PNC TN8440 95−044

社内資料

本資料は　年　月　日付けで登録区分、
変更する。
2001. 6. 20
[技術情報室]

第１回高温溶融技術研究会
発表資料集

１９９５年１０月

動力炉・核燃料開発事業団
東　海　事　業　所

いては複
こう管理
い。

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)
2001

Ⓚ

社内資料
PNC TN8440 95－044
1995年10月

登録区分
2001. 6. 20
変更表示

第1回高温溶融技術研究会　発表資料集

実施責任者　大内　仁*、五十嵐　寛*
編集者　河村和廣*

要　旨

東海事業所及び大洗工学センターにおける高温溶融技術研究成果について議論する場として第1回高温溶融技術研究会を1995年10月6日に地層処分基盤研究施設4階大会議室で開催した。当日は東海事業所、大洗工学センター、人形峠事業所、本社から45名が参加し、高温溶融技術に関連した14件の研究成果の発表があった。本報告書は、研究会の発表要旨及びOHP資料をとりまとめたものである。

* 東海事業所　環境技術開発部　環境技術第一開発室

PNC PN8440 95－044

第1回高温溶融技術研究会研究会プログラム

日時、場所

平成７年10月6日（金）13：15 - 16：45
地層処分基盤研究施設　4階大会議室

プログラム

［＊］環境技術第一開発室

【第一セッション】　座長　大内　仁　13：15 - 14：35

〔1〕 高温溶融技術の内外の現状　［＊］河村和廣 …… 1
・LFCM／AVM／JCEM、CCIM、プラズマ溶融等
〔2〕 誘導加熱法によるガラス溶融試験（CCIM）　［＊］篠崎　貢 …… 13
・SiCによる起動、溶融
〔3〕 スラグの直接通電加熱溶融（ESR）　［環境施設部　処理第二課］ …… 23
・金属廃棄物溶融試験　坂場裕憲
（炭素鋼溶融とスラグ成分変化について）
〔4〕 焼却灰のマイクロ波加熱溶融　［環境施設部　処理第二課］ …… 33
（マイクロ波伝送特性、溶融時の整合特性等）　大内　優
〔5〕 雑固体廃棄物の高温焼却溶融　［大洗工学センター　環境技術課］…… 42
永瀬　睦

第一セッション質疑／討論

【第二セッション】　座長　五十嵐　寛　14：35 - 15：40

〔6〕 熱流動解析　［＊］吉田　勝 …… 54
・ガラス溶融炉内の電位、温度、流動を計算する
3次元熱流動解析コードFLOWMELを開発

〔7〕 高温融体物性評価　［＊］捧　賢一 …… 65
・熱流動解析に必要な物性（粘度、密度、熱伝導率、
比熱、比抵抗等）と測定法
・溶融ガラス中の酸素分圧測定
〔8〕 電鋳レンガの耐蝕性　［＊］正木敏夫 …… 80
・クロミア・アルミナ系レンガ材料の溶融ガラスへの
浸漬試験
〔9〕 電極用金属の耐蝕性　［＊］米澤重晃 …… 92

・溶融ガラス中の腐食メカニズム（Cr酸化物被膜）、
電流密度／腐食の関係
〔10〕 新電極材料開発 ［＊］ 正木敏夫 …… 100
・Ni、Cr系電極材料の通電腐食試験

第二セッション質疑／討論

【第三セッション】 座長 河村和廣 15：40 - 16：45

〔11〕 乾式再処理技術開発 ［再処理技術開発部 プラント設計開発室］ …… 113
・FBR燃料の溶融塩電解による乾式再処理の開発計画 小山智造
〔12〕 廃棄物溶融ガラスの直流電解試験 ［＊］ 花本行生 …… 124

〔13〕 塩化物スラグの酸化処理 ［＊］ 小林洋昭 …… 133
・溶融塩廃棄物をホウ酸と加熱処理し、酸化物へ転換
$6MCl + 2H_3BO_3 \rightarrow 3M_2O + B_2O_3 + 6HCl$ (M=K, Na, Li etc.)
〔14〕 ガラス固化の低レベル廃棄物への適用性 ［＊］ 捧 賢一 …… 141
・低レベル廃棄物組成、ガラス固化適用例

第三セッション質疑／討論

主な質疑応答

（1）コールドクルーシブル誘導溶融法によるガラス溶融試験

Q：起動源としてSiC棒を選定した理由は？

A：発熱効率及び消耗しガラスに混入しても問題ないという観点から選定した。

（2）金属廃棄物溶融試験

Q：高温で行えば、表面塗料を事前に除去する必要は無いのではないか？

A：タングステン電極を消耗させる酸化鉄（特に酸素が問題）及びアルミ（脱酸素剤）量を減らすために、高温で焼く以外の方法が有効である。

（3）溶融ガラス中の腐食メカニズム（Cr酸化物皮膜）、電流密度／腐食の関係

Q：電流密度とCrの移動との関係は？

A：直接データは無い。高電流密度条件での試料表面のCr濃度は薄くなっていた。

（4）乾式再処理技術開発

Q：溶融塩の配管移送は可能か？

A：溶融塩が途中で固まった場合を考えると、配管移送は難しいと考える。

Q：周辺機器を含めた経済性の検討は行っているか？

A：今後の研究テーマである。

（5）塩化物スラグの酸化処理

Q：ホウ酸によるスラグ処理時に発生する塩素の処理はどのように考えているのか？

A：今後の課題と考えている。

（6）今後の研究会の進め方（大内室長）

今回は第一回であり、各部署における技術開発状況の紹介が中心であったが、高温溶融技術を共通に議論し、情報交換できる場として有意義な研究会であった。次回からは分野、目的をしぼって議論する場としていく予定である。

出席者一覧

事業所	部課室		氏名
東海	再処理技術開発部		松本忠邦
〃	〃	プラント設計開発室	五十嵐幸
〃	〃	〃	天本一平
〃	〃	〃	小山智造
〃	〃	機器材料開発室	武田誠一郎
〃	環境施設部	処理第二課	大内　優
〃	〃	〃	坂場裕憲
〃	〃	〃	福田　修
〃	核燃料技術開発部	先端技術開発室	小杉一正
〃	技術開発推進部	研究開発調整室	菖蒲康夫
〃	〃	アクチニドリサイクルグループ	遠藤秀男
〃	環境技術開発部	環境技術第一開発室	大内　仁
〃	〃	〃	五十嵐寛
〃	〃	〃	河村和廣
〃	〃	〃	小林洋昭
〃	〃	〃	鈴木　猛
〃	〃	〃	正木敏夫
〃	〃	〃	山下照雄
〃	〃	〃	米澤重晃
〃	〃	〃	捧　賢一
〃	〃	〃	花本行生
〃	〃	〃	吉田　勝
〃	〃	〃	石田　登
〃	〃	〃	二村浩尓
〃	〃	〃	下田良幸
〃	〃	〃	関　克巳
〃	〃	〃	小林博美
〃	〃	〃	塙　秀之
〃	〃	〃	篠崎　貢
〃	〃	〃	永井　勲
〃	〃	〃	畠山清司

事業所	部課室		氏名
東海	環境技術開発部	環境技術第一開発室	浅野博之
〃	〃	〃	三林健次郎
〃	〃	〃	四倉浩司
〃	〃	〃	矢ノ倉淳一
〃	〃	〃	川又宏之
〃	〃	環境技術第二開発室	福本雅弘
〃	〃	〃	林晋一郎
〃	〃	〃	飯島和毅
〃	〃	〃	神谷　茂
〃	〃	〃	土橋雅彦
大洗	管理部	環境技術課	宮崎　仁
〃	〃	〃	永瀬　睦
人形	環境資源開発部	環境資源開発課	佐藤和彦
本社	環境技術開発推進本部	処理貯蔵研究グループ	小室敏也

発表資料

〔1〕　高温溶融技術の内外の現状
〔2〕　コールドクルーシブル誘導溶融法によるガラス溶融試験
〔3〕　金属廃棄物溶融試験（炭素鋼溶融とスラグ成分の変化について）
〔4〕　焼却灰のマイクロ波加熱溶融
〔5〕　雑固体廃棄物の高温焼却溶融技術
〔6〕　ガラス溶融炉熱流動解析コードの開発
〔7〕　高温融体物性評価
〔8〕　電鋳レンガの耐食性
〔9〕　溶融ガラス中の腐食メカニズム（Cr酸化物皮膜）、
　　電流密度／腐食の関係
〔10〕　新電極材料開発
〔11〕　乾式再処理技術開発
〔12〕　溶融廃棄物ガラスの直流電解試験
〔13〕　塩化物スラグの酸化処理
〔14〕　ガラス固化の低レベル廃棄物への適用性

〔1〕高温溶融技術の内外の現状

高温溶融技術研究会

平成７年１０月６日

発表テーマ	高温溶融技術の内外の現状		
発表者所属	環境技術開発部 環境技術第一開発室	発表者氏名	河村和廣

発表要旨

高レベル廃棄物処理技術開発として動燃が開発を進めてきたガラス溶融技術を中心に高温溶融技術の内外の現状を紹介する。

【動燃のガラス溶融技術開発】

ガラス溶融法としては、直接通電セラミックメルタ（LFCM）、高周波加熱セラミックメルタ、ポットメルタの試験を実施し、試験結果およびガラス産業界の実績、スケールアップの融通性、海外の動向などを参考にして直接通電セラミックメルタを選定した。昭和52年度には初めて直接通電セラミックメルタを設計・製作し（Aメルタ）、メルタの開発が始まった。これ以降Bメルタ、Cメルタ、改造Bメルタ、モックアップ１、２、３号メルタを製作、試験し、ガラス溶融工程に関わる要素技術、メルタ構造、運転技術の開発を進めた。ガラス流下方式および炉床形状については、オーバーフロー方式、ボトムフロー方式の試験結果をもとに、ガラス中に析出する白金族元素析出物を容易に流下できるボトムフロー方式および炉床勾配を30～60°つける構造を採用した。メルタ起動時の加熱方式については、炭化珪素発熱体方式、マイクロ波加熱方式を試験し、配置設計上裕度のある炭化珪素発熱体方式を選定した。ガラス流下方式としてはフリーズバルブ法でノズルを直接通電加熱する方法、高周波加熱する方法を比較検討し、後者を選定した。電極材料としては、ニッケル、クロム系合金、金属モリブデンなどを比較評価し、耐食性、耐酸化性が優れるニッケル、クロム系合金（インコネル690）を採用した。また溶融ガラスと接する耐火物材料については、耐食性などの特性が優れるクロム系電鋳耐火物（モノフラックスK-3）を採用した。

昭和63年頃から固化処理技術の高度化に向けた技術開発に着手した。

直接通電セラミックメルタより交換所要時間が短く、解体廃棄物量が格段に少ない、また原理的に運転に対する白金族元素の影響を受けにくい円筒電極直接通電メルタ（JCEM）を開発した。平成1年に小型試験装置を5年に工学試験装置を製作、試験し、廃棄物固化用メルタとしての成立性を評価した。コールドクルーシブル誘導溶融法（CCIM）は、従来型メルタより高温で多様な物質を溶融でき、長寿命化により二次廃棄物の低減化が可能であるため、平成2年に開発を始めた。3年には小型試験装置を製作し、金属及びガラスの溶融特性を試験し、各種廃棄物への適用性を評価した。

メルタ開発設計の効率化及び運転支援のため、熱流動解析コードの開発を昭和56年から進めている。昭和62年からは、ガラス固化技術開発情報を保管する廃棄物研究開発データベースの開発に着手し、平成2年に基本システムを完成し、運用している。平成7年には、熱流動解析コードを中心にして、廃棄物研究開発データベースを含めた溶融炉設計支援システムの設計に着手した。

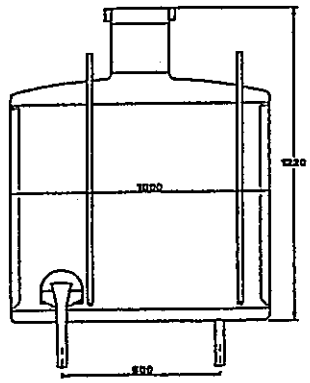
【ガラス溶融技術の比較】

現在、実廃液処理で実績をあげているのは、LFCM方式とAVH方式である。LFCM方式は日、米、独／ベルギー／中、露で採用され、大型化が容易で寿命が長い。一方、AVH方式は仏、英で採用され、メルタ解体廃棄物発生量が少ない。表－１にJCEM、CCIMとともに溶融方式を比較する。メルタ解体廃棄物発生量の低減、低レベル廃液等多様な対象廃棄物への適用、高温処理（高耐久性固化体、高廃棄物含有率化）等の目的でCCIM、プラズマ炉を仏、露等で、撹拌型メルタを米で開発している。

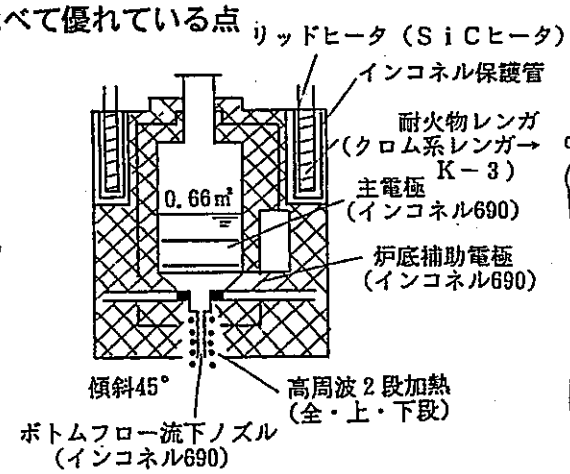
表－1　溶融方式の比較

溶融方式	AVH	LFCM	CCIM	JCEM
●加熱方式	外部加熱（中周波誘導）	内部加熱（直接通電）	内部加熱（高周波誘導）	内部加熱（直接通電）
●廃棄物供給方式	仮焼体	液体	仮焼体／液体	液体
●炉壁材料	金属	セラミック	金属	金属
●処理能力上限	上限有（～35kg／h）	原理的に無制限	電源により上限有	原理的に無制限
●単位溶融表面積当りの処理能力	小	中	不明	大
●解体後の廃棄物発生量	8g／kgガラス	80-90g／kgガラス	AVHより小	AVH と同程度
●寿命	短(2000h)	長（5年）	長	長
●交換に要する期間	短	長	短	短
●白金族元素の影響	有	有	有	無

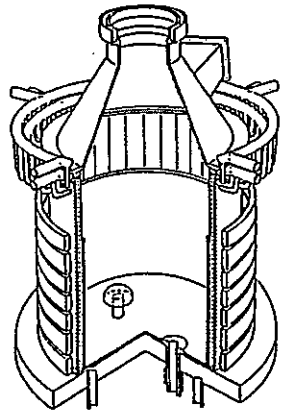
□：他方式と比べて優れている点



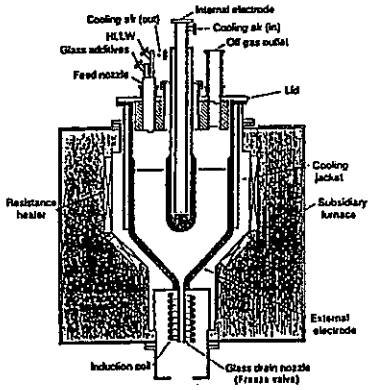
AVH
（仏国）



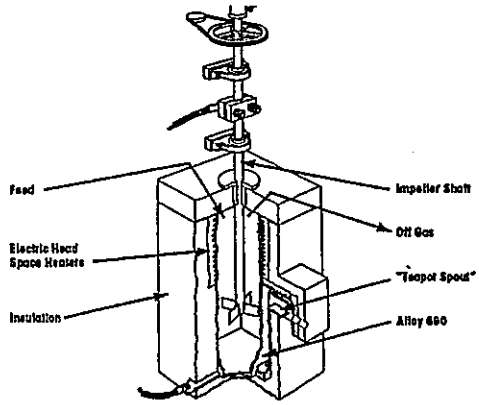
LFCM
（日本TVF）



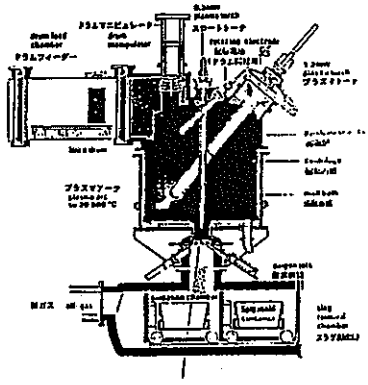
CCIM
（仏国）



JCEM
（日本）



攪拌型メルタ
（米国）



プラズマ炉
（スイス）

高温溶融技術の内外の現状

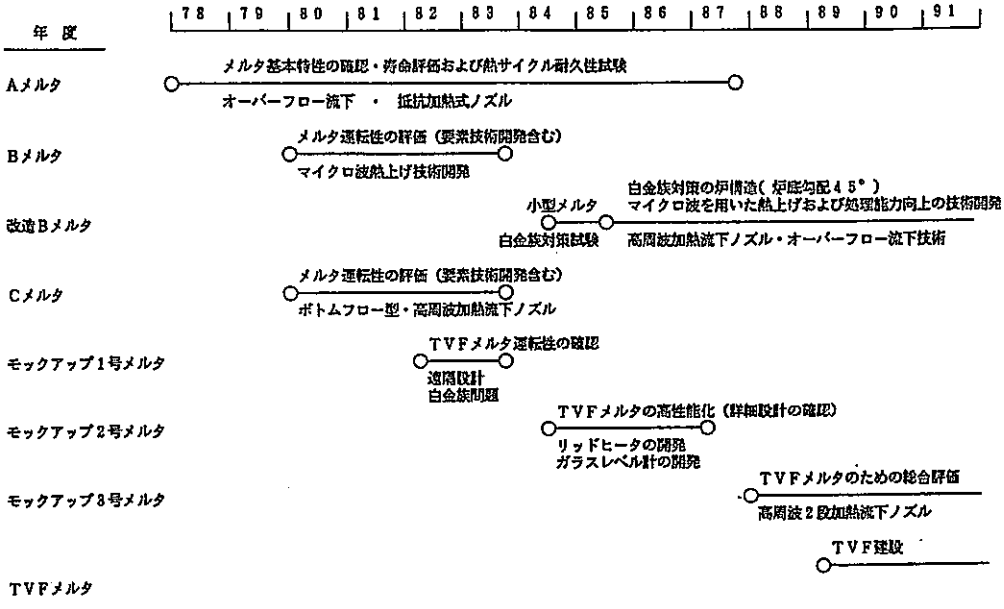
平成7年10月6日
高温溶融技術研究会

河村和廣
環境技術開発部　環境技術第一開発室

高温溶融技術の内外の現状

1.動燃のガラス溶融技術開発
2.溶融技術への要求性能
3.溶融対象
4.加熱方式
5.ガラス溶融技術の比較

1.動燃のガラス溶融技術開発



図－1 メルタの開発経過

2.溶融技術への要求性能

●処理能力	プラント規模
●処理温度	多様な対象廃棄物（金属、ガラス、セラミクス等）／高耐久性固化体、高廃棄物含有率化、炉寿命／解体廃棄物量削減
●経済性	設備費、運転費、解体・処分費
●安全性	閉じ込め性／漏洩

3.溶融対象

●一般廃棄物
　　可燃物、不燃物（焼却灰、金属）

●放射性廃棄物
・高レベル廃棄物
　ガラス、セラミクス（ホウケイ酸ガラス、シンロック等）
・中、低レベル廃棄物
　金属（ステンレス、ジルカロイ等）
　ガラス、セラミクス（Na廃液、焼却灰等）

4.加熱方式

化学反応エネルギー利用
●燃焼　　LPG、灯油等

電磁気エネルギー利用
●抵抗加熱　　内部加熱（直接通電）
　　外部加熱
●誘導加熱　　内部加熱
　　外部加熱
●マイクロ波加熱
●アーク加熱
●プラズマ加熱
●電子ビーム加熱

5.ガラス溶融技術の比較

表－1　溶融方式の比較

溶融方式	AVH	LFCM	CCIM	JCEM
●加熱方式	外部加熱（中周波誘導）	内部加熱（直接通電）	内部加熱（高周波誘導）	内部加熱（直接通電）
●廃棄物供給方式	仮焼体	液体	仮焼体／液体	液体
●炉壁材料	金属	セラミック	金属	金属
●処理能力上限	上限有（～35kg／h）	原理的に無制限	電源により上限有	原理的に無制限
●単位溶融表面積当りの処理能力	小	中	不明	大
●解体後の廃棄物発生量	8g／kgガラス	80-90g／kgガラス	AVHより小	AVH と同程度
●寿命	短(2000h)	長（5年）	長	長
●交換に要する期間	短	長	短	短
●白金族元素の影響	有	有	有	無

□：他方式と比べて優れている点

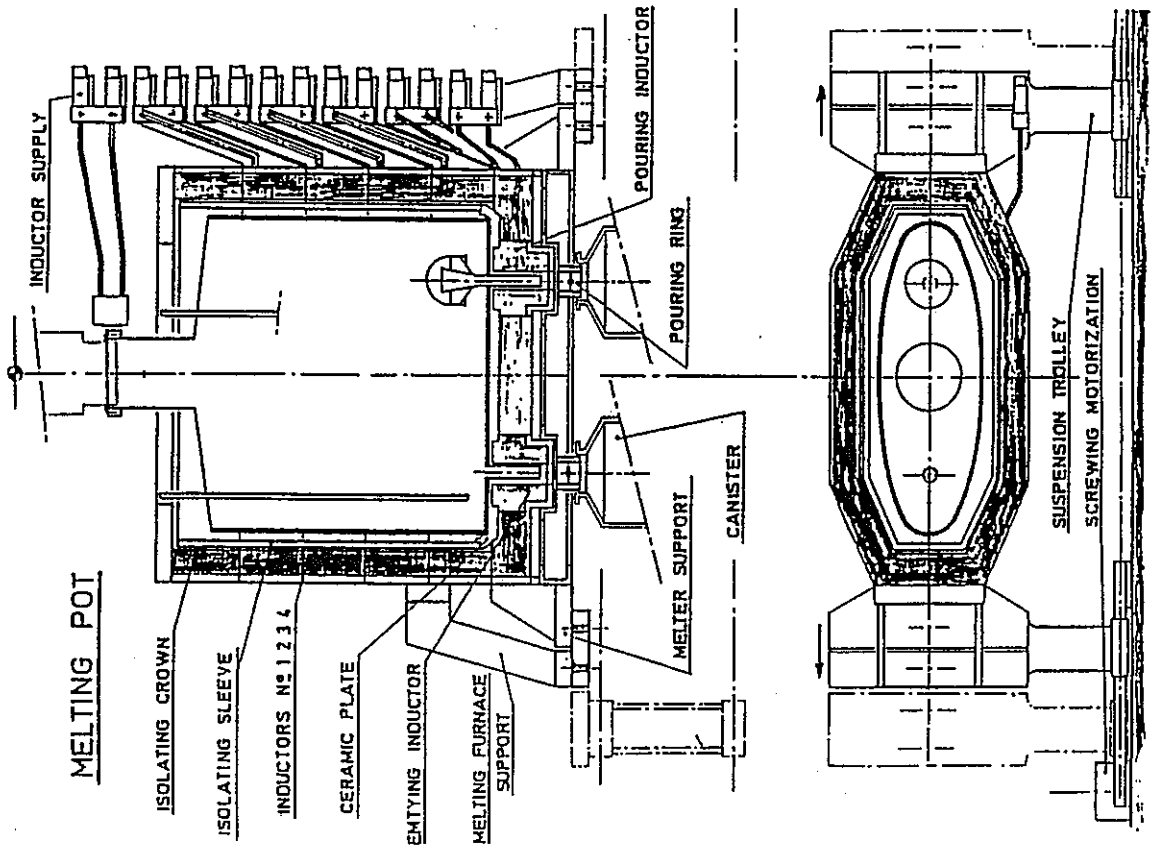
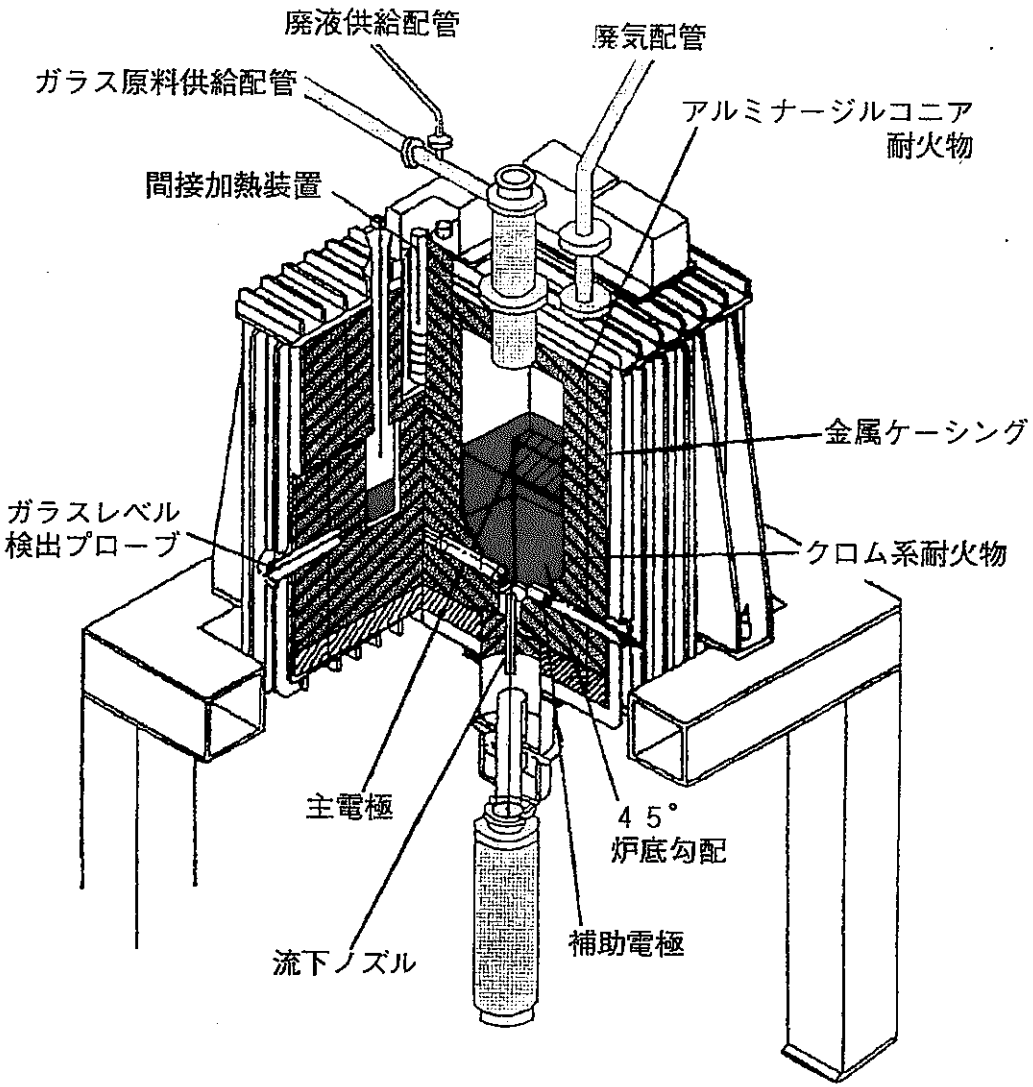


Fig. 2. AVH type melter.



