

本資料は 年 月 日付で登録区分、
変更する。

2001. 7. 31

[技術情報室]

α 金属減容技術に関する調査

1994年10月

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター

この資料は、動燃事業団社内における検討を目的とする社内資料です。ついでには複製、転載、引用等を行わないよう、また第三者への開示又は内容漏洩がないよう管理して下さい。また今回の開示目的以外のことには使用しないよう注意して下さい。

本資料についてのご問合せは下記に願います。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002
動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター
システム開発推進部技術管理室

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大字村松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)



社 内 資 料

PNC 4N9420 95-011

1 9 9 4 年 10 月

α 金属減容技術に関する調査

佐久間 敦宏* 菅谷 敏克* 宮崎 仁*
飛田 祐夫* 谷本 健一* 照沼 誠一*

要 旨

本調査は、大洗工学センターにて実施する固体廃棄物処理技術開発施設（「LEDF」）の基本設計の遂行にあたり、その初期段階において α 系金属廃棄物を処理する「 α 金属減容設備」のプロセスの確定に資することを目的に実施したものである。

調査対象には、概念設計での確定に至らなかったインダクトスラグ溶融方式、及びインキャンメルト方式の2方式と、同じ高周波溶融加熱原理である浮揚溶解方式を加えた3方式を設定し、各技術の現状を整理するとともに、LEDFの「 α 金属減容設備」プロセスとしての適用性、並びに他の溶融方式との比較による優位性について評価・整理した。

その結果、3方式の中でインキャンメルト方式が、現状において「前処理設備の軽減化」及び「技術実証度」の評価において、他方式と比較して最も技術的に優位にあることが確認された。また、施設運用に影響する「経済性」の評価においても同方式が他方式と比較して最も負担が少ないことも確認された。

したがって、本調査の結果に基づき、LEDFの「 α 金属減容設備」プロセスにはインキャンメルト方式を選定するものとした。



目 次

	頁
1. まえがき	1
1.1 調査の目的	1
1.2 調査の背景	1
2. 技術調査	2
2.1 調査の対象	2
2.2 溶融技術の基本要件の整理	2
2.3 調査項目の策定	2
2.4 調査方法	3
3. 技術評価	4
3.1 技術評価の方法	4
3.2 技術評価の整理	4
4. まとめ	6
5. 謝辞	6

図表

添付資料

1. インキャンメルト方式炉に関する調査
2. コールドクルーシブル炉に関する調査
3. 浮揚溶解炉に関する調査

1. まえがき

1.1 調査の目的

本調査は、現在大洗工学センターにて実施中の固体廃棄物処理技術開発施設（以下「LEDF」という）の基本設計遂行にあたり、 α 系金属廃棄物を処理する「 α 金属減容設備」のプロセスを確定することを目的に実施したものである。

1.2 調査の背景

先のLEDF概念設計では、「 α 金属減容設備」のプロセスには技術選択で高周波誘導加熱による溶融技術が選定され、中でもインダクトスラグ溶融方式とインキャンメルト方式の2方式が、「 α 金属減容設備」のプロセスとしての適用評価が高いものとされたが、最終的な溶融方式の確定までには至らず、暫定的にインダクトスラグ溶融方式を基本とした設計が進められた。

したがって、今回の基本設計では、その初期段階において再度「 α 金属減容設備」のプロセスの方式確定、即ちインダクトスラグ溶融方式とインキャンメルト方式との詳細な技術内容の比較・評価を行い、溶融方式の確定を行う必要があった。

2. 技術調査

2.1 調査の対象

溶融技術の調査対象は、前述の2方式のほか、同じ高周波誘導加熱原理を持つ浮揚溶解方式も新たに調査対象として追加し、併せて3方式の調査を行うこととした。

以下に調査の対象技術を整理する。

- ① インダクトスラグ溶融方式
- ② インキャンメルト方式
- ③ 浮揚溶解方式

2.2 溶融技術の基本要件の整理

溶融技術の調査を行うにあたっては、先ずLEDFの「 α 金属減容設備」のプロセスとしての基本要件を次のとおり整理した。

- ① 溶融の基本特性に問題の無いこと（溶融原理、技術実証度）
- ② 安全面での設備構造に問題が無いこと（安全性）
- ③ 保守・補修性に問題が無いこと（保守性）
- ④ システム構成が施設規模に影響を与えないものであること（設計対応）
- ⑤ 前処理設備への負担が少ないこと（前処理負担度）
- ⑥ D-50ドラムへの収容効率が高いこと（固化体性状）
- ⑦ α 取扱施設としてのハンドリングに問題が無いこと（設計対応）
- ⑧ 設備／運転コストが安いこと（経済性）
- ⑨ LEDF安全審査及び建設に向けた検討事項を解決すべく対応が取れること（設計対応）

2.3 調査項目の策定

前述に整理された基本要件を受けて、「 α 金属減容設備」のプロセス対象となる溶融技術の調査項目を以下のように策定した。

(1) 基本特性

- ① 技術実証度（開発経緯／技術現状／運転実績等）
- ② 処理対象廃棄物（処理対象廃棄物／対象廃棄物形状）
- ③ 前処理負担度（解体・除染条件／分別・除去）

- ④ 処理性（処理性能／溶融速度／溶湯飛散）
 - ⑤ 運転操作性（供給操作性／溶融操作性／出湯操作性／搬出操作性）
 - ⑥ 固化体性状（固化体形状／均質性）
 - ⑦ 保守性（点検・保守項目／点検方法／保守・補修方法／交換方法）
 - ⑧ 二次廃棄物（物量／処理性）
 - ⑨ ユーティリティ（電力／水道／雰囲気制御ガス）
 - ⑩ 安全性（火災・爆発／閉じ込め性等）
 - ⑪ 耐久性（炉体の耐久性／耐蝕性／腐食性）
 - ⑫ 経済性（設備コスト／運転コスト）
- (2) LEDFに向けた開発課題

2.4 調査方法

溶融技術の調査にあたっては、各技術の現状をより詳細に把握するために、各技術開発元の固有メーカーに対して、模擬廃棄物を用いた溶融試験の実施をはじめとした上記項目に基づく調査を実施し、各技術の現状を整理するとともに、LEDFへの技術の適用性、及び他の溶融方式との比較事項について確認した。添付資料-1に「コールドクルーシブル炉に関する調査」を示し、添付資料-2に「インキャンメルト方式炉に関する調査」、添付資料-3に「浮揚溶解炉に関する調査」を示す。

3. 技術評価

3.1 技術評価の方法

溶融技術の評価は、前述の調査項目に対応した評価項目を設定し、インダクトスラッグ炉、インキャン方式炉、浮揚溶解炉の3方式の技術について調査結果を整理し、段階的な指標付けを行った。表4-1に調査項目に対応した評価項目内容、表4-2に評価時の段階的な指標の説明を示す。

また、最終的な「 α 金属減容設備」のプロセスの確定においては、更に次に示す各技術の総合評価項目についても勘案することとした。

- ① LEDFの役割から
- ② 前処理設備の軽減化
- ③ 経済性
- ④ 技術実証度
- ⑤ 処分体としての性能
- ⑥ 本技術の選択に伴う技術評価
- ⑦ 原研「中廃」での作業対応
- ⑧ その他有用性

3.2 技術評価の整理

表4-3に前述の評価指標に基づいた溶融技術の評価結果を示し、以下に各技術別の評価、及び総合評価について述べる。

(1) 各技術別の評価

まず、インダクトスラッグ炉は溶融の基本特性に係わる技術的課題は試験で確認されており、LEDF向けの技術候補として優れている。しかし、スケールアップ要因、安全審査対応の原子力仕様に対する技術実証度等に関してはスケールアップモデルによる確認が必要と思われる。

次にインキャン炉であるが、本技術も溶融の基本特性に係わる技術的な課題は試験で殆ど確認されており、LEDF向けの技術候補として優れている。特に現在、電力向放射性雑固体廃棄物処理技術として安全審査に対応中であることから、原子力仕様としての技術実証度は高く、スケールアップ要因にも課題が少ない。

一方、浮揚溶解炉は、前記2つの技術と比較して開発規模が大変小さく、基本特

性においても未確認・未検討な部分が多くあるので、LEDF向けの技術候補としては時期尚早である。

(2) 総合評価

総合評価では、「前処理設備の軽減化」及び「技術実証度」についてインキャン炉が技術現状で他方式と比較して最も優位であることが整理され、本結果はLEDF基本設計の合理化の目的にも合致するものである。尚、「経済性」もインキャン炉が負担が軽く、他方式との比較で優位であることが示された。

4. まとめ

以上の調査により、インダクトスラグ方式、インキャンメルト方式、浮揚溶解方式の中で、技術実証度、前処理負担度のほか、設備コスト、運転コスト等の経済性も優れ、かつ、スケールアップ課題に問題が無く、電力向の $\beta\gamma$ 廃棄物処理技術として既に安全審査に対応中であるインキャンメルト方式をLEDFの「 α 金属減容設備」のプロセスに選定するものとする。

5. 謝辞

本調査を実施するにあたっては、(株)神戸製鋼所殿、及び日本ガイシ(株)殿、並びに富士電機(株)殿の各社のご協力をいただいたことに厚く感謝の意を表します。

表4-1 α 金属減容プロセスの評価項目

(1/2)

評価項目		調査内容	
1. 基本特性			
(1)技術実証度	開発経緯	開発経緯	開発目的と経緯は充分であるか
		開発規模	開発規模はLEDFに対応可能な技術現状であるか
	技術現状	一般工業界	一般工業界における技術現状はどうか
		原子力業界	原子力業界における技術現状はどうか
	運転実績	原子力向けの実績（或いは対応）は検討されているか	
国内開発メーカー	国内における技術開発、及び製造メーカー		
(2)対象廃棄物	対象廃棄物	SUS	熔融運転に支障は無いか
		SS	熔融運転に支障は無いか
		Al	突沸による熔融運転への支障は無いか
		Sn	突沸による熔融運転への支障は無いか
		Pb	突沸による熔融運転への支障は無いか
		Zn	突沸による熔融運転への支障は無いか
		その他夾雑物	塗膜分等による発煙での熔融運転への支障は無いか
対象廃棄物形状	寸法制限値	概念設計条件の100mm□より大型寸の対応が可能か	
(3)前処理負担度	解体・除染		解体・除染設備等前処理設備へ著しい作業負担が無いか
	分別・除去	夾雑物	夾雑物等の分別の必要性は確認済であるか
(4)処理性	処理性能	処理量	炉の基本的な処理単位量が整理されているか
		運転モード	標準的な処理モードは整理されているか
	熔融速度	熔融速度	炉単位における熔融速度は整理済か
	溶湯飛散	供給時溶湯飛散	廃棄物供給時の溶湯飛散の挙動は確認されているか
(5)運転操作性	供給操作性	初期装荷	初期装荷物の装荷方法について検討済か
		供給形態	供給形態は検討済か
		供給単位	追加供給時の物量について検討済か
		供給閉塞	廃棄物供給時の閉塞の問題は無いか
		投入制御	廃棄物の投入量制御方法は検討されているか
	熔融操作性	熔融制御	熔融制御方式の検討がされているか
		溶湯飛散	低融点金属供給時の溶湯飛散挙動について整理されているか
	出湯操作性	出湯方式	出湯方式の区別
		操作手法	固化体の取出し操作が整理されているか
	搬出操作性	移送操作	固化体の移送操作が整理されているか
払出し取合		処理系からの払出し取合について整理されているか	
(5)固化体性状	固化体形状	形態	処理生成物の形態、形状に問題は無いか
	均質性	積層	固化体が積層状になって均質性に問題が無いか
		酸化物影響	酸化物は還元されるか
(6)保守性	点検・保守項目	頻度	点検・保守項目毎の頻度は整理されているか
	点検方法	監視	設備の保守監視方法について検討されているか
	補修交換方法	保守概念/手法	補修方法について検討されているか
		交換概念/手法	交換方法について検討されているか

表4-1 α金属減容プロセスの評価項目

(2/2)

評価項目		評価基準	
(7)二次廃棄物	物量	発生する二次廃棄物量は整理されているか	
	処理性	二次廃棄物の処理設備の必要性が整理されているか	
(8)ユーティリティ	電気	運転に伴う消費量は定量的に整理されているか	
	水道	運転に伴う消費量は定量的に整理されているか	
	雰囲気制御ガス	使用の必要性は整理されているか	
(9)安全性	火災・爆発	水蒸気爆発等の火災・爆発に対する対策が検討されているか	
	閉じ込め性	核種の閉じ込め性について検討されているか	
	突沸防止対策	低沸点金属等供給時の突沸防止策が検討されているか	
	供給時湯跳ね対策	廃棄物供給時の湯跳ね対策について検討されているか	
	鑄型からの湯漏れ対策	溶融時の湯漏れに対する防止構造対策が検討されているか	
	炉体破損時の安全性	炉体破損時の安全性は検討されているか	
	固化体搬送系の健全性	溶融固化体の収容時の搬送に係わる健全性に支障は無いか	
(10)耐久性	炉体の耐久性	装置の耐久性は実機経験から予測されているか	
	炉体の耐蝕性/腐食性	炉体の耐蝕、或いは腐食等は発生しないか	
(11)経済性	設備コスト	構造的な設備コストの高騰要因が無いか	
	運転コスト	電力使用源単位	著しい電力の消費は無いか
		水道	著しい冷却水の消費は無いか
		不活性ガス	雰囲気制御ガスの使用量は定量的に把握されているか
		排ガスフィルタ	物量を含めた著しい交換消費は無いか
		廃棄物供給容器	廃棄物供給時の介在容器の著しい消費は無いか
		固化体コスト	インキャン方式の場合、容器代が運転費の高騰に影響するか
炉体補修品	炉体補修部品等は明確になっているか		

表4-2 α金属減容プロセス評価指標の説明

指 標	評 価 内 容
○	技術現状で殆ど確認済でありLEDFに適する
△	技術現状で一部未検討の部分があり、確認が必要
×	技術現状で未検討の部分が多く、LEDFに適さない

表4-3 熔融技術の評価結果(1/5)

評価項目		インダクトスラグ炉	評価	インキャン炉	評価	浮揚溶解炉	評価																																											
1. 基本特性																																																		
(1) 熔融原理		<ul style="list-style-type: none"> 誘導コイルで銅るつば内の金属に高周波誘導電流を発生させ、金属を熔融する。 熔融は、るつば発熱による間接加熱と金属の直接誘導加熱で行う。 銅るつばも同時に加熱されるが、るつば内の冷却水により除熱され、所定温度以上に上昇しないように設定される。 	—	<ul style="list-style-type: none"> 誘導コイルでセラミックるつば内の金属に高周波誘導電流を発生させ、金属を熔融する。 熔融は、るつば発熱による間接加熱と金属の直接誘導加熱で行う。 	—	<ul style="list-style-type: none"> 誘導コイルで銅るつば内の金属に高周波誘導電流を発生させ、金属を熔融する。 熔融は、るつば発熱による間接加熱と金属の直接誘導加熱で行う。 溶融物を炉内で完全浮上(炉体と非接触)するために、複数加熱コイルを有する特殊な加熱炉体構造となっている。 	—																																											
(2) 装置概念		<p>この図は、インダクトスラグ炉の断面図を示しています。中心には溶融金属が溜まるるつばがあり、その周囲には冷却水が循環する水冷銅るつばが設けられています。誘導コイルはるつばの周囲に配置され、高周波電流を供給して金属を加熱します。また、炉内には耐火材と昇降装置が設置されており、溶融金属の供給と固化体の引き抜きが行われます。</p>		<p>この図は、インキャン炉の断面図を示しています。中心には溶融金属が溜まるるつばがあり、その周囲にはセラミックるつばが設けられています。誘導コイルはるつばの周囲に配置され、高周波電流を供給して金属を加熱します。また、炉内には耐火材と昇降装置が設置されており、溶融金属の供給と固化体の引き抜きが行われます。</p>		<p>この図は、浮揚溶解炉の断面図を示しています。中心には溶融金属が溜まるるつばがあり、その周囲には水冷銅るつばが設けられています。誘導コイルはるつばの周囲に配置され、高周波電流を供給して金属を加熱します。また、炉内には耐火材と昇降装置が設置されており、溶融金属の供給と固化体の引き抜きが行われます。</p>																																												
(3) 技術実証度		<table border="1"> <tr> <td>開発経緯</td> <td>高融点金属の精錬技術(金属精錬技術)として開発された。</td> <td>—</td> <td>炉の溶融技術を放射性廃棄物の処理に適用したのが開発の初期(μ波)であり、その発展型として高周波による溶融技術が開発された。</td> <td>—</td> <td>電力利用促進を目的とした電磁応用研究の一環として開発された技術で、電磁浮上による溶融を可能とするものである。</td> <td>—</td> </tr> <tr> <td>開発規模</td> <td>モックアップ炉(50kg/バッチ)終了</td> <td>△</td> <td>モックアップ炉(700kg/キャニスタ)終了</td> <td>○</td> <td>40kg/バッチ炉を検討中。</td> <td>×</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">技術現状</td> <td>一般工業界</td> <td>国内外を問わず研究実績が多く、ジルコニア精練或いはシリコン精製等に実用化されている。(海外での研究実績は豊富である。)</td> <td>○</td> <td>国内外を問わず鋼材製造等で各所に多数実績がある。(業種、方式によってはIonオーダーでの運用実績有り。)</td> <td>○</td> <td>現在大学等の学術研究機関での基礎試験段階である。(23kg浮揚)</td> <td>△</td> </tr> <tr> <td>原子力業界</td> <td>PNC東海にてジルコイ溶解性能確認試験実施。(コールド試験) (国外では仏国CEAマルクール研にてハル廃棄物の処理で、ホット試験データが整理され、また米国では、AGNS社がバーンウニル再処理工場のハル廃棄物処理施設向け設計検討を実施。)</td> <td>△</td> <td>電力向βγ廃棄物処理技術として安全審査対応中</td> <td>○</td> <td>PNC東海にてジルコイ溶解性能確認試験実施。(コールド試験)</td> <td>△</td> </tr> <tr> <td>運転実績</td> <td>300ラン(神戸製鋼モックアップ炉)</td> <td>○</td> <td>400ラン(日本ガイシモックアップ炉)</td> <td>○</td> <td>100ラン(富士電気パイロット炉)</td> <td>△</td> </tr> <tr> <td>国内開発メーカー</td> <td>(株)神戸製鋼所、住友金属鉱業、大阪チタニウム、三菱マテリアル、大同特殊鋼等</td> <td>—</td> <td>日本ガイシ(株)、(株)神戸製鋼所、大阪チタニウム等</td> <td>—</td> <td>富士電機(中部電力との共同研究)</td> <td>—</td> </tr> </table>	開発経緯	高融点金属の精錬技術(金属精錬技術)として開発された。	—	炉の溶融技術を放射性廃棄物の処理に適用したのが開発の初期(μ波)であり、その発展型として高周波による溶融技術が開発された。	—	電力利用促進を目的とした電磁応用研究の一環として開発された技術で、電磁浮上による溶融を可能とするものである。	—	開発規模	モックアップ炉(50kg/バッチ)終了	△	モックアップ炉(700kg/キャニスタ)終了	○	40kg/バッチ炉を検討中。	×	技術現状	一般工業界	国内外を問わず研究実績が多く、ジルコニア精練或いはシリコン精製等に実用化されている。(海外での研究実績は豊富である。)	○	国内外を問わず鋼材製造等で各所に多数実績がある。(業種、方式によってはIonオーダーでの運用実績有り。)	○	現在大学等の学術研究機関での基礎試験段階である。(23kg浮揚)	△	原子力業界	PNC東海にてジルコイ溶解性能確認試験実施。(コールド試験) (国外では仏国CEAマルクール研にてハル廃棄物の処理で、ホット試験データが整理され、また米国では、AGNS社がバーンウニル再処理工場のハル廃棄物処理施設向け設計検討を実施。)	△	電力向βγ廃棄物処理技術として安全審査対応中	○	PNC東海にてジルコイ溶解性能確認試験実施。(コールド試験)	△	運転実績	300ラン(神戸製鋼モックアップ炉)	○	400ラン(日本ガイシモックアップ炉)	○	100ラン(富士電気パイロット炉)	△	国内開発メーカー	(株)神戸製鋼所、住友金属鉱業、大阪チタニウム、三菱マテリアル、大同特殊鋼等	—	日本ガイシ(株)、(株)神戸製鋼所、大阪チタニウム等	—	富士電機(中部電力との共同研究)	—					
開発経緯	高融点金属の精錬技術(金属精錬技術)として開発された。	—	炉の溶融技術を放射性廃棄物の処理に適用したのが開発の初期(μ波)であり、その発展型として高周波による溶融技術が開発された。	—	電力利用促進を目的とした電磁応用研究の一環として開発された技術で、電磁浮上による溶融を可能とするものである。	—																																												
開発規模	モックアップ炉(50kg/バッチ)終了	△	モックアップ炉(700kg/キャニスタ)終了	○	40kg/バッチ炉を検討中。	×																																												
技術現状	一般工業界	国内外を問わず研究実績が多く、ジルコニア精練或いはシリコン精製等に実用化されている。(海外での研究実績は豊富である。)	○	国内外を問わず鋼材製造等で各所に多数実績がある。(業種、方式によってはIonオーダーでの運用実績有り。)	○	現在大学等の学術研究機関での基礎試験段階である。(23kg浮揚)	△																																											
	原子力業界	PNC東海にてジルコイ溶解性能確認試験実施。(コールド試験) (国外では仏国CEAマルクール研にてハル廃棄物の処理で、ホット試験データが整理され、また米国では、AGNS社がバーンウニル再処理工場のハル廃棄物処理施設向け設計検討を実施。)	△	電力向βγ廃棄物処理技術として安全審査対応中	○	PNC東海にてジルコイ溶解性能確認試験実施。(コールド試験)	△																																											
運転実績	300ラン(神戸製鋼モックアップ炉)	○	400ラン(日本ガイシモックアップ炉)	○	100ラン(富士電気パイロット炉)	△																																												
国内開発メーカー	(株)神戸製鋼所、住友金属鉱業、大阪チタニウム、三菱マテリアル、大同特殊鋼等	—	日本ガイシ(株)、(株)神戸製鋼所、大阪チタニウム等	—	富士電機(中部電力との共同研究)	—																																												

表4-3 溶融技術の評価結果(2/5)

評価項目			インダクトスラグ炉	評価	インキャン炉	評価	浮湯溶解炉	評価
(4)対象廃棄物	対象廃棄物	SUS	溶融処理に支障無し。	○	溶融処理に支障無し。	○	溶融処理に支障無し。	○
		SS	溶融処理に支障無し。	○	溶融処理に支障無し。	○	溶融処理に支障無し。	○
		Al	溶融処理時の突沸挙動確認済。	○	溶融処理時の突沸挙動確認済。	○	溶融処理時の突沸挙動確認済。	○
		Sn	0.3%混入で溶融に支障の無いことを確認済。	○	0.3%混入で溶融に支障の無いことを確認済。	○	確認データ無し。	×
		Pb	0.3%混入で溶融に支障の無いことを確認済。	○	0.3%混入で溶融に支障の無いことを確認済。	○	確認データ無し。	×
		Zn	0.3%混入で溶融に支障の無いことを確認済。	○	0.3%混入で溶融に支障の無いことを確認済。	○	確認データ無し。	×
	対象廃棄物形状	寸法制限値	140mm□が現状限界(220mmφモックアップ炉)今後の設計対応では300mm□が可能な見通し。	△	310mm□が現状限界(100Lモックアップ炉)~300mm□程度は現状技術で充分設計対応可能。	○	30mm□が現状限界(2.3kgパイロット炉)今後開発予定の40kg炉でも100mm□が限界。	×
(5)前処理負担度	解体・除染		現状ではインキャン方式より細断負担は大きい。(440mmφ炉での実証が必要。)	△	現状で最も前処理負担度が少ない技術であり、インダクトスラグ炉より優位である。	○	現状では細断が必要で、3方式の中で最も前処理負担度が高い。	×
	分別・除去	夾雑物	Zn, Pb等は可能な限り分別・除去が望ましいが、微量混入時の溶融への支障が無いことが溶融試験にて確認されており、問題は無い。	○	Zn, Pb等は可能な限り分別・除去が望ましいが、微量混入時の溶融への支障が無いことが溶融試験にて確認されており、問題は無い。	○	Zn, Pb等は可能な限り分別・除去が望ましいが、微量混入時の溶融への影響は未確認の為、確認が必要である。	×
(6)処理性	処理性能	処理量	〈現状〉50kg/バッチ炉 〈設計調査〉~540kg/日(30日稼働/年)	○	〈現状〉700kg/バッチ 〈設計調査〉~200kg/日(80日稼働/年)	○	〈現状〉2.0kg/バッチ程度 〈設計調査〉160kg/日(100日稼働/年)	○
		スケールアップ	現状炉の10倍のスケールアップ実証が必要。	△	現状でのスケールアップ課題は無い。	△	現状炉の100倍のスケールアップ実証が必要。	△
		運転モード	〈供給モード〉6バッチ/hr 18バッチ/日(3時間運転)	○	〈供給モード〉4バッチ/hr 20バッチ/日(5時間運転)	○	〈供給モード〉4バッチ/hr 16バッチ/日(4時間運転)	○
	溶融速度	溶融速度	180kg/hr	○	40kg/hr	○	40kg/hr	○
	溶湯飛散	供給時溶湯飛散	供給落下時の溶湯飛散は若干有るが、挙動確認済。	○	供給落下時の溶湯飛散は若干有るが、挙動確認済。	○	供給落下時の溶湯飛散挙動確認データ無し。	×
(7)運転操作性	供給操作性	初期装荷	廃棄物は炉上部より装荷、投入する。 (大型金属片は、加熱前に装荷する)	○	廃棄物は炉上部より装荷、投入する。 (大型金属片は、加熱前に装荷する)	○	廃棄物は炉上部より装荷、投入する。 (100mm□以上の金属片は対応不可能。)	△
		供給形態	ワイヤーメッシュによる供給(供給毎)	△	メッシュかごによる供給(供給毎)	△	未検討	×
		供給単位	30kg/供給	○	10kg/供給	△	10kg/供給	△
		供給閉塞	現状炉(220mmφ)では供給閉塞の可能性が残される。(440mmφ炉であれば問題無し。)	△	現状では3方式の中で最も炉内径が大きく、供給閉塞は起こりにくい。	○	炉寸法が3方式の中で最も小規模であり、大型金属片の直接処理は不可能である。	△
	溶融操作性	溶融制御	事前計量により炉容量以内に管理する。 (湯面検知、目し確認でも等入量を制御する。)	○	事前計量により炉容量以内に管理する。 (湯面検知、目し確認でも等入量を制御する。)	○	事前計量により炉容量以内に管理する。 (湯面検知、目し確認でも等入量を制御する。)	○
		溶湯飛散	溶解温度は炉壁の冷却量とバランスし、融点+30℃で自動的に安定。(PWTF-ESRと同機構。)	○	溶解温度は電源のボリュームで調整可能。	○	溶解温度は炉壁の冷却量とバランスし、安定させる。	○
	出湯操作性	出湯方式	低融点金属供給時の溶湯飛散は、溶融試験にて挙動を確認済であり、設計対応可能である。	○	低融点金属供給時の溶湯飛散は、溶融試験にて挙動を確認済であり、設計対応可能である。	○	低融点金属供給時の溶湯飛散については、確認データが少なく、挙動を把握する必要である。	×
操作手法		るつば内凝固上部引き抜き式	—	るつば内凝固下部引き抜き式	—	流下ノズル錐型出湯式	—	
搬出操作性		水冷却るつば内で溶融体の凝固直前に吊上げ治具を挿入し、凝固定着後に炉上部から引き抜く。	△	キャニスタ内で溶融・凝固後、昇降装置によってキャニスタ毎炉底部から廃棄体として回収する。	○	るつば下部の流下ノズルから錐型へ出湯し凝固化する。	△	
(8)固化体性状	固化体形状	移送操作	クレーンによる吊り上げで対応する。	○	コンベア+クレーンで対応する。	○	クレーンによる吊り上げで対応する。	○
		拡出し取合	ポリ容器+PVCによるバグアウトで対応(PWTF)	○	ポリ容器+PVCによるバグアウトで対応する。	○	ポリ容器+PVCによるバグアウトで対応(PWTF)	○
		形態	炉内径サイズの金属単体の塊	○	セラミックるつばとの共着塊	△	金属単体の塊(錐型選択により任意形状可)	○
均質性	積層	バッチ溶融時の磁界攪拌作用により均質である。	○	バッチ溶融時の磁界攪拌作用により均質である。	○	非均質(出湯固形時積層状)	△	
	酸化物影響	酸化還元される。	○	酸化還元される。	○	酸化還元される。	○	

表4-3 溶融技術の評価結果(3/5)

評価項目	インダクトスラグ炉		評価	インキャン炉		評価	浮揚溶解炉		評価
	点検・保守項目	頻度		点検方法	補修交換方法		点検方法	補修交換方法	
(9)保守性	点検・保守項目	頻度	・原則として溶融ごとに炉体の事前点検を行う。 ・水冷銅ろつばは分解・点検が必要である。 (スリット部等1回/年)	△	・原則として溶融ごとに炉体の事前点検を行う。 ・直接の炉体は存在しないが、内部耐火材は交換する。(10年程度で交換。)	○	・原則として溶融毎に炉体の事前点検を行う。 ・水冷銅ろつばは分解・点検が必要である。 (スリット部等数回/年)	△	
	点検方法	監視	炉内点検はITVにて遠隔監視対応可能。	○	炉内点検はITVにて遠隔監視対応可能。	○	未検討	×	
	補修交換方法	保守概念/手法	直接保守を原則とする。	○	直接保守を原則とする。	○	直接保守を原則とする。	○	
		交換概念/手法	炉体補修時には、加熱コイルも一体に取り外し、メンテナンスグローブボックスで保守・補修を行う。	○	炉体取り外しは昇降装置にて、チャンバ内装物を含めて下方へ引き抜き、メンテナンスグローブボックスで保守・補修を行う。	○	交換方法については未検討。	×	
(10)二次廃棄物	物量	廃棄物供給容器	ワイヤーメッシュシート(供給毎)	△	メッシュかご(供給毎)	△	未検討	×	
		オフガスフィルタ	バグフィルタ(無交換)	○	セラミックフィルタ(1回/3~5年)	△	未検討	×	
			HEPAフィルタ(1回/年)	○	HEPAフィルタ(1回/年)	○	HEPAフィルタ(1回/年)	○	
		溶融容器	発生せず	○	セラミックろつば(溶融毎:40kg程度/個)	△	発生せず	○	
		炉内耐火物	発生せず	○	炉内耐火物が発生する(250kg/10年)	△	発生せず	○	
	処理性	処理設備を必要とする対象物は無い。	○	セラミックフィルタ用の破砕装置が必要である。また、耐火材の廃棄はD-50ドラムで行う。	△	処理設備を必要とする対象物は無い。	○		
(11)エネルギー	電気	高周波用電源(1600kW)	△	高周波用電源(400kW)	○	高周波電源(常用2系統:650kW+400kW)	×		
	水道	コイル冷却用	96ml/h(炉冷却と供用)	△	10ml/h	○	65ml/h(炉冷却と供用)	△	
		炉体冷却用	96ml/h(コイル冷却と供用)	△	使用しない	○	65ml/h(コイル冷却と供用)	△	
	不活性ガス	酸化抑制用に窒素、或いはアルゴンを使用。	○	酸化抑制用に窒素、或いはアルゴンを使用。	○	酸化抑制用に窒素、或いはアルゴンを使用。	○		
(12)安全性	火災・爆発	水冷銅セグメントからのピンホール等による冷却水漏洩に伴う水蒸気爆発が懸念されるが、炉壁内の熱電対の温度変化(+30℃)を監視することで事前確認が可能である。 (PNC東海PWTFのESRと同様。)	△	炉体の基本構造が水冷ではないので、水蒸気爆発は原則として起こり得ない。	○	水冷銅セグメントからのピンホール等による冷却水漏洩に伴う水蒸気爆発が懸念されるが、温度変化の監視により事前確認が可能。	△		
	閉じ込め性	溶融炉自体は核種閉じ込め性を持たないので、炉をチャンバ内装とすることで核種閉じ込め性を担保し、他の付帯機器はグローブボックス内に設置し、負圧管理で対応可能なものとする。	○	溶融炉自体は核種閉じ込め性を持たないので、炉をチャンバ内装とすることで核種閉じ込め性を担保し、他の付帯機器はグローブボックス内に設置し、負圧管理で対応可能なものとする。	○	未検討	×		
	突沸防止対策	確認のための分別・除去工程が不可欠であるが、溶融試験で突沸時の飛沫挙動は確認済なので、仮に混入して突沸が発生しても溶融炉の炉内高に裕度を持たせることで回避可能としている。また、予め初装荷して低温域で先行処理することでも回避可能であり、問題は無い。	○	確認のための分別・除去工程が不可欠であるが、溶融試験で突沸時の飛沫挙動は確認済なので、仮に混入して突沸が発生しても溶融炉の炉内高に裕度を持たせることで回避可能としている。また、予め初装荷して低温域で先行処理することでも回避可能であり、問題は無い。	○	確認のための分別・除去工程が不可欠であるが、仮に混入して突沸が発生しても溶融炉の炉内高に裕度を持たせることで回避可能と考えられる。また、初装荷による低温域での先行処理でも回避可能と考えられるが、溶融試験による挙動確認が必要である。	△		
	供給時湯跳ね対策	廃棄物供給時の湯跳ねは、炉上部の間隔に余裕を持たせることで対応可。(湯跳ね挙動確認済。)	○	廃棄物供給時の湯跳ねは、炉上部の間隔に余裕を持たせることで対応可。(湯跳ね挙動確認済。)	○	未検討	×		
	炉体破損時の安全性	炉体からの溶湯漏れは電磁力学上考えられないが外周のチャンバで対応する。	○	キャニスタ破損に伴う溶湯の漏れについては、炉防壁(耐火材)、チャンバにて対応する。	○	炉体からの溶湯漏れは電磁力学上考えられないが外周のチャンバで対応する。	○		
	固化体搬送系の健全性	固化体引き上げ時の落下防止機構で対応(PWTF)	○	クレーンの落下防止機構で対応する。	○	固化体引き上げ時の落下防止機構で対応する。	○		

表4-3 溶融技術の評価結果(4/5)

評価項目		インダクトスラグ炉	評価	インキャン炉	評価	浮揚溶解炉	評価	
(13)耐久性	炉体の耐久性	・炉体の寿命は、繰り返し熱応力評価によって15年以上の耐久性を持つ。 ・炉自体には駆動部が無いので、付随する保守部品が少なく、耐久性に優れる。	○	・炉体外殻、及び溶融コイル、炉内耐火材は、10年間無交換。	○	・炉体は水冷式なので比較的長寿命と考えられる。 ・炉自体には駆動部が無いので、付随保守部品が少なく、耐久性に優れると考えられる。	○	
	炉体の耐蝕性/腐食性	・耐蝕性に関しては、酸性ガスが発生せず、また不活性ガス雰囲気とすれば腐食の問題は無い。 ・炉体は銅製かつ常時水冷されており、高温腐食の問題は無い。	○	・耐蝕性に関しては、酸性ガスが発生せず、また不活性ガス雰囲気とすれば腐食の問題は無い。	○	・耐蝕性に関しては、酸性ガスが発生せず、また不活性ガス雰囲気とすれば腐食の問題は無い。 ・炉体は銅製かつ常時水冷されており、高温腐食の問題は無い。	○	
(14)経済性	設備コスト	炉本体、及び付帯設備の購入製作費、並びにそれに係る工事費がインキャン炉と比較して高価である。(詳細は別途資料にて説明。)	△	炉本体、及び付帯設備の購入製作費、並びにそれに係る工事費がインダクトスラグ炉より安価である。(詳細は別途資料にて説明。)	○	電源装置が複数必要となるので、設備全体が高いと考えられる。	×	
	運転コスト	電力使用源単位	3.0~9.0kWh/kg程度であり、インキャン炉と比較して高い。	△	0.5~2.0kWh/kg程度とインダクトスラグ炉と比較して安い。	○	高周波電源が2系統あり、3方式の中で最も高い。(4.3~数十kWh/kg)	×
		水道	コイル冷却と炉体冷却の供用であり、インキャン炉の2倍である。(8640m ³ /年)	△	コイル冷却用に使用するが3方式の中で最も少量である。(50m ³ /バッチ×80バッチ/年=4000m ³ /年)	○	コイル冷却と炉体冷却とを供用するが、3方式の中で最も使用量大。(26000m ³ /年)	×
	不活性ガス	酸化抑制用に使用する。	○	酸化抑制用に使用する。	○	酸化抑制用に使用する。	○	
	排ガスフィルタ	・バグフィルタは設備費のみで無交換。 ・HEPAフィルタ(1回/年)	○	・セラミックフィルタ(5年毎:低温、低流量) ・HEPAフィルタ(1回/年)	○	・除塵プロセスは未検討。 ・HEPAフィルタ(1回/年)	×	
	廃棄物供給容器	ワイヤーメッシュシートを運転毎に使用する。	△	メッシュかごを運転毎に使用する。	△	未検討	×	
	固化体コスト	設備消耗品は殆ど無い。	○	消耗品として、溶融毎にセラミック容器が必要で運転費の経済的負担が大きくなる。 (5万円/個×80バッチ/年=400万円/年)	△	設備消耗品は殆ど無い。	○	
炉体補修品	特に無し	○	分割式炉内耐火物(250kg/10年)	△	特に無し	○		
2. LEDFに向けた開発課題		インダクトスラグ炉は溶融の基本特性に係わる技術の根幹的な課題は無いと考えられるが、LEDFに向けた開発課題としてはおおよそ以下に整理される。 ・スケールアップ炉(440mmφ炉)の技術実証確認及びそれに伴う廃棄物細断条件の低減化確認。 ・ホット試験の実施による核種移行特性確認等αホットデータの取得・確認。 ・ワイヤーメッシュシートによる廃棄物供給機構の確認 ・吊り上げ用具を用いた固化体の引き抜き機構の確認。 ・炉体(るつば)スリット部の保守・補修方法の確立。		インキャン炉もインダクトスラグ炉と同様に溶融の基本特性に係わる技術の根幹的な課題は無いと考えられ、LEDFに向けた開発課題はおおよそ以下に整理される。 ・ホット試験の実施による核種移行特性確認等αホットデータの取得・確認。 ・メッシュかごによる廃棄物供給機構の確認。 ・固化体取出し機構の確認。 ・炉体(耐火材)の交換概念の確立及び確認。		浮揚溶解技術は、技術開発現状が他方式と比較して基礎研究段階で遅れており、LEDFに向けての開発課題を論じる以前に、溶融の基本特性等を確認する必要があると考えられる。		

表4-3 溶融技術の評価結果(5/5)

評価項目	インダクトスラグ炉	評価	インキャン炉	評価	浮揚溶解炉	評価
3. 総合評価						
(1)LEDFの役割から	処理生成物が金属単体の塊として得られるので高減容が図れる。(30体/年の発生) また、処理系からの二次廃棄物の発生は少ない。	○	処理生成物はセラミックるつばとの共着体として得られるので、減容効果は薄れる。(40体/年) オフガス系のセラミックフィルク、及び耐火材等不燃物系の二次廃棄物が不定期に発生する。	△	処理生成物が金属単体の塊として得られるので高減容が図れる。また、処理系からの二次廃棄物の発生は少ないと考えられる。	○
(2)前処理設備の軽減化 (基本設計での合理化対応)	概念設計での懸念事項であった廃棄物細断条件(100mm□)は技術的な炉体のスケールアップが実証されれば300mm□まで改善される見込み。	△	廃棄物細断条件は概念設計結果に対し現状技術において3方式の中で最も前処理負担が少なく、前処理設備軽減化に寄与する。	○	廃棄物細断条件は3方式の中で最も小さいので、前処理負担が高く、前処理設備軽減化には寄与しない。	×
(3)経済性 (基本設計での合理化対応)	経済性の観点からは、設備コストがインキャン炉よりも高価で、また運転コストも高価である。	△	経済性の観点からは、設備コスト及び運転コスト共にインダクトスラグ炉よりも安価であり、低位である。	○	経済性に関しては、技術現状が研究段階である為設備コストの算定比較が不可能だが、運転コストは3方式の中で最も高いと算定される。	×
(4)技術実証度	インキャン方式の代替技術として金属製錬分野において汎用され始めており、技術の根幹的な問題は無いがスケールアップに課題が残されている。一方、ホットデータは、仏国CEAでのハル廃棄物処理によるデータの蓄積・整理段階の現状。	△	既に鉄鋼製錬技術として一般工業界における技術的信頼度は高く、原子力業界においても電力向けの放射性雑固体廃棄物(βγ)処理技術として、現在安全審査を実施中で、技術の根幹的な問題、及びスケールアップの課題は無い。	○	現在研究段階の技術と設備規模であり、実用化に向けての課題が他の2方式と比較して多いので、LEDFへの採用は時期尚早と思われる。	×
(5)処分体としての性能	処分体としての処理生成物の性能は、金属塊であり、均質固化体として問題は無い。	○	金属塊自身は溶融を介した均質固化体だが、共着しているセラミックるつばを含めた均質性の認識確認が必要と思われる。	○	処分体としての処理生成物の性能は、金属塊であり、均質固化体として問題は無い。	○
(6)本技術の選択に伴う設備評価	本技術の選択によって、簡易前処理によるα金属廃棄物の高減容設備プロセスの確立が得られる。(但し、スケールアップの課題解決が必要。)	△	本技術の選択によって、簡易前処理によるα金属廃棄物の高減容設備プロセスの確立が得られる。	○	本技術の選択では、簡易前処理の実現は困難で、高減容設備プロセスの確立は難しい。	×
(7)原研「中廃」での作業対応	処理生成物は定型物なので、「中廃」におけるD-50ドラムへの封入作業に支障は無い。	○	処理生成物は定型物なので、「中廃」におけるD-50ドラムへの封入作業に支障は無い。	○	処理生成物は定型物なので、「中廃」におけるD-50ドラムへの封入作業に支障は無い。	○
(8)その他有用性	処理生成物が金属塊単独で得られるので、リサイクル金属製錬技術としての有用性が考えられ、将来的なR&D要素を見い出せる。	—	処理生成物の一部が金属塊単独で得られるのでリサイクル金属として活用する為にはセラミックるつばを解除する必要があるが、その場合、設備増設等の追検討が必要となるが、一方で金属含有比の高い夾雑廃棄物処理技術としての有用性は考えられ、R&D要素を見い出せる。	—	処理生成物が金属塊単独で得られるが、現状では小規模であり技術実証度の確認が必要で、リサイクル金属製錬技術としての有用性を説くには時期尚早である。	—
まとめ	本技術は、概念設計においてα金属減容設備に選定されたものであり、処理物が金属単体の塊として得られ、固化体性状に優れるものである。また、一般工業界における金属精錬技術として実績もある。しかし、装置のスケールアップ及び原子力業界における技術現状では、インキャン炉と比較して技術の実証度、或いは前処理負担度において劣る部分がある。 既に装置のスケールアップに対する技術的、構造的な課題に対する検討が進行中ではあるが、スケールアップモデルによる実証結果が得られておらず、経済性においてもインキャン炉に対する優位性が見い出せない現状では、LEDFのα金属減容技術として最適ではないと判断される。	△	本技術は、インダクトスラグ炉と比較して技術実証度、前処理負担度共に技術的に低位であり、設備コスト、運転コストといった経済性でも低位である。 特にスケールアップ課題に問題が無く、電力向けのβγ雑固体廃棄物処理技術として既に安全審査に対応中であることから、技術的課題が3方式の中で最も少なく、LEDFのα金属減容技術として適するものである。	○	本技術は、現在学術研究機関等での小規模開発段階であり、工学的規模(最低数十kg以上)のモックアップ炉による基礎的な溶融試験データを整備する必要があり、技術実証度に乏しいので、LEDFへの採用は時期尚早と考えられる。(夾雑物混合時の溶融挙動確認データが皆無。) 尚、本技術では溶融物を磁力反発作用によって浮上させるものであるが、LEDF向け技術として考えるとき、浮上させるメリットを見出すことが難しい。 したがって、本技術はLEDFのα金属減容技術としては適さない。	×

添付資料

1. インキャンメルト方式炉に関する調査

1. インキャンメルト方式炉に関する調査

インキャンメルト方式炉は、金属を投入した特殊セラミック容器を高周波コイルの巻かれたチャンバー内に充填し、高周波コイルに誘導電流を流して得られるジュール熱(溶融温度:1500°C)により内部の金属を溶融するもので、溶融物の取出しは、除熱後にセラミック容器ごと固化体として取り出すものである。このインキャンメルト方式炉について以下の項目について調査を実施した。

- ① インキャンメルト方式炉による溶融データの整理
- ② 溶融技術の現状調査
- ③ 課題の整理・検討
- ④ コスト試算

1.1 インキャンメルト方式炉による溶融データの整理

溶融データの整理対象は、SUSの単独溶融、及びSSの単独溶融、SUS+SSの混合溶融とした。データ項目としては、処理量、処理温度、嵩密度、均質性を中心に整理した。尚、処理の実際性を勘案し、Pb、Al、あるいはZnといった低沸点金属等の夾雑物の微量混入処理時のデータも整理した。

(1) 運転温度について

金属廃棄物は、JIS等に基づき製作された構造材料が多いため、JISやデータブック等で容易に融点を特定できる。

金属廃棄物としては、炭素鋼、ステンレス鋼、鋳鉄、アルミニウム、銅、真鍮等が挙げられる。表-1.1(1)-1にこれら金属廃棄物の融点を示す。鉄を主体とする炭素鋼、ステンレス鋼、鋳鉄の融点は1200～1500°C、それ以外のアルミニウム、銅、真鍮等の融点は660～1080°C程度であることから、1500°Cに炉内を加熱すれば、全ての廃棄物を溶融処理することが可能である。

尚、原子力発電所では金属以外の材料として、保温材、コンクリート、フィルタが廃棄物として発生するが、これらの融点は、保温材類(珪酸カルシウム、グラスウール、ロックウール、石綿)が700～1400°C、コンクリート類が約1350°C、フィルタ類(ガラス繊維)が約700°Cである。

これらの廃棄物の融点から、高周波溶融炉の溶融温度として、1500°Cを選定した。

(2) 処理速度について

a. 検討の前提条件

α金属廃棄物(16ton/y)にインキャンメルト方式炉を適用する場合、キャニスタの大きさに応じて、処理量、処理速度は次の4ケースがある。これらの概略の仕様を表-1.1(2)-1 インキャンメルト方式炉のケース毎の概略仕様に示す。

CASE① 200ℓドラムにキャニスタを挿入し、セメントモルタルを充填。一日の処理量は、約750kg/日であり、運転時間を5時間とすれば、約150kg/hの処理速度が必要である。

CASE② 200ℓ内張ドラム(以下D-50という)に60ℓ規模のキャニスタを挿入。一日の処理量は、約400kg/日である。運転時間を5時間とすれば、80kg/hの処理速度が必要である。

CASE③ D-50に30ℓ規模のキャニスタを挿入。一日の処理量は、約200kg/日である。運転時間を5時間とすれば、40kg/hの処理速度が必要である。

CASE④ D-50に7ℓ規模のキャニスタを挿入。一日の処理量は、約100kg/日である。運転時間を5時間とすれば、20kg/hの処理速度が必要である。

これらを比較評価すると、CASE①はD-50に対応できないため問題がある。CASE④は、廃棄物の切断寸法が小さくなるため前処理負荷が大となり、実用的な設備にならない可能性がある。このため、CASE②とCASE③の比較になるが、廃棄物の切断寸法は同じであり、前処理負荷は同じである。しかし、CASE③は、CASE②に比べ装置の全高が低くでき、設備費、建屋費等のコストを低減することができる。

以上より、CASE③が最も合理的であり、この場合を前提に処理速度の評価検討を実施することとした。

b. 処理速度の整理

代表的な金属廃棄物について、日本ガイシ(株)が有する大規模および中規模の高周波式インキャンメルト方式炉を用いて、炭素鋼(SS400)、ステンレス鋼(SUS304)、及び炭素鋼+ステンレス鋼の溶融処理速度データを整理した。

表-1.1(2)-2にインキャンメルト方式炉の主な仕様並びに、図-1.1(2)-1にインキャンメルト方式炉の運転カーブを示す。廃棄物は炉への供給性を考慮して、L型鋼(50×50×6t)を大規模では600mmに中規模炉では300mmに切断して使用した。

溶融処理速度の試験結果を表-1.1(2)-3にさらに、試験結果より算出した熱効率を表-1.1(2)-4,5に示す。

表-1.1(2)-3に示すように、大規模炉での処理速度は炭素鋼、ステンレス鋼、及び炭素鋼+ステンレス鋼のいずれの場合も200kg/hの処理速度であり、エネルギー効率は約35%であった。中規模炉では、処理速度としては約40kg/h、エネルギー効率は約20%であった。

今回対象とするインキャンメルト方式炉では、200kg処理、運転時間5h(40kg/h)であることより、中規模炉と同等であり、電気容量としては、100kwと設定した。

c. 処理速度に及ぼす夾雑物の影響について

Pb、Al、Znといった低融点金属等の夾雑物の微量な混入程度では、処理速度に及ぼす影響は無視することができる。但し、これらの金属の内、Znについては表-1.1(1)-1に示すように低沸点であり、溶融時には、若干の問題があり、この挙動については、1.3.2(1)にて詳細に検討を行った。

表-1.1(1)-1 代表金属類の融点と沸点1)2)3)

		融点		沸点	
		°C	出典	°C	出典
純 金 属	Fe	1536	3	2887	3
	Cu	1083	3	2582	3
	Al	660	3	2477	3
	Pb	327	3	1755	3
	Zn	419	3	906	3
	Sn	232	3	2480	3
実 用 合 金	SGP	1510	1	—	—
	STPG	1510	1	—	—
	SUS304	1454	2	—	—
	SUS316	1399	2	—	—
	铸钢(SCPH2)	約1500	2	—	—
	ステンレス铸钢 (SCH13)	約1500	2	—	—
	铸铁(FC20)	約1200	3	—	—
	真鍮(Cu/Zn合金) Zn;30 ~ 45%	890 ~ 950	3	—	—

表-1.1(2)-1 インキャンメルト方式炉のCase毎の概略仕様

	CASE①	CASE②	CASE③	CASE④
スケール	大	中	中	小
搬出形態	200ℓオープンドラム	200ℓ内張ドラム(D-50)	200ℓ内張ドラム(D-50)	200ℓ内張ドラム(D-50)
キャニスタサイズ	約110ℓ	約60ℓ	約30ℓ	約7ℓ
1ドラム当たり溶融物重量	約750kg	約400kg	約400kg (200kg×2)	約300kg (50kg×6)
固化体本数	22	40	40	54
処理量	750kg/日	400kg/日	200kg/日	100kg/日(2固化体/日)
処理処理速度(5h運転)	150kg/h	80kg/h	40kg/h	20kg/h
必要運転日数	22	40	80	160
電気容量	300KW	200KW	100KW	30KW
切断寸法	φ450mm以下	φ350mm以下	φ350mm以下	φ150mm以下
特長	<ul style="list-style-type: none"> ● 処理能力が大きい ● 切断寸法の制約が少ない ● 減容比が大きい 	<ul style="list-style-type: none"> ● D-50ドラムに1固化体を充填するように、るつぼ寸法を決定 	<ul style="list-style-type: none"> ● D-50ドラムに2固化体を充填するように、るつぼ寸法を決定 ● 設備が比較的コンパクトになる 	<ul style="list-style-type: none"> ● 設備がコンパクト ● D-50ドラムに6固化体を充填
評価	D-50に適用できない ×	CASE③に比べ装置の全高が高くなる ○	CASE②に比べ、低コスト化できる ◎	切断寸法が小さいため前処理負荷多く実用性に問題がある。 △
廃棄体概要図	<p>セメントモルタル 200ℓドラム 溶融物 るつぼ</p>	<p>セメントモルタル D-50 溶融物 るつぼ</p>	<p>セメントモルタル D-50 溶融物 るつぼ</p>	<p>セメントモルタル D-50 溶融物 るつぼ</p>

表-1.1(2)-2: インキャンメルト方式炉の主な仕様

	大規模炉	中規模炉
電源容量	最大600kwh	最大100kwh
キャニスタ サイズ	約φ530×800h 内容量約110ℓ	約φ370×600h 内容量約35ℓ
廃棄物寸法	長さ600mm	長さ300mm

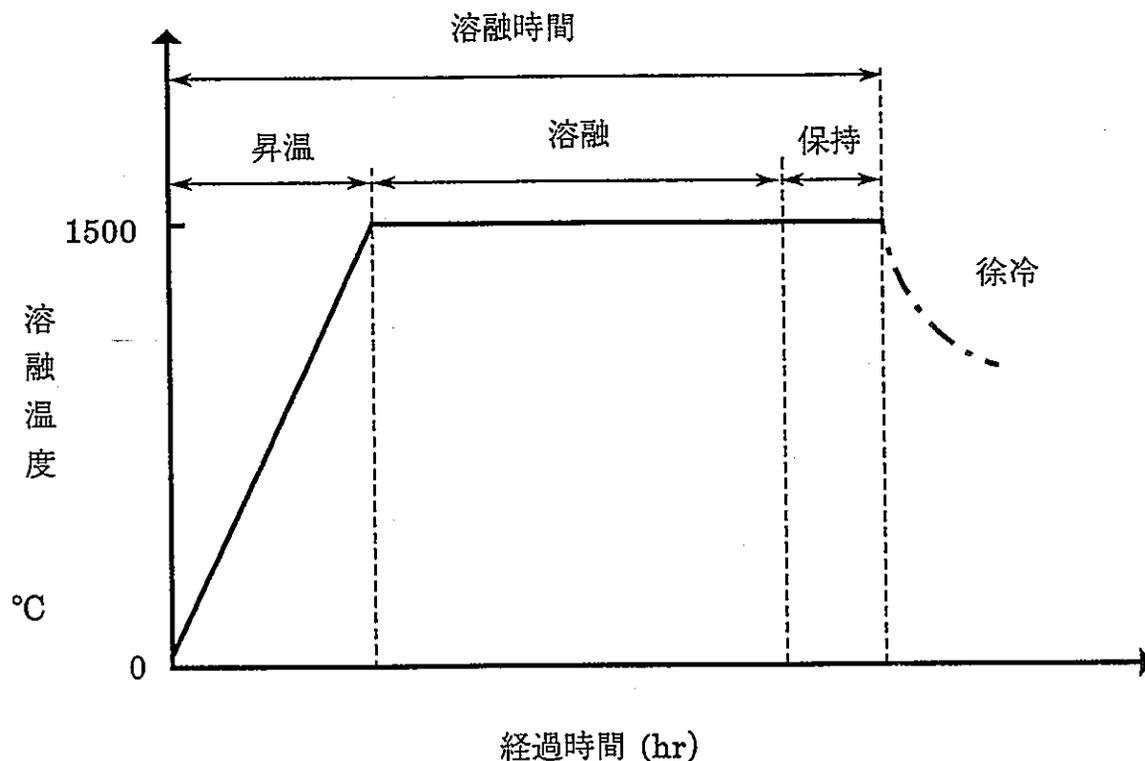


図-1.1(2)-11 インキャンメルト方式炉運転カーブ

表-1.1(2)-3) インキャンメルト方式炉の金属溶融処理速度

試験装置	溶融物種類	溶融物重量 (kg)	溶融温度 (°C)	試験結果				
				消費電力 (kwh)	昇温時間 (hr)	溶融時間 (hr)	保持時間 (hr)	処理速度※1 (kg/hr)
大規模 高周波溶融炉	炭素鋼	750	1500	880	0.8	2.2	0.5	214
	ステンレス鋼	750	1500	830	1.0	2.1	0.5	208
	炭素鋼+ ステンレス鋼	750	1500	890	0.9	2.2	0.5	208
中規模 高周波溶融炉	炭素鋼	200	1500	381	2.0	2.5	0.5	40
	ステンレス鋼	200	1500	400	2.0	2.4	0.5	40.8
	炭素鋼+ ステンレス鋼	200	1500	400	2.0	2.4	0.5	40.8

備考) ※1は溶融物重量を昇温開始～保持終了までの時間で除し、算出した。

表-1.1(2)-4:大規模炉のエネルギー効率

溶融物	溶融物重量 (kg)	溶融エネルギー原単位 (kwh/ton)	消費電力 (kwh)	エネルギー効率 (%)	溶融処理速度 (kg/hr)
炭素鋼	750	400	880	34	214
ステンレス鋼	750	400	830	36	208
炭素鋼+ ステンレス鋼	750	400	890	34	208

表-1.1(2)-5:中規模炉のエネルギー効率

溶融物	溶融物重量 (kg)	溶融エネルギー原単位 (kwh/ton)	消費電力 (kwh)	エネルギー効率 (%)	溶融処理速度 (kg/hr)
炭素鋼	200	400	381	21	40
ステンレス鋼	200	400	400	20	40
炭素鋼+ ステンレス鋼	200	400	400	20	40

●エネルギー効率の求め方

$$\eta = (\text{溶融物重量} \div 1000\text{kg}) \times \text{エネルギー原単位} \div \text{消費電力} \times 100 \quad (\%)$$

(3)均質性について

溶融固化体は、廃棄物を溶融し液体化した後に固化して作製する。したがって、基本的には高い均質性を有することが予想できる。

しかしながら、溶湯の一部を固化しながら廃棄物を溶融する方式では、作製した固化体の均質性は、溶融中に投入する廃棄物ごとの組成(核種濃度・組成を含む)のばらつきに大きく影響される。この場合、均質な固化体を作製するためには、溶融する廃棄物の組成/汚染状況による詳細な分別が必要と想定される。

一方、インキャンメルト方式においては、一旦全量を溶融した後に固化することから、溶融体の均質性は高いことが容易に想定できる。

本検討においては、溶融体の均質性の観点から有利と判断される、インキャンメルト方式の溶融炉において作製した溶融体について、均質性に関する調査・検討を行った。

a.均質性確認の方針

固化体の均質性としては、

- ① 組成の均質性
- ② 密度の均質性

の2つに関して検討することで、固化体の均質性を確認できると考える。したがって本検討においては、主に固化体母材を構成する元素の均質性、及び固化体母材の密度の均質性を調査・確認することとした。

b.確認対象とした溶融固化体

均質性の確認を行った溶融固化体を表-1.1(3)-1に示す。ラン3から6までの金属単独条件における溶融では、スラグ形成材として、保温材を用いた。

分析用試料のサンプリングは、金属層、セラミック層おのおのの上部、中部、下部、および各部の中心部、外周部、中間部について行った(図1.1(3)-1)。

c. 固化体組成の均質性

固化体母材の均質性の確認として、金属層では炭素鋼またはステンレス鋼を構成する元素としてFe、Al、Cr、Ni、セラミック層では母材を構成する元素としてSi、Caについて、各サンプリング箇所ごとに固化体中の濃度を測定し、固化体中における濃度の変動係数を評価した。また核種として、金属層ではCo、セラミック層ではCsの濃度を測定し、各サンプリング箇所における元素濃度の変動係数を評価した。

評価結果を表-1.1(3)-2に示す。変動係数は最大でも3%以下であった。この結果から、固化体組成の均質性は非常に高いことを確認した。

d. 固化体密度の均質性

固化体密度に関しては、各サンプリング箇所において嵩密度および真密度の測定を行った。測定結果を表-1.1(3)-3に示す。測定の結果、溶融固化体の嵩密度は真密度に近い値であることを確認した。また、各サンプリング箇所における嵩密度のばらつきはほぼ認められなかった。このことから、固化体密度の観点からも溶融固化体の均質性は良好であったことを確認した。

e. まとめ

溶融固化体の均質性の評価として、固化体の組成及び密度に関して測定・評価を行った。

評価の結果、固化体の組成に関しては濃度の変動係数が数%程度であった。また固化体の密度に関しては、嵩密度のサンプリング箇所による違いは小さいこと、嵩密度が真密度に近い値であることを確認した。

以上により、インキャンメルト方式によって作製した溶融固化体は、高い均質性を持つことを確認した。

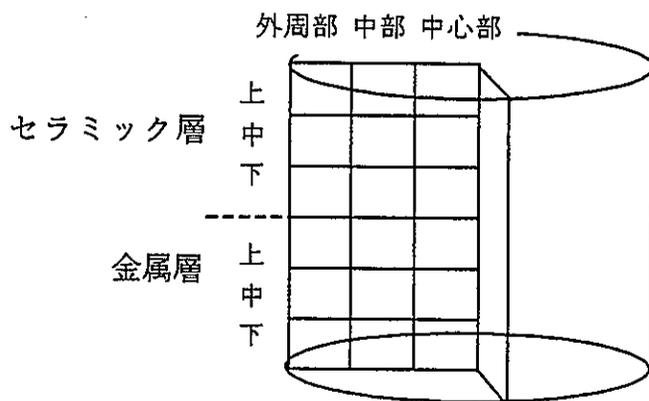


図-1.1(3)-1 分析用試料のサンプリング箇所

表-1.1(3)-1 確認対象とした溶融固化体

ラン	模擬廃棄物	模擬金属廃棄物の混合比
1	無機物 / 炭素鋼 / SUS304 *無機物：保温材、コンクリート、焼却灰の混合	炭素鋼 / SUS = 1 / 1
2	保温材 / HEPA / 炭素鋼	---
3	炭素鋼 / SUS304	炭素鋼 / SUS = 1 / 1
4	炭素鋼 / アルミ	炭素鋼 / アルミ = 4 / 1
5	炭素鋼単独	---
6	SUS304単独	---

温度：1,500°C、溶融固化体容積：100リットル程度

表-1.1(3)-2 固化体成分濃度の変動係数

(単位:%)

ラン	模擬廃棄物	金属層		セラミック層	
		Fe、Al等	Co	Si、Ca	Cs
1	無機物 / 炭素鋼 / SUS304	<2*1	—	<1	—
2	保温材 / HEPA / 炭素鋼	<1*2	<3	<1	<3
3	炭素鋼 / SUS304	<3*1	—	—	—
4	炭素鋼 / アルミ	<3*3	—	—	—
5	炭素鋼単独	<2*2	<1	—	—
6	SUS304単独	<2*1	<2	—	—

*1: Fe、Cr、Ni *2: Fe *3: Fe、Al を分析対象とした。

表-1.1(3)-3 固化体密度の測定値

(単位: g/cm³)

ラン	模擬廃棄物	金属層		セラミック層	
		嵩密度	真密度	嵩密度	真密度
1	無機物 / 炭素鋼 / SUS304	7.6~7.7	7.7	2.7	2.8
2	保温材 / HEPA / 炭素鋼	7.6~7.7	7.7	2.6~2.9	2.9
3	炭素鋼 / SUS304	7.7~7.8	7.8	—	—
4	炭素鋼 / アルミ	6.2~6.3	6.3	—	—
5	炭素鋼単独	7.7~7.8	7.8	—	—
8	SUS304単独	7.8~7.9	7.9	—	—

1.2. インキャンメルト方式炉の現状調査

インキャンメルト方式炉に関する技術の現状調査と他の方式炉との相対比較に資する、主な調査・比較項目は次のとおりである。

- ・溶融原理
- ・装置概念
- ・対象廃棄物
- ・前処理負担度
- ・運転操作性
- ・固化体性状
- ・保守性
- ・安全性
- ・システム構成
- ・二次廃棄物
- ・技術実証度
- ・ユーティリティ
- ・開発課題
- ・総合評価 等

(1)インキャンメルト方式炉について4)

a. 溶融原理

インキャンメルト方式炉は、電磁誘導作用を利用して対象物を加熱・溶融する方法で、加熱コイルと呼ばれる巻線に交流電流 I_1 を流すことにより交番磁束 ϕ_1 が発生し、この磁束内に配置された加熱材(インキャンメルト方式炉では、セラミックキャニスタ及び金属廃棄物)には、電磁誘導作用による二次誘導電流 I_2 が流れる。この二次誘導電流 I_2 が加熱材内を流れることによってジュール熱が発生し加熱材(セラミックキャニスタ及び金属廃棄物)が発熱する。(インキャンメルト方式炉の溶融原理を図-1.2-1に示す)

b. 装置概念

インキャンメルト方式炉の構造を図-1.2-2に示す。インキャンメルト方式

炉は、金属廃棄物を炉内に予めセットしたセラミックキャニスタ内で加熱・溶融する。セラミックキャニスタ周囲には加熱を行うための高周波誘導コイルが配置されている。コイルは炉内の輻射熱を避けるため耐火物で炉内と仕切られ保護されている。金属廃棄物の投入は炉上部より行い、セラミックキャニスタのセット及び取出は炉下部から行う。尚、金属廃棄物溶融後は炉内で冷却・凝固させた後、セラミックキャニスタごと廃棄体とする。

以下にインキャンメルト方式炉の主要な特徴を示す。

- ① 対象廃棄物の範囲が広く、ほとんど全ての廃棄物処理可能である。
- ② 溶湯の出湯作業、引き抜き作業がなく、運転が簡単である。
- ③ 溶湯と耐火物の接触がなく寿命が長い。メンテナンスも容易である。

c. 対象廃棄物

インキャンメルト式溶融炉では導電性物質(金属)以外にセラミックキャニスタ自身の発熱により、非導電性物質(コンクリート,保温材,HEPA,焼却灰,可燃物)の加熱・溶融が可能である。

d. 前処理負担度

金属廃棄物は、セラミックキャニスタ内に入る大きさであれば前処理は不要である。又、非導電性物質の溶融も可能なため厳密な仕分作業は不要となる。

e. 運転操作性

運転は溶融操作のみで、セラミックキャニスタ表面温度をインバータ制御で必要な温度域となるようコントロールしている。金属廃棄物の投入及びセラミックキャニスタのセット,取出は自動運転で行い、特に溶融後の廃棄体の取出は、セラミックキャニスタごと廃棄体とするため、廃棄体自体の引き抜き操作が不要となりハンドリングが容易である。

f. 固化体性状

電磁誘導中溶融した廃棄物は、セラミックキャニスタ内で攪拌されるため、冷却・凝固した固化体は均一性に優れている。又、固化体サイズは、100ℓまで実証確認済みである。

g. 保守性

炉内耐火物は直接溶湯と接触しないため、長期使用が可能である。又、耐火

物の構造は単純な円筒形で、炉底部の専用フランジで耐火物のみを保持する構造を採用している。このため耐火物は、フランジごと炉内からの拔出しや炉内へのセットが可能であり、保守が容易に行える。詳細な保守方法については1.3.3(1)で述べる。

h. 安全性

出湯操作がないため、溶融物が外部に飛散する恐れは無い。又、万一セラミックキャニスタが破損した場合も溶融物は溶融炉下部の湯だめ部に溜まり、固形化して炉外に漏れないようにしている。

また、停電時には、そのまま再起動が可能である。

i. システム構成

インキャンメルト方式炉のシステムフローを図-1.2-3に示す。尚、システム規模については1日の処理量により表-1.1(2)-1 インキャンメルト方式炉のケース毎の概略仕様に示す内のCase3について検討した。

① 金属廃棄物の受入

除染・解体エリア(セル室内)から搬入用エアロックを介して金属廃棄物を受入れる。(金属廃棄物は、除染・解体エリアにて所定の大きさに切断後、溶融炉投入用籠に1籠あたり10~20kg詰められていると想定。)受入れた金属廃棄物は、重量を測定した後ストックエリアにストックする。尚、ストックエリアは1日分の処理量(200kg/日)がストックできるようにする。

籠のストック数

ストック数は1籠あたりの投入重量により決定される。ここでは投入重量を10kgとして、籠のストック数を算定した。尚、配置上ストック数を減じたい場合は、籠サイズを大きくするか投入密度を増加させる必要がある。

$$200\text{kg/日} \div 10\text{kg/籠} = \underline{20\text{籠}}$$

② 金属廃棄物の投入

金属廃棄物は金属廃棄物リフトで溶融炉上部まで搬送する。搬送された金

属廃棄物は熔融炉内に移動した後、取扱機によって下降し籠ごとセラミックキャニスタ内に投入される。

③ 熔融炉

- ・方式 : インキャンメルト方式
- ・処理量 : 最大40kg/h
- ・キャニスタサイズ : 30ℓ
- ・電気容量 : 100kw
- ・運転温度 : 1500°C

④ 排ガス処理

熔融炉から出てくる排ガス(50Nm³/h,500°C)を、まずセラミックフィルタでの低融点物質捕集を考慮し200°Cとなるよう空気で混合冷却する(排ガス量150Nm³/h,200°C)。冷却された排ガスは、セラミックフィルタ,HEPAフィルタで除塵した後排ガスブロワで吸引されオフガス処理設備へ排出される。尚、熔融炉内は排ガスブロワで常時負圧維持し、万一の排ガスブロワ故障時のため排ガス補助ブロワを予備機で設けている。セラミックフィルタ上部には逆洗装置を設け、定期的にセラミックフィルタエレメント表面の付着物を払い落とす。又、下部には払い落とした付着物及び使用済セラミックフィルタエレメントを容器に回収できるようにしている。

・セラミックフィルタエレメント本数

セラミックフィルタエレメント1本あたりのろ過面積は0.188m²
(φ60×1000ℓ),ろ過速度は0.03m/s以下より

$$\left(150\text{Nm}^3/\text{h} \times \frac{273+200}{273} \times \frac{1}{3600} \right) \text{m}^3/\text{s} \div (0.18\text{m}^2 \times 0.03\text{m}/\text{s}) = 13.4\text{本}$$

よってエレメント本数は余裕を考慮し18本とする。

・HEPAフィルタ枚数

フィルタ1枚当たりの処理風量を1920m³/h(610×610)とすると、フィルタ枚数は、

$$\left(150\text{Nm}^3/\text{h} \times \frac{273+200}{273} \right) \div 1920\text{m}^3/\text{h} = 0.13\text{枚}$$

よってフィルタ枚数は1枚とする。

・排ガスプロワ容量

$$200\text{Nm}^3/\text{h} \times 1500\text{mmAq (at } 200^\circ\text{C)}$$

⑤ キャニスタの取扱い

セラミックキャニスタを溶融炉内へセットし、溶融後キャニスタ(固化体)を炉内から取出し、固化体ドラム詰め装置でD50ドラム缶へ充填する。

以上の検討に基づいた主要機器の外形構造図及び配置図の例を以下の図に示す。配置については、グローブボックス型について検討した。尚、 α ホール型についても参考に示した。

- ・金属廃棄物受入設備 図-1.2-4
- ・金属廃棄物投入設備 図-1.2-5
- ・溶融炉 図-1.2-6
- ・キャニスタ取扱い設備 図-1.2-7
- ・セラミックフィルタ 図-1.2-8
- ・インキャンメルト方式炉配置例(グローブボックス型) 図-1.2-9
- ・インキャンメルト方式炉配置例(α ホール型) 図-1.2-10

j. 二次廃棄物

以下にCASE③の場合の主な二次廃棄物を示す。耐火物及びセラミックフィルタエレメントの交換頻度は、中規模炉の運転実績より設定した。また、HEPAフィルタは定検時に取り替えるものとした。尚、この場合の年間運転時間は、表-1.1(2)-1より5時間/日 \times 80日/年=400時間/年とした。

- ・耐火物(1セット) —10年に1回交換
- ・セラミックフィルタエレメント(18本) —5年に1回交換
- ・HEPAフィルタ —1年に1回交換

k. 技術実証度

電磁誘導方式は、鑄鉄、鑄鋼、ステンレス等の金属溶融、ガラスの溶融、非鉄金属の溶融等幅広い分野で用いられている技術である。この方式を利用した放射性廃棄物処理技術の研究・開発は10数年前から開始され、基礎試験(ベンチスケール)に始まり中規模及び大規模の試験を実施してきている。又、ホット試験及びラボスケールの試験装置により、放射性核種挙動、排ガス処理性能(除染性能)、固化体中の核種分布等ホットデータが得られており実証された技術である。これまでの研究・開発状況を図-1.2-11に示す。

l. ユーティリティ

インキャンメルト方式炉の運転において必要となるユーティリティは、冷却水、圧縮空気、電源、空調等である。溶融炉の規模として表-1.1(2)-1のCASE3(100kw炉)について、必要なユーティリティを表-1.2-1に示した。

m. 開発課題

今回の金属廃棄物溶融処理設備の開発課題は特に無い。しかし今後以下の項目の検討対応及び試験確認が必要である。

① α 対策(メンテナンスを考慮した、溶融炉・グローブボックス等の設計)

