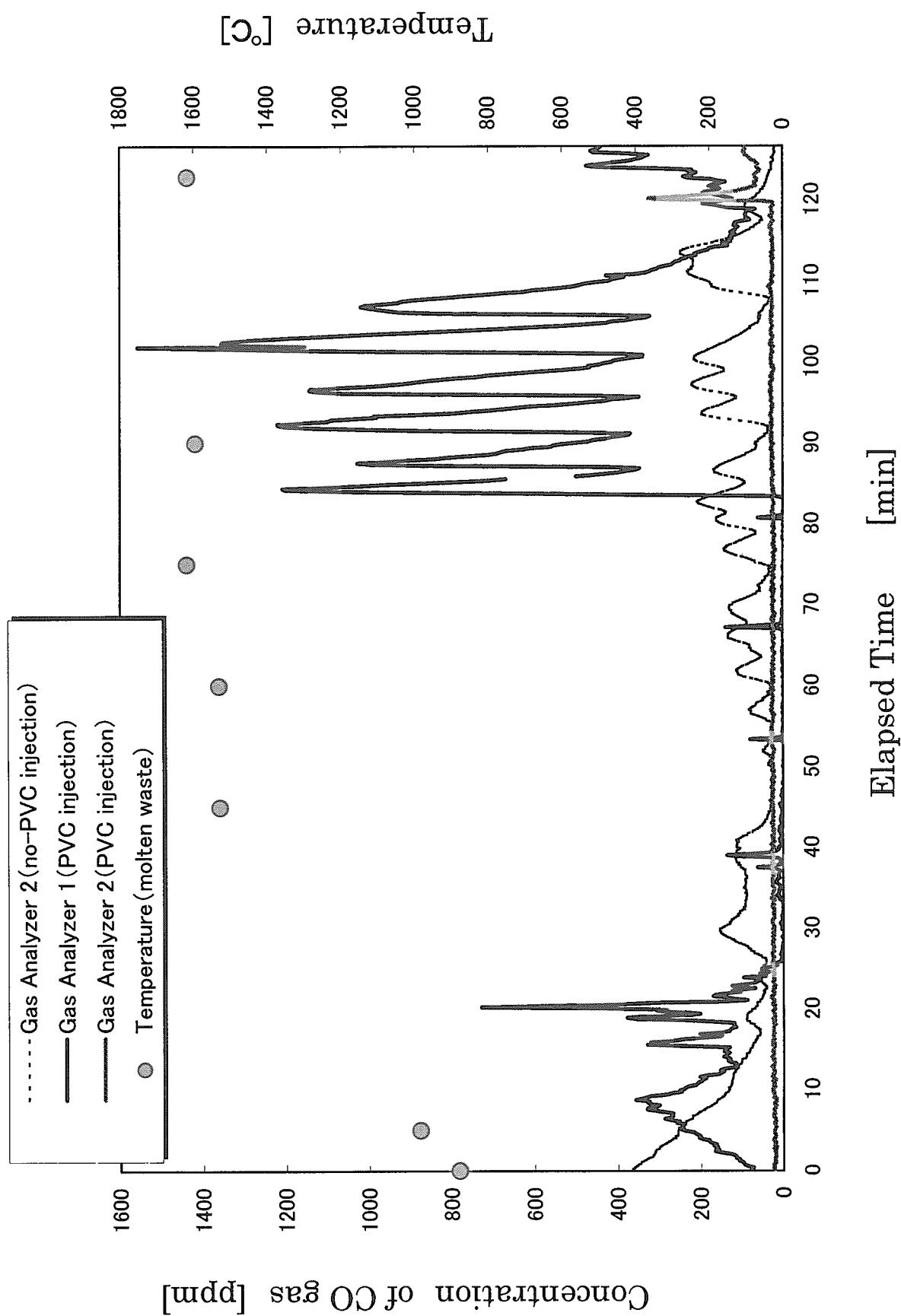


Fig. 10 Monitoring of Concentrations of CO gas Produced in Melting of PVC tube