ガラス溶融炉の構造

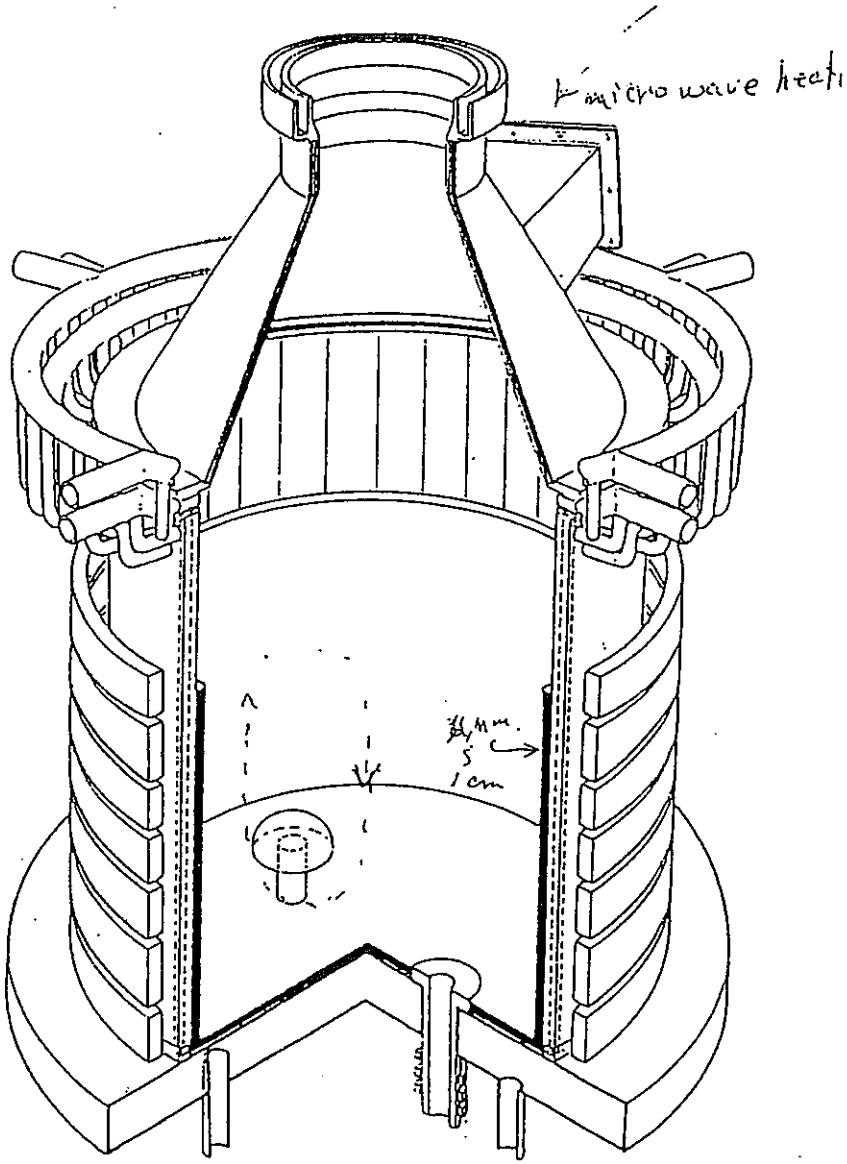
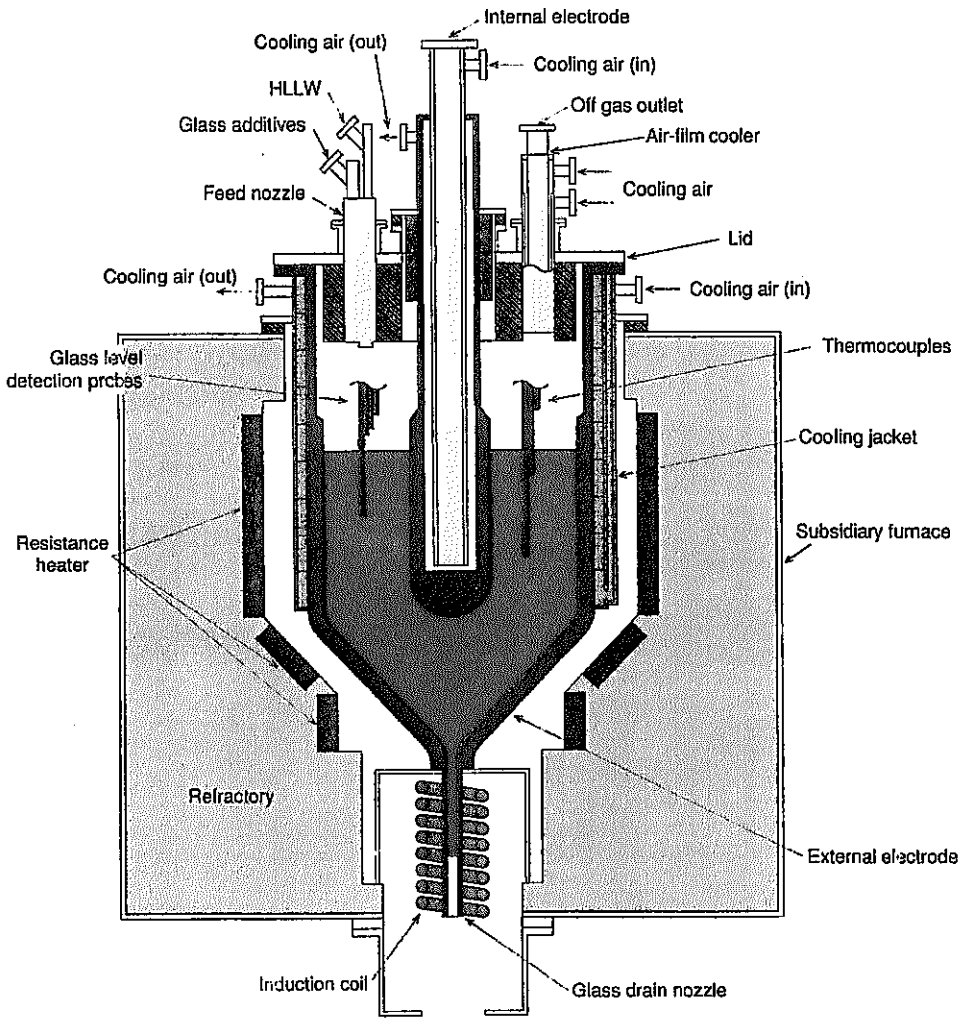
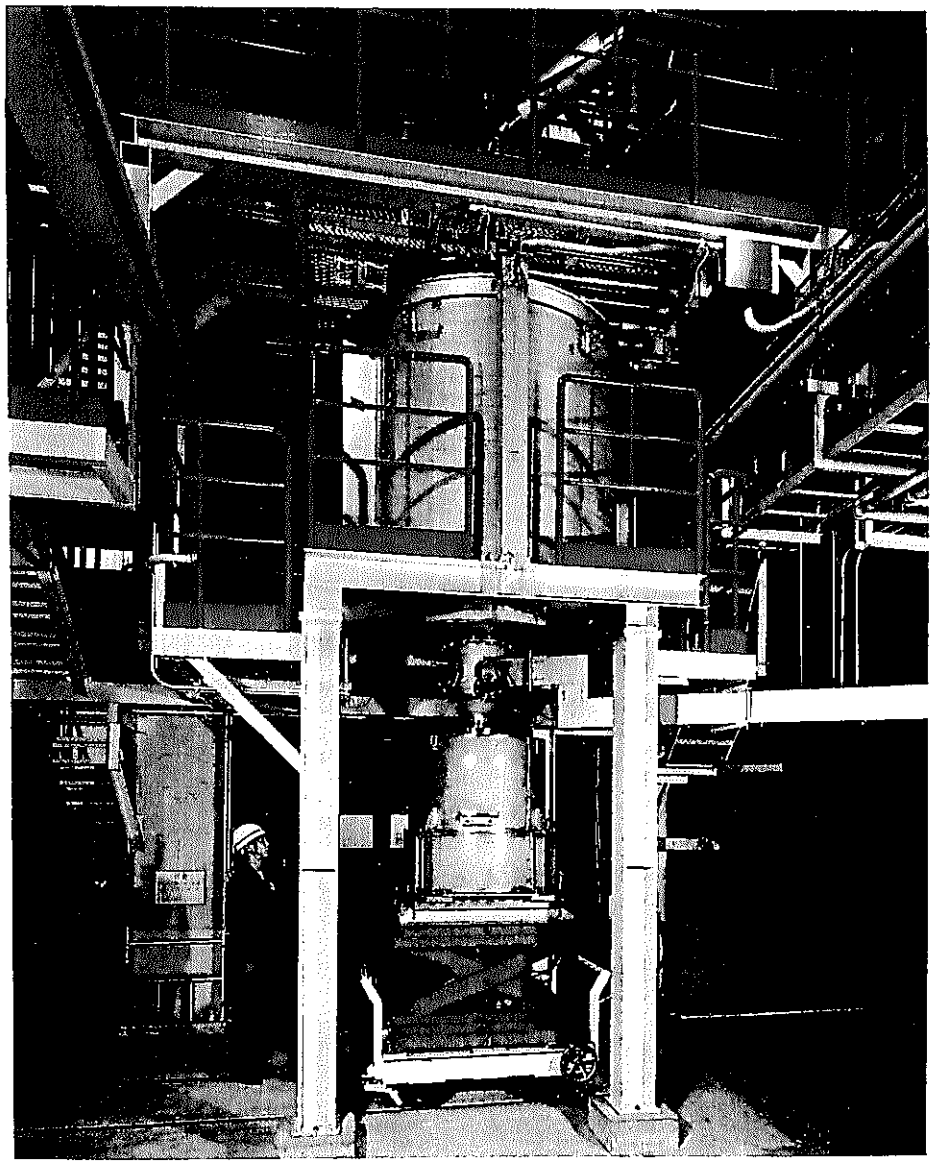


FIG 3 : Cold crucible furnace



Joule-Heated Cylindrical Electrode Melter (JCEM)



廃棄物溶融方式

●AVH（仏、英）
　　誘導加熱／金属製炉
●LFCM（日、米、独／ベルギー／中、露）
　　抵抗加熱（直接通電）／セラミック製炉

●CCIM（仏、露）
　　誘導加熱／炉体冷却金属製炉
●JCEM（日）
　　抵抗加熱（直接通電）／円筒電極金属製炉
●撹拌型メルタ（米）
　　抵抗加熱（直接通電）／撹拌付金属製炉
●プラズマ炉（仏*、露、スイス）

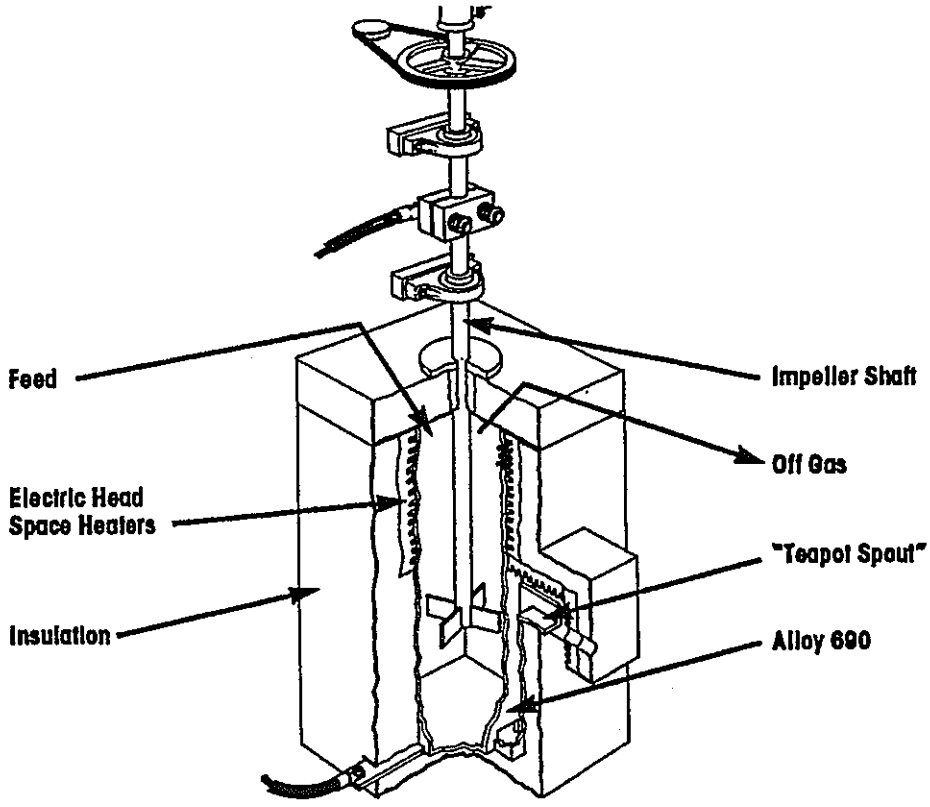


Figure 1. Section drawing of the F 1 Stir-Melter unit.

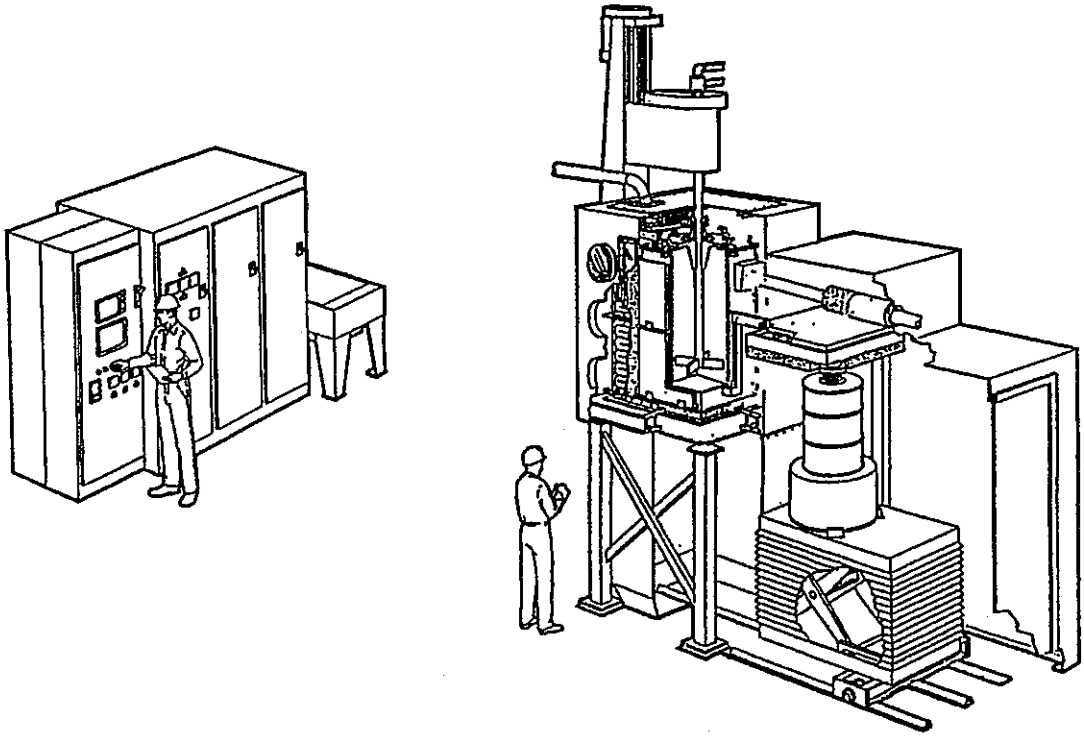
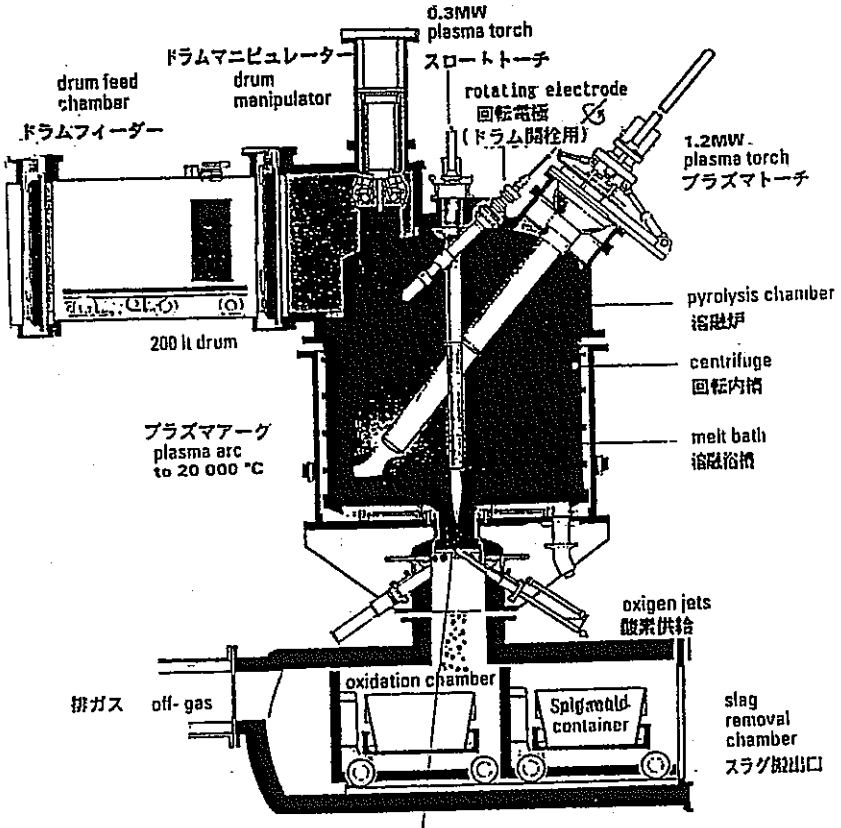


Figure 6. The WV 9 Stir-Melter with the optional containment enclosure.

概略仕様

- 処理対象廃棄物　：有害化学物質、汚染土壌、医療廃棄物
- 装置タイプ　：ＰＣＦ－８
- プラズマアーク発生電極：銅電極　1,200KW（DC,600V）
- プラズマアーク温度　：約20,000℃
- 溶湯温度　：約1,600℃
- 回転炉床内径　：約２．４ｍ
- 炉高さ　：約　３　ｍ
- 処理能力　：約１Ｔ／Ｈ
  （200リットルドラム缶４～５缶/H）



回転を止めて流下
直径 40ppm

MGC-PLASMA社はスイスのHoser-Glaser&Co.Ltd.,と化学・薬品会社Sandozグループによって1989年に設立された会社

〔2〕コールドクルーシブル誘導溶融法によるガラス溶融試験

高温溶融技術研究会

平成７年１０月６日

発表テーマ	コールドクルーシブル誘導溶融法によるガラス溶融試験		
発表者所属	環境技術開発部　ＨＴＳ	発表者氏名	篠崎　貢

発表要旨

1. 目的

コールドクルーシブル誘導溶融法は、浮上溶融あるいは接触する部分に未溶融の固体（スカル）を形成することにより、溶融物を炉体に接触させずに溶融できるため、高融点の物質を溶融できることに加え、溶融物による炉体の侵食が少ないという特色を持っている。また、溶融炉の長寿命化および処理能力の向上が期待できる。

本報告では、ガラス溶融適用の確認を目的としたガラス溶融基礎試験結果について報告する。

2. 試験方法

基礎試験装置の概要を図－１に示す。高周波電源は真空管発振方式で周波数は4MHz, 最大出力は50kWである。コールドクルーシブルは銅製で、内径が100mm, 深さが150mm, そして10個のセグメントに分割されている。コイルは外径が170mm で７ターンである。

熱上げ試験では、誘導加熱される SiC棒を起動源として熱上げを行い、 SiC棒を引き抜いた後でも誘導加熱を継続できるために必要な電力を調べた。

溶融試験では、溶融ガラスとクルーシブルの間に残るスカルと呼ばれる未溶融固体層の厚さに対して、ガラス溶融温度およびクルーシブル冷却水流量の影響を把握した。

3. 試験結果

熱上げ条件に関する結果を図－２に示す。

起動源を引き抜いた後でも誘導加熱を継続できる条件として、陽極電圧8.0kV において陽極電流値は4.5A以上が必要であることを確認した。

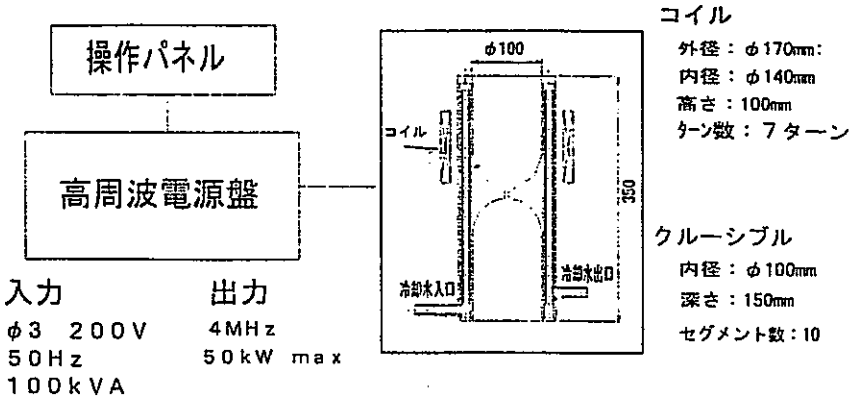
溶融試験で得られたスカル厚みの測定結果について図－３に示す。

スカル厚さは温度が高い程薄くなる傾向を示した。コールドクルーシブル冷却水流量の影響については、溶融ガラス温度が1200℃の側壁面では、流量が増加するとともにスカル厚さも増加する傾向を示したが、その他の溶融温度では冷却水流量の有意な影響は認められなかった。また、1600℃までの溶融温度でスカルは全周にわたって形成されたことを確認した。

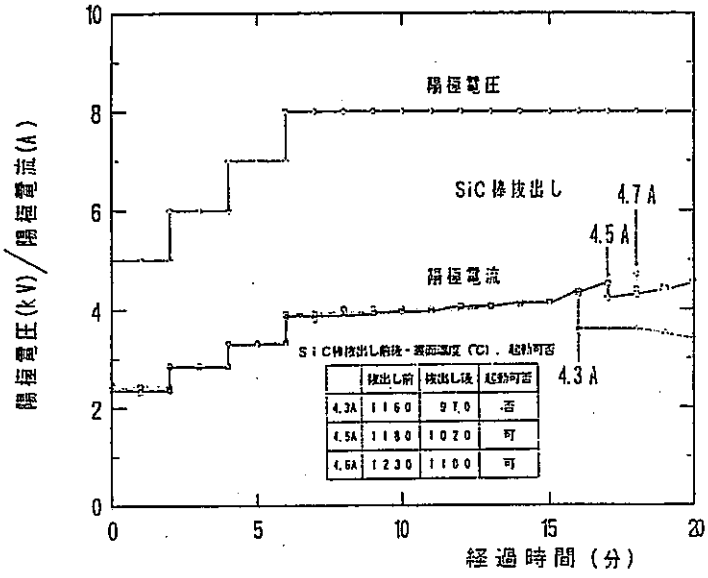
4. まとめ

コールドクルーシブル誘導溶融法を用いて、 SiC棒を起動源として熱上げが可能であったこと。また、従来の方法よりも高温である1600℃においてもスカルが形成され、クルーシブルが溶融ガラスにより侵食されることなかった。