②スラグコントロール材の選定

尚、スラグ材選定後、確認のため溶融時の α 核種挙動、均一性等の試験を実施する必要がある。

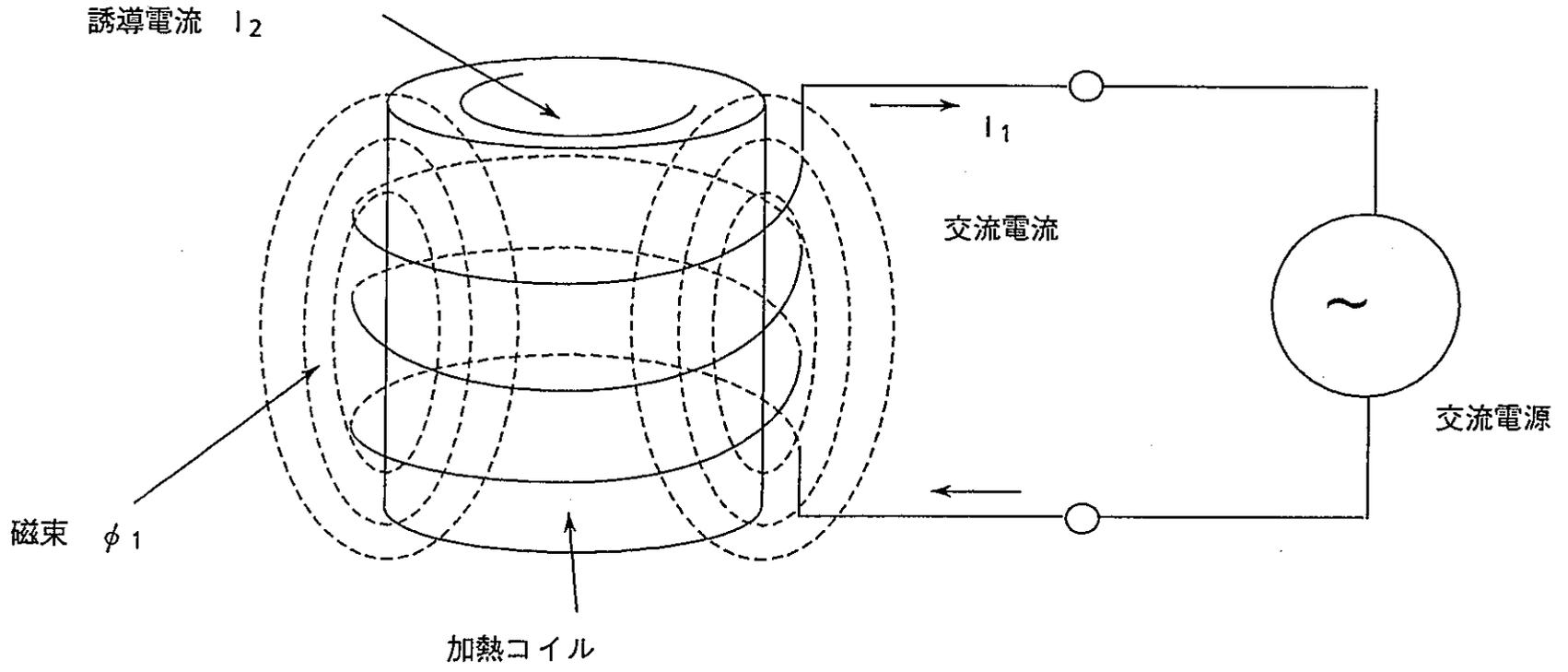


図-1.2-1 インキャンメルト方式炉の溶融原理

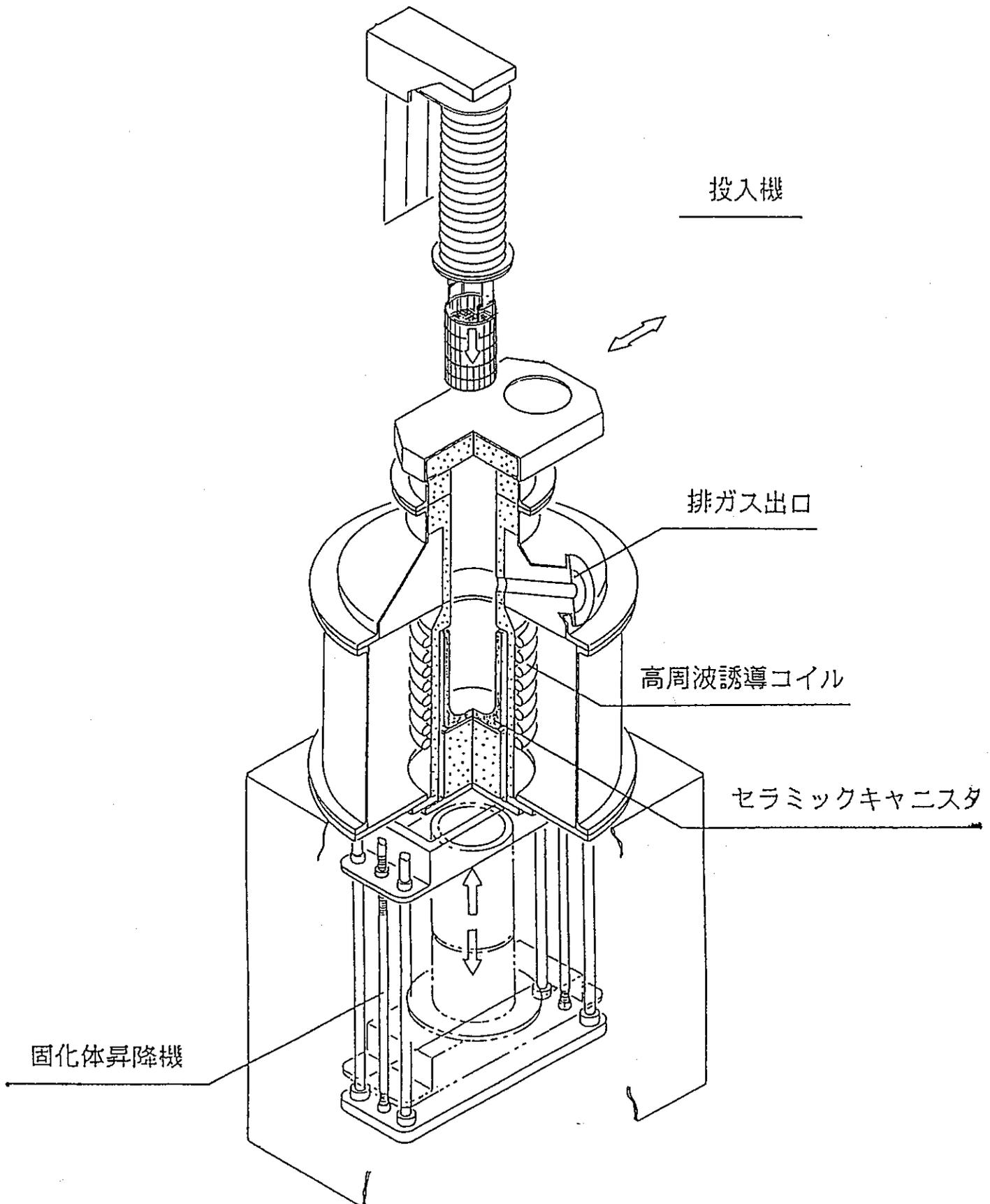


図-1.2-2 インチャンメルト方式炉概略構造図

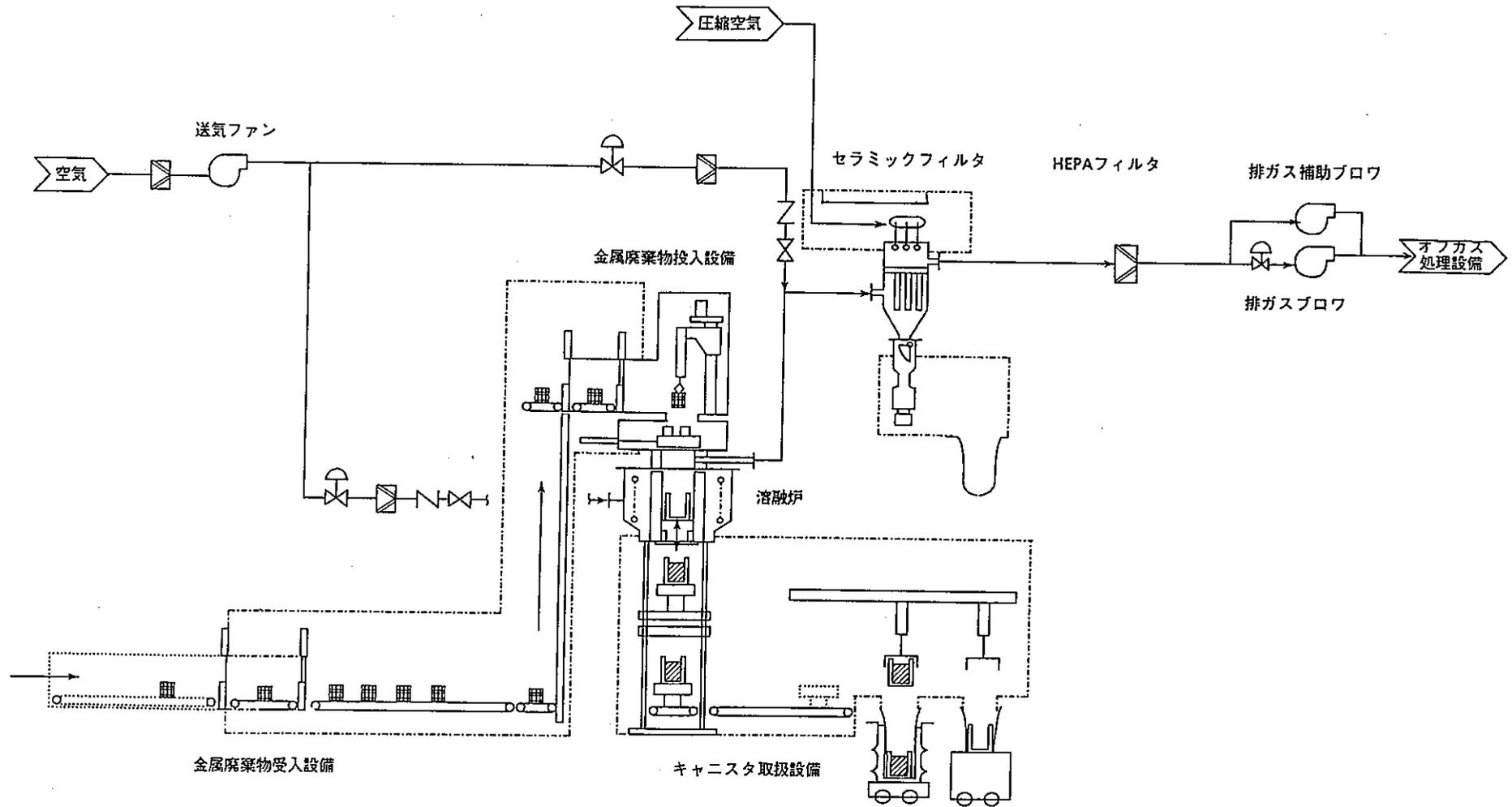


図-1.2-3 インキャンメルト方式炉のシステムフロー

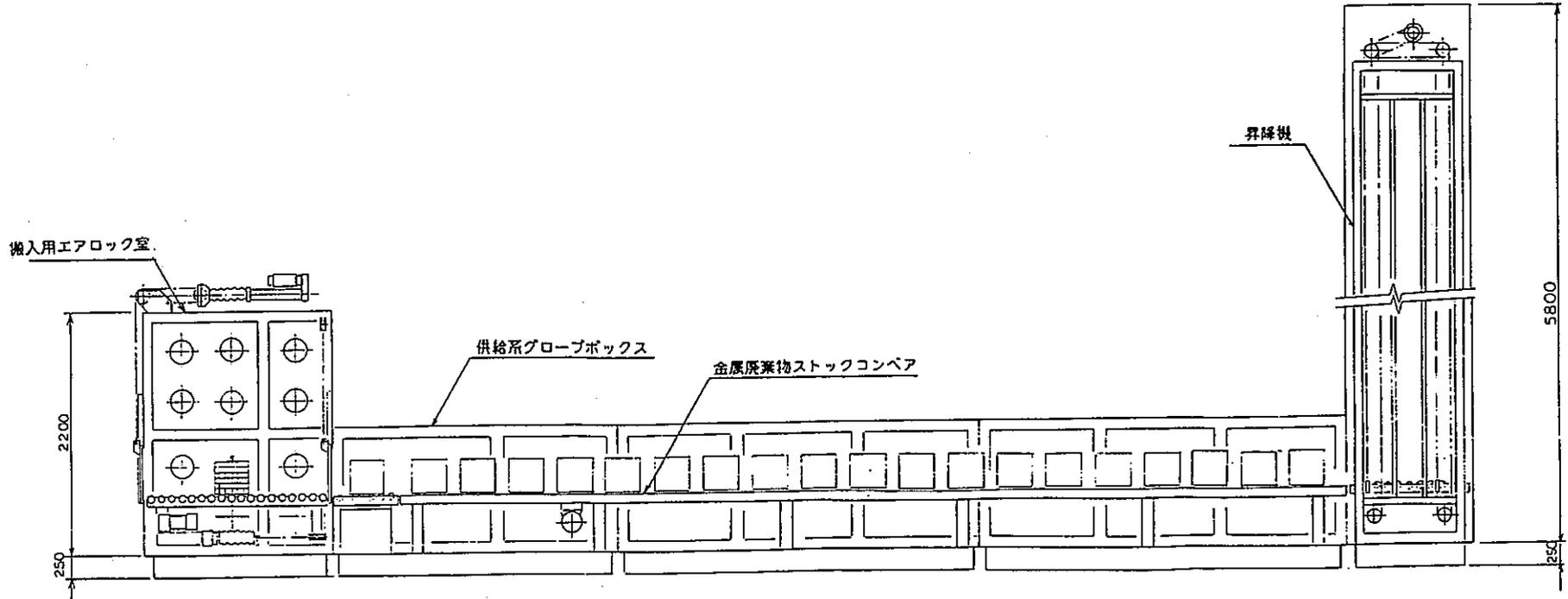
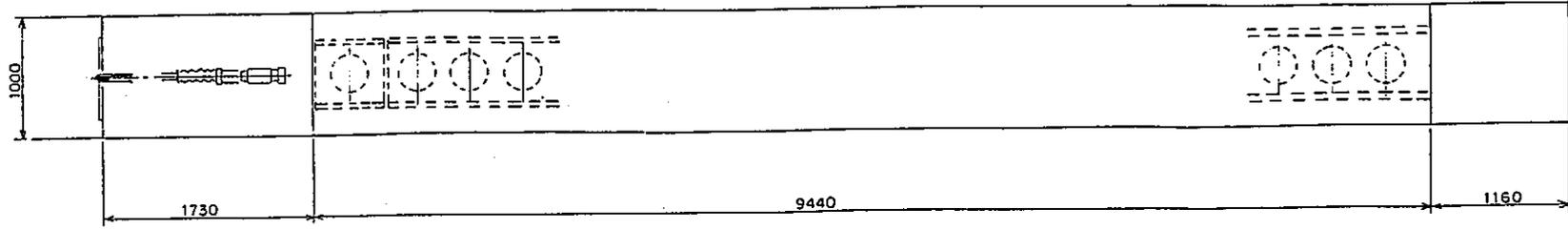


図-1.2-4 金属廃棄物受入設備

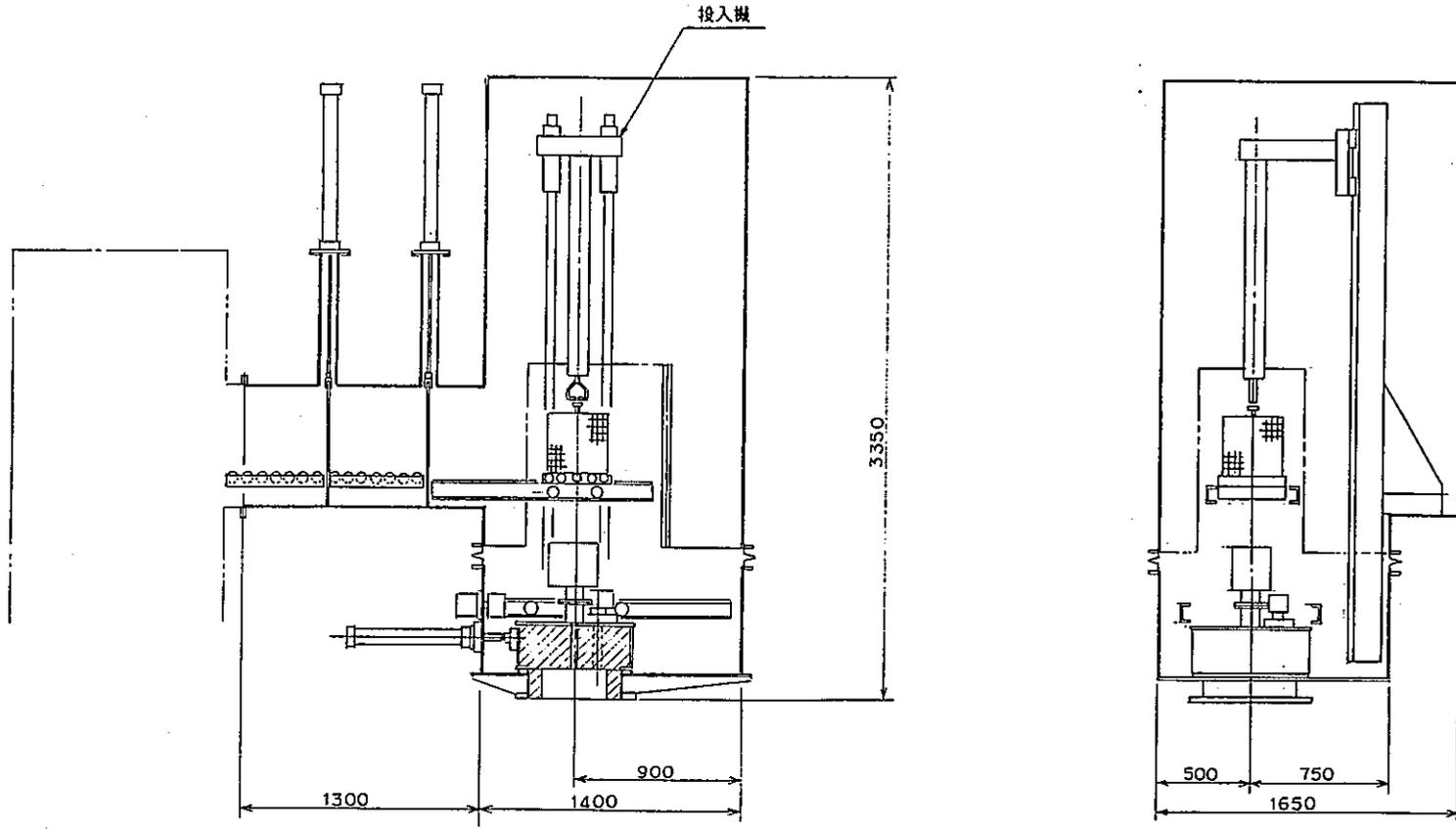


图-1.2-5 金属废弃物投入设备

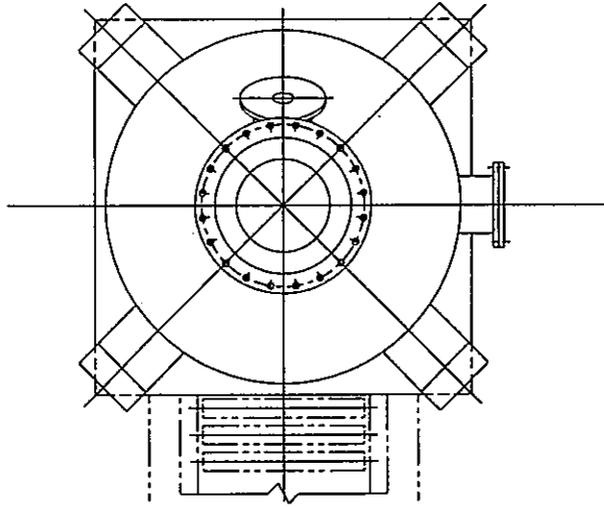
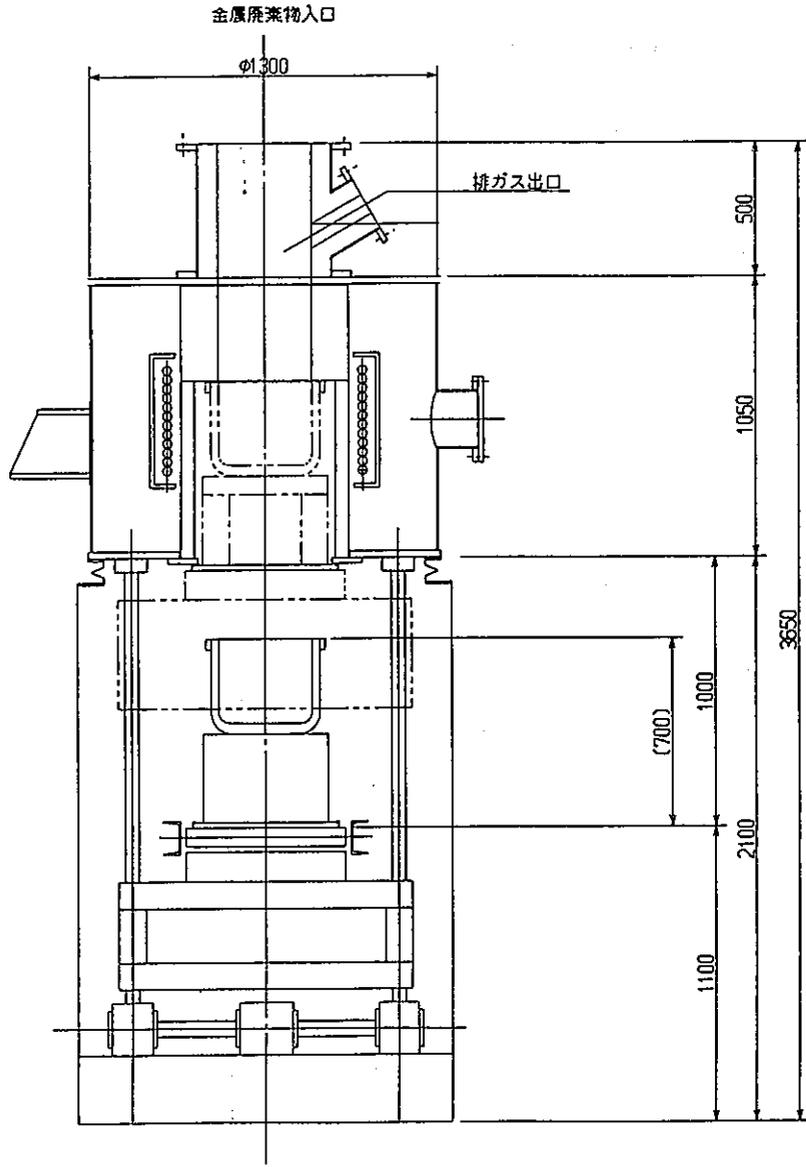
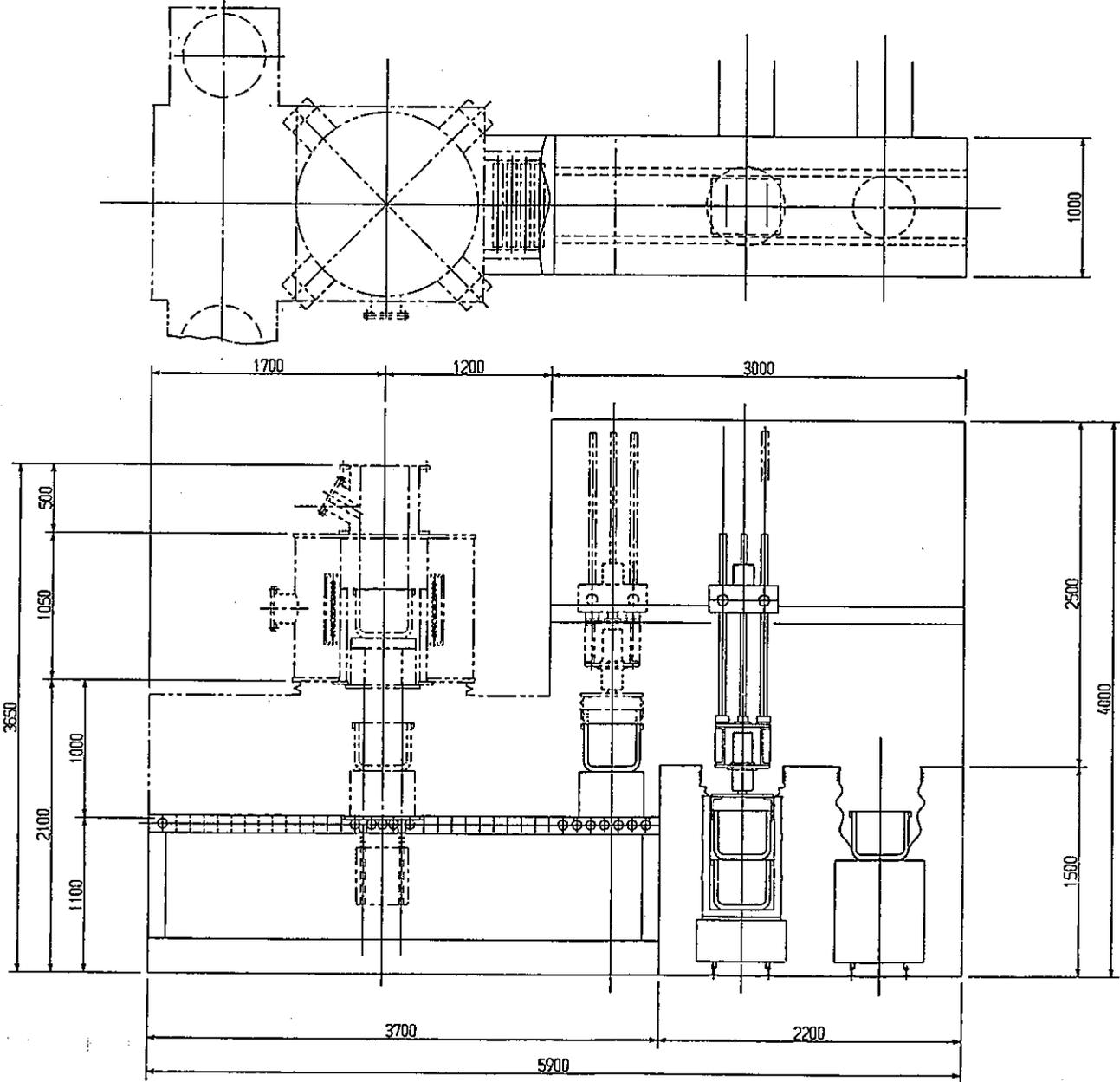


図-1.2-6 溶融炉



☒-1.2-7 キャニスタ取扱イ設備

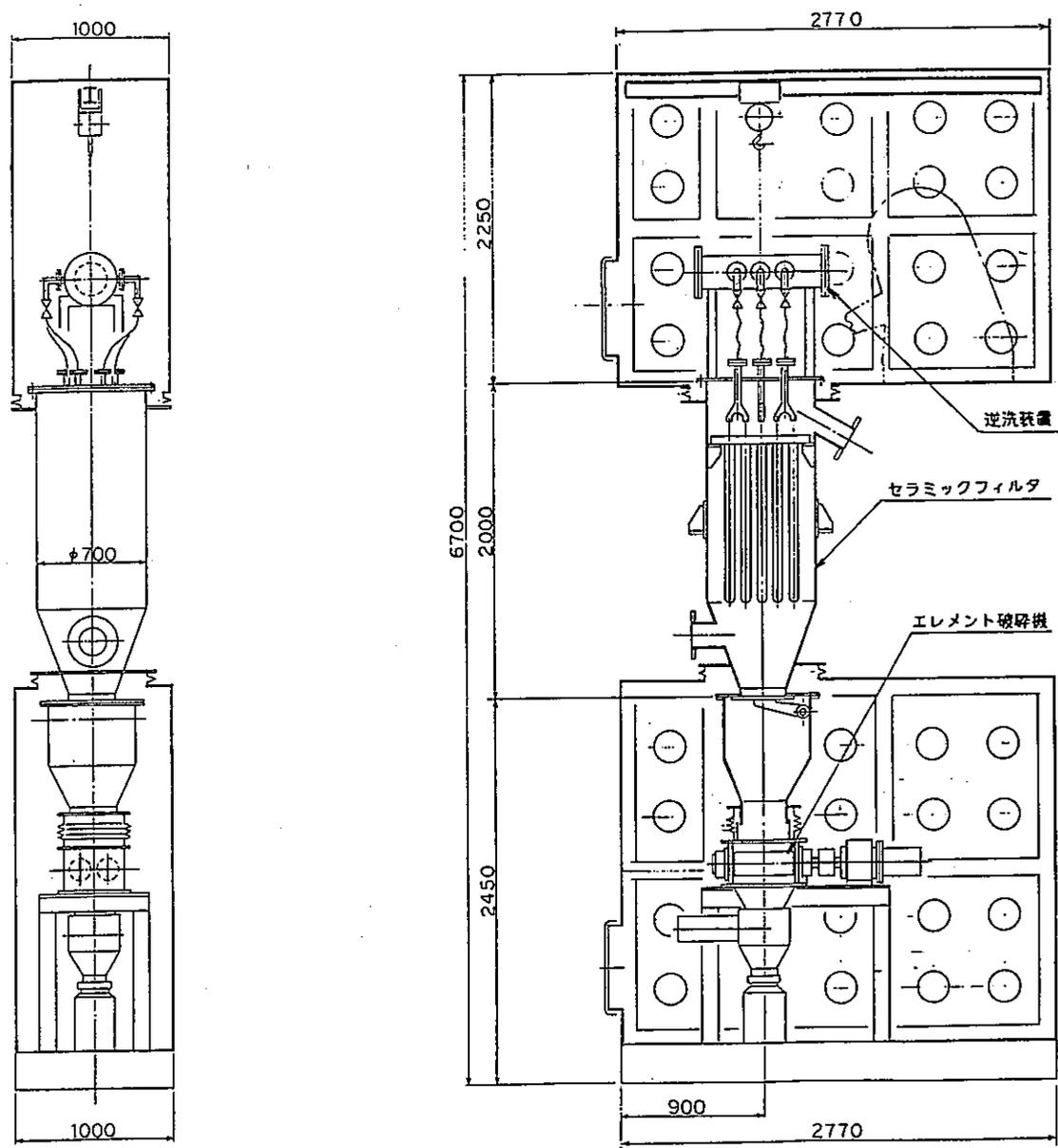


図-1.2-8 セラミックフィルタ

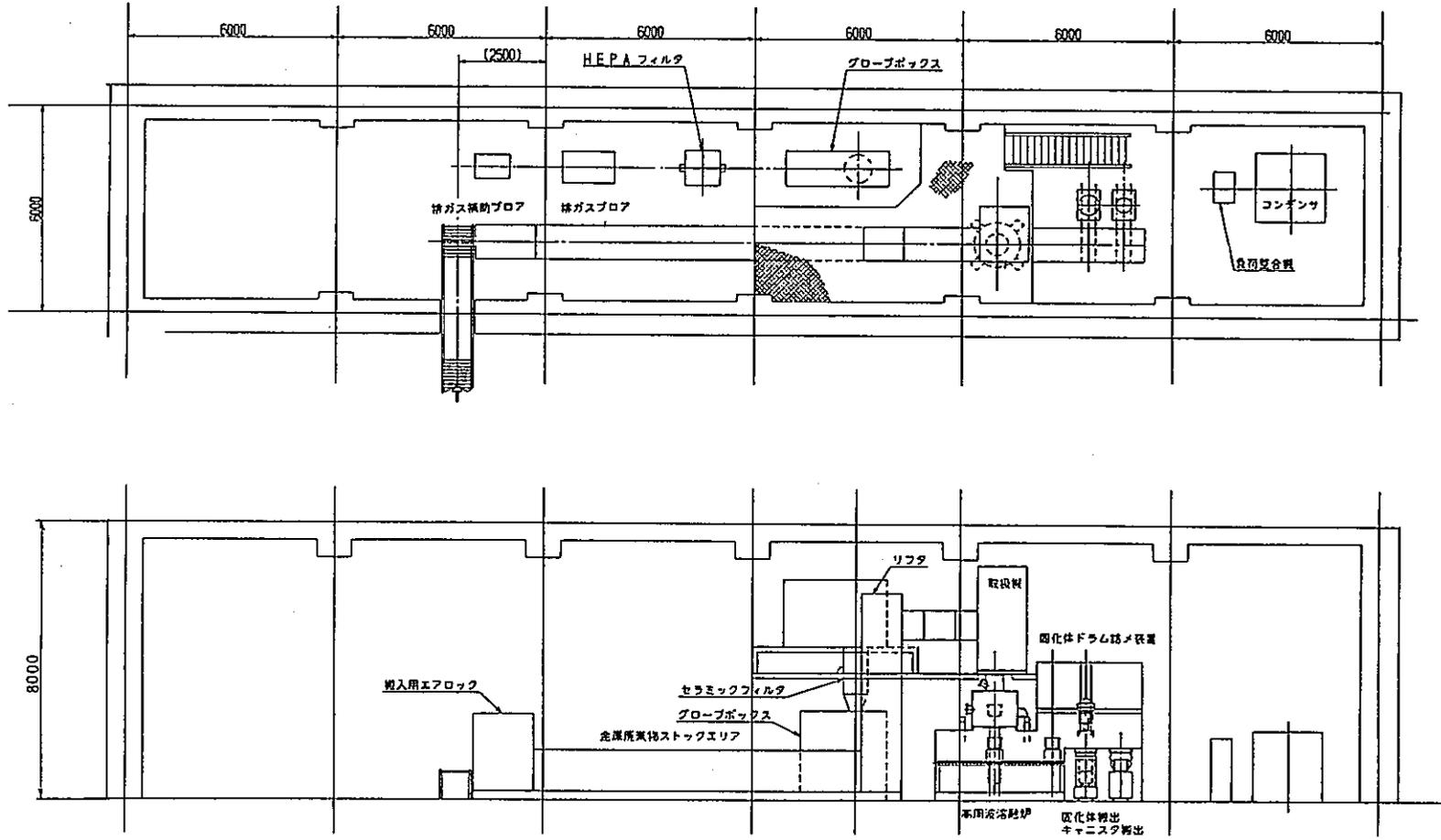


図-1.2-9 インキャンメルト方式配置例 (グローブボックス型)

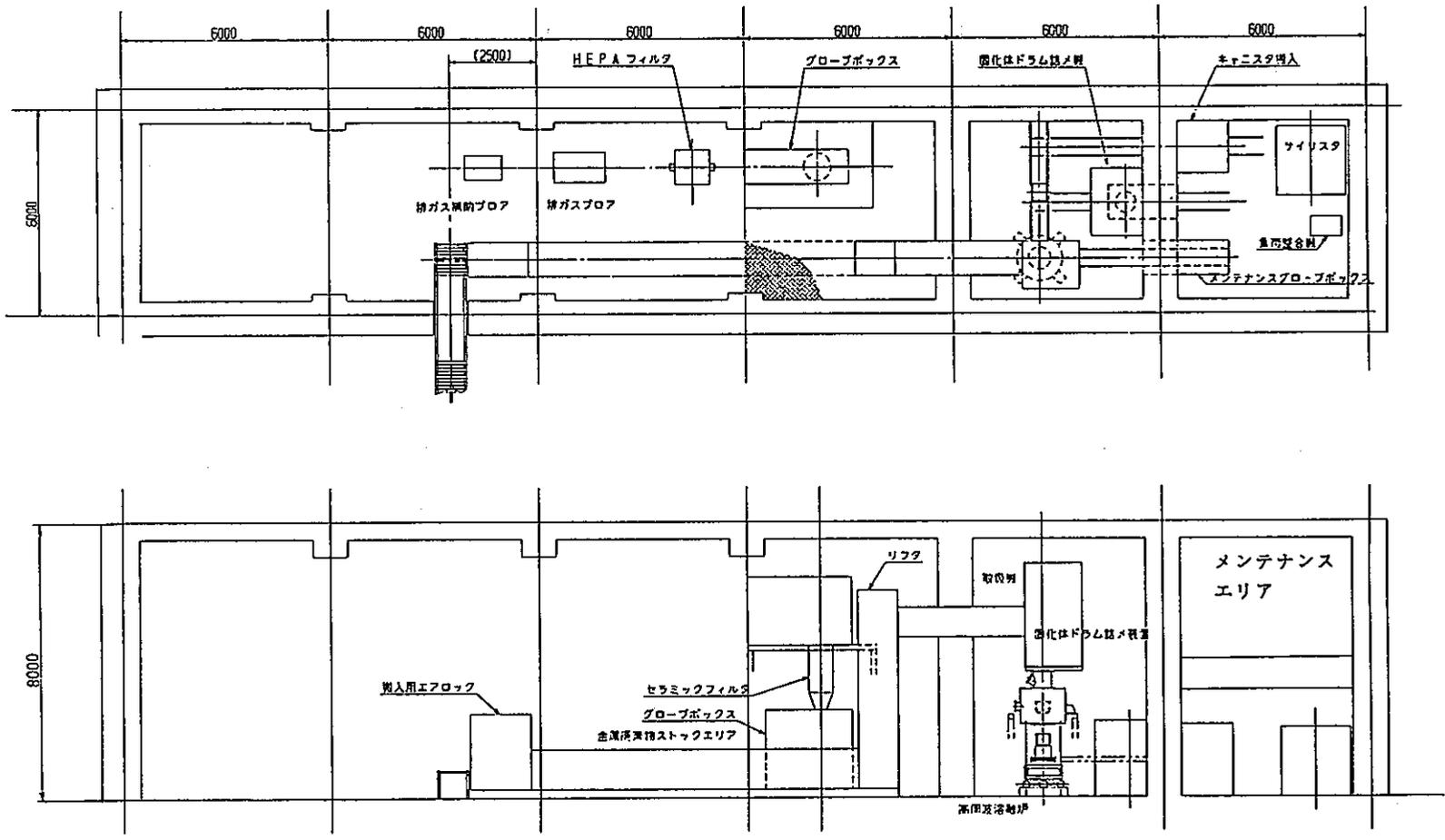


図-1.2-10 インキャンメルト方式配置例 (αホール型)

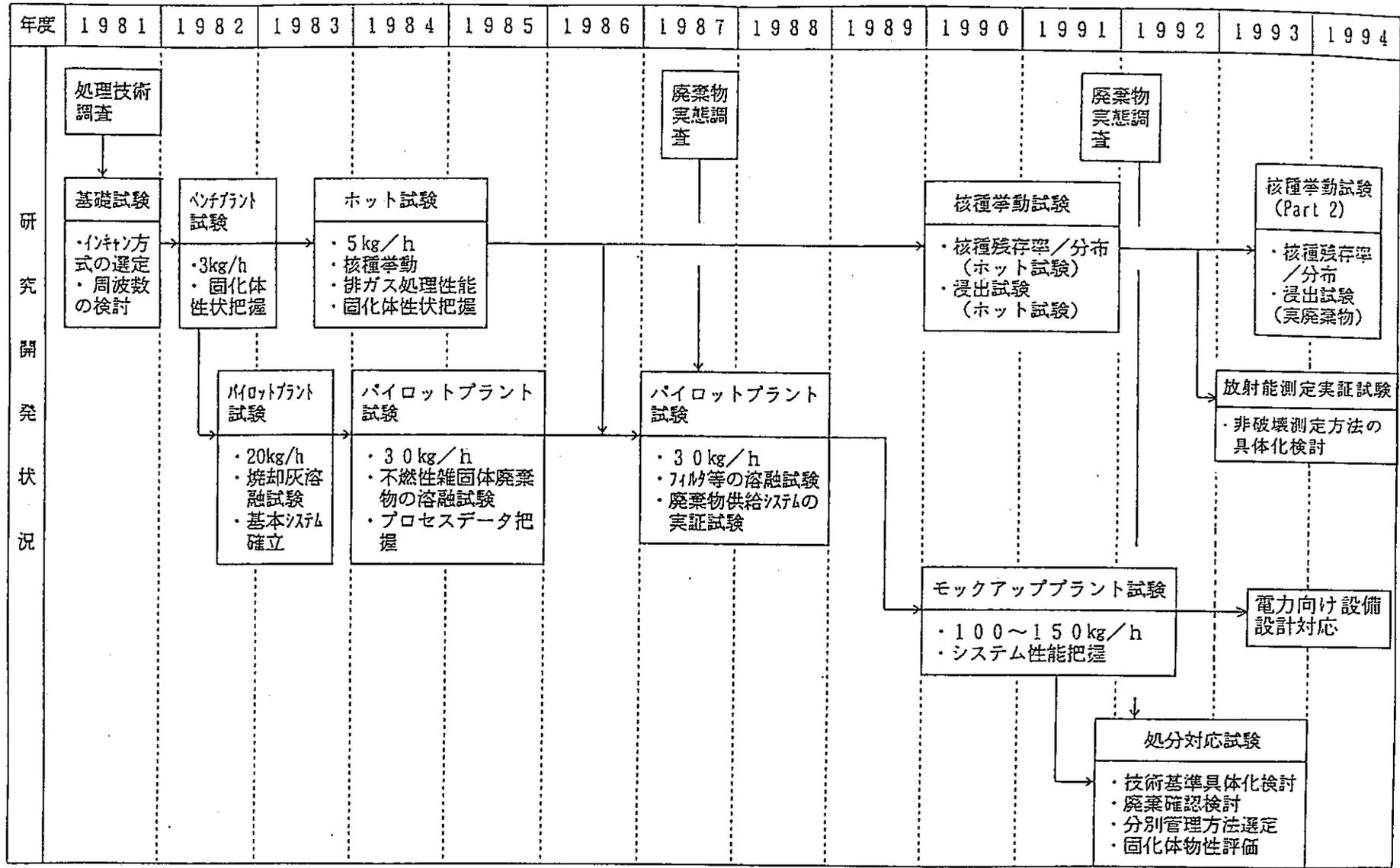


図-1.2-11 溶融固化システムの研究・開発状況

表-1.2-1 インキャンメルト方式炉(100kw規模)のユーティリティリスト

	使用量	使用圧力	主な用途	備考
冷却水	10m ³ /h	3kg/cm ²	溶融炉冷却用	
圧縮空気	30Nm ³ /h	5kg/cm ²	シリンダ駆動用 パージ用	
常用電源	250KVA	—	溶融炉 排ガスブロワ等システム機器 装置類のモータ 盤内電源	
非常用電源	30KVA	—	冷却水循環系 排ガス補助ブロワ 制御電源	
熱負荷	25000kcal/h	—	装置設置エリア内	

1.3 課題の整理・検討

インキャンメルト方式炉に関し、 α 廃棄物処理設備としての次の技術的課題の整理・検討を行った。

- ① 廃棄物供給系
- ② 装置安全性
- ③ 保守性

1.3.1 廃棄物供給系

廃棄物供給系として、以下の検討を実施した。

- ① 廃棄物供給寸法
- ② 供給型式
- ③ スラグ効果

(1) 廃棄物供給寸法

a. 最大供給可能寸法

インキャンメルト方式炉では、廃棄物を上方よりキャン内に投入するため、廃棄物の供給可能寸法は、キャンの内径寸法により、決定される。

一方、キャンの内径寸法は、パッケージの形態により決定されるが、 α 金属廃棄物の溶融体は、200ℓ内張ドラム(D-50)相当に収納して保管されることを考慮すると、表-1.1(2)-1に示した4種類のパッケージ形態が考えられる。以下に各CASEでの切断寸法を示す。尚、切断寸法は、D-50容器等へのキャン挿入のための取扱い代(片側約10～15mm)及びキャンの厚み(約20～30mm)を考慮して設定した。

- | | |
|---------|--|
| CASE① | 200ℓドラムにキャンを挿入し、D-50相当厚みのセメントモルタルを充填。切断寸法は ϕ 450mm以下。 |
| CASE②,③ | 200ℓ内張ドラム(D-50)に60ℓあるいは、30ℓ規模のキャンを挿入。切断寸法は ϕ 350mm以下。 |

CASE④ 200ℓ内張ドラム(D-50)に8ℓ規模のキャンを挿入。切断寸法は
φ150mm以下。

上記CASEを比較すると、セメントモルタルを充填しない方が、将来の処分対応
に対し、フレキシビリティが高い。このため、CASE②,③,④が実用的であると考
えられ、最大供給可能寸法としてはφ350mm程度となる。

b. 切断程度の検討

前項の検討により、溶融炉の前処理としての廃棄物の切断寸法は、CASE②,③
では最大φ350mm、CASE④では最大φ150mmとなる。

この両者を比較すると、切断寸法に反比例して切断工数が増加し、また、それ
に伴い発生する切りくず、ダスト等の二次廃棄物も増加することは明らかであ
る。従って、切断寸法は大きい方が好ましく、CASE②,③の選定が好ましい形と
なる。

但し、最終的には、溶融炉の前工程である解体・除染設備での廃棄物の取扱性を
考慮して決定する必要がある。

(2) 供給型式

a. 受入方式

金属廃棄物の切断・除染セルより溶融炉への受入型式としては、両者をグローブボックス等で連結できると考えると、次の2種類がある。

- ① 容器に入れた廃棄物を受け入れる
- ② 廃棄物のみを受け入れる

この内②の廃棄物のみを受け入れる方式では、切断・除染セルと溶融炉投入部が近傍にあり、コンベア等で一次的に移送できる場合には、比較的容易に輸送が可能である。しかし、垂直方向の輸送を伴う場合には、バケットコンベア等が必要になり、形状を特定できない金属廃棄物の輸送は複雑な機構が必要でトラブルが生じやすく、 α 廃棄物用としては不適と考えられる。このため、廃棄物の受入方式としては、容器で受け入れるシステムが望ましく、以下の検討は容器受入を前提として行うものとする。

尚、容器サイズはるつぼサイズを30ℓとすると、廃棄物の供給性を考慮すると、20ℓ程度が適正規模である。また、1容器あたりの廃棄物重量は、充填密度を0.5程度と想定すると、10kg/容器となる。

b. 溶融炉への供給方式

溶融炉への廃棄物供給方式としては各種あるが、検討の前提条件として、溶融炉と廃棄物供給部間には、次のシステムを設けるものとする。

- 熱しゃへい用ダンパ
- 圧力バウンダリ、エアシール用の2重ダンパ

溶融炉への供給方式としては、次の4種類が考えられる。その概要図を表1.3.1(2)-1のシステム概要に示す。

- ① 直接供給方式 溶融炉上部で、受け入れた容器から転倒等により廃棄物を取りだし、2重ダンパを介して自重により溶融炉に供給。容器はリサイクルする。

- ② 投入バケツ方式 溶融炉上側部で受け入れた容器から転倒等により廃棄物を取りだし、投入用バケツに詰め替える。投入用バケツは水平移動した後、昇降機によりキャニスタ近傍まで下降し、バケツ下部の蓋を開けることにより廃棄物のみを溶融炉に投入。容器、投入用バケツはリサイクルする。尚、この方式は、 $\beta\gamma$ 用としてデザインされている日本ガイシ(株)モックアッププラントで採用している方式である。
- ③ 投入容器方式 受入容器を投入容器として用いるとともに、そのまま溶融する方式で、投入容器は水平移動した後、昇降機によりキャニスタ近傍まで下降し溶融炉に投入。受入容器は使い捨てとなる。
- ④ 投入かご方式 受入容器形状をかご式とする。その他は③と同等である。

以上4方式について、システム構成、廃棄物の供給性、切断寸法、溶湯の跳ね、処理速度、消耗品について比較評価を実施した。その結果を表-1.3.1(2)-1.に示す。

比較表に示すように①の直接供給方式は、供給部の構造が簡単、消耗品がないというメリットがあるが、廃棄物の詰め替え時、ダンパ部移動時にブリッジ等により閉塞する可能性がある。また比較的高い位置からの投入となるため溶湯の跳ねを考慮する必要があるという問題があり、 α 廃棄物向けシステムとしては不適と考えられる。

②の投入バケツ方式は、バケツに詰め替え、キャニスタ近傍まで下降し溶融炉に投入するため①に比べ溶湯の跳ねはない。しかし、システムがやや複雑となる問題がある。

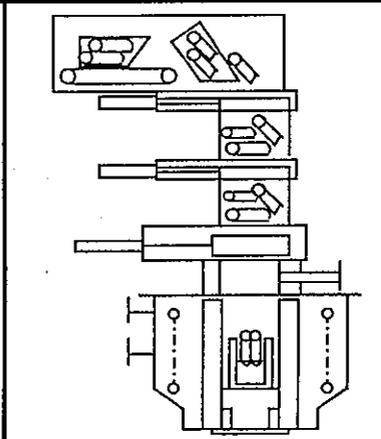
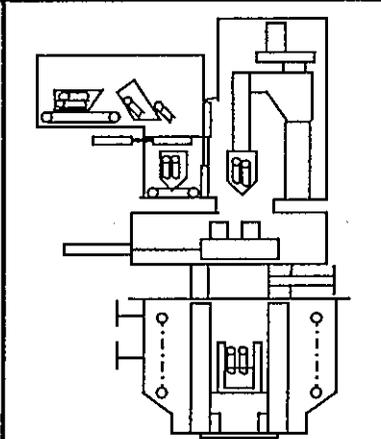
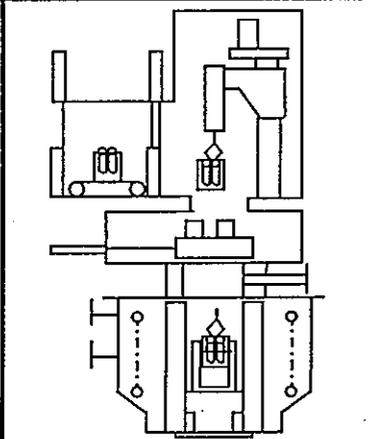
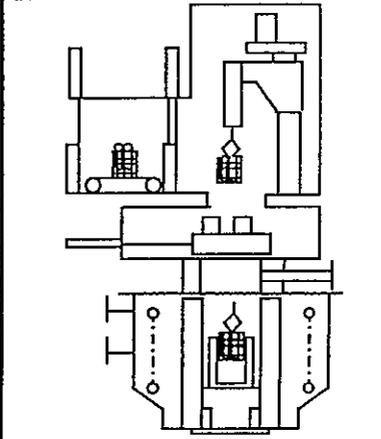
③の投入容器方式は、容器ごと溶融するため、廃棄物の閉塞はなく運転性は良好と考えられる。しかしながら、容器投入時は、廃棄物と溶湯が直接接触しないため、熱エネルギーの伝達性が悪いことが予想され、引いては処理速度の低下につながる可能性がある。また、容器が消耗品となるため低コスト化の工夫が必要で

ある。

④の投入かご方式は、投入容器をメッシュ状のかごとすることにより、上記③の課題解消を図ったものである。つまり、投入時には、メッシュより溶湯が浸入するため、熱エネルギーの伝達性は改善される。また、メッシュとすることにより軽量化できコスト的にも安価とできる。唯一懸念される点は、メッシュとすることによりかごからの廃棄物のこぼれであるが、これは、除染を実施したあとのためルーズ汚染は無視できると考えられるため、本型式は充分適用性があると判断される。

以上述べたように供給方式としては、投入かご方式を選定するものとする。

表-1.3.1(2)-1 廃棄物の投入方式の比較

	コンベア直接供給方式	投入バケット方式	投入容器方式	投入かご方式
廃棄物受入形態	容器に詰めて受入、容器はリサイクル	容器に詰めて受入、容器はリサイクル	投入容器で受入、そのまま溶融	投入かごで受入、そのまま溶融
システム	容器のリサイクルシステム必要 ○	容器リサイクルシステム,昇降装置,バケット往復機構必要 △	昇降装置必要 ○	昇降装置必要 ○
廃棄物の供給性	投入ダンパ部で廃棄物が閉塞する可能性がある △	バケット詰替え時に廃棄物が閉塞の可能性がある △	問題なし ○	問題なし ○
切断寸法	閉塞を考慮すると比較的細かく切断必要 △	閉塞を考慮すると比較的細かく切断必要 △	投入容器サイズまで可 ○	投入かごサイズまで可 ○
溶湯の跳ね	高い位置での投入のため跳ねの対策必要 △	昇降装置により低い位置からの投入でき対策不要 ○	昇降装置により低い位置からの投入でき対策不要 ○	昇降装置により低い位置からの投入でき対策不要 ○
処理速度	速い ○	速い ○	やや低下する △	速い ○
消耗品	なし ○	少ない(バケット) ○	投入容器 △	投入かご ○
総合評価	消耗品はないがシステムの信頼性に問題がある △	システムが大型化する △	処理速度、消耗品にやや問題がある ○	システム簡略で信頼性が最も高い ◎
システム概要				

(3)スラグ効果

a.助剤の種類と量に関する調査・検討

①はじめに

鉄鋼・製鉄分野等を始めとして、金属の溶融を行う場合、金属溶湯にはスラグ溶湯を形成する場合が大半である。製鉄の分野においては、スラグの主な役割は、溶鋼中の不要な成分を取り除くことである。

ここで、溶鋼から不要な成分を取り除く方法としては、スラグを用いた化学反応による方法と揮発による方法がある。これと加熱方法との組み合わせで表-1.3.1(3)-1に示すような多種類の溶融方法が存在する。

スラグを用いた金属溶湯からの不純物の除去は、基本的には不純物元素を酸化してスラグ層に取り込むことで行う。この反応は主にスラグ溶湯と金属溶湯の境界面で生じる⁶⁾。

界面における元素の挙動は、スラグの物理的、化学的性質に影響を受ける。例えば、溶鋼中のリンを取り除く場合には表-1.3.1(3)-2に示す条件を満たすスラグを用いることが望ましく、溶鋼中の水素を取り除く場合には表-1.3.1(3)-3に示す条件を満たすスラグを用いることが望ましい⁶⁾。

α 金属廃棄物溶融炉においては、元素の(核種の)挙動を理論的に説明しやすい状況とすることが必要と考えられる。この観点からは、スラグ層には表-1.3.1(3)-2, 表-1.3.1(3)-3に示した条件を参考として、次の機能が必要と考える。

i 溶融時に金属溶湯表面全体を覆う容積がある。

ii 十分な流動性を持つ。

なお、 α 核種は溶融時にはスラグへ移行するとの報告がある⁷⁾。したがって地下水等とスラグの接触時にスラグに核種の閉じ込め性を期待する場合には、スラグに次の機能が必要と考える。

iii 耐水性に優れる。

②スラグの組成

(i)構成成分

スラグの構成成分は主にCaO、SiO₂、Al₂O₃、FeO等である。製錬スラグの組成例を表-1.3.1(3)-4 転炉スラグの組成例を表-1.3.1(3)-5、高炉スラグの組成例を表-1.3.1(3)-6、その他の炉等の組成例を表-1.3.1(3)-7に示す。転炉スラグで塩基度が大きい場合には、スラグ化しないフリーCaOの存在が確認されている。フリーCaOは吸湿性を持ち、スラグの耐久性に悪影響を与えることが知られている6)。

(ii)成分元素酸化物の性質

スラグを構成する酸化物は、大きく酸性酸化物と塩基性酸化物に分かれる。酸性酸化物の代表はSiO₂、塩基性酸化物の代表はCaOである。ここでの酸性、塩基性は各元素の酸素との結び付きの強さを表している。酸性酸化物は酸素との結び付きが強いもの、塩基性酸化物は酸素との結び付きが弱いものである8)。鉄鋼製錬スラグにおいてはSiO₂、TiO₂、Al₂O₃等を酸性酸化物、CaO、MnO、FeO等を塩基性酸化物として扱う(表-1.3.1(3)-8)。

スラグはミクロには元素と酸素とが結び付いた網目状の組織である(図-1.3.1(3)-1)。スラグ中において、酸性酸化物は網目状の組織を形成し、塩基性酸化物は網目構造中では酸素との結合を断ち切る役割を果たす。したがって、酸性酸化物を網目形成酸化物、塩基性酸化物を網目修飾酸化物と呼ぶ。また、網目形成酸化物、網目修飾酸化物の両方の性質を示す酸化物を両性酸化物と呼ぶ。各元素の酸化物は表-1.3.1(3)-8の様に分類される6)。

基本的には網目形成酸化物が多いほどスラグ溶湯の粘性は高く、逆に網目修飾酸化物が多いほど粘性は低くなる。したがって、スラグに求める機能として挙げた「十分な流動性」を満足するためには、これらの適切な割合を把握すれば良い。

一般に、網目形成酸化物と網目修飾酸化物の存在割合を「塩基度」と定義して、スラグの性質を議論する上での指標の1つとして用いる。塩基度には幾つか

の求め方があるが、「CaOの存在率(wt%)/SiO₂(wt%)の存在率」等が用いられる。したがって、以下、本検討においてもこれを塩基度の定義として用いる。

(iii)塩基度と元素(核種)の溶融時の挙動

スラグは塩基度によって性質が異なることから、用途に応じて塩基度を調整する。但し元素(核種)の溶融時の全ての挙動について影響を与えるものではないと考えられる。

溶融時の挙動について、塩基度と元素の挙動に相関が認められた例としては、スラグによる溶鋼からの脱硫・脱リンの効果(図-1.3.1(3)-2)、また、炭素鋼あるいはステンレス鋼を造滓剤とともに溶融した場合のCs-137のスラグへの残存率⁹⁾がある。具体的には溶鋼からの脱硫・脱リンの効果はスラグの塩基度が高いほど大きく、また、Cs-137のスラグへの残存率は、塩基度が0.3～3.0の範囲で塩基度が高いほど小さい値となった。また、スラグ層として保温材、及び組成の異なる2種類の焼却灰を用いた場合において、Cs-134の残存率は50～70%程度の範囲に分布した¹⁰⁾。

逆に相関が認められなかった例としては、炭素鋼あるいはステンレス鋼を造滓剤とともに溶融した場合のCo-60、Cs-137、Zn-65、Sr-85の定性的な分布(金属とスラグ間)挙動、およびCo-60、Zn-65、Sr-85の定量的な分布がある。具体的には、Co-60は金属側へ分布し、排ガス系への移行は認められなかった。Zn-65は金属側へ分布し、<20%程度が排気系へ移行した。Sr-85はスラグ層へ移行し、排ガス系への移行は認められなかった。Cs-137はスラグ側へ移行した⁹⁾。

また、スラグ層として保温材、及び組成の異なる2種類の焼却灰を用いた場合において、C-14、Co-60、Ni-63、Sr-85、Tc-99、I-131の残存/分布挙動、及びCs-134の分布挙動に違いは認められなかった¹⁰⁾。

以上の結果からは、元素がスラグ側へ分布し、かつ溶融条件において揮発が認められた元素(核種)の挙動について、核種の残存率がスラグ塩基度に依存する傾向が認められる。 α 核種(U-235、U-238、Pu-241)については、同様の溶融条件においてスラグ側に分布し揮発は認められていない⁷⁾。

したがって、 α 核種の溶融時の残存・分布挙動に関してはスラグの塩基度の影響は小さいと考える。このことから、 α 核種の挙動の観点からはスラグ組成の制約条件は特に認められない。したがって、スラグ組成は流動性やスラグの代表的組成(表-1.3.1(3)-4、-5、-6、-7)等を考慮して決定すれば良いと考える。

(iv)塩基度とスラグの耐水性

スラグは、網目形成酸化物を十分量含む場合、ガラス(セラミック)化する。したがって耐水性に関してはガラスに関する知見が適用可能である。スラグの耐水性に関しては別項に記載するが、基本的には網目形成酸化物は耐水性を高め、網目修飾酸化物は元素ごとに耐水性への寄与が異なる¹⁾。

③スラグに求める機能と助剤成分

金属単独での溶融を考えた場合においても、核種の挙動等を考慮するとスラグ層の形成が必要と考える。スラグを形成する場合には、網目形成酸化物および網目修飾酸化物が必要である。

本検討ではスラグに求める機能として、以下の条件を挙げた。

- i 溶融時に金属溶湯表面全体を覆う容積がある。
- ii 十分な流動性を持つ。
- iii 耐水性に優れる。

先の検討の結果、これらの内iiとiiiを満足するためには、網目形成酸化物と網目修飾酸化物が適切な割合で共存することが必要である。

金属単独での溶融条件では、スラグ成分として供給されるのは酸化鉄を主体とした微量のサビのみであり、網目形成酸化物の供給は期待できない。したがって網目形成酸化物を含む助剤の供給が必要と考える。

鉄鋼分野で助剤として用いられているスラグ原料と供給量を表-1.3.1(3)-9に示す⁶⁾。ここで軽焼ドロマイトとは生ドロマイトを900~1,000°Cで焼成したものである。各産地ごとの石灰石、およびドロマイトの化学成分を表-1.3.1(3)-10、-11に示す⁶⁾。

本検討では、将来的には、形成したスラグの特性などに関する検討・評価も実施が必要となる場合が想定される。したがって可能な限り単純な系を選定することとし、表に示したスラグ成分のうち、網目形成元素、網目修飾元素それぞれの代表的形態として、 SiO_2 、 CaCO_3 を用いることが適切と考える。(表-1.3.1(3)-12)なお CaCO_3 については 898°C 付近の温度において二酸化炭素と酸化カルシウム(CaO)に分解する¹²⁾。炭素鋼・ステンレス鋼等の溶融温度($1,400 \sim 1,500^\circ\text{C}$ 程度)を考慮すると、 CaO を用いても同様と考える。

④助剤の組成

助剤の組成として検討する必要があるのは、 SiO_2 、 CaCO_3 (CaO)の混合率(塩基度)である。混合率は、一般的なスラグの組成を参考として設定することとした。

表-1.3.1(3)-4、-5、-6、-7に示した通常のスラグ組成においては、多くの場合1から3の範囲内であった。また、塩基度(CaO/SiO_2)が3を超える場合にフリー CaO の存在が認められた。フリー CaO は耐水性に悪影響を与えることが知られている。本検討においてはこれを参考として、検討すべき塩基度としては最大3周辺の範囲が適切と考える。

⑤助剤の添加タイミング

金属廃棄物の溶融時には、金属廃棄物を一度に全量投入することが困難であるため、分割して炉内に投入することとなる。溶融の対象とする金属廃棄物には α 核種の存在が予想されるため、核種の分布挙動の観点から、溶融当初よりスラグ層が存在することが望ましい。

したがって、溶融開始当初の段階で助剤を投入する必要があると考える。

⑥助剤の量

助剤の量に関しては、スラグに求められる機能の1つとして挙げた、「溶融時に金属溶湯表面全体を覆う容積がある」ことを満たす量であれば良い。基本的に

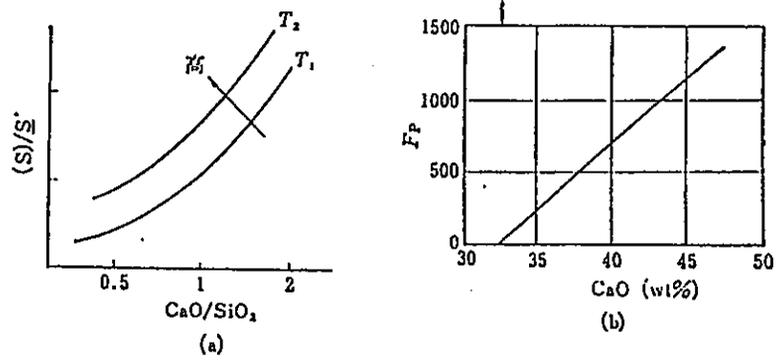
は、適正なスラグ溶湯の厚さを把握することで、スラグ量を設定可能と考える。必要な量は炉のスケールによって設定する事となる。

助剤の必要量に関しては、試験による確認が必要であるが、オーダーとしては、金属量に対し2~3wt%程度と考える。

⑦まとめ

溶融対象とする廃棄物に含まれる核種の溶融時の挙動を考慮して、金属廃棄物溶融時には助剤の添加が必要と判断した。次に金属廃棄物を溶融処理する場合の助剤の必要要件を整理し、使用する助剤の組成、添加タイミング、使用量について検討を行った。結果のまとめを表-1.3.1(3)-13に示す。

助剤の組成に関しては、 SiO_2 及び CaCO_3 (または CaO)を用い、混合率は塩基度として1~3の周辺とすることが適切と考えた。助剤の添加タイミングについては溶融開始当初からの添加が有効と考えた。助剤の使用量については、金属量に対し2~3wt%程度と考えられた。



(a) 脱硫率と塩基度の関係 (模式図) ($T_2 > T_1$)

(b) $F_P = \frac{\%P_2O_5}{\%P_2O_5 + \%FeO}$ と CaO との関係

図-1.3.1(3)-2 スラグの塩基度と脱硫・脱リンの効果

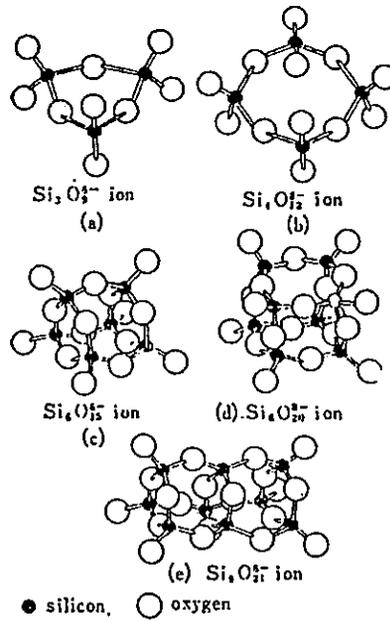


図-1.3.1(3)-1 スラグのマイクロ組織

表-1.3.1(3)-1 溶融方式の一例

精錬の原理	精錬の方法	加熱方法		
		誘導	ジュール熱	アーク
化学反応	スラグ (ガスバブリング 併用もある)	高周波 低周波	ESR	アーク炉
蒸発	真空溶解 (ガスバブリング 併用もある)	高周波 低周波 (VIM,等)	ESR	VAR

VIM:真空誘導溶解

ESR:エレクトロスラグ再溶解

VAR:真空アーク再溶解

*プラズマに関しては、鋼等の溶解精錬に使用した例は報告されていない6)

表-1.3.1(3)-2 脱リン作用を促進する条件6)

条件
(1)比較的低温のうちに脱リン作用が進行する。 (2)スラグ中の酸化鉄(FeO)が多い。 (3)スラグの塩基度が高い。 (4)スラグの流動性が良い。 (5)スラグ中のリン酸分(P ₂ O ₅)が低い。 (6)スラグ中に、Si、Mn、Crなど脱リンを妨げる元素が少ない。 (7)ホタル石の主成分(CaF ₂)は脱リンを促進する。

表-1.3.1(3)-3 脱水素を有利にする条件6)

条件
(1)鋼浴温度が十分に高いこと。
(2)鋼浴中にSi、Mn、およびCrなど脱酸性元素を過度に含まないこと。
(3)適度に泡立ったスラグで、あまり厚くないこと。
(4)脱酸速度が大きいこと(沸騰がさかんなこと)。
(5)酸化剤や添加剤に水分を含まないこと。
(6)大気中の湿度が低いこと。

表-1.3.1(3)-4 製錬スラグの組成例8)

種類	化学組成(wt%)					
	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	MnO	FeO
Cu溶鋳炉	39	17	9	3	0.2	30
Fe溶鋳炉	32	45	15	3	2.5	0.3
塩基性平炉	13	43	4	6	15	12

*塩基性平炉：炉内ライニングが塩基性である平炉。平炉は燃料を溶解室内で燃焼して内容物を溶解する炉であるが、国内では衰退し現在は使われていない。

表-1.3.1(3)-5 転炉スラグの組成例6)

塩基度	化学組成(wt%)												
	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	MnO	T-Fe	FeO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	F	S	フリーCaO
<3	17~ 19	47~ 48	2~3	2	5~6	13~ 16	9~ 14	4~9	2	2	<1	< 0.2	<1
3~4	13~ 20	48~ 59	1~6	1~ 10	3~6	13~ 20	7~ 15	2~ 10	1~2	1~3	<1 ~3	< 0.2	0.2~ 11
4~5	10~ 15	43~ 54	1~3	1~ 11	3~6	10~ 15	10~ 22	5~ 12	1~2	1~2	2~ 4	< 0.2	0.2~ 16

*フリーCaO：スラグとして固化しなかったCaO

表-1.3.1(3)-6 高炉スラグの組成例6)

種類	化学組成(wt%)							
	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	MnO	FeO	TiO ₂	S
A	34.2	40.4	14.6	6.9	0.70	0.30	1.61	1.02
B	32.5	39.5	15.3	5.9	0.78	0.48	2.14	1.08
C	35.0	43.4	12.8	3.1	0.54	0.65	0.85	1.30
D	33.9	41.5	14.2	6.8	0.40	0.38	0.71	0.98
E	33.1	40.5	13.1	5.8	0.79	0.41	1.34	1.00
F	34.5	41.5	15.2	4.9	0.73	0.60	0.94	0.80
G	32.3	41.1	14.2	6.5	0.59	0.72	1.69	0.92
H	33.5	41.2	14.5	5.7	0.58	0.33	1.62	1.01

表-1.3.1(3)-7 各種スラグ等の組成例13)

種類	化学組成(wt%)							
	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	MnO	T-Fe	TiO ₂	S
高炉スラグ	33.8	42.0	14.4	6.7	0.3	0.3*	1.0	0.84
転炉スラグ	13.8	44.3	1.5	6.4	5.3	17.5	1.5	0.07
電気炉 酸化スラグ	19.0	38.0	7.0	6.0	6.0	15.2	0.7	0.38
電気炉 還元スラグ	27.0	51.0	9.0	7.0	1.0	1.5	0.7	0.50
山土	59.6	0.4	22.0	0.8	0.2	---	---	0.01
安山岩	59.6	5.8	17.3	2.8	0.2	3.1*	0.8	---

*FeOとして。

表-1.3.1(3)-8 酸化物の分類6)

網目形成酸化物	網目修飾酸化物	両性酸化物
SiO_2 P_2O_5 Cr_2O_3 WO_3 V_2O_5 MoO_2	CaO MnO FeO MgO Na_2O K_2O	Al_2O_3 Fe_2O_3 MgO

表-1.3.1(3)-9 スラグ原料と供給量

網目修飾酸化物			網目形成酸化物		
原料	原単位 (kg/ton)	備考	原料	原単位 (kg/ton)	備考
ケイ石質 (SiO_2)	0 ~ 5	珪石レンガ ケイ砂	石灰石	0 ~ 20	---
転炉スラグ	0 ~ 20	---	生石灰 (CaCO_3)	20 ~ 60	---
---	---	---	ホタル石 (CaF_2)	0 ~ 5	耐火物への 影響要考慮
---	---	---	生ドロマイト (MgO 比率高 める)	0 ~ 20	炉内レンガ の溶損防止
---	---	---	軽焼 ドロマイト	0 ~ 40	溶損防止に 極めて有効

表-1.3.1(3)-10 各産地の石灰石の化学成分6)

産地	化学成分(wt%)					
	Ig.loss	CaO	MgO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃
岩手県弁天山	43.71	54.80	0.47	0.14	0.02	0.06
栃木県葛生	43.80	54.15	1.14	0.22	0.03	0.05
岐阜県赤坂	43.32	55.25	0.49	0.22	0.02	0.06
高知県稲生	43.70	55.10	0.49	0.22	0.01	0.10
大分県津久見	43.48	55.40	0.25	0.04	0.01	0.03