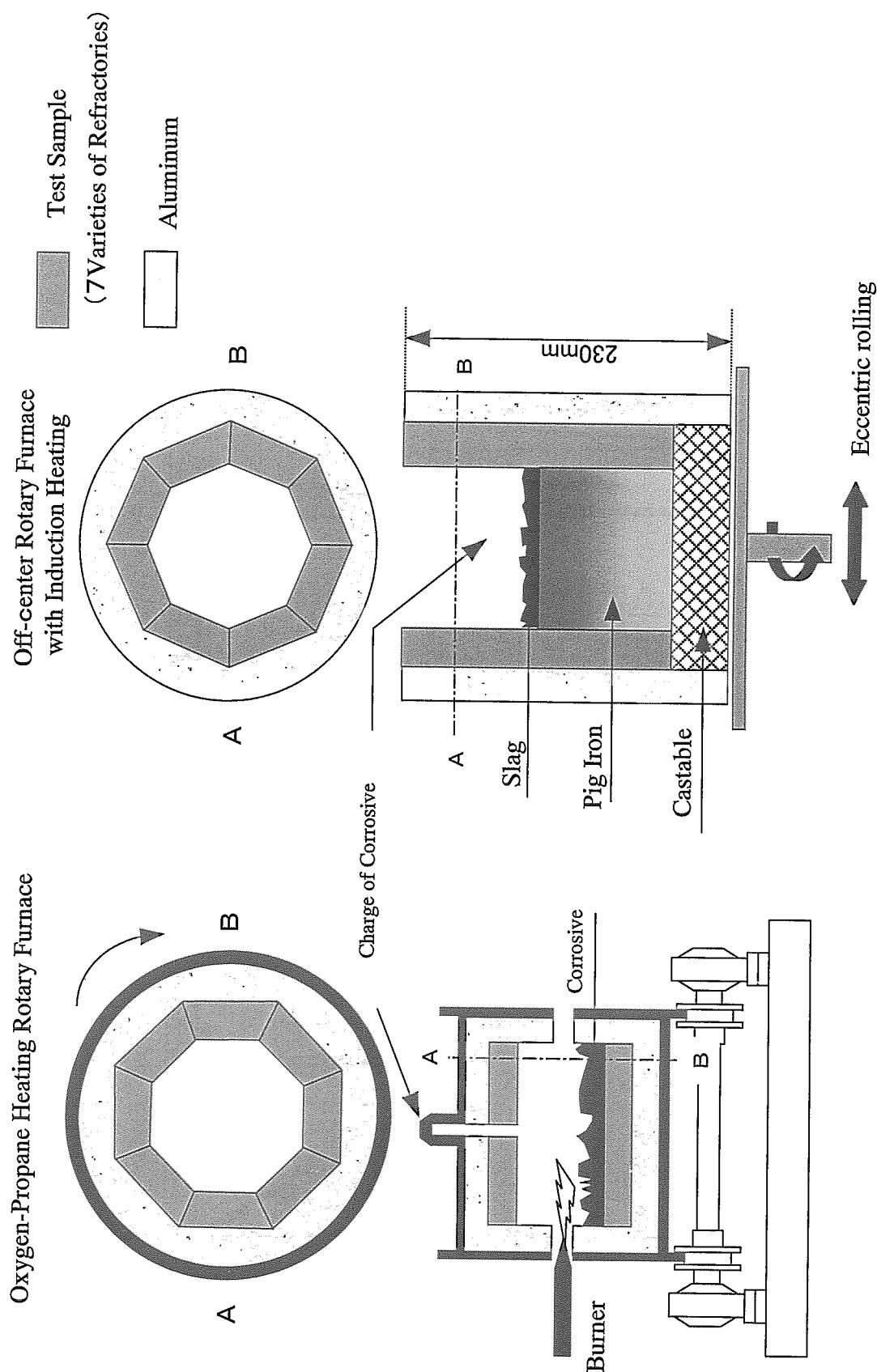


Fig. 11 Principle of Corrosion Test Apparatus

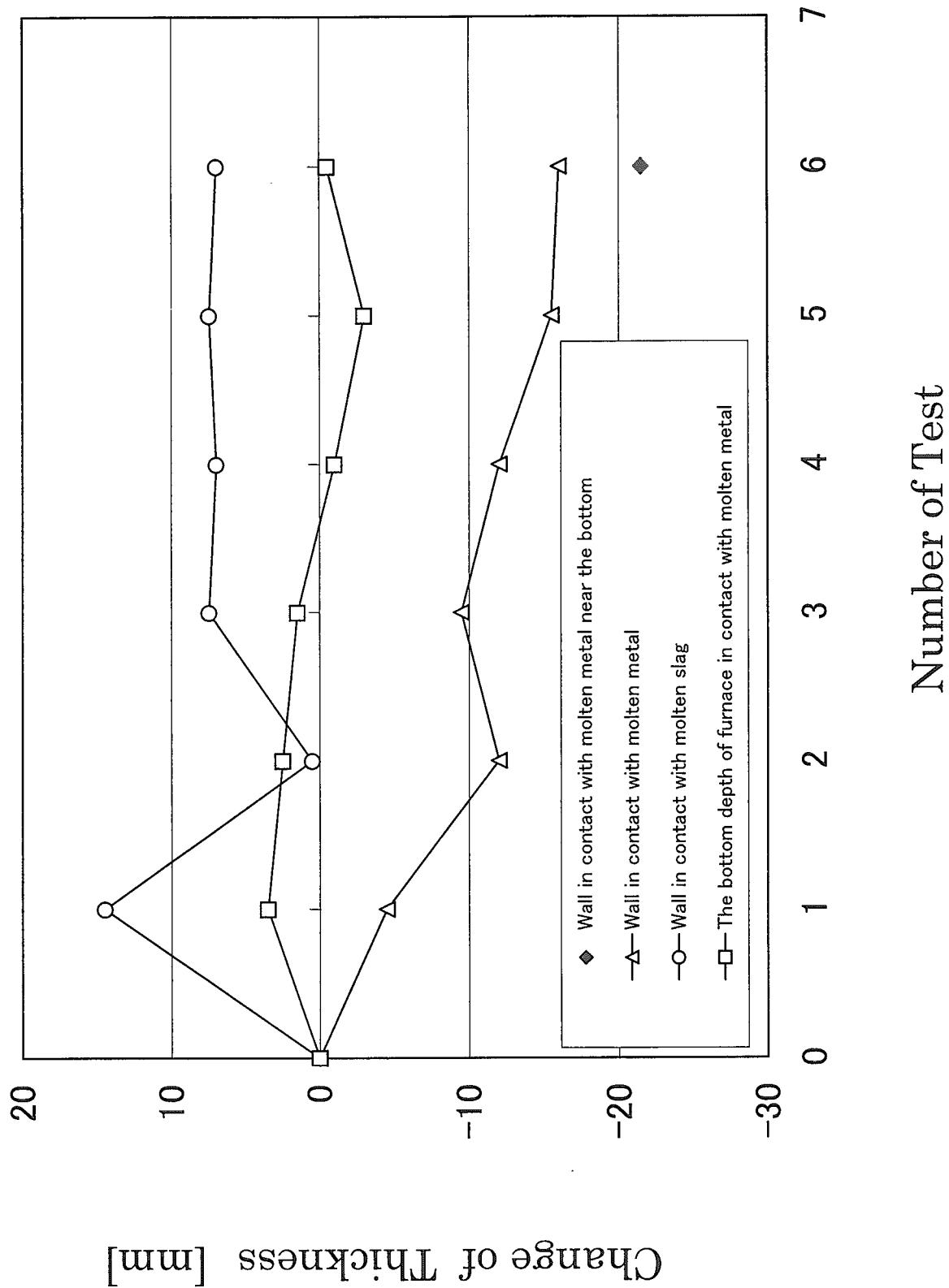