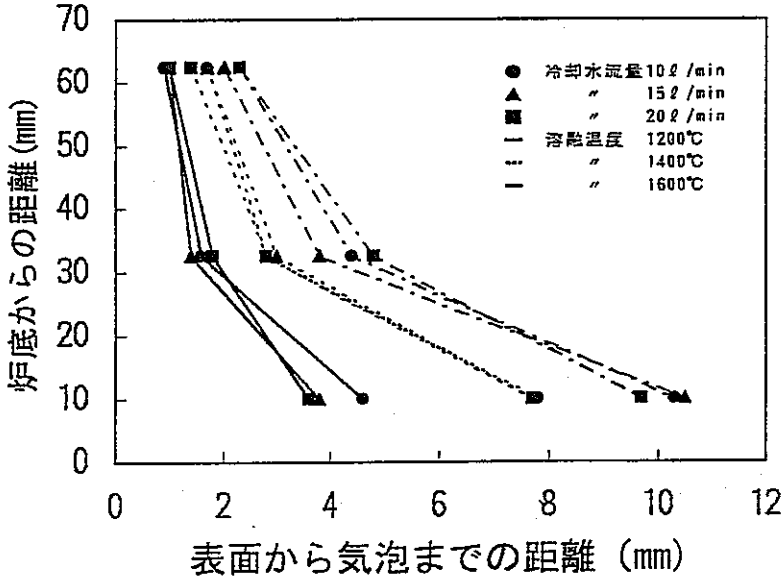
これら結果より、本溶融法がガラス溶融に適用できる見通しが得られた。



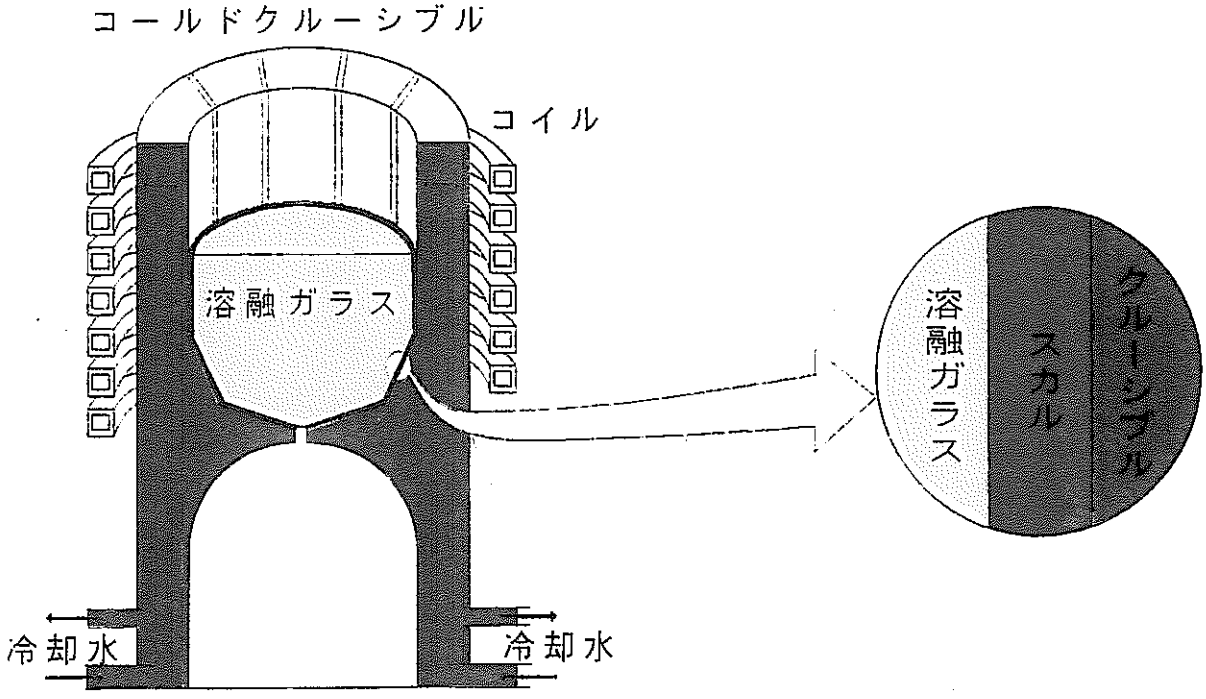
図－1　装置概要



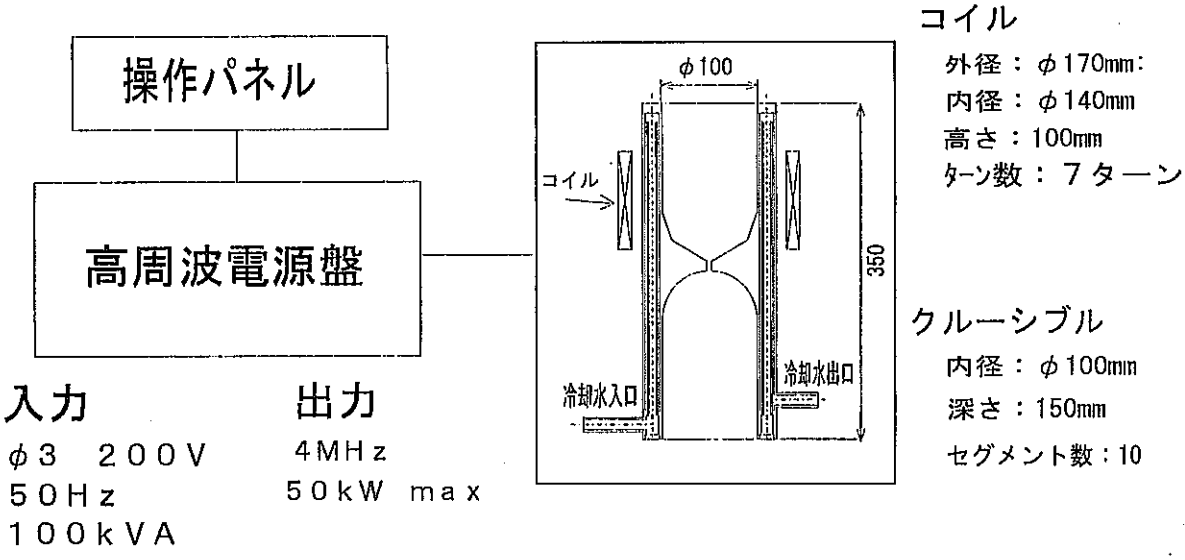
図－2　熱上げ試験結果



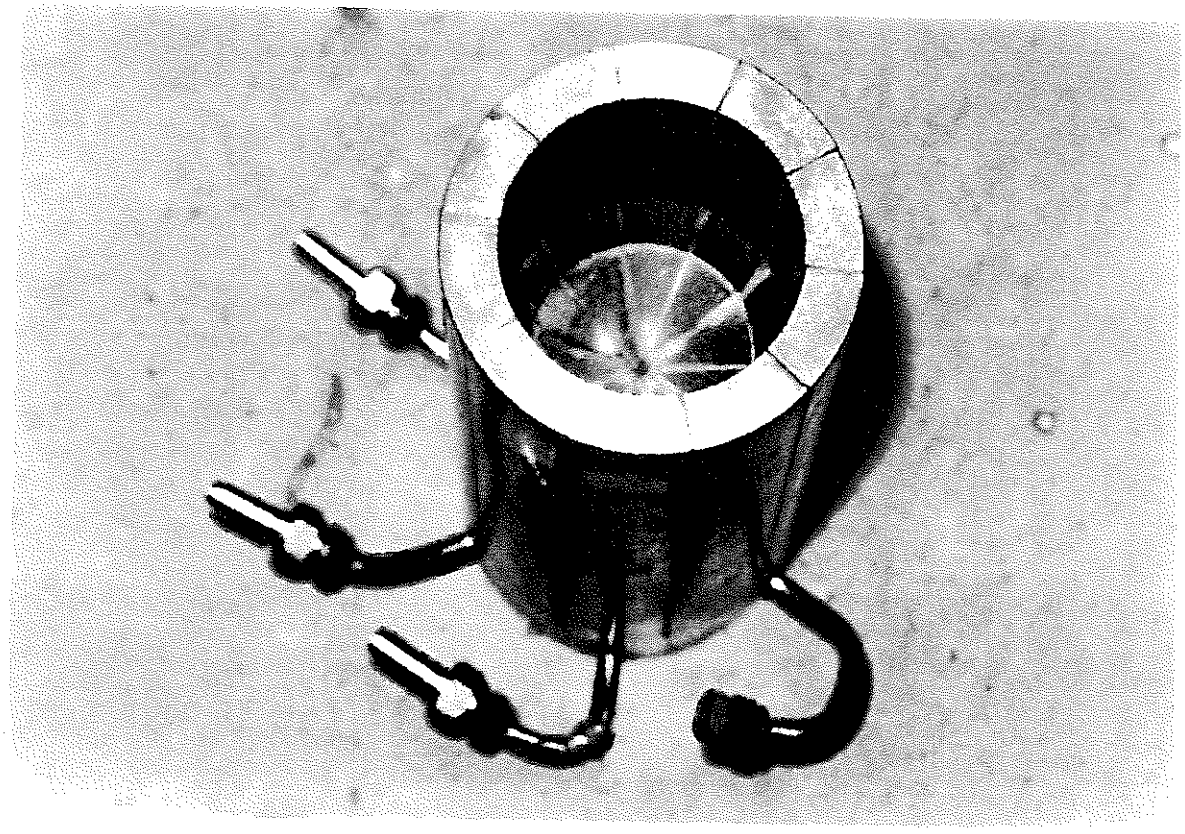
図－3表面～気泡までの厚さの測定結果



コールドクルーシブル誘導溶融法の概略



図－1　装置概要



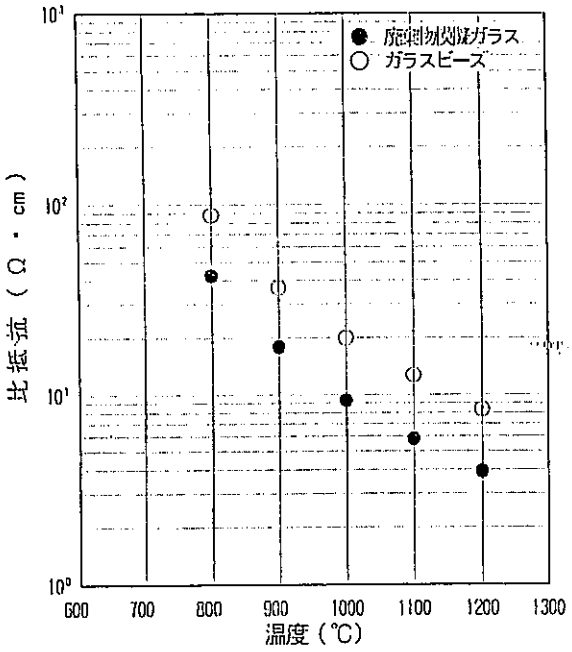
試験項目

熱上げ試験

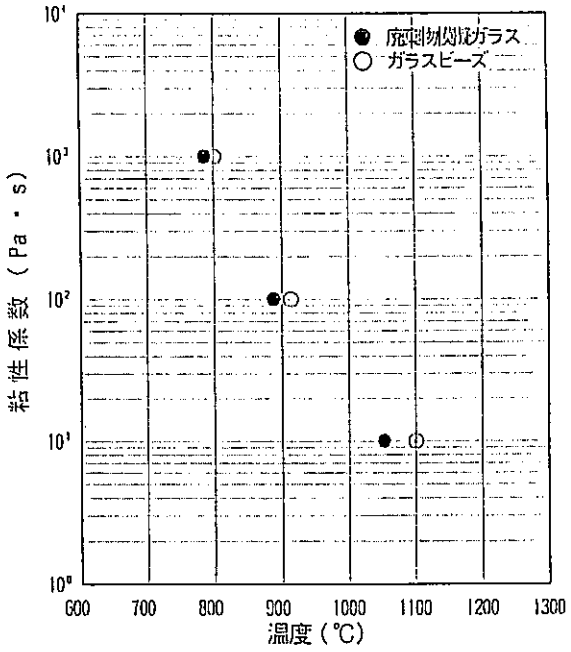
- 自己誘導加熱を維持するために必要な加熱条件の把握

溶融試験（スカル層の確認）

- 溶融温度による影響
- クルーシブル冷却水流量による影響



比抵抗の温度依存性の違い



粘性係数の温度依存性の違い

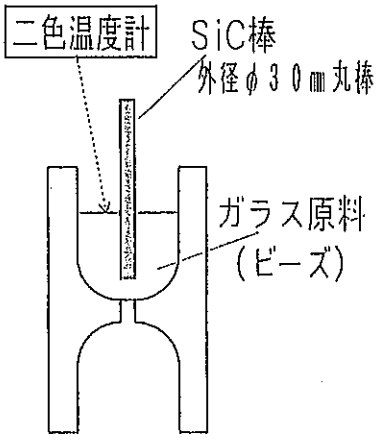
熱上げ試験方法および条件

溶融試料：ガラス原料（ビーズ，平均粒径 φ1.5㎜）

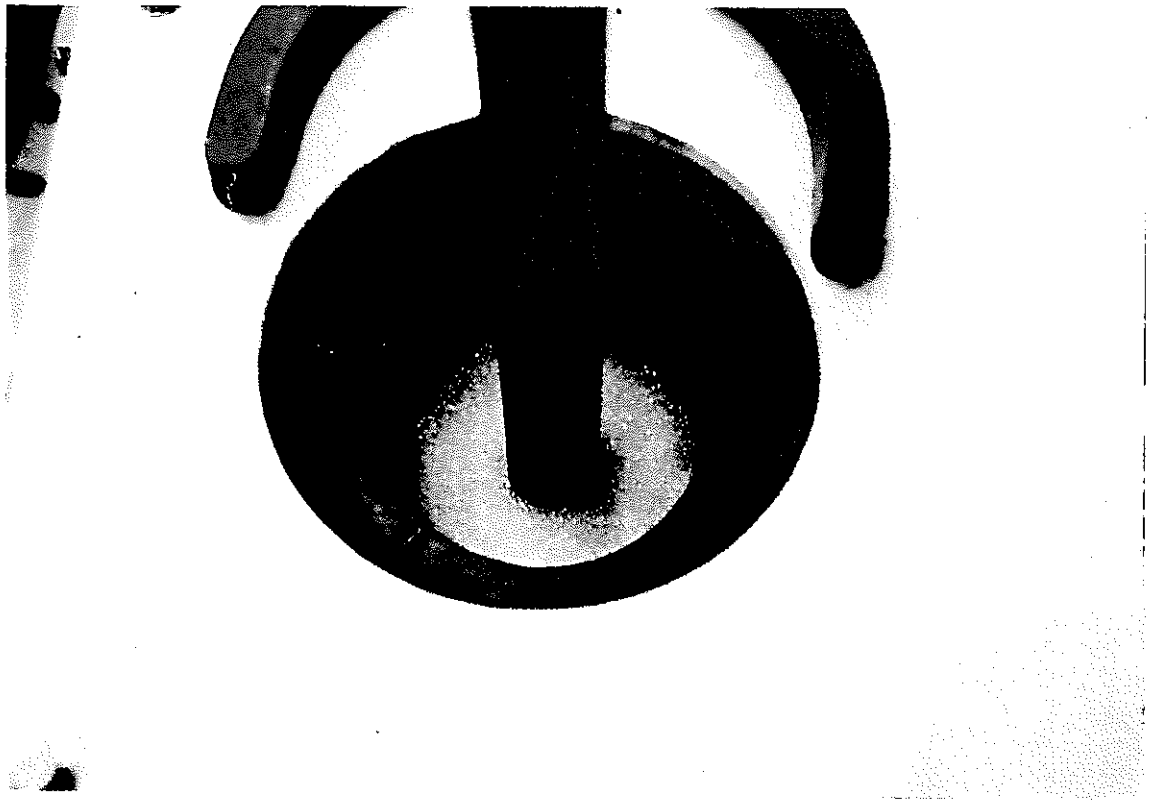
陽極電圧：5kV → 1kV／2min → 8kV

必要加熱条件の把握

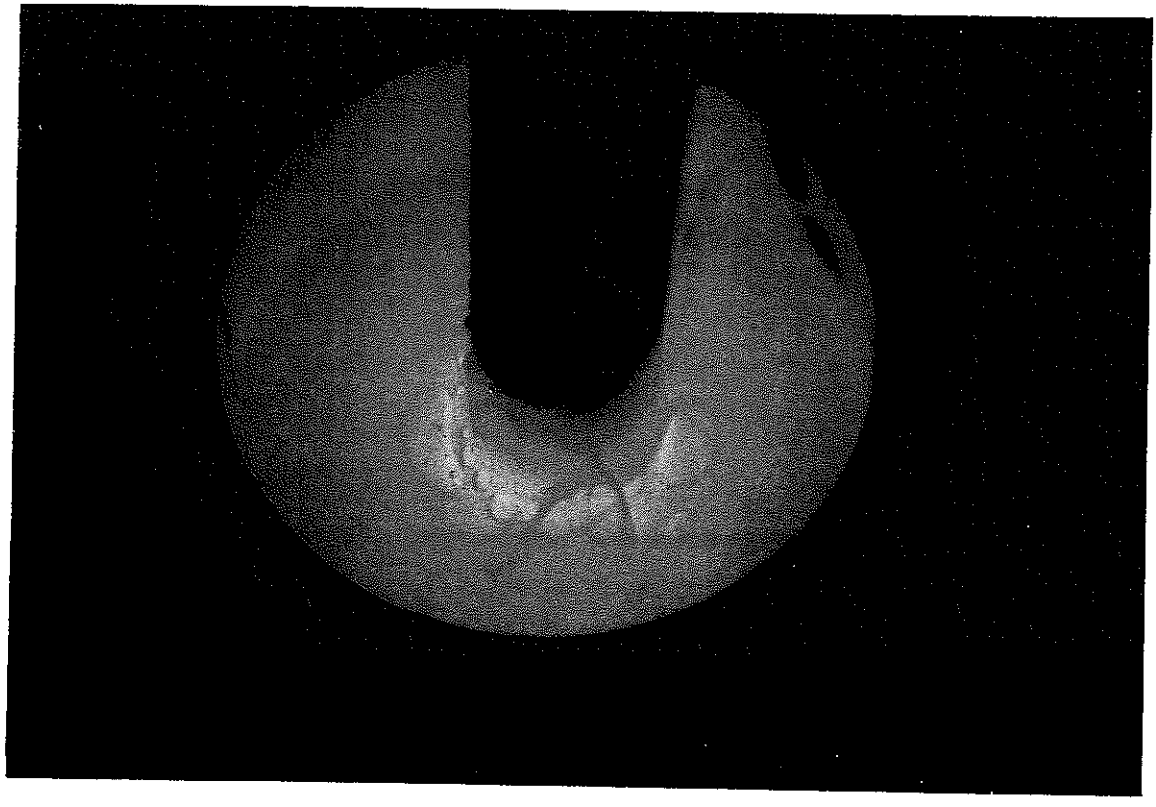
陽極電流　（A）	4.3　～　4.7
ガラス重量（g）	1200



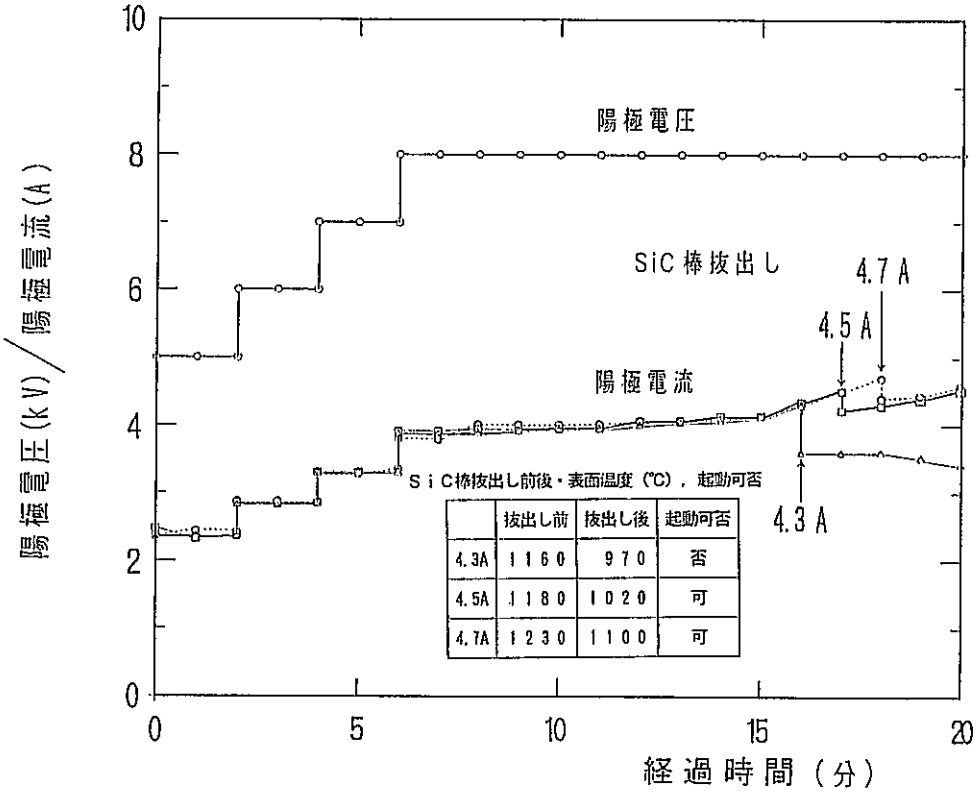
クルーシブル



加熱開始前



SiC棒を引抜く前



	抜出し前	抜出し後	起動可否
4.3A	1160	970	否
4.5A	1180	1020	可
4.7A	1230	1100	可

加熱条件の把握

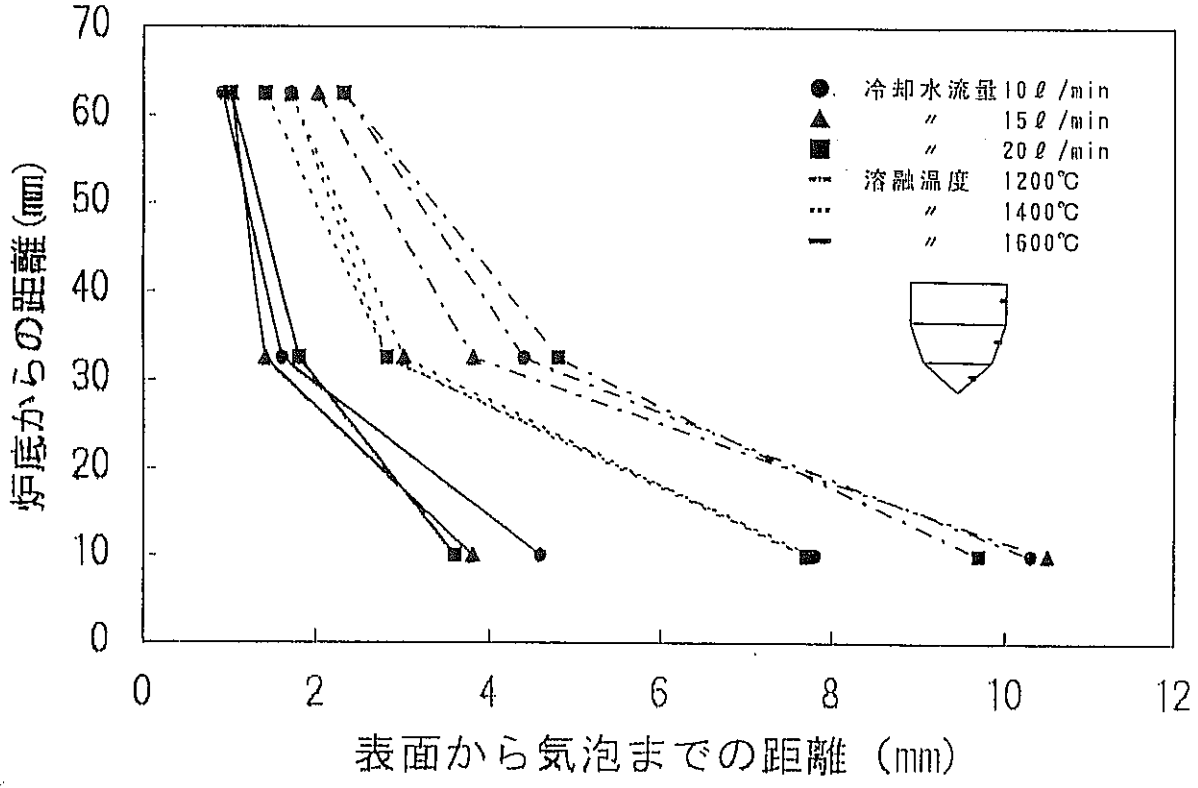
溶融試験条件

熱上げ方法　：熱上げ試験と同様

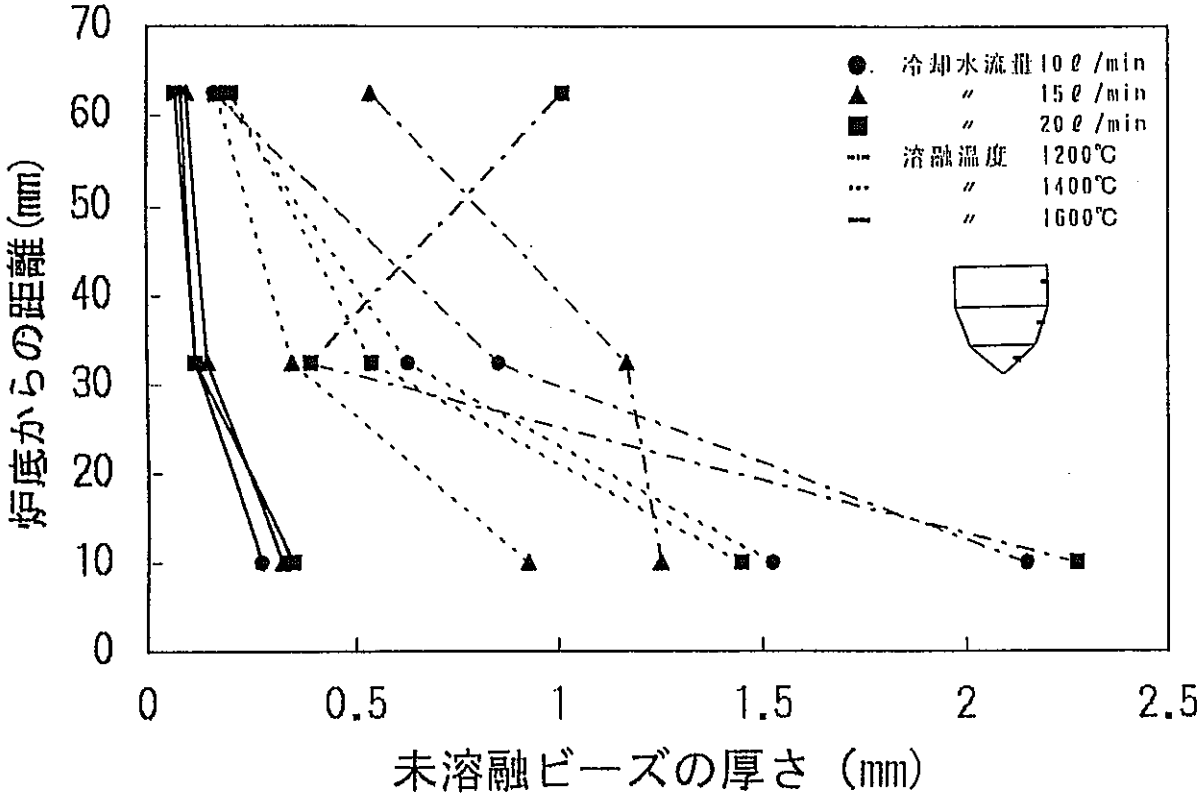
ガラス重量　：1200g

溶融温度　：1200，1400，1600℃

冷却水流量　：10，15，20ℓ/min



表面～気泡までの厚さの測定結果



未溶融ビーズの厚み測定結果

まとめ

熱上げ試験
- SiC 棒を発熱源として熱上げを行うことができた

溶融試験
- 溶融温度が１６００℃までスカル溶融が安定に行えることを確認した

⇩

ガラス溶融への適用

〔3〕金属廃棄物溶融試験
（炭素鋼溶融とスラグ成分の変化について）

高温溶融技術研究会　　平成７年１０月６日

発表テーマ	金属廃棄物溶融試験（炭素鋼溶融とスラグ成分の変化について）		
発表者所属	環施部 処理第２課	発表者氏名	坂場 裕憲

発表要旨

1. 目　的

現在，ＰＷＴＦでは，金属廃棄物をＥＳＲによって溶融処理を行っている。

この処理条件は金属比をＳＵＳ：ＳＳ＝９：１で行っているが，近年炭素鋼(SS)の発生量が増加しているため，炭素鋼の溶融処理が必要になっている。

しかし，炭素鋼の溶融には酸化鉄等の問題があり，安定処理が出来ない状態にある。よって，本試験はＥＳＲによる炭素鋼の処理に脱酸剤のＡｌを添加して溶融が可能であるか調査すると共に，スラグ成分の変化について調査した。

2. 試　験

試験は，ＰＷＴＦ実機の1/10スケールであるコールドの試験装置で，炭素鋼と炭素鋼に耐酸性塗料が塗布してあるものとで行った。

(1) 炭素鋼溶融時に必要なＡｌ添加量とスラグの成分変化を調査する。

錆のない炭素鋼を10Kg処理して，Ａｌの添加量を処理量の0.3%(30g)，0.5%(50g)，0.7%(70g)，1.0%(100g)と増加させて溶融試験を行い，鋳塊，スラグの状態及び電極消耗量を調査する。

次に，溶融を行った各スラグについて溶融上問題となるＡｌ，Ｗ，Ｆｅ，Ｃについて定量分析を行い，元素の含有量から仮定酸化物形態をAl_2O_3，FeO，WO_3として換算し，スラグの成分変化等から，Ａｌの最適添加量を調査する。

(2) 仮焼により表面塗料を除去した炭素鋼にＡｌを添加しての溶融試験

ＰＷＴＦの仮焼条件と同じくなるよう，８００℃で２時間仮焼し，残渣量を調査する。その残渣量を還元するのに必要なＡｌ添加量を計算で求め，その添加量に(1)の炭素鋼溶融時のＡｌ添加量を加えて溶融試験を行い，鋳塊やスラグの状態及びスラグの成分変化等から，溶融処理の運転条件等を調査する。

3. 結　果

(1) 炭素鋼溶融時に形成される酸化鉄を還元するのにＡｌを処理量の0.5 %添加する必要がある。

(2) 仮焼した炭素鋼の溶融処理は，Ａｌを処理重量の 3.2%添加するば可能である。しかし，反応熱及びスラグの組成変化により，溶融温度が2000℃を上回る。ＰＷＴＦ実機で，溶融温度が2000℃を超える運転は不適当である。

4. まとめ

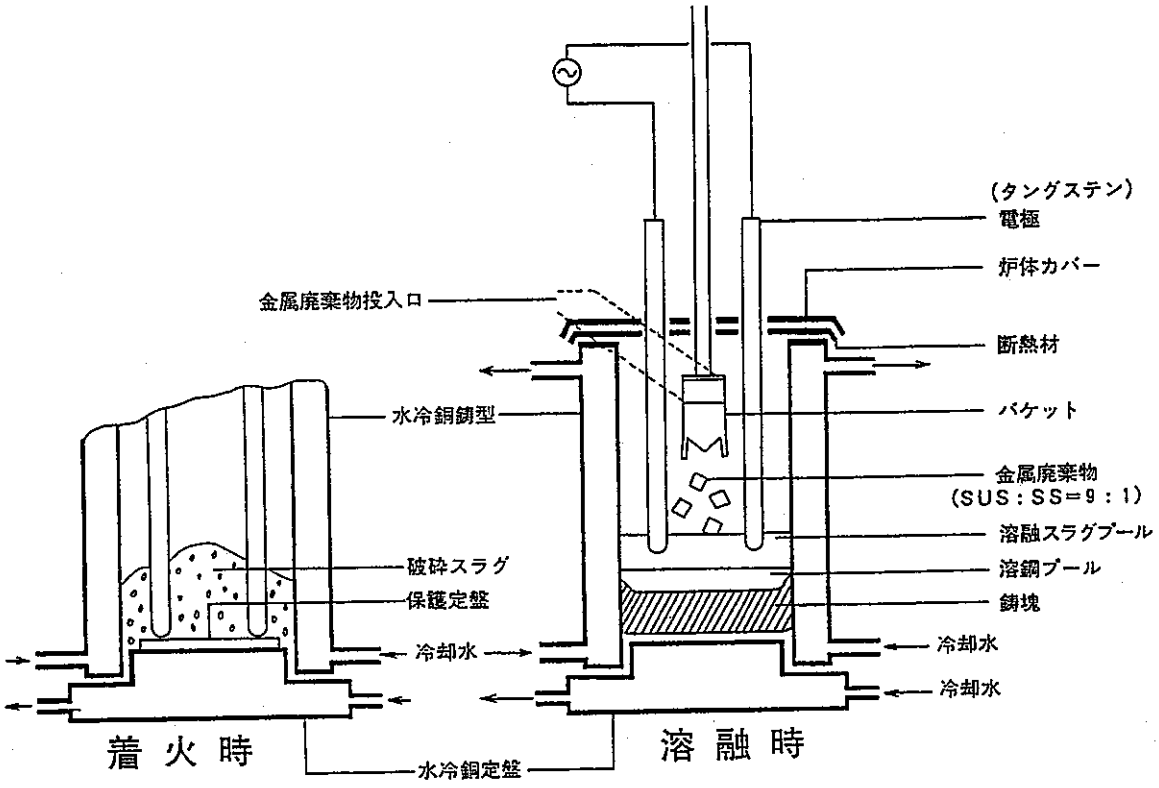
(1) 炭素鋼の溶融は，Ａｌを添加することにより可能であるが反応熱等により溶融温度が上昇する。

(2) Ａｌを添加することによりAl_2O_3の量が増加するため，スラグ組成が変化し，繰り返し使用が出来なくなる。

(3) 炭素鋼を溶融する際には，仮焼以外の方法により表面塗料の除去を行いＡｌ添加量を出来る限り抑える必要がある。

金属廃棄物の溶融試験

環境施設部　処理第２課　坂場



金属溶融炉断面図

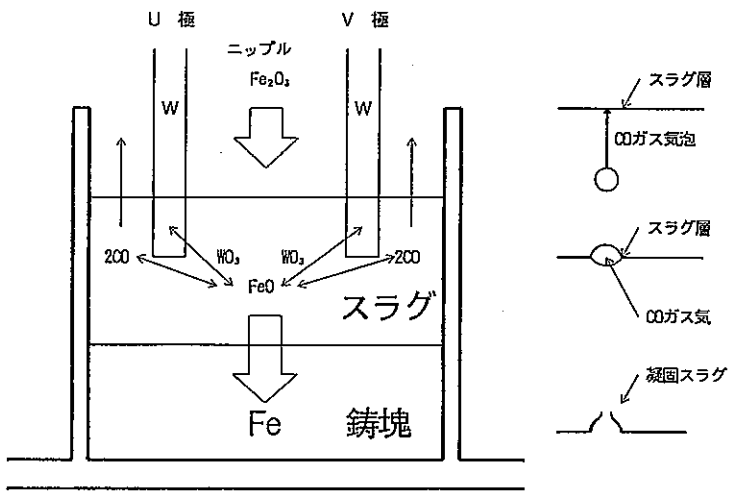
炭素鋼溶融時の問題点

(1) COガスの発生により溶融スラグ表面に凝固スラグ殻が形成する。

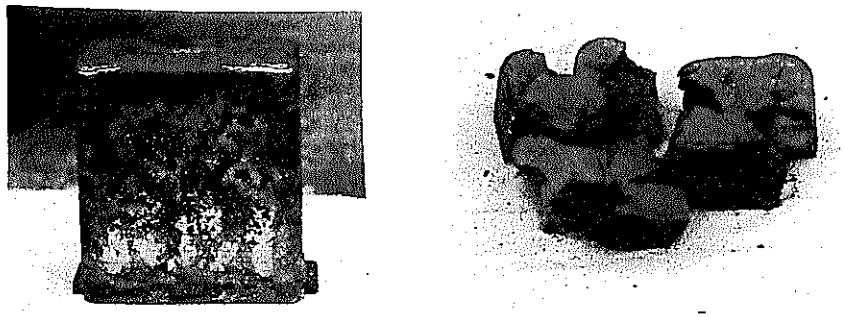
(2) タングステン電極が著しく消耗する。

(3)金属鋳塊表面に凹凸ができ，スラグを巻き込みを起こす。

(4) スラグの成分が変化し，繰り返し溶融が出来なくなる。



ＳＵＳ材溶融時の鋳塊とスラグ（参考）



１０．０kg処理での電極消耗量

Ｕ極　長さ；　７．９（mm）

ｖ極　長さ；　６．８（mm）

炭素鋼溶融（鋳なし，ＡＩ添加なし）

１０．０kg処理での電極消耗量

Ｕ極　長さ；３１．５（mm）

ｖ極　長さ；３４．５（mm）

酸化鉄を還元するのに脱酸剤の添加が有効である。

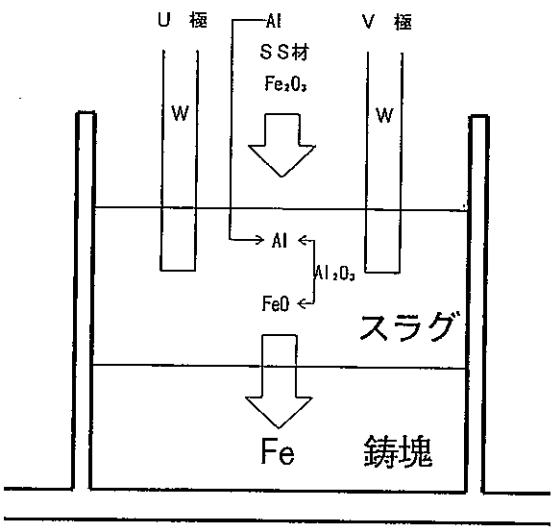
脱酸元素のSi，Al，Mn等からスラグ($CaO-Al_2O_3-B_2O_3$)成分変化が少ないAlを選定し、溶融する際に金属と共に添加する。

Fe_2O_3を還元するのに必要なAℓ添加量は

$Fe_2O_3 + 2A\ell \rightarrow 2Fe + A\ell_2O_3$

Fe_2O_3 =159.6 g/モル，Aℓ=27 g/モル

より求める



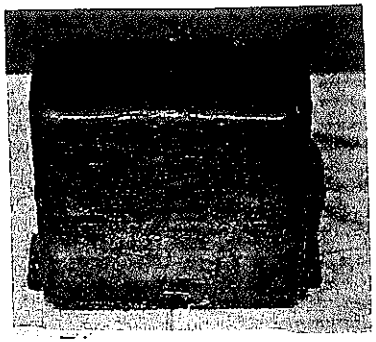
「炭素鋼溶融に必要なＡｌ添加量とスラグの成分変化を調査する．」

炭素鋼を１０kg処理してＡｌを以下の条件で添加し溶融中に形成する酸化鉄を還元するのに必要なＡｌ添加量を調査する。

添加量 溶融No.	処理量比	Ａｌ量
1	0.3 %	30 g
2	0.5 %	50 g
3	0.7 %	70 g
4	1.0 %	100 g

炭素鋼にＡｌを添加しての溶融

1．Ａｌ添加量３０（ｇ）　（処理量の０．３％）

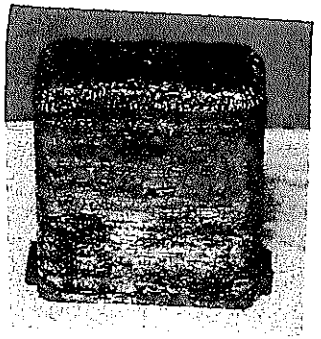


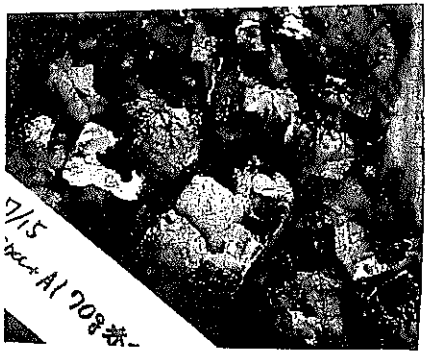
電極消耗量　Ｕ極　長さ；２１．５（mm）
Ｖ極　長さ；３２．５（mm）

2．Ａｌ添加量５０ｇ　（処理量の０．５％）

電極消耗量　Ｕ極　長さ；１２．０（mm）
Ｖ極　長さ；１３．５（mm）

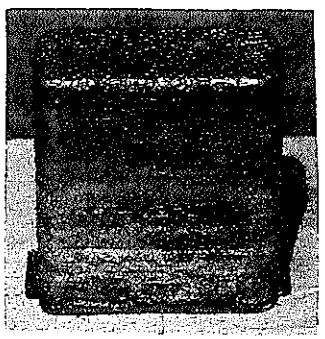
3．Ａｌ添加量７０ｇ　（処理量の０．７％）





電極消耗量　Ｕ極　長さ；６．０（mm）
Ｖ極　長さ；７．５（mm）

4．Ａｌ添加量１００ｇ　（処理量の１．０％）

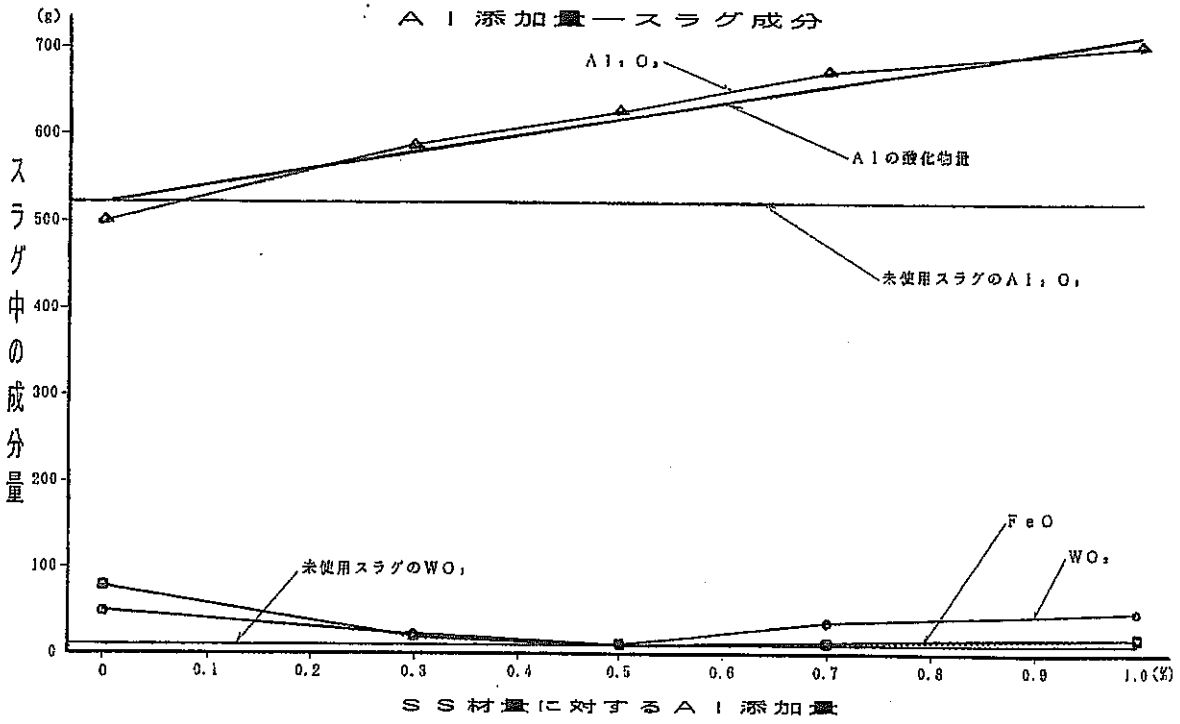


電極消耗量　Ｕ極　長さ；５．４（mm）
Ｖ極　長さ；４．５（mm）

Al添加によるＳＳ材溶融のスラグ分析結果

〔wt%〕

試験No.	試料名	処理量	電極	電極消耗量 重量	電極消耗量 長さ	元素 仮定酸化物形	Al含有量 Al_2O_3	Fe含有量 FeO	W含有量 WO_3	C含有量
	スラグ成分		U極			定量結果	23.20	0.07	0.46	0.01
			V極			換算結果	43.84	0.09	0.58	
	ＳＵＳ溶融	10.0 kg	U極	70 g	7.9mm	定量結果	21.70	2.11	1.41	0.02
			V極	80 g	6.8mm	換算結果	41.00	2.72	1.78	
1	ＳＳ材	10.0 kg	U極	240 g	31.5mm	定量結果	22.26	5.347	3.496	0.438
			V極	300 g	34.5mm	換算結果	42.06	6.879	4.409	
2	ＳＳ材	SS； 8.0kg	U極	160 g	21.5mm	定量結果	26.18	1.335	1.683	0.500
	Al;0.3%添加	Al； 27g	V極	260 g	32.5mm	換算結果	49.47	1.717	2.122	
3	ＳＳ材	SS；10.0kg	U極	100 g	12.0mm	定量結果	28.40	0.691	0.527	0.084
	Al;0.5%添加	Al； 50g	V極	90 g	13.5mm	換算結果	53.66	0.796	0.796	
4	ＳＳ材	SS；10.0kg	U極	90 g	6.0mm	定量結果	28.78	0.616	2.519	0.141
	Al;0.7%添加	Al； 70g	V極	90 g	7.5mm	換算結果	54.38	0.792	3.177	
5	ＳＳ材	SS；10.0kg	U極	70 g	5.0mm	定量結果	30.08	0.907	2.874	0.161
	Al;1.0%添加	Al； 100g	V極	20 g	4.5mm	換算結果	56.84	1.167	3.624	