*岐阜県春日のFe₂O₃の値は、Fe₂O₃+Al₂O₃での値。

表-1.3.1(3)-11 各産地のドロマイトの化学成分6)

産地	化学成分(wt%)					
	Ig.loss	CaO	MgO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃
栃木県羽鶴	46.33	33.33	19.58	0.16	0.15	0.13
岐阜県春日	45.16	33.70	18.83	1.95	0.55	--
台湾花連港	46.87	31.66	20.13	0.45	0.37	0.41
韓国	---	30.58	21.10	0.75	0.33	0.25

*岐阜県春日のFe₂O₃の値は、Fe₂O₃+Al₂O₃での値。

表-1.3.1(3)-12 検討対象とするスラグ形成材

網目生成酸化物	網目修飾酸化物
SiO ₂	CaCO ₃ またはCaO

表-1.3.1(3)-13 スラグ効果に関する検討結果

検討事項	検討結果
助剤の必要性	核種によってはスラグ層へ分布する(α 核種含む)ことから、必要。
助剤の組成	SiO ₂ 、CaCO ₃ (またはCaO)を用いる。溶融状況によって他の成分の添加も考慮する。 塩基度としては3以下程度を目安とする。
助剤の添加タイミング	溶融開始当初より添加
助剤の量	金属量に対し2~3wt%

b.スラグの核種閉じ込め性の調査・検討

①はじめに

スラグに関しては、産業廃棄物としての有害物を対象とした溶出試験結果例の報告がある(表-1.3.1(3)-14)。これによれば、スラグは高い耐水性を持ち、核種についても核種閉じ込め性を持つことが期待できる。

また、保温材、焼却灰等を用いて作製したスラグ層の核種浸出率を測定した結果、浸出率は 10^{-6} ~ 10^{-7} g/cm²/d程度であり、高レベルガラス固化体と同等の核種閉じ込め性を持つことを確認した¹⁰⁾。

また、コンクリート中のような強アルカリ性の環境は、SiO₂の溶出が生じやすく、ガラスやスラグなどのセラミックスには厳しい環境である。セメント骨材に用いられるスラグは、このような環境においても安定であることが求められるため、溶出試験によって溶解シリカとアルカリ濃度の減少量を求め、安定性の判定を行っている¹³⁾。この判定法によれば、高炉スラグ材は強アルカリ環境下においても高い安定性を示すことが確認されている(図-1.3.1(3)-3)。

一方、スラグはその組成や構造の観点からは、ガラス(セラミック)と同一であり、ガラスに関する知見の適用が可能と考える。また、熔融した金属に関しては、炭素鋼とステンレス鋼が主体であることから、炭素鋼の腐食に関する知見の適用が可能と考える。

熔融した金属、あるいはスラグの核種閉じ込め性に関しては、廃棄体の表面積、接触する溶液の性質、求められる閉じ込め性(溶出率、 $1/y$)、閉じ込め性を期待する期間などによって評価の方針、試験等を設定する必要がある。したがって最終的な処分を検討していない現段階では、閉じ込め性に関する詳細な検討を行うことは困難である。

また特にスラグ層に関しては、特性が組成に強く依存することから、組成を設定していない段階での評価は困難である。したがって、本検討においてはガラスに関する知見の整理を行い、スラグの核種閉じ込め性評価に関する見通しを得ることとした。

② ガラスの化学組成と耐水性

ガラスの性質は、網目形成酸化物、網目修飾酸化物、中間酸化物の混合割合によって異なる。ここではガラスに含まれる代表的な元素(酸化物)について、耐水性に与える影響を整理した(表-1.3.1(3)-15)。

③ ガラスの構造安定性

ガラスあるいはセラミックは温度変化の影響によって構造が変化する可能性があるが、天然ガラスに関する研究から、通常的环境下では熱的構造変化は生じないことが確認されている¹⁴⁾。

④ 放射線照射の効果

ガラス固化体に関する研究から、線量の大半を占めると考えられる γ 線に関しては影響が認められていない¹⁴⁾。 α 、 β に関しても、溶融対象が除染後の金属廃棄物であることから大きな影響はないと考える。

⑤ ガラスの溶出メカニズム

常温付近における、ガラスの水への溶出はおおよそ次の様に進行すると考えられている。

- (i) 水との接触により、アルカリイオンと H_3O^+ 、 H^+ との間でイオン交換が生じる。
- (ii) 固化体表面でアルカリイオンが不足し、Si、B、Fe、Mn、Al等の水和物を含むゲル層が形成される。
- (iii) Siがゲル層表面から徐々にB、Fe、Mn、Al等とともに溶解する。Siの溶解形態は $\text{Si}(\text{OH})_4$ 等と考えられる。
- (iv) 中性付近での溶解度の小さいFe、Mn、Al等の水和物や酸化物がゲル層の外側に析出層を形成する。
- (v) iii、ivの過程が徐々に進行する。

以上の溶出メカニズムを踏まえた上で、長期間にわたる溶出挙動の評価に採用されている考え方は、溶液の飽和効果を重視する考え方、及びガラス母相の溶解とともに核種が溶出されるとする考え方の2つである15)。

⑥ ガラスの浸出率の設定

ガラスの浸出率の設定にあたっては、浸出率を用いる目的や、浸出率を用いた評価の考え方等を考慮する必要がある。例えば、長期的な平均浸出率を用いる場合や、浸出開始後ごく初期の値を用いる場合、あるいはある決められた期間内における浸出率を用いる場合が考えられる。

検討の1つの方針として、スラグの耐食性を他のガラスと比較する場合には、図-1.3.1(3)-4に示した図を用いて、多くのガラスの中での位置づけの明確化を図ること等も考えられる。

⑦ まとめ

スラグは有害物の溶出データ(表-1.3.1(3)-14)から、基本的に核種閉じ込め性に優れていることが期待できる。また、スラグの溶出に関しては、通常のガラスと同様の考え方が適用できるものと考えられる。

閉じ込め性の評価に当たっては、スラグの浸出率の設定を行い、固化体形状やサイズを考慮した上で固化体としての溶出率を設定する必要がある。今後更に核種閉じ込め性に関する検討を行う場合には、環境条件の設定、スラグ組成の設定、廃棄体としての固化体仕様の設定等を行う必要がある。

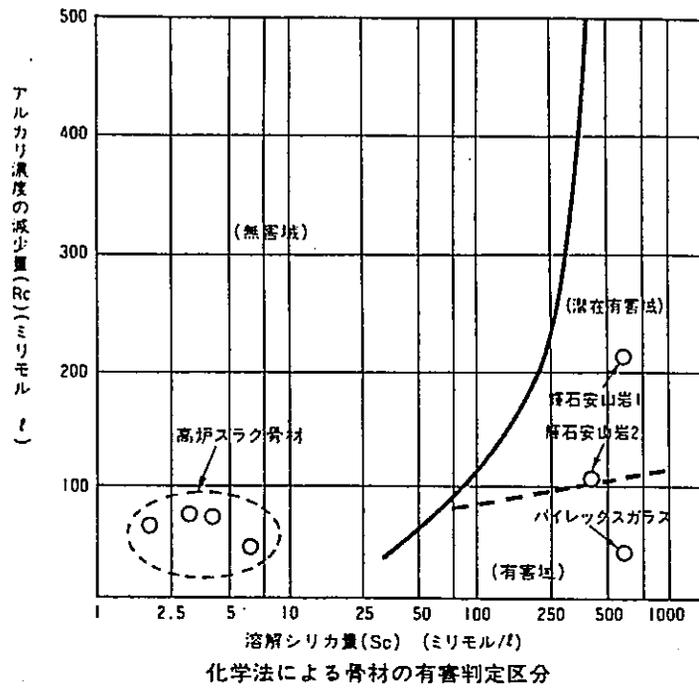


図-1.3.1(3)-3 化学法による骨材の有害判定区分(3)

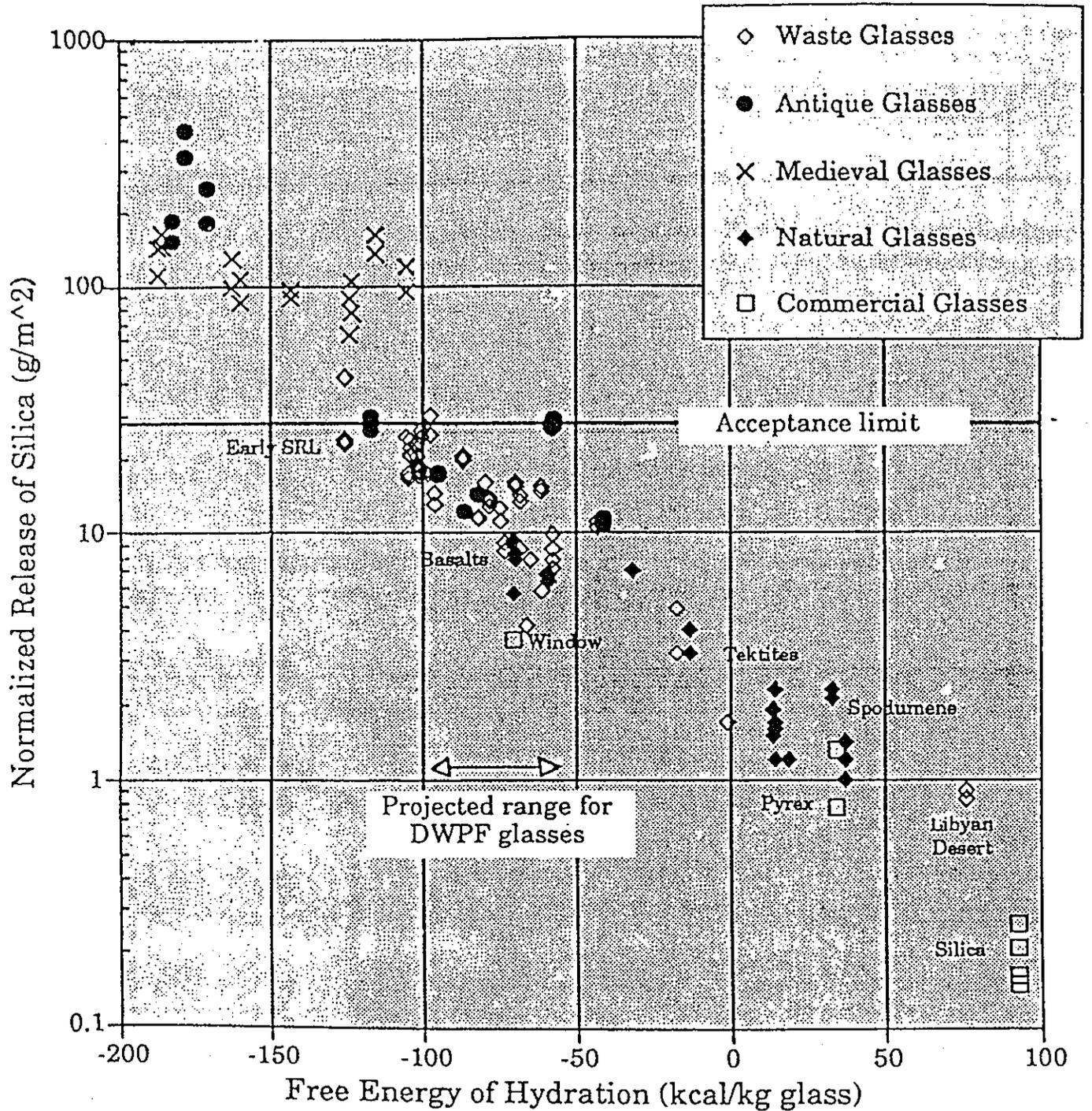


図-1.3.1(3)-4 スラグ成分の水和自由エネルギーとシリカの規格化浸出量の関係
 [MCC-1法、28日、蒸留水、90°Cにおけるデータ]16)

表-1.3.1(3)-14 有害物に関するスラグの溶出試験結果¹³⁾
(単位:mg/l)

	Cd または Cd化合物	Hg または Hg化合物	6価Cr または 化合物	Pb または Pb化合物	有機リン 化合物	As または As化合物
法定基準値	<0.3	<0.005	<1.5	<3	<1	<1.5
高炉スラグ 転炉スラグ 電気炉スラグ	検出限界 値以下	検出限界 値以下	検出限界 値以下	検出限界 値以下	検出限界 値以下	検出限界 値以下

「産業廃棄物に含まれる有害物の検定方法」により検定を行った。法定基準値は「有害な産業廃棄物に係る判定基準を定める総理府令」の埋立処分の場合の基準を示す。

表-1.3.1(3)-15 各種の元素とガラスの耐水性¹¹⁾¹⁷⁾¹⁸⁾

元素(酸化物)	効果
SiO ₂	網目形成酸化物。ガラスの基本成分。耐水性を高める。
B ₂ O ₃	網目形成酸化物。ガラスの粘度を低下させる。ホウケイ酸ガラスでは耐水性を弱めるが、pH緩衝効果があり長期的に溶出を制御できる点で有利。
Al ₂ O ₃	多すぎない限り網目形成酸化物となり、耐水性を高める。
CaO	網目修飾酸化物。耐水性は向上する
Na ₂ O	網目修飾酸化物。耐水性を低下させる。
Li ₂ O	網目修飾酸化物。耐水性を低下させる。
ZnO	網目修飾酸化物。耐水性は向上する。
ZrO ₂	量が少なければ網目形成酸化物となり耐水性向上。

1.3.2 装置安全性

装置の安全性として以下の項目について検討した。

- ①突沸防止対策
- ②供給時湯跳ね防止対策
- ③鋳型からの湯漏れ防止対策
- ④駆動系の安全性
- ⑤固化体搬送系の安全性
- ⑥ α 設備としての具備事項

(1) 突沸防止対策

a. 突沸を生じる金属

突沸は、化学大辞典によれば次のように述べられている。

「液体を熱して沸点に達しても沸騰しない場合、さらに加熱すると外部からの衝撃または異物の混入により突発的に激しく沸騰を起こす。これを突沸という。過熱現象の最も普通のものである。突沸の発端は器壁又は液中の塵埃に付着していた空気分子の小集団が核となり、液体内部に気泡を生じるためであると考えられている。」

上記の定義によれば、金属の溶融処理において、1500°Cの炭素鋼の溶湯中に、真鍮の塊を投入すると激しく沸騰し、溶湯を飛散させる現象は、正しくは突沸とはいえない。しかしながらこの急激な沸騰は、突沸現象に近いので、ここではこの現象を突沸と呼ぶこととする。

突沸現象は、溶湯の温度と投入した金属の沸点の関係で決定される。既に表1.1.1(1)-1に代表的な純金属と実用合金での融点と沸点について整理した。表1.1.1(1)-1に示すようにAl、Pb、Snは融点は低いですが、沸点は高いため、1500°Cの炭素鋼の溶湯中に大量に投入しても突沸現象は生じない。また、実用合金であるステンレス鋼、鋳鉄は、融点が高く同様に問題ない。

一方、Znは、融点が沸点ともに低く、金属溶湯中に沈みこむと突沸が生じる。

Znの実用合金としては真鍮がある。真鍮は、計装用のバルブ、継ぎ手で多用される材質である。

真鍮が溶湯中に投入された場合の現象を把握するため、モックアッププラントを用いて、従前実施した試験の結果を参考として表-1.3.2(1)-1,-2に示す。尚、真鍮の投入は、投入バケットで行い、溶湯の飛散状況は溶融炉上部に設けたのぞき窓及び、投入ダンパ部側面からの目視確認により、炉内圧力変動は炉本体のテストノズルに取りつけたビジグラフによる確認を実施した。表-1.3.2(1)-1,-2に示すように真鍮は、ダストの発生を伴ったものの炉内圧力の変動は観察されなかった。溶湯の盛り上がりや異常な音は観測されなかった。また、試験を通じて投入バケットは正常に作動した。試験後の目視確認では、キャニスタ及び炉内の耐火物は健全であった。溶湯は、真鍮重量数100gオーダーで飛散することが確認された。その状況を模式的に図-1.3.2(1)-1真鍮投入時の炉内状況に示す。

以上の結果に示すように、真鍮は、溶融対象物として積極的に受け入れることには問題があるが、分別を前提とした混入程度は特に問題はない。また、kgオーダーでの混入も問題がない。尚、汚染範囲を極力少なくするため、図-1.3.2(1)-2に示すように投入用昇降機には汚染拡大防止カバーを設置し、対策することが有効と考える。

尚、低沸点金属の他には金属部品内部への封入水が問題であるが、ここでは、切断除染等の前処理の段階で完全に除去されると考えられるため検討の対象外とした。

b. 低沸点金属の無害化の検討

真鍮を積極的に受け入れる場合には、次の分別による除去、仮焼による無害化、及び熔融処理過程での対応の3つの方法が考えられる。これらの比較を表1.3.2(1)-3低沸点金属の無害化方式の比較に示す。

① 分別による除去

この方式は、真鍮は、比較的用途が限られており、形状、色により識別し易いことを利用して人手により分別するものである。形状としては計装弁、継ぎ手等であり、色としては銅色である。分別した真鍮は、キャニスタへ加熱前に投入(予投入と呼ぶ)することにより、飛散させることなく熔融処理が可能である。長所は設備が不要であることであるが、反面、短所としては、人が介するので分別対象物を見逃す場合があることである。

この短所を補う方法としては、真鍮の自動分別装置が考えられるが、一般産業分野ではニーズがないためか、実用化されている装置は見当たらなかった。

② 仮焼による無害化

この方式は、金属廃棄物全体を亜鉛の沸点以上(1100～1300°C)で仮焼前処理し、真鍮中の亜鉛分を揮発させ、無害化するものである。仮焼を実施した廃棄物はそのまま熔融が可能である。長所は人が介さないので確実に処理できることである。一方、短所としては、高温の仮焼設備が必要で、コストが高くなる点である。

③ 熔融処理過程での対応

この方式は、熔融処理過程で、廃棄物を投入する前にキャニスタの温度を突沸が生じない温度に下げ(1300°C程度)、投入後温度を上げ熔融する。この操作を繰り返し熔融処理を行うものである。長所は熔融処理設備内で対応できる。短所は、熔融温度を上げ下げするため、エネルギー効率が悪く、処理速度が大幅に低下することである。この対策としては、電源容量を大きくすることで有る程度の対応は可能であるが、過剰設備となる問題がある。

以上の3方式を比較すると、真鍮は比較的用途、形状が限られており、目視による分別が容易なこと、溶融炉側である程度の許容量があること、また、万一多量に混入しても、飛散した溶湯が、耐火物に付着する程度であり、設備上問題ないことを考慮すると、分別による対応が、適用性が高い方法である。

表-1.3.2(1)-1 スラグ層への真鍮の投入試験結果

試験回数	投入量(g)	炉内圧	炉内状況
1	100	変動なし	溶湯飛散確認できず
2	300	変動なし	溶湯わずかに飛散
3	500	変動なし	坩堝上部耐火物近くまで飛散
4	1000	変動なし	炉上部耐火物近くまで飛散
5	1500	変動なし	炉上部ダンパ近くまで飛散

条件

- 1.溶湯種類 約100kgコンクリート等の無機物
- 2.溶融温度 1500°C
- 3.投入物 真鍮(Zn30%で真鍮バルブに使用されるもの)
サイズφ30mmのものを所定重量に切断
- 4.使用プラント 大規模炉
溶湯面からダンパ面まで約2m

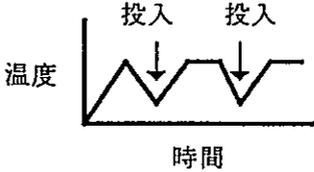
表-1.3.2(1)-2 金属層への真鍮の投入試験結果

試験回数	投入量(g)	炉内圧	溶融炉内状況
1	100	変動なし	溶湯飛散確認できず
2	300	変動なし	溶湯わずかに飛散。300gは1/4Bの弁重量に相当
3	500	変動なし	炉上部耐火物近くまで飛散
4	1000	変動なし	炉上部耐火物近くまで飛散
5	1500	変動なし	炉上部ダンパ近くまで飛散

条件

- 1.溶湯種類 約100kg炭素鋼
- 2.溶融温度 1500°C
- 3.投入物 真鍮(Zn30%で真鍮バルブに使用されるもの)
サイズφ30mmのものを所定重量に切断
- 4.使用プラント 大規模炉
溶湯面からダンパ面まで約2m

表-1.3.2(1)-3 低沸点物の無害化方式の比較

	分別による除去	仮焼による無害化	熔融過程での対応
方式	<p>真鍮は、比較的用途が限られており、形状、色により識別し易いことを利用して分別するものである。形状としては計装弁、継ぎ手等であり、色としては銅色である。</p> <p>分別は人手により実施。 分別した真鍮は、キャニスタへ予投入し、熔融処理が可能である。</p>	<p>金属廃棄物を亜鉛の沸点以上(1100～1300℃)で仮焼前処理し、真鍮中の亜鉛分を揮発させ、無害化するものである。</p> <p>仮焼を実施した廃棄物はそのまま熔融が可能である。</p>	<p>廃棄物を投入する前にキャニスタの温度を突沸が生じない温度に下げ(1300℃程度)、投入後温度を上げ熔融する。この操作を繰り返し熔融処理を行うものである。</p> 
長所	<ul style="list-style-type: none"> ・ 設備が不要である。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 人が介さないので確実である。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 熔融処理設備内で対応できる。
短所	<ul style="list-style-type: none"> ・ 人が介するので分別対象物を見逃す場合がある。 ・ 自動化するは開発が必要である。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 仮焼設備が必要である。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 処理速度が半分以下になるため、初期の電源容量を大きくする必要はある。 ・ エネルギー効率が悪い。
評価	<p>熔融炉側である程度の許容量があるため実用的な方法である。廃棄物調査を実施し、分別対象物の形状、量等を把握することが望ましい。</p> <p style="text-align: center;">○</p>	<p>仮焼設備が必要なため、コストが高くなる。</p> <p style="text-align: center;">△</p>	<p>熔融炉が過剰設備になる。分別対象量が、多量となる場合には、検討の余地がある。</p> <p style="text-align: center;">△</p>

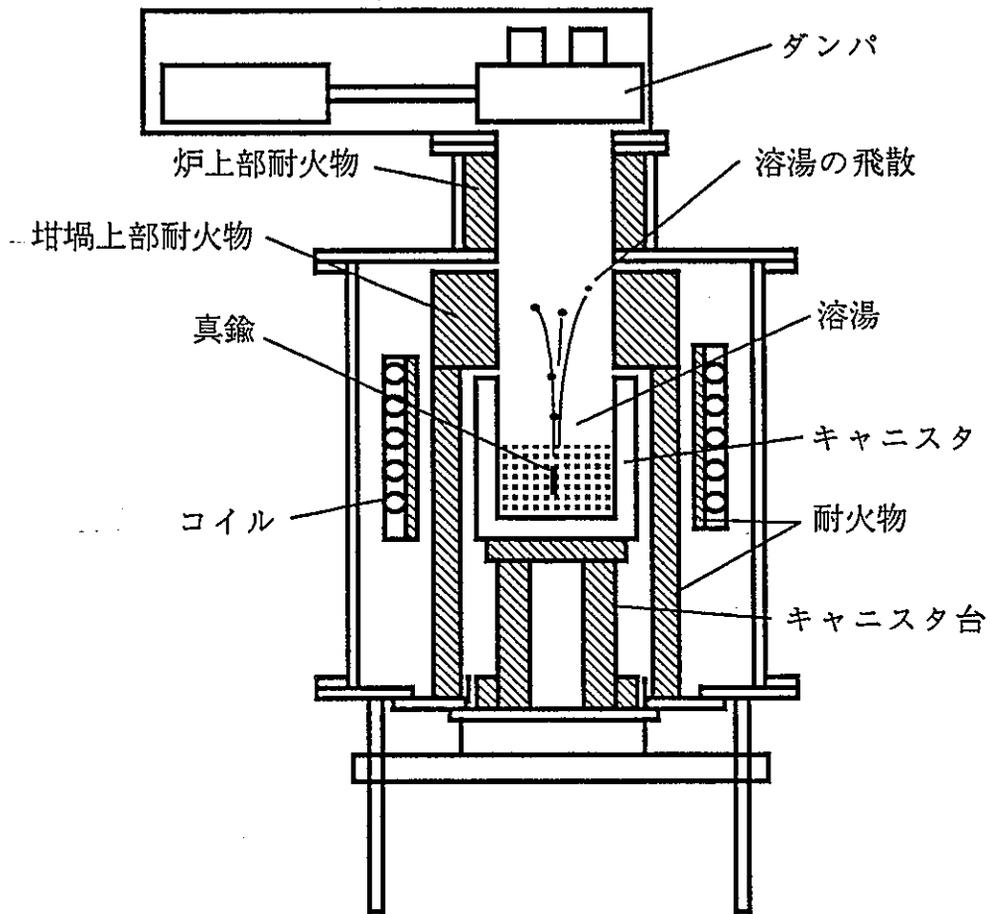


図-1.3.2(1)-1 真鋳投入時の炉内状況推定図

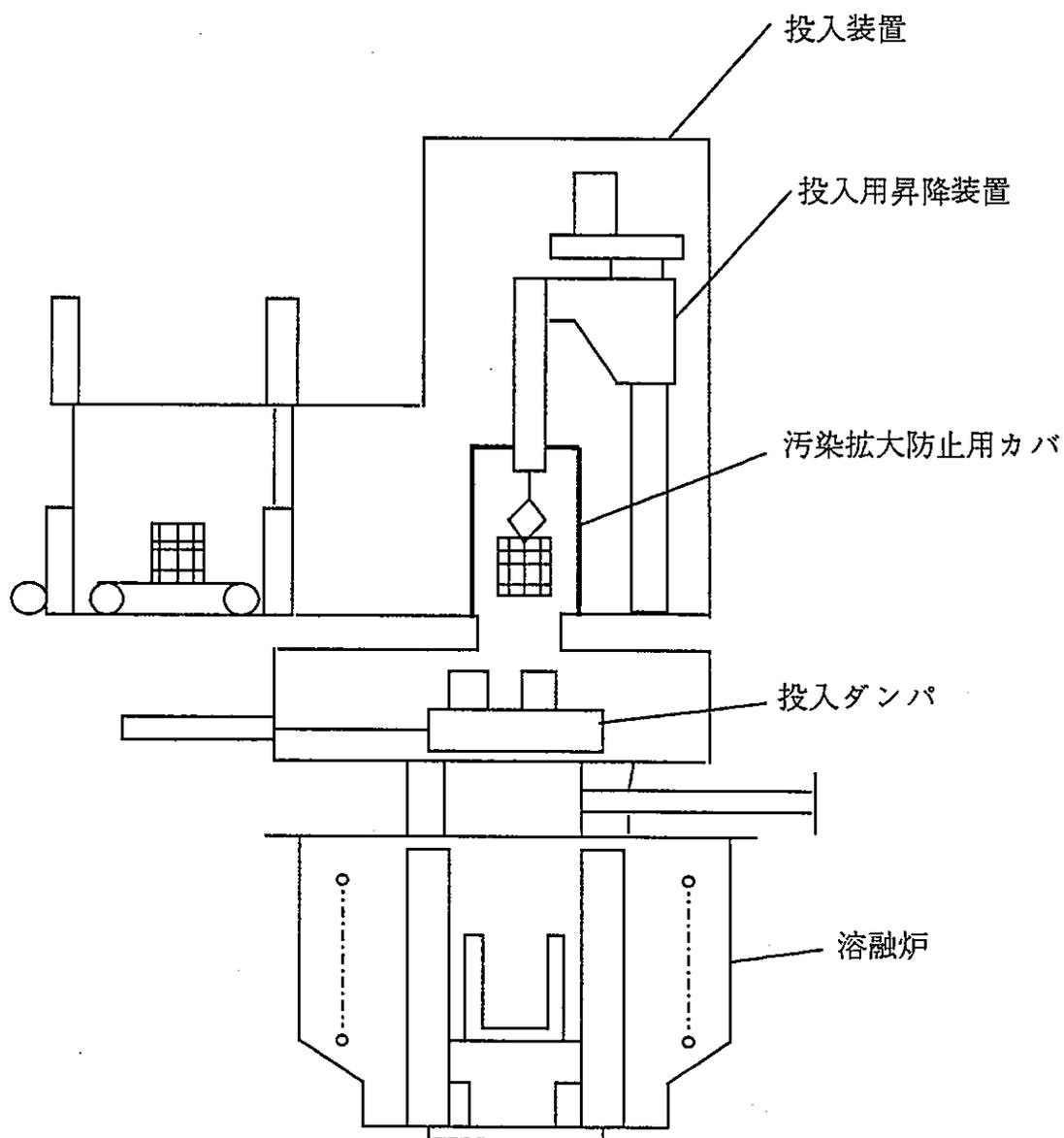


図-1.3.2(1)-2 廃棄物投入装置の汚染防止対策

(2) 供給時湯跳ね防止対策

廃棄物をキャニスタに供給する場合には、溶湯からの湯跳ね防止対策をとる必要がある。これは、湯跳ねによる耐火物の汚染を極力防止するために実施するものである。防止対策としては、1.3.1(2)の供給方式で検討したように投入用昇降機により、廃棄物をキャニスタ近傍まで降ろし、供給する方式が望ましい。

(3) 鋳型からの湯漏れ防止対策

a. 通常運転時の溶湯のレベル管理

溶融炉の最終運転段階では、溶湯レベルが上がってくるため、溶湯がキャニスタからオーバフローしないように、溶湯レベルの管理を行いながら廃棄物を投入する必要がある。管理方法としては、次の3種類がある。その概要を図-1.3.2(3)-1通常運転時の溶湯レベル管理方法に示す。

- ① 重量-容量管理 重量は、本来投入量及び投入間隔を管理するために設けるものであるが、大半の金属の比重が8前後であることを利用し、計算により概略の溶湯レベルを算出する方法である。この方式では金属の比重が比較的近接していることが条件となるが、アルミニウムが多い場合には、分別が必要である。
- ② ITVによる監視 炉本体上部にITVを設け、目視により溶湯レベルを監視しながら運転する方式である。目視確認のため確実である。
- ③ レベル計管理 炉本体上部にレーザ式レベル計を設け、溶湯レベルを測定する方式である。

以上を比較すると、ITV監視による運転が最適であるが、投入重量測定は必ず必要であることより重量計管理、ITV監視を併用することが望ましい。

b. 万一の湯漏れ防止対策

溶融炉運転中に、キャニスタが損傷し、溶湯がキャニスタ外部に流出した場合の対策について以下に述べる。

溶融炉の内部は図-1.3.2(3)-2A図に示すようになっている。発熱部はキャニスタとその中の溶湯であり、その周囲は、断熱のため耐火物でとりかこまれている。さらにコイルは念のため、耐火物はその表面に施行されている。尚、外殻は鋼製で圧力バウンダリを構成し、炉内を負圧に維持し、放射能の系外への漏洩を防止する構造となっている。

この構造のなかで、万一、キャニスタが破損し、溶湯がキャニスタ外に流出した場合を検討する。(図-1.3.2(3)-2B図参照)

運転中に溶湯が流出すると、キャニスタは耐火物で囲まれており、図-1.3.2(3)-2B図のように流れ出すが、溶融炉下部は発熱源がなく温度が低いためすぐ固まり、耐火物の内部に閉じ込めることができる。また、溶湯流出を検知する温度センサが設けてあり、異常を検知し、通電を停止するよう設計されており、装置は安全に停止する。

また、缶体により炉内は、負圧に保たれており、放射能の系外への漏洩は発生しない。

溶湯の漏れが少量の場合には、通常のキャニスタの取扱いで炉外に取り出すことができる。

溶湯が大量に流出した場合には、通常のキャニスタ部だけの昇降だけでは取り出すことはできない可能性がある。この場合には、炉内を完全に冷却した後(通常一晩)図-1.3.2(3)-2のB、C図に示すように、耐火物を保持しているフランジをグローブボックスより操作して取り外し、昇降機により下部に降ろし、メンテナンスエリアに引き込み交換作業を実施することになる。詳細については1.3.3の保守性の項目で述べる。

尚、この場合の重量としては、キャニスタ及び溶融物で約250kg、耐火物で約250kgの合計500kg程度となる。

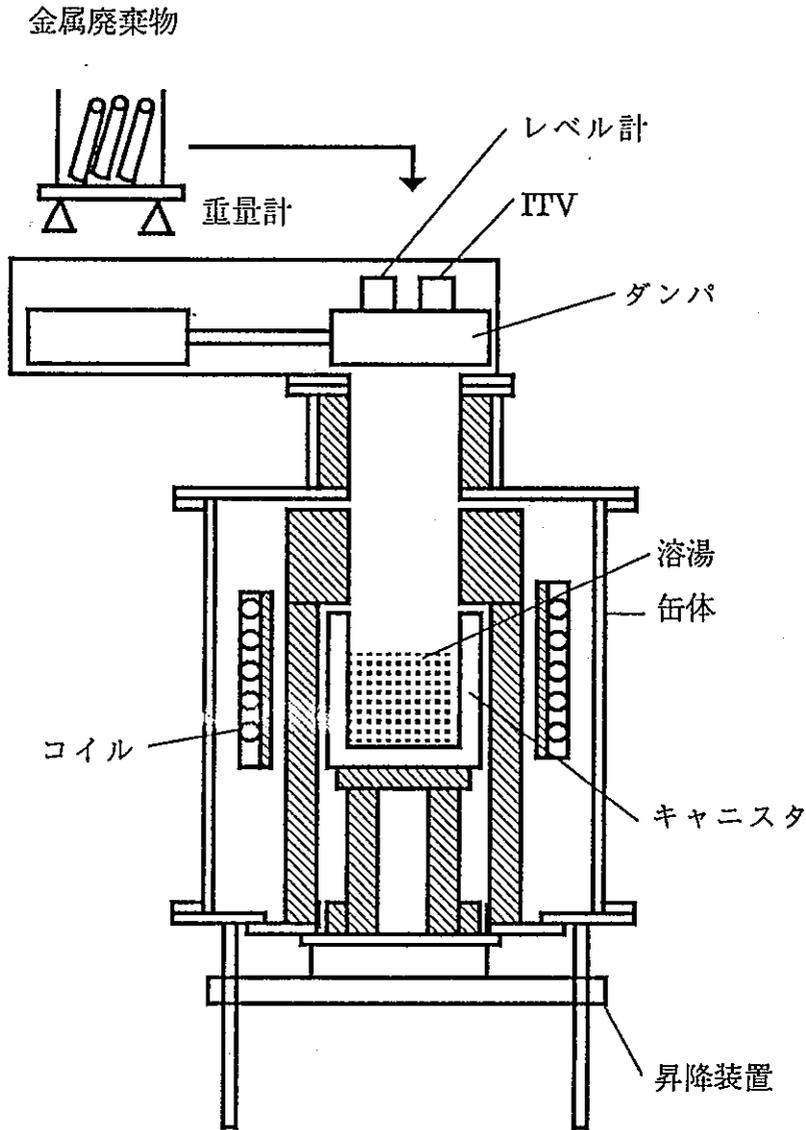
(4) 駆動系の安全性

溶融炉本体部において溶融処理中に駆動する部分はなく安全性は確保されてい

る。また、キャニスタの溶融炉からの取出しは、昇降機により実施するが、キャニスタが冷却された後実施するので、問題ないと考えられる。

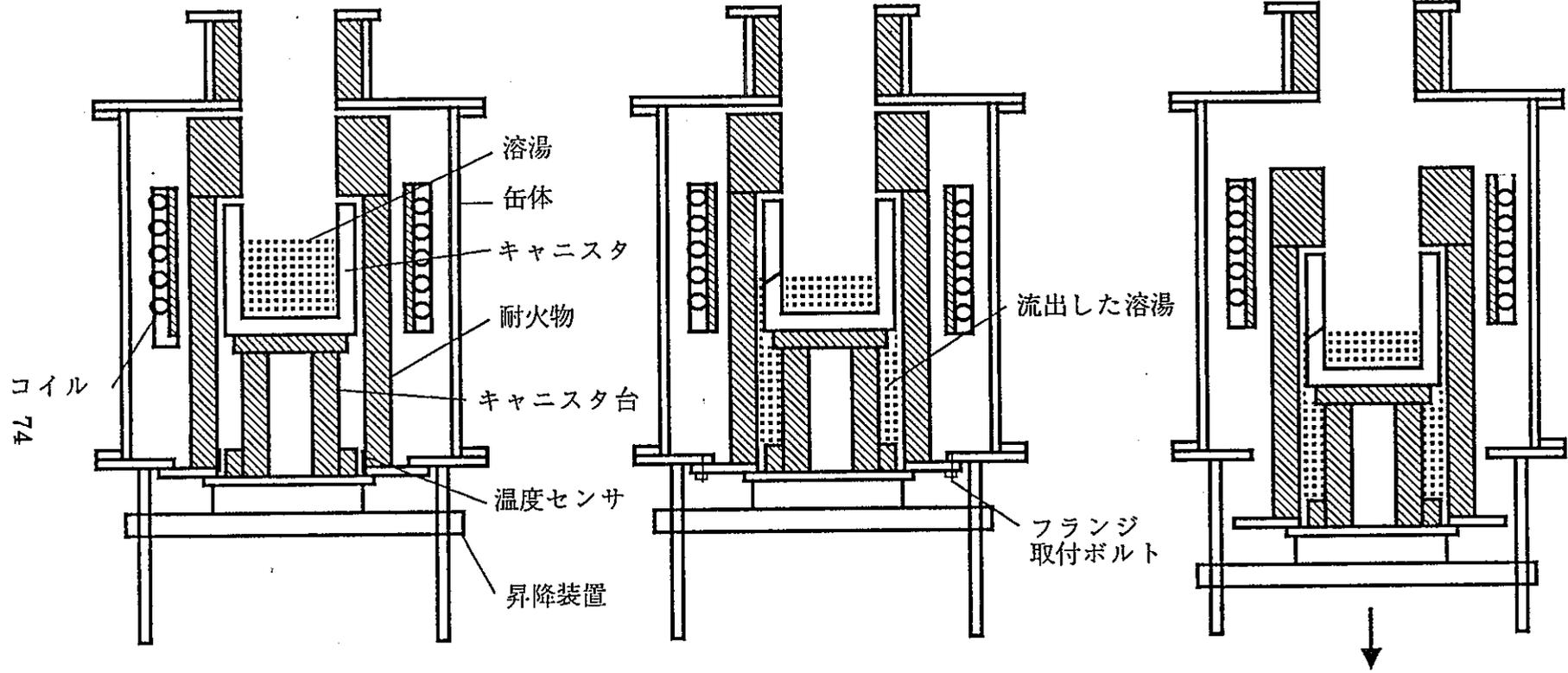
(5) 固化体搬送系の安全性

固化体搬送系の概念図を図-1.3.2(5)-1に示す。固化体は内容物が固化した状態で溶融炉外に搬出するため、安全性は確保されている。固化体の具体的な動きとしては、図-1.3.2(5)-1に示すように、昇降機で下降、コンベアで横移動した後、キャニスタ取扱装置により、キャニスタ側面をつかみ、D-50ドラムにバグアウトするものである。尚、キャニスタは、取扱装置により、バグインする方式である。尚、今後の基本・詳細設計の段階でダブルリッド方式も合わせて検討していくことが望ましい。



センサ	管理方法
重量計	金属廃棄物の重量を測定し、投入重量、投入間隔を管理。重量により投入間隔を設定。比重より溶湯量を算出し、溶湯レベル管理も可能。
ITV	炉本体上部にITVを設け、目視による溶湯レベル監視が可能。
レベル計	炉本体上部にレーザレベル計を設け、溶湯レベルを測定し溶融量を管理。

図-1.3.2(3)-1 通常運転時の溶湯レベル管理方法



A図-通常運転時

B図-溶湯流出時

C図-内部構造物取出

図-1.3.2(3)-2 キャニスタ損傷時の対応

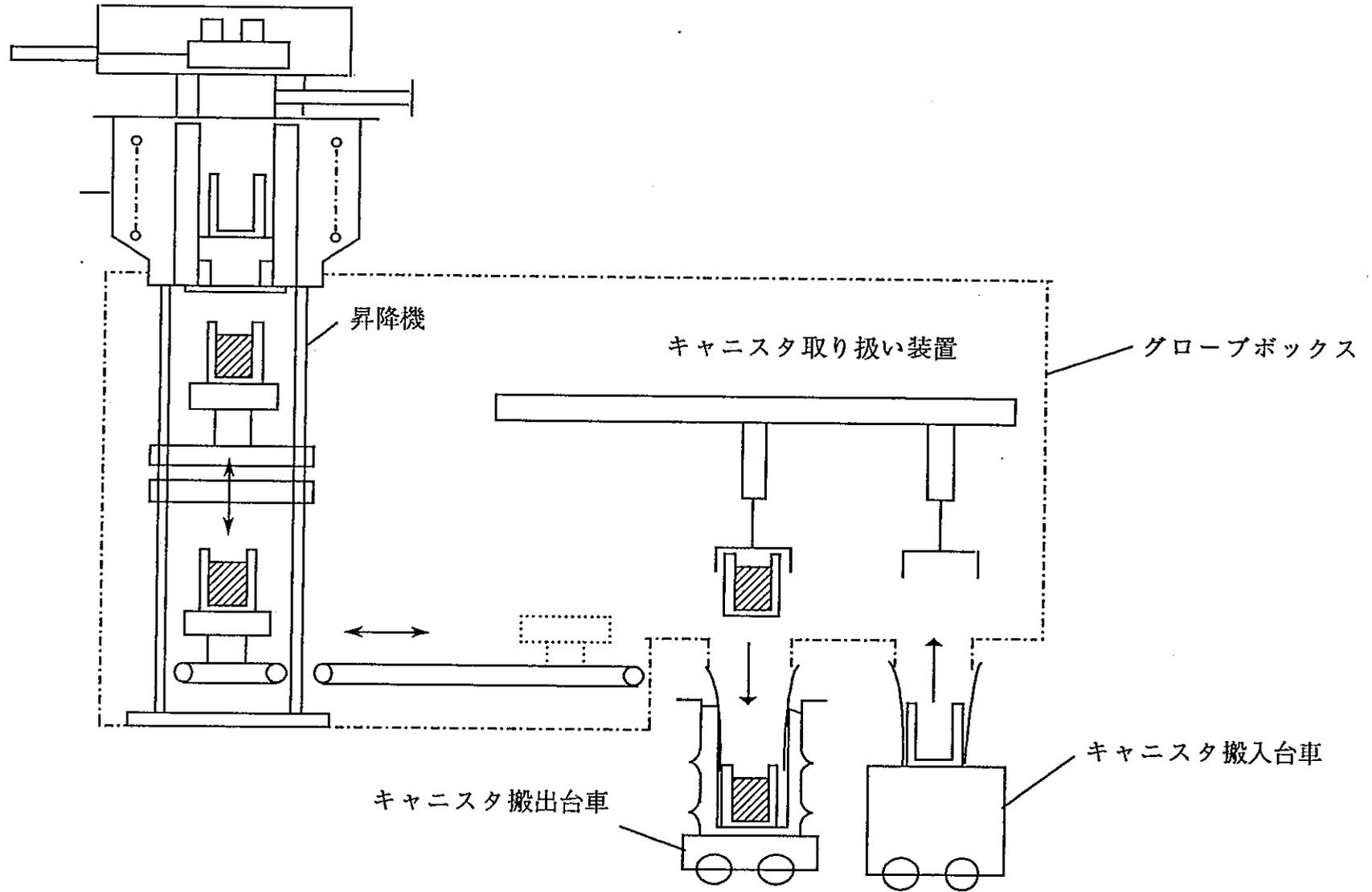


図-1.3.2(5)-1 固化体搬送系の概念図

(6) α 設備としての具備事項

a. 基本的考え方

α 設備の場合、特に以下の4つの基本的考え方を具備した形でシステム、設備設計を行う必要がある。

- ① α が系外へ洩れないように密閉化と負圧維持を図る。
- ② α 汚染区域の拡大を防止する。
- ③ 運転性
- ④ メンテナンス性
 - α が洩れないようにする
 - メンテナンスが容易な機器設計構造とする。

b. 具体的な対策

各項目の具体的な対策を以下に示す。また、インキャンメルト式溶融炉システムの対策を図-1.3.2(6)-1に示す。

- ① α が系外へ洩れないように密閉化を図る。

(i) 溶接構造

配管等の接続は原則として溶接構造とする。

(ii) 機器接続部シールカバーによる気密維持

溶接構造にできない機器接続部はシールカバーにより気密維持を図る。

(iii) グローブボックス又は気密ボックス内設置

機器又は配管で気密化できない場合は、グローブボックス又は気密ボックス内に設置し気密維持を図る。又、各グローブボックスの使用条件に応じた適切な給排気システムを設け、 α が系外へ洩れないようにする。

インキャンメルト式溶融炉システムでは以下の箇所にこの対策を実施する。

- 金属廃棄物受入設備(グローブボックス)
- 金属廃棄物投入設備(気密ボックス)

- キャニスタ取扱設備(グローブボックス)
- セラミックフィルタ取扱設備(グローブボックス)
- 廃セラミックフィルタ取扱設備(グローブボックス)

尚、通常運転で用いる廃棄物の搬入口には、エアロック、2重ダンパを設け気密化を図る。また、キャニスタの取扱いはバッグインバッグアウト方式により実施する。

② α 汚染区域の拡大を防止する。

HEPAフィルタにて α 汚染区域と区分する。

③ 運転性

通常運転は原則として遠隔自動運転とする。インキャンメルト方式炉では、バッグの取扱操作以外は遠隔自動運転が可能である。

④ メンテナンス性

① α の漏洩防止

セラミックフィルタ、パッキン、ベアリング等のメンテナンス部品は、バッグインバッグアウト方式にて交換できる構造とし、 α が系外に飛散しないようにする。

② メンテナンス性

グローブボックス内のモータ類、シリンダ類、昇降装置等の稼働部品は、グローブからのメンテナンスが可能なように配置設計を行うとともに交換が容易な構造を採用する。

セラミックエレメント交換作業及び溶融炉の耐火物交換作業は、グローブボックス内でハーフスーツにより作業を行えるよう設計する。

キャニスタ取扱設備については、万一の場合を考慮して、グローブボックス内に人がエアラインスーツの着用により、内部に入ってメンテナンスができる構造とする。

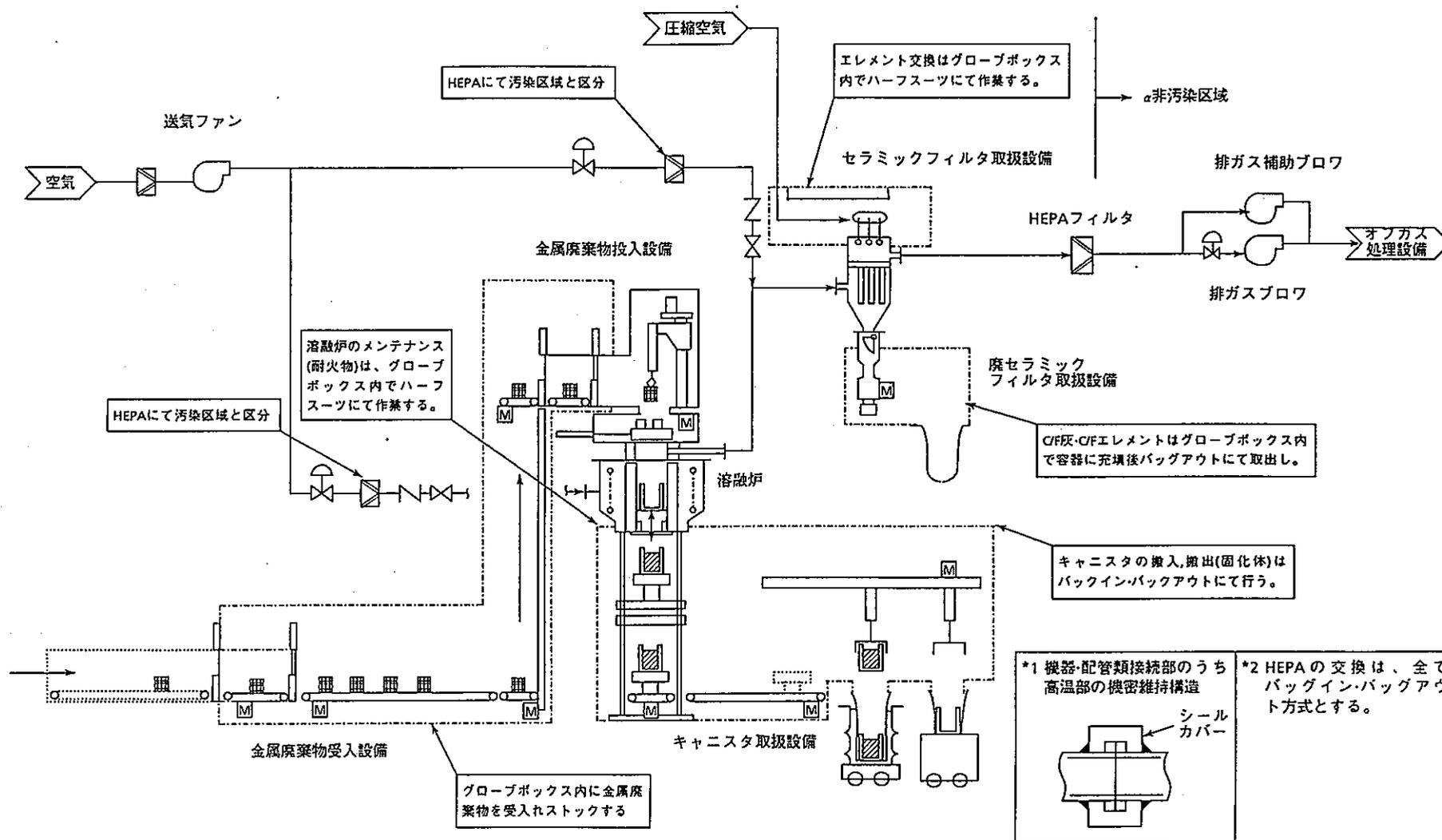


図-1.3.2(6)-1 インキャンメルト方式炉のα対策

4.3.3 保守性

インキャンメルト炉の保守性に関し、以下について検討を行った。

- ① 炉本体の保守
- ② その他の機器の保守

(1) 炉本体の保守

炉本体の詳細構造は、図-1.3.3(1)-1のようになっている。この内、耐火物は次の①から⑥により炉内の主要構造物は次の通りである。

- ・鋼製外殻
- ・耐火物 (図に示すように通常①から⑥で構成している)
- ・コイル
- ・レベル計、ITV、温度センサ

この内、鋼製外殻及びコイルは十分な強度・寿命設計をおこなえば、特に劣化要因はないので、メンテナンスフリーとすることができる。また、耐火物についても、直接溶湯に触れることはないため、運転日数(80日/年)、運転時間(5時間/日)を考慮すれば、10年程度の寿命が期待できる。しかしながら、メンテナンス方法は検討しておく必要がある。

また、レベル計、ITV、温度センサ等計測制御機器についてもメンテナンス方法を検討しておく必要がある。

a. 耐火物のメンテナンス

i 耐火物①(キャニスタ台)

耐火物①は通常のキャニスタ交換と同様に昇降機、コンベアにより、グローブポートまで移動する。この耐火物①は分割構造となっているためグローブより操作し、バッグアウトによりD-50に廃棄する。新しい耐火物は逆の順序で組立てを行う。その作業概要を図-1.3.3(1)-2に示す。尚、グローブボックス内の負圧が維持できるように給排気のコントロールは充分行う。

ii 耐火物②③

耐火物②③の交換は、耐火物①を前記の要領で、炉内より取り出した後に次の手順で実施する。作業の概要を図-1.3.3(1)-3に示す。

- ・昇降機で耐火物②を保持しているフランジを保持しながら、取付ボルトをグローブより操作して取り外す。
- ・耐火物②を昇降機によりフランジごと下に降ろす。
- ・グローブボックス内のハーフスーツが装備してあるメンテナンスエリアにフランジごと耐火物②を引き込む。
- ・耐火物②はあらかじめ分割構造になっているので、ハーフスーツから操作して耐火物②を別途設けるポートよりD-50にバッグアウトし、廃棄する。尚、グローブボックス内には、ハンマ等の補助工具をバッグインにより、入れておく。
- ・新しい耐火物は、廃棄したポートから逆の手順でグローブボックス内に取り込み、組立て・取付を行う。

iii 耐火物④⑤

耐火物④⑤は、雰囲気温度が最大でも500°C程度の比較的低温となるため、取替えは不要と想定される。しかし、交換が容易なようにカートリッジ化することが望ましい。尚、耐火物④は計器保護のため熱しゃへいが必要で耐火物構造となるが、耐火物⑤については、特にその必要もないため、耐熱鋼等の使用により、メンテナンス箇所を低減することも可能である。

iv 耐火物⑥

耐火物⑥は、雰囲気温度も低く、特に劣化要因はないのでメンテナンスは不要である。

b. 計測制御機器のメンテナンス

レベル計、ITVは気密ボックスに設けるグローブポートより、バッグインバッグアウトにより、交換できる構造とする。温度センサについては、炉下部に設けるグローブボックスより、メンテナンスが可能なよう取りつける構造とする。

(2) 付帯機器の保守

付帯機器の保守としては、消耗品であるセラミックフィルタとHEPAフィルタについて考慮しておく必要がある。

a. セラミックフィルタの保守

セラミックフィルタの寿命は、運転日数、運転時間を考慮すれば、5年程度の寿命が期待できる。しかしながら、消耗品であり、メンテナンス方法は十分に検討しておく必要がある。図-1.3.3(2)-1にセラミックフィルタのメンテナンスの方法を示す。その手順は以下の通りである。

- ・ グローブボックス内の負圧が維持できるように給排気のコントロールを行う。
- ・ グローブボックス内に設けたハーフスーツより操作してセラミックフィルタ外殻蓋のボルトをはずし、メンテナンス用モノレールにより横移動し、仮置する。
- ・ セラミックフィルタの底部ダンパは事前にオープンとしておき、エレメント破砕機は稼働しておく。エレメント外し治具により、セラミックフィルタを支持プレートより、下方に落下させる。
- ・ セラミックフィルタは破砕機により細かく破砕され、下方のボックスに収納される。破砕終了後、ダンパを閉め、破砕したエレメントはボックスごとバッグアウトし、D-50に収納する。
- ・ 新しいセラミックフィルタは、バッグインして、グローブボックスより操作して、装着する。

破砕したセラミックフィルタの見掛け容積は約100ℓである。一方、破砕したセラミックフィルタの回収ボックスは、取扱性を考慮して30～35ℓを想定している。このため一回のセラミックエレメントの交換により3個の回収ボックスが発生する。

尚、通常の運転では、ほとんどセラミックフィルタ灰は発生しない見込みであり、回収ボックスの交換頻度は、年間運転日数を80日とすれば、数回/年のオーダーとなる。

b. HEPAフィルタの保守

HEPAフィルタは、全てバッグインバッグアウトできる構造とする。

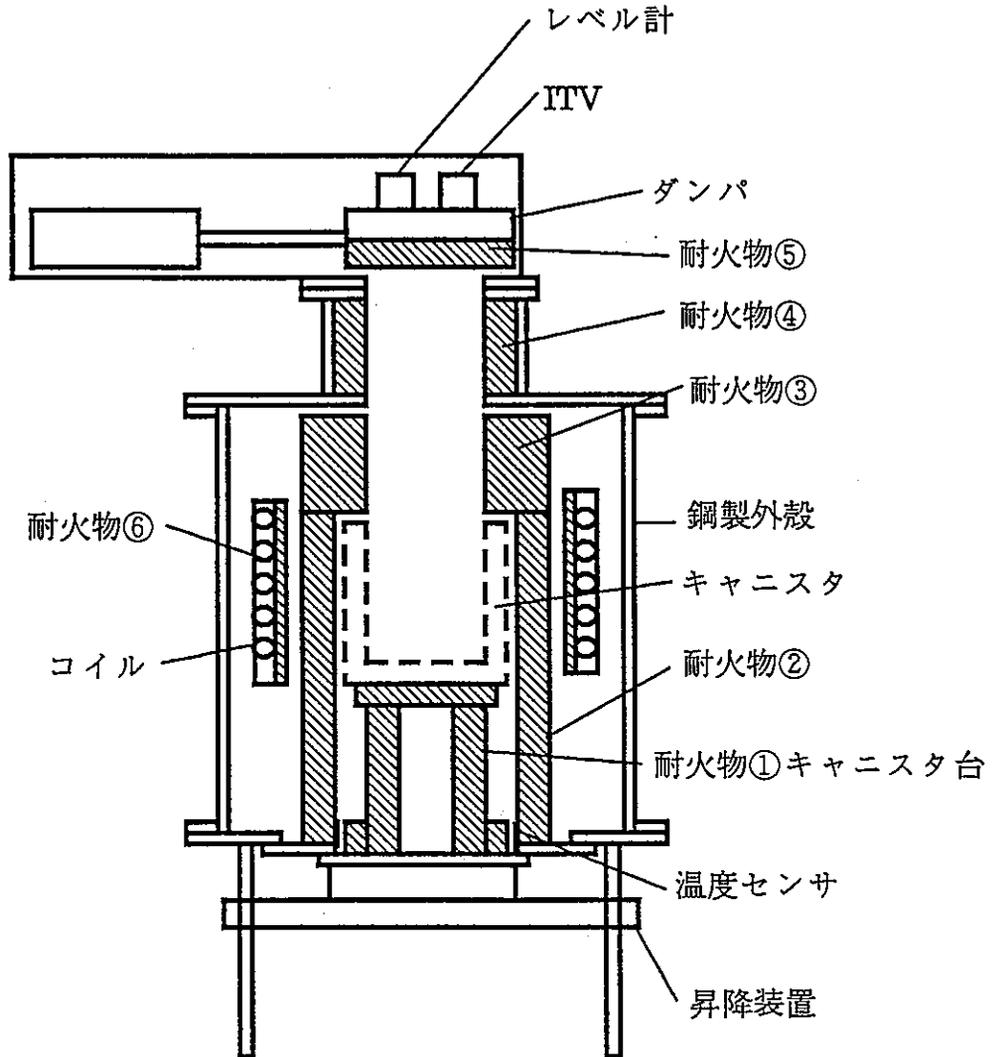


図-1.3.3(1)-1 溶融炉内の詳細構造

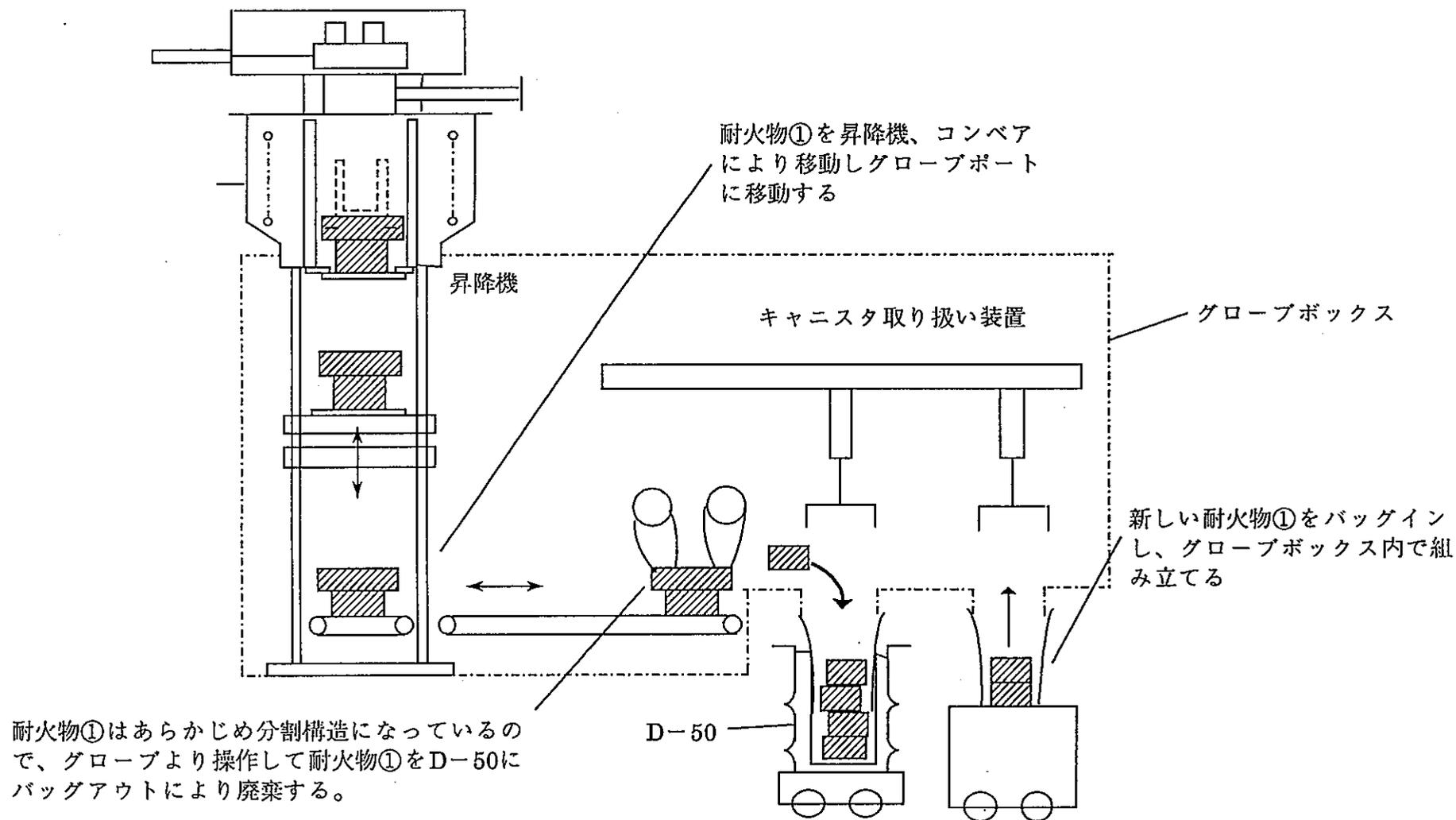
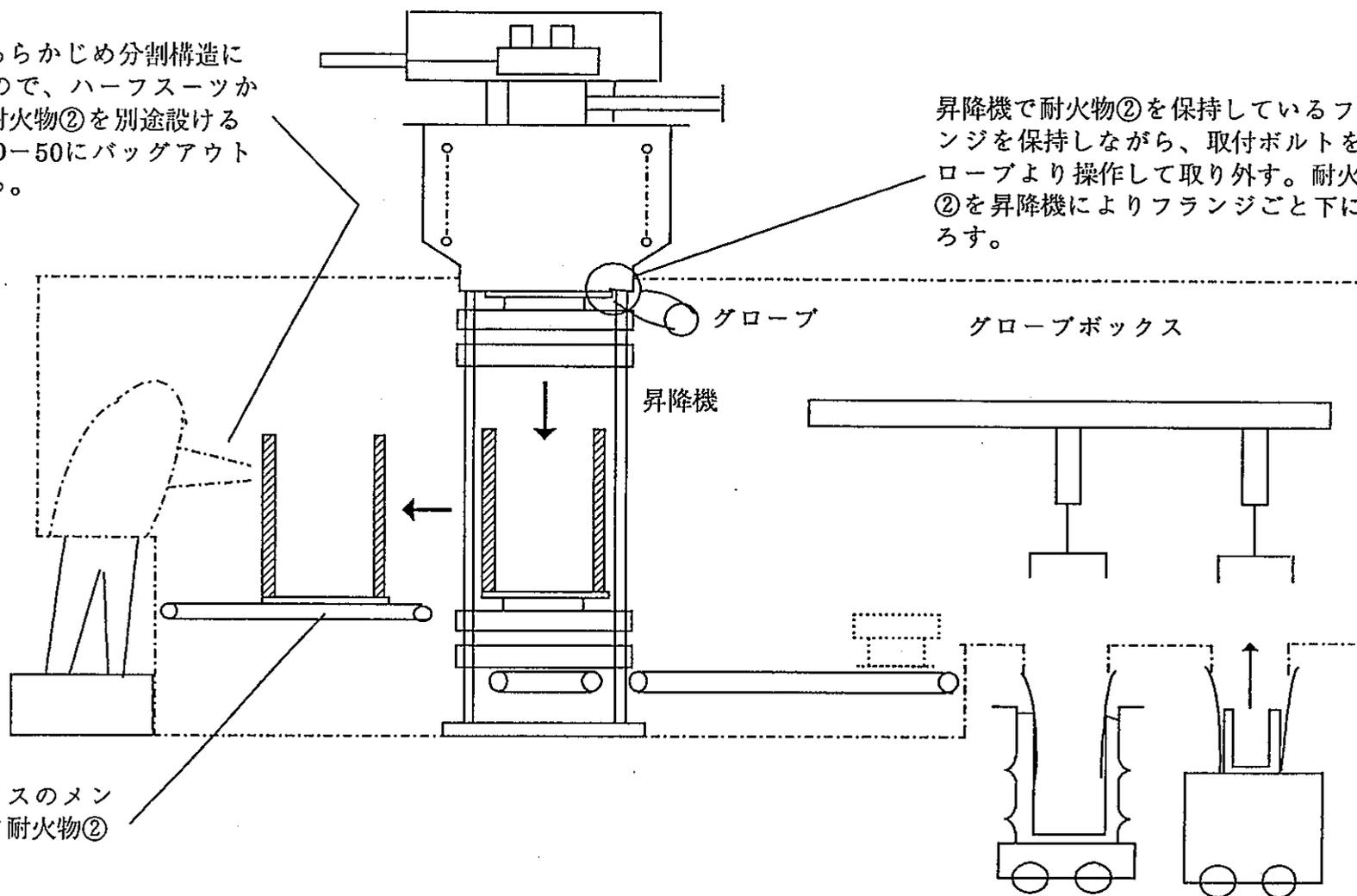


図-1.3.3(1)-2 耐火物①のメンテナンス

耐火物②はあらかじめ分割構造になっているので、ハーフスーツから操作して耐火物②を別途設けるポートよりD-50にバッグアウトし、廃棄する。

昇降機で耐火物②を保持しているフランジを保持しながら、取付ボルトをグローブより操作して取り外す。耐火物②を昇降機によりフランジごと下に降ろす。



グローブボックスのメンテナンスエリア耐火物②を引き込む。

図-1.3.3(1)-3 耐火物②のメンテナンス

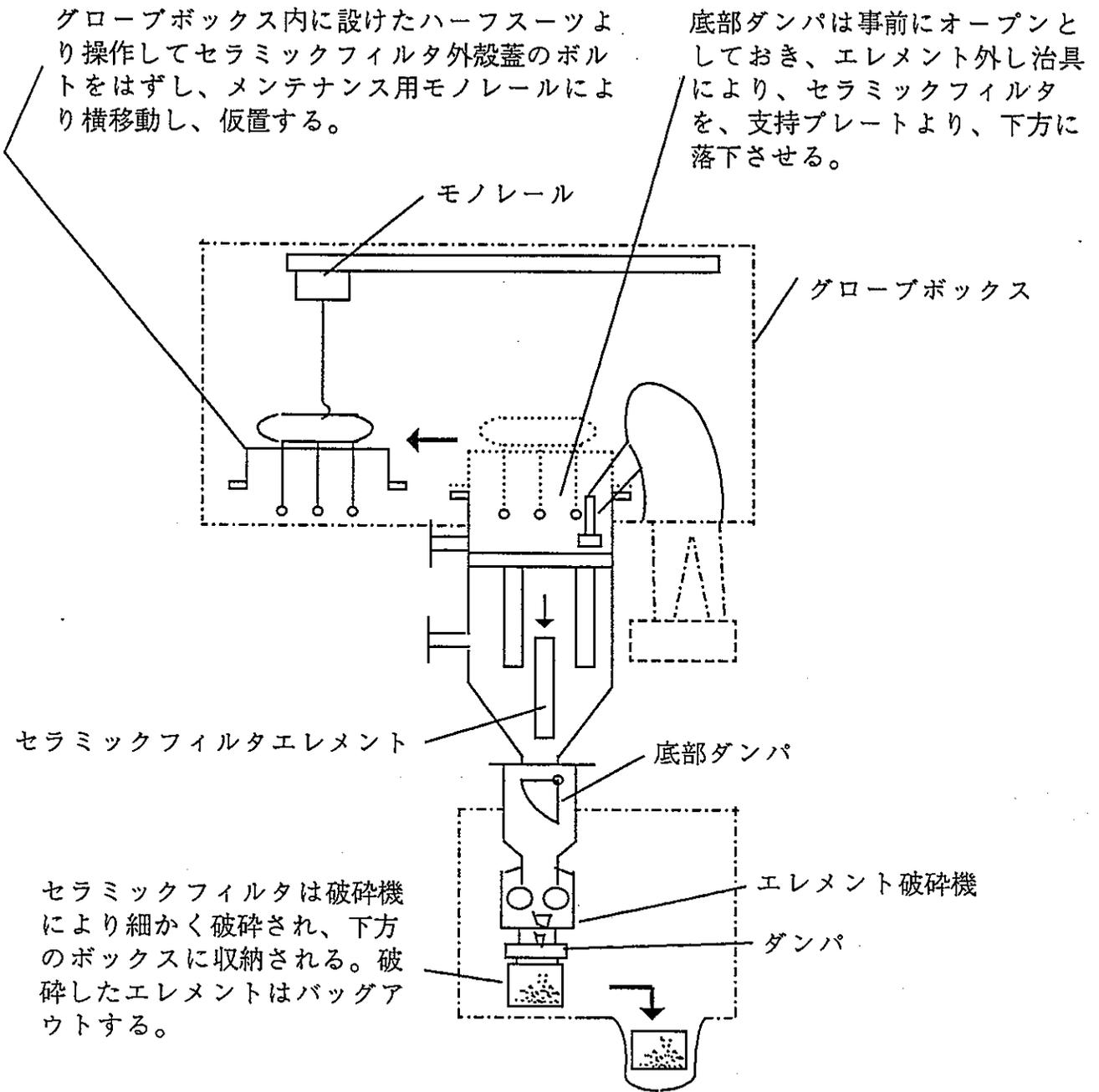


図-1.3.3(2)-1 セラミックフィルタのメンテナンス

1.4コスト試算

表-1.1.(2)-1に示すCASE①～④についてインキャンメルト方式炉システムの超概算のコスト比較を行った。尚、ここで、CASE③を比較のベースとし、設備の建設コストは設備コストに含めた。その結果を表-1.4-1に示す。

表-1.4-1 インキャンメルト方式炉システムの概算のコスト

CASE	設備コスト比	運転コスト比
CASE①	1.8	1.00
CASE②	1.3	1.00
CASE③	1.0	1.00
CASE④	0.7	1.00

- 設備コスト試算の前提条件
 - ① 建屋、換気空調、放射線監視及びその他建屋付帯設備(埋設金物、消火設備、照明、接地線、通信設備、電源設備、域外工事等)、切断等前処理設備は、不含とした。
 - ② ユーティリティは設備近傍で取り合い、パワーセンター、MCCは、不含とした。
 - ③ 制御設備はリレー式制御盤とした。
 - ④ 保守自動化設備は含まず、グローブボックスからのマニュアル操作とした。
 - ⑤ 平成6年度価格で積算した。
- 運転コスト試算の前提条件
 - ① 運転員は1名とした。
 - ② キャニスタ、投入かご等の消耗品は含めた。
 - ③ 切断前処理コストは、不含とした。
 - ③ 定期検査費用は、不含とした。

・参考文献

- 1) 日本機械学会, "伝熱工学資料第3版", 丸善
- 2) 長谷川正義監修, "ステンレス鋼便覧", 日刊工業新聞社
- 3) 日本金属学会, "金属データブック(改訂2版)", 丸善
- 4) NGK原子力技報, NO.2, "不燃性廃棄物高周波溶融固化技術の概要"
- 5) A.Jouan, et al., "New volume-reduction conditioning options for solid alpha-bearing waste" : Third european community conference on radioactive waste management and disposal september 17-21, 1990
- 6) 日本鉄鋼協会編, "鉄鋼便覧第3版", 丸善
- 7) M.Sappok, kerntechnik, vol.56,6, pp.376-378, 1991
- 8) 大谷正康, "鉄冶金熱力学", 日刊工業新聞社
- 9) デコミッションング技報, 第9号p.41
- 10) 1993 International Conference on Nuclear Waste Management and Environmental Remediation, Vol.3, pp.705, 1993
- 11) 作花濟夫, "ガラスの辞典", 朝倉書店, 1985
- 12) 化学大辞典編集委員会編, "化学大辞典", 共立出版
- 13) 鉄鋼スラグ協会パンフレット、FS-51
- 14) Project Report NGB85-09、Project Gewähr 1985、NAGRA(1985)
- 15) PNC TN 1410 92-081
- 16) P0998A, US DOE Rep (USA), (WSRC-MS-90-138-REV-1, 1990)
- 17) 成瀬省, "ガラス工学", 共立出版(1958)
- 18) 作花濟夫, "ガラスハンドブック", 朝倉書店(1975)

不燃性廃棄物高周波溶融固化技術の概要

Outline of the Induction Heat Melting Process for Low Level Radioactive Non-Combustible Wastes

加藤 明* 澤田 英治* 岩田 克一*
Akira Kato Eiji Sawada Katsuichi Iwata

Low-level radioactive wastes generating at nuclear power plant are classified into the following groups, combustible solid waste including spent resin, non-combustible solid waste including incinerated ash, and concentrated liquid waste.