Fig. 12 Change of Thickness of Refractory Bricks after Corrosion Test

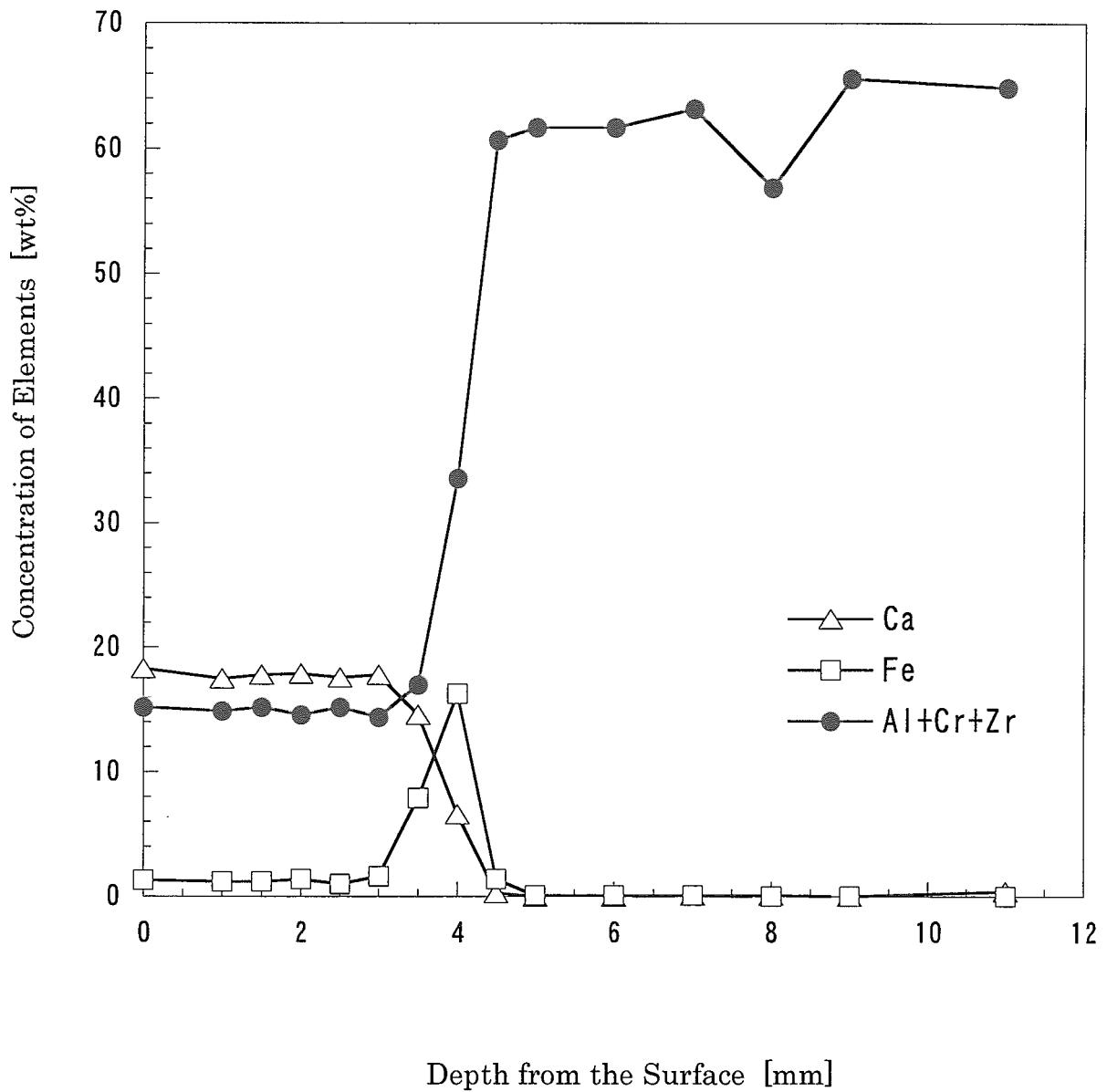


Fig. 13 Depth Profile of Ca,Fe and Al+Cr+Zr by EDX Analysis  
in Refractory Brick Sample Corroded by Molten Slag