炭素鋼は表面に耐酸性塗料を塗布してあるものが殆どである。

ＰＷＴＦでは，仮焼によって塗料の除去をした後，溶融処理を行う。

「仮焼して表面塗料を除去した炭素鋼を溶融した鋳塊とスラグの状態」　（Ａｌ添加無し）

「仮焼により表面塗料を除去した炭素鋼の溶融試験」

仮焼して表面塗料を除去した炭素鋼を溶融するのに必要なＡｌ添加量を調査する。

仮焼は，８００℃・２時間とする。

この時の残渣量は処理量の６～８％である。

その量を還元するのに必要なＡｌ添加量を，

$Fe_2O_3 + 2Al \rightarrow 2Fe + Al_2O_3$

Fe_2O_3 ＝159.6 g/ モル，Ａｌ＝27 g/ モル

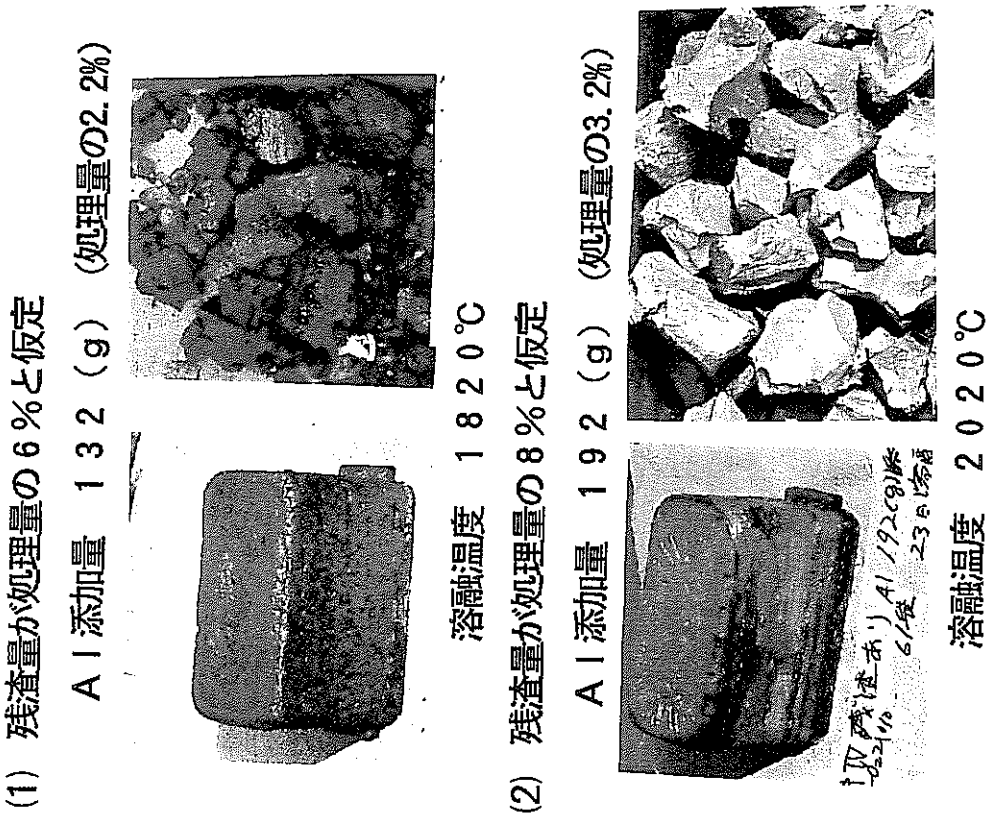
より求め，これに「処理量の0.5％」を加える。

(1)　残渣量が処理量の６％とした仮定

Ａｌ添加量；１３２（ｇ）（処理量の2.2％）

(2)　残渣量が処理量の８％とした仮定

Ａｌ添加量；１９２（ｇ）（処理量の3.2％）



溶融温度の上昇

AlがFeOを還元する時に発生する反応熱及びスラグの成分変化による温度の上昇と考えられる。

しかし，ＰＷＴＦ実機の設計条件は，溶融温度が1800℃であるため，溶融温度が2000℃を超える運転は，溶融炉の劣化及び損傷等の安全上の問題があり，不適当である。

結　　果

仮焼した炭素鋼の溶融処理は，反応熱等により溶融温度が上昇し，また，スラグ組成が変化し，繰り返し溶融が出来なくなる。

よって，炭素鋼の溶融には，仮焼以外の塗料除去方法等を検討し，Ａｌ添加量を出来る限り抑える。

〔4〕焼却灰のマイクロ波加熱溶融

高温溶融技術研究会　　平成７年１０月６日

発表テーマ	焼却灰のマイクロ波加熱溶融		
発表者所属	環施部　処理第二課	発表者氏名	大内　優

発表要旨

1.　はじめに

プルトニウム廃棄物処理開発施設（ＰＷＴＦ）では、プルトニウム取扱施設から発生するプルトニウムで汚染された廃棄物のうち、紙，布類及びＨＥＰＡフィルタ等の可燃物は、焼却減容後発生した焼却灰をマイクロ波を利用して溶融固化し、人工鉱物として安定化を図っている。しかし、焼却灰は、焼却対象物や焼却条件等により、焼却灰中に含まれる未燃物等の量に変動があるため、溶融時のマイクロ波吸収状態や、固化体嵩密度が大きく変化するという課題がある。このため、焼却灰中の未燃物等の組成変動に対しても安定したマイクロ波加熱溶融が行える溶融運転条件を見出すべくマイクロ波加熱溶融特性の確認試験を行った。

2.　実施内容と結果

試験は、ＰＷＴＦに設置されているマイクロ波加熱溶融設備の基本特性である溶融炉内のマイクロ波伝送モードの確認と、溶融時における整合器の整合特性の調査・確認を行った。

(1)　マイクロ波伝送特性

マイクロ波が溶融ルツボ内を伝わるときの波長〔管内波長（λｇ）〕を測定し、マイクロ波伝送モード（ＴＥ）を確認するとともに、マイクロ波管内波長とルツボ径，焼却灰嵩密度等を考慮して、最適初期投入灰の重量を設定した。

(2)　溶融時の整合特性

溶融炉内におけるマイクロ波共振状態を一定に保つように溶融炉上部のヘットチューナと導波管に取付けられたＥＨ整合器を調整し運転すると、整合器の整合位置が規則的・周期的に変化していることを見出した。この整合位置は、溶融面高さがルツボ内に形成されるマイクロ波管内波長の１／２だけ上昇する毎に変化するため、溶融中の溶融面の高さを予測することが出来るようになった。

3.　まとめ

(1)　マイクロ波の炉内伝送モードは、ＴＥモードであることが確認できた。

(2)　焼却灰溶融時の整合位置が規則的，かつ周期的に変化することを実験的に見出した。

4.　今後の課題

(1)　整合操作の合理化

焼却灰の性状変化等マイクロ波整合に影響するデータを溶融前あるいは溶融中に収集し、これを整合回路にフィードバックさせた整合操作の自動化システムの検討を進めて行く。

(2)　均質溶融性追求

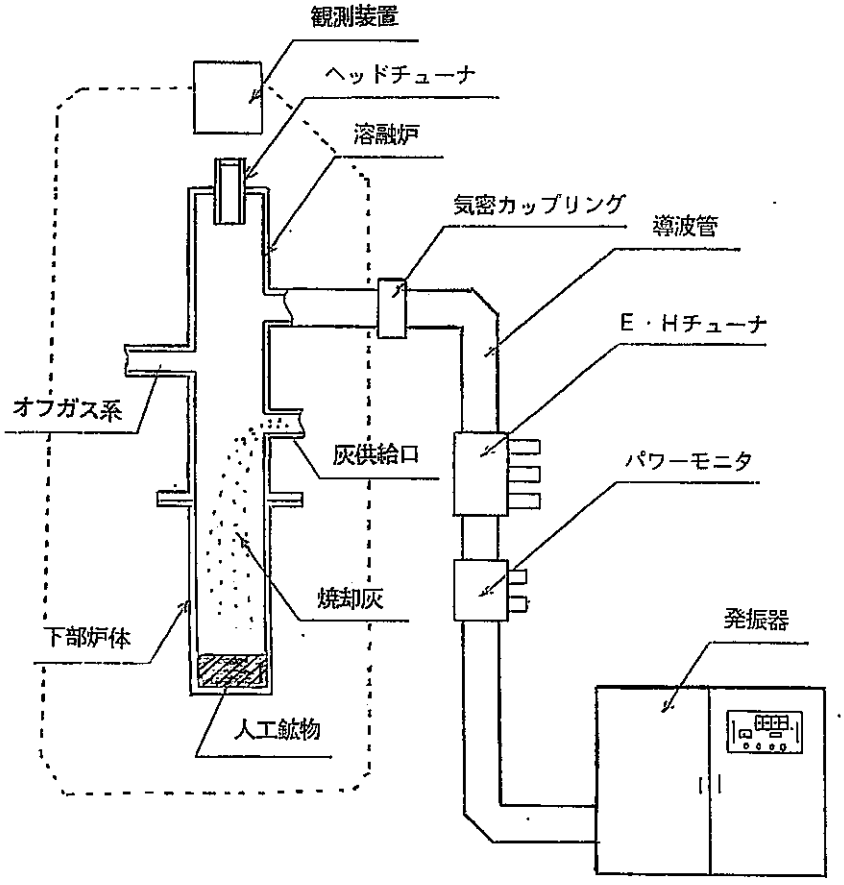
ルツボ内に形成される電界強度分布の均一性，溶融時のルツボ外表面の強制冷却による急激な温度勾配の抑制等による均質溶融体作製のための検討を進めて行く。

マイクロ波加熱溶融特性確認試験

(1)マイクロ波伝送特性

・管内波長

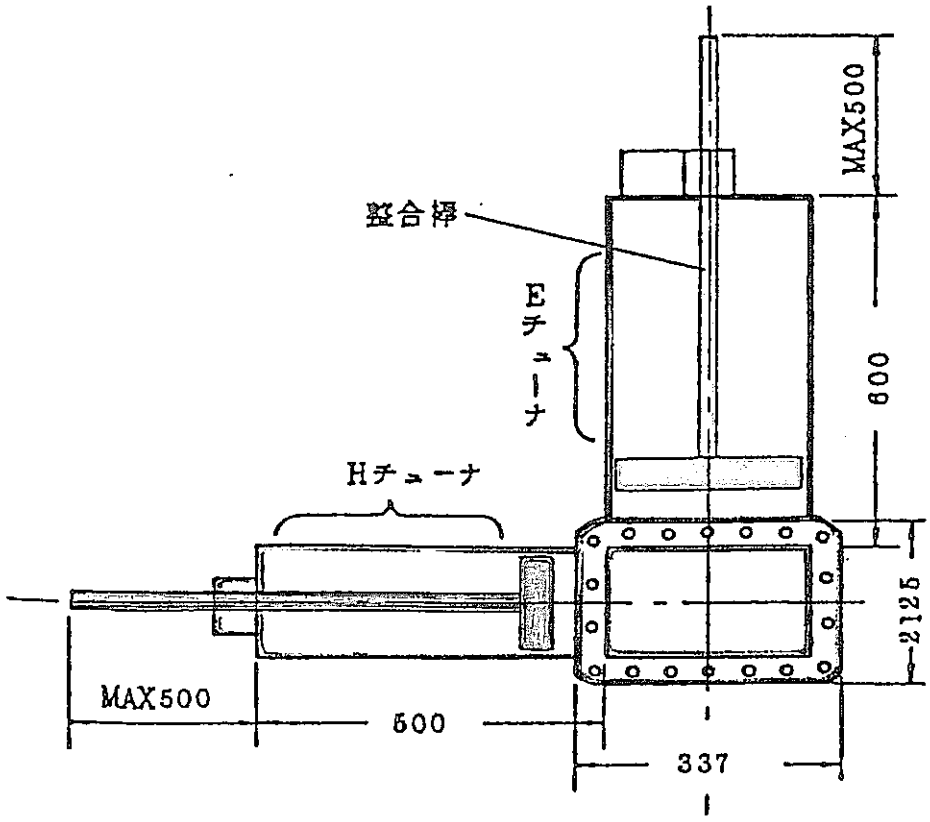
(2)溶融時の整合特性



マイクロ波溶融工程設備概略図

仕様

周波数	：	2450 MHZ
出力	：	10 KW
マイクロ波モード	：	TE-11 (電界モード)
ルツボ(内径)	：	129.8mm
(長さ)	：	770 mm



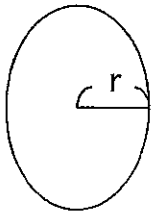
導波管整合機（ＥＨチューナ）

ルツボ形状によるマイクロ波伝送モード

$$管内波長(\lambda g) = \frac{\lambda o}{\sqrt{1-(\lambda o/\lambda c)^2}}$$

λo ：自由空間波長
λc ：遮断波長
λg ：管内波長

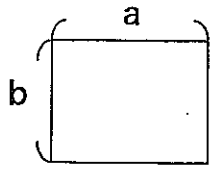
円形導波管



$$\lambda c = \frac{2\pi r}{K}$$

r ：導波管半径
K ：モードによる定数

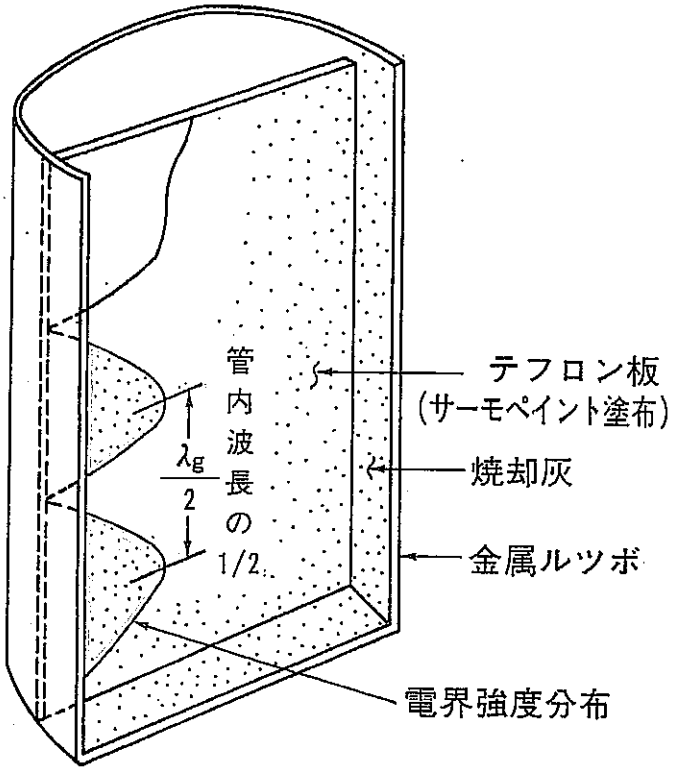
四角形導波管

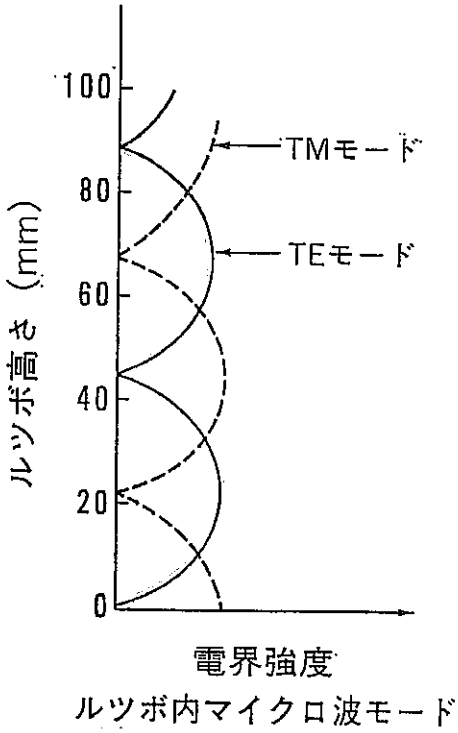


$$\lambda c = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}}$$

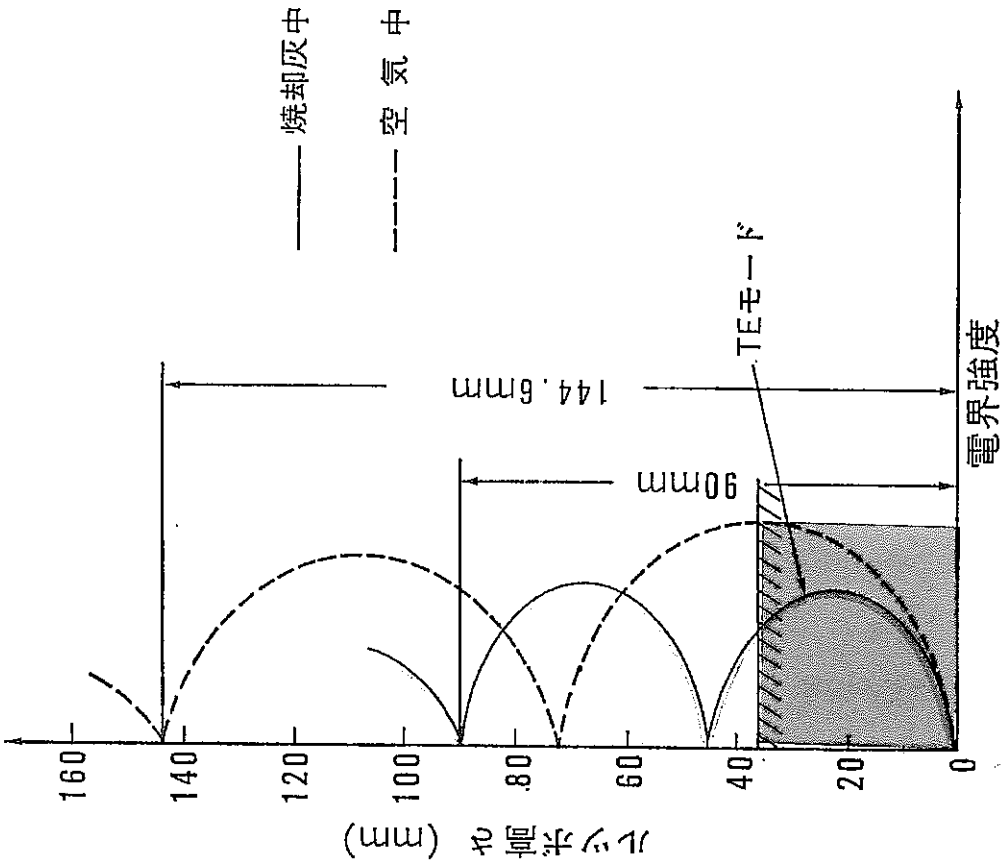
m，n ：モード次数

試験条件
ルツボ径：129mmφ
マイクロ波照射電力：1.2kW×3分

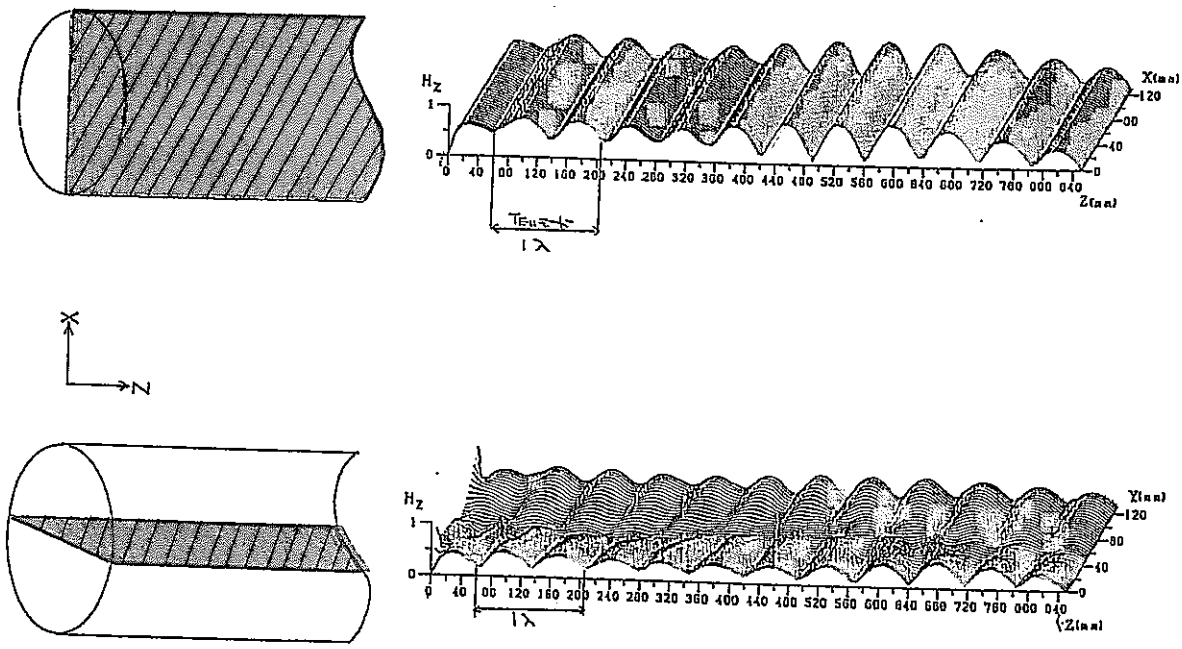




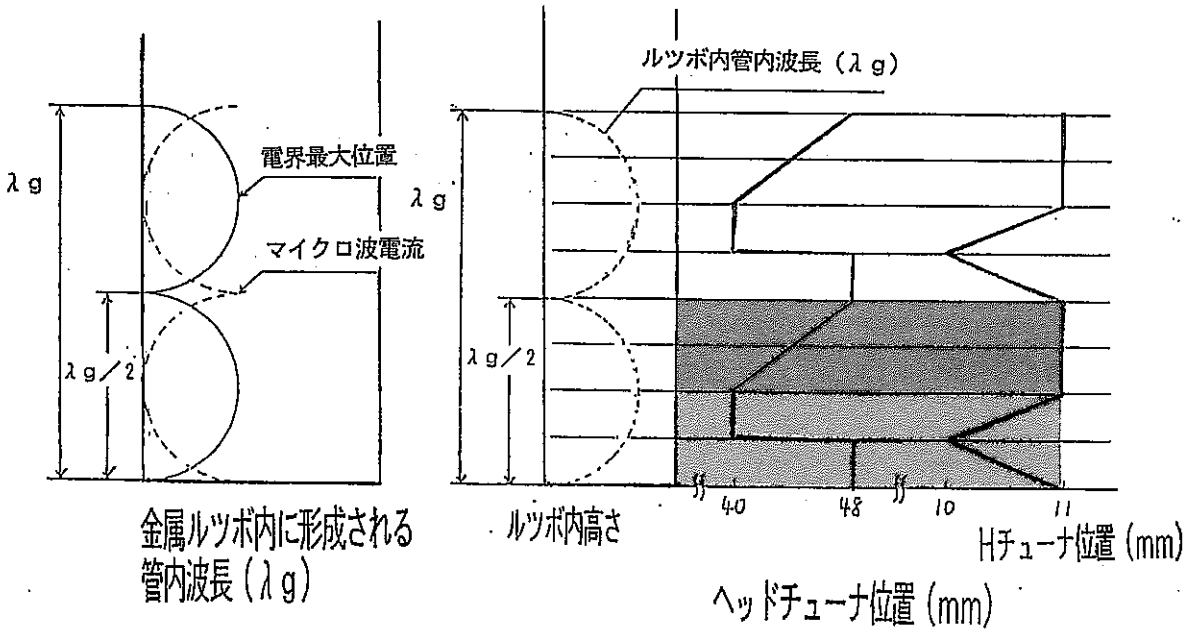
管内波長の測定方法



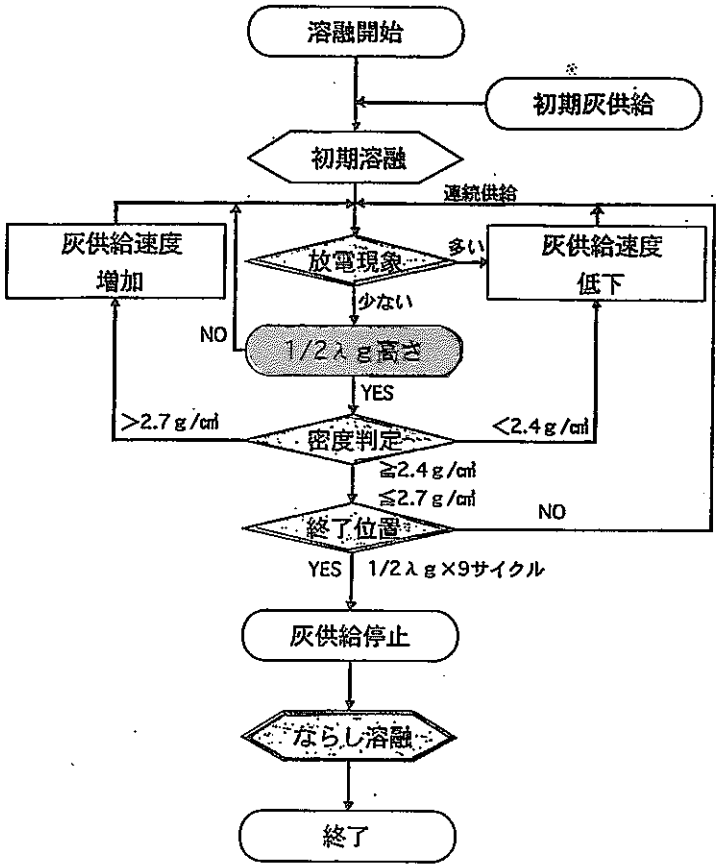
管内波長測定結果



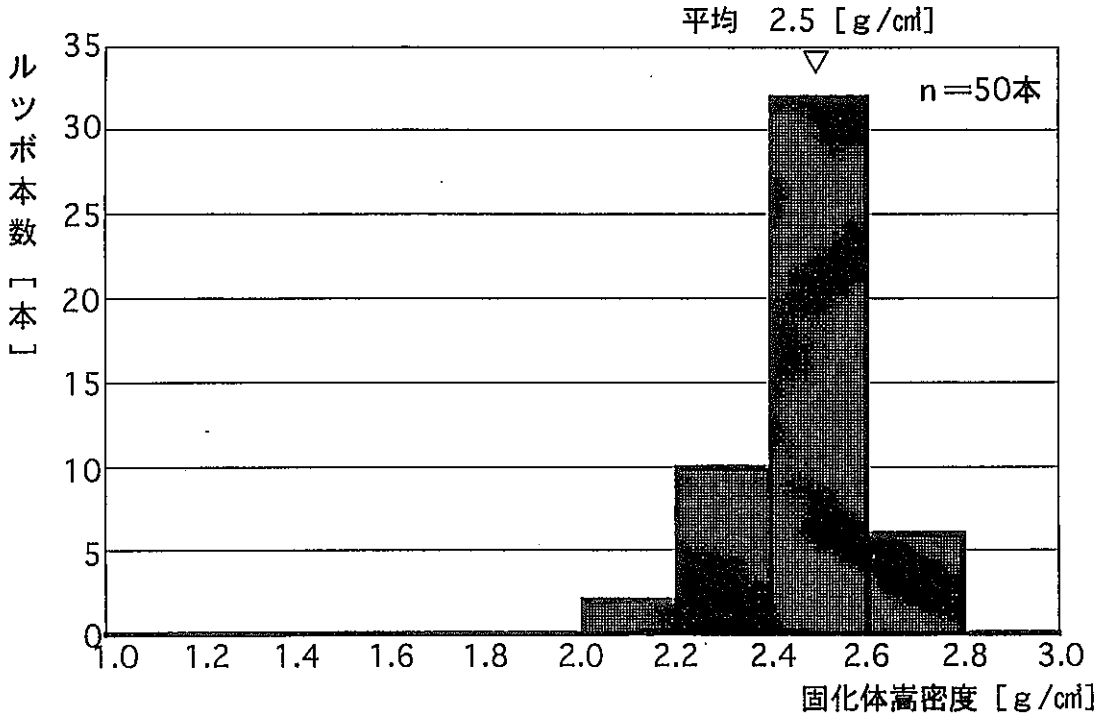
下部炉体（るつぼ内）のTE11モードによる定在波



管内波長（λg）と各溶融面高さにおける整合位置の関係



運転フローチャート



高密度化運転による固化体嵩密度

溶融条件

マイクロ波電力：5～6 kW
投入速度：3 kg/hr

試験用小型固化体断面

まとめ

(1)マイクロ波伝送特性

管内波長の測定結果からマイクロ波の炉内伝送モードはＴＥモードであることを確認出来た。

(2)溶融時の整合特性

整合器の整合位置が規則的・周期的に変化することを実験的に見出した。

⇨ 安定運転が可能となった。

今後の課題

・整合操作の合理化

・均質溶融性追求

〔5〕雑固体廃棄物の高温焼却溶融技術

高温溶融技術研究会

平成７年１０月６日

発表テーマ	雑固体廃棄物の高温焼却溶融技術		
発表者所属	大洗工学センター　環境技術課	発表者氏名	永　瀬　　睦

発表要旨

１．技術概要

高温焼却溶融技術は、原子力施設から発生する多様な低レベル雑固体廃棄物（可燃物、ゴム等の難燃物、コンクリート、金属等の不燃物、イオン交換樹脂、等）を一元的に減容処理を行う技術として開発された。本装置では、1,000～1500℃の高温で雑固体廃棄物を焼却・さらに溶融し、安定且つ均質なガラス状固化体を生成する。