Except non-combustible solid waste including incinerated ash, treatment methods of them are already developed and now in running. Though great efforts have been made on the development for non-combustible solid waste treatment, these wastes are still stored in drums with no volume reduction and solidification.

Recently, AFR-storage is definitely planned, so the volume reduction and solidification of non-combustible solid waste have become very important based on the cost and safety analysis of disposal and transportation.

On the other hand, it is estimated that the volume of concentrate liquid waste will decrease in the near future, so it becomes the rational method to treat this waste with the other wastes.

Authors have developed the new solidification system adopting the induction heat melting method to solve these problems.

This system is able to treat various kinds of these wastes by one melter and solidify into stable products with large volume reduction effect.

This report describes the outline of this system and test results.

Key words; radioactive waste, induction heating, melting/solidification, non-combustible waste, incinerated ash, concentrated liquid waste, volume reduction.

§ 1. はじめに

発電用原子炉の運転に伴って発生する低レベルの放射性廃棄物は可燃性雑固体、使用済樹脂、不燃性雑固体及び濃縮廃液に大別され、それらの現状の処理方法はFig. 1に示す通りである。このうち、可燃性雑固体については焼却処理が実施され、大幅な減容がなされている。使用済樹脂については、プラスチック固化されているプラントもあるが、いずれ近い将来可燃性雑固体とともに焼却されることになっている。しかし、焼却処理の残渣として発生する放射性焼却灰(以下、焼却灰という。)はその

ままドラム缶に保管されており、貯蔵時の安全性及び埋設処分への対応を考慮すれば、いずれ固型化処理を施すことが必要である。不燃性雑固体廃棄物は低圧での圧縮処理を行うか、あるいは未処理のままドラム缶等に収納されており、将来の埋設処分のためには減容と固型化両面の処理技術の確立が望まれている。一方、濃縮廃液はセメント、アスファルト及びプラスチックで固型化されるか、もしくは、ペレット化されるなどの処理技術が確立されている。しかしながら、濃縮廃液の発生量は今後ますます減少するため、単独で固型化処理することは合理的とは思われず、発生量の多い可燃物又は不燃物とともに処理あるいは固型化できる技術の出現が望まれている。

* : エンジニアリング事業本部開発部原子力開発課

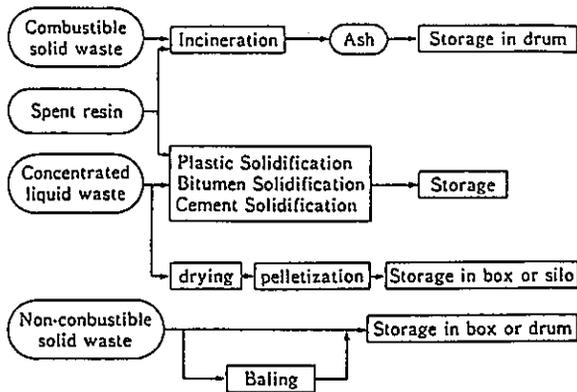


Fig.1. Flow chart of low level radioactive waste treatment at nuclear power plant

これらのことから、現在技術確立が望まれているのは焼却灰、不燃性雑固体及び濃縮廃液を同一プロセスで減容安定化する固型化技術であるといえる。著者らは、このようなニーズに応えるべく高周波誘導加熱による熔融固型化技術の開発を実施し、

- (1) 焼却灰、不燃性雑固体及び濃縮廃液乾燥粉体を同一プロセスで固型化し、安定な固型体とできることを確認した。
- (2) 実機スケールのパイロットプラントを建設し、処理性能、操作性、耐久性及び安全性等の各種実証データを得た¹⁾。
- (3) ベンチスケールのホットテストプラントを設置し、実廃棄物及び放射性同位元素(以下、RIと言う)を使用した試験を実施して、放射性核種の挙動及び固型体の性状に関するデータを得た²⁾。

本報では、高周波誘導加熱炉を用いた放射性廃棄物の処理技術について、その概要を報告する。

§ 2. 不燃性廃棄物処理の現状と廃棄物の性状

前述の焼却灰、不燃性雑固体及び濃縮廃液はいずれも

不燃性であり、Table 1 にその内容を示す。また、以下に特徴を述べる。

2-1 焼却灰

焼却灰は焼却炉の炉底から回収される炉底灰と排ガスに伴ってセラミックフィルタで捕集・回収されるフィルタ灰に分類される。この他に、焼却処理設備からは使用済セラミックフィルタエレメント(以下、C/Fエレメントと言う。)が発生する。

焼却灰の主成分はSiO₂、CaO、Al₂O₃及びFe₂O₃等の無機酸化物であり、融点はおよそ1,200~1,300℃である。粒径は炉底灰では数100μmの粉状物から200mm程度の塊状物まで広く分布しており、その割合は、概略5mm以下のものが30~60wt%、5~30mmのものが30~40wt%、30~100mmのものが10~30wt%及び100mm以上のものが0~10wt%である。また、フィルタ灰はすべて0.5mm以下の微粉状である。炉底灰中には可燃性雑固体に混入して焼却された不燃物が夾雑物として1~10wt%程度残留しており、その代表例としてはボルト、番線、アルミ片、アスベストパッキン、ガラス片などがあげられる。

C/Fエレメントは、SiCを主成分とするものであり、交換時には焼却処理設備に付属したエレメント破砕機によって破砕される。このため、100mm~150mm程度の破砕片としてドラム缶に収納されている。

2-2 不燃性雑固体

不燃性雑固体の代表的なものとしては金属、保温材、フィルタ、コンクリート、及びガラスがあげられる。金属廃棄物は、大型施設及び機器等の改修に伴って発生する大口径配管、型鋼及び機器類を除けば、大部分は一般に雑金属と称される番線、小口径配管、足場材及び薄板等が主体である。これらは形状が雑多で嵩ばるものであるため、ドラム缶への充填効率が悪い。また、保温材及びフィルタも嵩密度が0.1~0.3g/cm³程度と小さく、プラントによっては低圧縮してドラム詰めしているところもある。土砂、コンクリート及びガラスは破砕された粉

Table 1. The classification of low level non-combustible wastes

		Content
Incinerated ash		Furnace ash Filter ash Spent ceramic filter element
Non-combustible solid waste	Metal	Carbon steel & stainless pipes Miscellaneous metals
	Heat insulator & Filter	Heat insulator, HEPA filter, Pre filter
	Concrete & Glass	Concrete blocks, Sand Glass
Concentrate liquid waste		BWR ; Na ₂ SO ₄ , PWR ; Na ₂ B ₄ O ₇ , Reprocessing plant : NaNO ₃ , NaH ₂ PO ₄ , Chemical sludge Laboratory : NaNO ₃ , NaCl, Na ₂ SO ₄ , Chemical sludge

粒状のものを含む場合がほとんどである。なお、塩ビ及びゴムを不燃性雑固体として分類管理しているところもあるが、これらは難燃性ではあるが焼却処理が可能である。通常の可燃性雑固体と比べて、焼却によりHCl等の有害ガスを発生すること及び難燃性であり排ガス処理系への負荷が大きいこと等の理由により、焼却処理対象外とされてきたが、現在では、ゴムについては改良型雑固体焼却設備での焼却が可能となってきた⁵⁾。また、塩ビについても難燃性廃棄物焼却装置の開発がなされ焼却処理による減容が期待できる⁶⁾。

(3) 濃縮廃液

濃縮廃液の主成分はBWR系ではNa₂SO₄であり、PWR系ではNa₂B₄O₇である。濃縮廃液の発生量は近年では炉水系の管理技術の向上に伴って減少する傾向を示しており、他の廃棄物と同一のプロセスで固型化するニーズが高まっていることは前述のとおりである。

§ 3. 高周波誘導加熱による溶融固化法

3-1 不燃性雑固体処理方法の概要

不燃性雑固体の処理方法としては大きくは以下の3種類の方法に分類できる。

3-1-1 廃棄物を直接または切断してセメント等の固化材で固化する方法

廃棄物をそのままセメント等で固化した場合には減容効果が全く期待できない。また、固化体の放射能分布も不均一なものしか得られないため、放射性核種の浸出性を評価することも困難である。これらの点を解決するために、廃棄物を破碎して小片状とした後に固化する方法が考えられる。この方法では1/2~1/3程度の減容効果が得られ、固化体もある程度は均一化することができるが、雑多な廃棄物を破碎することが必要となるため、技術的課題が多い。また、コスト的にも高く経済的な方法とは言えない。

3-1-2 廃棄物を圧縮減容した後に固化する方法

廃棄物を低・中圧(~200ton)または高圧(~2,000ton)で圧縮することにより充填効率を高める方法であり、高圧縮を行った場合には1/3~1/5程度の減容効果が得られる。しかし、圧縮体は廃棄物の形状が変形しただけのものであり、核種の閉じ込め性能を有するものではないため、直接固化の場合と同じく何らかの固化処理(コンディショニング)が必要となる。

3-1-3 廃棄物を溶融固化する方法

溶融固化法は、廃棄物を高温で溶融することにより真密度に近い固化体を得るものであり、他の方法に比べてもっとも高い減容効果が得られる。また、固化体は放射性核種を内部に閉じ込めた均一なものとなり、優れた耐浸出性を有する。すなわち、不燃性雑固体の減容と固型化が同時に行える合理的な処理法であると言える。また、焼却灰や濃縮廃液乾燥粉体などの粉粒状廃棄物も処理で

きることから、圧縮法に比べて適用範囲が広い。

3-2 高周波誘導加熱の原理と特徴

溶融処理対象とする不燃性廃棄物は焼却灰、金属、保温材、フィルタ、コンクリート、ガラス及び濃縮廃液乾燥粉体など多種多様であるため、加熱方式としては廃棄物の性状に影響されない方式を選定することが重要である。加熱方式としては高周波誘導加熱、プラズマアーク加熱、マイクロ波加熱及び直接通電加熱などが考えられる。しかし、マイクロ波加熱及び直接通電加熱では金属を溶融できず、プラズマアーク加熱では粉粒状物に対して不適である。一方、高周波誘導加熱は導電性物質(例えば金属、カーボン)の周囲に設置したコイルに周波数100~数千1,000Hzの交流電流を流すことにより、コイル内の導電性物質の内部に発生するジュール熱を利用して高温を得るものである。このため、導電性容器を誘導加熱し、容器からの伝熱で廃棄物を溶融すれば廃棄物性状に影響されず安定した溶融操作が可能である。また、他の加熱方式に比べて、以下に示すような特徴を有している。

- (1) 電気エネルギーを直接被加熱物(溶融容器)へ投入するため効率が良い。
- (2) 被加熱物への電力投入密度が高いため、短時間で高温が得られる。
- (3) 燃焼空気及びバージガスを必要としないため排ガス量が少ない。
- (4) 温度制御が容易である。
- (5) 炉の構造が簡単でコンパクトである。

以上の理由により、著者らは不燃性廃棄物の溶融方式として高周波誘導加熱方式を採用した。

3-3 高周波誘導加熱炉の概要

高周波誘導加熱による不燃性廃棄物溶融炉の概要をFig 2に示す。溶融炉のタイプとしては、溶融容器と固化体容器を兼用するインキャン溶融方式と溶融容器(メルタ)と固化体容器(キャニスタ)を分離してメルタ内で廃棄物を溶融し、溶湯をキャニスタに抜出して固化するメルタ溶融方式の2方式がある。両方式ともに、溶融容

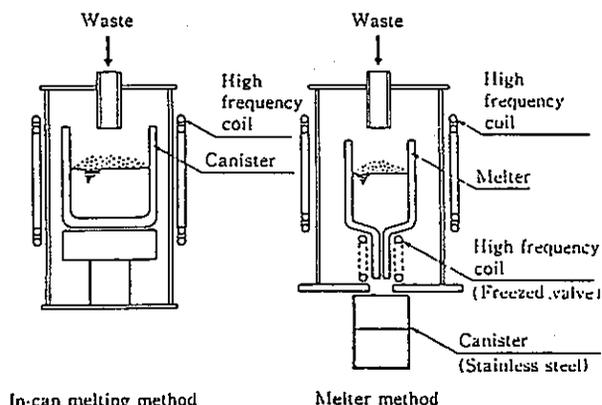


Fig.2. Melting methods with induction heat

器の材質としては導電性セラミックを使用し、高周波誘導加熱で溶融容器を発熱させて廃棄物を溶融する。インキャン溶融方式で使用するセラミックキャニスタをFig. 3に示す。また、メルタ溶融方式で使用するセラミックメルタをFig.4に示す。

インキャン溶融方式ではセラミックキャニスタの大きさを自由に設定することができ、200ℓドラムサイズの固化体も製作可能である。このため、固化体をドラム缶に収納して埋設処分する場合でも充填効率が良く、高い減容効果が得られる。また、溶融容器は固化体容器を兼ねており固化体1本ごとに交換するものであるため、耐久性の高い高級材料を使用する必要がなく低コストでの製作が可能である。これは、金属、コンクリート及び耐火物のように溶融時に高い処理温度を必要とし、溶融容器への侵食が激しい廃棄物を処理する場合に有利である。

メルタ溶融方式では、廃棄物の溶融体をメルタから拔出して固化体とするため、固化体形状の自由度が極めて大きい。すなわち、ステンレス製容器等に充填してブロック状とするのはもちろんのこと、水砕等の方法による粒状化やペレット化することもできる。(Fig.5参照。)このため、埋設処分のための廃棄体パッケージ形態はブロック状の固化体をドラムに充填してドラムとの空隙を

モルタル等で埋めて固定したもの、あるいは、水砕スラグやペレットを固化材と混練してドラム内で固化したものなど、多様化することができる。これより、廃棄物の放射能レベルに応じた廃棄体パッケージを製作することが可能であり、フレキシビリティが高い。また、インキャン溶融方式と比べて処理コストを安くできる。しかし、高融点の不燃性雑固体（耐火レンガ、コンクリート等）や金属類を多量に処理する場合には操作温度を更に高温とする必要があり、メルタの交換頻度が多くなるため経済性において幾分難点がある。

§ 4 パイロットプラントによる溶融固化試験

4-1 高周波溶融固化システムの基本フロー

高周波溶融固化システムにおける不燃性廃棄物の基本処理フローをFig.6に示す。廃棄物の溶融炉への供給方法としては、焼却灰はドラム缶から排出後そのまま投入する。不燃性雑固体は粗大物を投入可能な大きさに切断する。濃縮廃液は乾燥粉体化して供給する。溶融固化体はドラム缶に収納して、セメントモルタル等を充填して固定する。溶融炉からの排ガスはセラミックフィルタ及びHEPAフィルタで除塵を行う。また、BWR系濃縮廃液のように溶融時に腐食性ガスを多量に発生する廃棄物を

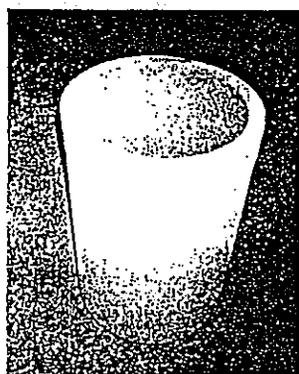


Fig 3. Ceramic canister

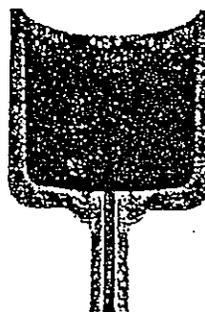


Fig 4. Ceramic melter



Block



Pellet



Granule

Fig.5. Solidified products by induction heat melting

処理する場合には、後段にアルカリスクラバを設けて処理する。

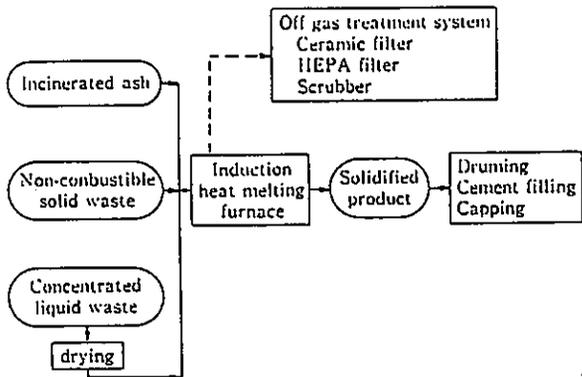


Fig.6. Process flow chart of induction heat melting system for non-combustible wastes

4-2 パイロットプラントの概要

パイロットプラントの概要をTable 2に示す。また、高周波溶融炉の外観をFig.7に示す。高周波溶融炉は実機とほぼ同規模のものであり、メルタ溶融方式及びビインキャン溶融方式のいずれも実施できる構造となっている。本炉は、これまでに約4,000時間の運転実績を有するものである。また、廃棄物投入系の機器としては、これまでにドラム排出機 (Fig.8)、供給フィーダ及び搬送コンベアを実機規模で製作し、各種実証試験を実施している。

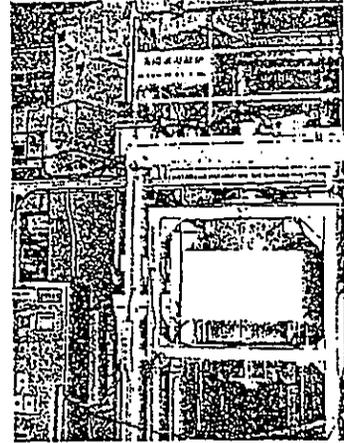


Fig.7. The pilot plant of induction heat melting furnace

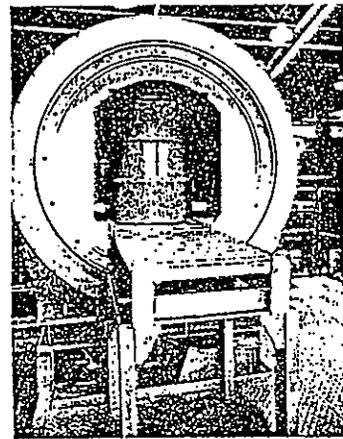


Fig.8. The mock up plant of waste discharger

Table 2. Outline of the pilot plant of induction heat melting system

Induction heat melting furnace	Method	・ Melter ・ In-can
	Generating power	100kW
	Frequency	3,000Hz
	Melting pot size	Max. 450mm ^φ ×600mm ^H
	Melting pot capacity	20~50 ℓ /Batch*
	Melting rate	25~60kg/h*
	Operating temperature	1,000~1,600°C
Handling system	Discharger	200 ℓ Drum size
	Vibration feeder	0.4m ³ /h
	Bucket conveyor	15 ℓ /bucket

* : It depends on melting pot size

4-3 焼却灰の溶融固化

原子力発電所で発生する可燃性雑固体焼却灰の化学組成をTable 3に示す。主成分はSiO₂、Al₂O₃、CaO及びMgOであり、これらを溶融することにより安定なガラス固化体に転換できる。焼却灰の融点は1,200~1,300°Cの範囲内であるため、溶融操作温度としては1,400°C程度で処理できる。

Table 3. The typical chemical composition of incinerated ash (wt %)

	Furnace ash	Filter ash
SiO ₂	25~41	14~33
Al ₂ O ₃	7~14	2~11
CaO	7~23	2~26
MgO	4~10	0~8
Fe ₂ O ₃	9~34	0~8
ZnO	2~6	0~32
TiO ₂	5~6	0~8
Na ₂ O	0~3	1~9
SO ₃	0~2	5~26
Ig.Loss	1~8	0~4

パイロットプラント (メルタ溶融方式) による焼却灰の処理試験結果をTable 4に示す。また、溶融炉の運転モードをFig.9に示す。本試験では組成、粒径及び夾雑物を模擬した焼却灰400kgを処理して容積150ℓのステンレス容器に充填した。(Fig.10参照。)パイロットプラントの運転は、セラミックメルタを1,400°Cまで昇温したのち、

Table 4. Test result of the melting of incinerated ash

Method	Method Melting pot size	Melter 285mm ^φ ×580mm ^H
Operating conditions	Temperature Feeding rate of ash	1,400°C 25kg/h
Property of solidified product	Density Compressive strength	2.7~2.9 g/cm ³ 800~1,200kg/cm ²

焼却灰を25kg/h (5 kg/回×5回/h) の速度で2時間投入

し、溶湯を下部ノズルより抜出してステンレス容器に充填した。この操作を8回くり返して、1本の固化体を製作した。得られた固化体は、アルミノケイ酸ガラス質で、800~1,200kg/cm²程度の高い圧縮強度を有する。また、密度は2.8程度あり、処理前の焼却灰の嵩密度がおよそ0.7g/cm³であることから、約4に減容されている。

なお、1サイト当りの焼却灰の発生量はおよそ10~20 ton/y程度であり、これを処理するのに必要な溶融炉の処理能力は20~30kg/hでよいことから、ほぼパイロットプラントと同規模の装置で処理可能である。

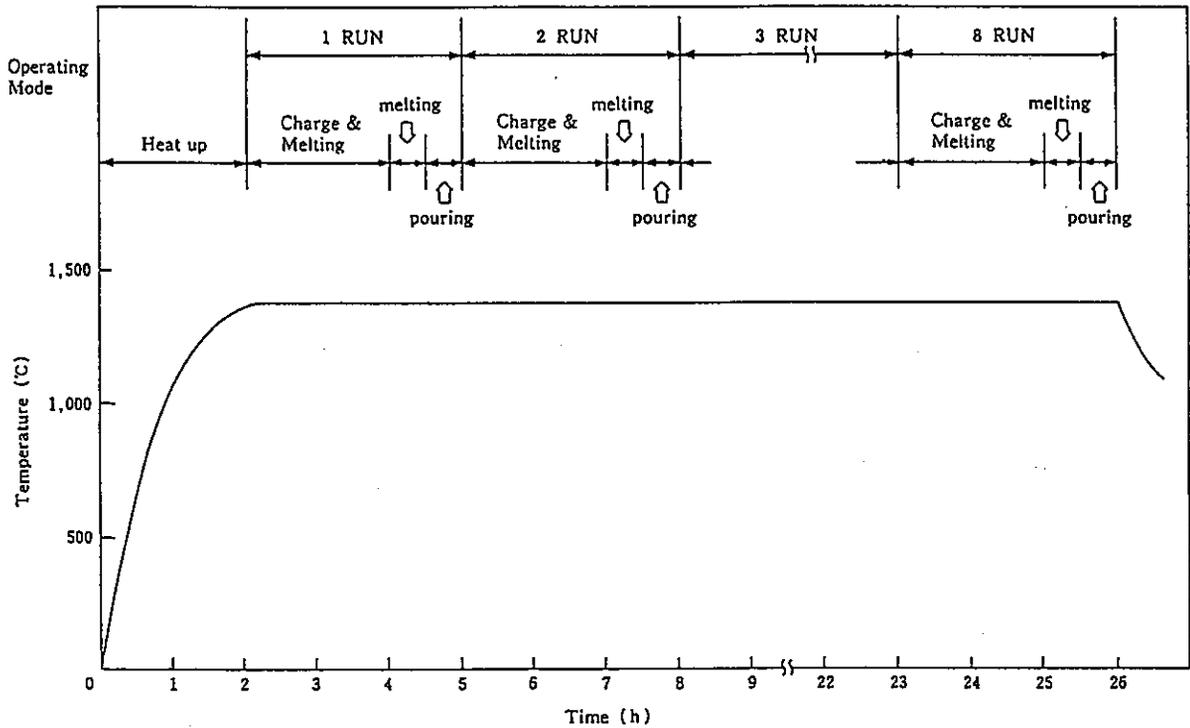


Fig.9. Operating mode of induction heat melting furnace (Melter method)

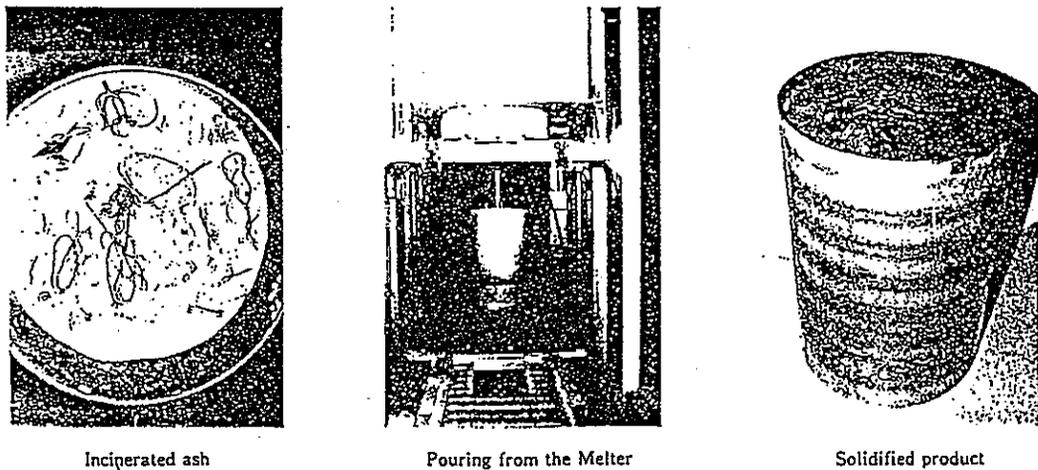


Fig.10. Photograph of incinerated ash melting test

Table 5. Test result of the melting of non-combustible solid wastes

Method	Method Melting pot size	In-can 370mm ¹⁰ ×500mm ¹¹			
Wastes	Wastes	Carbon steel Stainless steel	Heat insulator Filter	Concrete	Glass
Operating conditions	Temperature Feeding of wastes	1,550°C 60kg/h	1,500°C 60kg/h	1,500°C 40kg/h*	1,500°C 60kg/h
Property of solidified product	Density Compressive strength	7.0-8.0 g/cm ³ (>1,000kg/cm ²)	2.3-3.2 g/cm ³ 1,000kg/cm ²		

* additive(Na₂CO₃) 10~20wt %

4-4 不燃性雑固体の熔融固化

不燃性雑固体は金属、保温材、フィルタ、コンクリート、ガラス、塩ビ及びゴムなどに分けられる。このうち、塩ビ及びゴムはいわゆる難燃物であり、焼却後熔融する必要がある。それ以外は、直接熔融固化することが可能である。

パイロットプラント（インキャン熔融方式）における熔融試験結果をTable 5に示す。本試験のキャニスタ寸法は370mm¹⁰×500mm¹¹であり、操作温度は1,500~1,550°Cである。対象廃棄物の融点は大部分が600~1,500°C程度であり、本操作温度にてすべて熔融処理可能であった。処理速度はコンクリートを除いて60kg/hであるが、コンクリートは骨材に使用されている砂の融点が高く融点降下剤を加えたため、やや低い値を示した。得られた固化体の密度は金属では7~8 g/cm³程度及びそれ以外の無機物では2.3~3.2 g/cm³程度であり、ほぼ廃棄物の真密度に近い値であった。

4-5 濃縮廃液の熔融固化

濃縮廃液の乾燥粉体は、熔融するだけでは安定な固化体とならないため、ガラス化のための助材としてSiO₂成分の添加が必要である。PWR系の場合には主成分のホウ酸ナトリウムがガラス原料であるため、20~30wt%のSiO₂を添加することにより容易に固化できる。一方、BWR系の場合には主成分が硫酸ナトリウムであり、熔融時に分解してSO_xが排ガス側へ移行するため固化処理による減容効果も大きい。また、排ガスはセラミックフィルタ及びHEPAフィルタで放射能を除去したあと、アルカリスクラバでSO_xを除去するため、脱硫廃液は放出可能である。

パイロットプラントにおける濃縮廃液乾燥粉体の熔融試験結果をTable 6に示す。操作温度はPWR系では1,100~1,200°C及びBWR系では1,300~1,400°Cで熔融処理可能であり、得られる固化体の密度はおよそ2.3~2.6 g/cm³であった。これより減容効果を求めると、PWR系では濃縮廃液1 m³を処理することにより、固化体ドラムがおよそ0.4本発生する。また、BWRではおおよそ1.2本発生する。（1ドラム当りの熔融固化体充填量は120ℓとした。）従って、減容効果はPWR系で約1/13及びBWR系で約1/4となる。なお、これを現状の処理方式と比較し

た場合、濃縮廃液1 m³当りアスファルト固化(PWR)では固化体ドラムが1本発生し、プラスチック固化(BWR)では1.8本発生することにより、本プロセスはこれらと比較してもPWR系で1/2.5及びBWR系で1/1.5の減容効果がある。

Table 6. Test result of the melting of dried conc. liquid wastes

		PWR	BWR
Method	Method Melting pot size	Melter 285mm ¹⁰ ×590mm ¹¹	
Operating conditions	Temperature	1,100~1,200°C	1,300~1,400°C
	Additive (SiO ₂) content	20%	50%
	Feeding of wastes	24kg/h	15kg/h
Property of solidified product	Feeding of additive	6 kg/h	15kg/h
	Density Compressive strength	2.3~2.6 g/cm ³ 1,000kg/cm ²	

§ 5 ホットテスト

5-1 ホットテストの目的

各種模擬廃棄物によるパイロットプラント試験において、焼却灰、不燃性雑固体及び濃縮廃液乾燥粉体は熔融することにより減容性の高い無機固化体とできることが確認された。このときの操作温度は1,200~1,600°C程度であるため、Cs等の半揮発性核種では熔融時の揮発が考えられ、その挙動を確認することが必要である。また、固化体の長期貯蔵に対する安全性を評価する上では、固化体からの核種の浸出性を把握することが重要である。

これらのことから、実廃棄物及び放射性同位元素（以下、RIと言う）添加廃棄物を使用したホットテストを実施し、以下の項目を検討した。

- (1) 熔融処理時における放射性核種の挙動（系統の除染係数）
- (2) 固化体からの放射性核種の浸出性

5-2 試験装置及び試験方法

ホットテストプラントのフローをFig11に示す。高周波熔融炉は内容積4ℓ（180mmφ×215mm¹¹）の熔融容器を使用するもので、処理能力はおおよそ3~5 kg/hである。

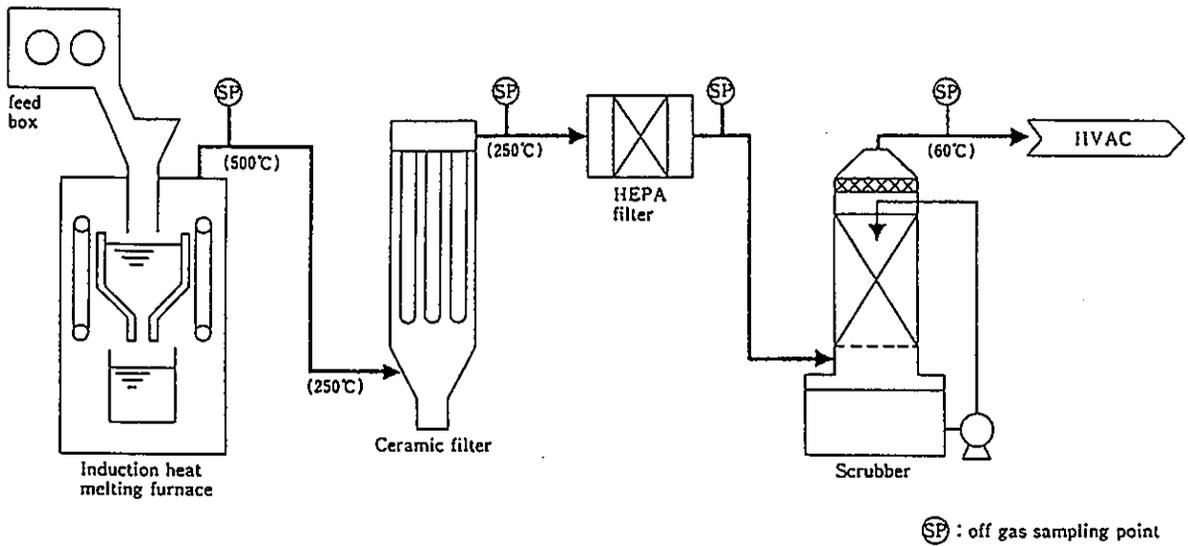


Fig. 11. Process flow chart of hot test plant

熔融炉からの排ガスは、セラミックフィルタ及びHEPAフィルタで除塵される。また、HEPAフィルタの後段にはBWR系濃縮廃液乾燥粉体(Na₂SO₄)を処理する場合のためにアルカリスクラバが設けてある。本試験では実焼却灰、RIを添加した不燃性雑固体(保温材、フィルタ、コンクリート及びガラス)及び濃縮廃液乾燥粉体(BWR系及びPWR系)を熔融炉へ投入しながら熔融した。このとき、排ガス処理系の各サンプリングポイントにおいて排ガス中の放射能を測定し、系統の除染係数を評価した。また、小型供試体を製作してIAEA法による浸出試験を実施し、固化体からの放射性核種の浸出率を評価した。

5-3 ホット試験結果

5-3-1 系統の除染係数

(1) 熔融炉からの核種の移行率

熔融炉から排ガス系への核種及びダストの移行率をFig12に示す。ここで移行率は、以下のように定義したものである。

$$\text{移行率} = \frac{\text{熔融炉出口における排ガス中の放射能}(\mu\text{Ci/h})}{\text{熔融炉への投入放射能}(\mu\text{Ci/h})}$$

これによると、⁶⁰Coの移行率は10⁻²(1%)以下であり、ダストの移行率とよく一致した。このことから、⁶⁰Coは1,600℃においても揮発せず、投入時の飛散ダストに同伴されて排ガスへ移行するものと考えられる。したがって、投入系の改良により飛散ダストを抑制すれば⁶⁰Coの移行はさらに小さくできるものである。¹³⁴Csはダストに同伴されるものの他に明らかな揮発が認められた。移行率は1,400~1,600℃では5×10⁻²~2×10⁻¹(5~20%)であり、ダストに比べておよそ1桁高い値ではあるが、後述のように排ガス処理系(セラミックフィルタ)ですべて

捕集・回収されており、系統としては高い除染係数が得られている。

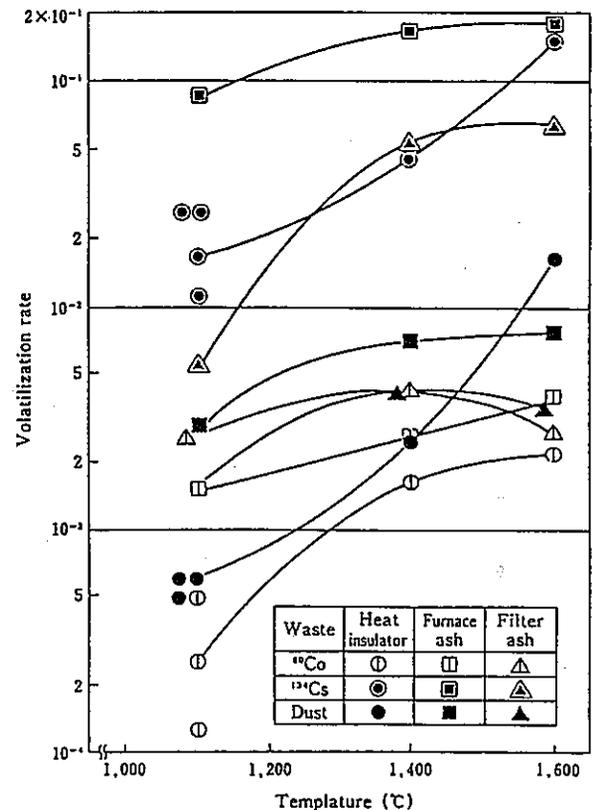


Fig.12. Volatilization rate from melting furnace

(2) 系統除染係数

セラミックフィルタにおける核種の除染係数測定結果をTable 7に示す。排ガス中の放射能は、セラミックフィルタ出口ですべて検出限界値以下となった。このため、この検出限界値からセラミックフィルタの除染係数を求めると、⁶⁰Coではおよそ10⁴以上及び¹³⁷Csではおよそ10⁶

以上の値が得られた。したがって、溶融炉の分離係数(1/移行率)が⁶⁰Coで10²及び¹³⁷Csで5~20であることと合わせると、本系統の除染係数はセラミックフィルタ出口道で10²以上が得られたことになる。また、アルカリスラバ廃液の放射能は検出限界値以下であり、放出可能であった。

Table 7. The decontamination factor of the ceramic filter for the off gas from the melting furnace

Wastes		Furnace ash	Filter ash	Heat insulator	Heat insulator	Dryer powder of conc. waste (BWR)	Dryed powder of conc. waste (PWR)
Treatment temperature (°C)		1,400	1,400	1,400	1,600	1,300	1,100
Condition of ceramic filter	Off gas volum (Nm ³ /h)	19.1	19.9	18.5	18.3	20.0	21.6
	Temperature (°C)	251	245	247	241	250	252
Activity in outlet of melter (μCi)	⁶⁰ Co	2.7×10 ⁻¹	1.5×10 ⁻¹	2.0×10 ⁻²	2.6×10 ⁻²	6.9×10 ⁻¹	5.0×10 ⁻¹
	¹³⁷ Cs	2.4×10 ¹	1.1×10 ¹	4.5×10 ⁻¹	1.1×10 ⁻¹	1.5×10 ¹	2.3
Activity in outlet* of ceramic filter (μCi)	⁶⁰ Co	<2.1×10 ⁻⁵	<1.6×10 ⁻⁵	<2.5×10 ⁻⁵	<2.0×10 ⁻⁵	<5.4×10 ⁻⁵	<6.0×10 ⁻⁵
	¹³⁷ Cs	<2.0×10 ⁻⁵	<9.7×10 ⁻⁶	<2.3×10 ⁻⁵	<1.5×10 ⁻⁵	<4.3×10 ⁻⁵	<3.3×10 ⁻⁵
Decontamination factor of ceramic filter	⁶⁰ Co	>1.3×10 ⁴	>9.4×10 ³	>8.0×10 ²	>1.3×10 ³	>1.1×10 ⁴	>8.3×10 ³
	¹³⁷ Cs	>1.2×10 ⁶	>1.1×10 ⁴	>2.0×10 ⁴	>1.0×10 ³	>1.3×10 ⁵	>7.0×10 ³

* : below detectable limit of activity

5-3-2 固化体性状

溶融固化体からの放射性核種の浸出率については、IAEA法による試験結果をTable 8に示す。核種の浸出率は⁶⁰Co及び¹³⁷Csともに10⁻⁴~10⁻⁶ g/cm²・dであり、濃縮廃液(BWR)のセメント固化体と比較して¹³⁷Csで2桁程度良好な値である。また、ホットテストで得られた固化体の密度は2.3~3.2 g/cm³程度でほぼ廃棄物の真密度に近く、圧縮強度は1,000kg/cm²程度であった。これらの値はパイロットプラント試験による結果とよく一致した。

§ 6 システムの概要

本技術の原子力発電所への適用に当っては、各サイトの廃棄物保管状況及び既存処理設備との関係で処理対象とする廃棄物の組合せが各種考えられる。ここでは、焼却灰、不燃性雑固体及び濃縮廃液を各々単独処理する場合のシステム例を述べる。

6-1 焼却灰の溶融固化

焼却灰のみを対象とした溶融固化システムでは、焼却

Table 8. The leachability of melting solidified products

Wastes	Treatment temperature (°C)	Additives	Additive contents (wt%)	Main chemical composition	Leach rate (g/cm ² ・d)	
					⁶⁰ Co	¹³⁷ Cs
Furnace ash	1,600°C	—	—	SiO ₂ Al ₂ O ₃ Na ₂ O	2.8×10 ⁻⁴	1.6×10 ⁻⁴
Filter ash	1,600°C	—	—	SiO ₂ Al ₂ O ₃ Na ₂ O	3.1×10 ⁻⁴	2.0×10 ⁻⁵
Heat insulator	1,600°C	—	—	SiO ₂ Al ₂ O ₃ Na ₂ O	6.5×10 ⁻⁵	7.2×10 ⁻⁴
Dryed powder of BWR conc. waste	1,300°C	SiO ₂	50	SiO ₂ Na ₂ O	1.1×10 ⁻⁴	6.9×10 ⁻⁴
Dryed powder of PWR conc. waste	1,100°C	SiO ₂	20	SiO ₂ B ₂ O ₃ Na ₂ O	6.7×10 ⁻⁴	6.4×10 ⁻⁴
Dryed powder of laboratory conc. waste (JAERI)	1,200°C	SiO ₂	60	SiO ₂ Na ₂ O	3.5×10 ⁻⁴	8.1×10 ⁻⁵

灰の発生量が比較的小さいこと及び性状が比較的一定していることより、溶融炉を小型化できるメルタ溶融方式がメリットが大きい。メルタ溶融方式による高周波溶融固化システムの一例をFig.13に示す。本システムでは、ドラム貯蔵されている焼却灰をドラム排出機を用いて排出しながら溶融炉へ供給し、溶融するものである。溶融固

化体はドラム缶に充填した後、周囲の空隙にセメントモルタルを充填して固定し、廃棄体とする。溶融炉からの排ガスは、単独での排ガス処理系(セラミックフィルタ+HEPAフィルタ)を設けて処理するか、あるいは、焼却設備と併設する場合には焼却炉の排ガス処理系を共用することも可能である。

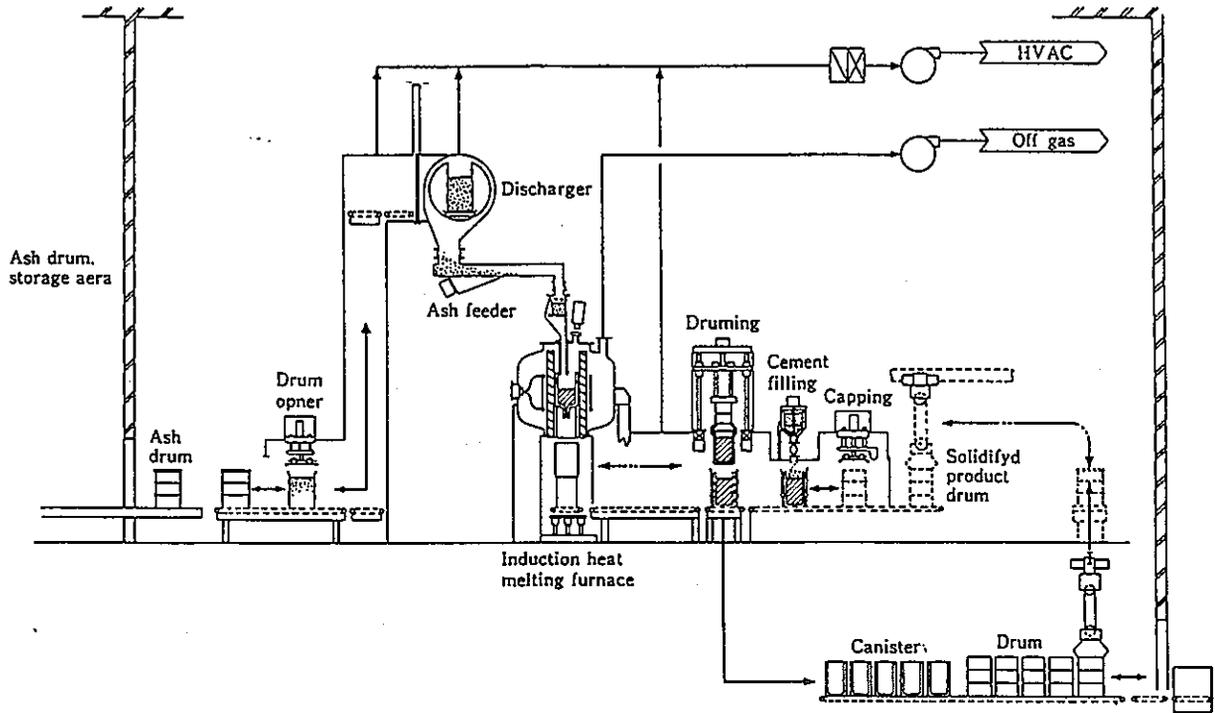


Fig.13. Typical induction heat melting system for incinerated ash

6-2 不燃性雑固体の溶融固化

不燃性雑固体全般を対象とする場合には、廃棄物を溶融炉へ投入できる大きさまで切断または破碎する前処理が必要である。この前処理機器としては、シャークッター、プラズマカッター、高速カッター及び剪断破碎機等が適用でき、廃棄物の性状に合わせて適宜選定する。溶融方式としてはメルタ溶融方式及びインキャン溶融方式のいずれも適用可能であるが、金属廃棄物、耐火物及びコンクリートなどの高融点廃棄物を大量に処理する場合にはインキャン溶融方式が望ましい。

6-3 濃縮廃液の溶融固化

濃縮廃液を対象とする場合、あらかじめ前処理として乾燥処理することが合理的である。乾燥機としては、当社の開発したセラミックボール式乾燥機及び薄膜式乾燥機等が適用できる。溶融方式は、対象物の性状が一定しているためメルタ方式が望ましい。排ガス処理方式は、PWR系は焼却灰の溶融システムと同様であるが、BWR系ではSOxの除去が必要となる。このため、排ガス中の放射能をセラミックフィルタ及びHEPAフィルタで除

去した後にアルカリスクラバで脱硫するシステムとすることが必要である。ホットテスト結果によれば、この脱硫廃液は放出可能と考えられる。

§ 7 システムの特長と導入効果

高周波溶融固化システムは、現在固化処理技術の確立が望まれている焼却灰、不燃性雑固体及び濃縮廃液を効率的に無機安定化できる技術であり、以下のような特長を有する。

- (1) 耐浸出性及び機械的強度に優れる無機固化体が得られ、埋設処分への対応が可能である。
- (2) 特別な前処理を必要とせずに固化処理ができ、システムが簡単である。
- (3) 処理可能廃棄物の範囲がきわめて広い。
- (4) 廃棄物をほぼ真比重まで減容できるため、減容効果が大きい。本システムを導入した場合の減容効果をFig.14及び15に示す。現状の処理システムと比較すると、PWR系で約1/5及びBWR系で約1/4の減容効果がある。

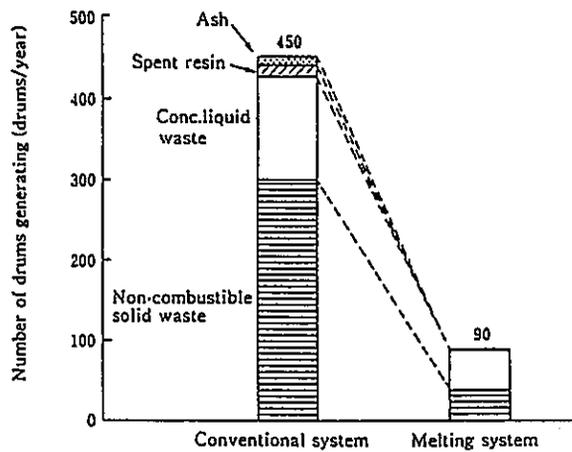


Fig.14. Volume reduction effect by NGK induction heat melting process (PWR 1,100MW)

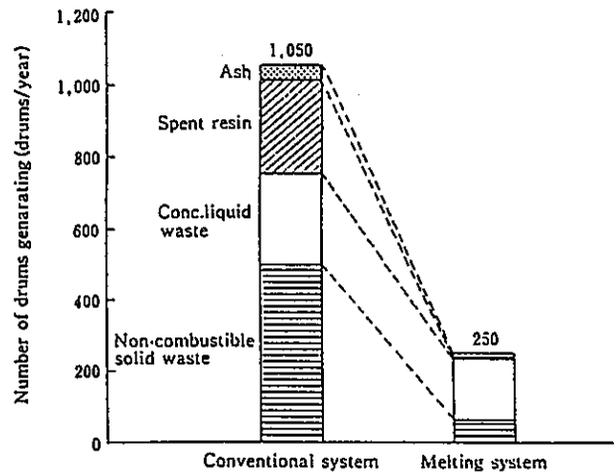


Fig.15. Volume reduction effect by NGK induction heat melting process (BWR 1,100MW)

§ 8 まとめ

可燃性廃棄物が焼却処理によって大巾に減容され、不燃性廃棄物の占める割合が高まる中で、高周波溶融固化装置は多様な廃棄物を一元的に処理できるシステムとして充分実用可能である。とりわけ、敷地外貯蔵が実施される段階では、優れた固化体性状と大巾な減容性を有する本システムが放射性廃棄物の処理法としてユーザーに貢献できるものとする。

参 考 文 献

- 1) 刈田陽一他, "低レベル放射性廃棄物のガラス固化装置", 産業機械No.422, P 18~P 22, (1985)
- 2) 高橋和司他, "焼却灰の高周波溶融固化技術の開発", 日本原子力学会 昭和58年秋の分科会予稿集 第II分冊, P 224, P 225, (1983)
- 3) 加藤清他, "放射性焼却灰の高周波溶融固化試験", 日本原子力学会 昭和59年秋の分科会予稿集 第II分冊, P 240, P 241, (1984)
- 4) 井上秀和, "濃縮廃液の乾燥及び高周波溶融固化試験", 日本原子力学会 昭和60年秋の分科会予稿集 第II分冊, P 229, P 230, (1985)
- 5) 高森英夫他, "改良型維固体焼却装置の概要", NGK原子力技報 No.1, P 9, (1987)
- 6) 手塚季弥他, "難燃性廃棄物焼却装置", NGK原子力技報 No.1, P 24~P 34, (1987)
- 7) 岡本孫次他, "セラミックボール式廃液乾燥機の開発", 日本原子力学会 昭和60年年会要旨集, 第II分冊, P 3, P 4, (1985)

参考文献 2

RADIONUCLIDES BEHAVIOR IN INDUCTION HEAT MELTING AND ITS PRODUCTS FOR NON-COMBUSTIBLE SOLID WASTE

T. Teshima, Y. Karita
NGK Insulators, Ltd.
Handa, Aichi, Japan

O. Okamoto, H. Ohno
Chubu Electric Power Company, Inc.
Nagoya, Aichi, Japan

ABSTRACT

Melting is one of the potential treatment methods for non-combustible waste based on its good properties of solidified products such as radionuclides confinement, mechanical strength, etc..

The radionuclides behavior in induction heat melting and its products were examined such as volatility, nuclides distribution in the product, and leachability for support to safety assessment of LLW disposal project.

Volatile nuclides such as C-14 and I-129 were confirmed to be released to off-gas in melting operation and while Cs-134 remained in the product. The other nuclides remaining in the product were confirmed to be distribute in the metal and ceramic block depending on the thermal properties of the nuclides. The leaching rate of the metal and ceramic block were measured to be sufficiently good.

INTRODUCTION

Solid waste generated at nuclear power plants are classified into combustible and non-combustible solid waste.

In Japan, combustible solid waste incinerators have been introduced and significantly contributed to reduce wastes amounts.

Concentrated liquid waste, one of the typical non-combustible waste, have been solidified with cement, bitumen, etc. and the Japanese shallow land burial project for these waste started from December in 1992 [1]. On the other hand, non-combustible waste such as metal, filter, heat insulator, concrete, etc. are still stored with baling or with no treatment at present, but the requirements for treatment and solidification of these wastes are anticipated to increase because the shallow land burial project for these dry active waste are now under planning.

The melting treatment is expected as the potential solidification method for the dry active waste based on the following properties.

1. High volume reduction effect which is able to decrease the transportation and disposal cost.

2. The good propertiese of solidified product which is required for shallow land disposal.
3. No pre-treatment such as sorting waste, rejecting of the hazardous waste, etc. because high temperature operation solidify the waste to a product with good properties and is able to decompose these hazardous substance.

The melting treatment is now actually applied to only recycling of metal scrap [2] and some type of melting treatment for the waste including the non-metallic waste have been under development [3].

Induction heat melting system have been developed for treatment of the dry active waste and is now nominated as the promising treatment system in Japan [4].

This paper describes the radionuclides behavior in induction heat melting treatment and leaching properties of the solidified product.

INDUCTION HEAT MELTING SYSTEM

MELTING METHOD

The heating method of this system utilizes the joule heat inside a conductive ceramic canister induced by the high-frequency coils surrounding the canister.

Since the waste is heated up and melted by the heat conducted from the canister, stable melting operation are possible with no influence by the configuration and properties of the waste. The pre-treatment required for the waste is so simple as to need only cutting or crushing to a size capable of being fed to the melting furnace.

The features of this heating method, in comparison with other heating methods, are as follows:

1. High heating efficiency and quick heating up rate.
2. Easy temperature control.
3. Simple and compact furnace configuration.

SYSTEM FLOW OF THE INDUCTION HEAT MELTING

This system consists of a melting furnace, waste supply system, off-gas treatment system and conditioning system, and Figure 1 shows the system flow of this system.

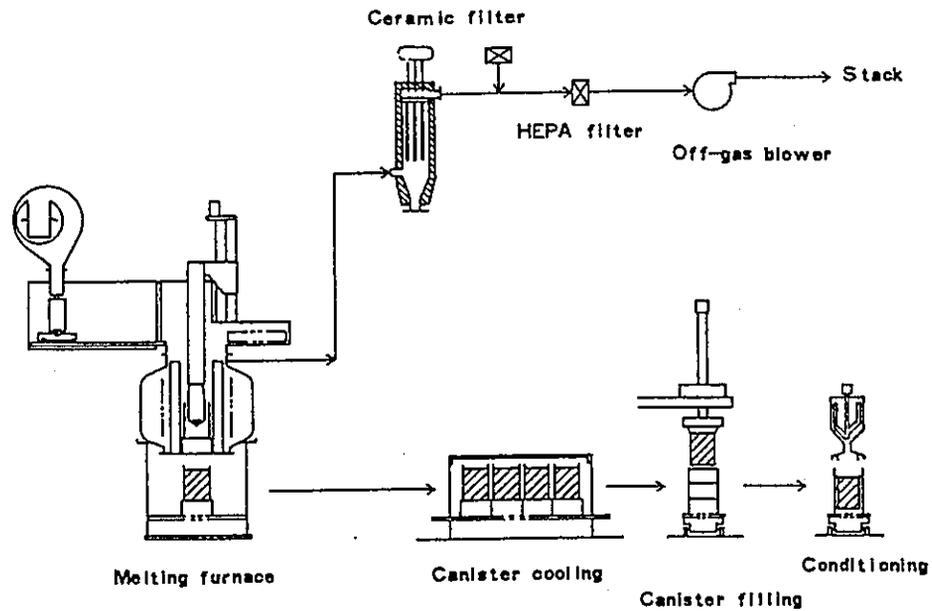


Fig.1 System flow of induction heat melting / solidification system

The wastes are cut into a size (about <400 mm) which is capable of being fed into the furnace, then fed from the furnace top in a some interval and melted. When the prescribed amount of wastes has been fed and melted, the solidified product is taken out and, after cooling, packed into drum and filled with cement mortar, etc..

The off-gas from the melting furnace is filtered by the off-gas treatment system such as ceramic filter and HEPA filter.

TREATMENT PERFORMANCE

Table 1 shows an example of the basic specification of the induction heat melting facilities for non-combustible solid waste. The melting furnace is a induction furnace adopting an in-can type ceramic canister and capable of treatment of 100kg/h in a operating treatment of 1500°C. The daily treating capacity is 4 canister/day, which means that melting treatment can be carried out at about 2 tons (equivalent to about 20 drums) of non-combustible solid waste per day.

Table 2 shows the volume reduction performance for each kind of waste, the properties of solidified product such as its density, compaction strength, etc..

OBJECTIVES OF EXPERIMENTS

Solidified products by melting treatment are expected to have the good properties for disposal such as high mechanical strength, good leachability, little significant void in solidified products, etc..

The objectives of experiments are to examine the following nuclide behaviors :

1. The volatility of nuclides in melting operation.
Melting treatment plant is operated at approximately 1400 - 1500 °C and some of nuclides such as C-14, I-129, Cs-137 have possibilities of release to off-gas in these high temperature conditions. To estimate the amounts of the nuclides remaining in the solidified product, the preliminary estimations of these nuclides behavior are required.

Table 1 Basic Specifications of Induction heat melting system

Waste Treated	<ul style="list-style-type: none"> • Metal waste such as pipes, plate, etc. • Inorganic waste such as filters, heat insulator, concrete, etc. • Incinerated ash.
Treating Capacity	• About 2tons(20drums) of non-combustible waste per day (continuous operated).
Melting Furnace	<ul style="list-style-type: none"> • Ceramic in-can type induction furnace. • Batch feeding of waste with buckets.

Table 2 Properties of solidified product by Induction heat melting

Waste	<ul style="list-style-type: none"> • Carbon steel • Stainless steel 	<ul style="list-style-type: none"> • Filter • Heat insulator • Concrete, etc.
Density	7.0~8.0g/cm ³	2.3~3.2g/cm ³
Compressive strength	> 1000kg/cm ²	~1000kg/cm ²

2. Distribution of nuclides in solidified products.

Solidified products are composed of ceramic block and metal block depending on kinds of waste treated. Nuclides contained in wastes are supposed to be distributed into each block due to the nuclides properties in melting conditions. To measure the concentration of the nuclides in a product and to assess the leaching behavior, the preliminary estimations of the nuclides distribution are required.

3. Leachability of the solidified products.

A solidified product composed of ceramic/metal block

are expected to have good leaching rate. To estimate the nuclide confinement performance, the preliminary leaching tests were carried out.

EXPERIMENTAL

Hot tests for nuclide behavior estimations were mainly carried out by the laboratory-scale test apparatus shown in Fig.1 and the main specification of it is shown in Table.1.

Three type experiments were carried out by the following procedures:

- Preliminary operation test for set of the operation conditions.
- Melting operation : Radioisotope solution were added to the simulated waste. After drying, these waste were filled into a ceramic canister, heated up to the operation temperature, melted for the prescribe hours, and cooled.
- Analyses of the radioactivity in the solidified product.
- Leaching tests.

These experiments were carried out on the following experimental conditions:

1. Waste treated : Carbon steel, Heat insulator, two type of incinerated ash.
2. Operation temperature : 1400 ~1600°C
3. Heating hours : 1~ 3 hours.
4. Nuclides : C-14, Co-60, Ni-63, Sr-85(instead of Sr-90), Tc-99, I-131(instead of I-129), Cs-134(instead of Cs-137). Safety assessment of these nuclides with H-3, Ni-59, Nb-94, and α nuclide are mainly carried out for the shallow land burial project in Japan.
5. Leaching test conditions : Leaching test conformed to MCC-1P(Material Characterization Center) method on the following conditions:
 - Leachate : Distilled water and Synthetic groundwater(Solution equilibrated with concrete and distilled water in the range of pH 10 ~ 12.)
 - Leaching time : 7 ~ 196 day.
 - SA/V : 0.1. 7.0 cm⁻¹.

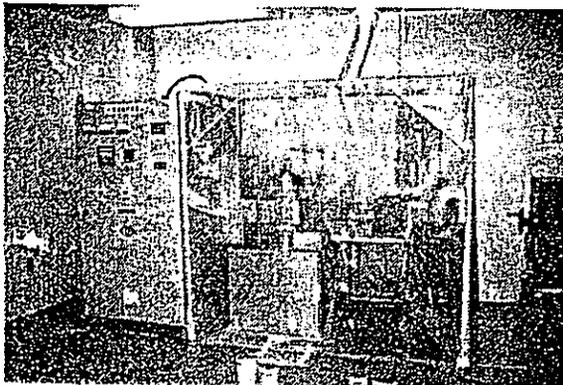


Fig Laboratory scale hot test apparatus

Table 3 Main specification of laboratory scale hot test apparatus

• Induction capacity	20 kW
• Frequency	30 kHz
• Operation temperature	1400~1600°C
• Size of a solidified product	approx. 45mm×45mmH

RESULTS AND DISCUSSION

RESIDUAL FRACTION OF NUCLIDES IN THE PROCESS OF MELTING

Table 4 shows the fraction of residual nuclides during melting. The fraction of residual nuclide was calculated as follows:

$$\frac{\text{Radioactivity in the solidified body (Bq)}}{\text{Radioactivity in the waste treated (Bq)}}$$

Table 4 Fraction of nuclides remaining in a product in melting operation

Nuclide	Fraction of nuclides remaining in a solidified product(%)		
	Heat insulator	Incinerated ash A	Incinerated ash B
C-14	< 0.1	< 1	< 1
Co-60	> 99	> 99	> 99
Ni-63	> 99	> 99	> 99
Sr-85	> 99	> 99	> 99
Tc-99	> 99	> 99	> 99
I-131	< 1	< 1	< 1
Cs-134	56	71	54

Experimental conditions : Operation temp. : 1400°C
: Melting time : 1 hour

Note : The content of iron oxide in incinerated ash A was 9 times higher than that of ash B.

The nuclides behavior in the process of melting obtained from these experiments can be divided into three groups:

1. Non-volatile nuclides: Co-60, Ni-63, Sr-85 (instead of Sr-90) and Tc-99

Almost 100% of these nuclides remained in the solidified products during melting. In general, Co-60, Ni-63 and Sr-85 are reported to be non-volatile nuclides, which showed similar results in these experiments.

Tc-99 is reported to show a different behavior as follows due to the redox conditions during melting [5]:

- Under normal oxidizing conditions, Tc is in the +7-state, and substantial losses of Tc occur as a result of compound volatility.
- The reducing conditions lead to the formation of TcO₂ and metallic Tc which remains in the solidified product under high temperature condition.

In the induction heat melting system, the inside of the canister is supposed to be maintained in a state close to the reduction conditions due to the oxidation reaction of carbon contained in the canister.

Tc-99 was, therefore, reduced to TcO₂/metallic Tc and remained in a solidified product in these experimental conditions.

2. Volatile nuclides: C-14, I-131(instead of I-129)

These two nuclides released to off-gas during the melting operation, and their radioactivity concentration in the solidified product was below the detectable limit. Although no experiments were carried out on H-3 which is one of the nuclides assessed for the disposal project, it is supposed to release from solidified products almost 100% like C-14 and I-129.

Since C-14 is one of the key nuclides in the safety

assessment for the disposal project, the detail evaluation of the radioactivity concentration in the solidified product is an important issue [6]. Figure 2 shows the residual fraction of C-14 at 1400 to 1600 °C. In this experiment, the radioactivity in the waste treated was increased by 10^3 of the above-described experiment in order to improve measurement accuracy.

As Figure 2 shows, the C-14 concentration in the solidified product (both ceramic and metal blocks) at 1400 to 1600°C was below the detectable limit and the residual fraction was lower than 10^{-4} . A residual fraction of oxalic acid which is an organic, C-14 was also confirmed to be lower than 9×10^{-5} .

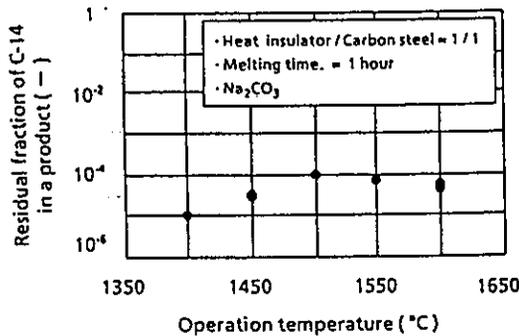


Fig.2. Fraction of C-14 remaining in a product versus Operation temperature (Radioactivity in a product were under detectable level in each temperature.)

3. Cs-134 (instead of Cs-137)

50 to 70% of Cs-134 remained in the solidified product under the condition of one hour melting at 1400°C.

Cs-137 is a key nuclide for determining the radioactivity of Sr-90 and α nuclides in a solidified product (the Cs-137 radioactivity in a solidified product is measured by non-destructive measurement and a radioactivity of Sr-90 and α nuclides is determined by the scaling factor method). For this purpose, to determine the residual fraction of Cs after melting and to correct the measured radioactivity is necessary for the determination of the radioactivity of Sr-90 and α nuclides in a solidified product.

The volatile behavior of Cs is reported to be under the influence of the heating temperature, heating time, composition of the melted material, etc [7].

Figure 3 shows the residual fraction of Cs-134 during melting at 1400 to 1500°C for one hour, and Figure 4 shows the residual fraction during melting at 1500 °C for one to three hours.

The Cs-134 residual fraction at 1400 to 1500°C was within the range of 40 to 50%. The residual fraction tended to decrease along with the melting time; it was about 20% when melted at 1500°C for three hours.

The surface temperature of the melted material of this experiment was almost equal to the operation temperature (up to 1500°C). On the other hand, in actual operations, the surface temperature of the melted material is maintained lower than the operation temperature because the surface is covered with supplied waste. For this reason, the residual fraction of Cs tends to be restrained in actual melting treatment, and it is necessary to ensure a residual Cs fraction during actual operation in the future.

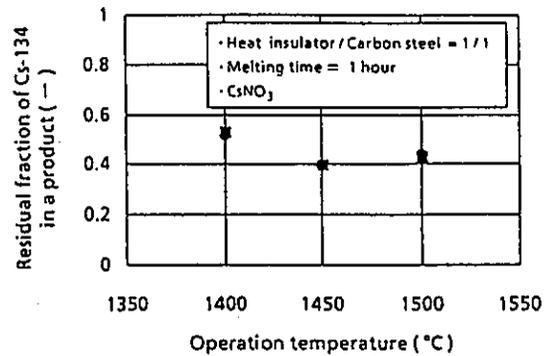


Fig.3 Fraction of Cs-134 remaining in a product versus Operation temperature

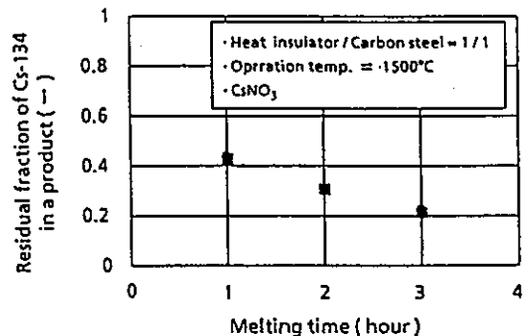


Fig.4 Fraction of Cs-134 remaining in a product versus Melting time

NUCLIDES DISTRIBUTION IN A SOLIDIFIED PRODUCT

The solidified product by melting consists of a metal block and a ceramic block corresponding to the kind of waste treated. Table 5 shows the residual nuclide distribution in each block of the solidified product after melting.

1. Distribution of nuclides in the metal block

Co-60, Ni-63 and Tc-99 were mostly distributed in the metal block and their distribution in the ceramic block was under the detectable limit.

2. Distribution of nuclides in the ceramic block

Sr-85 (instead of Sr-90) and Cs-134 (instead of Cs-137) distributed in the ceramic block.

The nuclides to be evaluated for safety assessment for the disposal project besides the five nuclides described above (except the volatile nuclides H-3, C-14 and I-129) are Nb-94 and α nuclide.

The results of the cold tests carried out with Nb (cold tracer) and Ce, instead of Nb-94 and α nuclide, showed that these nuclides were distributed in the ceramic block and were under the detectable limit in the metal block.

Since the reactions between the metal and ceramic blocks are mainly controlled by oxidizing/reducing reactions, the nuclide distribution in the metal and ceramic blocks could be estimated mostly by the standard free energy of oxide formation. Figure 5 shows the standard free energy of oxide formation of the respective elements. The tendency in the formation of oxides or the metallic element estimated by Figure 5 is similar with the experiment results.

Table 5 Distribution of nuclides in metal/ceramic block of a solidified product

Nuclide	Distribution of nuclides(X) in	
	metal block	ceramic block
Co-60	> 99	< 1
Ni-63	> 99	< 1
Sr-85	< 1	> 99
Tc-99	> 99	< 1
Cs-134	< 1	> 99
Nb(cold tracer)	< 2	> 98
Ce(instead of α)	< 2	> 98

Experimental conditions

- Operation temp. : 1400°C
- Melting time : 1 hour
- Waste treated :
- Heat insulator/Carbon steel = 1/1

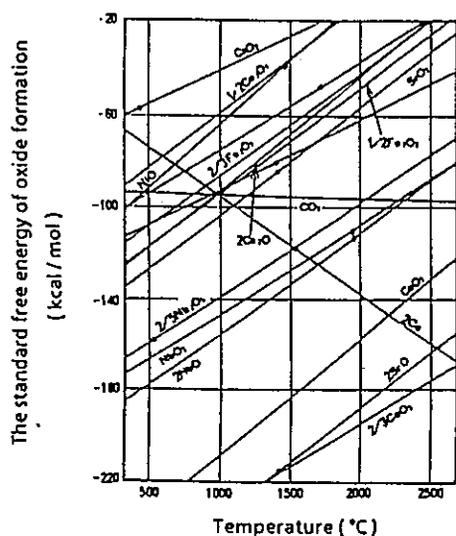


Fig.5 The standard free energy of oxide formation

LEACHABILITY OF NUCLIDES FROM A SOLIDIFIED PRODUCT

Table 6 shows the leaching rates of nuclides from a solidified product under conditions which simulate the underground water of the Shallow land burial center in Rokkasho. Figure 6 shows the result of the leaching test for Na (a main component of a solidified product) as a function of [(SA/V).t].

In hot tests (Table 6), the radioactivity concentration was below the detectable limit in the leachate under most of the experiment conditions. The leaching rates, calculated from the detectable limit values, were 10^{-7} to 10^{-6} g/cm² · day in the 28day test and 10^{-9} to 10^{-7} g/cm² · day in the 196day test, and these were found to be sufficiently good.

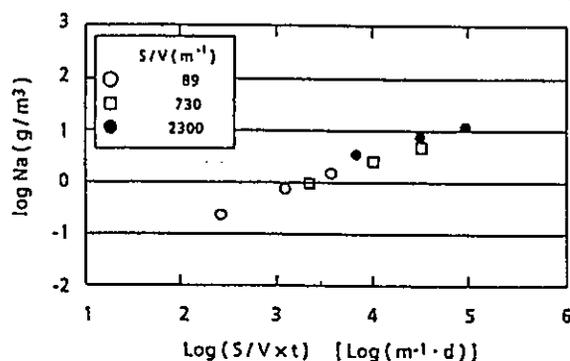


Fig.6 Effect of S/V on Na leachability (one of main element of a product)

- 1. Leaching conditions : • Distilled water, • 10°C
- 2. Melting conditions : • 1450°C
- 3. Waste treated : heat insulator, concrete, filter

Table 6 Leaching rate of solidified products by Induction heat melting emmersed at 10 °C (simulated at disposal site condition)

Leachate	Leaching time (day)	SA/V (cm ⁻¹)	Distilled water				(g/cm ² · day)
			28		196		Synthetic groundwater
			0.1	7.0	0.1	7.0	28
Metal block	Co-60	N.D. (6.5 × 10 ⁻⁶) N.D. (7.0 × 10 ⁻⁶)	-	-	-	N.D. (8.5 × 10 ⁻⁷)	
	Ni-63	N.D. (2.1 × 10 ⁻⁶) N.D. (1.9 × 10 ⁻⁶)	-	-	-	N.D. (2.9 × 10 ⁻⁶)	
	Tc-99	N.D. (5.9 × 10 ⁻⁷) N.D. (7.9 × 10 ⁻⁷)	-	-	-	N.D. (1.0 × 10 ⁻⁷)	
Ceramic block	Sr-85	Ash	N.D. (2.2 × 10 ⁻⁶) N.D. (2.2 × 10 ⁻⁶)	N.D. (8.1 × 10 ⁻⁷) N.D. (8.0 × 10 ⁻⁷)	N.D. (1.0 × 10 ⁻⁷)	N.D. (1.0 × 10 ⁻⁹)	6.7 × 10 ⁻⁶ N.D. (2.4 × 10 ⁻⁶)
		Heat insulator	6.7 × 10 ⁻⁶ N.D. (2.4 × 10 ⁻⁶)	N.D. (5.6 × 10 ⁻⁷) N.D. (9.5 × 10 ⁻⁷)	-	-	N.D. (1.1 × 10 ⁻⁶)
	Cs-134	Ash	N.D. (7.7 × 10 ⁻⁷) N.D. (1.1 × 10 ⁻⁶)	N.D. (1.5 × 10 ⁻⁷) N.D. (1.5 × 10 ⁻⁷)	N.D. (1.5 × 10 ⁻⁷)	6.0 × 10 ⁻⁹	N.D. (1.3 × 10 ⁻⁶) N.D. (5.6 × 10 ⁻⁶)
	Heat insulator	N.D. (1.3 × 10 ⁻⁶) N.D. (5.6 × 10 ⁻⁶)	N.D. (1.3 × 10 ⁻⁷) N.D. (1.4 × 10 ⁻⁷)	-	-	N.D. (2.0 × 10 ⁻⁶)	

Figure 6 shows the leaching behavior of the main component element (Na) from a solidified product. Figure 6 shows that leaching of a main element from a solidified product by melting can be expressed as a function $(SA/V)t$ and the possibility that the leaching of the main elements are controlled by their solubility.