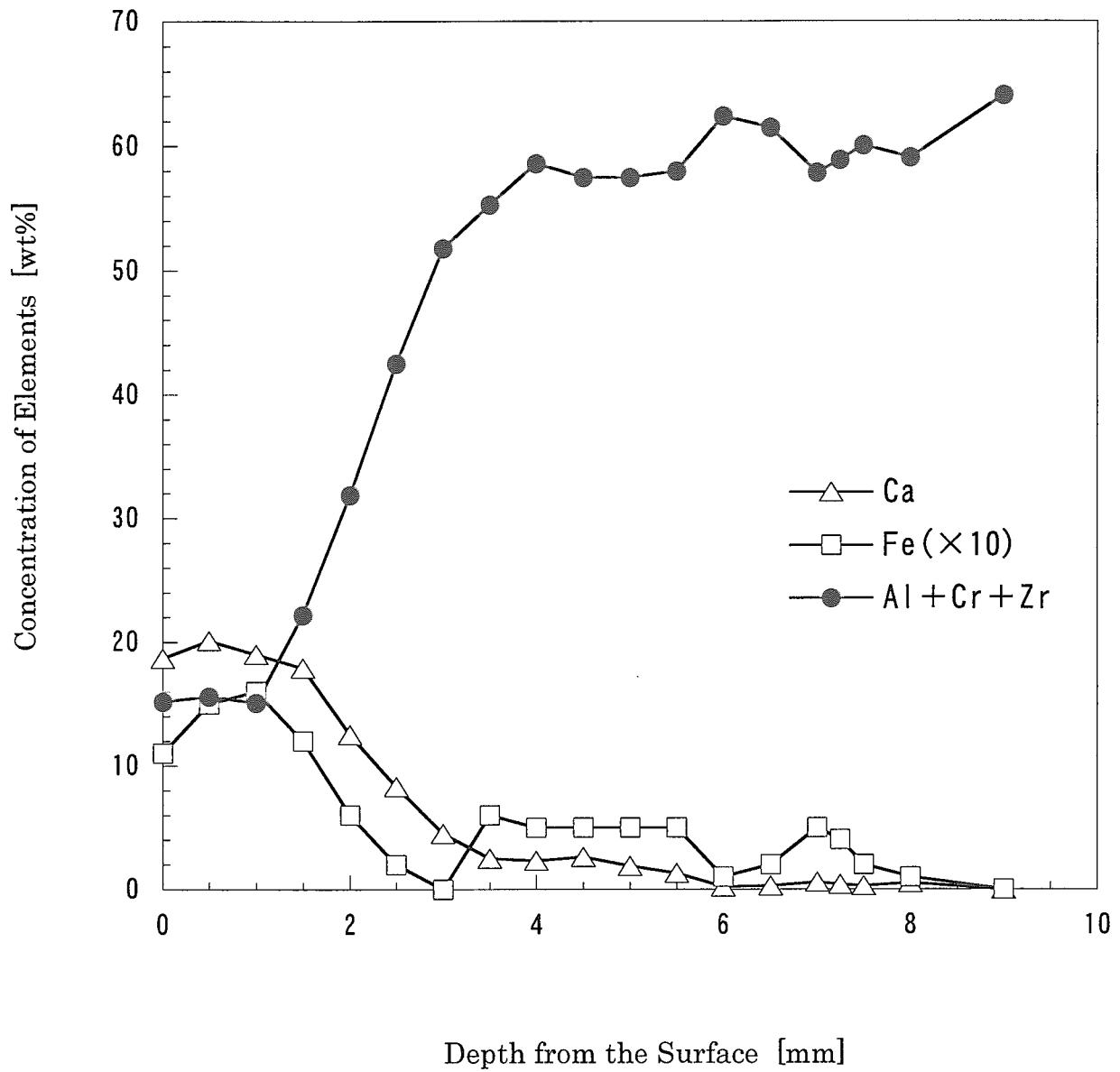


Fig. 14 Depth Profile of Ca, Fe and Al+Cr+Zr by EDX Analysis  
in Refractory Brick Sample Corroded by Molten Metal

This is a blank page.

## 国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s <sup>-1</sup>
圧力、応力	ニュートン	N	m·kg/s <sup>2</sup>
エネルギー、仕事、熱量	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>
工率、放射束	ジュール	J	N·m
電気量、電荷	ワット	W	J/s
電位、電圧、起電力	クロン	C	A·s
静電容量	ボルト	V	W/A
電気抵抗	ファラード	F	C/V
コンダクタンス	オーム	Ω	V/A
磁束	アンペア	A	A/V
磁束密度	ウェーバー	Wb	V·s
インダクタンス	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>
セルシウス温度	ヘンリー	H	Wb/A
光束度	セルシウス度	°C	
照度	ルーメン	lm	cd·sr
放熱能	ルクス	lx	lm/m <sup>2</sup>
吸収線量	ベクレル	Bq	s <sup>-1</sup>
線量当量	グレイ	Gy	J/kg
	シベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名 称	記 号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ′, ″
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 <sup>18</sup>	エクサ	E
10 <sup>15</sup>	ペタ	P
10 <sup>12</sup>	テラ	T
10 <sup>9</sup>	ギガ	G
10 <sup>6</sup>	メガ	M
10 <sup>3</sup>	キロ	k
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h
10 <sup>1</sup>	デカ	da
10 <sup>-1</sup>	デシ	d
10 <sup>-2</sup>	センチ	c
10 <sup>-3</sup>	ミリ	m
10 <sup>-6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>-9</sup>	ナノ	n
10 <sup>-12</sup>	ピコ	p
10 <sup>-15</sup>	フェムト	f
10 <sup>-18</sup>	アト	a