本装置概要を図-１に示す。供給された処理対象廃棄物は、±90°に回転する揺動炉内でLPGガスバーナで加熱され、燃焼の促進及び溶融物の撹拌均一化が行われる。１バッチ運転毎に揺動炉が170°回転し、溶融物は炉下部から排出される。また燃焼排気は、二次燃焼室で未燃分を完全燃焼した後、スクラバ、HEPAフィルタ等から構成されるオフガス系を経て排気される。

本技術は、昭和６２年度から平成５年度にかけて大洗工学センターＷＤＦにおいて工学試験装置によるホット試験を完了しており、現在は平成１３年度から運転開始され大洗工学センター内の放射性固体廃棄物の総合的な減容・処理を行う「固体廃棄物前処理技術開発施設（ＬＥＤＦ）」への適用に向けて、実用化開発の段階にある。

２．ホット試験

ＷＤＦで行ったホット試験では、主に以下の項目について本技術の実廃棄物の処理性能及びホット性能の試験評価を行い、実用化の見通しを得た。

・減容性　　・融材の影響
・核種移行特性（炉及びオフガス系）
・固化体均質性　　・固化体浸出率

３．ＬＥＤＦ計画

現在、ＬＥＤＦ計画に向けて、以下の実用化開発を実施中である。またＬＥＤＦ適用装置フローを図-２に、また装置概要を表-１に示す。

（１）耐火物寿命の評価／寿命推定技術開発

２種類の炉耐火物候補材料（クロミア系不定系耐火物、アルミナ電気融レンガ）について、溶融物による侵食及び熱損耗への耐性を加速試験により評価した。試験の結果、耐火物の減損厚さは約300時間以内に約６mmで安定することが確認された。

（２）耐火物溶射補修技術の開発

炉耐火物が部分的に損耗、欠損した場合の遠隔補修技術として、溶射補修技術を開発中である。溶射とは、燃焼火炎中で耐火物粉末を溶融させ、損耗部に吹き付けることで耐火物層を追加形成する技術である。

溶射を行った耐火物を切断し、溶射部を観察した結果、耐火物層と溶射層が一体となり、高い強度及び耐性が期待できることが確認できた。

以　上

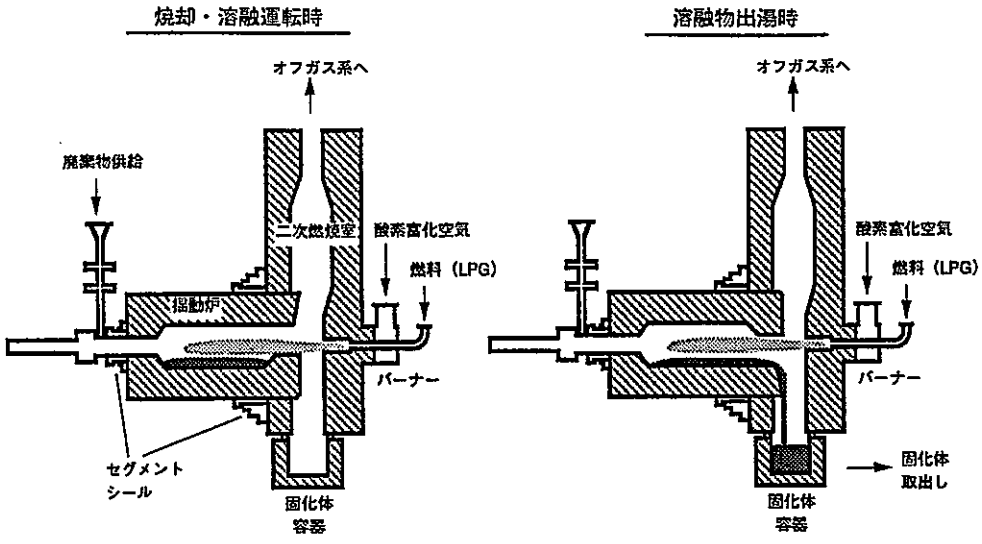


図-1　高温焼却装置　概略図

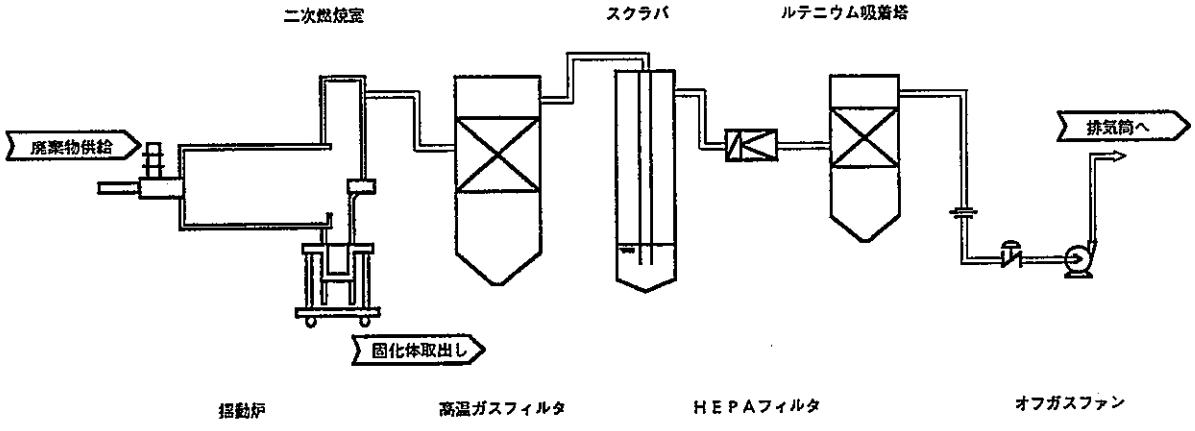


図-2　ＬＥＤＦ装置　フロー図

表-1　ＬＥＤＦ装置　概要

処理能力	30kg／時，140kg／バッチ（雑固体）
対象廃棄物	可燃物（紙、ｳｪｽ、HEPA･･･） 難燃物（ｺﾞﾑ、活性炭･･･） 不燃物（ｺﾝｸﾘｰﾄ、金属、ｱｽﾍﾞｽﾄ、石膏･･･） 廃イオン交換樹脂

PNC PN8440 95－044

高温溶融技術研究会

雑固体廃棄物の高温焼却溶融技術

平成７年１０月６日

大洗工学センター　環境技術課

１．技術の概要

◆従来技術の課題

・低レベル雑固体廃棄物　→　発生量多、多種多様

・廃棄物の性状・組成毎の処理必要

・処理工程の複雑化・処理コストの増大

⇒ ◆開発目標

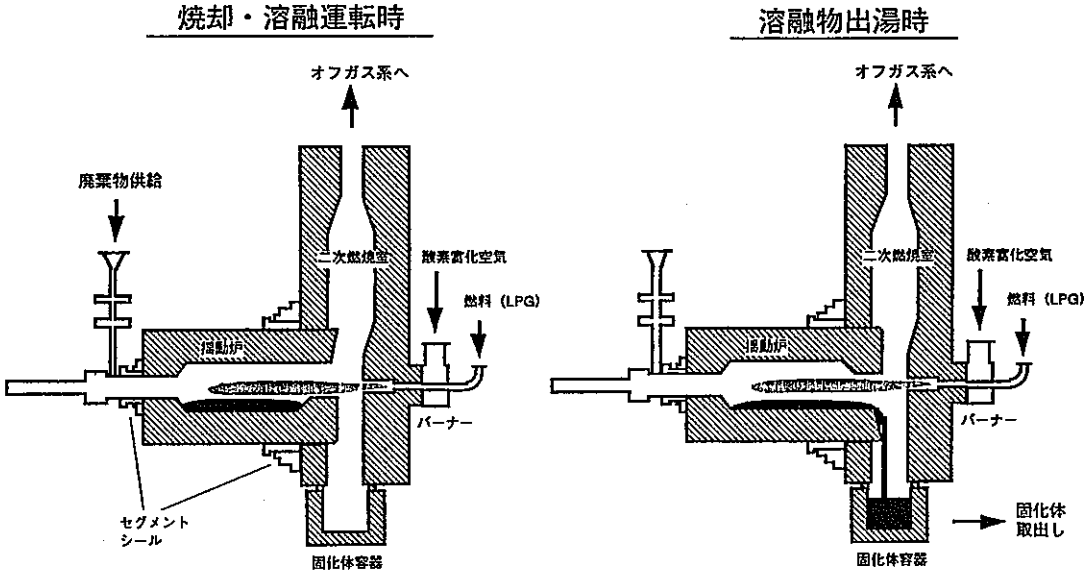
・多種多様な廃棄物の無選別・一元化処理

・細断、成分調整等の前処理を極力不要とする

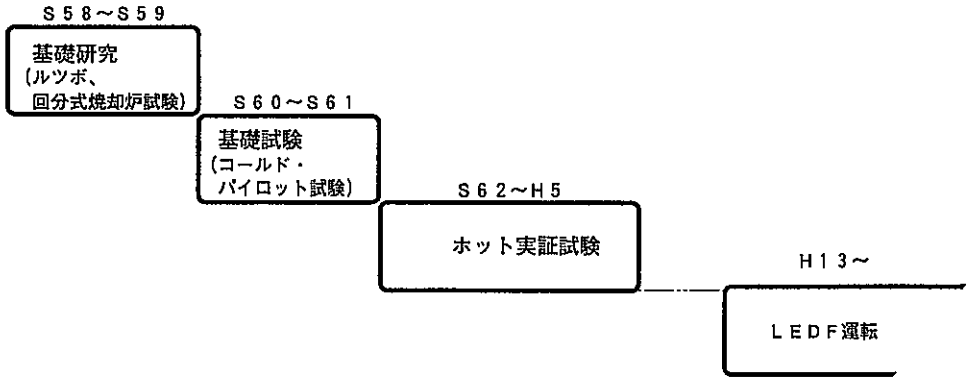
・高温溶融処理により高減容、且つ安定なガラス状無機質固化体化

・二次廃棄物発生量を最小限とする

焼却溶融炉　概略図



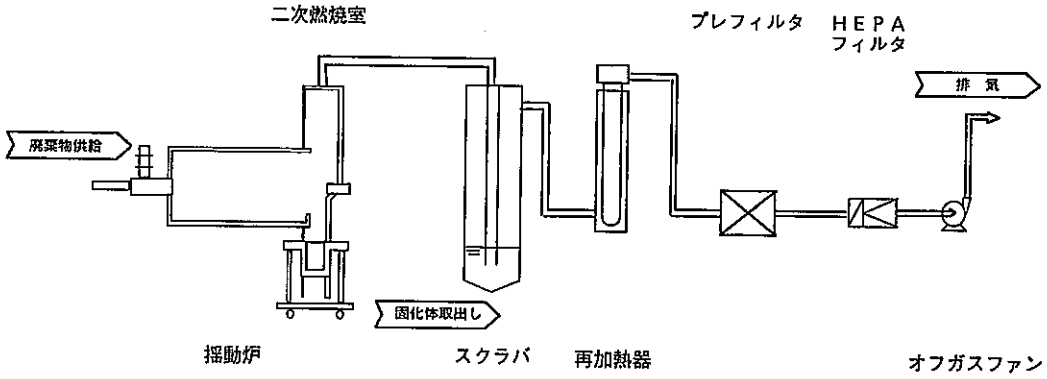
開発経緯



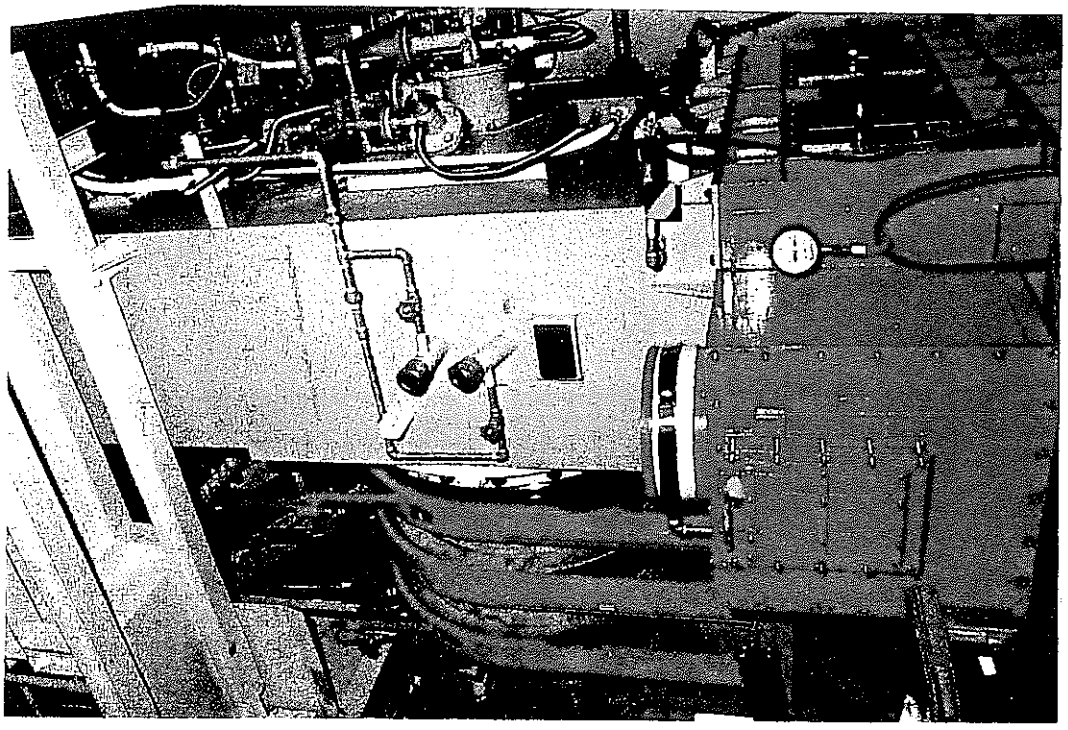
ＬＥＤＦ：　固体廃棄物前処理技術開発施設

2．ホット試験

装置概略フロー（ホット試験装置）



処理能力	10kg／時
対象廃棄物	可燃物（紙、ｳｪｽ、HEPA・・・） 難燃物（ｺﾞﾑ、活性炭・・・） 不燃物（ｺﾝｸﾘｰﾄ、金属、ｱｽﾍﾞｽﾄ、石膏・・・） 廃イオン交換樹脂
試験評価ＲＩ	Co-60、Cs-137、Na-22、Mn-54、Fe-59、Ru-108



A Multi-purpose Incinerating Melter System
Demonstration test unit

試験の結果と評価

◆焼却溶融性能

・多種多様な廃棄物を一元処理可能（1200～1300℃で全て溶融）

・融材無添加で安定運転可能

（核種の炉からの移行率に有意差なし）

◆装置除染性能

・炉→ｵﾌｶﾞｽ系への核種移行：24～250（Co-60），1～48(Na-22)

4～10（Ru-106），6～11(Cs-137)

・オフガス系ＤＦ：　1.0E4～1.0E5（Co-60）

1.0E2～4.0E3（Cs-137）

⇒ ・装置全体の除染係数は実用化設計対応可能な結果を確認

◆固化体性状

・嵩密度　2.3～2.6 [g/cm^3]

・浸出率（Cs）　1.6E-6～2.7E-5 [g/cm^2/日]

・固化体中放射能分布　：　±10%以内

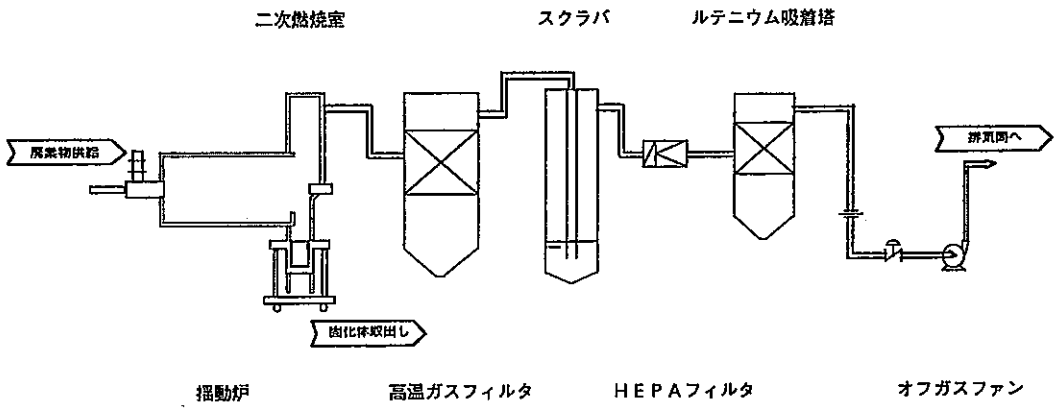
⇒ ・真比重（2.6～3.0）近くまで、高減容率を達成

・浸出率は、セメント固化体と同等、あるいはそれ以上に優れる

・固化体内均質性は高い

3．ＬＥＤＦ実用化開発

装置概略フロー（ＬＥＤＦ）



処理能力	30kg／時，140kg／バッチ（雑固体）
対象廃棄物	可燃物（紙、ｳｪｽ、HEPA･･･） 難燃物（ｺﾞﾑ、活性炭･･･） 不燃物（ｺﾝｸﾘｰﾄ、金属、ｱｽﾍﾞｽﾄ、石膏･･･） 廃イオン交換樹脂

実用化開発

◆耐火物寿命の評価／寿命推定技術開発

・２種の候補耐火物について、加速試験

・評価項目　；　溶融物による侵食（コロージョン）への耐性
熱損耗（スポーリング）への耐性
スラグコーティングによる長寿命化確認

◆耐火物溶射補修技術の開発

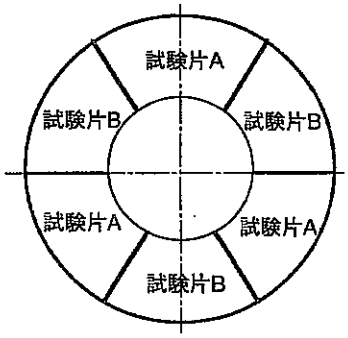
・炉耐火物の部分損傷時の、遠隔補修技術の開発

・評価項目　；　炉耐火物層と溶射補修層の一体化の確認

動力炉・核燃料開発事業団

耐火物寿命推定試験

耐火物耐久試験炉・側面側

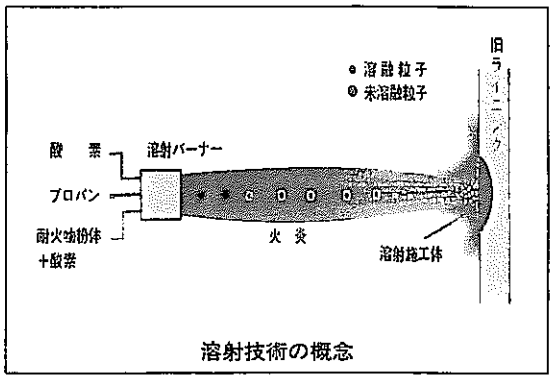


試験炉	：500D x 500L 外部水冷回転侵食炉
酸素バーナ	：100,000kcal/h
試験時間	：300時間（1750℃溶融運転時間帯）
試験片	：A（クロミア系不定形耐火物）、B（アルミナ電鋳レンガ）
昇温速度	：常温～1750℃／3時間
試験温度	：1750℃
スラグ	：LEDF模擬廃棄物の溶融物破砕片、交換頻度：1回／日

試験結果：
侵食及びスポーリングによる損耗量は、6 mm / 300時間

動力炉・核燃料開発事業団

耐火材の溶射補修技術



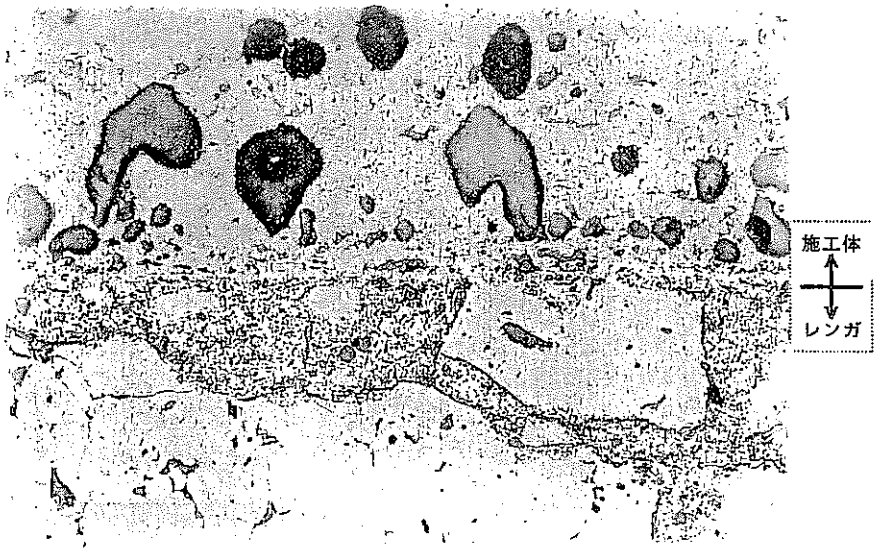
溶射技術の概念

溶射状況

・燃焼火炎中で耐火物粉末を溶融させ、損傷部に吹き付けるもので、吹き付けた施工体は緻密で高強度となり、高い耐用性が得られる。

動力炉・核燃料開発事業団

クロミア系不定形耐火物の溶射補修結果



4．まとめ

◆ホット試験

・装置の廃棄物処理特性、ホット性能を確認

・放射性雑固体廃棄物処理に適したプロセスであることを確認

◆ＬＥＤＦ実用化開発

・寿命評価技術、遠隔補修技術の開発・検証

・遠隔による定期保守技術の開発・確立

◆今後の課題

・解体廃棄物処理への適用

〔6〕ガラス溶融炉熱流動解析コードの開発

高温溶融技術研究会

平成７年１０月６日

発表テーマ	ガラス溶融炉熱流動解析コードの開発		
発表者所属	環境技術第一開発室	発表者氏名	吉田　勝

発表要旨

１．はじめに

ＨＴＳでは高レベル放射性廃棄物の処理用ガラス溶融炉用の３次元熱流動解析コード『ＦＬＯＷＭＥＬ』の開発を行っており、現在、実規模試験溶融炉であるモックアップ３号溶融炉や、ＪＥＣＭ等を対象とした解析を行っている。

２．開発の目的

実炉からは炉内の温度状況、流動状態、電流密度などのデータを直接得ることが困難である。そこで、溶融炉の運転条件をもとにシミュレーションによって炉内状況を推定し、運転支援を行う。

また、ガラス溶融炉開発の際し、従来のような小規模実験炉からの積み上げ方式ではなく、シミュレーションによる設計支援を行って、設計の効率化を図ることを目的として開発、改良を現在も継続している。

３．コードの特徴

廃棄物処理用のガラス溶融炉を対象とした、非圧縮性粘性流体の３次元非定常計算が可能である。炉内には熱伝導計算の他に流動計算、電位計算が必要であり、計算時間の短縮を図るために２メッシュ系を採用している。解法には差分法を適用し、コントロールボリューム法を用いて支配方程式の離散化を行っている。また、カーテシアン座標系だけでなく、ＪＣＥＭ等の円筒型のガラス溶融炉にも適合させるために極座標系での計算も可能なコードとなっている。その他、以下のような特徴、計算機能を有している。

・複数の通電回路の計算が可能
・気泡を含む流動解析機能－バブリングを想定
・任意のセルの電気伝導度の指定が可能－白金族の体積を考慮
・矩形メッシュの他に３角メッシュの取り扱いが可能－炉底傾斜部に対応
・内部メッシュ系（ガラス溶融部に相当）のみのメッシュの細分化が可能

４．解析結果

現在までに主にモックアップ３号溶融炉、物理モデル、ＪＣＥＭを対象とした解析を実施している。最も解析例の多いモックアップ３号溶融炉のメッシュをFig.1に、解析結果として、温度分布図、流動ベクトル図をFig.2、Fig.3に示す。また中心軸上の炉内温度分布の実測との比較をFig.4に示す。

５.今後の課題

これまで計算パラメータや境界条件の影響などについて検討を行い最適化を図ってきており、定性的には炉内状況を把握することが可能である。しかし、定量的には炉内温度分布計算結果と実測温度分布とが必ずしも合致しない。原因としては粘度、比熱といった物性値の問題、メッシュ幅の影響などが想定されるため、今後、内部メッシュの細分化などを行い精度向上を図る予定である。

また、合わせてＪＣＥＭを対象としたパラメーター解析も進めてゆく予定である。

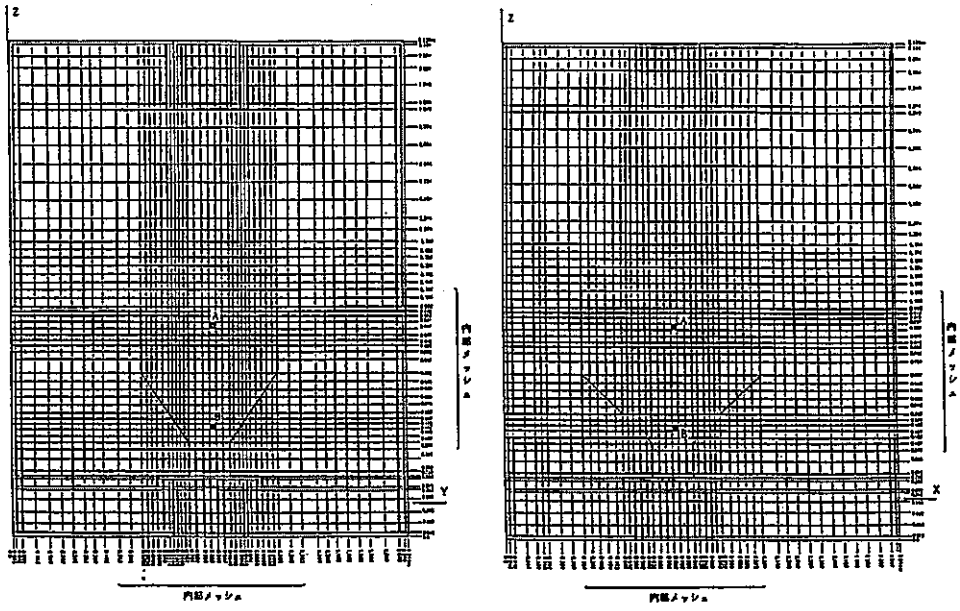


Fig. 1　メッシュ図

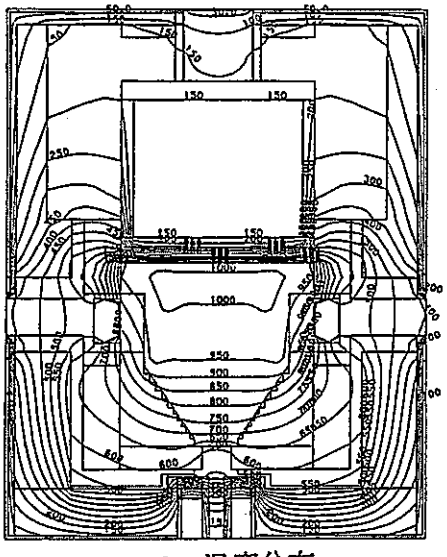


Fig. 2　温度分布

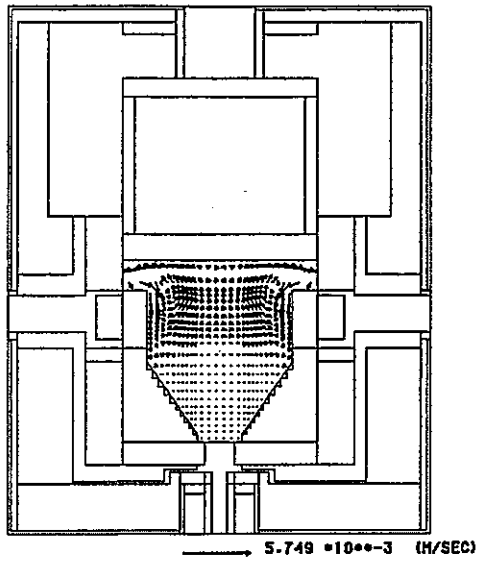


Fig. 3　流動ベクトル

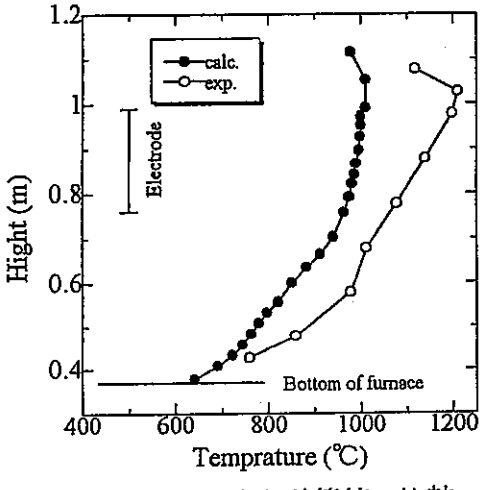


Fig. 4　実測温度と計算値の比較

ガラス溶融炉熱流動解析コードの開発

○吉田　勝　　川又　宏之

高温溶融技術研究会

１９９５年10月 6日

動力炉・核燃料開発事業団

東海事業所

Power Reactor and Nuclear Fuel
Development Corporation

PNC

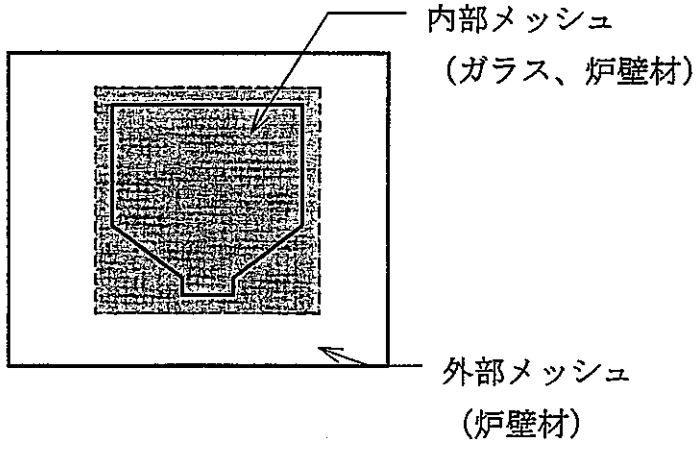
目的

- ガラス溶融炉運転時の炉内状況の推定
- ガラス溶融炉の設計支援

特徴と解法

- ３次元非定常解析
- 差分法
  コントロールボリュームによる離散化
- 内外部２メッシュ系
  炉内のみの流動計算、電位計算が可能

2メッシュ系



機能

- 電場計算
  - 複数通電回路の設定
  - 導電性堆積物の考慮
  - 電位、電流密度、発熱密度の算出
- 熱流動計算
  - 温度、流速、粒子軌跡、圧力の算出
  - バブリングへの対応