These values show that the confinement performance of the solidified product by melting is equal to or higher than that of the cement-solidified product (main solidified product for the first stage of Shallow land burial started in December 1992 in Japan).

CONCLUSIONS

The radionuclides behavior in induction heat melting and its products were estimated. Based on the following results, the solidified products were supposed to be suitable for the shallow land burial requirements such as the determination of nuclides concentration in products, the nuclide confinement, etc.

- Approximately 100% of Co-60, Ni-63 and Tc-99 remained in a product and distributed in metal block.
- Sr-85 and Cs-134 remaining in a product distributed in ceramic block.
- The activity of C-14 and I-131 in a product were under detectable level in melting conditions.
- The leaching rate of metal/ceramic block were in the range of 10^{-7} ~ 10^{-8} g/cm² · day.

ACKNOWLEDGEMENT

The authors are sincerely grateful to H. Uemura for the analyses of radioactivity in solidified products.

REFERENCES

1. Takahashi, K. et al., 1992, "Design and Construction of Low Level Radioactive Waste Disposal Facility at Rokkasho Storage Center", Proceedings, 8th Pacific Basin Nuclear Conference, pp 7.J.1-7.J.5.
2. Sappok, M., 1991, "Recycling of Metallic Materials from the Dismantling of Nuclear Plants", Kerntechnik, Vol.56, pp 376-378.
3. Hoffelner, W., et al., 1992, "Plasma Technology for Rapid oxidation, Melting and Vitrification of Low/medium Radioactive Waste", Nuclear Engineering International, Oct., pp 14-16.
4. Tokura, T., 1991, "Present Status of Advanced Treatment Technologies for Radioactive Solid Wastes", Proceedings, 6th SINO-JAPANESE Seminar on Nuclear Safety, pp 6.2.1-6.2.16.
5. Freude, E. et al., 1989, "Investigation of the Redox Behavior of Technetium in Borosilicate Glass Melts by Voltammetry", Sci. Basis Nucl. Waste Manage. 12", pp 199-204.
6. Yamanaka, T. et al., 1991, "Nondestructive Measurement of Density and Radioactivity Distribution in Miscellaneous Solid Wastes packed in a Drum Package", Proceedings, 1991 Joint International Waste Management Conference, Vol.1, pp 297-303.
7. e.g.: Vance, E.R., et al., 1988, "Volatile Losses from Sphene Glass-ceramic and Borosilicate Glass Melts", Journal, Am. Cer. Soc., Vol.71, pp 318-320.
Carpenter, J.H., et al., 1984, "Cesium Vaporization Losses from the Synroc Mineral Barium-cesium Hollandite", Nuclear Waste Management, pp 730-735.

参考文献 3

切断方法の検討

切断対象となる金属廃棄物は、ステンレス鋼、炭素鋼が主体とはいえ、金属類一般とする必要があり、材質は特定できない。また、形状、肉厚も多種多様で特定できず、極厚品の混入も想定する必要がある。

以上の対象物の特性を考慮して、一般産業における以下の切断装置について、適用範囲、切断速度、取扱性、二次廃棄物、廃棄物形状の自由度、騒音、コスト等の観点より調査を実施した。その結果を表一 切断装置の調査(一般産業)に示す。

- ① 剪断方式(シャー)
- ② 高速回転砥石方式
- ③ バンドソー切断方式
- ④ ガス切断方式
- ⑤ プラズマ切断方式
- ⑥ レーザ切断方式
- ⑦ ウォータージェット切断方式

表に示すように、適用性のある方式としては、剪断方式(シャー)、高速回転砥石方式、ガス切断方式、プラズマ切断方式が考えられた。しかし、剪断方式(シャー)は、プラズマ切断方式に処理速度で劣り、ガス切断方式は酸素-アセチレンガスを使用するため、セル内での安全性に問題があるため、プラズマ切断方式が優れると判断した。また、プラズマ切断機は、ロボットとの組合せによる自動切断機も実用化されており、また肉厚100mm程度までの切断が可能であることより実用性が高いと判断された。但し、プラズマ切断方式は、鉛等の低融点物質には不向きであり、これについては高速回転砥石方式が優れるため、合わせて高速回転砥石方式も選定した。

表一切断装置の調査(一般産業)

項目 方式	原理	特徴	適用範囲(MAX)	切断速度 (概略)	取り扱い性	2次廃棄物	廃棄物形状の自由度		騒音	コスト	評価
							形鋼、パイプ等	大物容器			
剪断方式 (シャー)	2枚の相対する剪断刃により材料を切断する。	厚物の切断には大きな動力を必要とし装置が大型化となる。 動力・油圧プレス方式がある。	機械構造上より 加工機用 丸鋼 ~ φ90mm 板材 ~ 13mm(600Ton) 鉄屑解体用 H形鋼 250×250(210Ton)	0.1 ~ 0.5m/s	易	無	(加工機用) 小 (解体用) 大	難 (×)	高	高	△ 装置が大型化し適用困難 (加工機用は不向き)
高速回転 砥石方式	高速回転する砥石により材料を切断する。	切粉・火花等が飛散する。 乾式と湿式がある。	機械構造上より (砥石最大径±860) H形鋼 200×200	乾式 300cm ² /min 湿式 120cm ² /min	易	切粉・粉塵の 処理	大	難 (×)	高	中	○ 切粉等の処理が必要であるが適用可
バンドソー 切断方式	周回する鋸刃(帯状刃)により材料を切断する。	冷却材(切削液)が必要である。 類似方式として往復動の鋸刃で切断する方式もある。	機械構造上より (鋸刃速度 ~ 65m/min) W1000×H800以下の材料	40cm ² /min	易	冷却油	大	難 (×)	高	中	× 切断速度が低く又廃棄物に冷却油が付着し不向き
ガス 切断方式	酸素-アセチレン(プロパン)炎の熱で材料を溶融切断する。	形状へのフレキシビリティはあるが火花等が飛散する。	鉄、低炭素鋼の金属で切断 厚さの制限は通常100mm程度まで	50cm ² /min (at 10mm ² CS)	難 資格免状が必要	切粉	中	易 (○)	低	低	△ ガスを用いるためセル内での使用は不向き
プラズマ 切断方式	プラズマ流れによる局部溶融で材料を切断する。	粉塵・火花が飛散する。 複雑形状のものは切断しにくい。 IP、酸素、窒素、プラズマがある。	全金属 (C.S 100mm)	200cm ² /min (at 10mm ² CS)	易 (資格免状不要のためガス切断に比較して易)	粉塵の処理	中	易 (○)	中 酸素 プラズマ 高	低	○ 粉塵等の処理が必要であるが切断速度に優れ適用可
レーザー 切断方式	レーザービームによる高エネルギー密度集中による溶融で材料を切断する。	薄板しか切断できない。 非常に高価である。	全材質 板材 C.S 6mm	150cm ² /min	難	無	小	難 (×)	低	極めて高	× コスト高及び廃棄物形状に自由度が小さく適用不可
ウォータージェット 切断方式	超高压水(1000 ~ 4000kg/cm ²)と研磨材を高速噴射して、この衝撃エネルギーで材料を切断する。	複雑形状のものは切断しにくい。 装置が大型化。 (油圧・給水ユニット必要)	全材質(コンクリート含) を自由な形状に切断可能	6cm ² /min	難	水、研磨材	小	難 (×)	中	非常に高	× 切断速度低及び同上

2. コールドクルーシブル炉に関する調査

1.はじめに

本調査は金属溶融技術のうち、コールドクルーシブル炉に関する溶融データの整理、及び技術の現状整理並びに調査を行い、それらの結果を整理することによって α 金属廃棄物の減容設備としての適用性評価データに資することを目的とする。

2. コールドクルーシブル炉による溶融データの整理

ここでは、コールドクルーシブル炉に関する溶融データの整理を行う。溶融データの整理対象は、SUSの単独溶融、及びSSの単独溶融、SUS+SSの混合溶融とする。尚、処理の実際性を勘案し、Pb, Al、或いはZnといった低沸点金属等の夾雑物の微量混入処理時のデータも整理する。

溶融データは、処理量、処理温度、嵩密度、均質性等を中心に整理する。

2.1 D-50ドラムへの装荷試験

2.1.1 試験方法

1) D-50ドラム準備

動力炉・核燃料開発事業団内において使用しているD-50ドラムの外観を写真2.1に示す。これは、200リットル・ドラム缶内に普通ポルトランドセメントが内張りされているものである。普通ポルトランドセメントは、CaO, SiO₂, Al₂O₃が主成分で、水分もかなり含まれており、また、耐熱性は一般的に800℃程度であることが知られている¹⁾。したがって、溶解した鉄系溶湯をこれに直接鑄造（注入）することは安全上問題があり、セメントにさらにアルミナ不定形耐火物（商品名：プライタブミックス）を20~30mm内張りし（写真2.2）、これに直接、鑄造することとした。内張りしたアルミナ耐火物の厚さはドラム鉄皮温度が高温にならないように、完全断熱を仮定し熱容量を考慮して決定した。また、鑄造時のD-50ドラム温度測定を目的に熱電対設置用の孔も3箇所設置した。熱電対はR型シース熱電対を使用し、ドラム底部から280,500,700mm高さのセメント-アルミナ耐火物間と高さ280mmのドラム表面に設置した（図2.1、写真2.3）。

このように製作したD-50ドラム鑄型の水分除去を目的にガスバーナー加熱により乾燥させた（写真2.4）。バーナー加熱の際はアルミナーセメント間の熱電対温度が800℃以上にならないように注意しながら加熱を行った。このように準備、製作したD-50ドラムを写真2.5に示すように溶解室内のバッチ式コールドクルーシブル下部に設置した。

2) 溶解原料

写真2.6、表2.1に溶解原料を示す。

表2.1 溶解原料

	材質	形状	数量
初装	SS41	φ 50mm×200mmH	5本(約15.7kg)
	SUS304	φ 50mm×200mmH	5本(約15.7kg)
追装	SS41	φ 18mm×20mmH	約250kg
	SUS304	φ 18mm×20mmH	約250kg

3) 試験手順

バッチ式コールドクルーシブル内に、上記表2.1に示す初装材（SS41,SUS304 50%配合）を装入し、真空排気後アルゴン置換（200Torr）し、投入電力300kWで溶解した。初装材がメルトダウンした後、追装原料約20kg（SS41,SUS304 50%配合）を原料添加機構より追装し、約40kgの溶湯と約10kgのスカル（凝固殻）を形成させた。その後、溶湯をD-50ドラムに鑄造し、コールドクルーシブル内に残ったスカル内に再び原料を約40kg（SS41, SUS304 50%配合）を追装し、溶解する操作を14回（7ch/day）繰り返した。

表2.2にこの試験条件を示す。

表2.2 D-50ドラム試験条件

仕様	条件
溶解雰囲気	真空排気後アルゴン置換（200Torr）
溶解時投入電力	300kW
溶解量	約50kg/ch（内、スカル10kg）
温度測定	R熱電対 アルミナ-セメント間（280,500,700mm） ドラム表面（280mm）
溶湯サンプリング	1回/ch
溶解回数	14ch

2.1.2 試験結果および試験評価

1) 溶解

コールドクルーシブルに装入した初装材のうち、最初にSS41が赤熱され、さらに加熱が進むとSUS304も加熱され始め、結局SUS304が先にメルトダウンした。これは、発熱速度の式(1)から考えれば、キュリー点以下では比透磁率がSS41の方が大きいいため、速く加熱され、キュリー点を越えた時点で比透磁率に差がなくなり、結局、融点が低く、電気伝導度の小さなSUS304が先にメルトダウンしたものと考えられる。

$$Q = 4 \pi a^2 (\mu_r f / \sigma \times 10^{-7})^{1/2} (n \cdot I)^2 \dots (1)$$

ここで、Q : 単位長さ当たりの発熱速度 (W/m)

a : るつば内装入物の半径 (円柱を仮定)

μ_r : るつば内装入物の比透磁率

f : 周波数 (Hz)

σ : るつば装入物の電気伝導度 (S/m = 1/Ω/m)

n : コイル巻き数

I : コイル電流値 (A)

また、初装原料約31.4kg (SS41,SUS304 50%配合) の溶解に要した時間は約15分程度で、追装原料40kgの溶解に要した時間は約20分で非常にスピーディに溶解できた。

2) 鑄造

コールドクルーシブル炉体を傾動させることにより、約40kgの溶湯をD-50ドラムに鑄造したが、出湯作業そのものには全く問題なかった。しかしながら、出湯末期に真下に垂れる溶湯がD-50ドラム内壁に付着してバリを形成した。写真2.7は7ch鑄造終了後(1日目終了後)および14ch終了後(2日目終了後)の様子である。内壁に付着したバリが鑄造を繰り返していく間に、凝固収縮力により内側に倒れてくるのが観察された。このバリの生成は、D-50ドラムの設置位置とコールドクルーシブルの相対的な位置関係だけで決まるもので問題とはならない。

写真2.8は、7ch鑄造終了後（1日目終了後）の溶解室内の様子であるが、溶解室内壁にかなりの水滴が付着しているのが確認された。これは、鑄造により加熱されたアルミナ耐火物およびセメントから蒸発した水分が水冷されている溶解室の内壁で再び冷却されて付着したと考えられる。アルミナ耐火物の乾燥が不十分であったか、或いはそれだけでなく、セメント内の水分も原因の1つの考えられる。14ch終了後（2日目終了後）にはこの水滴は認められなかった。これは、7ch鑄造終了により（1日目終了）かなりの水分は蒸発したと考えられる。

3) 固化体取り出し作業

鑄造した固化体の性状を調査するため、写真2.9に示すように、固化体をD-50ドラムから取り出した。取り出しは容易ではなく、まず、ドラム缶をガス切断し、セメント、アルミナを破壊して取り出した。アルミナは焼結されたような状態であった。

4) 固化体

写真2.10に固化体の外観写真を示す。直径は約400mm、高さ490mmであり、表面にはアルミナが付着している部分が多く観察された。写真2.11に固化体の中心断面の外観を示す。

この固化体の切断は放電切断で実施した。固化体断面に14層が積層されているのが認められ、また、7層目までに集中して黒く見える穴が認められる。これはガス穴であり、発生した水分が蒸発しきれずに固化体内に閉じこめられたものと考えられる。8層～14層までにはこの黒い部分は認められない。これは、溶解室内壁に付着していた水分との対応を考えれば、2日目はD-50ドラムに残っていた水分が少量であったため、ガス穴が少ないものと考えられる。

この固化体の凝固組織は、通常の金属の凝固組織である。

5) 固化体の化学成分均質性

本試験ではSSとSUSを溶融したので、固化体の均質性を確認するため、代表成分としてNi, Crをとりあげ、この分布を測定した。この結果を図2.2に示す。図2.2において、▲はるつば内でサンプリングした溶湯中の濃度、○は固化体の層状部からサンプリングした凝固体中の濃度である。

この結果、次のことが明らかになった。

- ・溶湯中のNi,Crの分布と凝固体のNi,Crの分布は、良い一致を示しており、溶湯のサンプリングにより固化体の成分分布を行うことが可能である。

ただし、チャージごとにNi,Crの分布にゆらぎが見られるのは、添加した原料であるSSとSUSの配合割合が変わったためである。(なお、No.2及び14は溶湯のサンプリングは行っていない。)

6) D-50ドラム温度変化

図2.3に casting 時(1日目)のD-50ドラムの温度変化を示す。各位置の温度変化は casting の度に段階的に上昇しているのが認められた。これは溶湯が持ち込んだ熱量のため、下部ほど高温になっている。温度は最高で500~600℃程度であり、セメントの耐熱温度以下であった。また、初期は断熱状態に近いが casting を重ねる内に casting した固化体が増加し、これが冷却側に寄与するため、冷却が速くなっているのがわかる。これらの現象は、当初、予備検討したものに近く、2日目以降、この温度を観察することにより安全に実験が遂行できた。

7) 冷却水温度変化

図2.4~図2.10に冷却水系の温度変化、および投入電力値を示す。図2.4~図2.7はコールドクルーシブル内の水温変化、上コイル、下コイルの水温変化、および投入電力値であるが、初期が22~23℃程度で、作業中は最高40℃程度まで上昇している。また、これら3系統の冷却温度は投入電力パターンに敏感な変化を示していることがわかる。投入電力において、時々、パワーがOFFになっているのは、追装用の原料を添加する際に溶湯飛散することを防止するために一旦溶湯温度を低くして粘性を高めているため、誘導溶解において、一般的に行われている作業上のノウハウである。

溶解室、架台、バケット等の他の冷却水系は図2.8~図2.10に示すように投入電力には敏感に反応せず、最高25~30℃程度であり、実験開始後、緩やかに上昇し、実験終了後緩やかに減少した。これは、これらの系が間接的な冷却系であるからである。

8) 溶解時の熱バランス

上記の冷却水系の温度変化（各系の冷却水温度-入水温度）より、熱バランスを計算した結果を表2.3に示す。これによると、まず、投入電力は300kW(300kJ/sec)であり、冷却水流量と温度変化から計算した総熱移動量が304.1kJ/secであるため、ほぼ一致している。また、これによると、投入した熱量のうち、コールドクルーシブルから約60%、誘導コイルから約28%、るつぼ架台から約13%の熱が移動していることが認められた。

表2.3 溶解時の熱バランス

冷却水系	流量(l/min)	温度変化(°C)	熱移動量(kJ/sec)	(%)
コールドクルーシブル	190	13.75	182.0	59.2
コイル(上)	48	11.25	37.6	12.4
コイル(下)	50	13.25	46.2	15.2
溶解室	160	0.00	0.0	0.0
るつぼ架台	11	5.00	38.3	12.6
合計	459	-----	304.1	100.0

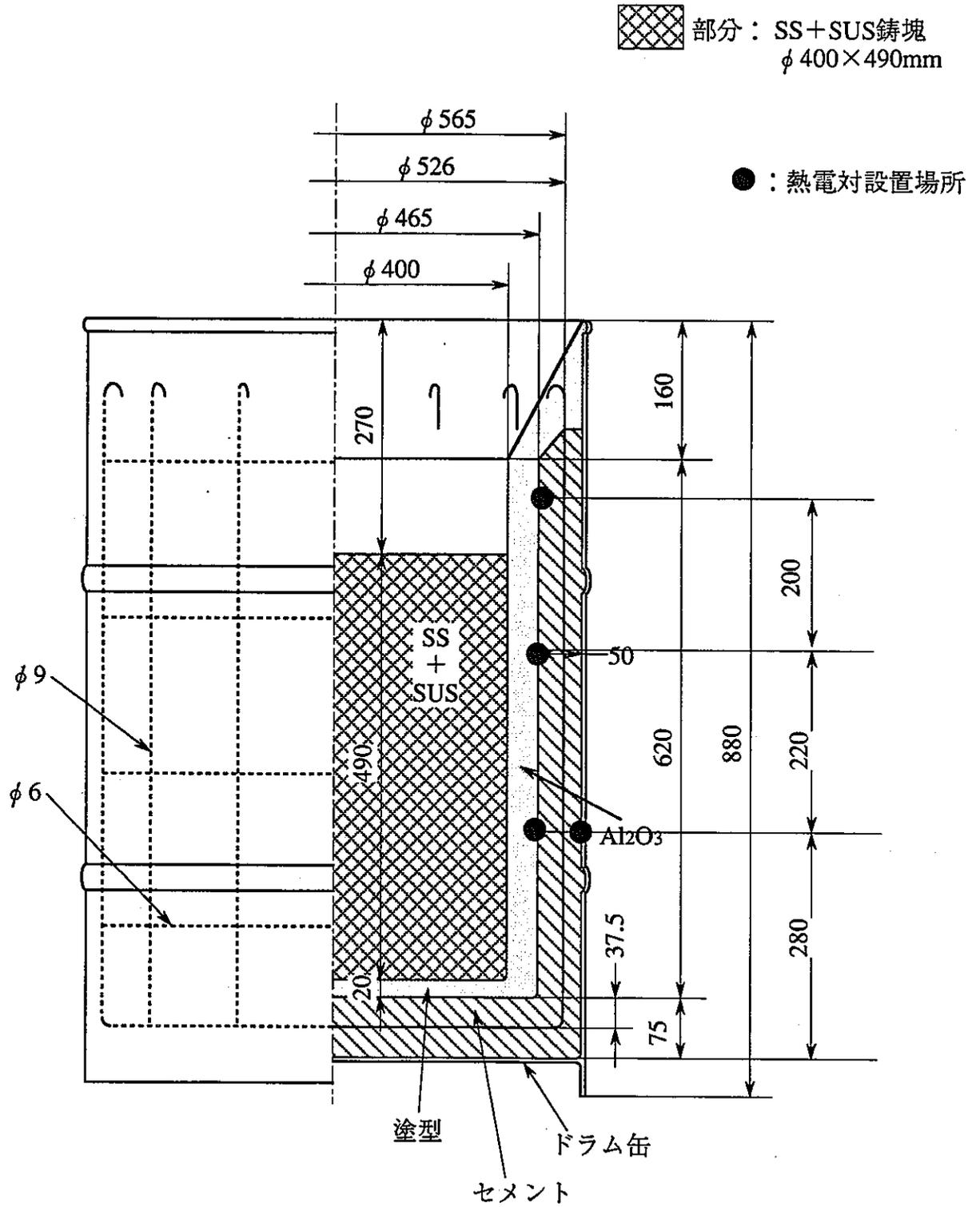


図2.1 D-50の概略図及び熱電対設置場所

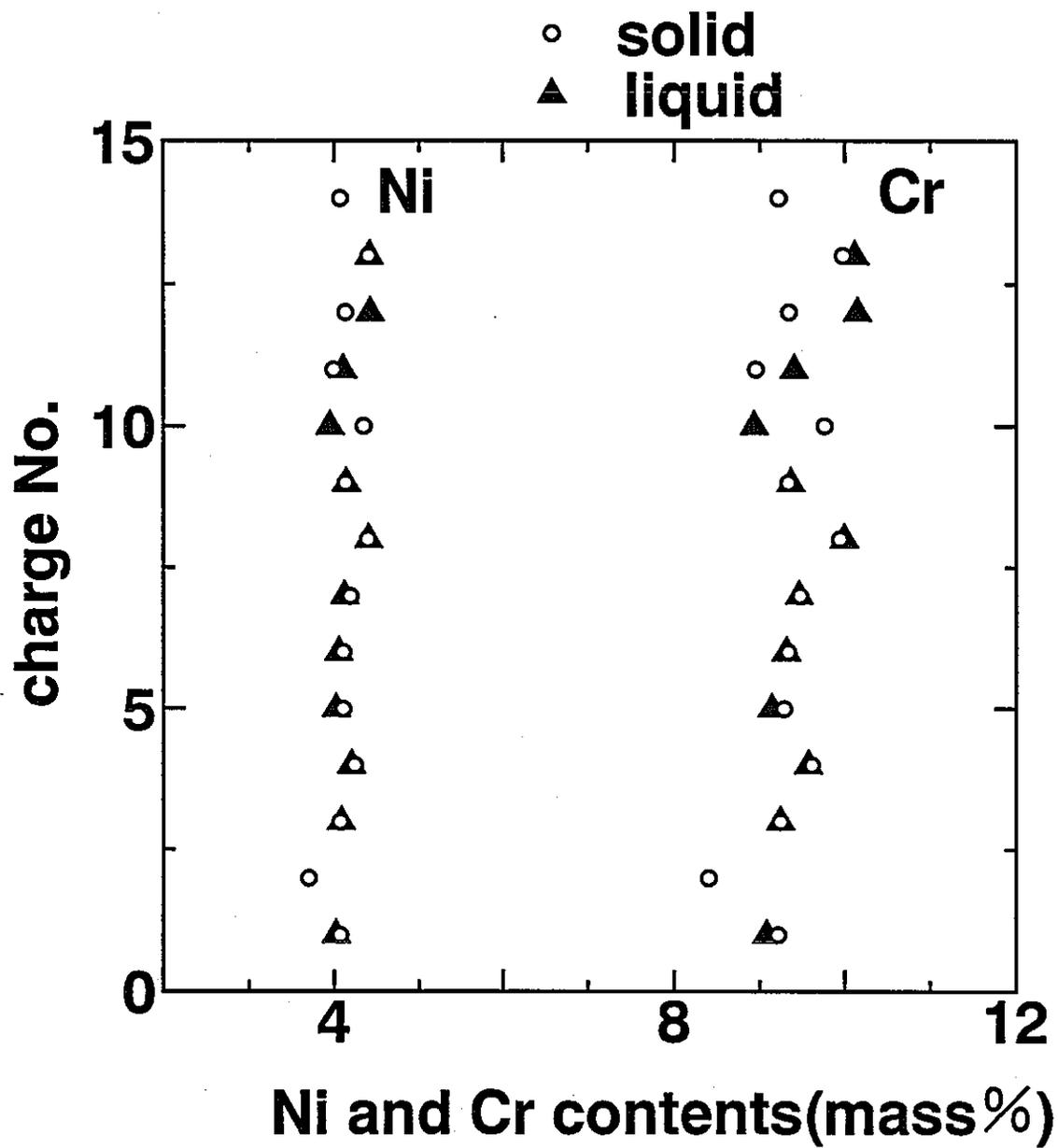


図2.2 D-50ドラムへの装荷試験におけるNi及びCrの分布

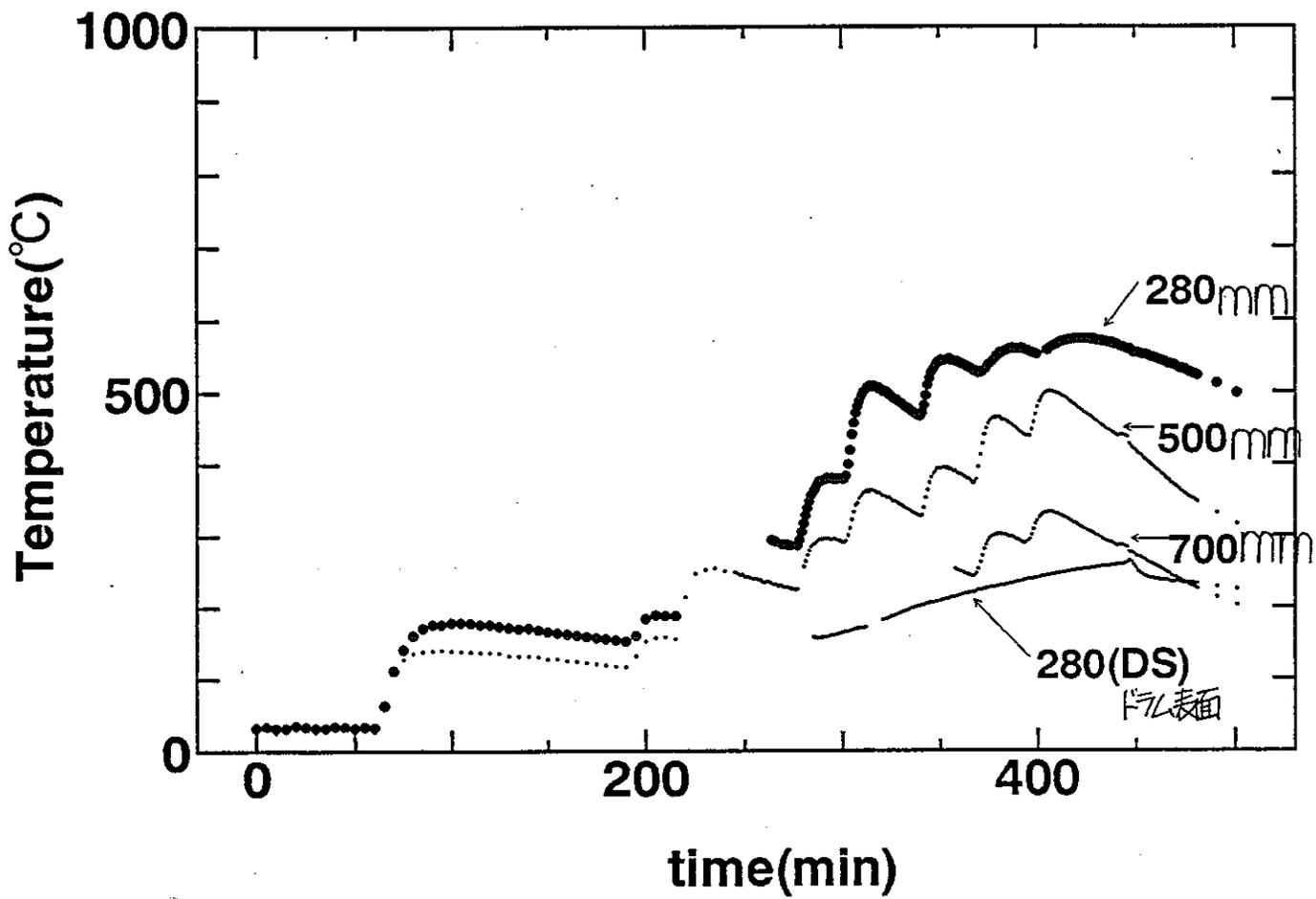


図2.3 D-50ドラム各部の温度分布

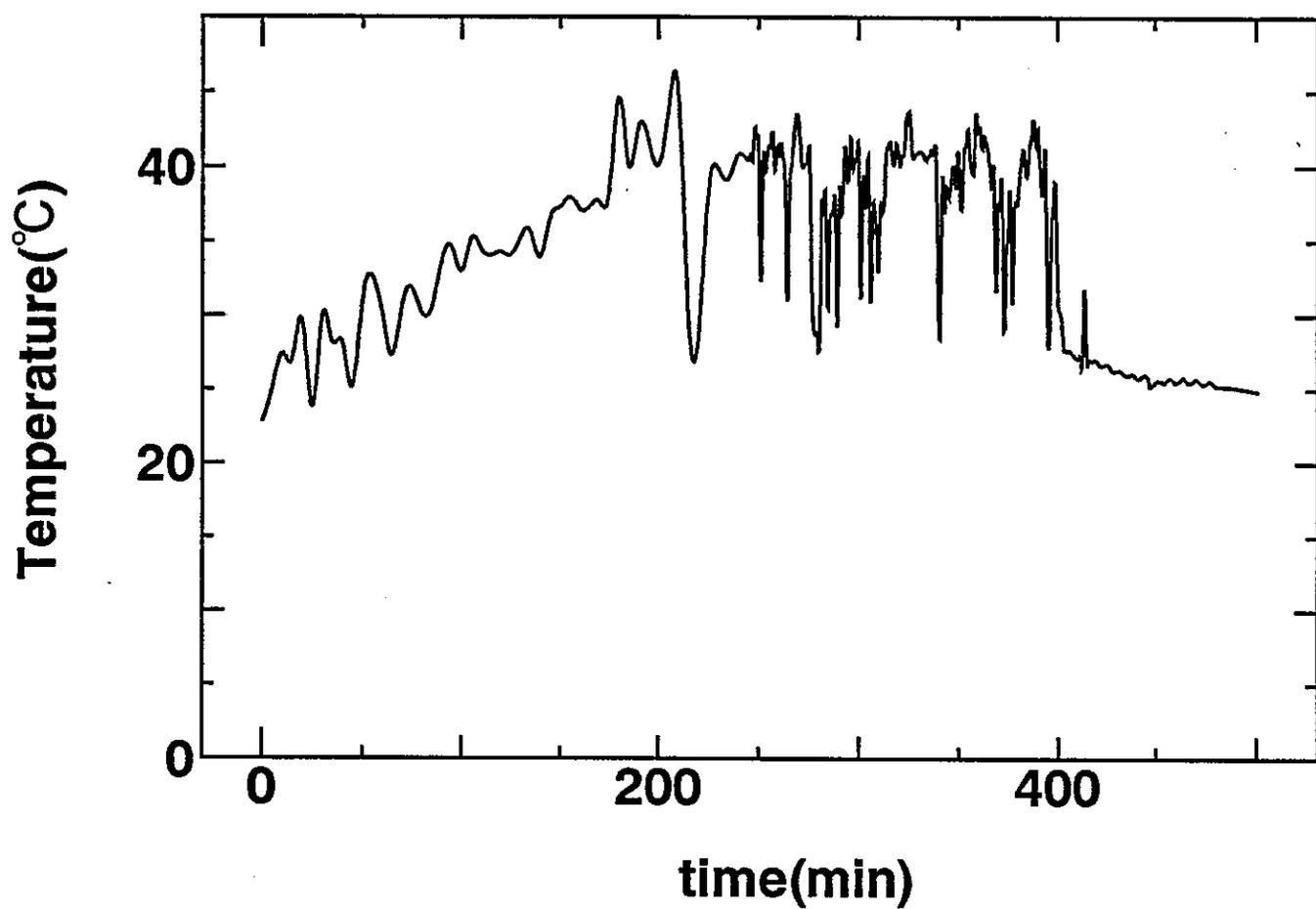


図2.4 D-50ドラムへの装荷試験でのコールドクルーシブル炉冷却水温度変化

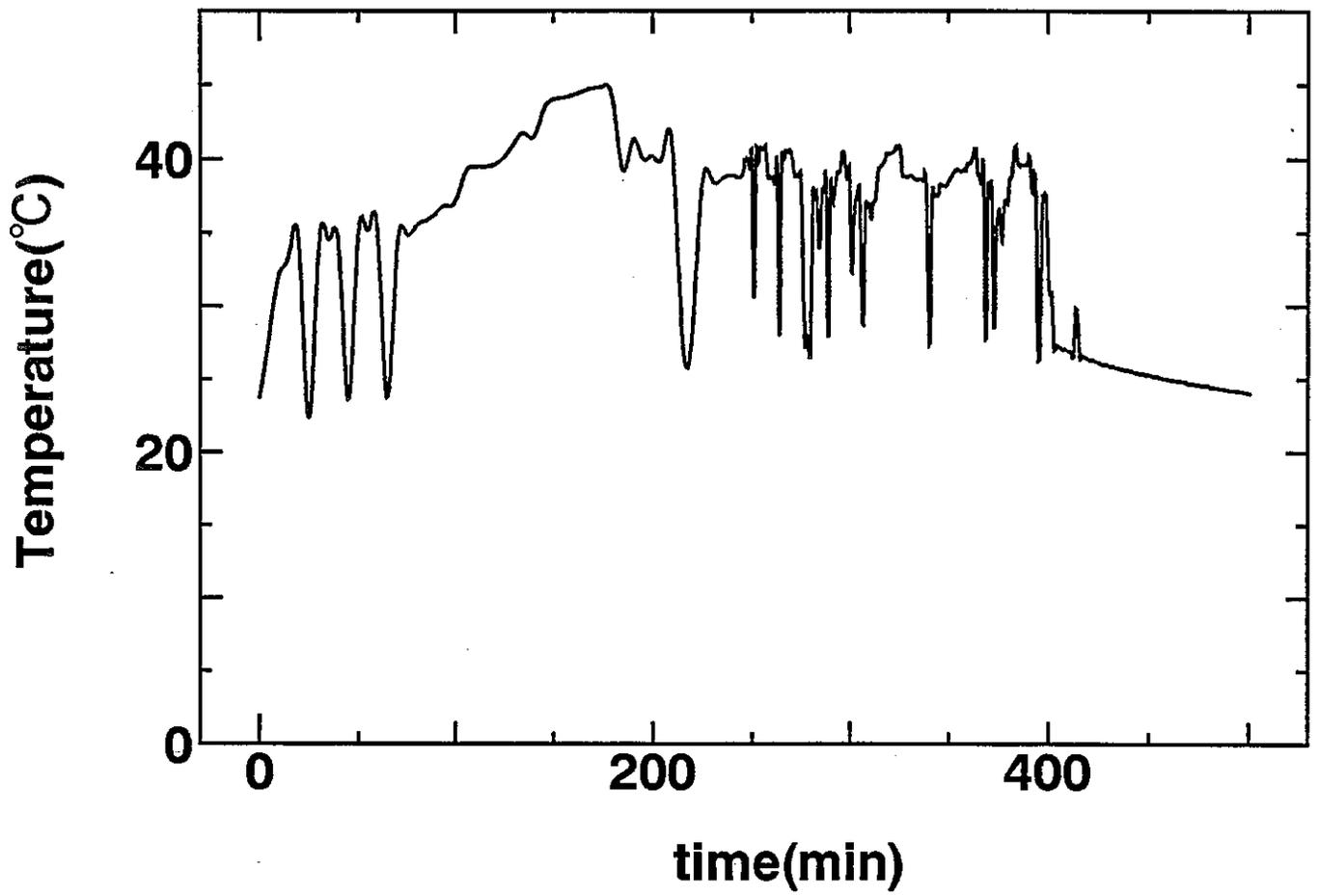


図2.5 D-50ドラムへの装荷試験での上部コイル冷却水温度変化

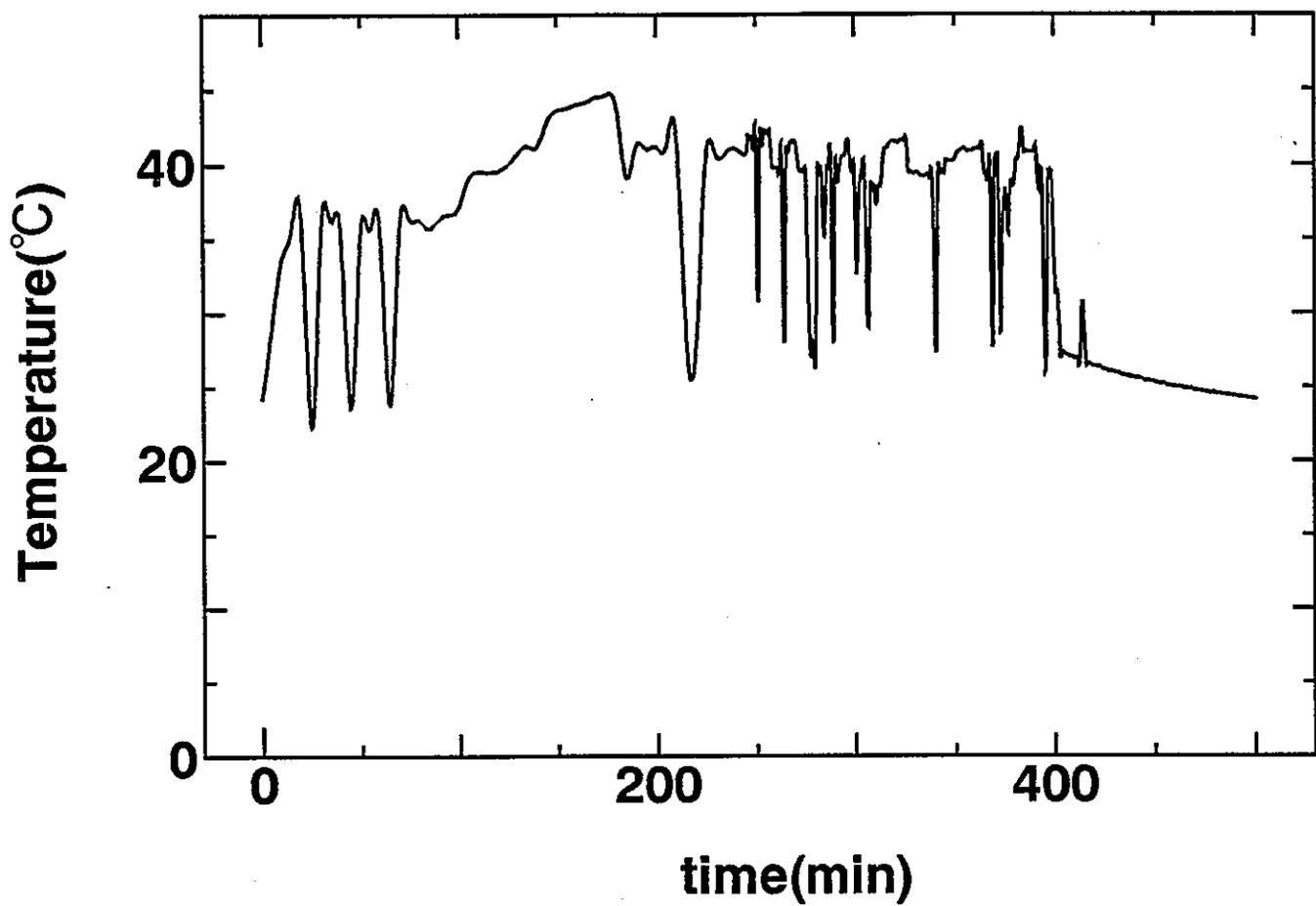


図2.6 D-50ドラムへの装荷試験での下部コイル冷却水温度変化

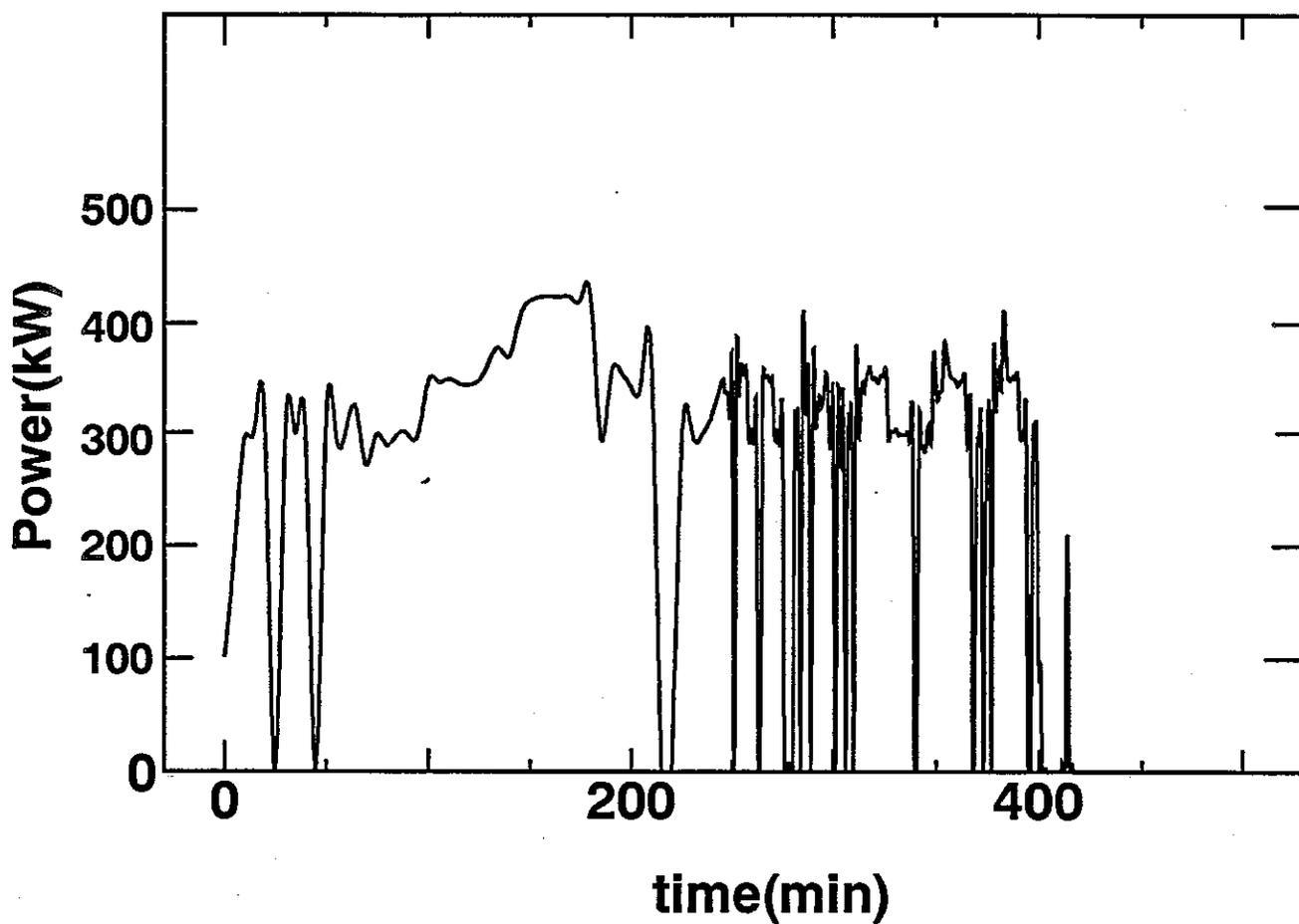


図2.7 D-50ドラムへの装荷試験での投入電力値

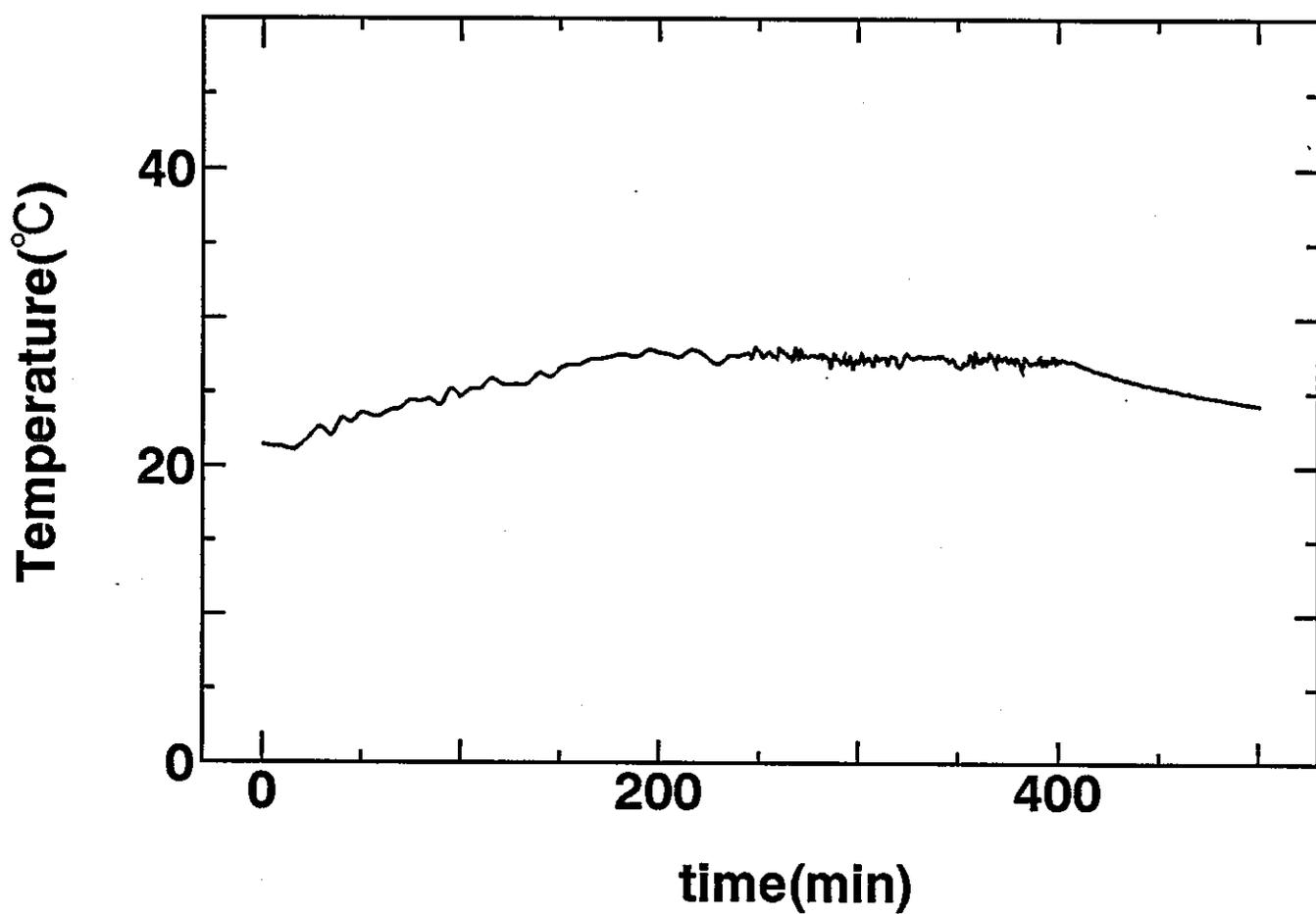


図2.8 D-50ドラムへの装荷試験での溶解室冷却水温度変化

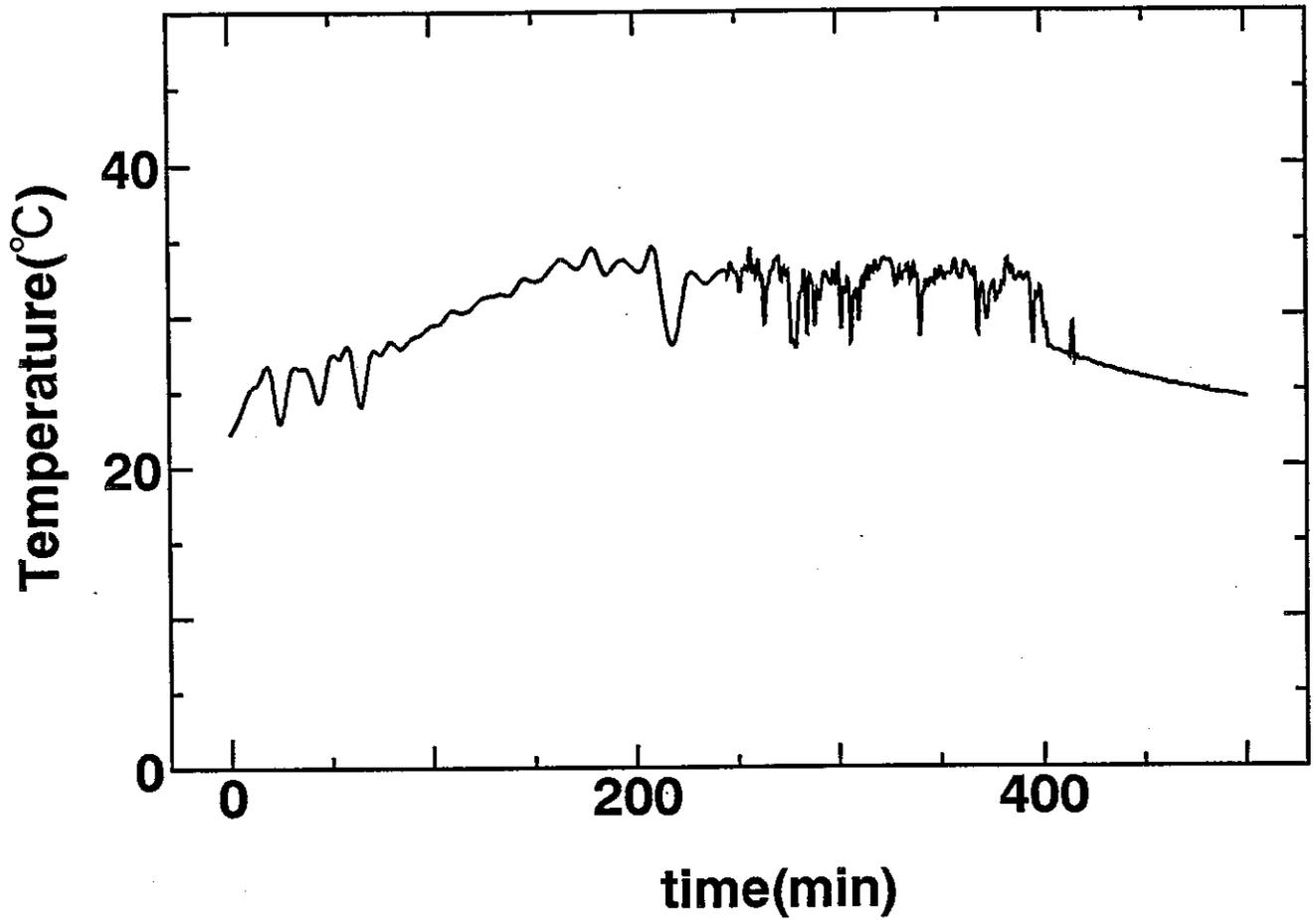


図2.8 D-50ドラムへの装荷試験でのるつは架台冷却水温度変化

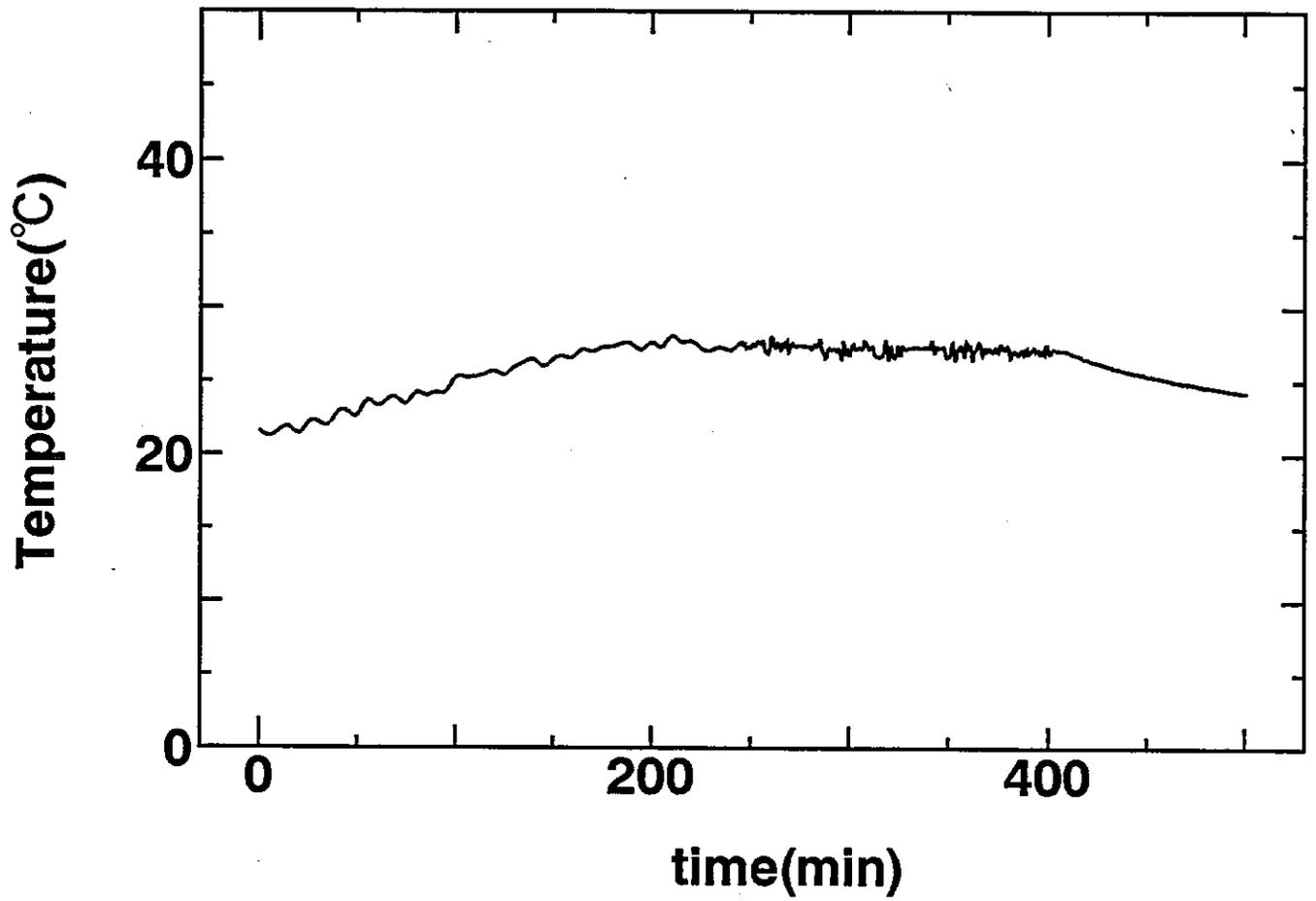


図2.8 D-50ドラムへの装荷試験でのバケット冷却水（入水）温度変化

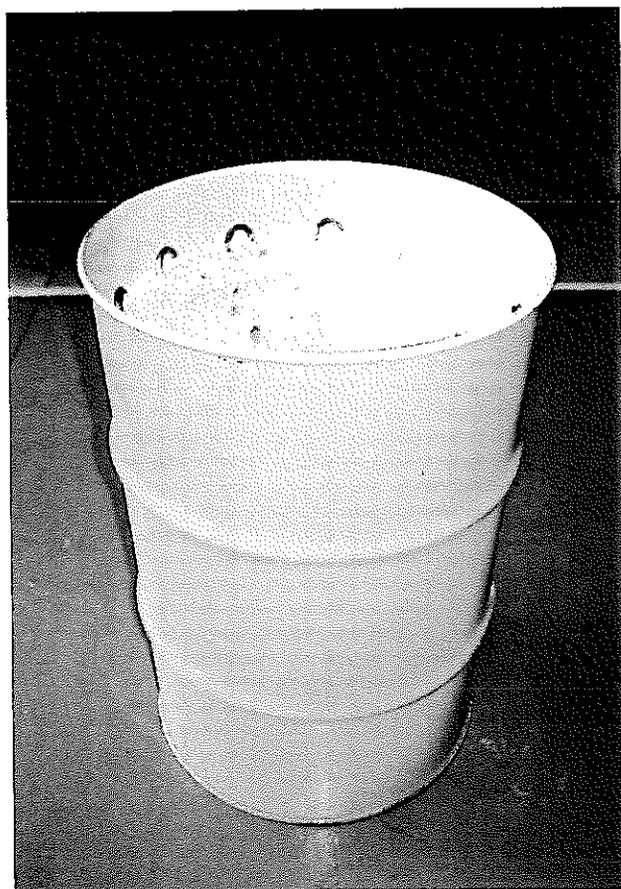


写真2.1 試験に使用したD-50ドラム外観（試験前）



写真2.2 耐火物（アルミナ）を塗布したD-50ドラム外観（試験前）

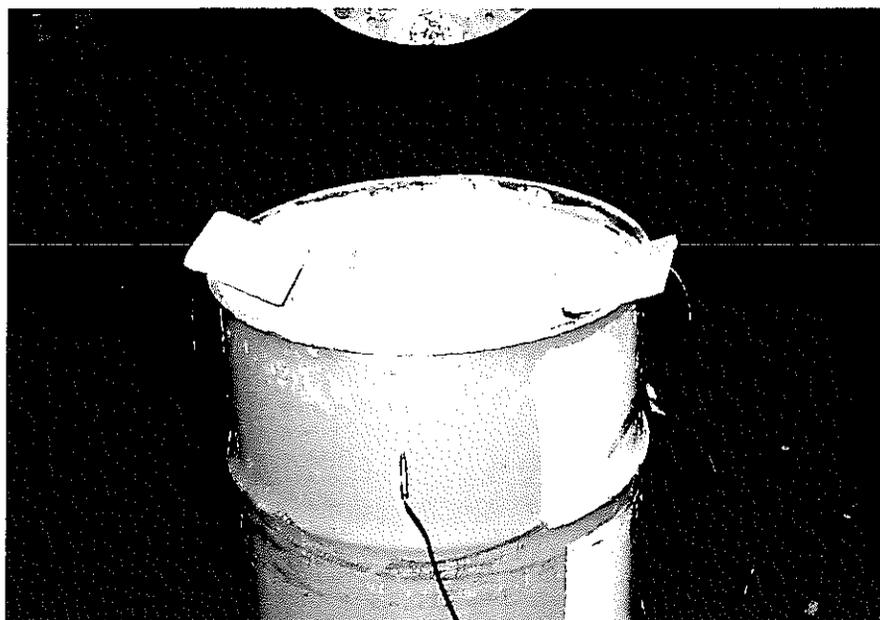


写真2.3 温度測定用熱電対を設置したD-50ドラム外観（試験前）

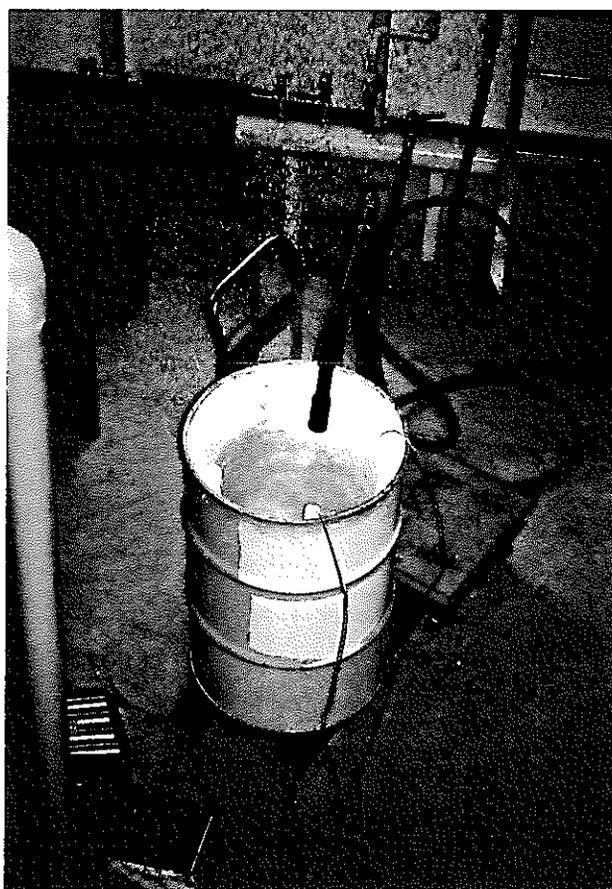


写真2.4 耐火物（アルミナ）を加熱処理中のD-50ドラムの様子

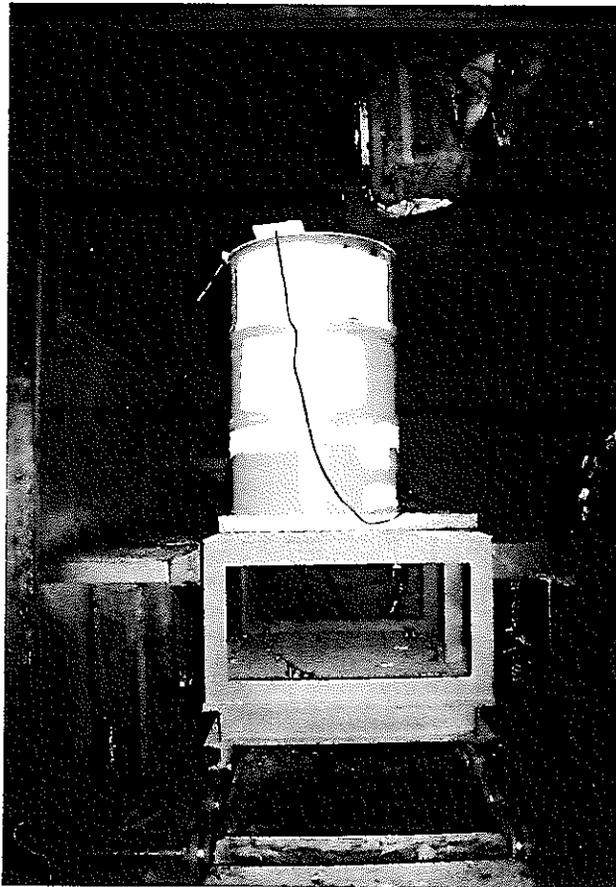
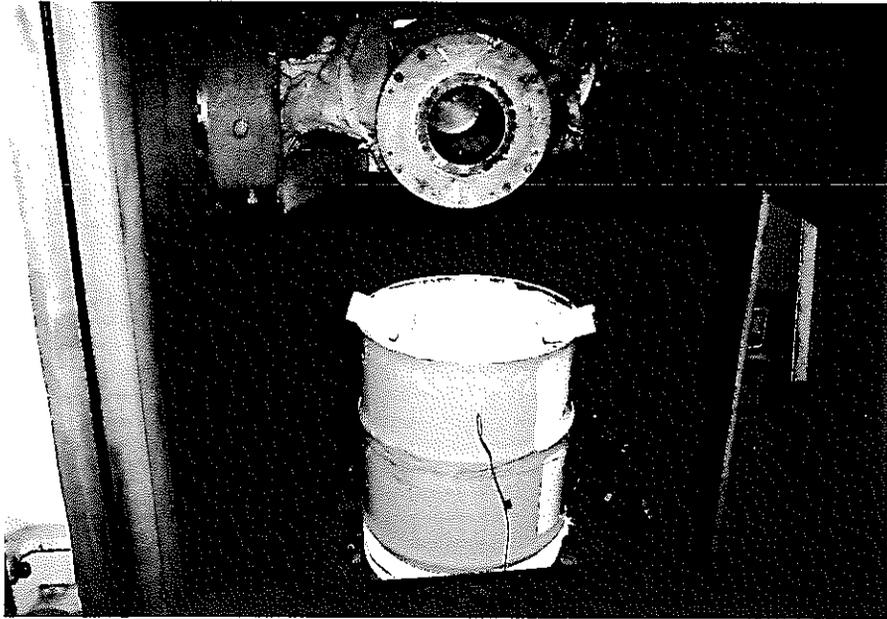


写真2.5 溶解室（チャンバー）内に設置した50ドラムの様子



写真2.6 溶融原料

(上の写真：コールドクルーシブル炉内に装荷した初期装荷原料)

(下の写真：追加装荷原料)

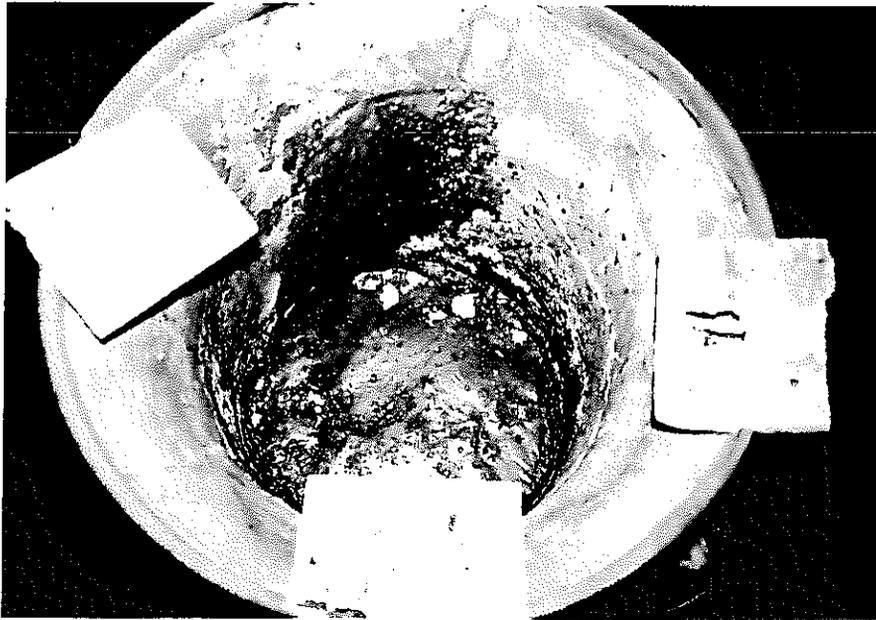


写真2.7 試験後のコールドクルーシブル炉内の様子
(上の写真：7チャージ（1日目）終了後のD-50ドラムの様子)
(下の写真：14チャージ（2日目）終了後のD-50ドラムの様子)