(注)

- 表1~5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクトアルも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC閣僚理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名 称	記 号
オングストローム	Å
バーン	b
バール	bar
ガル	Gal
キュリ	Ci
レンントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

$$1 \text{ Å} = 0.1 \text{ nm} = 10^{-10} \text{ m}$$

$$1 \text{ b} = 100 \text{ fm}^2 = 10^{-28} \text{ m}^2$$

$$1 \text{ bar} = 0.1 \text{ MPa} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm/s}^2 = 10^{-2} \text{ m/s}^2$$

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

$$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$$

$$1 \text{ rad} = 1 \text{ cGy} = 10^{-2} \text{ Gy}$$

$$1 \text{ rem} = 1 \text{ cSv} = 10^{-2} \text{ Sv}$$

### 換 算 表

圧	MPa(=10 bar)	kgf/cm <sup>2</sup>	atm	mmHg(Torr)	lbf/in <sup>2</sup> (psi)
力	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322 × 10 <sup>-4</sup>	1.35951 × 10 <sup>-3</sup>	1.31579 × 10 <sup>-3</sup>	1	1.93368 × 10 <sup>-2</sup>
	6.89476 × 10 <sup>-3</sup>	7.03070 × 10 <sup>-2</sup>	6.80460 × 10 <sup>-2</sup>	51.7149	1

$$\text{粘度 } 1 \text{ Pa}\cdot\text{s} (\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2) = 10 \text{ P(ボアズ)} (\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s}))$$

$$\text{動粘度 } 1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St(ストークス)} (\text{cm}^2/\text{s})$$

エネ ル ギ ー ・ 仕 事 ・ 熱 量	J(=10 <sup>7</sup> erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft · lbf	eV	1 cal = 4.18605 J(計量法)	
								= 4.184 J (熱化学)	= 4.1855 J (15 °C)
	9.80665	1	2.72407 × 10 <sup>-6</sup>	2.34270	9.29487 × 10 <sup>-3</sup>	7.23301	6.12082 × 10 <sup>19</sup>	= 4.1868 J(国際蒸気表)	
	3.6 × 10 <sup>6</sup>	3.67098 × 10 <sup>5</sup>	1	8.59999 × 10 <sup>5</sup>	3412.13	2.65522 × 10 <sup>6</sup>	2.24694 × 10 <sup>25</sup>		
	4.18605	0.426858	1.16279 × 10 <sup>-6</sup>	1	3.96759 × 10 <sup>-3</sup>	3.08747	2.61272 × 10 <sup>19</sup>	仕事率 1 PS(仏馬力)	
	1055.06	107.586	2.93072 × 10 <sup>-4</sup>	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 <sup>21</sup>	= 75 kgf·m/s	
	1.35582	0.138255	3.76616 × 10 <sup>-7</sup>	0.323890	1.28506 × 10 <sup>-3</sup>	1	8.46233 × 10 <sup>18</sup>	= 735.499 W	
	1.60218 × 10 <sup>-19</sup>	1.63377 × 10 <sup>-20</sup>	4.45050 × 10 <sup>-26</sup>	3.82743 × 10 <sup>-20</sup>	1.51857 × 10 <sup>-22</sup>	1.18171 × 10 <sup>-19</sup>	1		

放 射 能	Bq	Ci	Gy	rad	C/kg	R	1 cal = 4.18605 J(計量法)	
							1	100
	1	2.70270 × 10 <sup>-11</sup>						
	3.7 × 10 <sup>-10</sup>	1	0.01	1	2.58 × 10 <sup>-4</sup>	1		

照 射 線 量	C/kg	R	1 cal = 4.18605 J(計量法)	
			1	3876

線 量 當 量	Sv	rem	1 cal = 4.18605 J(計量法)	
			1	100