Table.　操業条件

項　目		条件	単位	数値
運転状態		廃液供給時		
ガラス製造速度			kg/h	6.25
ガラス原料供給速度			kg/h	4.49
廃液供給速度			l/h	13.52
原料溶融層厚さ			m	0.105
ガラスレベル			mm	126
主電極間通電	電力値		kW	36
	電流値		A	668
	電圧値		V	57
補助電極間通電	電力値		kW	0.4
	電流値		A	26
	電圧値		V	12
ノズル-主電極間通電	電力値		kW	0
	電流値		A	0
	電圧値		V	0
主電極冷却条件	流量		Nm3/h	39.5
〃 南側	出口温度		deg	391
主電極冷却条件	流量		Nm³/h	39.2
北側	出口温度		deg	395
主電極冷却条件	入口温度		deg	28
電極の放熱体積			m³	0.01365
オフガス温度(T925)			deg	149.0
炉内雰囲気温度			deg	165.7
炉内壁温度(T511)			deg	350.0
外気温度			deg	22
メルタリーク量			Nm³/h	6.4
原料供給ﾉｽﾞﾙﾊﾟｰｼﾞ空気流量			Nm³/h	15
水スプレーパージエア量			Nm³/h	1.0
ｴｱﾌｨﾙﾑｸｰﾗｰ供給空気流量			Nm³/h	61.3

Table.　境界条件

項目			記号	単位	数値
主電極冷却部吸熱量	北側		q_N	kW/m²	389.6
	南側		q_S		384.8
原料溶融層境界条件	原料溶融層暑さ		L	m	0.105
	熱伝導率		K_S	W/mK	1.4
	原料溶融層吸熱量		Q_A	kw	14.77
プレナム空間境界条件	熱伝達率	天井面	α_{A1}	W/m²K	9.16
		東西面	α_{A2}		7.32
		南北面	α_{A3}		7.00
	空間内雰囲気温度		T_p	℃	165.7
溶融炉外壁面境界条件	熱伝達率	東面	α_{1E}	W/m2K	8.75
		西面	α_{1W}		8.54
		南面	α_{1S}		8.86
		北面	α_{1N}		8.27
		天井面	α_2		11.25
		底面	α_3		4.60
流下ノズル表面境界条件	熱伝達率		α_{N1}	W/m²K	13.46
流下ノズル孔境界条件	熱伝達率	天井面	α_{N2}	W/m²K	7.65
		側壁面	α_{N3}		14.05
	孔内雰囲気温度		T_{NP}	℃	40
外気温度			T_r	℃	22

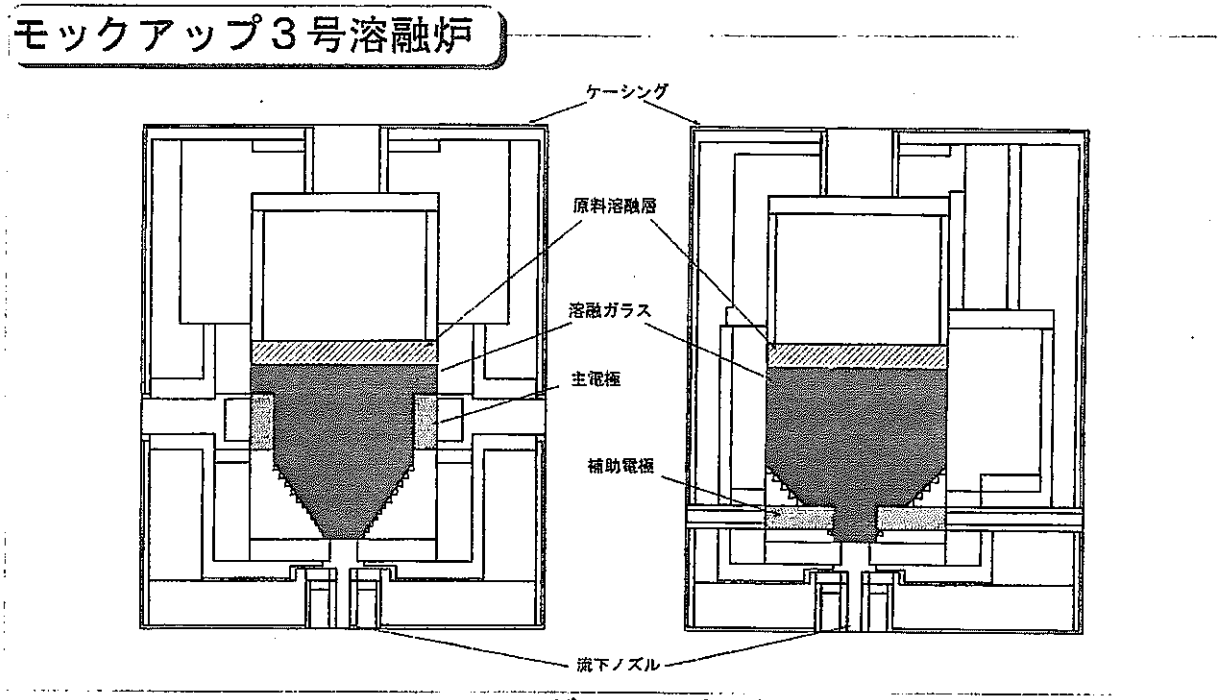


Fig.　ガラス溶融炉

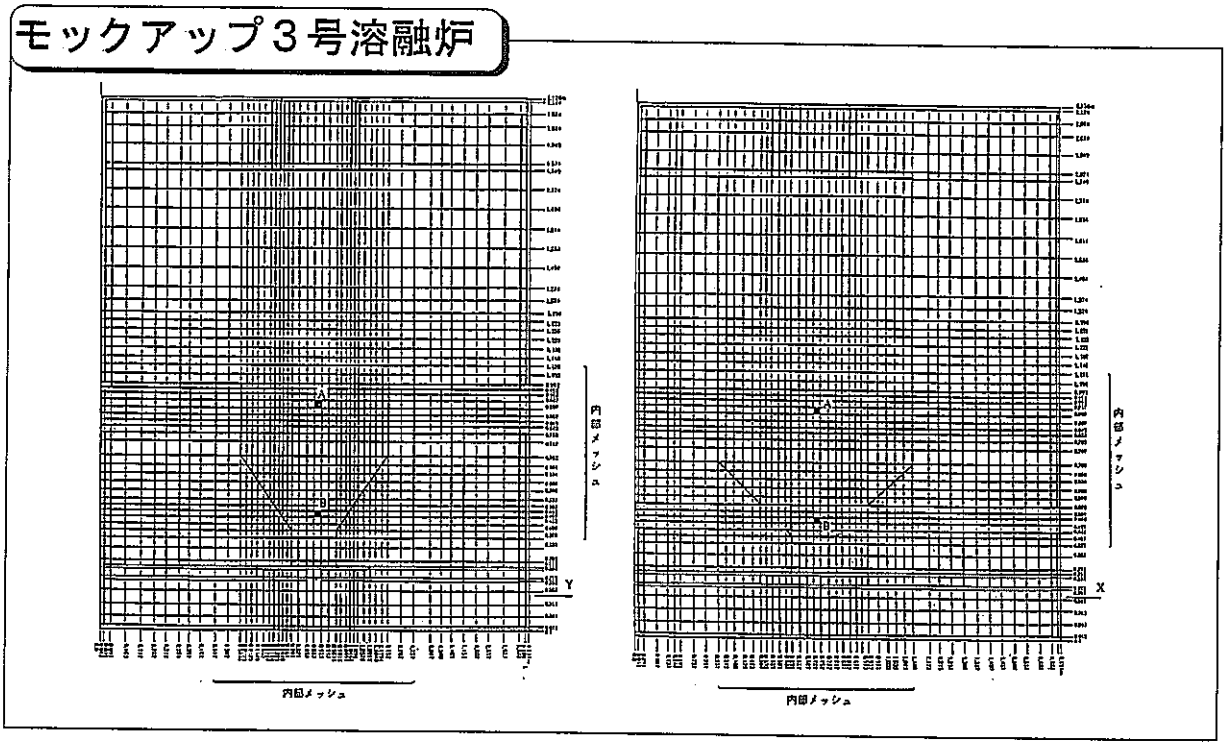


Fig.　メッシュ図

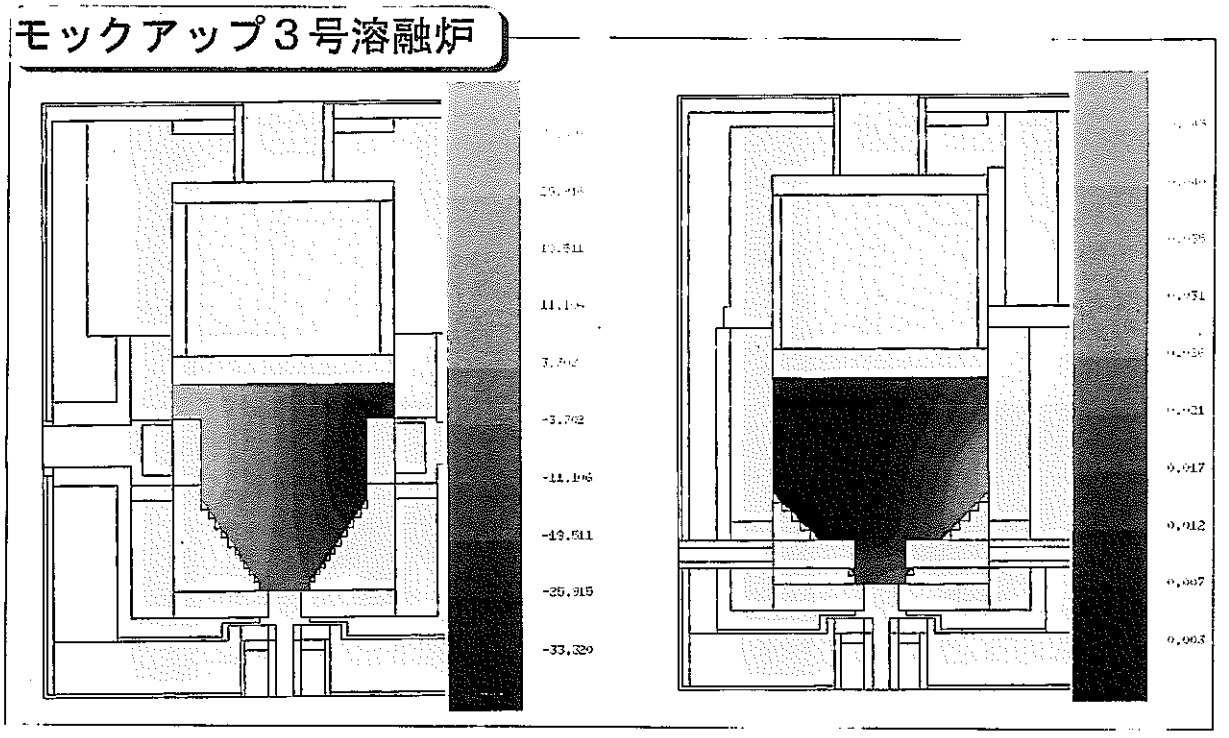


Fig.　電位分布図

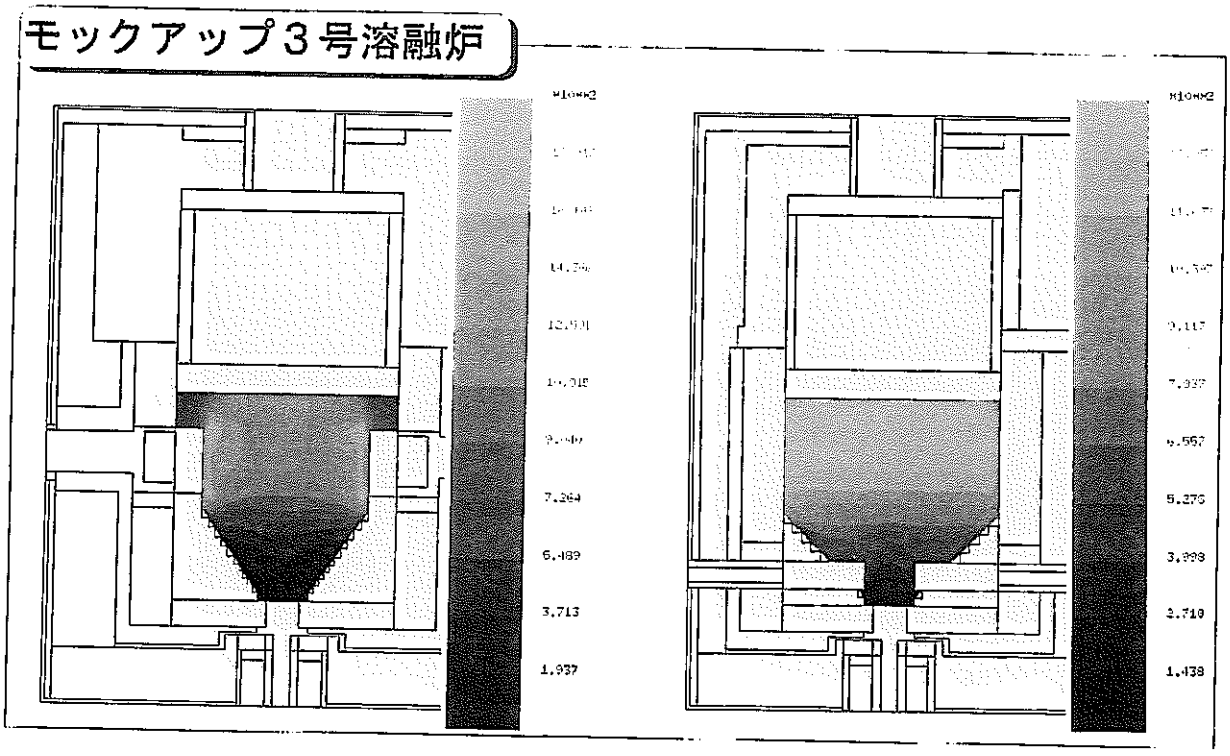


Fig.　電流密度分布図

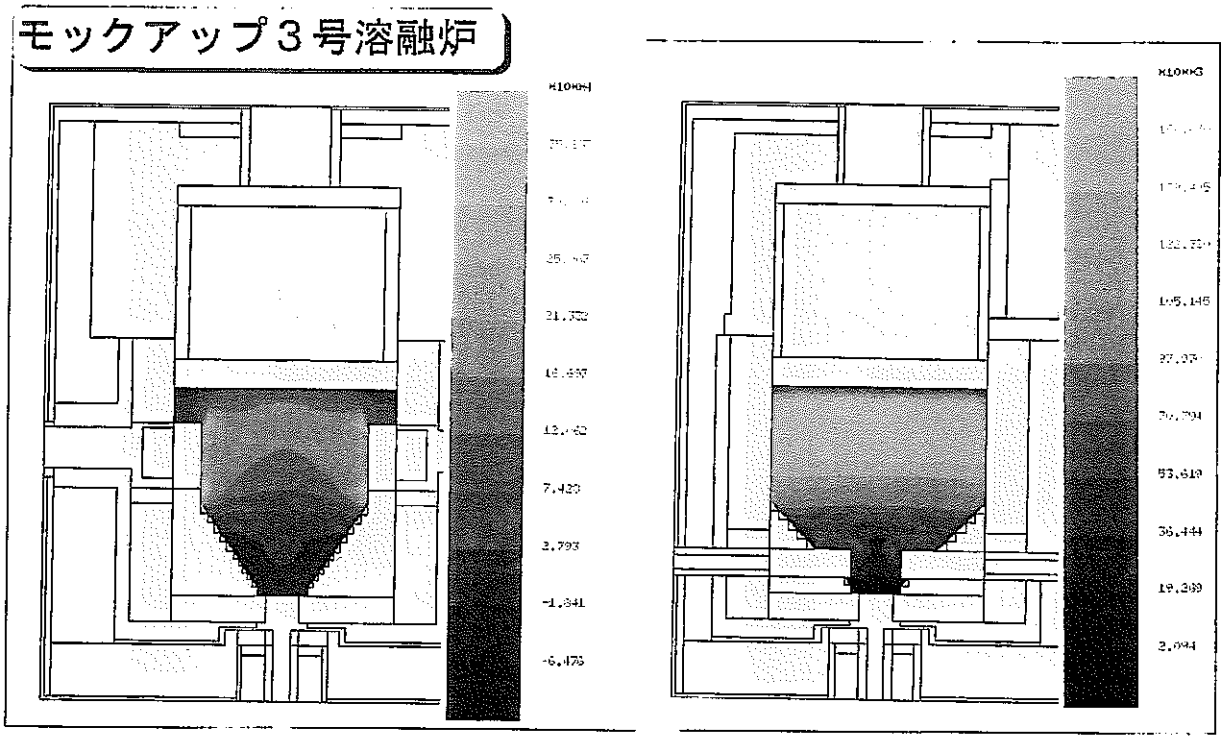


Fig.　発熱密度分布

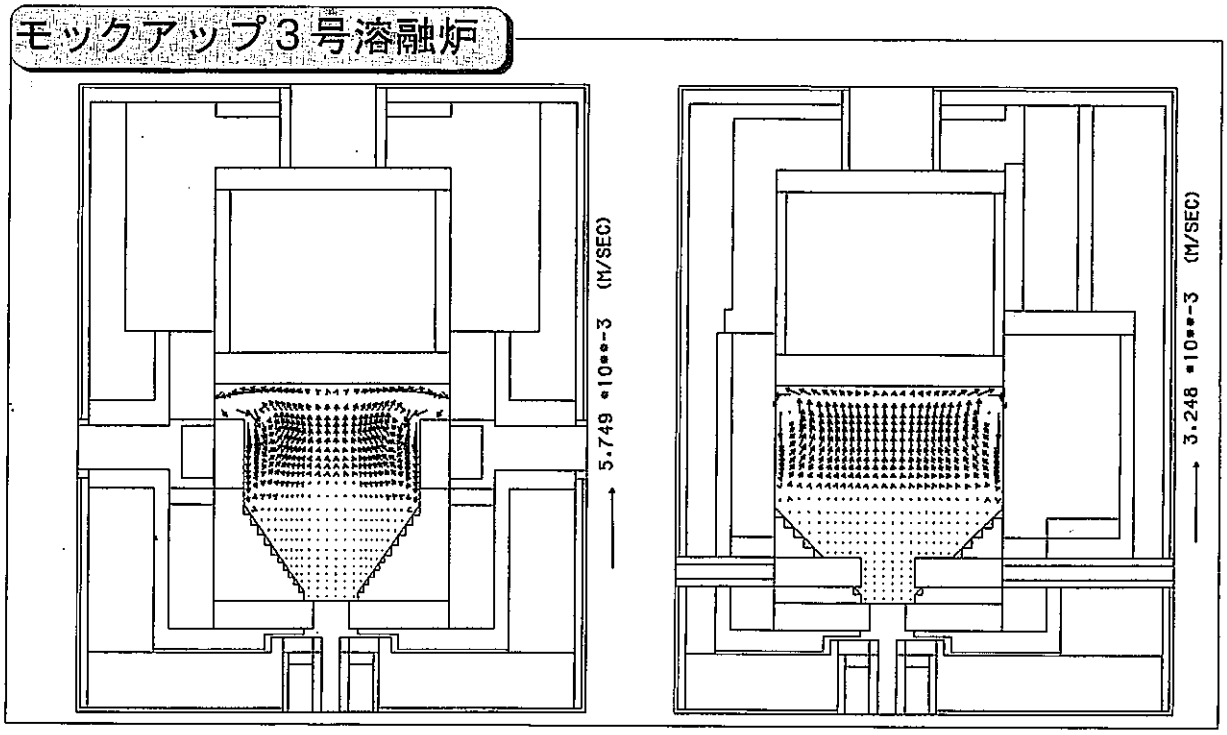


Fig.　流動ベクトル

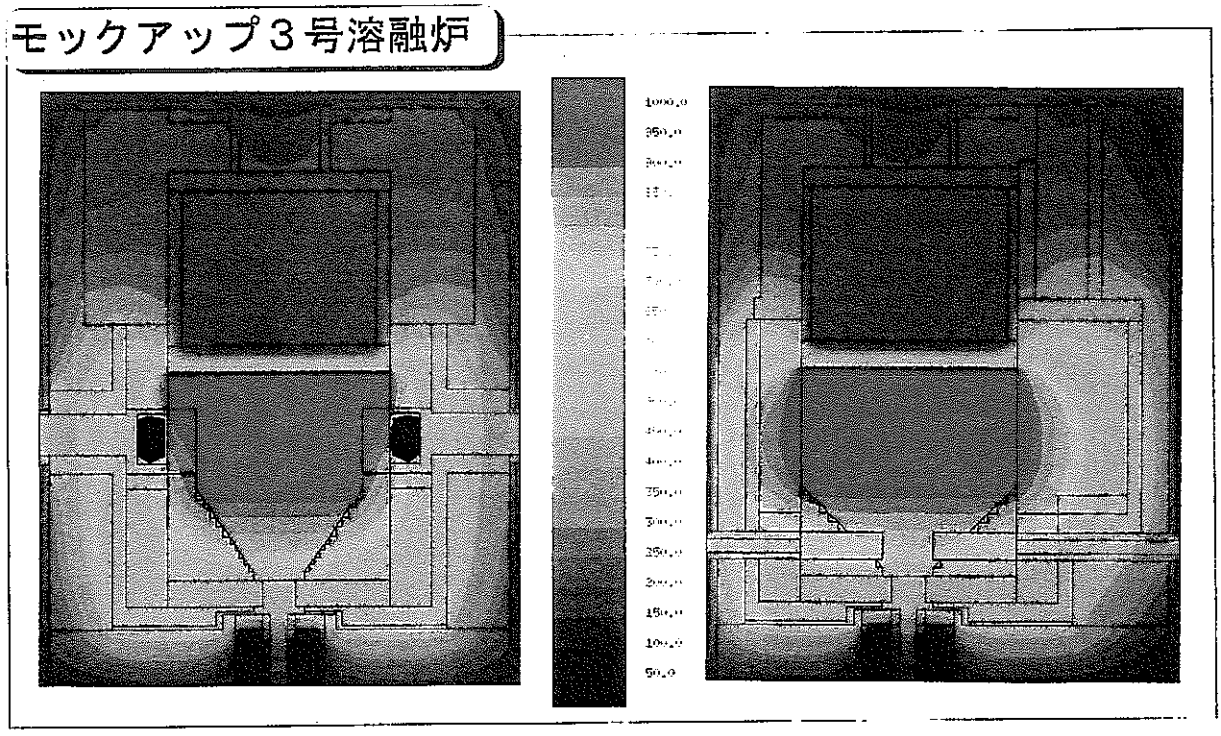


Fig.　温度分布図

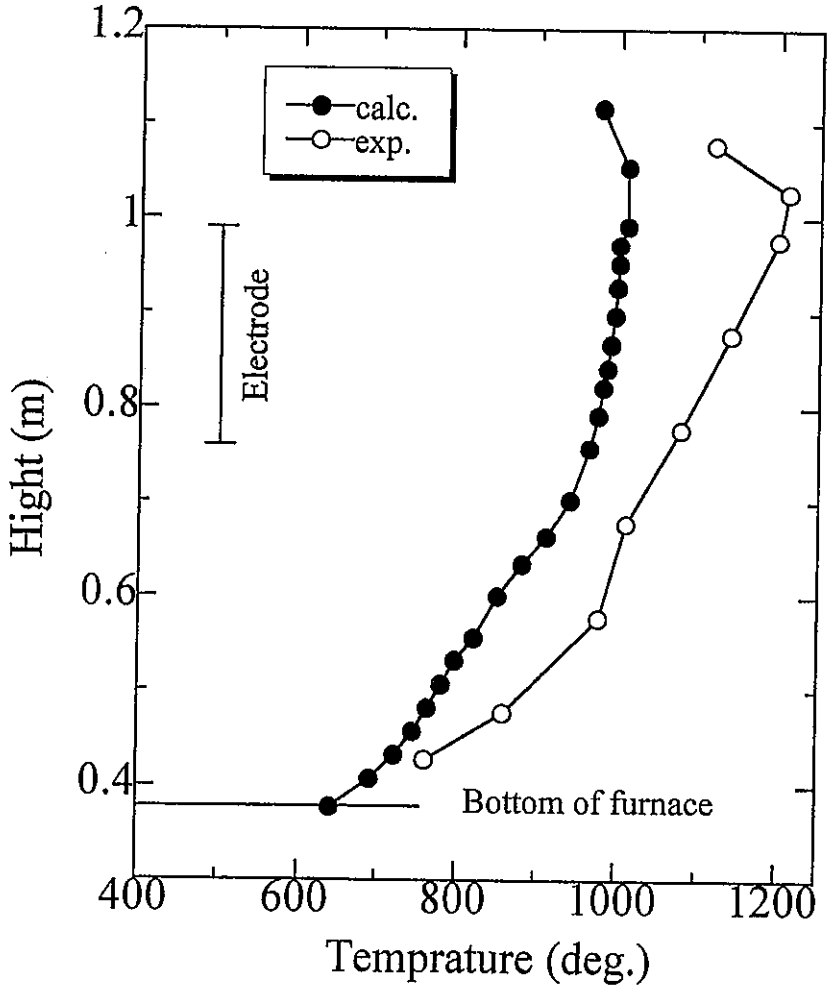


Fig.　炉内中心軸上の温度

〔7〕高温融体物性評価

高温溶融技術研究会

平成７年１０月６日

発表テーマ	高温融体物性評価		
発表者所属	環境技術開発部 環境技術第一開発室	発表者氏名	搗賢一

発表要旨

熱流動解析に必要なガラス物性値は密度，体膨張係数，熱伝導率，比熱，電気抵抗率，粘性係数である。

これらの物性値の測定法について，ＨＴＳ所有の測定装置，かつてＨＴＳで所有していた測定装置，今後導入を検討したい装置などとりまぜて，測定原理を紹介する。

密度測定方法：白金球つり下げ法，ガラス容量測定法(1)，(2)

体膨張係数算出方法：密度より算出

熱伝導率測定方法：レーザーフラッシュ法（石英セル使用型，縦置き型）

比熱：トリプルセル型ＤＳＣ法

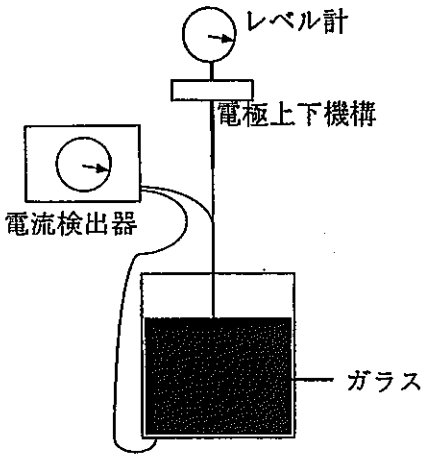
電気抵抗率：平行平板電極法

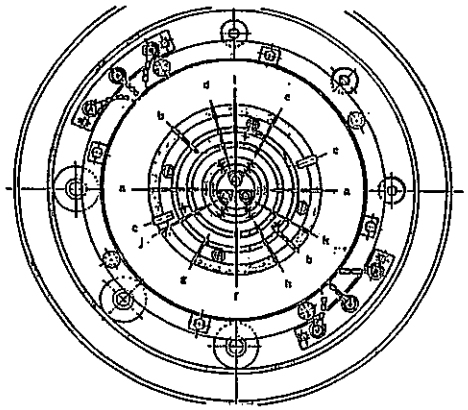
粘性係数：白金球引上げ法，平行板粘度測定法，回転円筒法

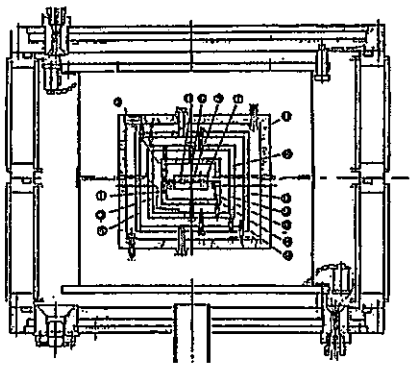
溶融ガラス中の酸素分圧を測定する方法として，酸素分圧センサの試作・測定を試みた。この酸素分圧センサの測定原理について紹介する。

融体の密度測定法(3)　ガラス容量測定法（2）

電流検出器につないだ電極を上下させ、ガラス融液に接することによりルツボ低部との間に電流が流れるレベルを測定しすることによって得たガラス容量から求める方法







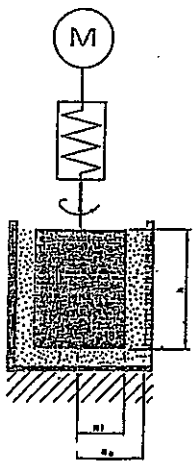
融体の粘度測定法(3)　回転円筒粘度測定法

$$D = \frac{2\omega \cdot R_a^2}{R_a^2 - R_i^2}$$

$$= \frac{\pi}{15} \frac{R_a^2}{R_a^2 - R_i^2} \times n$$

$$= M \times n$$

D：ずり速度（1/s）
R_i：ローターの半径（cm）
R_a：試料容器の半径（cm）
ω：角速度
n：内筒回転数
M：定数



融体の電気抵抗率測定法

円筒状の被測定物の上下両端に平行平板電極が設置された測定槽のセル定数Cは、幾何学的な寸法から計算できる。

$$C = l / S$$

l：電極間距離（m）
S：断面積（m^2）

融体の電気抵抗率Rは

$$R = R_m / C$$

R_m：測定抵抗（Ω）

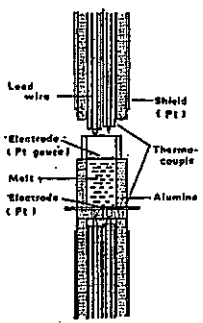


Fig. 1. Diagram of the conductivity cell arrangement.