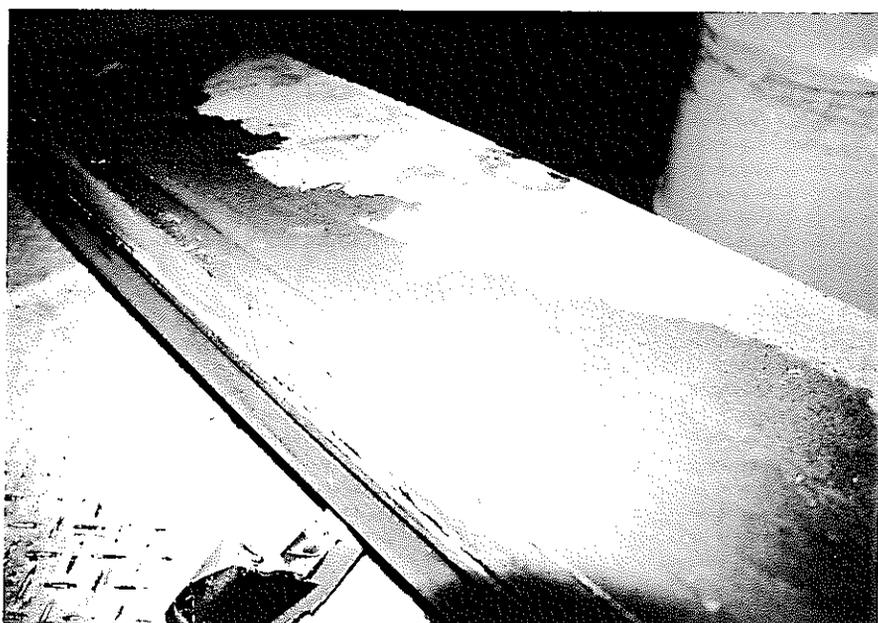


写真2.8 7チャージ（1日目）終了後の溶融室の様子
（内壁に付着しているのは水滴）



写真2.9 固化体取出し作業の様子

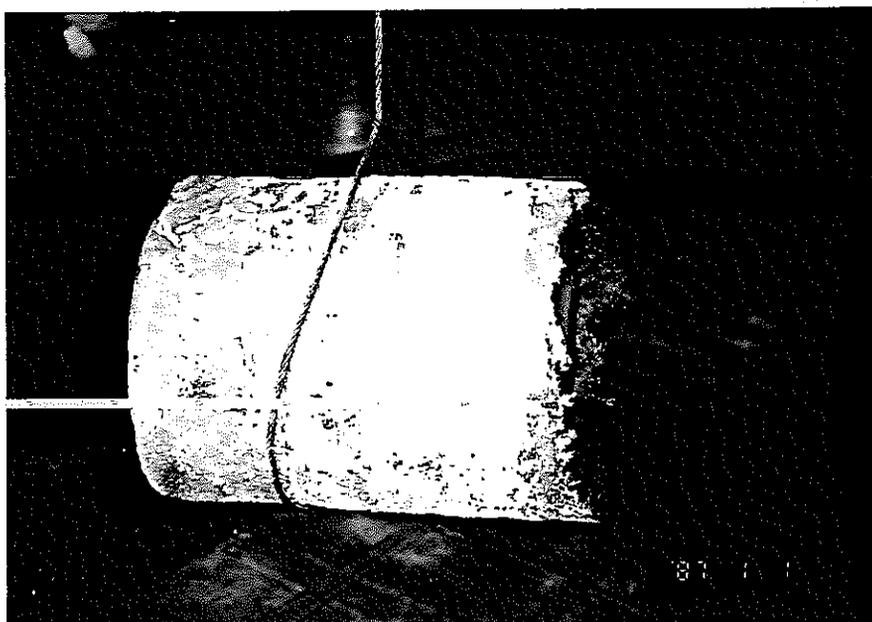


写真2.10 取出された固化体の様子

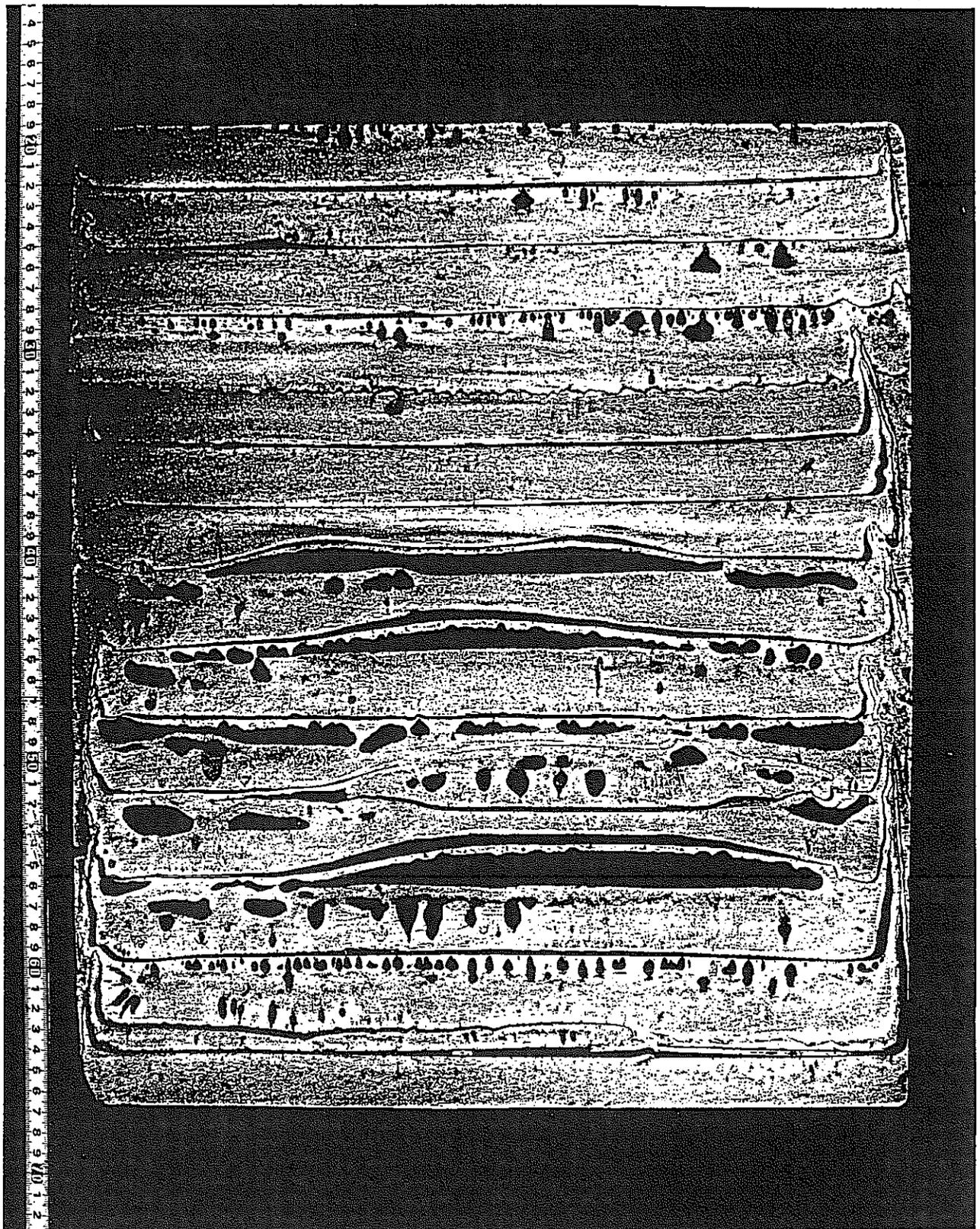


写真2.11 取出された固化体中心断面の様子

2.2 引き抜き試験

2.2.1 試験方法

本プロセスの概要図を図2.11に示す。本プロセスは、2.1節において説明したこれまでのバッチタイプのコールドクルーシブルに替わり、底のない引き抜き型のコールドクルーシブルを誘導コイル内に設置し、さらに引き抜き機構をコールドクルーシブル内に設置することにより実施するもので、具体的には、初装材を溶解し、上部から追装用原料を添加しながら、連続的に溶融固化させるプロセスである。

1) 溶解原料

試験に使用した溶融原料を表2.4に示す。

表2.4 溶解原料

実験名	材質	スターティング ブロック	初装材	追装材
RUN2	SUS304	φ 214mm×100mmH	φ 50mm×200mmH ×10本(約31.4kg)	φ 18mm×20mmH
RUN4	SS41	φ 214mm×100mmH	φ 50mm×200mmH ×10本(約31.4kg)	φ 18mm×20mmH

2) 引き抜き実験条件

引き抜きの条件を表2.5に示す。

表2.5 引き抜き条件

仕様	条件
溶解雰囲気	真空排気後アルゴン置換 (400Torr)
溶解時投入電力	300kW
溶解量	約140kg/ch
温度測定	データロギングシステム使用
引き抜き速度	3 mm/min
引き抜き方式	連続下降方式

2.2.2 試験結果および評価

1) 固化体

写真2.12、2.13に試作した鑄塊の外観写真を示す。これらは $\phi 214\text{mm} \times$ 約 600mmH で、ある。写真2.14、2.15にこれらの鑄塊の中心断面のマクロ組織を示す。鑄塊下部の灰色部がスターティングブロックであり、その上部に凝固組織が出ている部分が溶融固化した部分である。スターティングブロックの上部が溶融して固化体と接合しているのが認められる。また、鑄塊は全体的に引け巣等の鑄造欠陥もほとんど認められるず、安定した固化体が得られている。

2) 固化体の化学成分均質性

鑄塊の分析位置を図2.12に示し、SUSの成分分析結果を図2.13に、SSの成分分析結果を2.14に示す。SUSの成分分布については、Ni及びCrをSSの成分分析についてはCについて行った。

図2.13及び2.14より、固化体のNi, Cr, Cの分布は測定位置に関係無くほとんど一定である。これは、固化体均質性が高いことを意味し、コールドクルーシブル炉の攪拌効果が大きいことが分かる。

3) 出力電圧、出力電力

図2.15に本実験における出力電圧、出力電力を示す。溶解初期は投入電力を階段状に徐々に与え、約15分程度で初装材をメルトダウンしている。この後、スターティングブロックと初装材の接合を目的に、約10分間、一時的に投入電力を 350kW に上げ、さらに、再び 300kW に戻し、約1時間保持した。その後、原料添加機構より追装原料添加し溶解しながら、引き抜きを行う、いわゆる連続溶解鑄造を実施した。追装原料の添加速度は単位時間当たりに凝固する量と同じになるように与え、溶湯プールを一定に保つように行った。その制御法は比較的簡単で、一定出力電圧の下では出力電力がコールドクルーシブル内の被溶解物量に比例する関係を利用し、 300kW 一定となるよう添加速度を制御した。所定量の連続溶解引き抜きを行った後、原料添加を終え、パワーをかけたまま、溶湯が固化するまで引き抜きを実施した。連続引き抜き時にパワーが一時的に上がっているのはコールドクルーシブル内壁に付着したスカルを溶解するためである。ここで、パワーをかけたまま、引き抜いたのは引け巣欠陥を防止するためである。パワーを切って固めた後引き抜けば、鑄塊トップはフラットになるが、引け巣欠陥が形成される。

4) 冷却水温度

図2.16にコールドクルーシブル、上コイル、下コイル、水冷銅円盤(底)水冷円筒、溶解室、入水温度を示す。この結果から、引き抜きの場合も、バッチタイプと同様にコールドクルーシブル、上コイル、下コイルの水温は投入電力に敏感に対応しているのがわかる。また、水温上昇も最大で約40℃程度であり、順調に連続溶解鑄造が実施されている様子がわかる。

5) 熱バランス

引き抜き実験時の熱バランスも、D-50ドラムの実験時と同様に表2.6に示す。

表2.6 溶解時の熱バランス

冷却水系	流量(l/min)	温度変化(℃)	熱移動量(kJ/sec)	(%)
コールドクルーシブル	195	14.25	193.6	71.5
コイル(上)	46	10.5	33.6	12.4
コイル(下)	46	11.5	36.9	13.6
溶解室	145	0.3	3.0	1.1
水冷円盤	52	0.5	1.8	0.7
水冷円筒	21	1.3	1.9	0.7
合計	505	-----	270.8	100.0

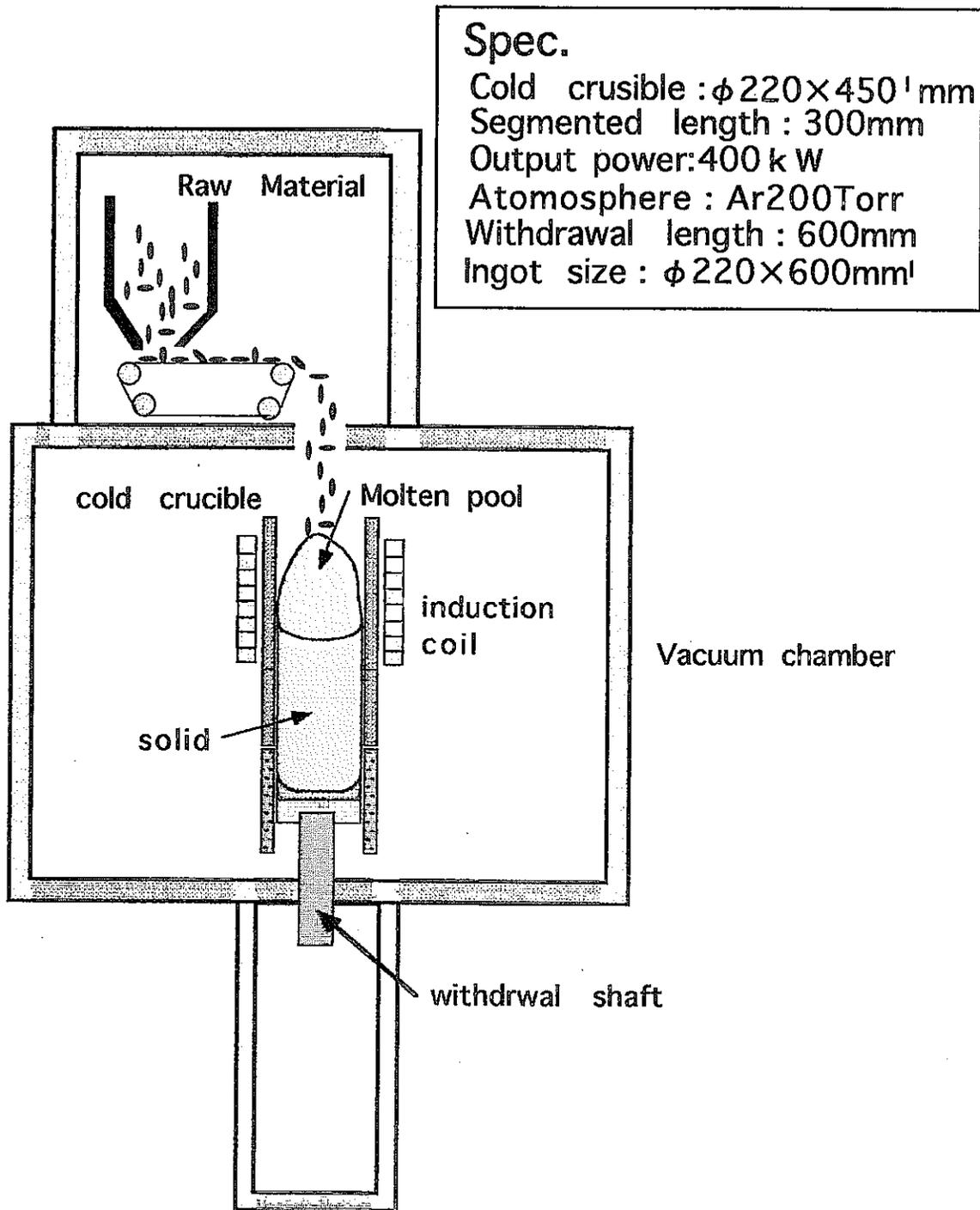


図2.11 引抜き試験の様子

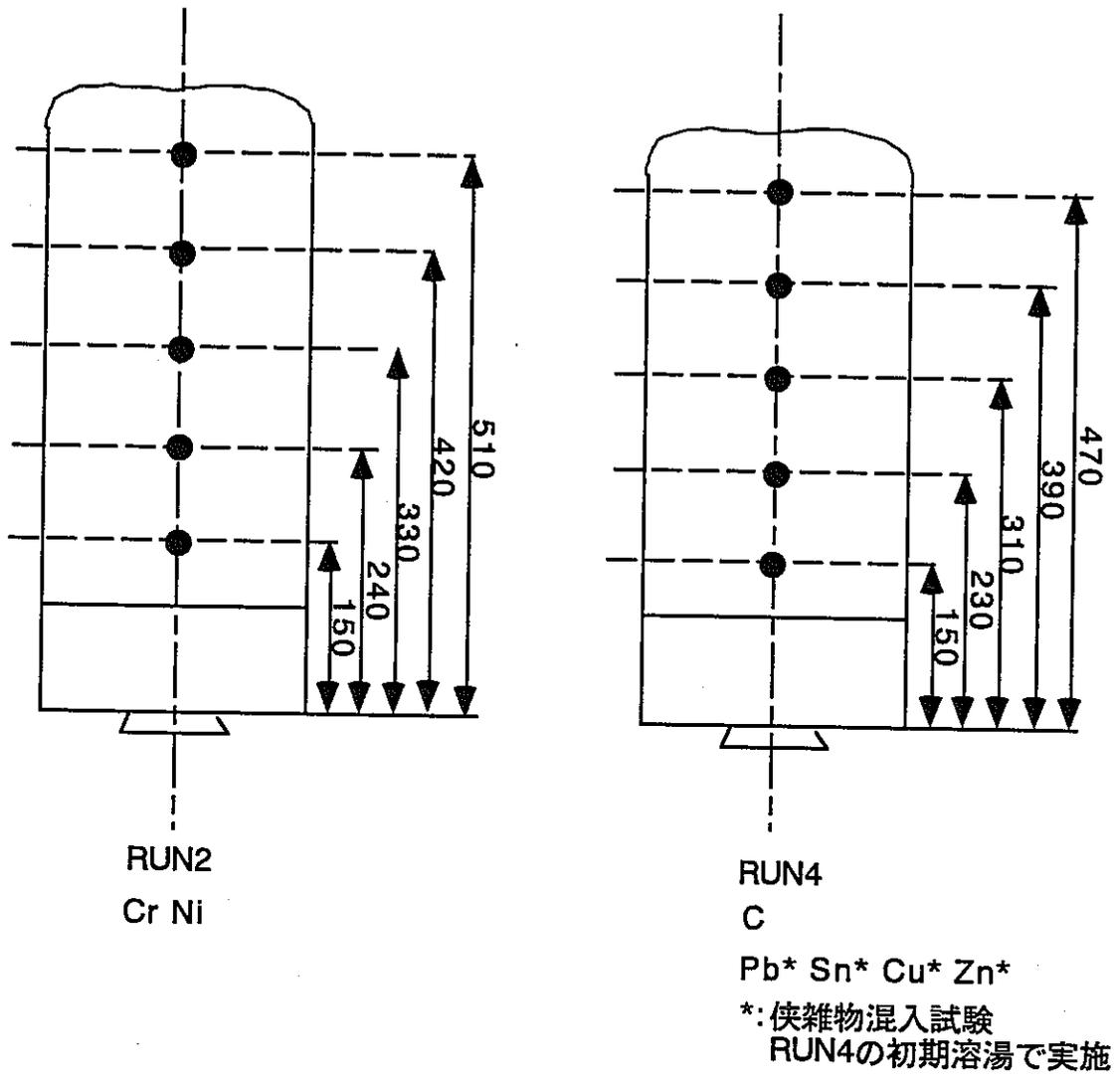


図2.12 引抜き固化体の分析位置及び分析元素

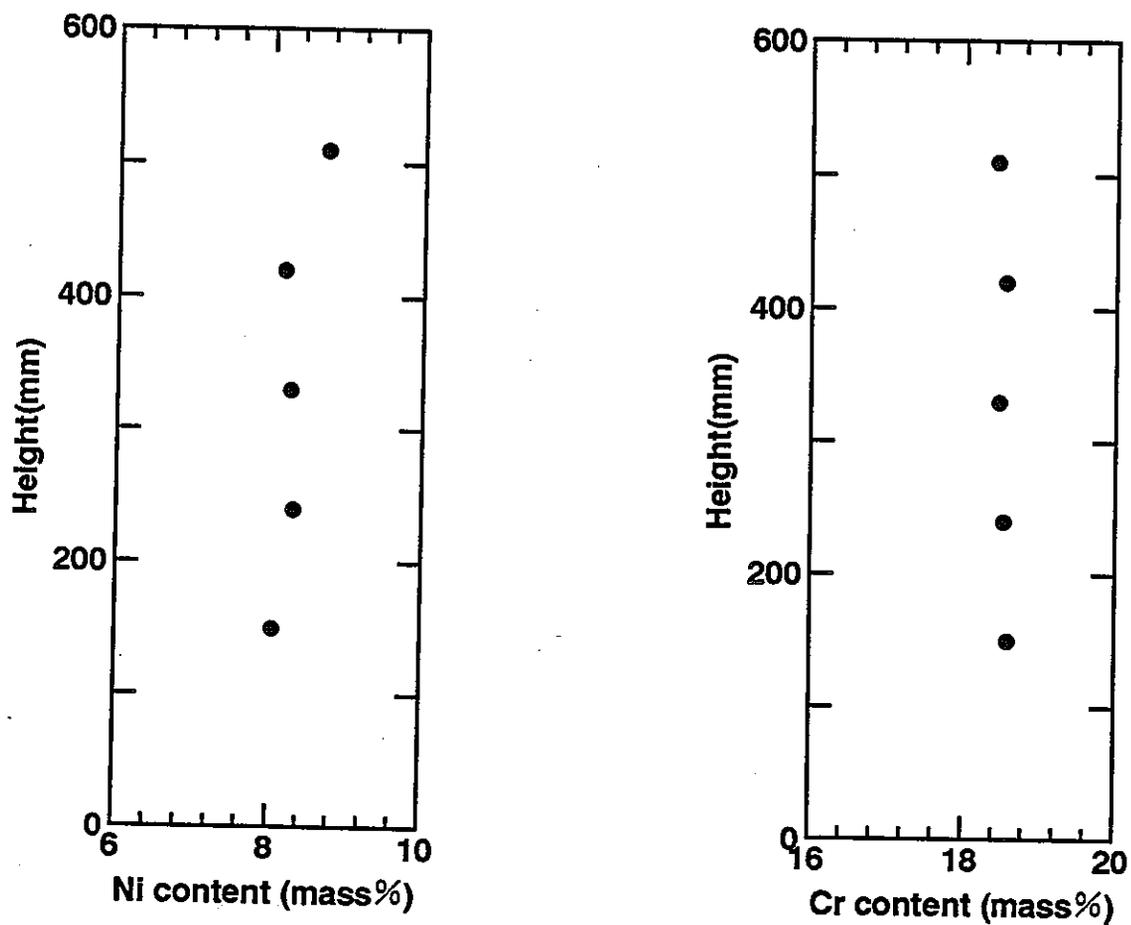


図2.13 引抜き固化体のNi,Crの分析結果
(RUN2 : SUS304)

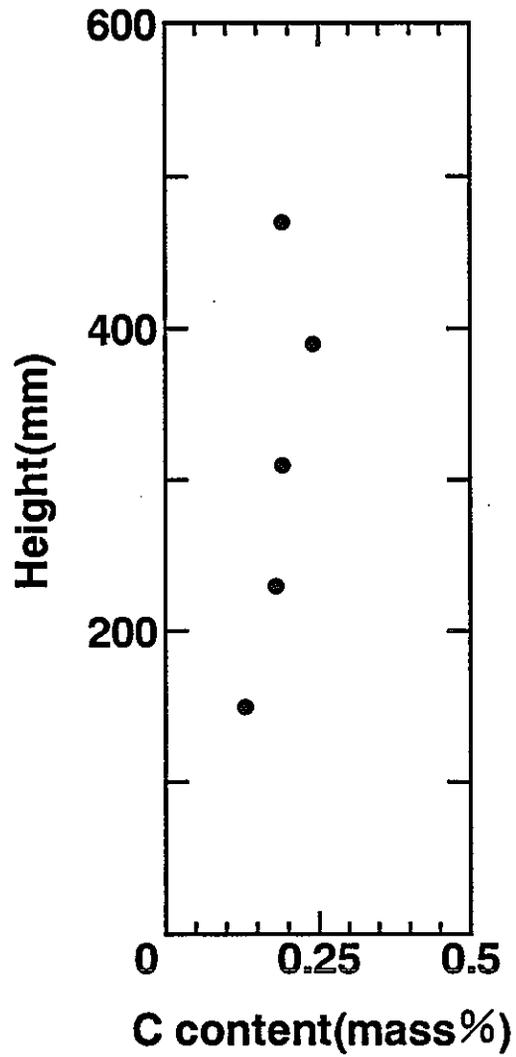


図2.14 引抜き固化体のCの分析結果
(RUN4 : SS41)

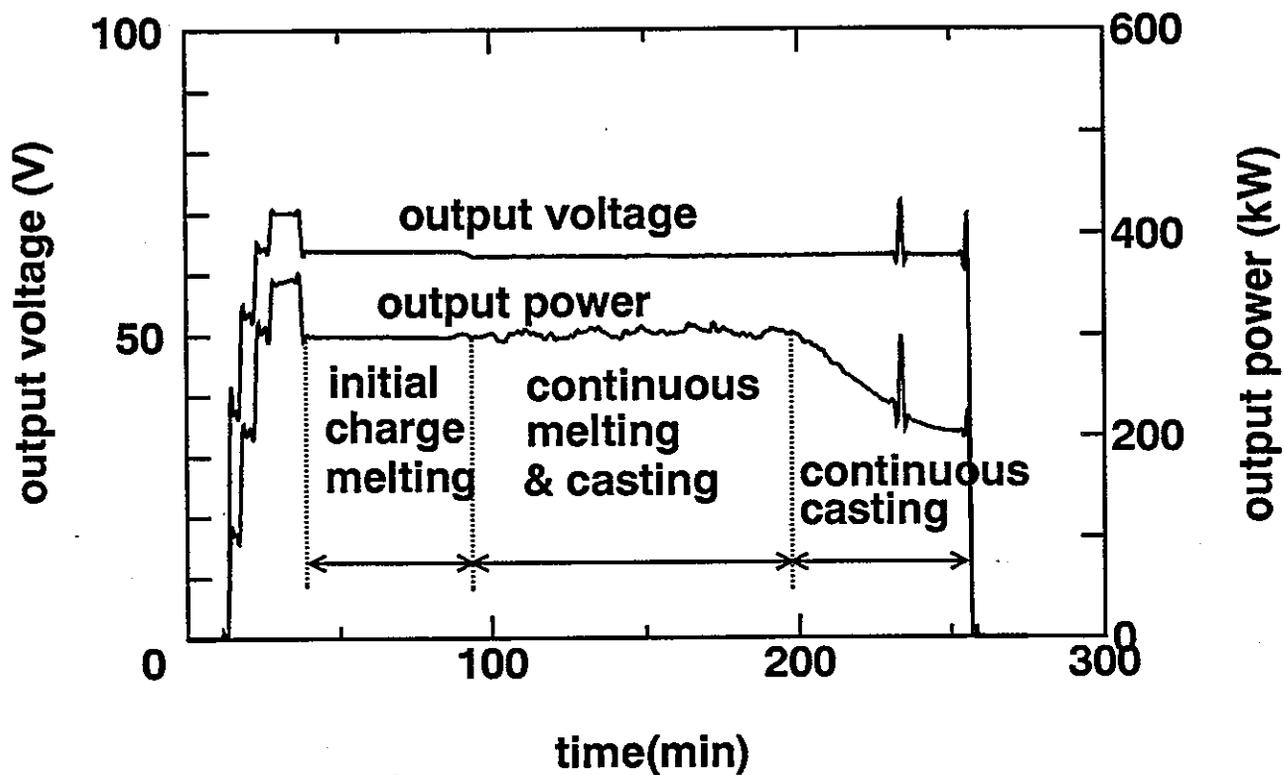


図2.15 引抜き試験時の出力電圧及び出力電力

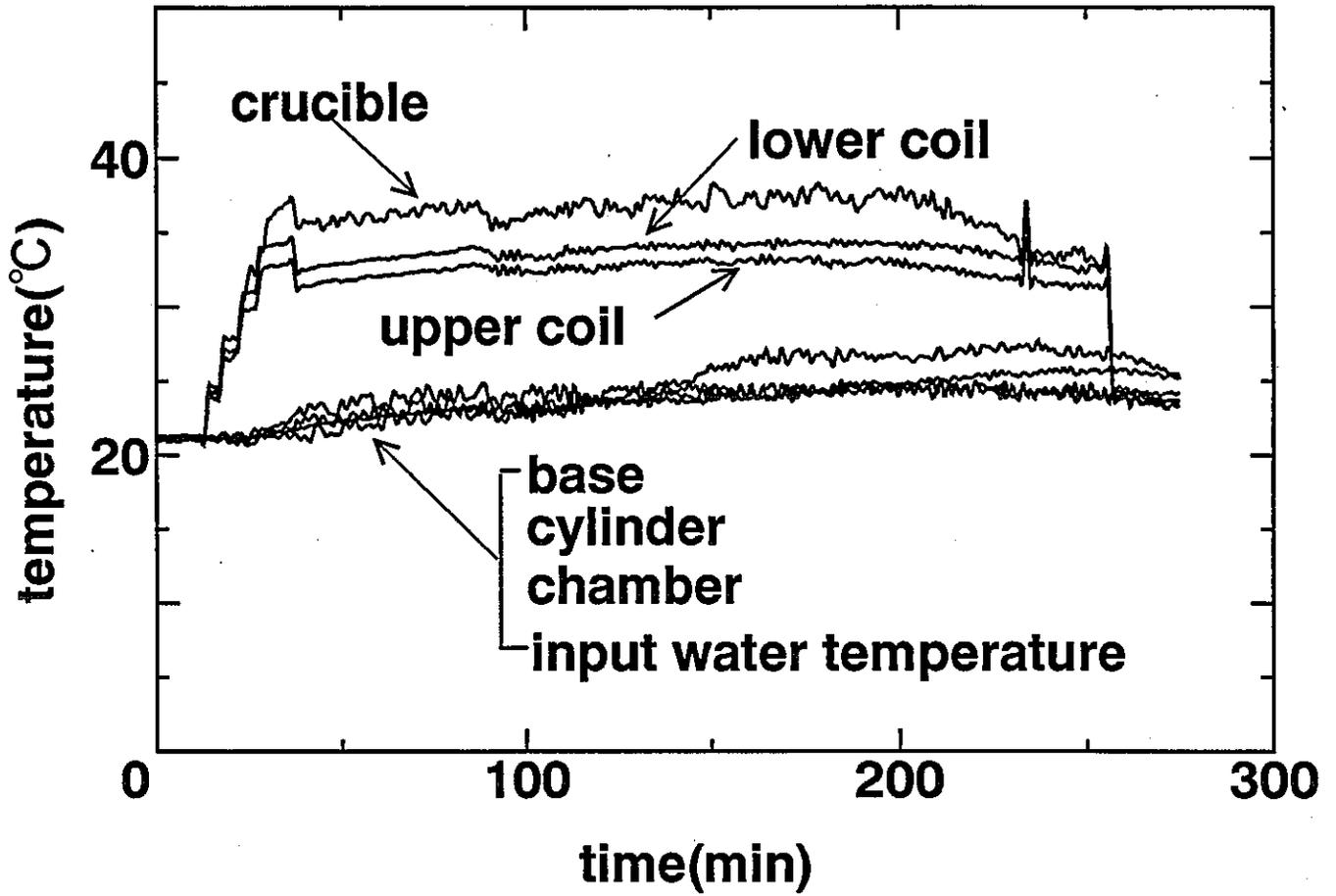


図2.16 引抜き試験時の各冷却水系の温度変化

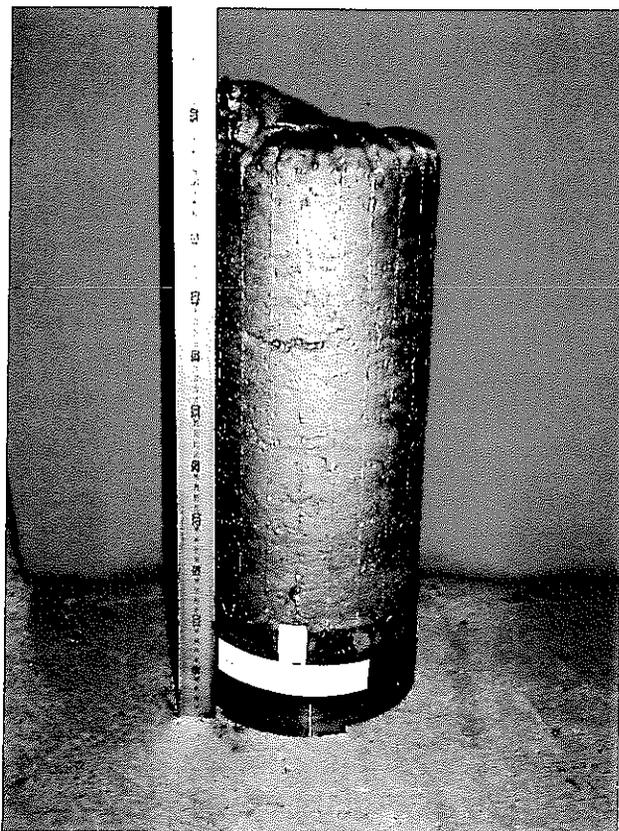


写真2.12 引抜き試験により作製された固化体の様子 (原料：SUS)

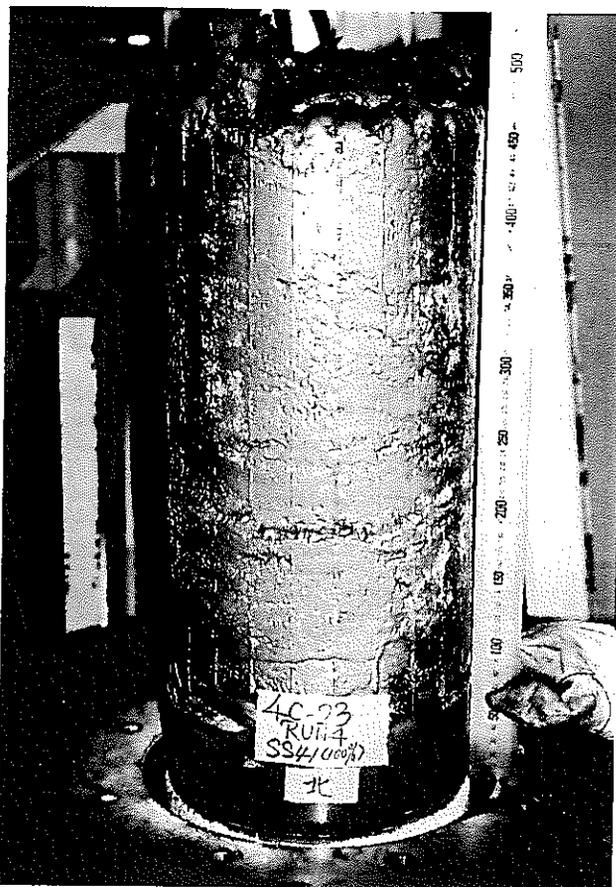


写真2.13 引抜き試験により作製された固化体の様子 (原料：SS)

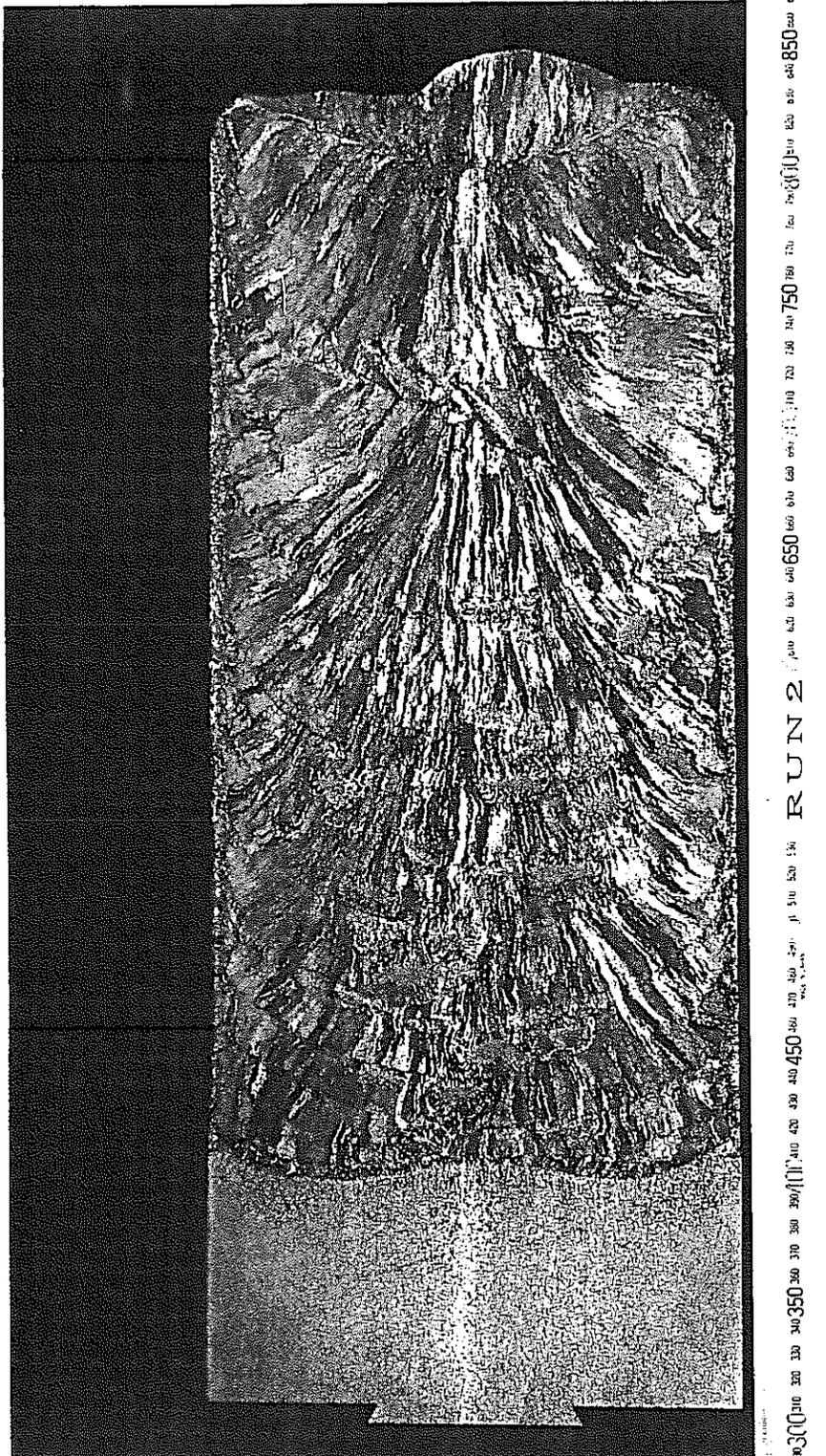


写真2.14 引抜き試験により作製された固化体の断面
(原料：SUS)

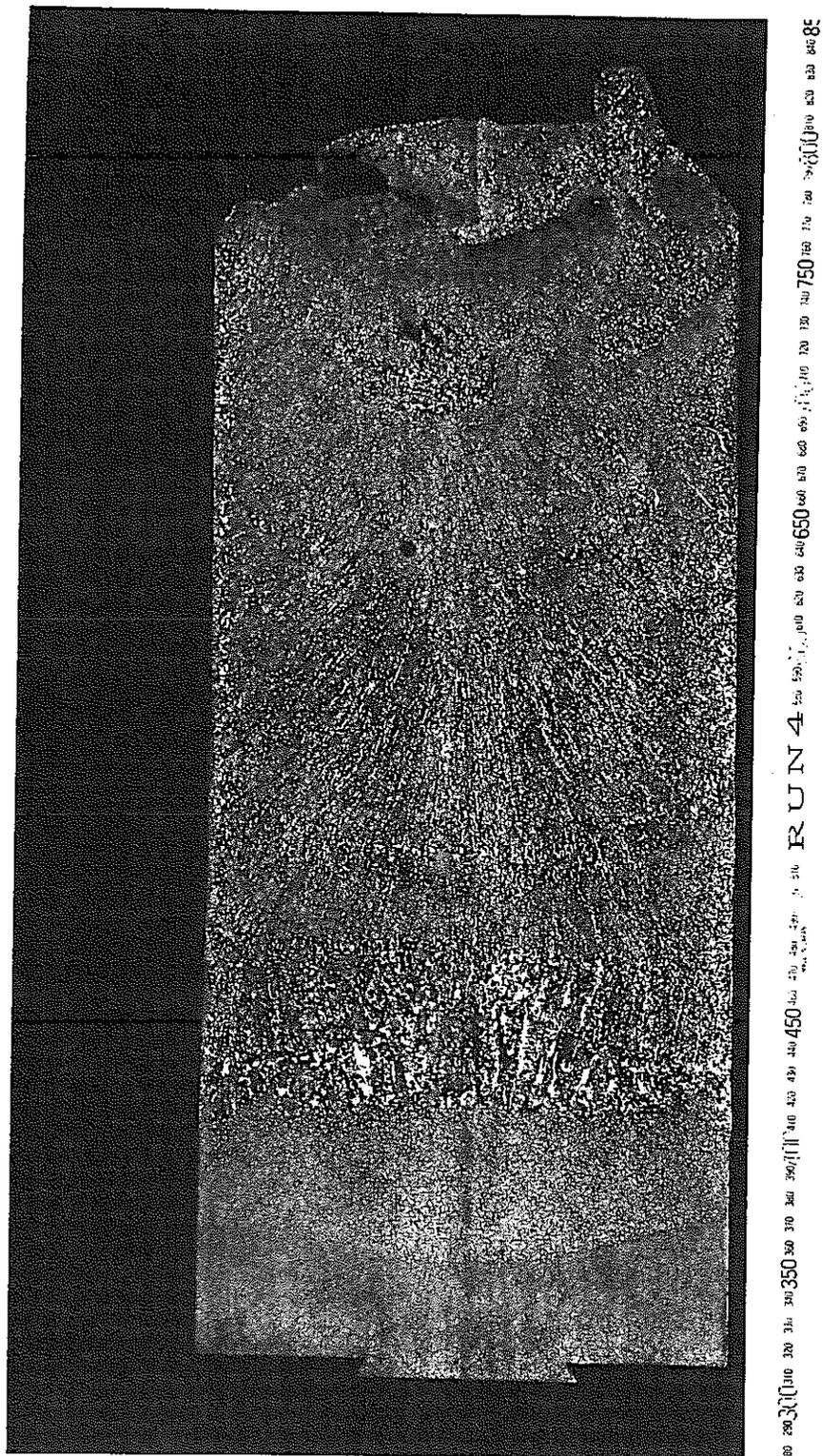


写真2.15 引抜き試験により作製された固化体の断面
(原料：SS)

2.3 夾雑物投入試験

2.3.1 試験方法

本実験は引き抜き試験RUN4において、引き抜き試験を実施する前に行った。すなわち、SS41の31.4 kgの溶湯を溶製し、表2.7に示すように、夾雑物として、Pb,Sn,Cu-35%Zn,塗装鉄板をそれぞれ100 gずつ添加し、その挙動を定性的に調査した。

表2.7 添加した夾雑物とその量

夾雑物	添加量	添加濃度
Pb(pure)	100 g	0.32mass%
Sn(pure)	100 g	0.32mass%
Cu-35%Zn(alloy)	100 g	Cu:0.21mass% Zn:0.11mass%
塗装鉄板	100 g	-----

また、蒸発が激しいことが予想されるCu-35%Zn合金に関しては表2.8に示すように少量ずつ添加し、その挙動を調査することも併せて実施した。

表2.8 Cu-35%Znの段階的添加試験条件

Cu-35%Zn	添加量	添加濃度 (w/o)
No.1	3g	0.0033
No.2	6g	0.0067
No.3	9g	0.010
No.4	12g	0.013
No.5	15g	0.017
No.6	30g	0.034

2.3.2 試験結果および評価

1) 夾雑物の挙動

夾雑物投入試験の結果を表2.9に示す。

表2.9 夾雑物投入試験結果

夾雑物	添加量	添加濃度	挙動
Pb(pure)	100 g	0.32mass%	一部蒸発、黒煙
Sn(pure)	100 g	0.32mass%	変化なし
Cu35%Zn(alloy)	100 g	Cu:0.21mass% Zn:0.11mass%	激しい蒸発、黒煙、 スプラッシュ
塗装鉄板	100 g	-----	変化なし

2) Cu-35%Znの段階的添加試験

激しい蒸発、黒煙、スプラッシュのあった本合金について、量を段階的に変えた実験を実施したが、少量ずつ添加しても、黒煙の量は少ないが激しい蒸発が起こった。

3) 夾雑物添加実験終了後の溶解室の状況

写真2.16に夾雑物添加実験終了後の溶解室の状況を示す。飛散した金属溶湯は予想より少量で、コールドクルーシブル炉体上部とコールドクルーシブル内壁のセグメント間に付着している程度であった。

4) 固化体の化学成分

夾雑物投入試験において、投入したPb,Sn,Cu,Znの成分分析を行った結果を図2.17～2.20に示す。これらの図において、横軸のサンプリングNo.は、経過時間を意味している。これらの結果より次のことが分かる。

- ・Pbの濃度は（図2.17参照）、投入直後は約0.01%であるが、最終的には0.004%程度まで下がる。Pbの濃度は、蒸発が無い場合の初期に、約0.32%程度になるように設定されており、投入直後に大半が蒸発していることが分かる。これより、Pb投入時の黒煙はPbであることが裏付けられる。
- ・Snの濃度は（図2.18参照）、投入直後は約0.54%であり、その後も大きな変化は無い。Sn投入時は、ほとんど黒煙は発生しないが、これはこの分析結果からも裏付けられる。

- ・ Cuの濃度は（図2.19参照）、投入直後は約0.6%であり、その後も大きな変化は無い。Cu投入時の挙動はZnと同時に投入したため不明であるが、この分析結果から、ほとんど黒煙は発生しなものと考えられる。
- ・ Znの濃度は（図2.20参照）、投入直後は約0.016%であるが、最終的には0.003%程度まで下がる。Znの濃度は、蒸発が無い場合の初期に、約0.11%程度になるように設定されており、投入直後に大半が蒸発していることが分かる。これより、Zn投入時の黒煙はZnであることが裏付けられる。

夾雑物投入時（引抜き時）のPb,Sn,Cu,Zn成分分析を行った結果を図2.21に示す。すなわち、各成分の残留割合を示したものであるが、同図より引抜きとともに夾雑物の割合が減少して行くのが分かる。

なお、試験終了後るつば内に付着した金属を分析した結果、

・ Cu：0.74%

・ Zn：0.22%

を含有した鉄であることが確認された。従って、Znの投入時のスプラッシュにより飛散した溶湯であることが分かった。

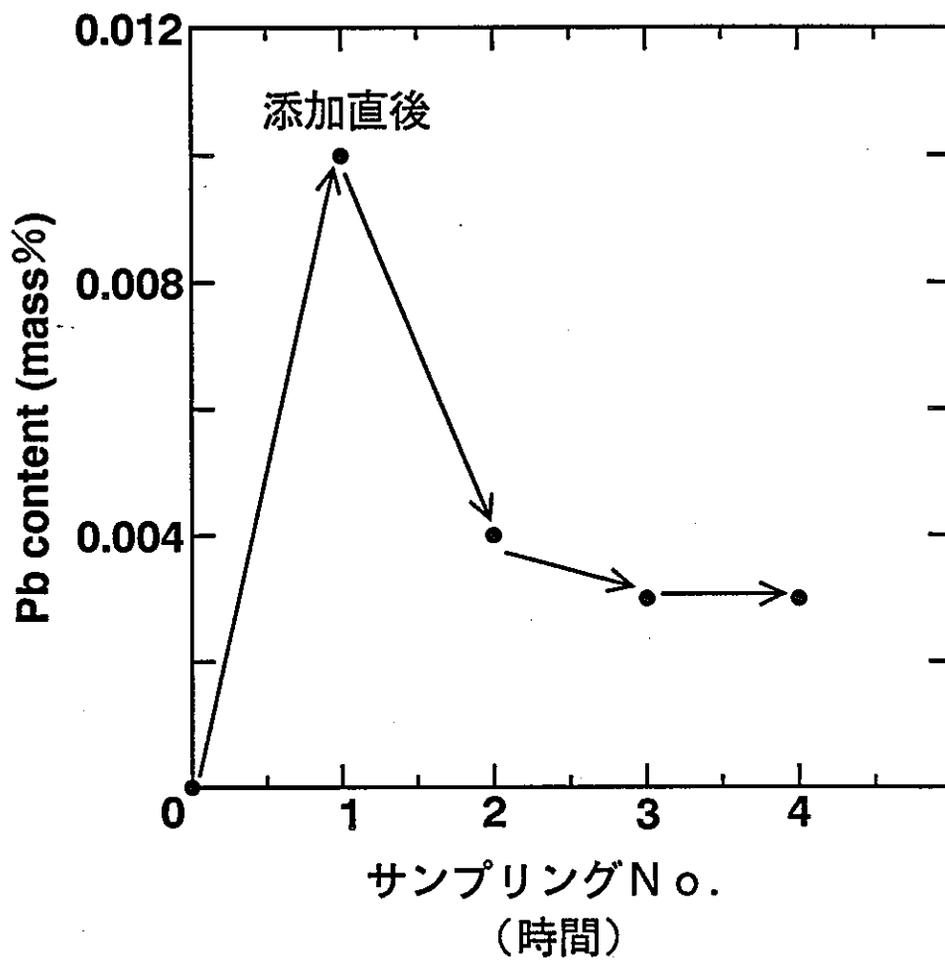


図2.17 夾雑物添加前後の夾雑物成分変化 (Pb)

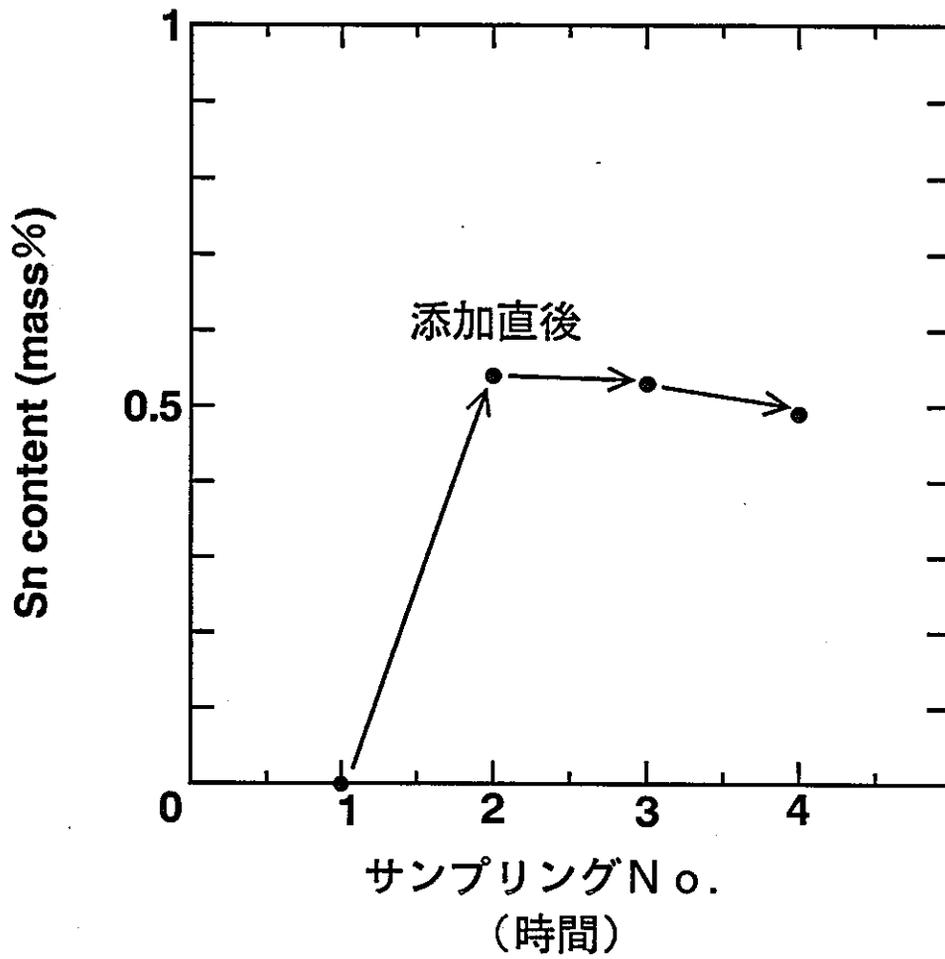


図2.18 夾雑物添加前後の夾雑物成分変化 (Sn)

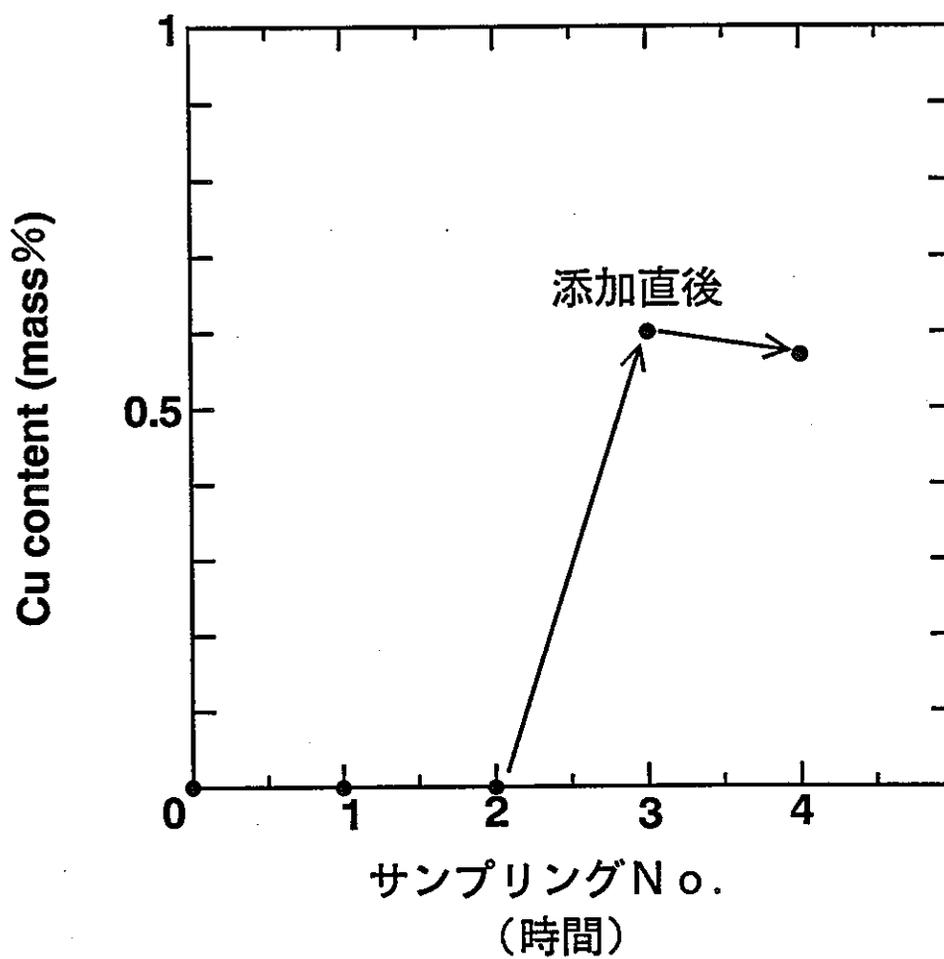


図2.19 夾雑物添加前後の夾雑物成分変化 (Cu)

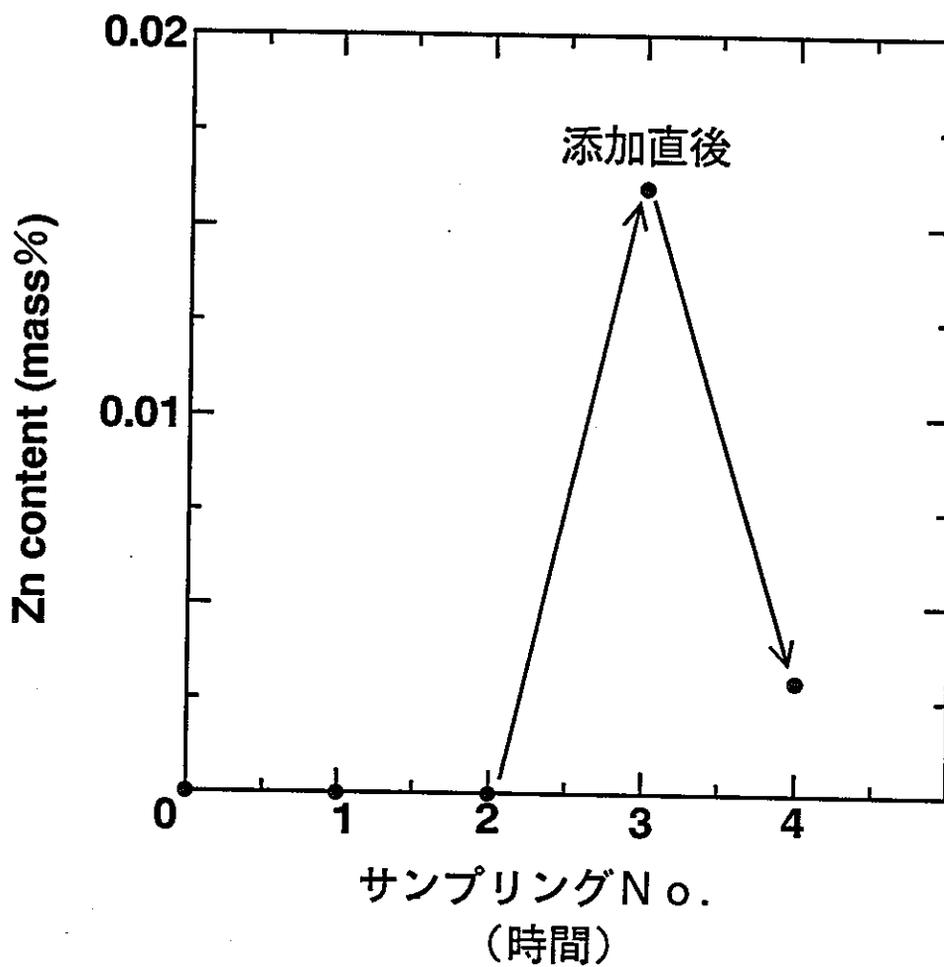


図2.20 夾雑物添加前後の夾雑物成分変化 (Zn)

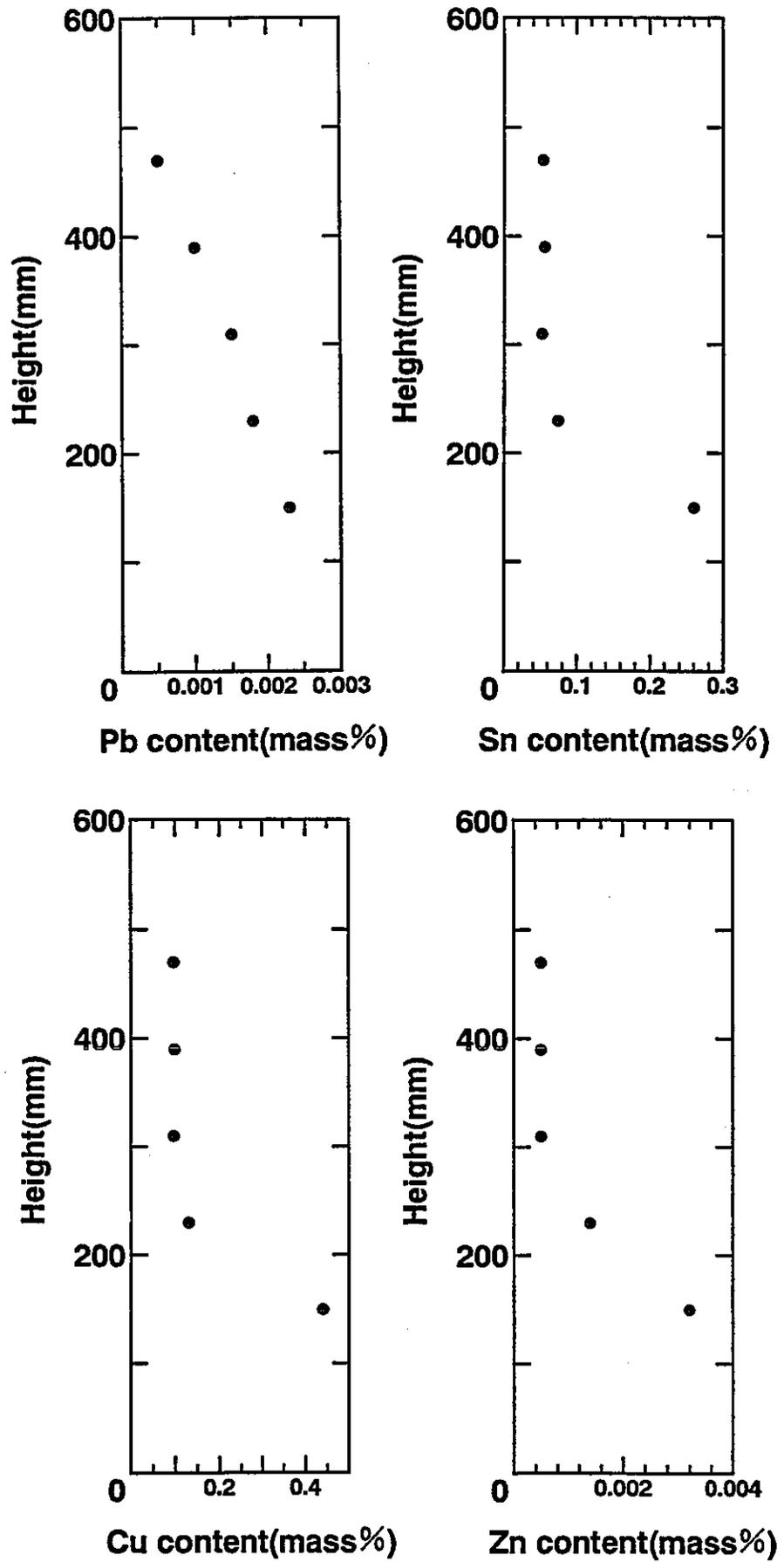


図2.21 固化体の夾雑物の分布

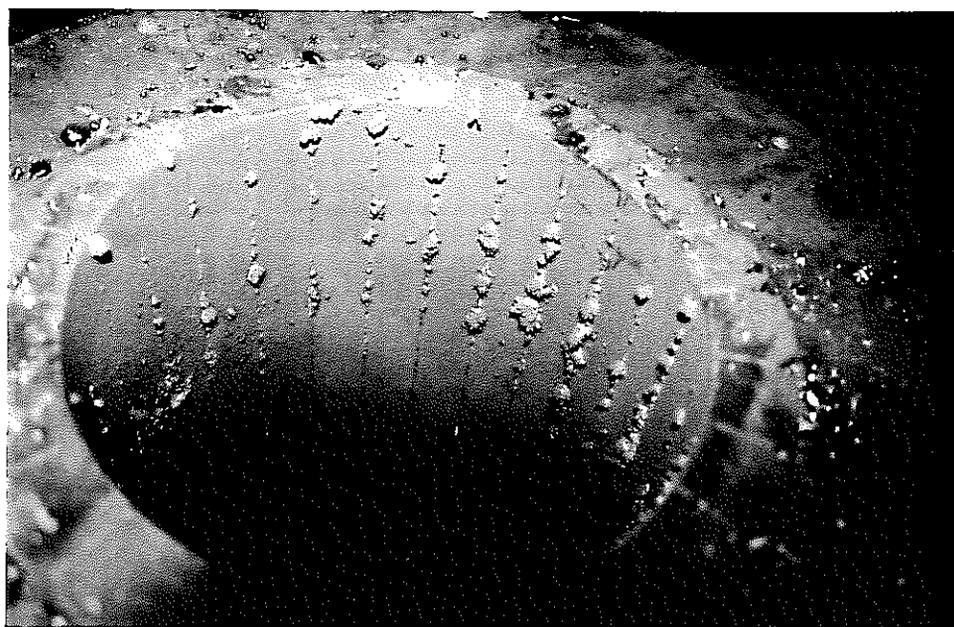
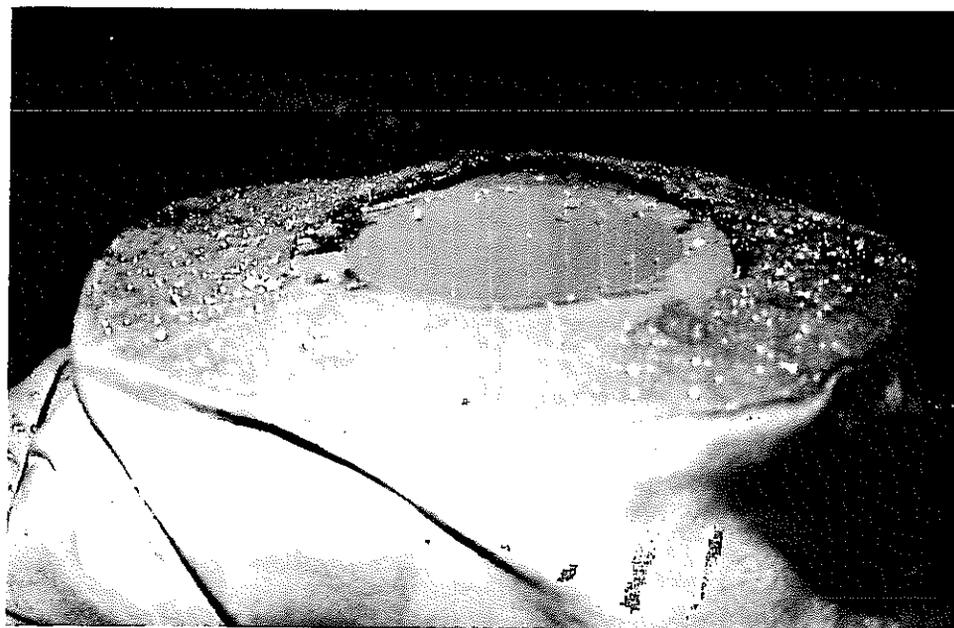


写真2.16 夾雑物添加試験後の溶解室内の様子

3. 溶融の現状調査

ここでは、コールドクルーシブル炉に関する技術の現状調査と他の方式炉の技術との相対比較を行い優位性を明確にする。主な調査・比較項目は次の通り。

- ・ 溶融原理
- ・ 装置概念
- ・ 対象廃棄物
- ・ 前処理負担度
- ・ 運転操作性
- ・ 固化体性状
- ・ 保守性
- ・ 安全性
- ・ システム構成
- ・ 二次廃棄物
- ・ 技術実証度
- ・ 開発課題
- ・ 総合評価 等

3.1 コールドクルーシブルに関する現状

ここでは、コールドクルーシブルに原理等の概念を明かにし、LEDFの α 金属減容設備の適用を前提に検討を行った。

3.1.1 コールドクルーシブルの概念

1) 溶融原理

コールドクルーシブルは、高周波誘導炉の1種であり、概念は図3.1に示した通りである。コールドクルーシブル炉により金属が溶融される機構は次の通りである。

- ・コールドクルーシブル炉の外周に設けられたコイルに交流電流を流すことにより、コイル内に交番磁界が発生する。
- ・この交番磁界により、コールドクルーシブル炉内の金属に誘導電流が発生し、金属片内に渦電流が発生する。
- ・この渦電流により金属がジュール加熱され、金属が溶解される。
- ・コールドクルーシブル炉に本体も、渦電流により加熱されるが、コールドクルーシブル炉内には冷却系が設けられており、除熱され、所定温度以上には上がらないように設定されている。
- ・コールドクルーシブル炉は、数個の金属セグメントより構成されている。これらのセグメントの間には、スリットが設けられており、コールドクルーシブル炉内部の金属に渦電流が発生しやすいようになっている。また、セグメントとしては、熱電導度の高い銅が一般には用いられている。

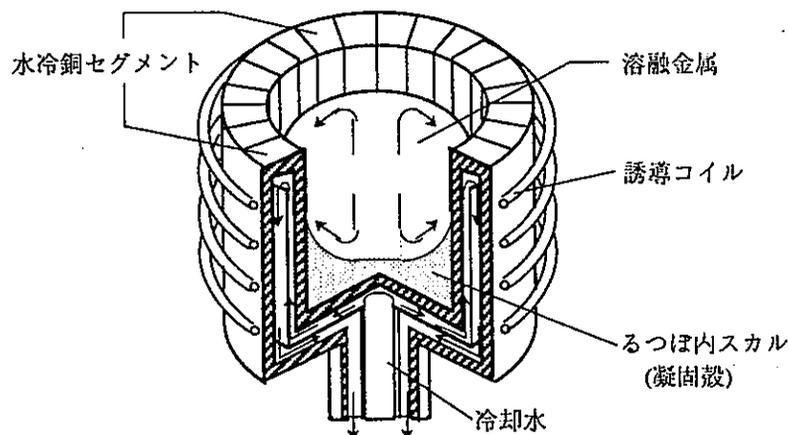


図3.1 コールドクルーシブル炉の概念

2) 装置概念

コールドクルーシブル炉の装置概念を図3.2に示す。図3.2に示した装置概念は、 α 金属減容設備を念頭にいたものであり、この装置の主な仕様を表3.1に示す。

表3.1 コールドクルーシブル炉の主な仕様

条件	仕様
溶融温度	溶融金属の融点近傍
溶融能力	約540kg/h ・金属の溶湯比重を7.9と仮定。 ・溶融のための前処理時間及び後処理時間は含まず。
炉寸法	440 ϕ ×700H
炉側出力電気定格	インバータ出力電力：1600 kW インバータ出力電圧：1000 V インバータ出力周波数：2000 kHz
電源側入力電気定格	受電容量：約2400 kVA 受電電圧：AC 6600 V
炉体の冷却	水冷式
固化体取出法	るつば内凝固式

3) 対象廃棄物

LEDFで対象となっている金属廃棄物を表3.2に示す。

表3.2 対象とする廃棄物の種類

材質	重量 (ton/年)	割合 (%)
SS	7.481	57.23
SUS	5.286	40.44
Pb	0.00264	0.02
Al	0.03696	0.283
その他	0.264	2.02

注1) 出典：「プロセス検討書作成要領」
(1994.3.28)

注2) その他には、非金属部材、低融点金属（亜鉛、スズ等）及び高沸点金属（ジルコニウム、タンゲステン等）が含まれる。

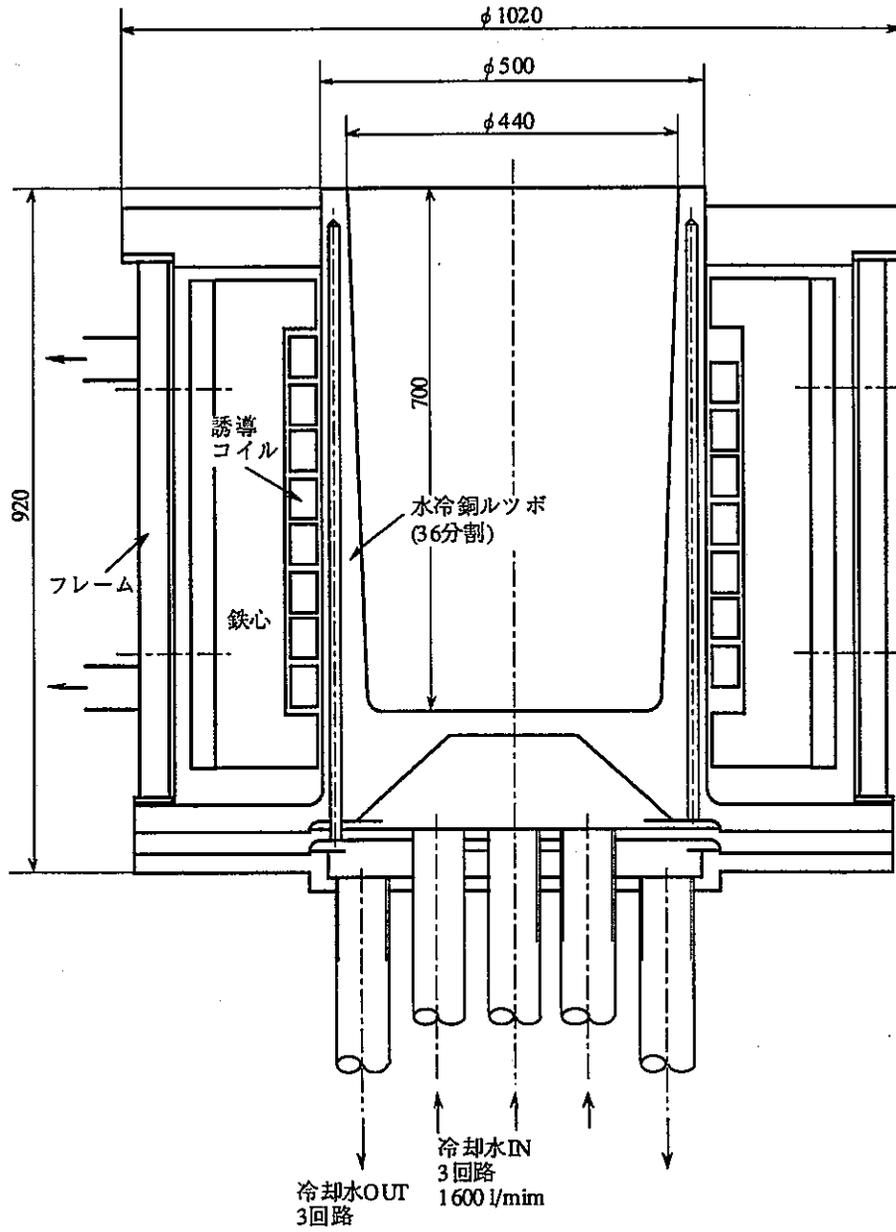


図3.2 コールドチル室炉の装置概念
(るつぼ内凝固式)

表3.2に示されたように、LEDFとして溶融する主要対象廃棄物は、SS又はSUSである。これらは2章で示したように、SS、SUS及びこれらの混合物の溶融についての問題はない。

しかし、 α 金属減容設備においては、これら以外にも夾雑物としてその他の金属等が投入される可能性がある。これら投入物について試験・検討を行った。この結果を表3.3に示す。

表3.3 投入の評価

区分	種類	評価	備考
主要金属	SS	問題無く、溶融可能。	試験確認。
	SUS	問題無く、溶融可能。	試験確認。
夾雑物 (金属)	^{30}Zn	投入時にスプラッシュが発生する。区分けするか、炉高さに余裕を持たせるかの配慮が必要。	試験確認。
	^{40}Zr	高沸点であり、SS/SUSの中に溶け込み、問題無し。	
	^{50}Sn	ほとんど影響無し、溶融可能。	試験確認。
	^{74}W	高沸点であり、SS/SUSの中に溶け込み、問題無し。	
	^{82}Pb	一部揮発する可能性あり、オフガス系への負荷を軽減するためには、区分けが必要となる。	試験確認。
夾雑物 (その他)	塗料	表面付着程度の塗料であれば問題無し。	試験確認。