PNC PN8440 95－044

高温融体物性評価

高温溶融技術研究会
1995年10月6日
捧　賢一
動力炉・核燃料開発事業団
東海事業所

Power Reactor and Nuclear Fuel
Development Corporation
PNC

高温融体物性評価

熱流動解析に必要な物性と測定法

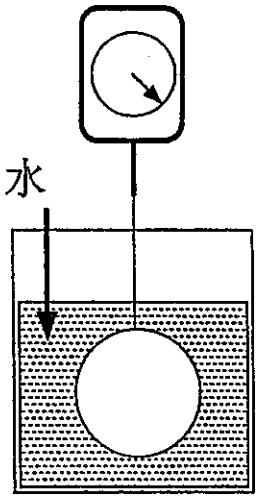
密度	ρ	kg/m^3
体膨張係数	β	1/K
熱伝導率	λ	W/m・K
比熱	Cp	J/Kg・K
電気抵抗率	R	Ω・m
粘性係数	μ	Pa・s

溶融ガラス中の酸素分圧測定

酸素分圧　Po_2　atm

融体の密度測定法(1)　白金球釣り下げ法

$$\rho = \frac{W_O - W_G}{\dfrac{W_O - W_W}{\rho_W}(1 + 3\alpha\Delta T)}$$

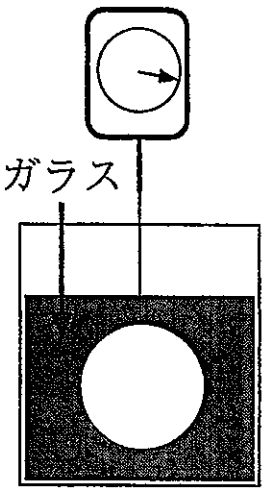


W_O：白金球重量（g）

α：白金の線膨張係数 10.2×10^{-6}／℃

ρ_W：水の密度（g/cm^3）

W_W：白金球の水中での重量（g）

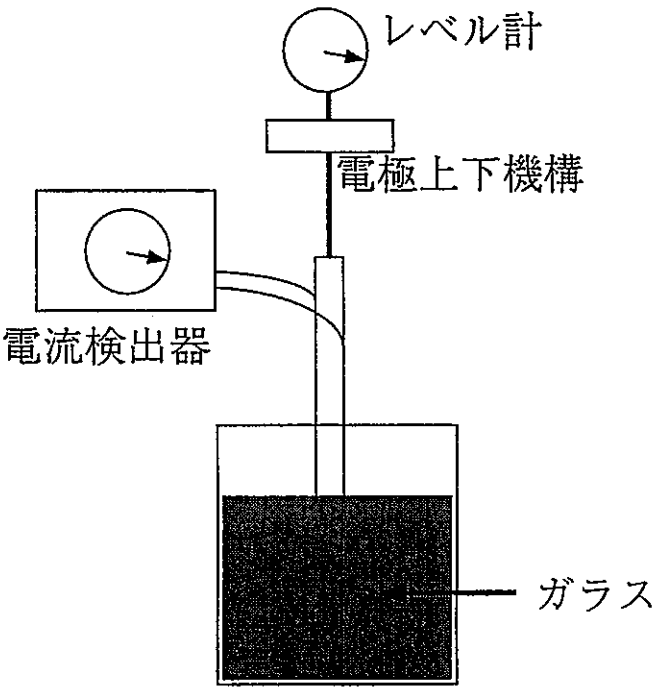


ΔT：溶融ガラス温度－水の温度

W_G：白金球の溶融ガラス中での重量（g）

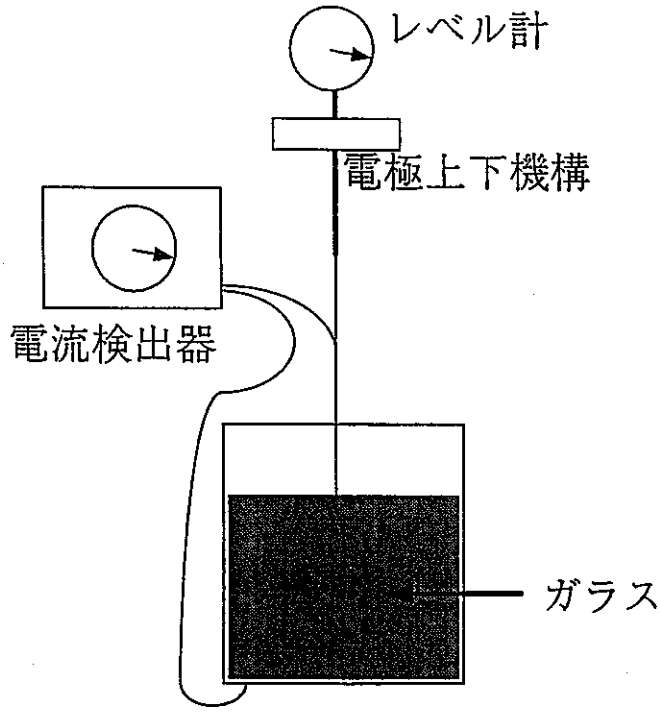
融体の密度測定法(2)　ガラス容量測定法（1）

電流検出器につないだ長さの等しい2本の電極を上下させ、ガラス融液に接することにより電流が流れるレベルを測定しすることによって得たガラス容量から求める方法



融体の密度測定法(3)　ガラス容量測定法（2）

電流検出器につないだ電極を上下させ、ガラス融液に接することによりルツボ低部との間に電流が流れるレベルを測定しすることによって得たガラス容量から求める方法



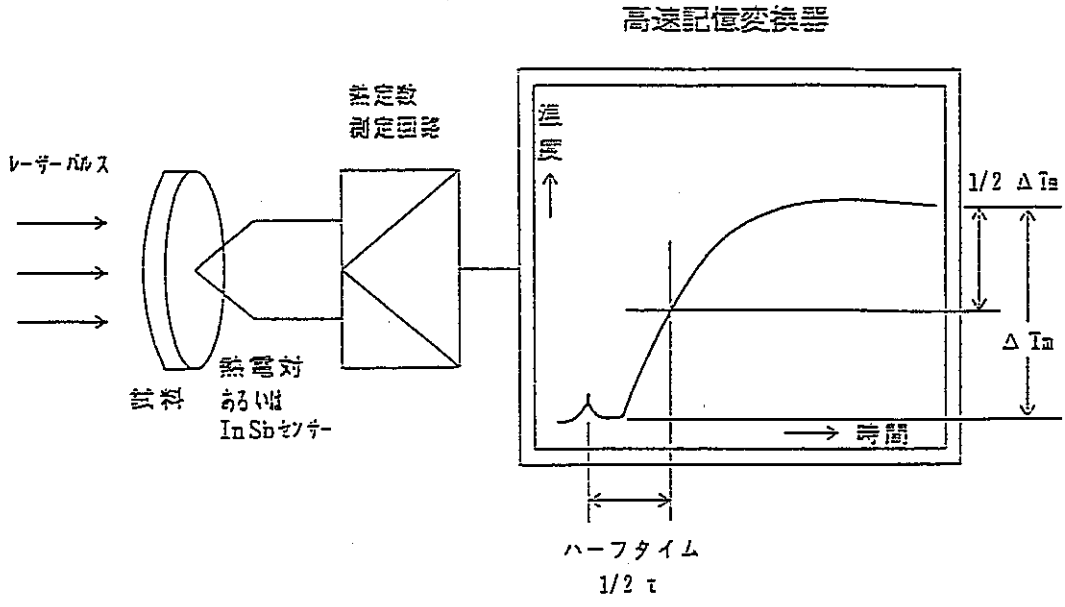
融体の体膨張係数算出法

$$\beta = \frac{(V - V_0)}{V_0 \theta}$$

V_0：0℃における体積（m^3）
V：θ℃における体積（m^3）

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{(\rho - \rho_0)}{\theta}$$

ρ_0：0℃における密度（kg/m^3）
ρ：θ℃における密度（kg/m^3）



図－1　　レーザーフラッシュ法の原理図

熱拡散率α（cm²/sec)は次式で表す事が出来る。

$$\alpha = 1.37 \frac{L^2}{\pi^2 \quad t1/2} \quad \text{----------} \quad (1)$$

ここでt１／２はレーザー照射後，試料の裏面温度が最高値ΔTmax の1/2に達するまでの時間（秒），Ｌは試料の厚さ（cm）。

次に試料の比熱と密度をＣp（cal/g,℃），ρ（g/cm³）とすると，試料がレーザービーム照射により吸収した熱量Ｑ（cal/cm²）が既知であれば

$$Q = Cp \cdot \rho \cdot L \cdot \Delta Tmax \quad \text{-------} \quad (2)$$

から試料の比熱と密度の積が求められる。

熱伝導率λ（cal/cm²,℃,sec）と熱拡散率α，比熱Ｃ，密度ρとの間には

$$\lambda = \alpha \times Cp \times \rho \quad \text{----------} \quad (3)$$

の関係があるから，（１），（２）式より熱伝導率を算出する事が出来る。

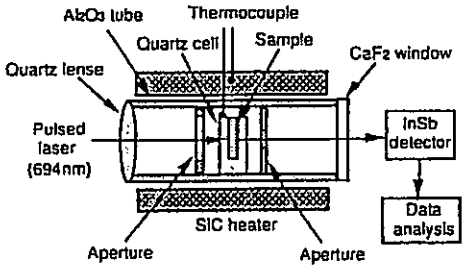


Fig. 1 Experimental setup for the measurement of the transient data.

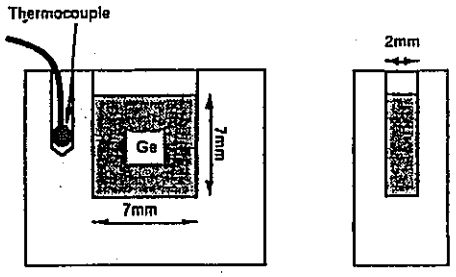


Fig. 2 Quartz cell and sample

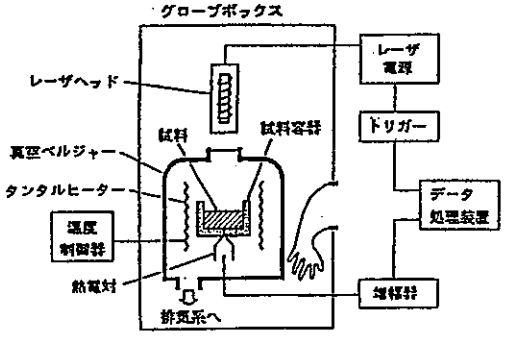


図 2　熱拡散率測定装置概略

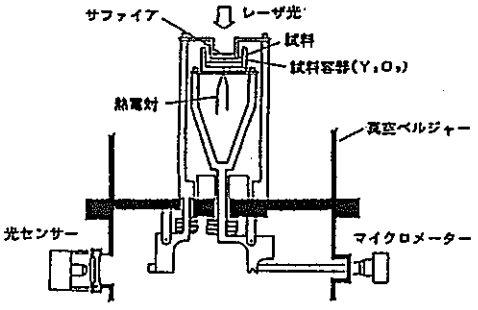


図 4　試料保持部構造

融体の比熱測定法　示差走査熱量計

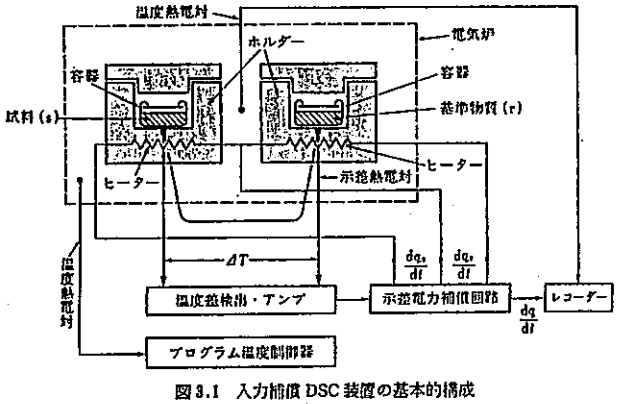


図 3.1　入力補償 DSC 装置の基本的構成

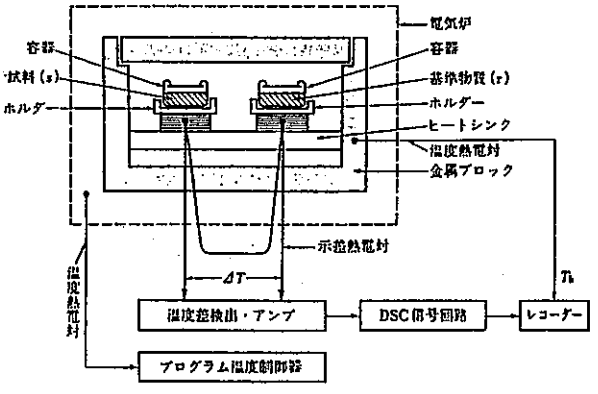


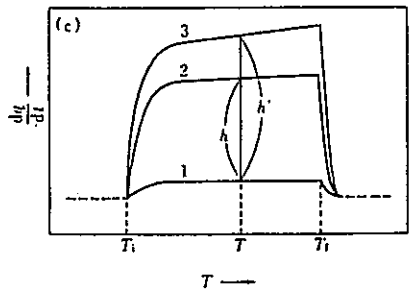
図 3.2　熱流束 DSC 装置の基本的構成

融体の比熱測定法　示差走査熱量計

$$\frac{dqo}{dt} = (Cso - Cro) \cdot \frac{dT}{dt}$$

$$\frac{dq}{dt} = \{(Cs + Cso) - Cro\} \cdot \frac{dT}{dt}$$

$$\frac{dq'}{dt} = \{(Csc + Cso) - Cr\} \cdot \frac{dT}{dt}$$

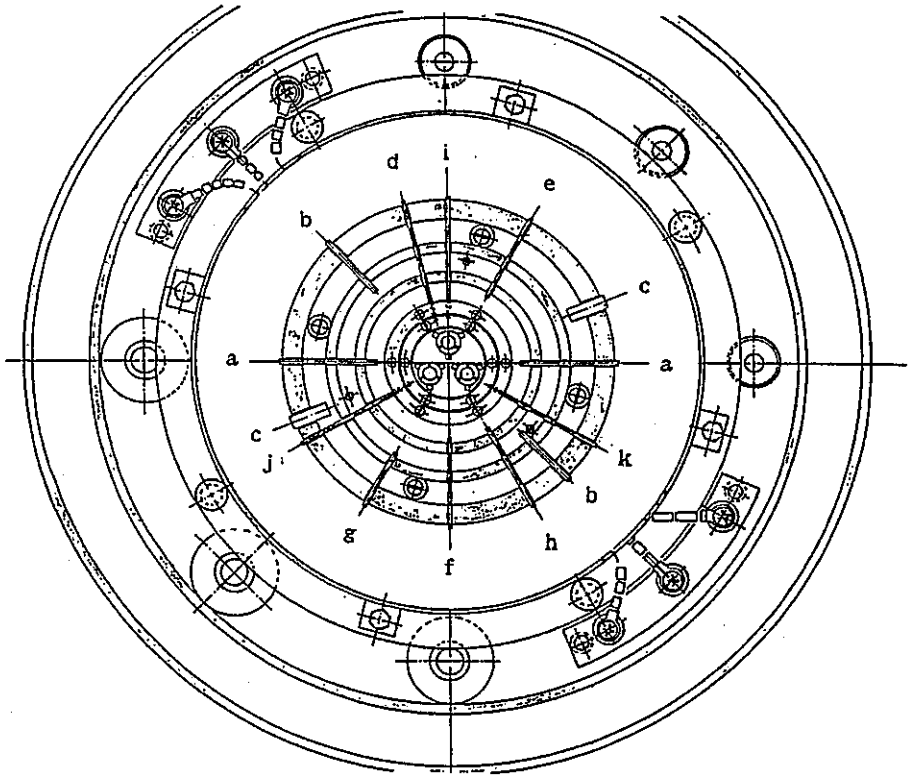


$$h = \frac{dq}{dt} \quad \frac{dqo}{dt} = Cs \cdot \frac{dT}{dt}$$

$$h' = \frac{dq'}{dt} \quad \frac{dqo}{dt} = Csc \cdot \frac{dT}{dt}$$

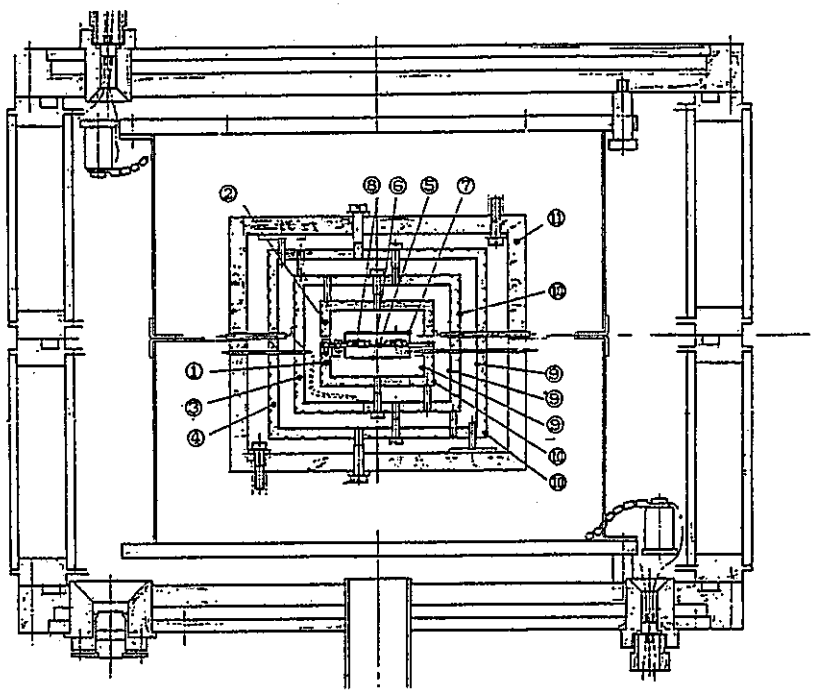
$$Cp = \frac{m'h}{mh'} Cp'$$

Cso：未知試料側試料容器の熱容量
Cro：基準物質側試料容器の熱容量
Cs：未知試料の熱容量
Csc：標準試料の熱容量
m：未知試料の重量
m'：標準試料の重量
Cp：未知試料の比熱
Cp'：標準試料の比熱



図－2　試料系の平面（断面）図

a：温度制御用ヒータ・リード、　b：ヒータ・リード、
c：ヒータ・リード、　d：断熱制御用熱電対、
e：断熱制御用熱電対、　f：断熱制御用熱電対、
g：断熱制御用熱電対、　h；温度制御用熱電対、
i：断熱用示差熱電対、　j：ダミー配線、
k：ダミー配線、



図－3　試料系の正面（断面）図

①定速昇温容器　②断熱容器A
③断熱容器B、　④断熱容器C、
⑤感温板、　⑥均熱容器（下部）、
⑦均熱容器（上部）、　⑧試料セル、
⑨内張り白金箔、　⑩ヒータ、
⑪断熱保温容器

融体の電気抵抗率測定法

円筒状の被測定物の上下両端に平行平板電極が設置された測定槽のセル定数Cは、幾何学的な寸法から計算できる。

$$C = l / S$$

l：電極間距離（m）
S：断面積（m^2）

融体の電気抵抗率Rは

$$R = R_m / C$$

R_m：測定抵抗（Ω）

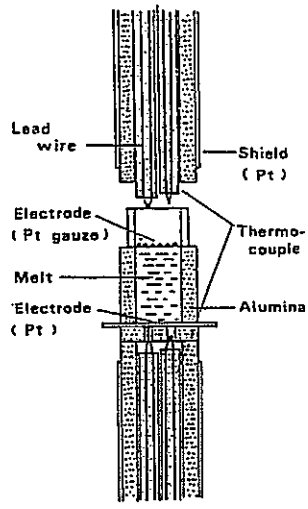
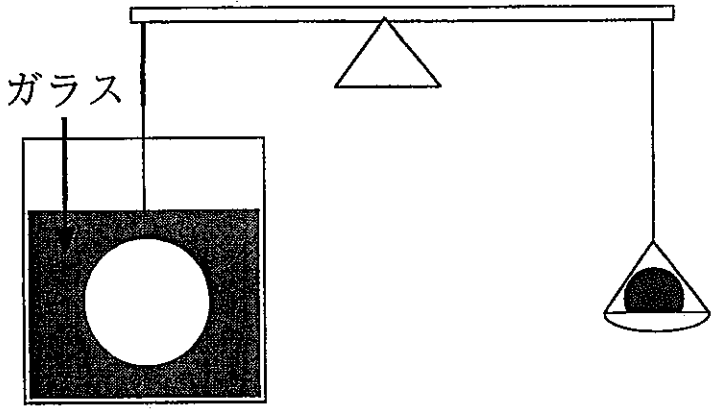


Fig. 1. Diagram of the conductivity cell arrangement.

融体の粘度測定法(1)　白金球引き上げ法

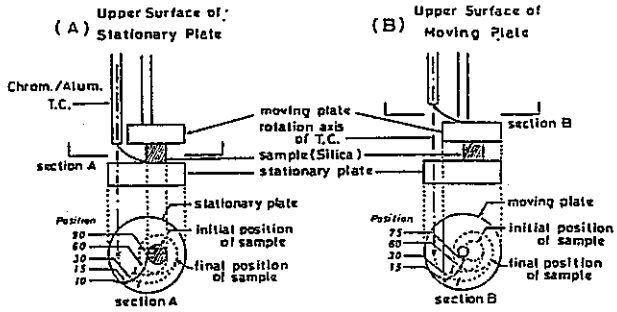
$$\mu = \frac{2}{9} g r^2 \frac{\rho_k - \rho_l}{v}$$

μ：粘度（poise）
g：重力加速度（cm/s^2）
r：球の半径（cm）
v：球の速度（cm/s）
ρ_k：球の密度（g/cm^3）
ρ_l：融液の密度（g/cm^3）

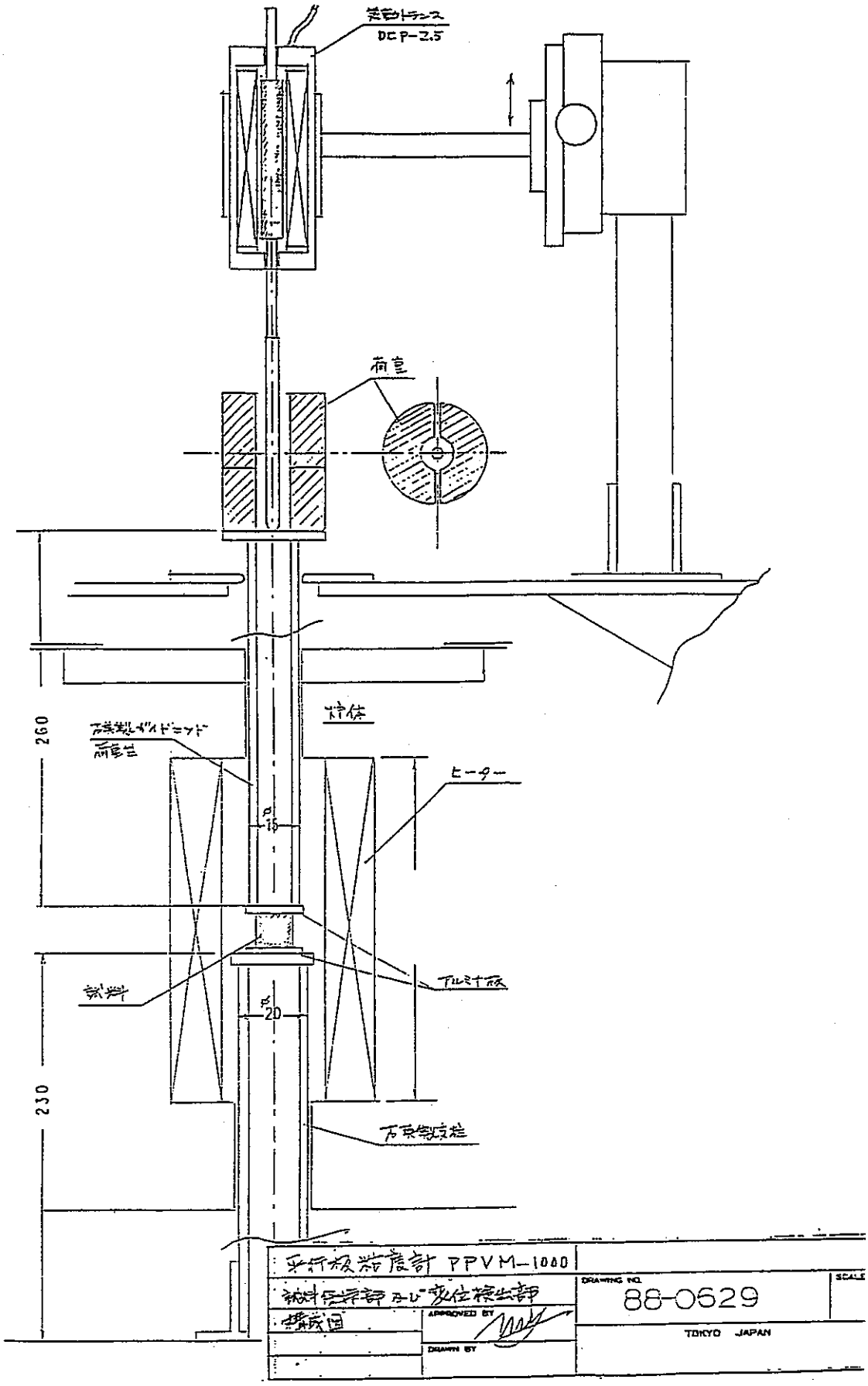


融体の粘度測定法(2)　平行板粘度測定法

$$\mu = \frac{2\pi M g H^{5}}{3V\,(-dH/dt)\,(2\pi H^{3}+V)}$$



μ：粘度（poise）
M：荷重（g）
g：重力加速度（cm/s ^{2}）
H：円柱状試料の高さ（cm）
V：試料体積（cm ^{3}）
dH／dt：試料変形速度（cm/s）

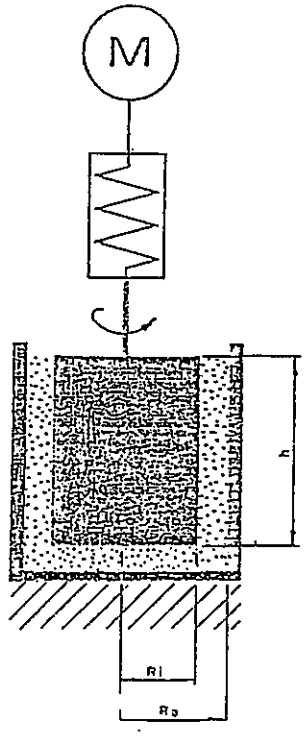

DCP-2.5
荷重
260
ヒーター
φ15
φ20
230
TOKYO JAPAN
88-0629

融体の粘度測定法(3)　回転円筒粘度測定法

$$D = \frac{2\omega \cdot R_a^2}{R_a^2 - R_i^2}$$

$$= \frac{\pi}{15} \cdot \frac{R_a^2}{R_a^2 - R_i^2} \times n$$

$$= M \times n$$



D：ずり速度（1/s）
R_i：ローターの半径（cm）
R_a：試料容器の半径（cm）
ω：角速度
n：内筒回転数
M：定数

融体の粘度測定法(3)　回転円筒粘度測定法

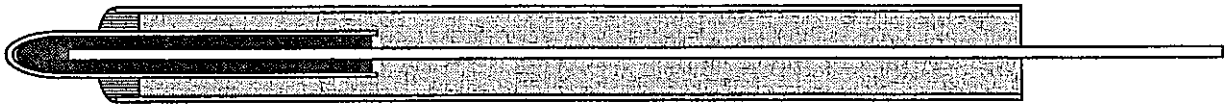
$$\tau = \frac{p}{2\pi \cdot h \cdot R_i^2} = \frac{1}{2\pi \cdot h \cdot R_i^2} \times p$$

$$f \times p = f \times \frac{p}{S} \times S = A \times S$$

D：ずり速度（1/s）
τ：ずり応力（dyne/cm）
μ：粘度（poise）
R_i：ローターの半径（cm）
h：内筒の高さ
f：ローター寸法から決まる定数
A：トルク変換ファクターを加味した定数
p：回転モーメント
S：電気信号値としてでてくるトルク値

$$\mu = \frac{\tau}{D}$$

溶融ガラス中の酸素分圧測定法　ジルコニア酸素センサ



Mo／(80wt%Mo+20wt%MoO_2)／(ZrO_2+9mol%MgO)／Pt〔gas(P O_2)〕

$$E=\frac{RT}{4F}\cdot\ln\frac{Po_2(gas)}{Po_2(Mo+MoO_2)}$$

$$\log Po_2=\frac{385.9*(Em-22.1+0.04T)\ +\ (169.2T-576100)}{19.14T}$$

〔8〕電鋳レンガの耐食性

高温溶融技術研究会

平成７年１０月６日

発表テーマ	電鋳レンガの耐蝕性		
発表者所属	環境技術第一開発室	発表者氏名	正木　敏夫

発表要旨

1　緒言

高放射性廃液ガラス固化用溶融炉の接液耐火物材料として，現在はクロミア・アルミナ系電鋳耐火物*)である MONOFRAX K3®が耐食性の観点から実用化されている。本研究ではガラス溶融炉の高性能化を図るため，耐食性の向上，耐熱衝撃性の改善，並びに直接通電ジュール加熱方式のガラス溶融炉で使用可能な電気抵抗特性を持つ電鋳耐火物の開発を行い，その特性を評価した。

2　開発品の特性

開発品と MONOFRAX K3®の化学組成，鉱物組成をTable 1 に，そのほかの特性値をTable 2 に示した。溶融ガラスに対する耐食性は耐火物中の Cr_2O_3含有量と相関を示し，特に Cr_2O_3が 60 wt.%以上でその効果が著しいことが判明した。開発品の耐食性は MONOFRAX K3®に比較して３～４倍の性能が期待できる結果となった。

耐熱衝撃性は，耐火物材料にとって重要とされる損傷抵抗 R''''によって評価するため，物性値から計算される理論抵抗係数[1]と輻射急熱法[1]の２評価方法を実施した。この結果，開発品の損傷抵抗 R''''は MONOFRAX K3®よりも２～３倍の高い耐熱衝撃性を有すると判断された。

電気抵抗特性は，Cr_2O_3 含有量の他，粒界，構成相の酸化状態などに影響される。このため開発品は，粒界で電気的に活性となるアルカリ成分を極力排除するとともに，製造過程で構成相の酸化度が低下しないよう，酸化剤として作用する MnO_2 を原料中に添加した。これによって開発品の電気抵抗は，900 ～1200℃のガラス溶融温度域で動燃ガラスの10倍以上の電気比抵抗を示し，直接通電ジュール加熱方式のガラス溶融炉で使用できる性能が得られた。

*)　Fused cast refractory

[1]　J.Nakayama, " Fracture Mechanics of Ceramics ", Edited by R.C.Bradt, D.P.H. Hasselman and F.F. Lange, Plenum Publishing Corp. N.Y. p.759, (1973).