注) 夾雑物の投入評価は、SS/SUS溶湯への投入を前提とした。

4) 前処理負担度

前処理工程にかかる負担としては、次のものが考えられる。

- ・ 夾雑物の区分け・除去
- ・ 炉内装荷のための切断
- ・ 除染

このうち、夾雑物の区分け・除去については、Zn及びPbへの配慮が必要である。Znの投入に対してはスプラッシュ対策が必要であり、コールドクルーシブル炉の高さに余裕を持たせることにより対応可能である。

Pbの投入対しては、黒煙が発生しオフガス系の負担が大きくなり、Pbは分別・除去することが望ましい。Pbが多量に存在する場合（例えば遮蔽シンゴットとして存在する場合）には、分別・処理することが必要となる。ただし、微量の場合には問題は少なく、今後システムとしての詳細検討が必要である。

炉内装荷のための切断については、受け入れる廃棄物の形状は表3.4に示された通りであり、炉の内径が440φ×700Hであることを考えれば、ほとんど問題は無いと考えられる。

除染については既に前工程で実施されており、α金属減容設備として受け入れる廃棄物の放射エネルギーは表3.4に示された通りと予想される。このレベルの放射エネルギーであれば、区分等のグローブボックス操作に何等問題無いと考えられる。

表3.4 α金属減容設備での受け入れる金属廃棄物の仕様

仕様	条件
受入れ金属片の寸法	300mm□以下
受入れ放射エネルギー	全α : 1.3×10^7 (Bq/年)
	全βγ : 7.6×10^8 (Bq/年)

5) 運転操作性

コールドクルーシブル炉を用いたα金属溶融の定常運転において、直接作業（グローブボックス作業）が必要となるのは、金属廃棄物の分別のみであり、他の工程は全て遠隔操作が可能である。

ただし、湯面の検知マニュアル操作と並行作業を行うことが望ましい部分もあり今後詳細検討が必要である。

処理能力の観点からは、1日1バッチの運転が充分可能であり、最大処理能力は、540kg/日（97ton/年）となる。これは、α金属減容設備として要求される年間処理量18tonを十分に上回っている。

表3.5 コールドクルーシブル炉を用いた場合の処理能力

条件	能力	備考
1バッチ当りの処理能力	540 kg/日	φ440×450H
1日当りの処理能力	540 kg/日	
1年当りの処理能力	97 ton/年	年間最大処理量は18tonから換算すれば、必要稼働日数は34日/年となる。

コールドクルーシブル炉の運転手順は次の通りである。

- ・運転開始前には、溶融装置（銅セグメントの健全性等）、ユーティリティ系（冷水供給の確認）、オフガス系（除塵装置、HEPAフィルタの閉塞等）の状態確認を行う。
- ・大型金属片を溶融する必要がある場合には、溶融装置内に大型金属片を定置する。
- ・溶融装置内を真空脱気し、不活性ガス（Ar等）充填する。
- ・溶融装置の冷却を開始する。
- ・溶融装置に電源投入し、加熱する。
- ・所要の温度に達した時点で、金属片の供給・溶融を開始する。
- ・所定の金属量の溶融が終了したことを確認して、溶融を停止する。
- ・金属固化体を1夜大気放置することにより冷却する（るつば内凝固させる）。
- ・オフガスは、除塵装置・HEPAフィルタを通して建屋換気・空調設備に送られる。

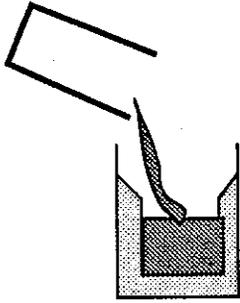
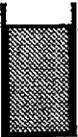
6) 固化体性状

固化体の性状は、固化体の取出方法により大きく異なってくる。この固化体の取出方法としては、次の3方式が考えられる。

- ①炉から溶湯を直接D-50ドラムに入れる方法（直接鑄造法）
- ②炉から引抜きにより固化体を取り出す方法（引抜法）
- ③炉内で凝固させた後に固化体を取り出す方法（るつぽ内凝固法）

これらの3方式について比較検討を行った結果を表3.6に示す。①については、現行貯蔵施設の要件を満足しておらず、将来に向けては有望であるものの対象外とする。②と③については、いずれも成立するが、 α 金属減容設備としては、D-50ドラムへのハンドリングを考慮し③るつぽ内凝固法を選定する。

表3.6 取出方式の比較

方式	概念	長所	短所	総合評価
① 直接鑄造法	コールドクルーシブル炉  D-50ドラム	1) D-50ドラムへの収納効率(90%以上)が高くなる。 2) D-50ドラムへのハンドリング(装荷作業)が不要となる。	1) 現行計画ではD-50ドラム内部に α 境界を設けなくてはならず、現行貯蔵施設では貯蔵できない。 2) 引け巣及びガス穴ができる。 3) 耐熱材の充填が必要。	△
② 引抜法	コールドクルーシブル炉 	1) 引け巣が殆ど発生しない。 2) D-50ドラムへの負担が少ない。 3) 連続処理が可能。	1) 収納効率(約75%)が多少悪い。 2) スタート材が二次廃棄物となる。 3) 発熱体の操作が必要となる。	○
③ るつぽ内凝固法	コールドクルーシブル炉 	1) 発熱体の操作作業が不要となる。 2) D-50ドラムへの負担が少ない。	1) 収納効率(約75%)が多少悪い。 2) 引け巣が多少発生する。	○

注) 収納効率は、D-50ドラム(465φ×620H)の内容積に対する割合とした。

7) 保守性

コールドクルーシブル炉に関する定常的な保守項目としては、メーカー試験の実績（約300バッチ）から表3.7に示したものがあげられる。

表3.7 コールドクルーシブル炉に関する保守項目

保守項目	保守箇所	保守頻度	備考
炉内	スリット部充填材	1回/5バッチ	高純度物質の作製の目的。
	銅るつぼ	1回/年	理論的には、10000回以上可能。
炉外	HEPAフィルタ	未定	金属廃棄物の種類による。
	電気系統	通常の保守	法規的な拘束なし。

コールドクルーシブル炉自体は、金属廃棄物と炉体がほとんど接触しないので、保守頻度は極めて低い。保守する箇所としては、「スリット部充填材」があるが、これは高純度金属を作製するために用いられているものであり、 α 金属減容設備としては不要である。また、「銅るつぼ」については、理論的には10000回程度まで健全性が担保され、経験的にも300バッチ以上保守が不要である。従って、ここでは、1年（最大180バッチ）に1回保守を行うこととする。ただし、「銅るつぼ」については、各溶融開始前には、ITV等を用いて炉体の健全性を確認することが望ましい。

α 金属減容設備全体としては、経済性等の観点から直接保守方式が望ましい。 α 金属減容設備の各工程における主な保守方法は、下記の通りである。

- ・設備全体としての定期的な保守については、線源（ α 金属片）を除去し、直接保守を行うことが可能である。
- ・本設備の溶融前の工程（トレイ受入・払出工程、前処理工程、溶融装置への供給工程）は、グローブボックス内の操作であるが、取扱対象物は α 解体・除染設備で除染された廃棄物であり極めて放射能量が少ないと予想される。また、これら工程は金属片または金属固化体のハンドリング工程であり一時停止を行っても、安全上の問題はほとんど無い。従って、これらの工程の作動中であっても停止させ直接保守が可能である。

- ・直接汚染雰囲気には接しない受入ドラム仮置台、搬出ドラム仮置台等は、グローブボックス外に設置が可能であり、常時直接保守が可能である。ただし、除塵装置及びHEPAフィルタは、線量当量率が十分に低いことを確認してから保守する必要がある。特にHEPAフィルタの保守については十分な配慮が必要である。

8) 安全性

ここでは、コールドクルーシブル炉に特有の安全確保の方法について述べる。

a) 水蒸気爆発に対する安全性

溶融装置において、銅セグメントの冷却のために、銅セグメント内部に冷却水を通す。万一、この水が漏洩した場合、溶融装置と反応して水蒸気爆発を起こす恐れがある。このような事例は我が国にはなく、PWTF/ESRの実績で問題が少ない。

α 金属減容設備では、この水蒸気爆発対策として、溶融部をチャンバー内に設置し、万一水蒸気爆発が発生しても外部に影響を及ぼさないように安全対策を施すことが可能である。

b) 低融点金属による突沸

溶融装置において、低融点金属が混入した場合、溶融部で突沸（スプラッシュ）を起こす可能性がある。この突沸は、溶融部の高さに余裕をもたせることにより対応可能である。

また突沸防止のために、 α 金属減容設備内に選別工程を設けて、突沸を起こす金属を選別除去することにより事前に防止できる。この選別された低融点金属は、初装荷を行うことにより溶融処理することも可能である。

c) 金属固化体による火傷

溶融により発生した金属固化体は、溶融炉より取り出し直接ハンドリングするので、ハンドリング時に作業員が火傷をおう可能性がある。

α 金属減容設備では、るつぼ内凝固法を予定しており、火傷等の心配は無い。また、引抜法であっても、溶融炉から取り出した金属固化体は、1夜放置冷却した後、ハンドリングすることにより、火傷を起こさないように安全対策を施すことが可能である。

d) 金属固化体の落下

金属固化体をPVC封入やD-50ドラムに封入する際には、金属固化体が落下し、装置の破損等を起こす可能性がある。

α 金属減容設備では、金属固化体の吊り部を工夫し、落下を起こさないように安全対策を施すことが可能である。

e) 金属固化体引抜時の湯洩れ

金属固化体を溶融部より引抜く場合には、溶融中の金属が引抜部より漏洩する可能性がある。

α 金属減容設備では、るつぼ内凝固法を予定しており、湯漏れの心配は無い。また、引抜式の場合でも、金属固化体の引抜速度を制御することにより、湯洩れが無いようにする充分対応可能である。また、万一湯漏れがあっても、溶融部をチャンバー内に設置し、外部に影響を及ぼさないように安全対策を施すことが可能である。

f) グローブボックス内の温度上昇・火災

溶融工程において、金属を溶融する際には発熱量が大きくなり、グローブボックス内の温度が上昇し、火災を招く可能性がある。

α 金属減容設備では、冷却系を2系列設けることにより、グローブボックス内の温度上昇を防止する。また、温度が上昇しても火災が発生しないように、溶融部は不活性ガス雰囲気にし、安全対策を施すことが可能である。

g) その他

固化体搬送時には、PVCの破損及び固化体の転倒の可能性がある。

α 金属減容設備では、PVC破損防止にはポリ容器を用い、固化体転倒防止には転倒防止機能を設け、安全対策を施すことが可能である。

9) システム構成

コールドクルーシブル炉を α 金属減容設備に適用した場合のシステムは、 α 解体・除染設備からのトレイ受入・払出工程、前処理工程、溶融装置への供給工程、金属の溶融工程、金属固化体の封入工程、D-50ドラムの払出工程で構成されるものと考えられる。

このシステム・フローの一例を図3.3に示す。

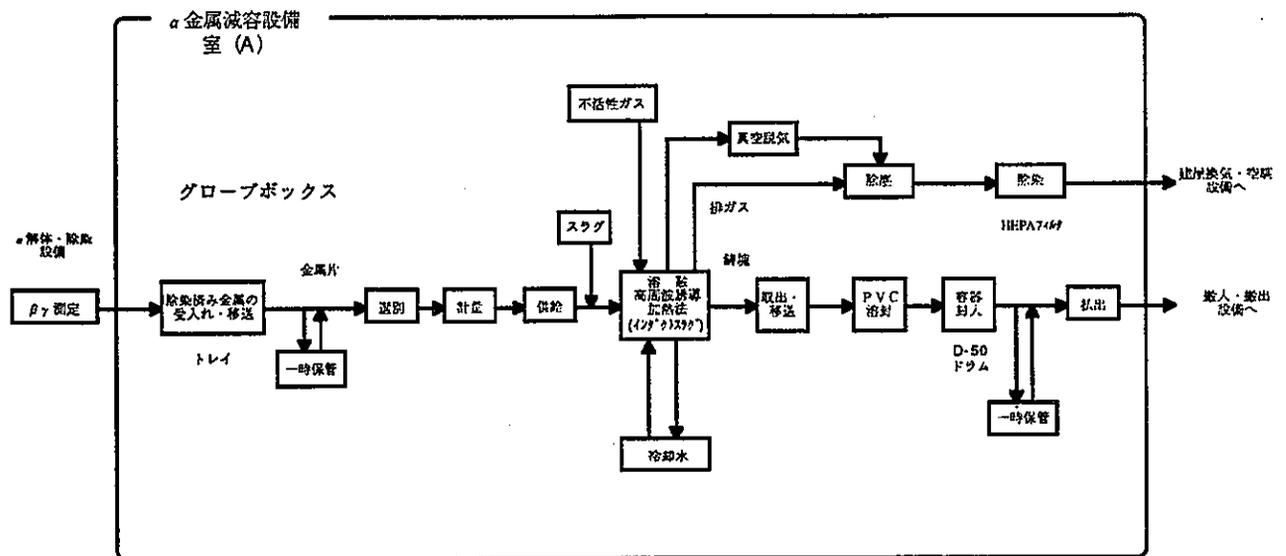


図3.3 α金属減容設備システム・フロー

10) 二次廃棄物

コールドクルーシブル炉によるα金属減容設備は、廃棄物と炉体がほとんど接触しないので二次廃棄物は極めて少ない。考えられる二次廃棄物を表3.8に示す。

表3.8 二次廃棄物

区分	種類	発生頻度	備考
金属廃棄物	メッシュシート	1 シート/バッチ	大型金属の初期投入用
	スタート材	1 台/バッチ	引抜き式の場合
不燃性廃棄物	HEPAフィルタ		
その他	蒸留水	1回/年	サイリスタ冷却材、炉体冷却水

表3.8に示した二次廃棄物のうち、メッシュシートについては、微量であり、α金属と同時に溶融してしまうのでほとんど量的にも問題無いと考えられる。スタート材については、引抜き式の場合には必要となるが、るつぼ内凝固法を用いた場合は不要となる。

11) 技術実証度

コールドクルーシブル炉を用いた α 金属の溶融の実績は無いものの、フランスでハル処理のホット試験を行ったことがある。施設設計としては、米国・バーンウェル再処理工場のハル処理用としてAGNSが設計検討を行った実績がある。国内では、動燃、RANDEC等が開発を行っており、企業としては、富士電機、住友金属、神戸製鋼等が参画している。

以上のように、 α 金属を対象とした実設備はないものの、研究開発、設計研究は盛んに行われており、原子力分野以外では実用化されており、技術実証度は高いといえる。

12) 開発課題

コールドクルーシブル炉は、原子力施設での実用化はなされていないものの、一般施設としては既に実用化されており、 α 金属減容設備への適用要件（被曝、耐放射線性、遠隔操作性等）を考慮に入れても開発課題は少ない。

主要な開発課題としては、下記の3つがあげられる。

- ・ 夾雑物の処理方法
- ・ るつぼの保守方法
- ・ 固化体のハンドリング方法

これらは、設計検討、前処理工程との調整により充分対応可能と考えられる。

13) 総合評価

以上の検討の結果、コールドクルーシブル炉を α 金属減容設備に適用する場合、

- ・ 炉径を440 ϕ とする。
- ・ 大型金属片は、選別して初期装荷する。
- ・ 炉体は保守エリアに移送して保守を行う。
- ・ 夾雑物のPb,Znについては量を見ながら分別処理か、一括処理かを判断する。

ことにより、充分実用にたえるものと考えられる。

3.1.2 α 金属減容設備におけるコールドクルーシブル炉

ここでは、 α 金属減容設備にコールドクルーシブル炉を適用した場合について検討を行う。

1) プロセスの概要

コールドクルーシブル炉を α 金属減容設備に適用した場合のブロックフローは図3.4に示した通りである。本設備は、次の工程より構成される。

- ・トレイ受入・払出工程
- ・前処理工程
- ・溶融装置への供給工程
- ・金属の溶融工程
- ・金属固化体の封入工程
- ・D-50ドラムの払出工程

(1) トレイ受入・払出工程

本工程では、 α 解体・除染設備とのトレイの受渡し及びトレイの一時保管を行う工程であり、次の操作を行う。

- ・ α 解体・除染設備で除染された金属片は、トレイにて払い出される。本工程は、このトレイをトレイ搬入・搬出装置にて、受入・一時保管する。
- ・金属片を溶融装置側に払い出した後の空のトレイは、トレイ受入・払出工程に返送される。本工程では、この空のトレイを一時保管した後に、トレイ再使用のため、トレイ搬入・搬出装置にて α 解体・除染設備へ払い出す。

α 解体・除染設備からの受入れは、遮蔽扉を介して行われ、 α 金属減容設備での本工程の操作はグローブボックス内で自動コンベアで行われる。

受入・払出に要する時間は、約0.5時間である。

(2) 前処理工程

本工程では、トレイ受入・払出工程からトレイを受入れ、溶融する金属を選別・計量する。

選別では、溶融に不適切な金属 (Pb,Zn) の除去、溶融不可能な形状の金属の除去を手動にて行う。計量では、金属片重量が、1バッチ当たり処理可能な重量範囲 (約540kg) であることを確認する。前処理に要する時間は、約1時間である。本工程での操作は、全てグローブボックス内で行われる。

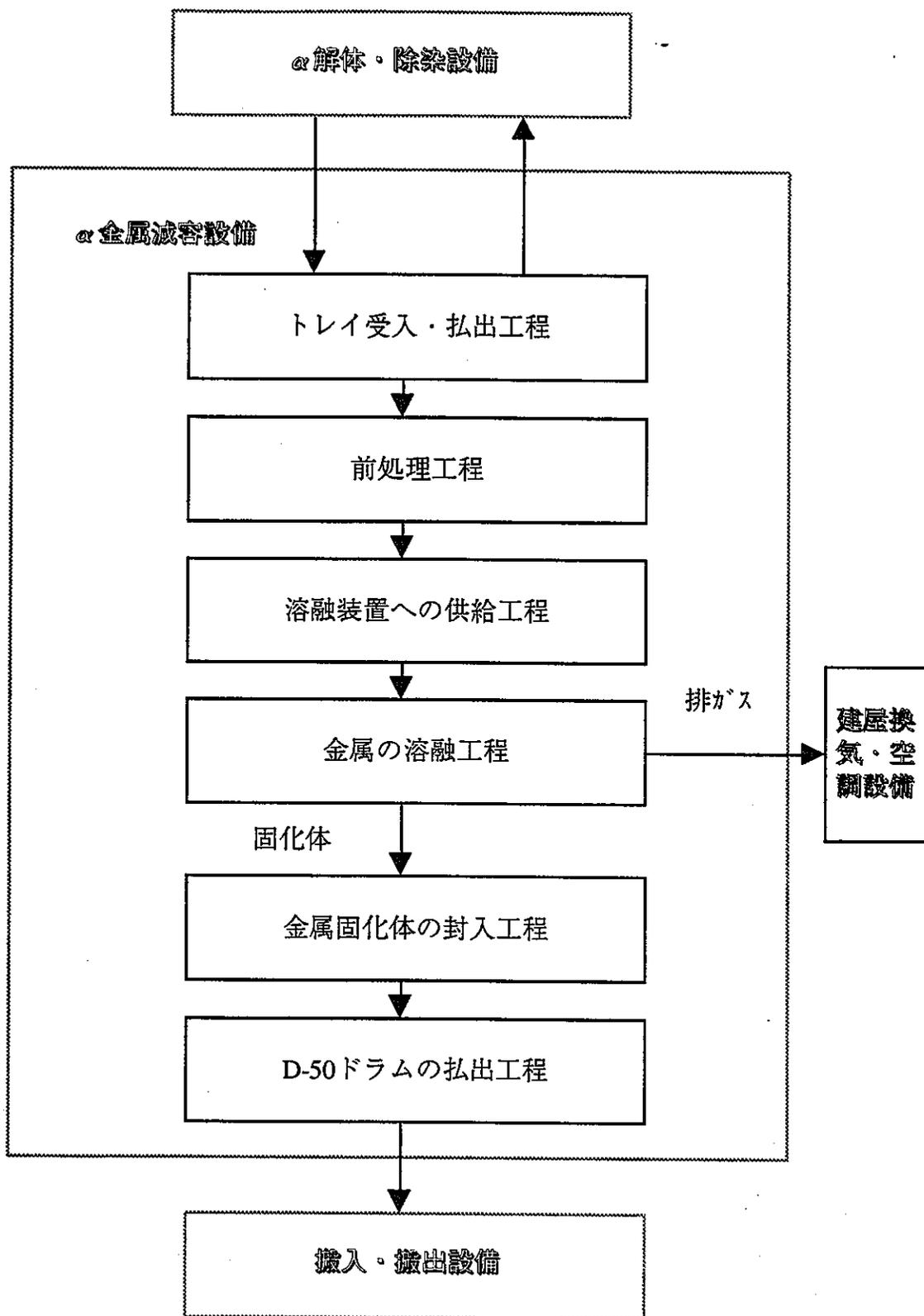


図3.4 コールドクルーシブル炉でのブロックフロー

(3) 溶融装置への供給工程

本工程では、計量確認された金属片を溶融装置に供給する。供給は、大型金属供給系及び小型金属供給系の2系列から構成される。具体的な方法は次の通りである。

- ・選別装置で選別された大型金属片は、手動にて金属製のメッシュシートに入れられ、大型金属片供給装置より溶融装置に供給される。なお、この操作は、溶融開始前に行われる。
- ・小型金属片は、小型金属供給装置（振動フィーダ式等）より供給される。
- ・選別装置で分別された溶融に不適切な金属等は、トレイに入れられてトレイ・受入・払出工程を介して α 解体・除染セルに返送される。これらの操作はグローブボックス内で行われる。

(4) 金属の溶融工程

本工程では、金属片をインダクトスラグ法により溶融する。本工程は、次の機能を有している

- ・金属片を溶融する機能
- ・溶融装置内部を真空脱気、不活性ガス充填する機能
- ・溶融装置を冷却する機能
- ・オフガスの除塵・除染機能

運転は、次の手順により行われる。

- a) 大型金属片を溶融する必要がある場合には、溶融装置内に大型金属片を装荷する。
- b) 溶融装置内を真空脱気し、不活性ガス充填する。
- c) 溶融装置（炉体部）の冷却を開始する。
- d) 溶融装置に電源投入し、加熱する。
- e) 溶湯の液面を見ながら、小型金属片を供給する。
- f) 所要金属量の溶融が終了したことを確認して、電源（溶融）を停止する。
- g) 金属固化体を自然冷却する。
- h) オフガスは、除塵装置を通して建屋換気・空調設備に送られる。

(5) 金属固化体の封入工程

本工程は、次の二つのステップより構成されている。

- ・ 溶融した金属固化体を移送し、1体ずつPVC溶封してD-50ドラム内に収納する。
- ・ PVC溶封した金属固化体を3体収納したD-50ドラムに、蓋を取り付けて封入する。

PVC溶封は、グローブボックス内でホイストを用いて行われる。D-50ドラムに蓋をする操作は、グローブボックス外で手動で行われる。金属固化体1体のD-50ドラムへの収納に要する時間は、約1時間である。

(6) D-50ドラムの払出工程

本工程は、ドラム取出装置より送られてきたD-50ドラムを、一時保管した後、搬入・搬出設備に払い出す。これらの操作は、フォークリフトを用いて、手動で行われる。

2) 運転方法

前節で述べたプロセスの定常運転フローを表3.9に示す。

表3.9 定常運転フロー

	1日目				2日目			
	10	12	2	4	10	12	2	4
1) トレイ受入・払出工程	■				■			
2) 前処理工程		■				■		
3) 溶融装置への供給工程			■				■	
4) 金属の溶融工程			休憩	■			休憩	■
5) 金属固化体の封入工程					■			
6) D-50ドラムの払出工程								

注) 金属の溶融工程では、サンプリングも行うこととする。

1日の運転は、先ず前日（あるいは、それ以前）に溶融・冷却された固化体をるつぽから取出し、PVC溶封し、D-50ドラムへの装荷を行うことから始まる。装荷後は、D-50ドラムの蓋を取り付け、所定の位置まで移送する。この工程は約1時間で行われる。

次に、次チャージの溶融の準備として、トレイにて α 金属廃棄物を受入れ、へ選別する。選別により、 α 金属廃棄物を次の4種類に分ける。

- ・大型金属（主要材質：SUS又はSS）
- ・小型金属（主要材質：SUS又はSS）
- ・溶融除外物質（Zn及びPb）

溶融除外物質は、トレイに入れられて α 解体・除染セル（または、別施設）に送られる。以上で、午前の作業は終了する。

午後は、大型金属片を溶融装置に装荷する作業から開始される。小型金属は、小型金属供給装置に装荷される。

次に、冷却水等の確認を行い、溶融が開始される。溶融は、正味1時間程度であるが、余裕をみて2時間程度行う。この間に、サンプリング等処分を考慮したデータの取得も行う。

溶融停止後、1時間ほど様子を見て1日の作業は終了する。

3) 配置計画

α 金属減容設備の配置例を図3.5に示す。 α 金属減容設備設備の主要部はグローブボックス内に設置され、コールドクルーシブル炉本体はその中のチャンバーへ設置される。また、コールドクルーシブル炉電源はグローブボックス外に設置される。

4) 使用機器

コールドクルーシブル炉を用いた α 金属減容設備の機器リストを表3.10に示す。

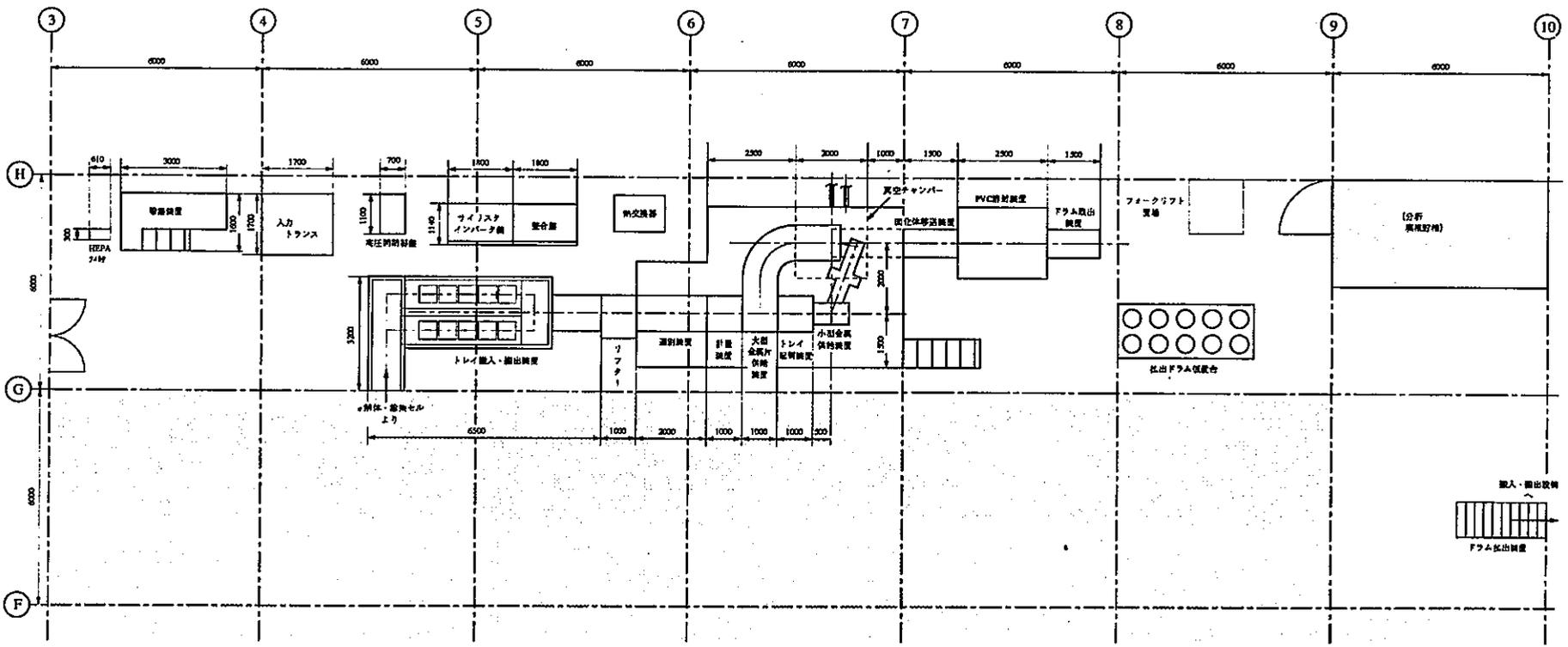


図3.5 α金属減容設備 配置計画図

表3.10 主要機器リスト

機器番号	機器名称	数量	型式	主要寸法 (mm)	材質	空重量 (TONS)	設備名称		α金属減容設備	
							設計条件	耐震 クラス	機器 クラス	備考
E-M-001	トレイ搬入・搬出装置	1	コンベア式	3200×6500×1200	SS400	1.91		C	—	
E-M-002	リフター	1	チェーン式	1250×1000×4700	SS400	0.72		C	—	
E-M-003	選別装置	1	手動式	1000×2000×2050	SUS304	0.60		C	—	
E-M-004	計量装置	1	ロードセル式	1000×1000×2050	SS400	0.43		C	—	
E-M-005	大型金属片供給装置	1	ホイスト式	3000×2400×2500	SS400	1.46		C	—	
E-M-006	トレイ転倒装置	1	回転式	1000×1000×2050	SS400	0.35		C	—	
E-M-007	小型金属供給装置	1	振動式	1000×2500×2050	SUS304	0.40		C	—	
E-M-008	固化体移送装置	1	コンベア式	800×3500×1600	SUS304	0.53		C	—	
E-M-009	PVC溶封装置	1		2000×2500×3400	SS400	1.35		C	—	
E-M-010	ドラム取出装置	1	コンベア式	800×1500×500	SS400	0.30		C	—	
E-M-011	払出ドラム板置台	1	プレート式	1500×3750×100	SS400	0.44		C	—	
E-M-012	ドラム払出装置	1	コンベア式	1000×2500×500	SS400	0.50		C	—	
E-M-013	フォークリフト	1				1.80				
E-M-014	天井クレーン	1			SS400	20.00				据付・保守用
	(定格荷重：20t)									
E-S-001	溶融装置	1	インダクタ式	4500×7500×2000	SUS304	20.00		B	—	
E-S-002	除塵装置	1	パケフィルタ	1600×3000×3000	SUS304	0.87		B	Y	
E-S-003	グローブボックス	1		3200×7500×4700 3000×6000×1800 2000×6000×3400	SUS304	7.63		B	Y	
E-S-004	HEPAフィルタ	1	横置角型	610×300×610	SUS304	0.10	500 m ³ /h	B	Y	

4. コールドクルーシブル炉に関する課題の整理・検討

コールドクルーシブル炉に関し、 α 廃棄物処理設備としての技術的課題の整理・検討を行います。主な課題の整理・検討項目は次のとおりとします。

- (1) 廃棄物供給系
 - ・ 廃棄物供給寸法
 - ・ 供給型式
 - ・ スラグ効果
- (2) 装置安全性
 - ・ 突沸防止対策
 - ・ 供給時湯跳ね防止対策
 - ・ 鑄型からの湯漏れ防止対策
 - ・ 駆動系の安全性
 - ・ 固化体搬送系の安全性
 - ・ α 設備としての具備事項
- (3) 保守性
 - ・ 炉本体の保守
 - ・ 付帯機器の保守

4.1 技術的課題と対策

4.1.1 廃棄物供給系

1) 廃棄物供給寸法

コールドクルーシブル炉は440 ϕ ×700Hあり、これに装荷可能な廃棄物寸法（300mm□以下）であれば、受入可能である。LEDFとして対象として寸法は、200mm□以下（当初計画、概念設計では140mm□以下）であり、充分対応可能である。

2) 供給型式

金属の供給は、大型金属片と小型金属に分けて行う。

大型金属片は、初装荷用として用いる。この大型金属片は、メッシュシートに入れて炉内に入れられる。

小型金属は、初装荷及び追加装荷として用いる。小型金属片は、振動フィーダまたは専用のグリッパを用いて炉内に入れられる。

3) スラグ効果

スラグは除染効果があり、除染により何等かの効果が期待される場合に入れられる。

α 金属減容設備においては、熔融処理された固化体は α 廃棄物として処分される予定であり、除染による低レベル放射性廃棄物化は困難と考えられる。また、除染による放射性廃棄物の拡散の可能性もあり、本 α 金属減容設備としては、使用しないものとする。

4.1.2 装置安全性

1) 突沸防止対策

夾雑物のうち、Znについては突沸の可能性はある。これについては、コールドクルーシブル炉の壁面を高くする事により対応可能である。また、事前に分別ができるのであれば、初期装荷することにより突沸無しで、熔融処理可能である。

2) 供給時湯跳ね防止対策

小型金属供給装置を用いて、小型金属を熔融炉に追加装荷する場合に湯跳ね（スプラッシュ）が生じる可能性がある。

これについては、コールドクルーシブル炉の壁面を高くすることにより防止できる。また、湯跳ねが生じても炉体はチャンバー内に設けられており、火災等の問題は無い。

3) 駆動系の安全性

コールドクルーシブル炉周囲の駆動系は、金属供給及び固化体取出のみであり、比較的シンプルな機構であり、問題は無い。

コールドクルーシブル炉外のハンドリング系については、通常のハンドリングであり、直接保守が可能であり問題は無い。

3) 固化体搬送系の安全性

コールドクルーシブル炉内で凝固された固化体は、500kgを超える重量がある。これについては、主にホイストを使用することにより搬送されるが、実績等から問題は無いと考えられる。

5) α 設備としての具備事項

本設備は α 金属減容設備であるが、対象が除染された金属片であり、放射エネルギーも低く、溶融工程を除くと具備事項は少ない。

溶融については、オフガス系への移行率を適正に評価する必要がある。これは模擬 α 核種を用いたコールド試験により確認する必要がある。

4.1.3 保守性

1) 炉本体の保守

炉本体は、極めて耐久性の高いものであり、金大型属片の落下等の操作ミスが無いかぎり、補修の必要は無い。ただし、溶融開始前には、ITVを用いて炉内壁を目視確認することが望ましい。

2) 付帯機器の保守

コールドクルーシブル炉本体を除くと、大半が通常のハンドリング機器であり、直接保守が可能であり特殊な配慮は不要である。ただし、固化体の吊上げ等を行う、ホイストについては、安全上の観点から二重化が望ましい。

4.2 その他の課題

その他、今後設計を進めて行く上で検討すべき項目を表3.12に示す。

表3.12 今後の設計検討課題 (1/2)

工程	検討課題	備考
トレイ受入・払出工程	本工程では、 α 解体・除染セルから、金属片をトレイで受け入れることとなっている。このトレイでの金属片重量は、80~127kgと設定している。 α 解体・除染セルでこの重量範囲内に金属片をトレイに装荷可能か検討する必要がある。	他設備との調整
	α 解体・除染セルはレッドであり、本 α 金属減容設備はアンバーである。本工程で α 解体・除染セルよりトレイを受け取る場合、二重の遮蔽扉を設けないと開口部（受渡し部）が高線量当量率になる可能性がある。これについて、合理的な配慮が必要である。	他設備との調整
	本工程では、 α 解体・除染セルとトレイの受渡しを行う。トレイに汚染があると、本設備全体が汚染されることになり、トレイに汚染がないことを確認する簡易な方法を検討する必要がある。	他設備との調整
前処理工程	本工程では、熔融に不適切な金属や有機物を除去する。これは、 α 解体・除染セルでも行われており、再確認のために行うものである。もし、このような金属や有機物があった場合、成分調整を行った後熔融工程に送るのか、それとも別工程に送付するのか検討する必要がある。	合理化対策
	本工程では、熔融する金属を計量する。この計量により、所定の重量範囲に入っていないことか明らかになった場合、余剰の金属を除去することとなる。この除去された金属の処置方法（例えば、次のトレイ以降と調整する）について検討する必要がある。	他設備との調整
	本工程では、バッファとして5トレイ（1週間分）の一時保管ができるように設定している。今後、このバッファ量について検討する必要がある。	LEDF全体として設計思想の統一
熔融装置への供給工程	本工程では、大型金属片は、金属メッシュシートに入れて直接熔融炉に装荷することとなっている。この金属メッシュシートの仕様について詳細検討する必要がある。	前工程を見直しながら検討
	本工程では、振動フィーダーにより大型金属片以外の金属片を熔融炉に供給することとなっている。振動フィーダーでは、30kg程度迄は実績があり重量的には問題がないが、特殊な形状の金属を受け入れた場合でも問題がないことを確認する必要がある。	前工程を見直しながら検討
	熔融炉の寸法は ϕ 440mmであり、金属片の寸法が330mm \square 以下であれば、熔融装置に供給可能である。しかし、それ以上の寸法がある場合には供給方法を工夫するか、細断が必要となる。これについて、検討が必要である。	

表3.12 今後の設計検討課題 (2/2)

工程	技術課題	対策
金属の溶融工程	溶融装置で作製される金属固化体は、現行実績を重視しφ440mm（収縮によりφ425mm程度となる）としている。この金属固化体は、現状ではD-50ドラム（内径：465mm）に1体収納することとしており、収納効率は約32%である。 収納効率を高めるためには、D-50ドラムに直接鑄造する方法もあり、これについても検討する必要がある。	将来に向けての検討
	本工程では、るつば内凝固により固化体を作製することとなっている。炉内で凝固時間について調査する必要がある。	試験検討
	本工程では、スラグは使用しないことになっている。今後α金属廃棄物の非α化が可能になった場合には、スラグ使用の是非を見直す必要がある。	将来に向けての検討
	現在試験では、安全性向上のため溶融時の雰囲気ガスとしてArガスを用いている。今後、その他のガス（窒素ガス等）の使用についても検討する必要がある。	設計検討
	本工程のオフガス系は、除塵装置で除塵した後、HEPAフィルタで除染を行っている。除塵装置は、逆洗方式により、フィルタエレメントの目詰まりを防止し、寿命の長期化を図ることにしている。これらエレメントの洗浄の頻度を検討する必要がある。	設計検討
金属固化体の封入工程	本工程では、金属固化体をD-50ドラムに装荷することとなっている。固化体は、そのままではハンドリングが困難であり、専用のハンドリング治具について検討する必要がある。	設計検討
D-50ドラムの払出工程	D-50ドラムは、一時保管されたのち、搬入・搬出設備に送り出される。このバッファとしての一時保管容量について、他設備の稼働状況と調整しながら設定する必要がある。	LEDF全体として設計思想の統一
	D-50ドラムは、搬入・搬出設備に送り出されるが、この受渡しについて検討する必要がある。	他設備との調整

3. 浮揚溶解炉に関する調査

1. はじめに

浮揚溶解技術は水冷るつば式の高周波溶融炉であり、溶融炉外周に巻かれたコイルに数kHz～数十kHzの電流を流すことにより、溶解対象物を溶融するものである。溶融原理はコイルと溶融物間に磁束が鎖交したうず電流が誘起され、うず電流間の反発力によって溶解対象物が溶融された状態で自重を支え空中に浮揚されるものである。

以下に浮揚溶解技術の開発実績及び溶解実績、特徴、並びに出湯形式等を整理する。尚、2.項以降に浮揚溶解技術の実験装置、磁界解析の資料等を示す。

表1-1 浮揚溶解技術の開発経緯

表1-2 浮揚溶解炉による溶融実績

表1-3 浮揚溶解炉の特徴

表1-4 浮揚溶解炉出湯形式のメリット／デメリット

図1-1 浮揚溶解設備の系統構成図（例）

表1-1 浮揚溶解技術の開発経緯

年	開発テーマ	期間, 狙い等
1989	浮揚溶解研究開始 基礎研究	1989~1990 2年間の共同研究 (科技厅 金属材料技術研究所 中部電力㈱) 電磁応用技術の浮揚溶解への応用
1990	200g級溶解るつぼ製作基礎実験 (セグメント数1~12)	従来は数10g級。 大型化指向。
1991	3~10kHz 高周波電源製作 200g級るつぼの24セグメント型試作 200g浮揚溶解成功	浮揚溶解の安定化のため
1992	2kg 級溶解るつぼ試作 2.3kg 浮揚溶解成功 動燃(東海)原子力廃棄物減容化研究	2電源方式の考案 新聞発表(9月) 原子力燃料棒破材ジルカロイの連続溶解 減容化処理技術確立
1993	電磁界と流体の連成解析実施 ・電磁力による溶湯形状推定 ・るつぼの温度分布推定	セグメント内の冷却経路などの構造設計 に反映
1994	底部出湯るつぼの試作 40kg級溶解るつぼ試作	業界から出湯のニーズに対応

表1-2 浮揚溶解炉による熔融実績

No.	材 料	溶解量 (kg) (溶解温度)	時間 (分)	雰囲気	溶解状況 (溶解実績回数)	評 価
1	Ti-Al合金 (原子比 1:1)	2.3 (1800°C)	2' 08"	減圧Ar	1.5kg 初め装入溶解, 40" 後溶解開始, 1' 22" で溶解, 残り装入して完全溶解した。(20回)	良 好
2	純Ti	2.3 (1800°C)	2' 12"	減圧Ar	1.3kg 初め装入, 22秒後溶解開始, 1' 18" で溶解, 残り装入して完全溶解。(15回)	良 好
3	Cu-Al合金 (重量比 2:3)	2.0 (1500°C)	2' 30"	減圧Ar	合金塊を初め, 1.5kg 溶かし, 残りを溶解。(30回)	未溶解 あり
4	ステンレス鋼 (Fe-Cr) 重量比 1:1	2.3 (1550°C)	3' 00"	減圧Ar	FeとCrの塊をるつばに装入, 溶かした。 Feが溶け, 次にCrが溶けた。 (20回)	良 好
5	鋳鋼 (Fe-C-Si)	3.0 (1500°C)	2' 30"	減圧Ar	鋳鋼をるつばに2kg装入して溶かし, 続いて残りを装入, 溶解した (30回)	良 好
運転実績(1992 ~1994年)					約 100 回 (実験用なのでこの間にるつばの 点検を実施)	良 好

表1-3 浮揚溶解炉の特徴

No.	ポイント	一般的特徴	LEDFでの有用性
1	均質組成金属の生成	高周波誘導の電磁攪拌効果があるため、溶解が均一に混ざり合う。	比重の差による不均一溶解が防げる。均一な溶解が望ましい。
2	高融点材料の溶解を容易に達成	るつぼと溶湯が非接触であるため、2000℃以上の高融点金属の溶解ができる。	材料が高融点であってもるつぼを損傷することはない。るつぼのメンテナンスが少なくてすむ。
3	完全浮揚による非汚染状態での溶解が可能	るつぼと溶湯が非接触であるため、るつぼと溶湯の間で相互の汚染がない。	放射性物質を含んでいても、るつぼと接触が無いのでるつぼのメンテナンスが少なくてすむ。
4	短時間で加熱溶解でき、省電力が可能	加熱の電力投入は大きい(数kw~数10kw)が、短時間で溶解できるので電力量は少ない。	電力量も少なくてすみ、又急速溶解なので溶解処理も速い。

表1-4 浮揚溶解炉出湯形式のメリット／デメリット

メリット	デメリット
<p>① インキャン方式に必要なキャニスタなどの二次廃棄物が発生しない</p> <p>② 熔融体の形状を自在に変えられるため、高充填率が得られる。</p> <p>③ 完全浮上であり、るつぼと非接触のため、未溶解部分が無い</p> <p>④ 溶解時るつぼと非接触のため、るつぼの損傷が少ない。</p> <p>⑤ 溶解時間が短いので、迅速な処理が可能 (電力使用量は溶解時間が短いため比較的小さい)</p> <p>⑥ インゴットやキャニスタのドラム缶への装入工程が不要である。</p> <p>⑦ 高融点金属の選別除去が不要である</p>	<p>① 加熱用と浮上用の2つの電源装置が必要なため、装置規模が大きい。</p> <p>② 出湯穴径が小さいので、通常の傾斜出湯に比べ時間を要する。</p>

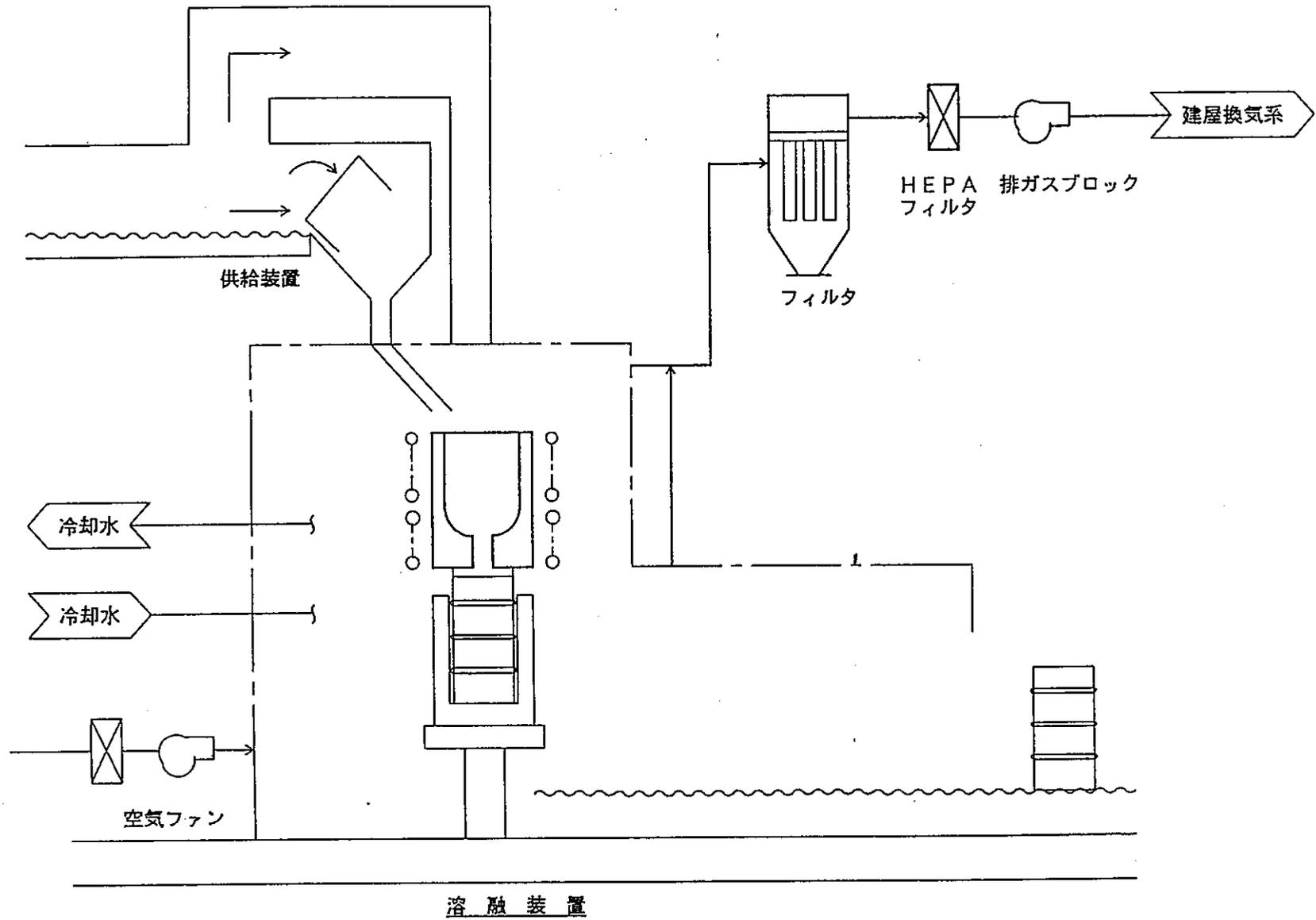
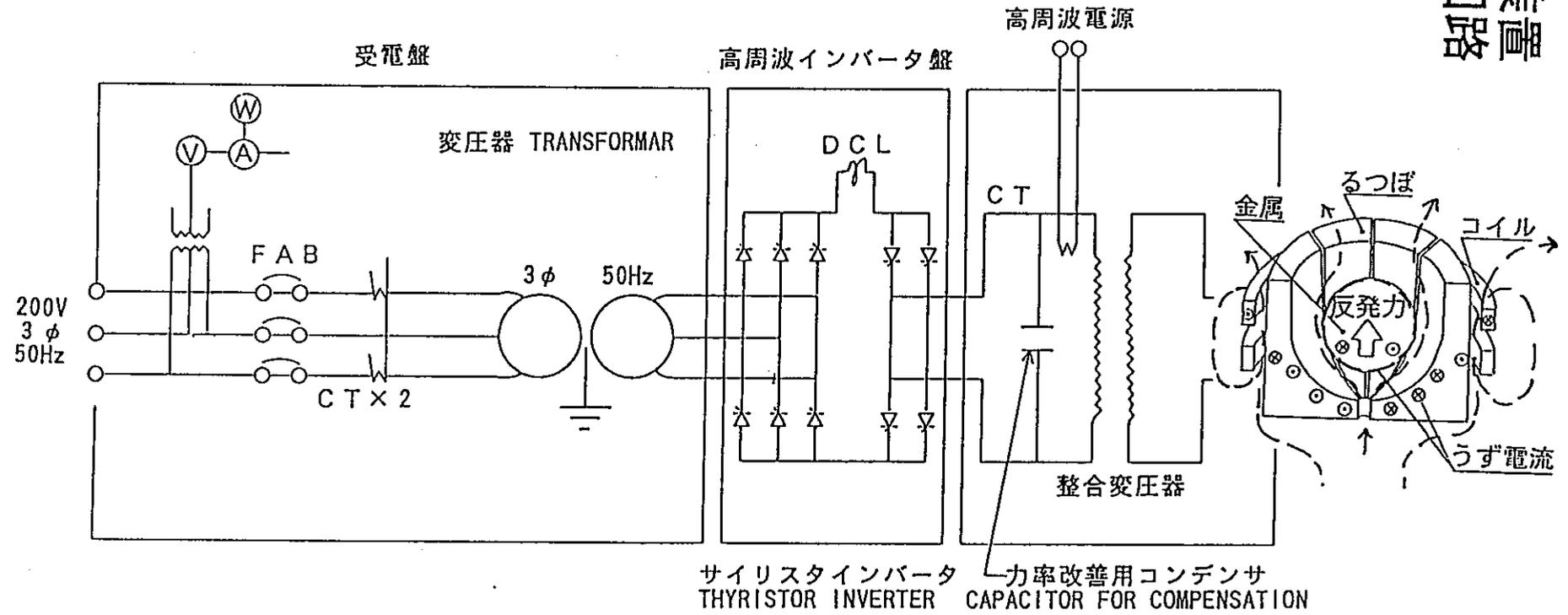


図1-1 浮揚溶解設備の系統構成図 (例)

2. 実験装置 2.1 実験回路

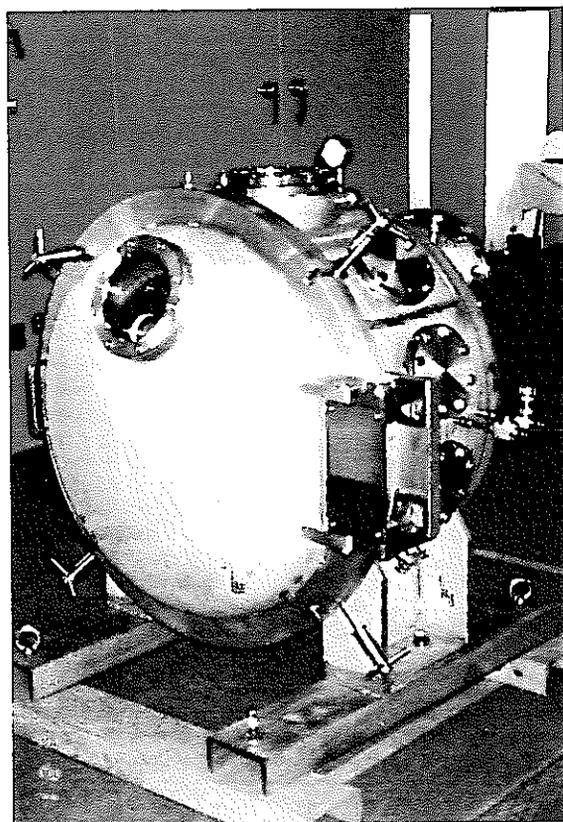


周波数
FREQUENCY
3~10kHz

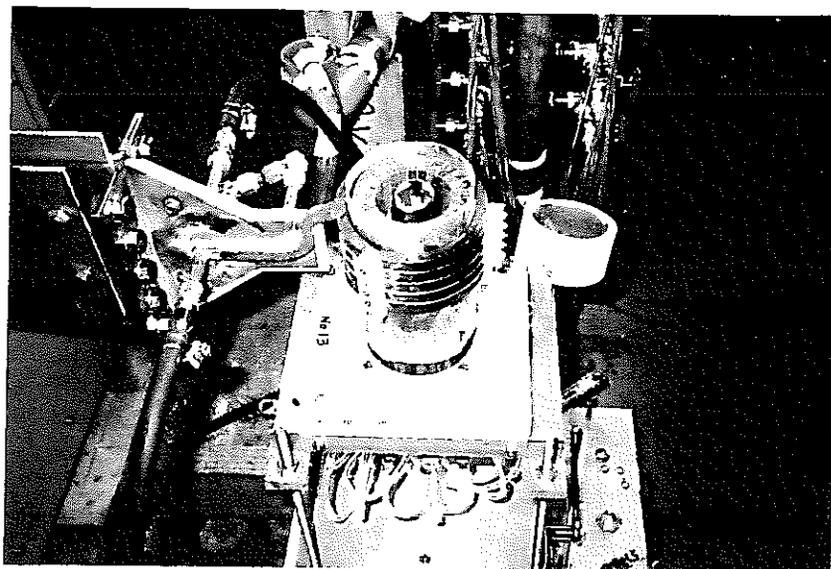
電圧
OUTPUT VOLTAGE
400V

2.2 雰囲気制御用試験容器

溶解金属の酸化を防ぐことや、
活性金属（チタン等）を溶解するため、
不活性ガス（アルゴン等）を封入して、
実験するための容器



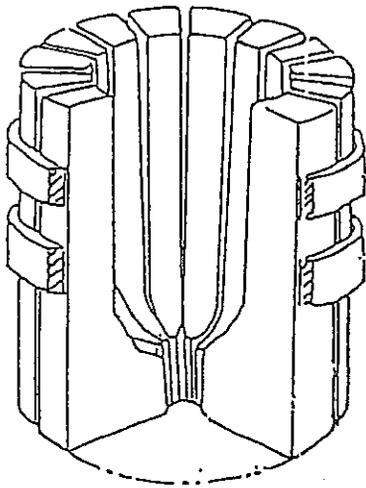
2.3 浮上溶解状況



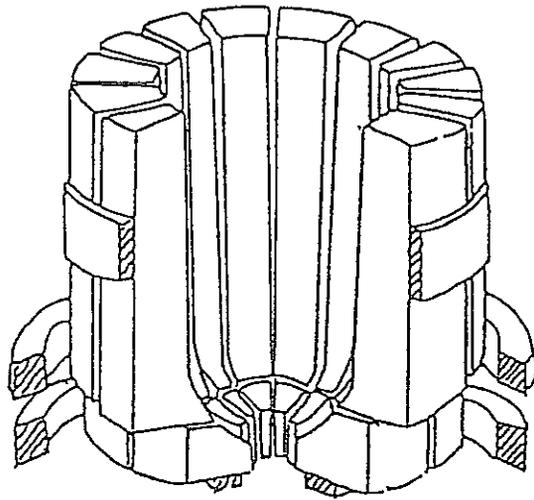
2.4 実験用るつぼ

スリットの数と幅，るつぼの大きさ，周波数，コイル位置，巻数などについて最適化を図ることが重要

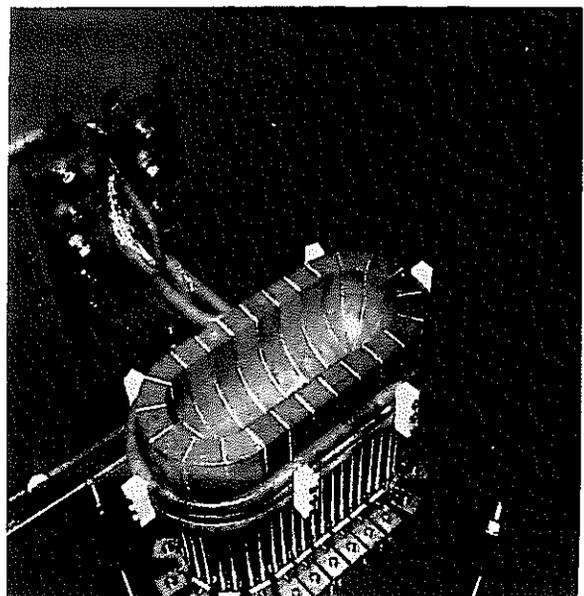
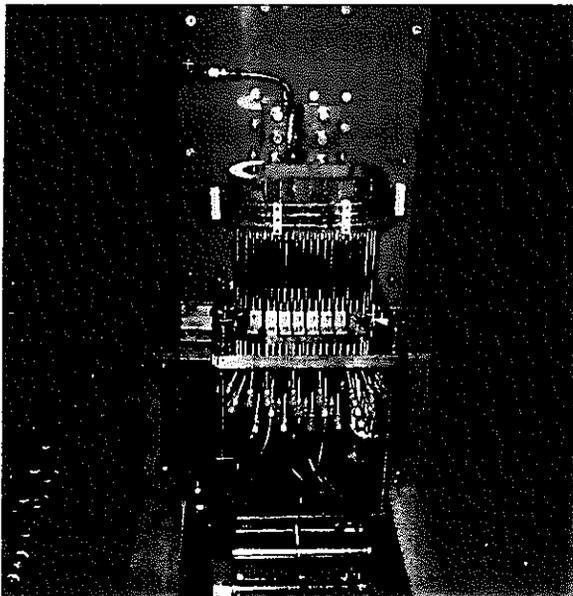
基本型



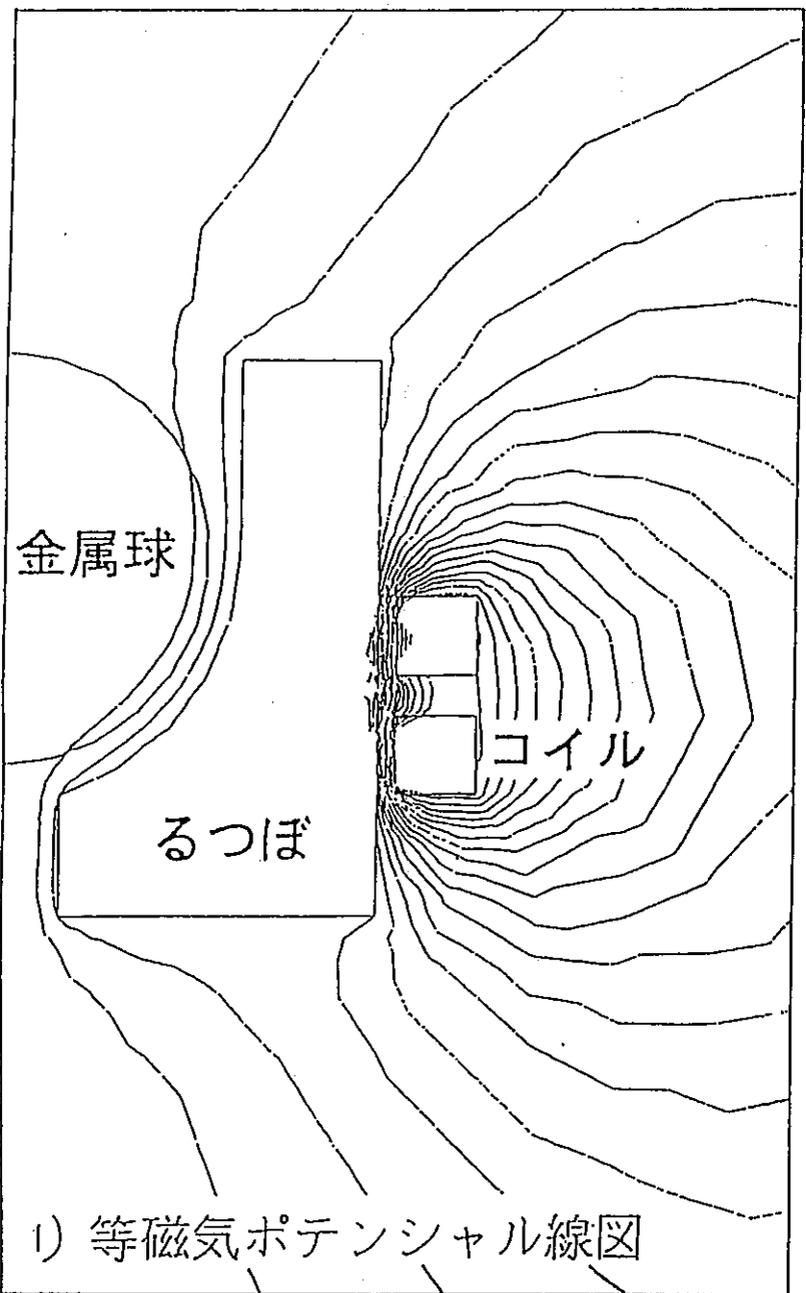
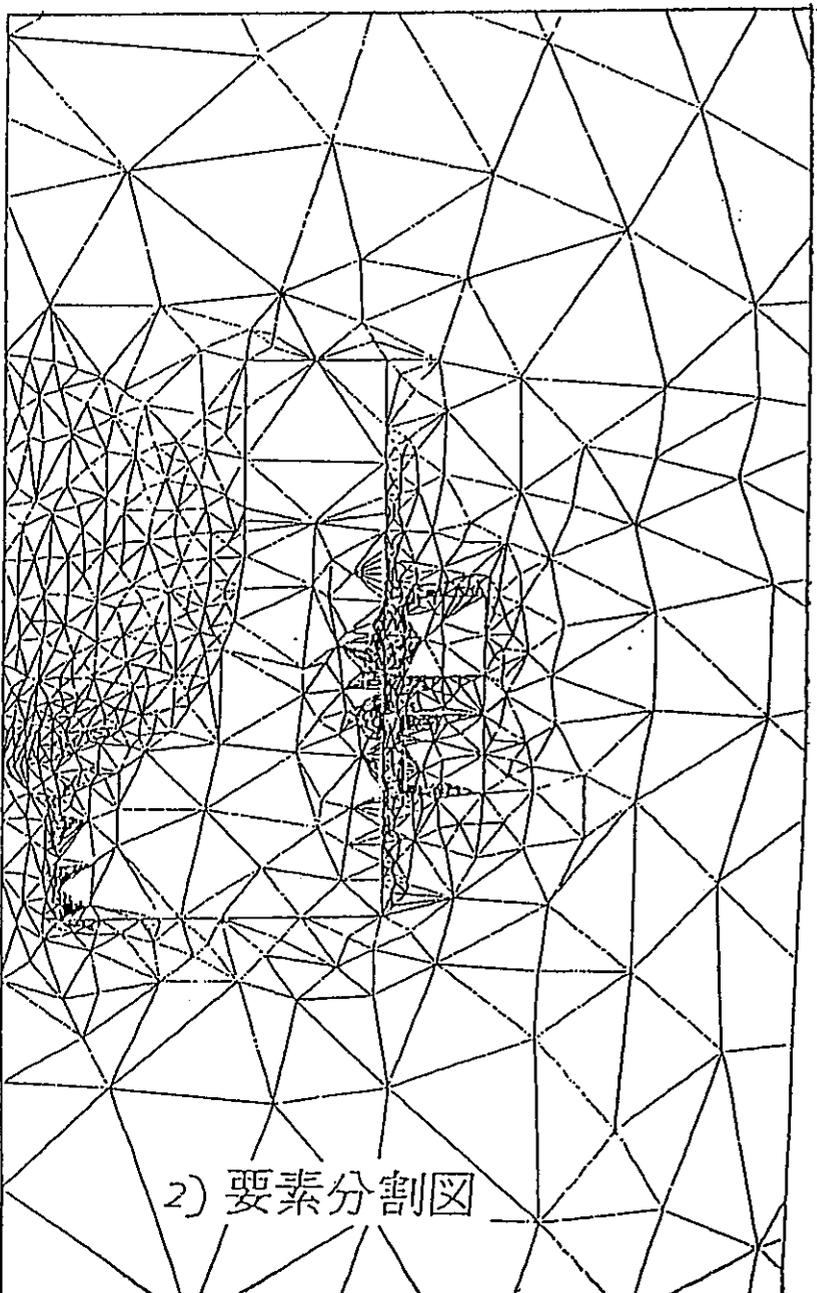
上下2分割



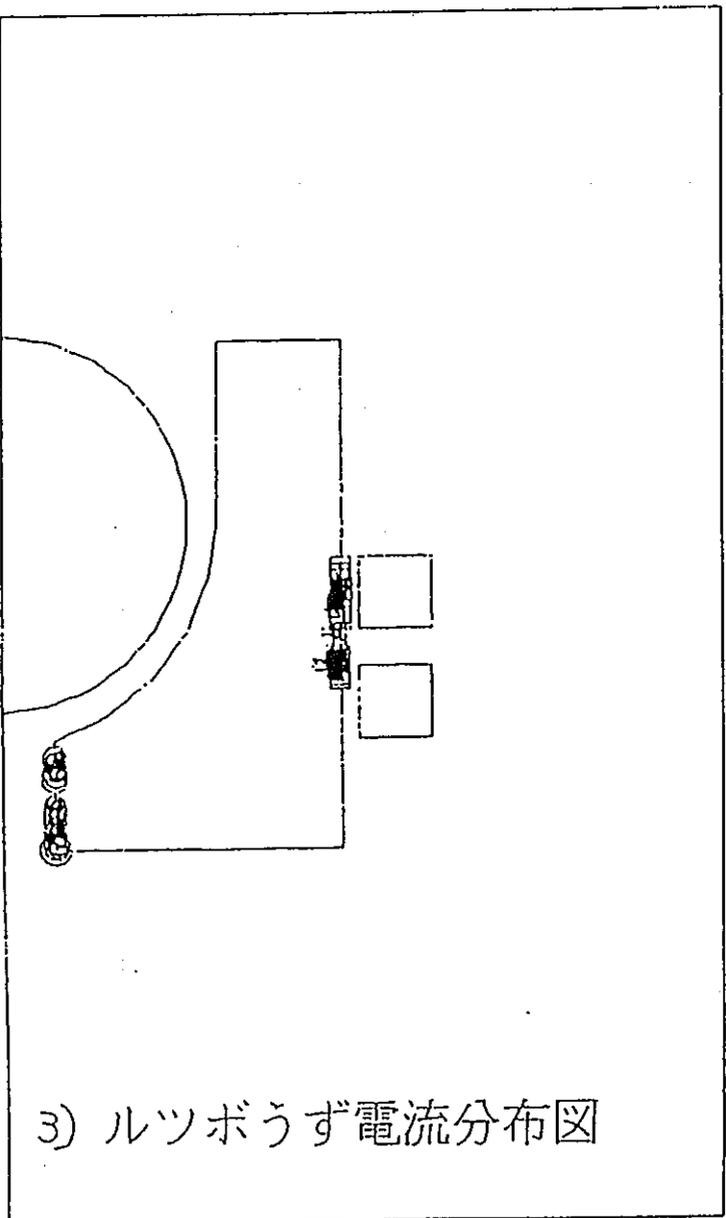
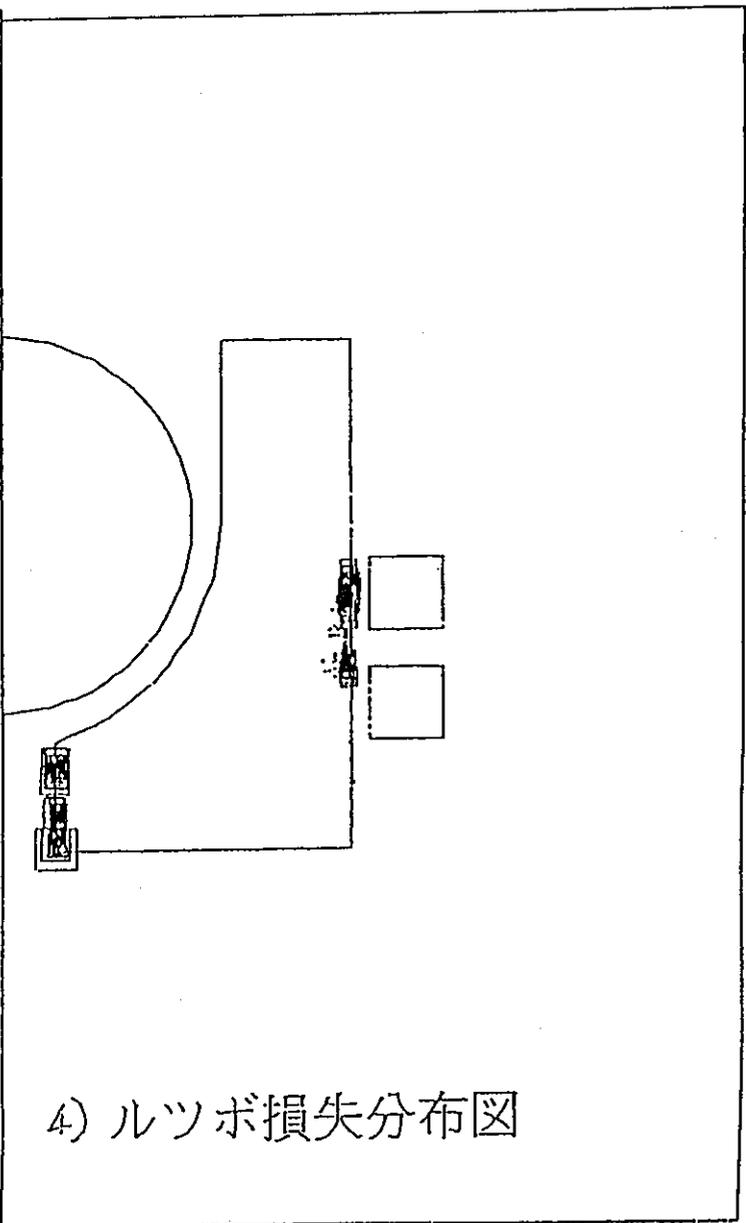
大容量タイプ



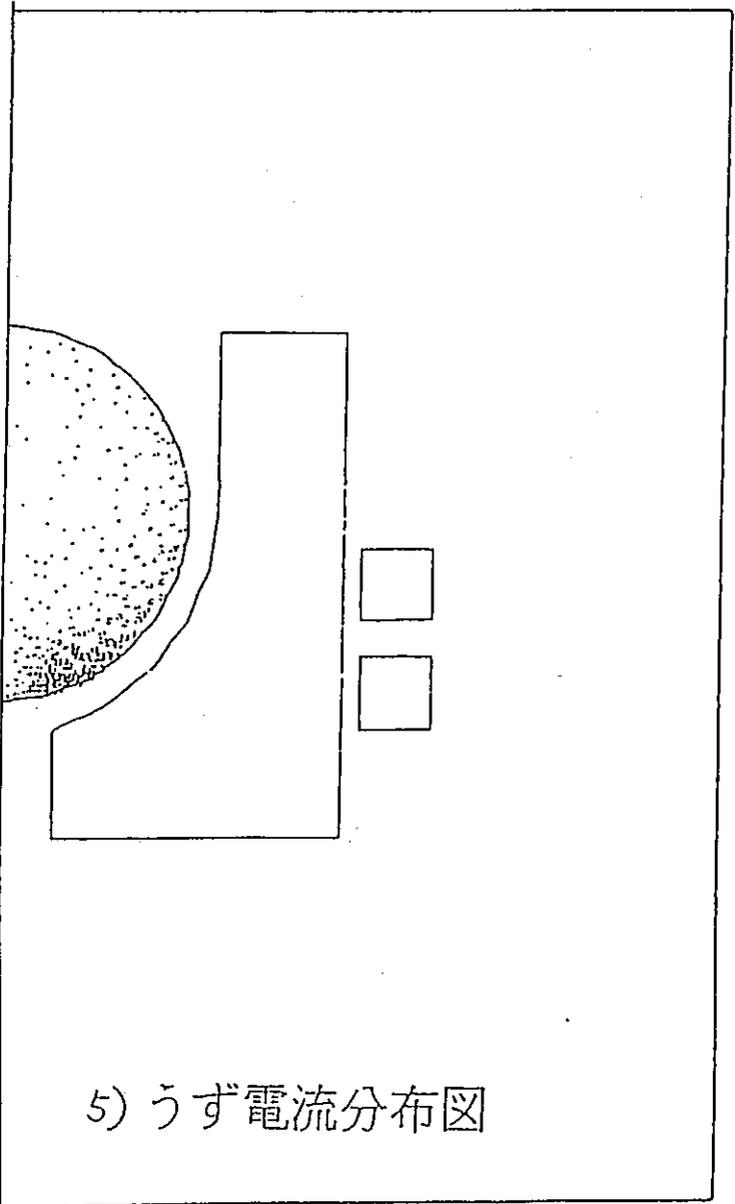
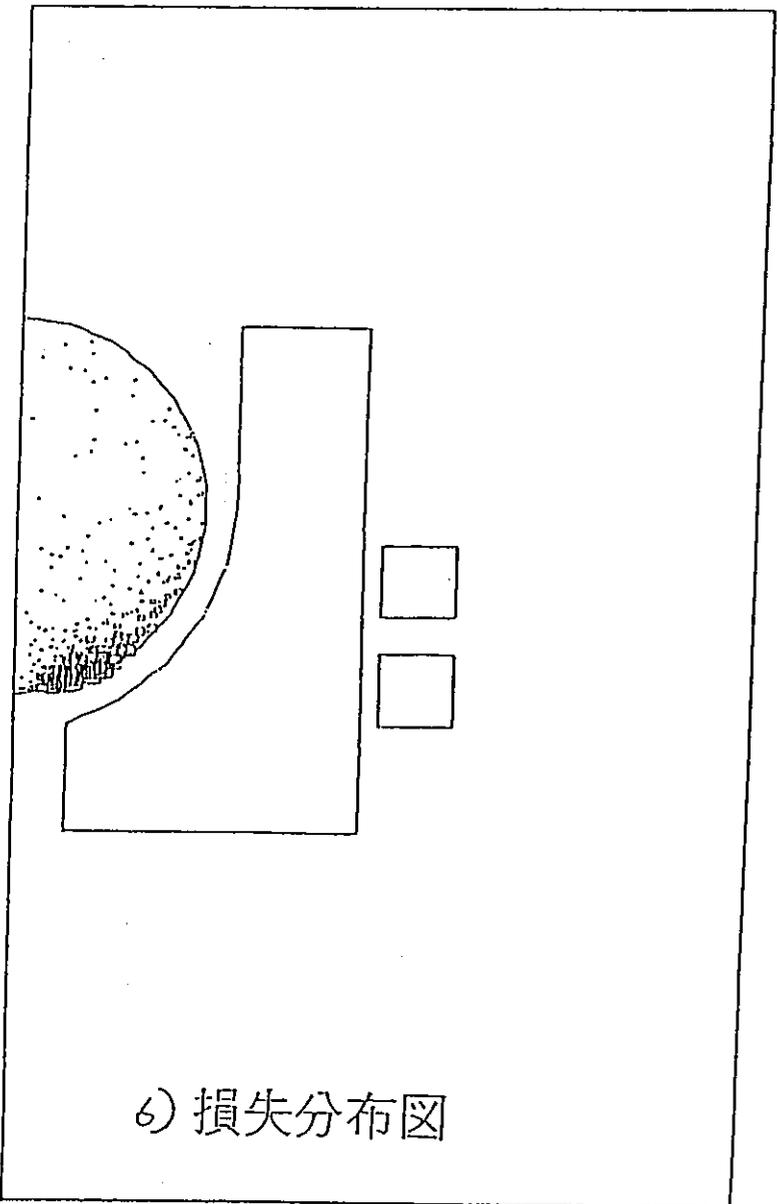
3. 磁界解析 3.1 磁束分布図



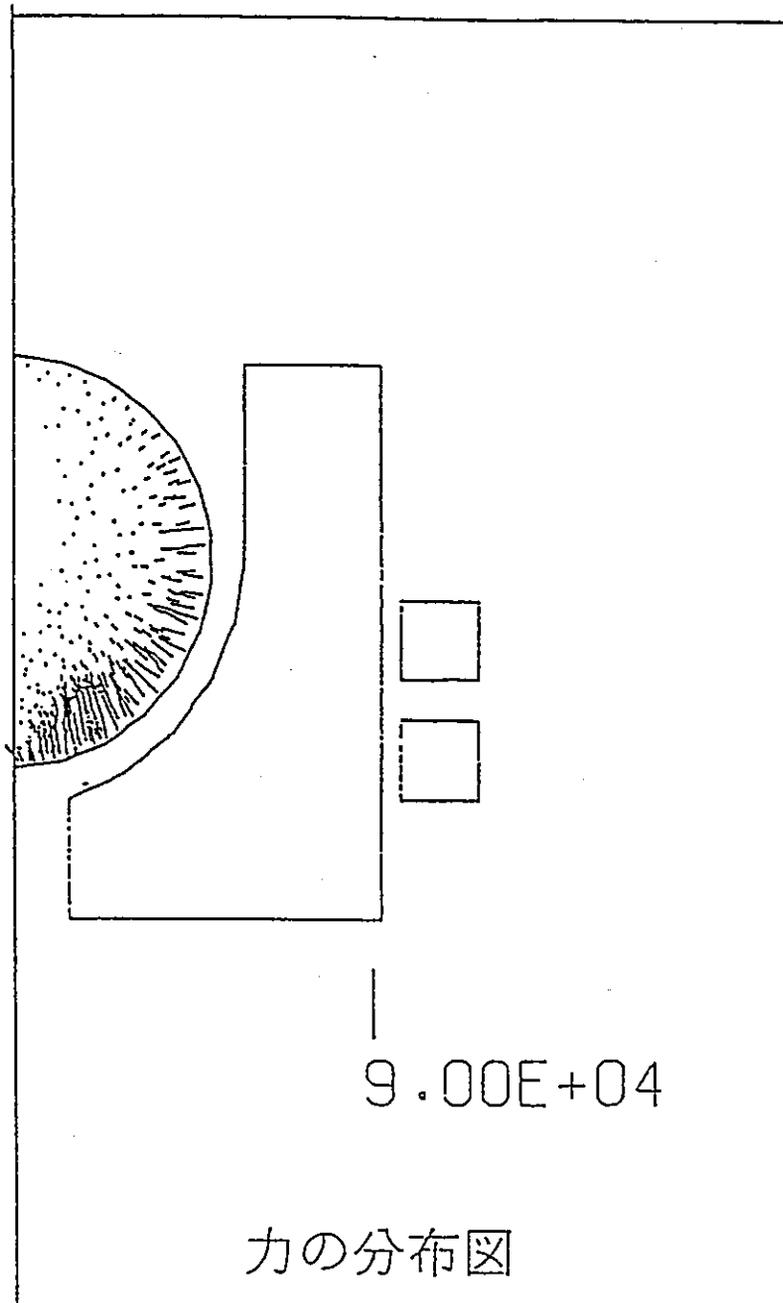
3.2 るつぼの電流と損失分布図



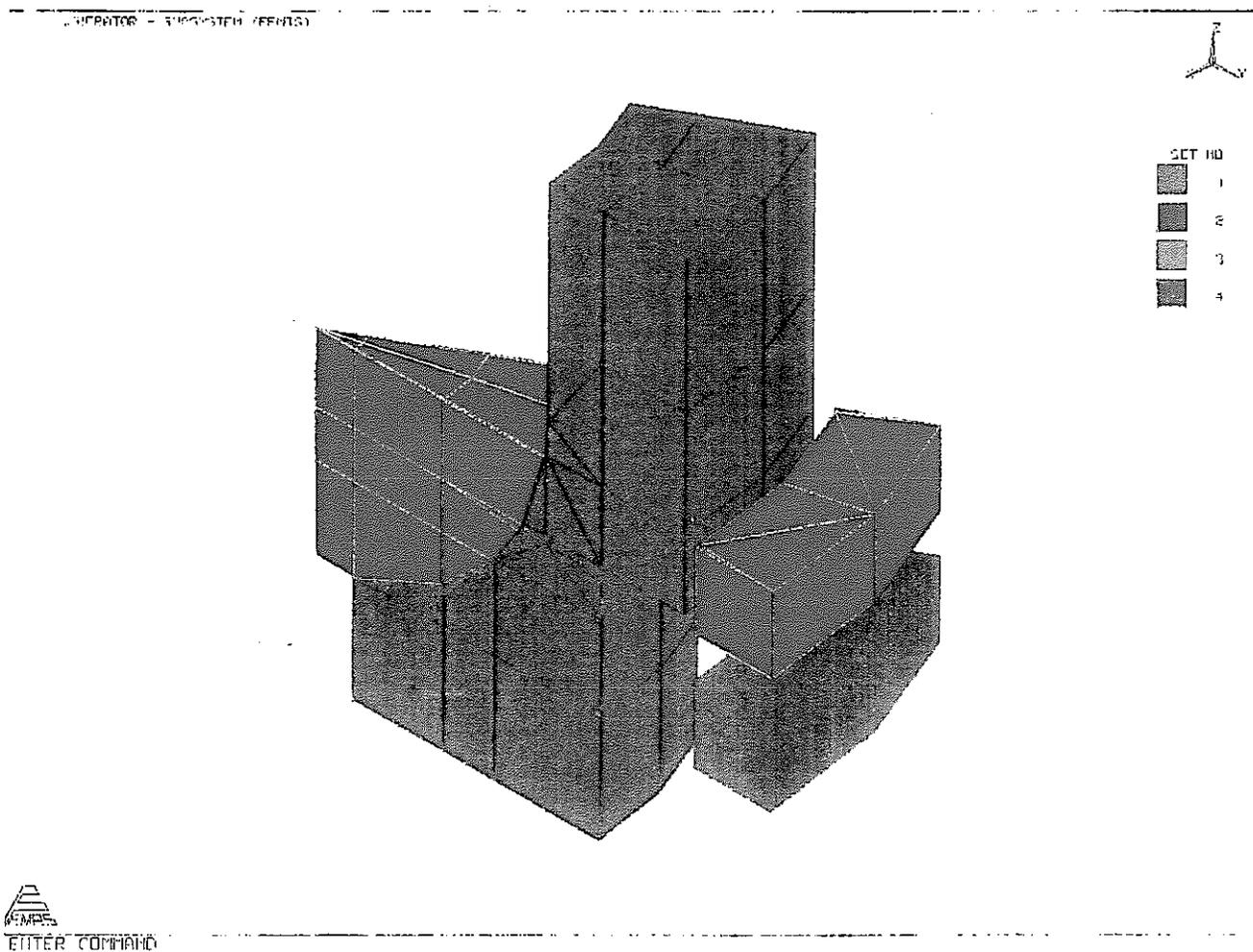
3.3 浮揚金属の電流と損失分布図

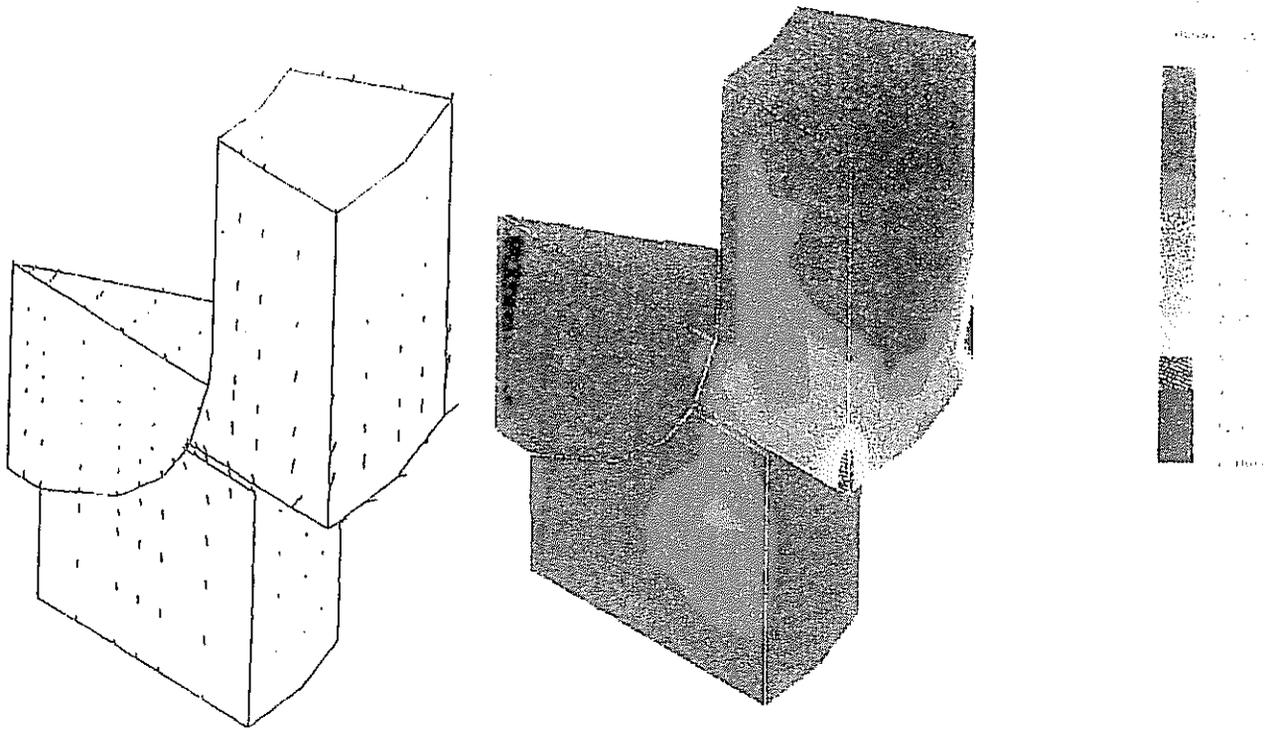


3.4 浮揚金属に加わる浮上力分布図

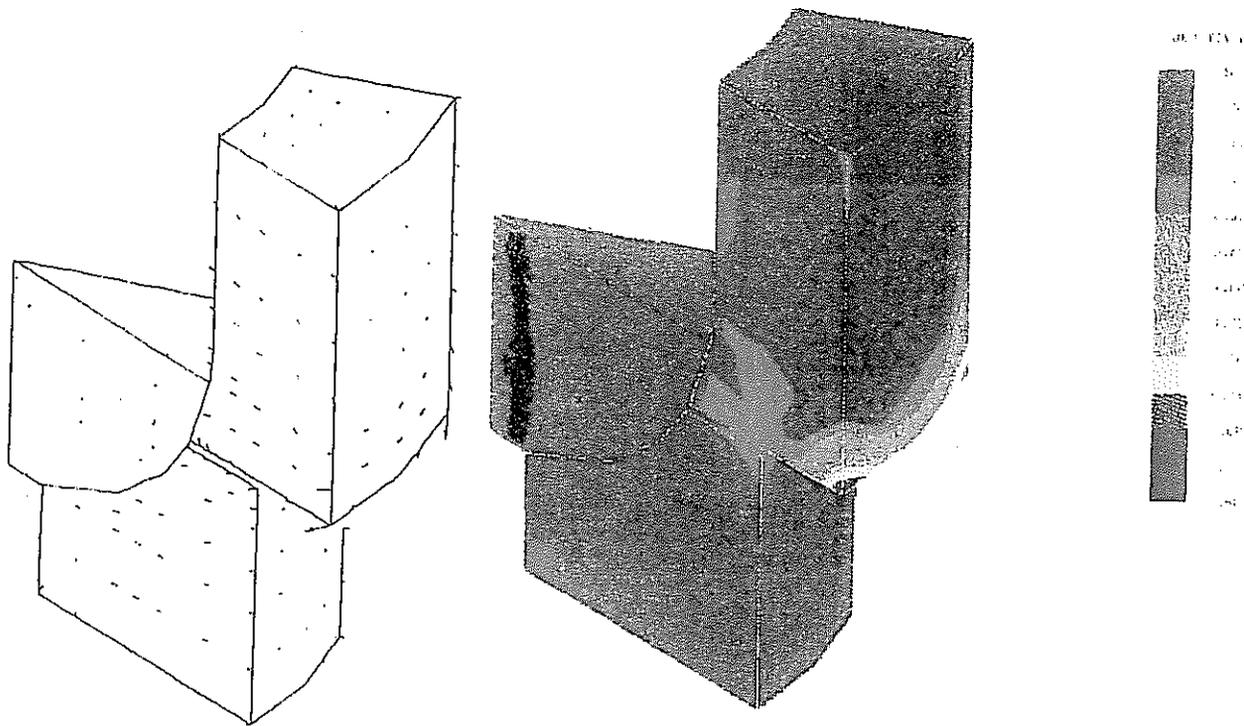


3.5 三次元磁界解析





るつぼ溶湯の磁束密度ベクトル図



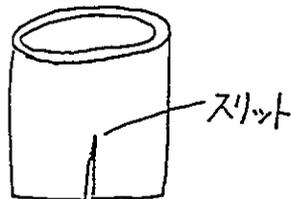
るつぼ - 溶湯のうず電流密度ベクトル図

附. ジルカロイ溶解実験

知見：・ジルカロイの破材のままでは溶解出来ない

⇒うず電流が流れ難い

- ・ジルカロイの形状が円筒状態では一部溶解するが、加熱時点で円の軸方向にスリット
(溶解) が入り、その後は溶解不能で加熱のみ



⇒うず電流の流れ方がかわり、うず電流が流れ難くなる

- ・低周波・高周波でも溶解不能
- ・るつぼの形状を変えても溶解不能

↓

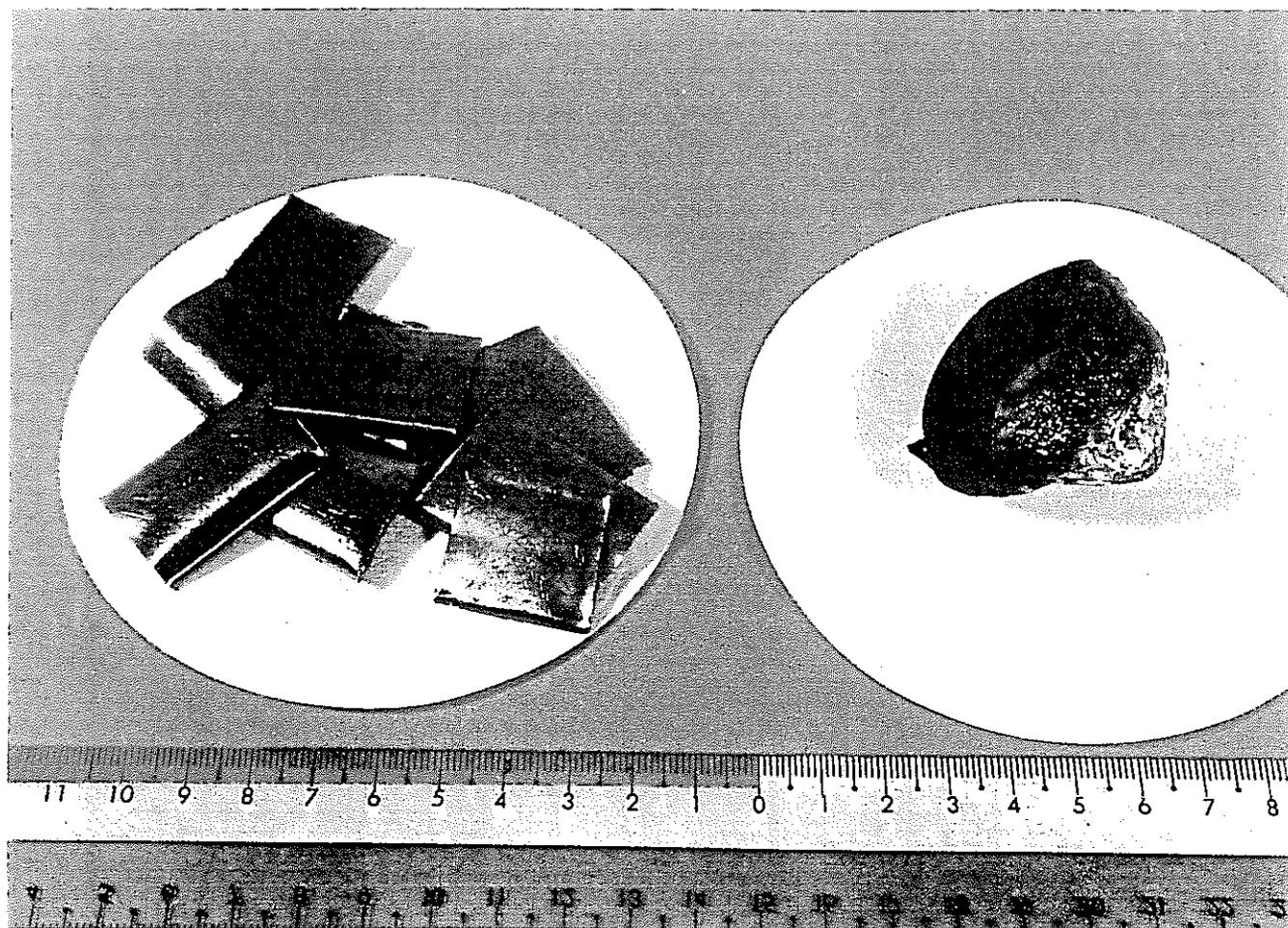
- ・高融点を持つ塊 (小片) を溶解後、破材を投入すれば溶解する。

↓ (溶湯温度：1850℃)

結論

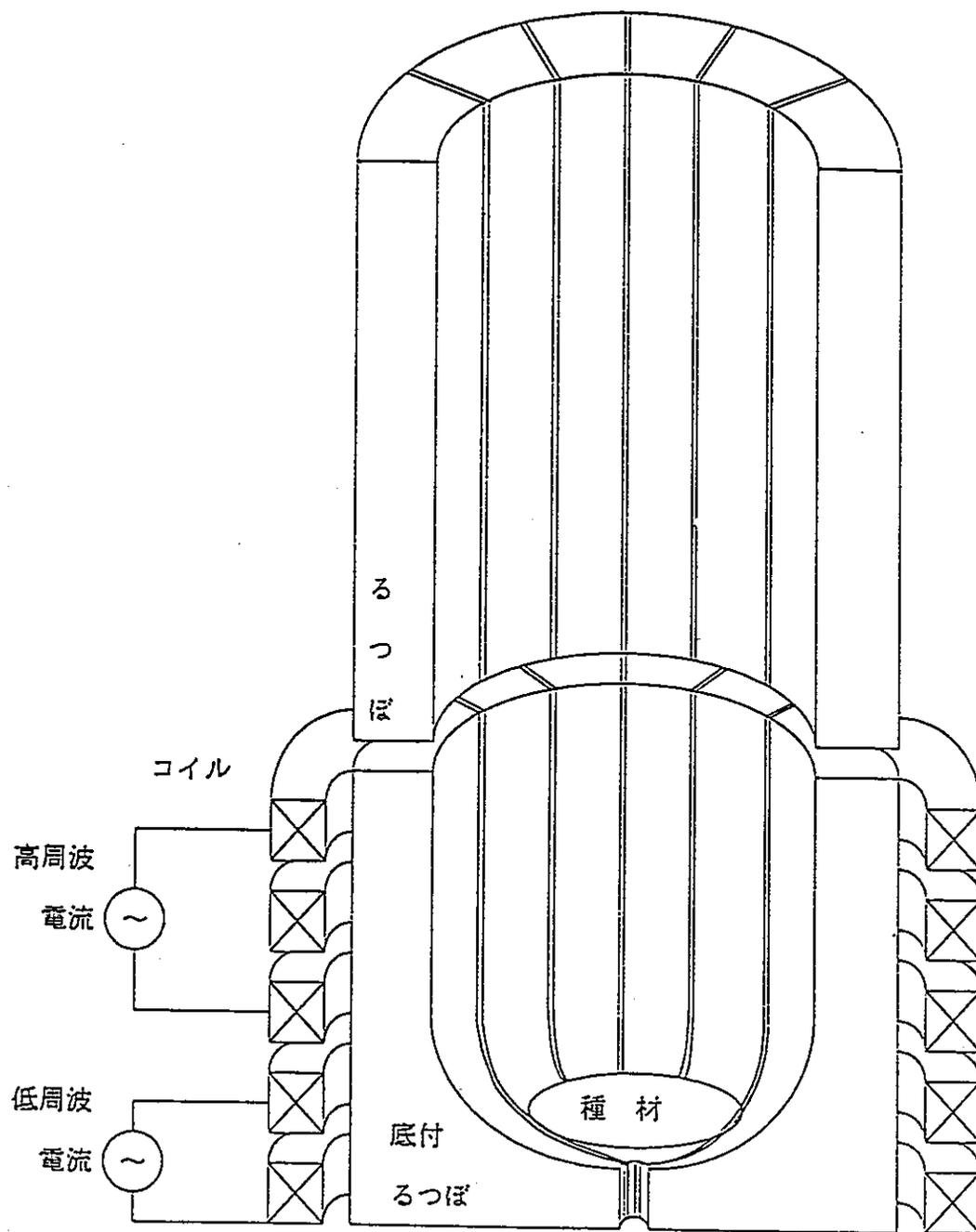
↓

ブロックのもので溶解して、溶湯を作りその中にジルカロイ破材を投入することで溶解可能

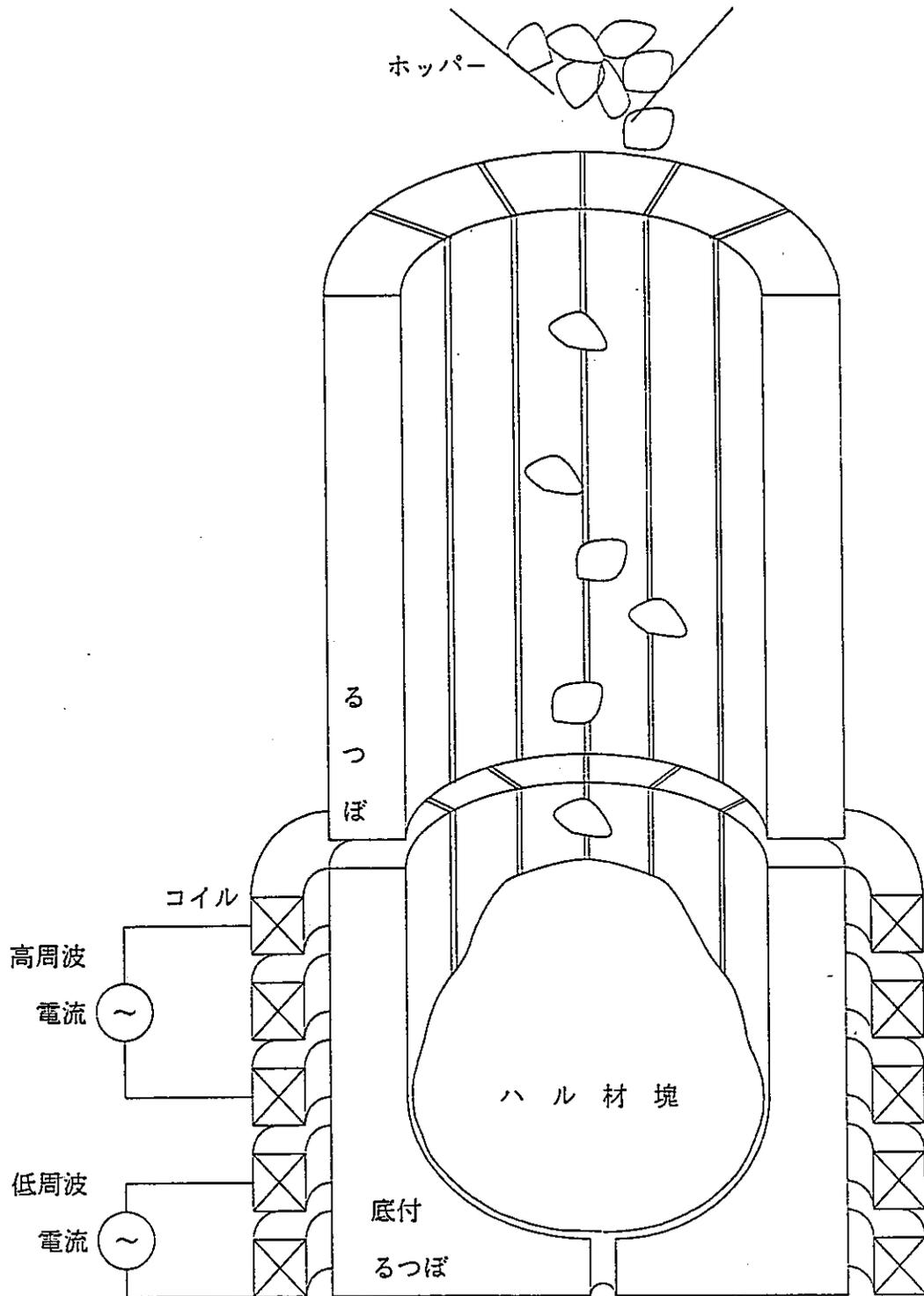


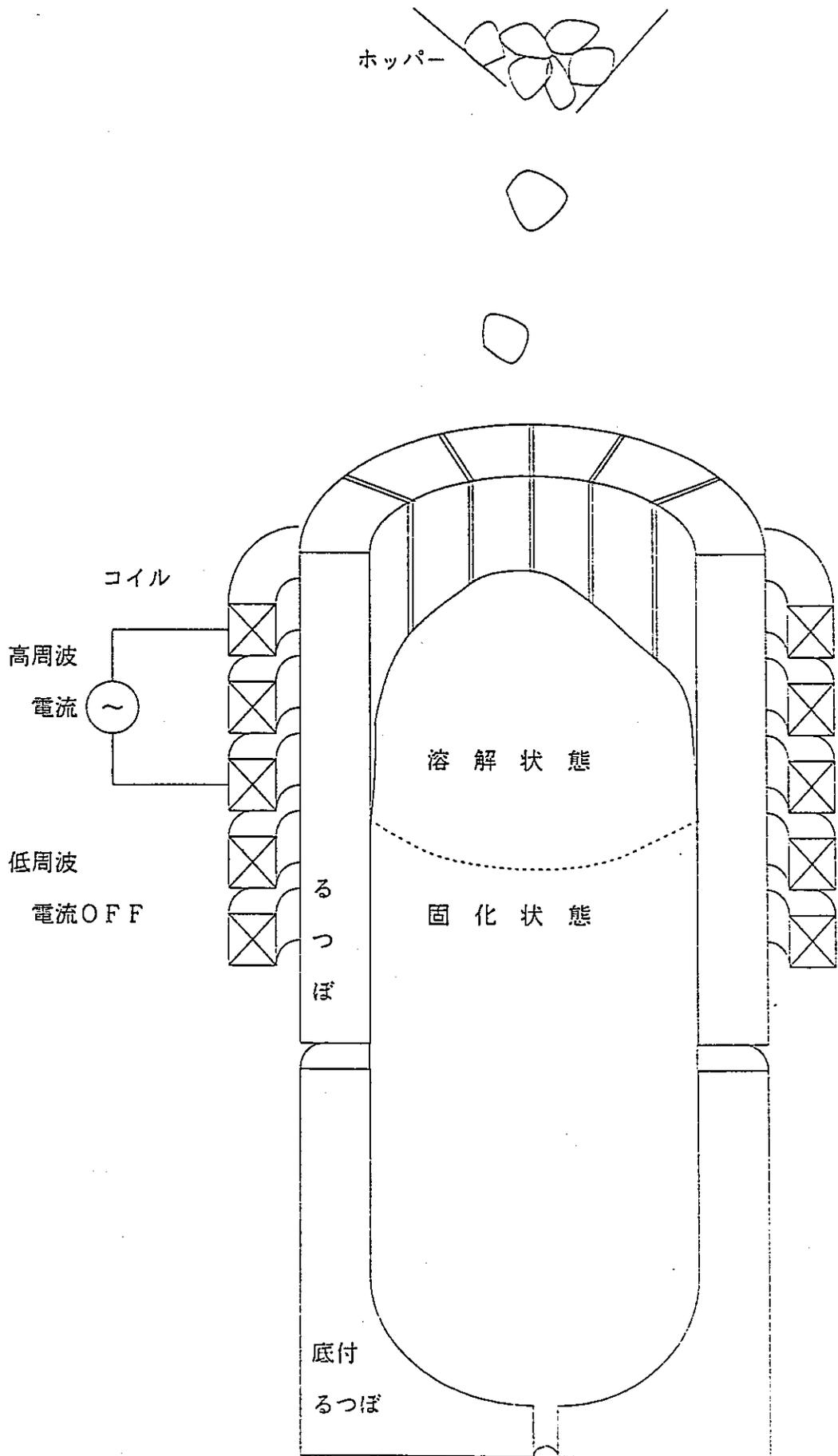
核燃料被覆管破材 溶解塊

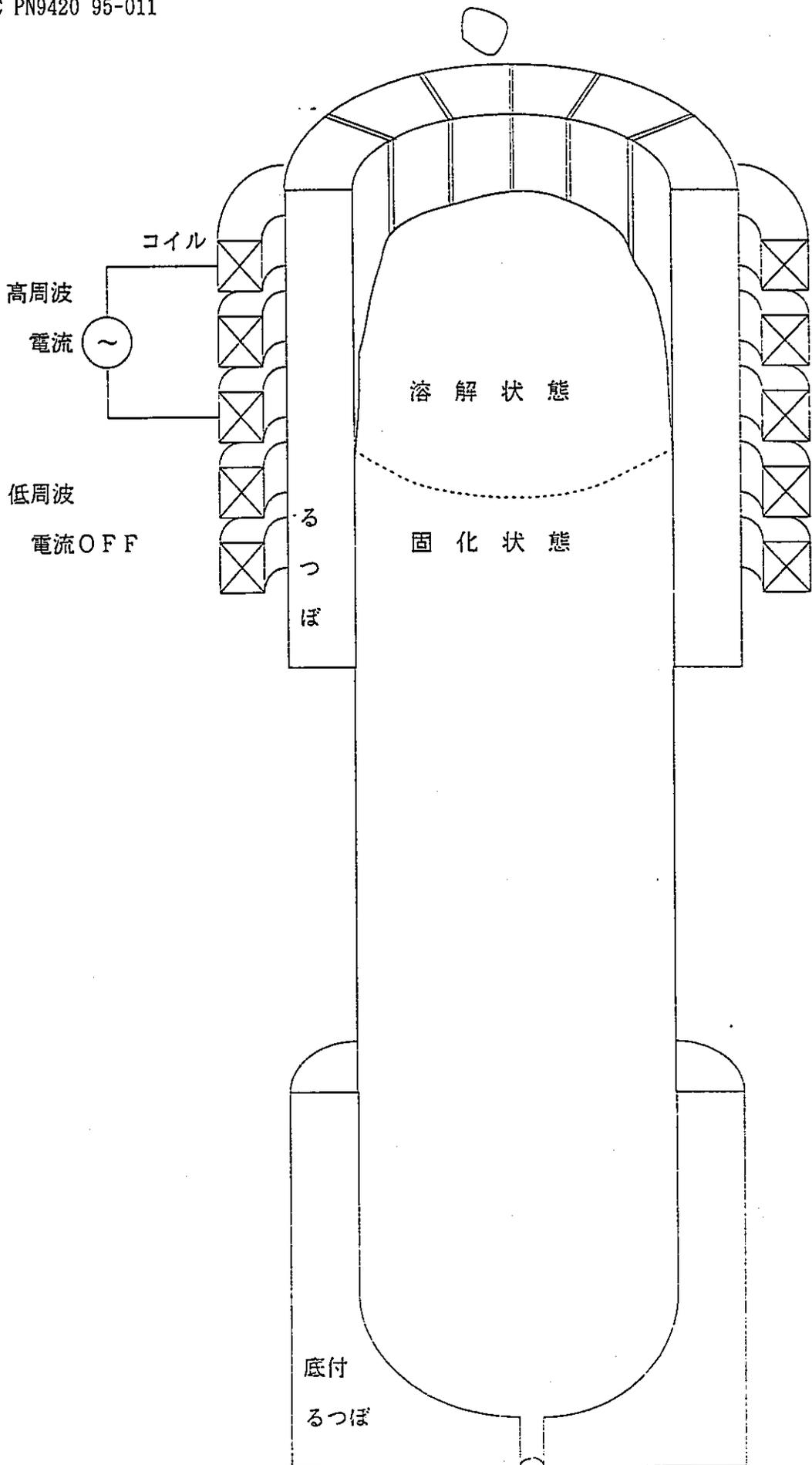
連続溶解概念図



種材溶解状態図







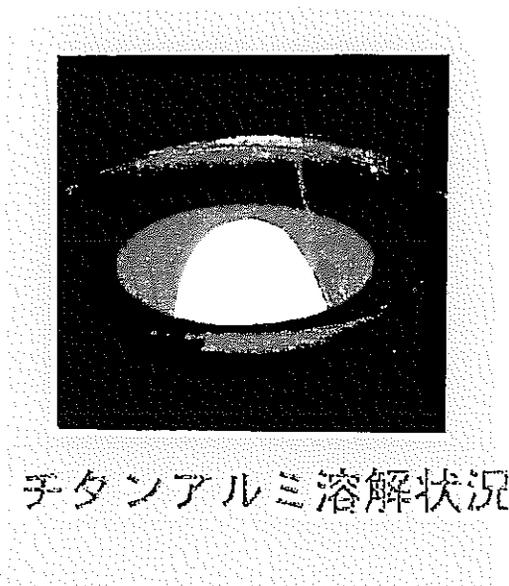
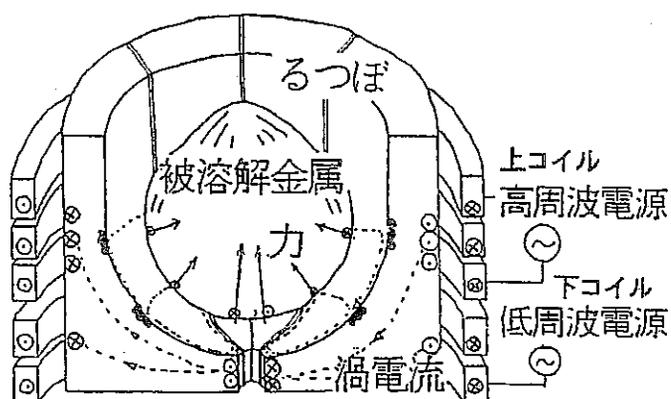
二重電源駆動方式による安定浮上溶解

目的

超高純度物質及び高融点材料を安定して溶解可能な浮上溶解装置を開発する。

原理・構成

2電源方式 → 安定溶解



チタンアルミ溶解状況

上コイル—高周波電源——安定力・加熱

下コイル—低周波電源——浮上力

電源仕様

(低周波数電源用)	3 ~ 10 kHz	100 kW
(高周波数電源用)	50 kHz	450 kW

特徴

完全浮上方式を採用⇒チタンアルミなどの高純度材料の溶解が可能。

上下コイルの作用を独自に制御⇒多種金属に幅広く対応可能。

件名 浮上溶解 TiAl インゴットの組成分析

1. 目的

開発中である浮上溶解製造装置を用いて、TiAl インゴットを作製した。この TiAl インゴットの組成均一性などをEPMAにて分析する。

2. 試料

浮上溶解にて製造した TiAl インゴット

3. 調査方法

生技研にて試料を切断し、表面をベルト研磨機で研磨したのち、バフ研磨にて鏡面仕上げを行ったものを、EPMA (電子プローブマイクロ分析) にて、定量分析を行った。

定量分析条件: 15kV, 0.5 μ A, 100 μ m (縦横10mm間隔で, 縦 7点, 横 5点, 計29点)

ZAF法による補正計算法

定量元素: Ti, Al, Mn (at%)

4. 調査結果

4.1) 断面マクロ組成分布

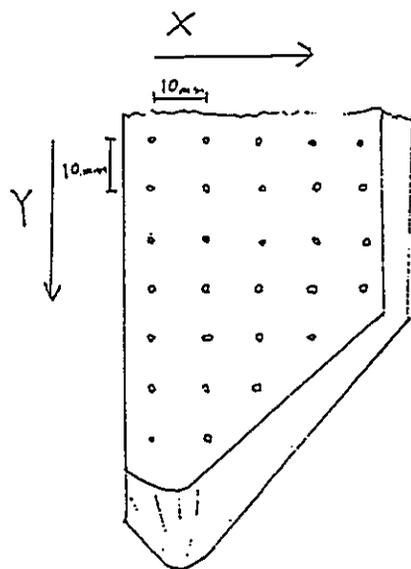
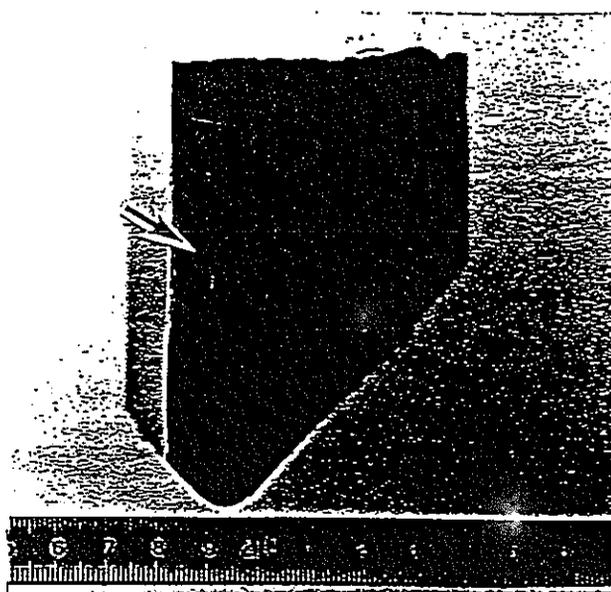
定性分析により, Ti, Al の他に不純物として少量の Mn を検出した。そこで, Ti, Al, Mn について断面のマクロ的な組成分布を調べた。図1 に29点の分析結果を示す。Ti を例にとると, 37.6 ~ 41.1at% の範囲でバラツキが認められる。

4.2) 断面のミクロ的組成分布

1) 図2 のa に示す組成像(平均原子番号に比例したコントラストを示す) より, 明るいスジ状の相が存在する。Ti, Al の分布からは, Ti, Al の濃度との対応は判別できない。しかし, コントラストの明瞭に異なっていることから, 相分離していることは明らかである。明るいスジ状の領域がTi₃Al 他は, TiAl 相の可能性がある。¹⁾

(参考文献)

1) 山口正治: CAMP-ISISJ Vol. 4 P727~(1991)



a) 断面研磨面写真
(矢印部 図2の形状観察位置)

b) a) のスケッチ
(○は定量分析位置)

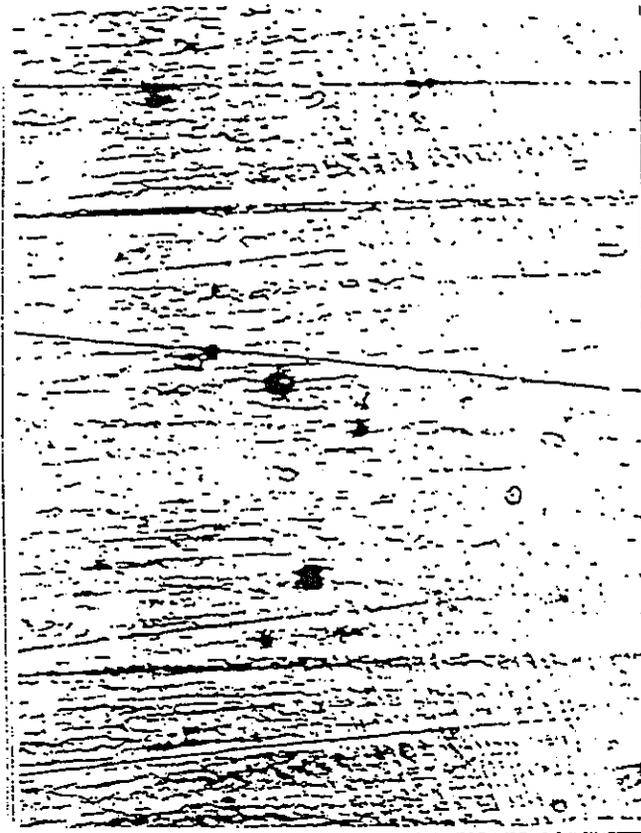
浮上溶解 TiAl 断面組成分布 (EPMA定量値wt%)

		Ti				
		5mm	15mm	25mm	35mm	45mm
Y	5mm	39.5	39.5	39.5	38.7	38.7
	15mm	38.4	38.0	39.6	39.5	39.7
	25mm	38.7	37.6	38.4	39.3	40.8
	35mm	38.6	39.7	39.3	40.2	41.1
	45mm	40.0	38.6	39.3	39.3	
	55mm	39.4	39.3	39.0		
	65mm	38.8	38.6			

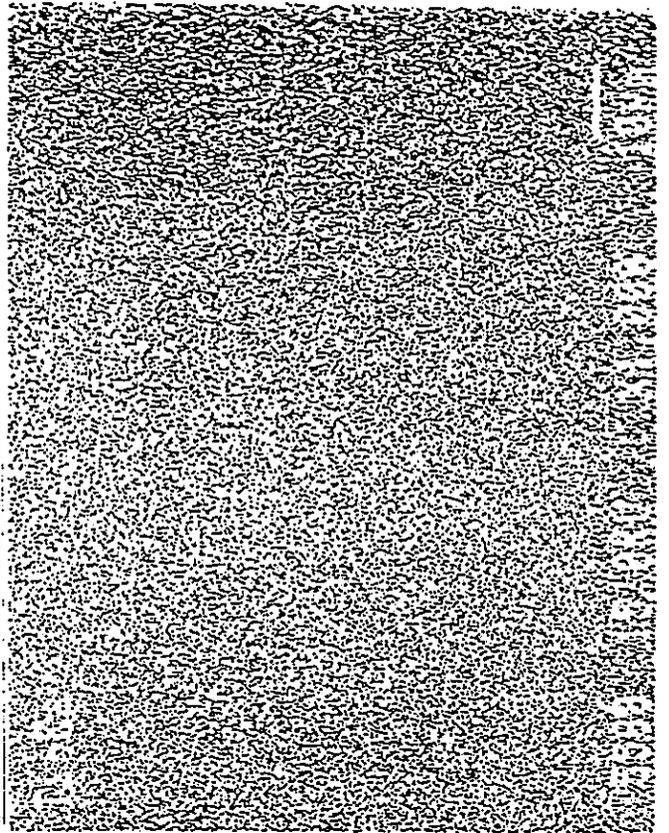
		Al				
		5mm	15mm	25mm	35mm	45mm
Y	5mm	59.9	59.9	59.9	60.6	60.7
	15mm	61.0	61.4	59.9	59.9	59.7
	25mm	60.6	61.4	60.8	60.0	58.7
	35mm	60.7	59.7	60.1	59.2	58.4
	45mm	59.5	60.7	60.2	60.1	
	55mm	60.1	60.2	60.4		
	65mm	60.6	60.8			

		Mn				
		5mm	15mm	25mm	35mm	45mm
Y	5mm	0.66	0.54	0.64	0.69	0.65
	15mm	0.60	0.61	0.45	0.59	0.57
	25mm	0.71	0.99	0.85	0.65	0.48
	35mm	0.69	0.62	0.65	0.60	0.41
	45mm	0.49	0.70	0.51	0.51	
	55mm	0.47	0.50	0.56		
	65mm	0.56	0.56			

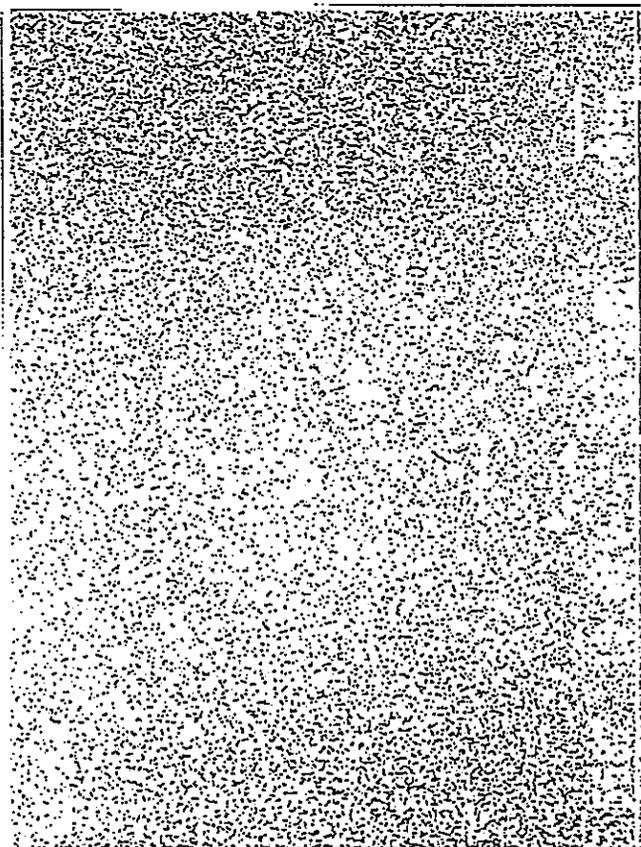
図1 浮上溶解 TiAl インゴット断面組成分布 (EPMA分析)



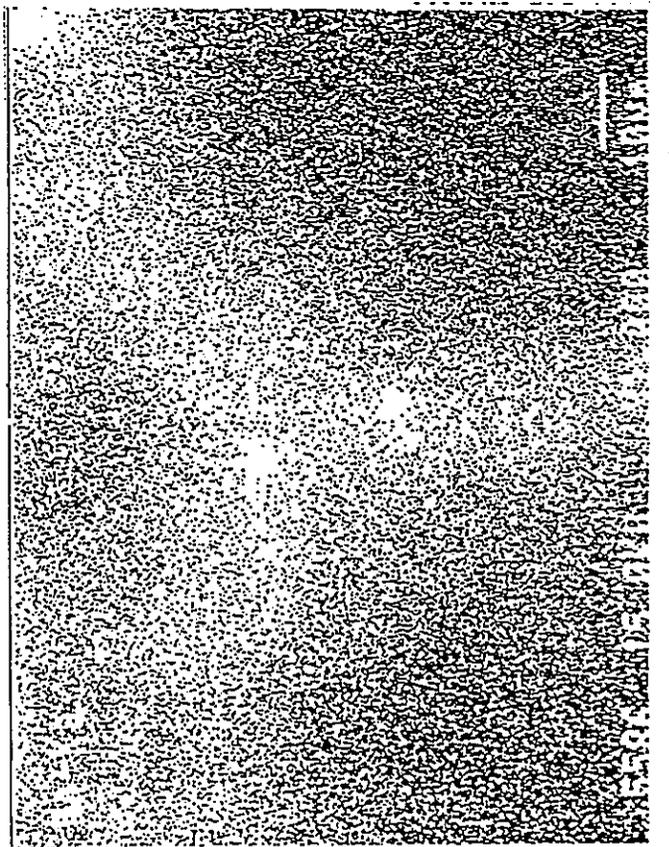
a) 組成像 ×1000



b) Tiの分布 ×1000



c) Alの分布 ×1000



d) Mnの分布 ×1000

図2 インゴット中央部の微少領域の組成分布

680 二重電源駆動方式浮上溶解

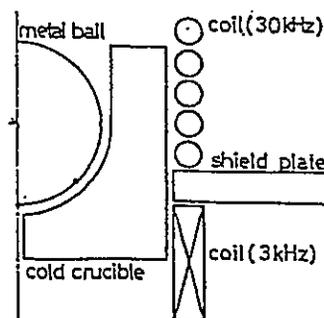
榎谷和之 渡辺敏昭 福澤章 山崎素央 藤田端 武遠男 森田公
 (金属材料技術研究所) (中部電力㈱) (富士電機総合研究所)

1. まえがき

浮上溶解装置は、うず電流の反発力を用い溶解金属を金属るつぼから浮上させ非接触で溶解できる装置で、TiAlなどの化学的に活性な材料を汚染することなく溶解できる特長を持つ。我々は浮上特性にすぐれる底が閉じた形状のるつぼを用いた装置の開発を進めている⁽¹⁾が、今回、安定した浮上溶解を実現する方式として浮上力と溶解電力の周波数依存性に着目し、励磁コイルとして上下2つのコイルを配備し、下は浮上特性がすぐれる低周波(数kHz)の上は安定性と溶解にすぐれる高周波(数十kHz)の電流を流す二重電源駆動方式を考案し、溶解実験を行い、良好な結果が得られたので報告する。

2. 溶解装置及び実験結果

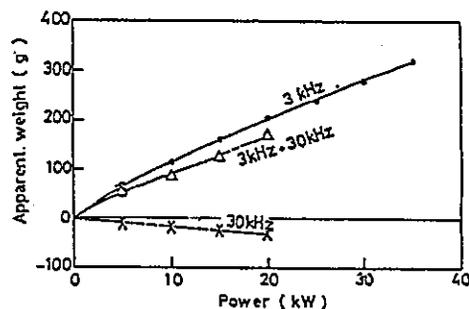
第1図に装置構成を示す。るつぼは24個の水冷銅セグメントで構成される。上コイルは5ターンで30kHzの電流を、下コイルには1ターンで3kHzの電流を流した。るつぼ内に銅球(52φ)を入れデジタル天秤で浮上力を測定した。結果を第2図に示す。浮上力は下のコイルで発生していること、及び浮上力はそれぞれの周波数での値の重畳が成立していることが明らかである。また溶解状態の安定性を評価するため、下コイルを3ターンにし、シールド板を取り去り、るつぼ内にCuAl合金310gを入れ、上コイルに30kHz、32kwを、下コイルに3kHz、3kwの電力を投入した。また、単一電源では3ターンコイルをとり去り、5ターンコイルを下側にセットし、30kHz、35kwの電力を投入した。溶解状態を第3図に示す。二電源方式の方が溶解形状がすぐれ、また溶解するまでの時間も二電源では一電源と比べ70%ですみ、二電源方式の方が昇温スピードがすぐれている。



第1図 装置構成図

3. まとめ

浮上溶解装置に二重電源駆動方式を採用することにより浮上力を下コイル(低周波電源)で発生し、加熱と安定を上コイル(高周波電源)で調整できることが可能となった。これにより溶解材料の材質・量が異なっても巾広く適用できることがわかった。



第2図 浮上力特性



(1) 二重電源駆動
(3kHz+30kHz)



(2) 単一電源駆動
(30kHz)

第3図 溶解状態

4. 参考文献

(1) 榎谷他「コールドフルーシブル内の固体金属球に働く浮揚力の実測と計算比較」電気学会研究会資料 No. SA-91-39, RM-91-P2, 1991

磁気浮上溶解の三次元渦電流解析

坪井 始 田中始男 美咲隆吉
(福山大学工学部)

武 達男 藤田 満
((株)富士電機総合研究所)

1. まえがき 渦電流解析は、有限要素法や境界要素法など実用的な手法によって行われているが、周波数が高い場合、透磁率が大きい場合など渦電流の浸透深さが解析領域と比べて相対的に小さくなると、要素分割数が増加し、計算規模が実用範囲を超えることになる。そこで、ここでは渦電流をカレントシートで近似し、電気ベクトルポテンシャルを未知変数とする微分・積分方程式法 (integro-differential method) によって磁気浮上溶解の渦電流解析を行った。

2. 微分・積分方程式法 渦電流の浸透深さが解析領域に比べて相対的に小さくなると、有限要素法では急激に変化する渦電流分布を近似するために細かい要素分割が必要であり、境界要素法では基本解の関数値の分布が電磁界の浸透深さ方向の分布と同じになるため境界要素の大きさを浸透深さと同程度にする必要がある。渦電流をカレントシートで近似する電気ベクトルポテンシャルを未知変数とする微分・積分方程式法ではこのような制限はなく、渦電流の導体表面での面分布を考え、電流分布が急激に変化する部分の要素分割を細かくすればよい。未知変数としては電気ベクトルポテンシャルの導体表面に垂直な成分 (法線成分) T を用い、次の支配方程式を解く(1)。

$$\frac{1}{\sigma} \nabla^2 T = \frac{j\omega\mu h}{4\pi} \iint_s \frac{\{\nabla \times (nT)\} \times r}{r^3} ds + j\omega B_s \quad (1)$$

ここで、 σ : 導電率、 h : 渦電流の浸透深さ、 n : 導体表面の単位法線ベクトル、 r : ソース点から計算点に向かうベクトル (r は r の大きさ)、 B_s : 外部ソースによる磁束密度。

また、求められた T から、渦電流密度 J 、損失 W 、導体表面に働く応力 f は次式で計算できる。

$$J = \nabla \times (nT) \quad (2)$$

$$W = \frac{h}{\sigma} \iint_s |\nabla \times (nT)|^2 ds \quad (3)$$

$$f = \{\nabla \times (nT)\} \times B \quad (4)$$

3. 計算例 磁気浮上溶解の三次元計算モデルを図1に示す(2)。るつぼは8つに分割され、溶融金属として球状の導体を仮定している。このときの表面要素分割を図2に示す。要素数は3,968であり、対称性を導入して1/16の領域で解析を行った。計算時間はEWS (SONY製NEWS NWS-3860: 20MIPS) を用いて約50分であった。図3に渦電流分布 (等ポテンシャル線) の計算結果を示す。

4. むすび 渦電流をカレントシートで近似し、電気ベクトルポテンシャルを未知変数とする微分・積分方程式法による磁気浮上溶解における高周波渦電流の解析を行った。今後、浮上力、損失などの計算値の妥当性の評価を行っていく予定である。

参考文献 (1) 坪井、須江、同末: ソース電流を考慮した両板導体のうず電流解析、電学論A、Vol.110、No.9、pp.591 (平2)
(2) 櫻谷他: コールドクルーシブル内の固体金属球に働く浮揚力の実測と計算比較、電気学会静止器・回転機合同研究会資料 SA-91-39、RM-91-102 (平2)。

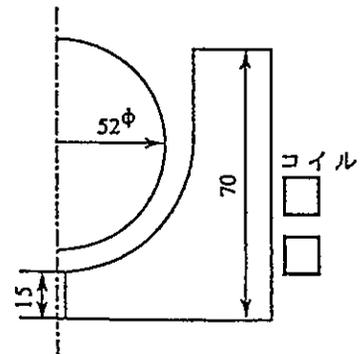


図1 計算モデル

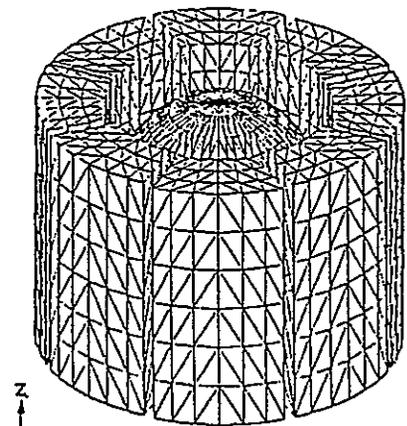
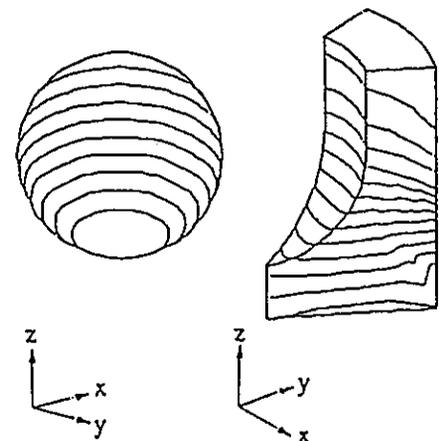


図2 要素分割



(a) 導体球 (b) るつぼ
図3 渦電流分布 (等ポテンシャル線)

Measurement of temperature in cold crucible

K. Sakuraya¹ T. Watanabe¹ A. Fukuzawa¹ M. Yamazaki² T. Take³ M. Fujita³ T. Morita³

¹ National Research Institute For Metals,
2-3-12 Nakameguro, Meguro-ku, Tokyo, 153, Japan

² Electrotechnology Applications R&D Center, Chubu Electric Power
Company Inc., 20-1 Sekiyama, Ohdaka cho, Midoriku, Nagoya, 459, Japan

³ Fuji Electric Corporate Research and Development Ltd.,
7 Yawatakaigandori, Ichihara, Chiba, 290, Japan

Abstract

A cold crucible is useful equipment for melting metal without contaminating it, because the molten metal is levitated in the crucible. In this paper, the temperatures on the surfaces of a crucible and molten metal were measured with thermo-labels and a thermo-tracer. We assume that the main eddy currents in a crucible flow from points near the coils to the hole in the bottom of the crucible. Eddy currents are induced in the molten metal at points corresponding to the slits between the segments comprising a crucible.

1. INTRODUCTION

In a cold crucible, a metal crucible is constructed of many segments, each one cooled internally with water. High frequency currents are made to flow through coils wrapped around the crucible. Eddy currents are induced in the crucible and the molten metal. Because repulsing forces are induced between the molten metal and the crucible or coils, the molten metal levitates. So, chemically reactive metal or alloy, for example, TiAl, can be melted without contamination.

The finite element method is widely used method of numerical analysis. But in a three-dimensional analysis, FEM needs many elements and variables. And induced eddy currents by high frequency currents must be considered. Therefore, this method of analysis has been used very little to investigate eddy current distribution in a cold crucible[1].

We conducted an experimental analysis to estimate eddy current distribution in a cold crucible. As the heat due to joule loss indicates eddy current distribution, we measured the temperature of the crucible and molten metal with a thermo-tracer and thermo-label.

2. TESTING CONDITION

Figure 1 shows the experimental apparatus, in which a crucible is closed except for a hole in the center of its bottom and high frequency currents flow in coils wrapped around the crucible. After the cooling water was drained out of the crucible, the power supply was turned on. With an infrared spectrometer, called a thermo-tracer, we measured the temperature distribution over the inside surface of the crucible. The surface of the metal after it completely melted was also measured. The conditions of measurement are shown in Table 1.

And the temperature distribution over a side plane of a crucible segment was measured with a thermo-label whose color changes from red to black at 70°C.

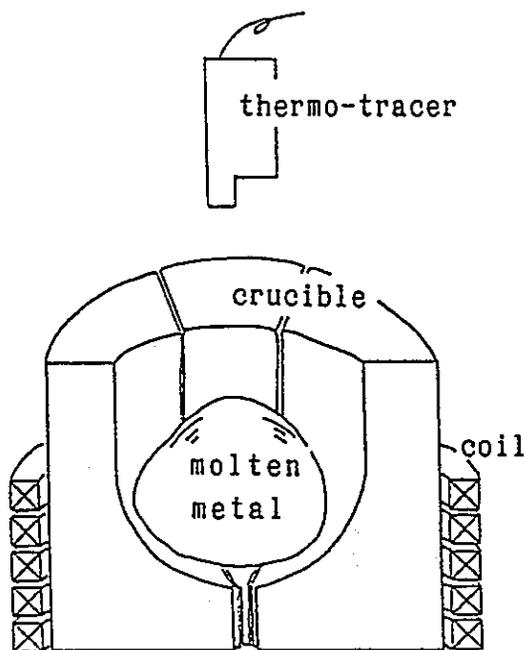


Fig.1 Experimental apparatus

Table 1 Condition of measurement

Crucible	copper inner diameter 60 ϕ outer diameter 96 ϕ
Coil	5 turns (8mm \square)
Frequency	25 kHz
Metal	CuAl 300g

3. TEST RESULTS

Figure 2(a) shows the temperature distribution over the inside of a crucible with 6 segments. The highest temperature region was near the hole in the bottom of the crucible. High temperature regions were also observed near the slits between crucible segments and on the straight, upper parts of segments. Low temperature regions were observed on the curved, lower parts of crucible segments. We found that the molten metal contacts with the crucible in these regions during the melting test, as shown in Figure 4. It was discovered that a crucible should have more segments for the better melting. Figure 2(b) shows the temperature distribution in a crucible with 24 segments. Low temperature regions became smaller in this case.

Figure 3 shows the temperature distribution over the surface of the molten metal and Figure 4 shows the melting condition in a crucible with 6 segments. The high temperature regions correspond to slits. The molten metal was pressed inward at these positions.

Figure 5 shows the temperature distribution over a side plane of a segment. The highest temperature region corresponds to the area between the coils and the hole in the bottom of the crucible. The straight, upper parts of crucible segments also comprise a high temperature region.

Referring to the above test results, we assume that the eddy current distribution in the cold crucible is shown in Figure 6. The main eddy currents in the segments flow from point A to B. The minor eddy currents flow in an inside in the segments. These minor currents prevent the molten metal from contacting the crucible. In the molten metal the eddy currents flow near the hole in the bottom of the crucible and the slits in the crucible.

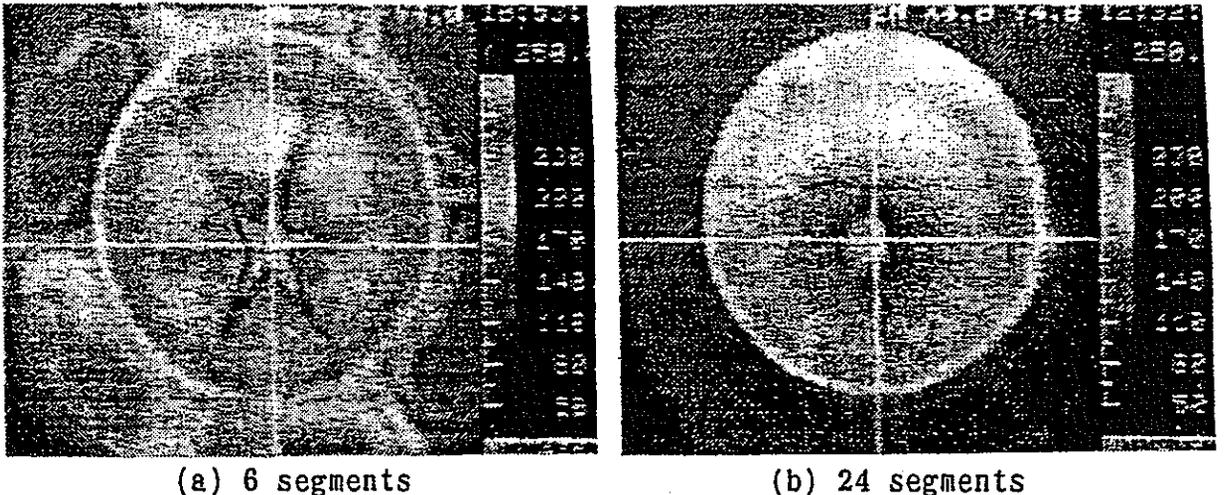


Fig.2 Temperature distribution over the inside of a crucible

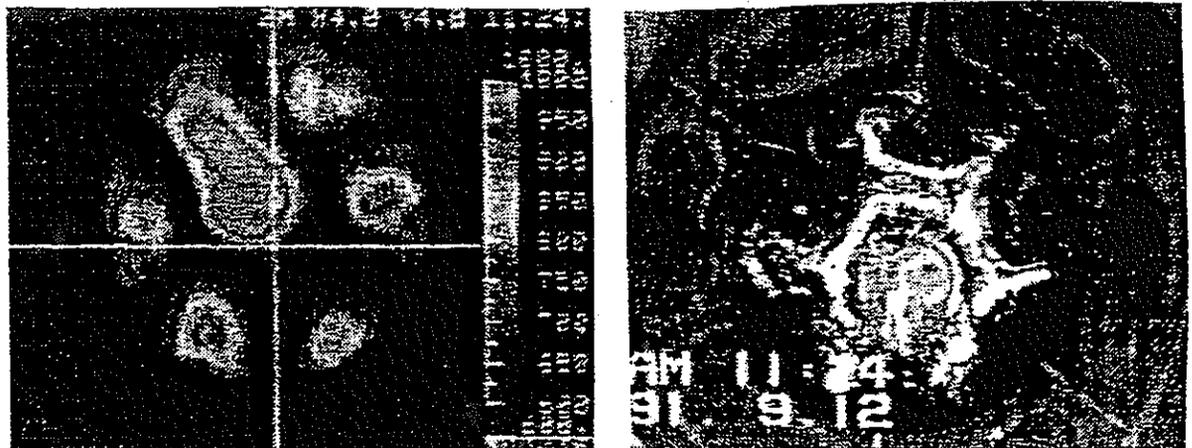


Fig.3 Temperature distribution over the surface of molten metal (6 segments)

Fig.4 Melting conditions (6 segments)

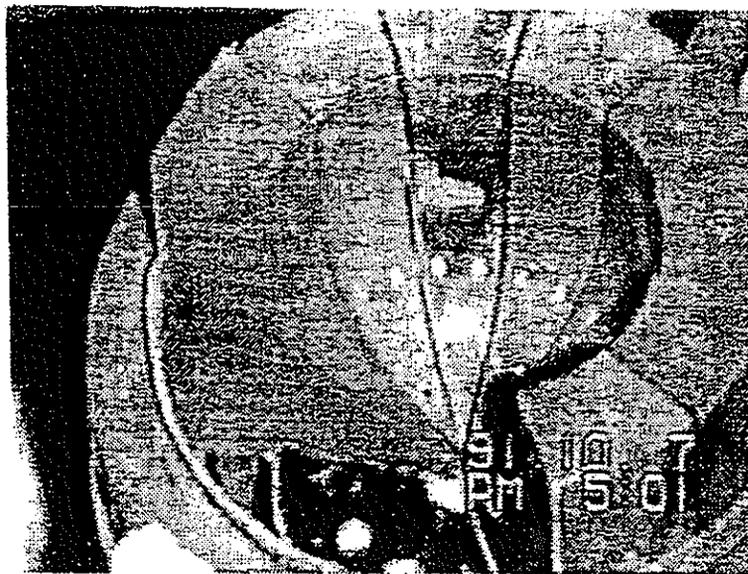


Fig.5 Temperature distribution over a side plane of a segment

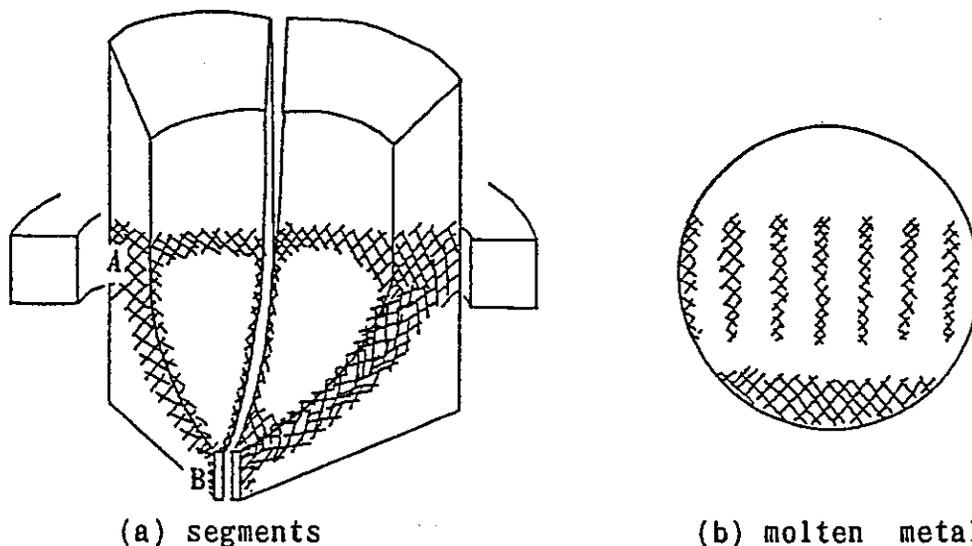


Fig.6 Eddy current distribution

4. CONCLUSION

Eddy current distributions in a cold crucible are predicted. Measuring the temperature was shown to be a useful technique for predicting such eddy current distributions. A thermo-tracer was shown to be useful for measuring the temperature distributions in a molten metal, and a thermo-label in a crucible segment for measuring the temperature distributions.

5. REFERENCE

- 1 Y. KAWASE, T. YAMAGUCHI, N. HAYASHI, IEE Japan, October, 1991, SA91-37, RM91-100