Table 1 Chemical composition, phase construction of new chromia fused cast refractory and MONOFRAX K3®

	New Composition	MONOFRAX K3®
Cr_2O_3	60.4	27.3
Al_2O_3	31.9	58.3
Fe_2O_3	----	6.0
MgO	3.8	6.0
MnO	2.3	----
CaO	0.3	0.5
SiO_2	1.3	1.5
TiO_2	----	0.1
(Wt.%)		
Al_2O_3-Cr_2O_3 s.s.*1	60	65
Spinel*2	39	34
Glassy phase, etc.	1	1
(Vol.%)		

*1 Solid solution *2 $(Mg,Fe,Mn)(Al,Cr)_2O_4$

Table 2 Some properties of new composition refractory and MONOFRAX K3®

	New Composition	MONOFRAX K3®
Bulk density (g/cm^3)	4.15	3.80
Apparent density (g/cm^3)	4.54	3.97
Apparent porisity (%)	8.5	4.3
Modulus of rupture S (Kg/cm^2)	473	755
Young's modulus E (10^6 Kg/cm^2)	1.9	2.6
Poisson's ratio ν	0.21	0.21
Fracture energy γ (J/m^2)	24.8	13.2
Thermal expansion coefficient α (10^{-6} °C^{-1})	7.73	8.04
Thermal shock fracture resistance parameter*1 R (°C)	24.6	28.0
Thermal shock damage resistance parameter*2 R"" (cm)	0.275	0.079
Corrosion factor static condition*3	0.301	1.000
dynamic condition*4	.0.231	1.000
Electrical resistivity*5 at 1000 °C (Ohm-cm)	136	478
1200 °C	55	180

*1 $R=S(1-\nu)/E\alpha$ *2 $R''''=E\gamma/S^2(1-\nu)$ *3 1250°C,720 hrs.
*4 1250°C,336 hrs.,50 r.p.m.
*5 Electrical resistivity of PNC glass is 10 ohm-cm at 1000°C and 4 ohm-cm at 1200°C.

電鋳レンガの耐蝕性

平成7年10月6日

高温溶融技術検討会

環境技術開発部　環境技術第一開発室

新耐火物材料の開発目的

1.　ガラス溶融炉の長寿命化

2.　ガラス溶融炉の運転裕度の向上

→　溶融ガラス中での耐食性および耐熱衝撃性に優れた耐火物材料の開発

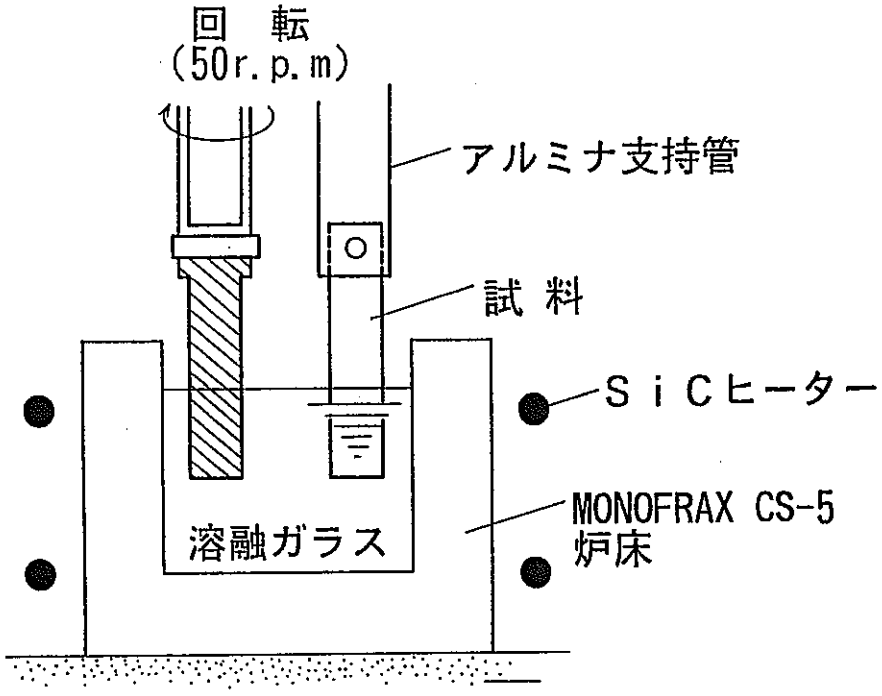
高放射性廃液ガラス固化用溶融炉のガラスコンタクト材料使用状況

（'90 現在）

国	機関	溶融炉	耐火物材料
米国	PNL	RLFCM	MONOFRAX K3
	SRP	SGM	MONOFRAX K3
	WVDP	SFCM	MONOFRAX K3
西独	PAMELA	K－5	ER－2161
	KfK	K－W2	ER－2161
日本	動燃	モックアップ3号	MONOFRAX K3

商用電気鋳耐火物の代表例

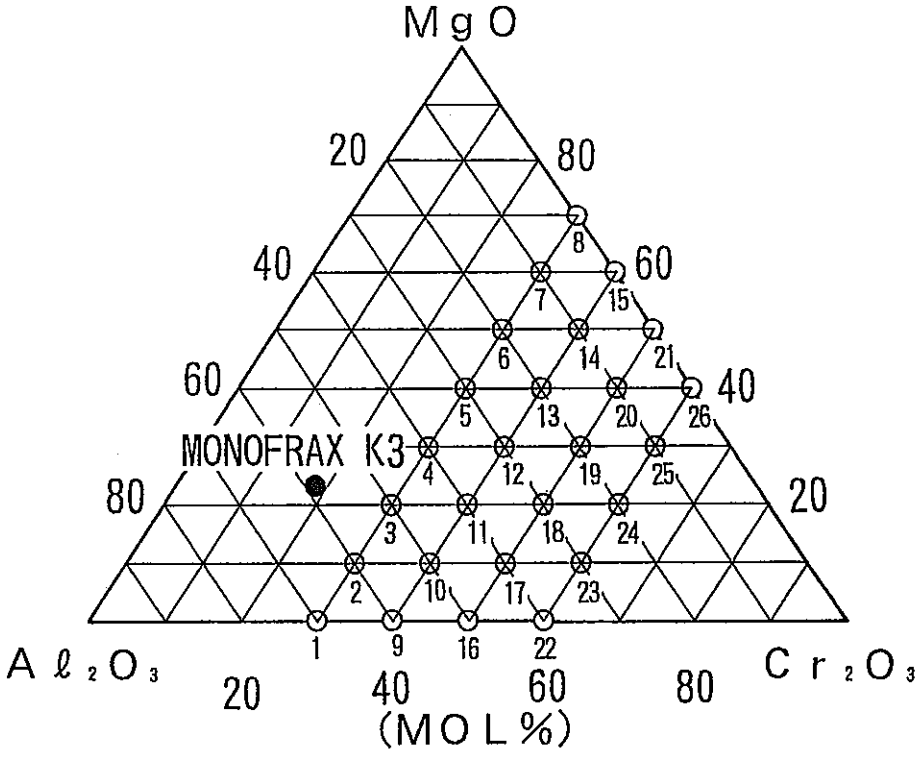
製品名	主成分	主構成相
MONOFRAX E	Cr_2O_3, Al_2O_3 MgO, Fe_2O_3	スピネル R_2O_3 固溶体
MONOFRAX K3	Al_2O_3, Cr_2O_3 MgO, Fe_2O_3	スピネル R_2O_3 固溶体
MONOFRAX Z	ZrO_2	ジルコニア
MONOFRAX CS5	Al_2O_3, ZrO_2 SiO_2	コランダム ジルコニア、ガラス
ER－2161	Al_2O_3, Cr_2O_3 ZrO_2, SiO_2	R_2O_3 固溶体 ジルコニア、ガラス

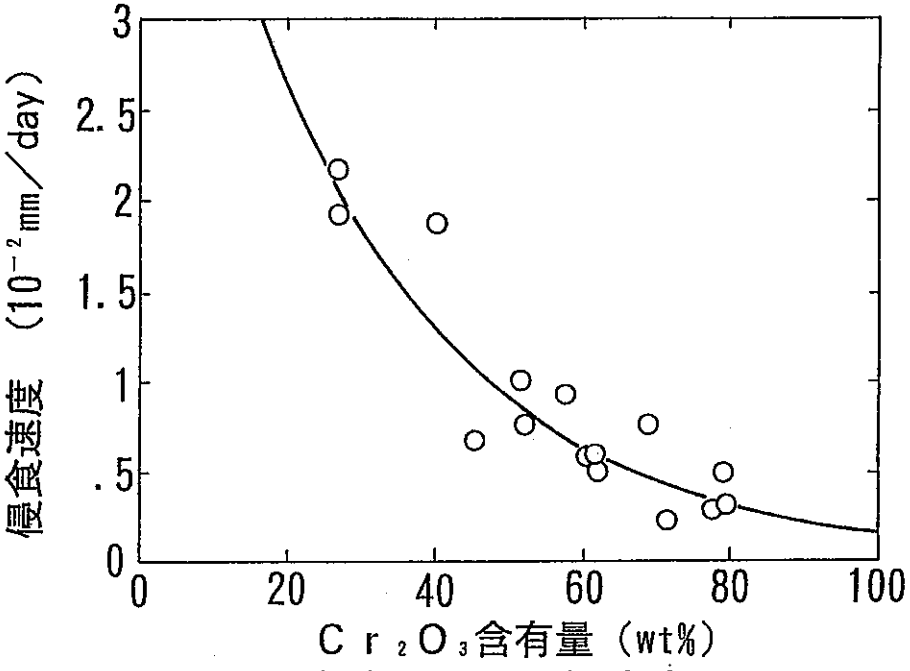


耐火物材料侵食試験装置

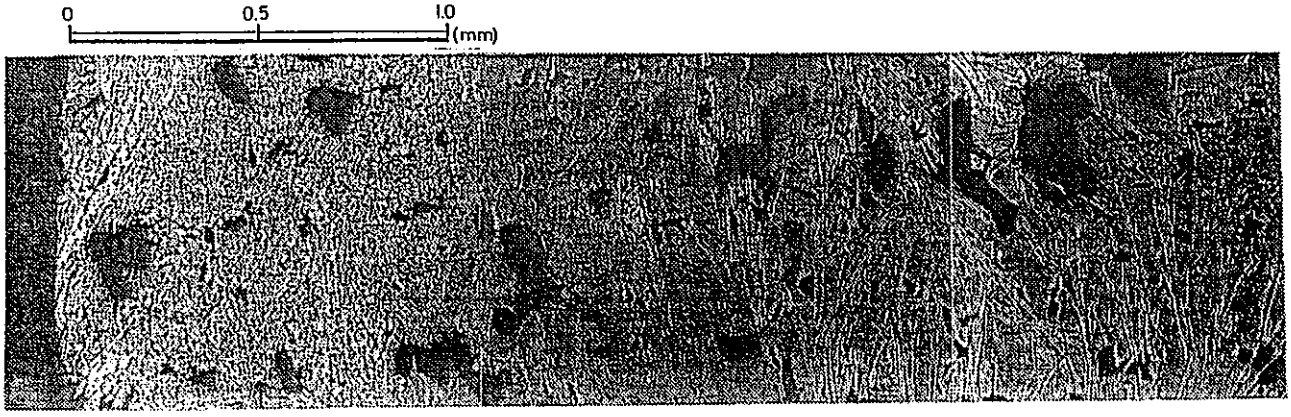
商用耐火物材料の侵食試験結果

製品名	主成分	主構成相	侵食速度 (10^{-2}mm/d)	
			静的条件 1250℃ 720hrs	動的条件 1250℃ 336hrs 50rpm 回転
MONOFRAX E	Cr_2O_3, $A\ell_2O_3$ MgO, Fe_2O_3	スピネル R_2O_3固溶体	0.33	測定限界以下
MONOFRAX K3	$A\ell_2O_3$, Cr_2O_3 MgO, Fe_2O_3	スピネル R_2O_3固溶体	1.92	2.14
MONOFRAX Z	ZrO_2	ジルコニア	5.67	8.39
MONOFRAX CS5	$A\ell_2O_3$, ZrO_2 SiO	コランダム ジルコニア、ガラス	9.84	20.36
ER-2161	$A\ell_2O_3$, Cr_2O_3 ZrO_2, SiO_2	R_2O_3固溶体 ジルコニア、ガラス	2.33	7.14

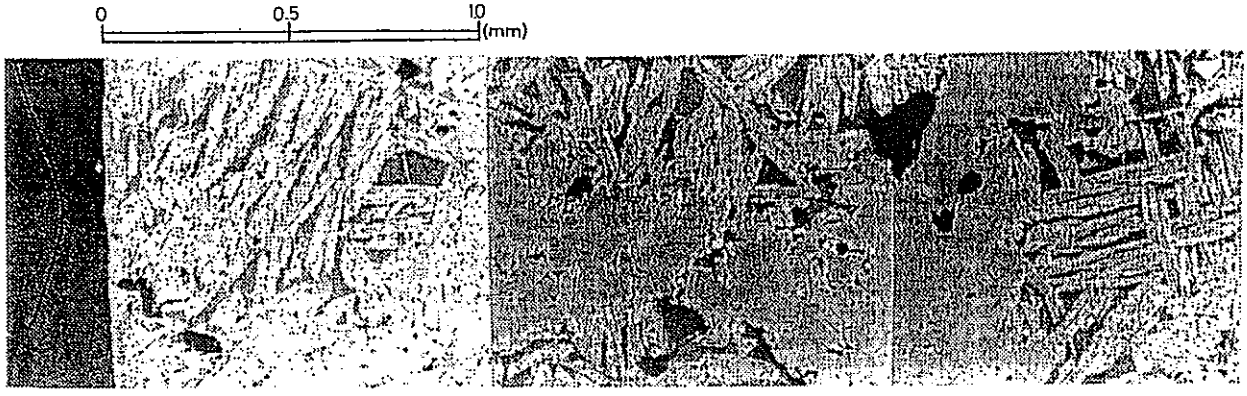




Cr₂O₃含有量と浸食速度との関係



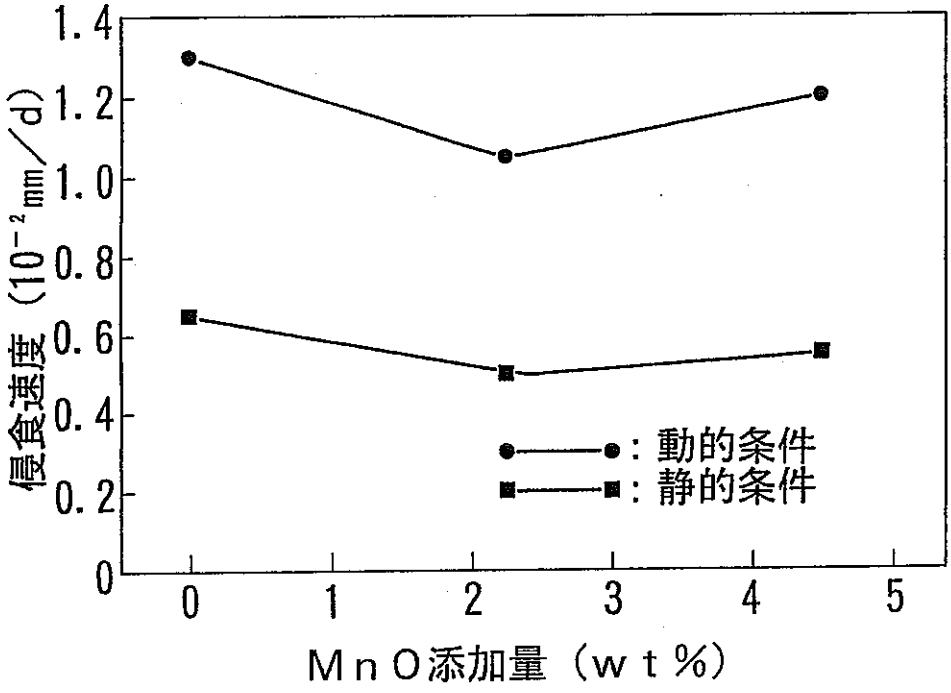
Reflective microphotograph of No. 4
after static corrosion test



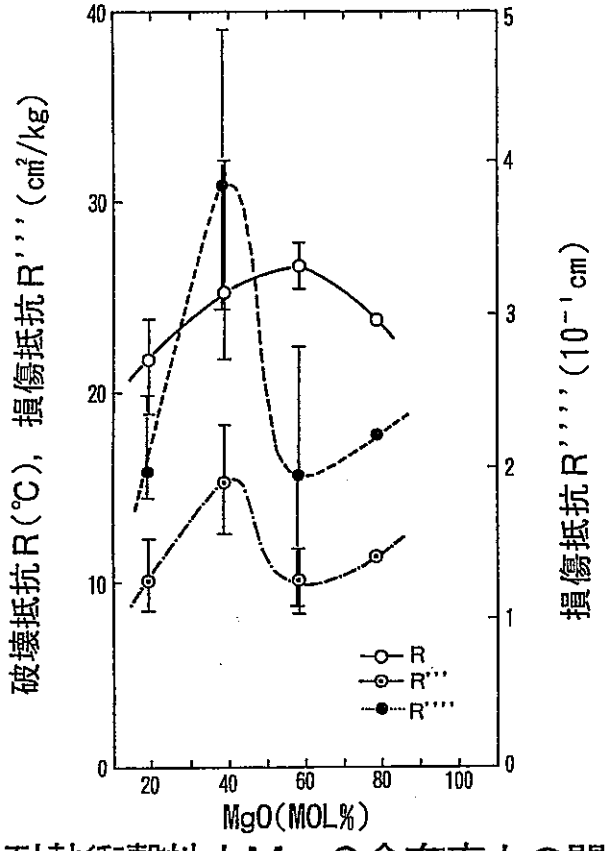
Reflective microphotograph of No. 23
after static corrosion test

$MgO-Al_2O_3-Cr_2O_3$系試作試料の侵食形態

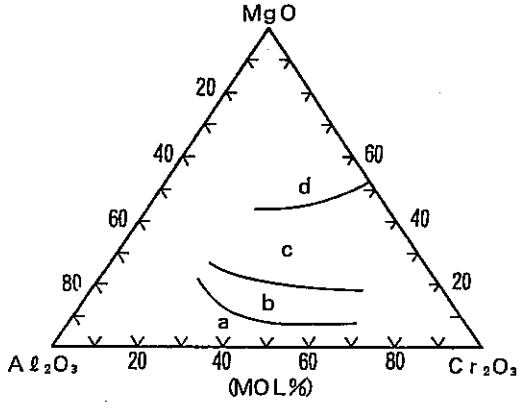
Cr_2O_3 含有量	侵　食　反　応
60%以下	Al_2O_3，MgO成分の溶脱による組織の破壊。ガラスおよびガラス二価成分の侵入による二次微小スピネルの形成。
60%以上	Al_2O_3，MgO成分とガラス二価成分の置換反応により，ガラス界面に緻密な二次スピネル層の形成。



マンガン添加の効果

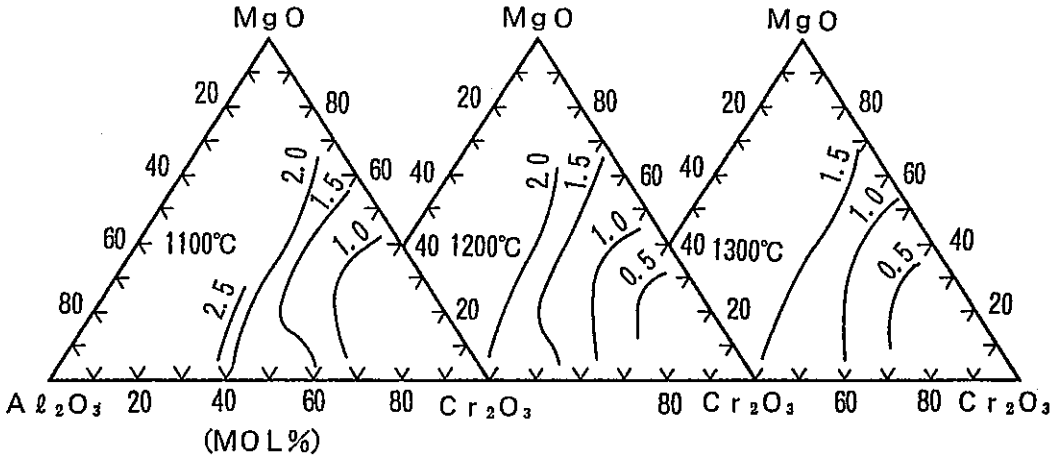


耐熱衝撃性とＭｇＯ含有率との関係



ａ：貫通クラック
ｂ：クラック無し
ｃ：表面クラック
ｄ：貫通クラック、表面クラック

Al_2O_3－Cr_2O_3－MgO３成分系での
試験試料の状態



電気比抵抗(log Ωcm)の化学組成、
温度による依存性

新耐火物材料とMONOFRAX K3 の化学組成、構成相

	新耐火物材料	MONOFRAX K3
Cr_2O_3	60.4	27.3
$Aℓ_2O_3$	31.9	58.3
Fe_2O_3	———	6.0
MgO	3.8	6.0
MnO	2.3	———
CaO	0.3	0.5
SiO_2	1.3	1.5
TiO_2 (wt%)	———	0.1
$Aℓ_2O_3-Cr_2O_3$ 固溶体	60	65
スピネル*1	39	34
ガラス相 (vol%)	1	1

*1 $(Mg,Fe,Mn)_2(Aℓ,Cr)O_4$

新耐火物材料とMONOFRAX K3の特性

	新耐火物材料	MONOFRAX K3
嵩密度 (g/cm³)	4.15	3.80
真密度 (g/cm³)	4.54	3.97
気孔率 (%)	8.5	4.3
曲げ強度 S (kg/cm²)	473	755
ヤング率 E (10^6 kg/cm²)	1.9	2.6
ポアソン比 ν	0.21	0.21
破壊靱性 γ (J/m²)	24.8	13.2
熱膨張率 α (10^{-6}℃$^{-1}$)	7.73	8.04
破壊抵抗*1 R (℃)	24.8	28.0
損傷抵抗*2 R"" (cm)	0.275	0.079
侵食量比		
静的条件	0.301	1.000
動的条件	0.231	1.000
電気比抵抗*3 at 1000℃ (Ohm-cm)	136	478
1200℃	55	180

*1 $R=S(1-\nu)/E\alpha$　*2 $R''''=E\gamma/S^2(1-\nu)$
*3 溶融ガラス電気比抵抗 10 ohm-cm (1000℃)
4 ohm-cm (1200℃)

ま　と　め

1. 開発した耐火物材料は、MONOFRAX K3 と比較して、耐食性は 3 ～ 4 倍、耐熱衝撃性は 2 ～ 3 倍の性能が得られた。

2. 開発した耐火物材料は、ジュール加熱方式のガラス溶融炉で使用できる電気抵抗特性を有している。

〔9〕溶融ガラス中の腐食メカニズム（Cr酸化物皮膜）、
電流密度／腐食の関係

高温溶融技術研究会

平成７年10月６日

発表テーマ	溶融ガラス中の腐食メカニズム（Ｃｒ酸化物皮膜）、電流密度／腐食の関係		
発表者所属	東海事業所 環境技術開発部 環境技術第一開発室	発表者氏名	米澤　重晃

発表要旨

【序論】ガラス溶融炉内では、高温の溶融ガラスによって電極は運転条件に応じた侵食を受ける。ガラス溶融炉の安全な運転確保の面から、電極材料の侵食量に基づき電極寿命を正確に評価することが重要である。

【実験】実験装置を図１に示す。電気炉内におかれた坩堝に模擬ガラスを満たし、その中に inconel690 の棒状電極を、電極の角に電流が集中することを防ぐため先端を坩堝に埋め込んで設置した。溶融ガラス温度は炉内雰囲気温度を制御することで所定の温度とした。電極に電極表面電流密度が 0～1.2A/cm^{2}となるよう交流電流を通電し、21 日間保持した。通電後の電極を取り出し、電極の直径をマイクロメータで測定し、試験前後での差から侵食量を求めた。さらに電極表面およびガラス中の元素分布を SEM/EPMA で分析した。

【結果】電極表面には Cr_2O_3 およびスピネル型複合酸化物が観察されたが、表面全体を覆うものではなく結晶が点在していた。電極表面近傍に多数のボイドが形成され、連結しているものがあった。電流密度および温度が高いものほどボイドの数ならびに直径は増大した。電極侵食深さは、電流密度 0.42～0.6A/cm^{2}の範囲で急増し、その程度はガラス温度が高いほど著しかった。（図２参照）

【考察】電極表面近傍のボイドは電流密度とガラス温度の増加に伴い増大しており、侵食量の増加傾向と一致している。一方ガラス保護膜として働くはずの Cr_2O_3 は層を形成していなかった。ボイドが形成されることにより、金属表面が脆くなりガラス融液の流動に伴う侵食を受けたものと考えられる。

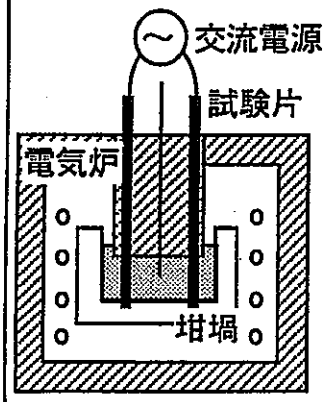


図１実験装置

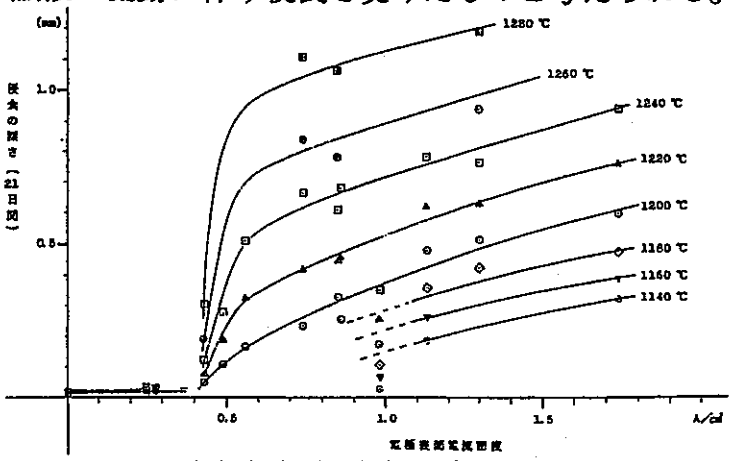


図２電流密度/温度と侵食量の関係

〔9〕電極用金属の耐食性

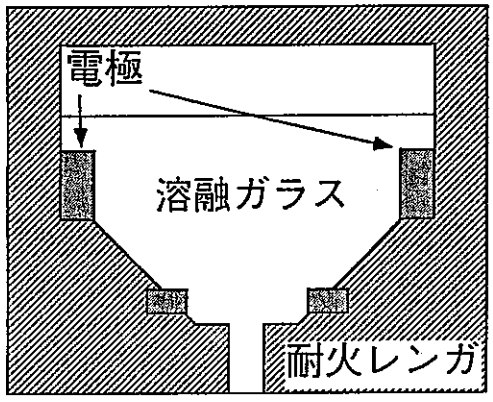
溶融ガラス中の腐食メカニズム
電流密度と腐食速度の関係

高温溶融技術研究会
H7年10月6日

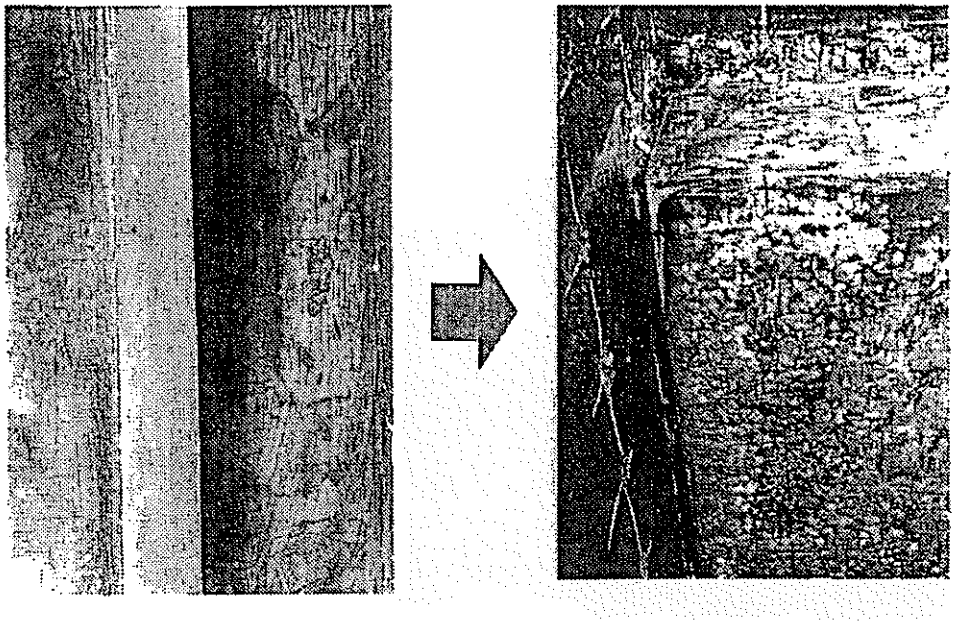
東海事業所
環境技術開発部
環境技術第一開発室

研究のバックグラウンド

セラミックメルタの寿命
・炉内壁レンガの侵食
・直接通電電極の侵食



セラミックメルタ断面図



使用前　　使用後

電極表面写真

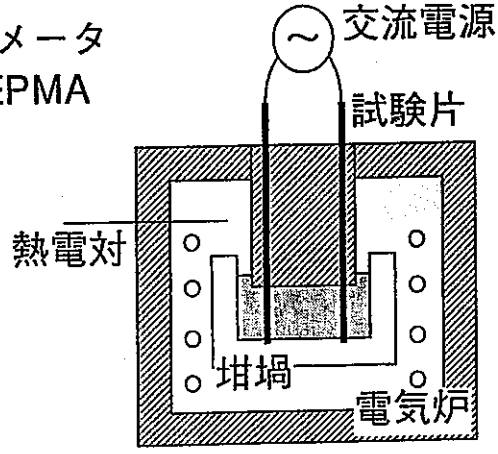
実験

実験条件

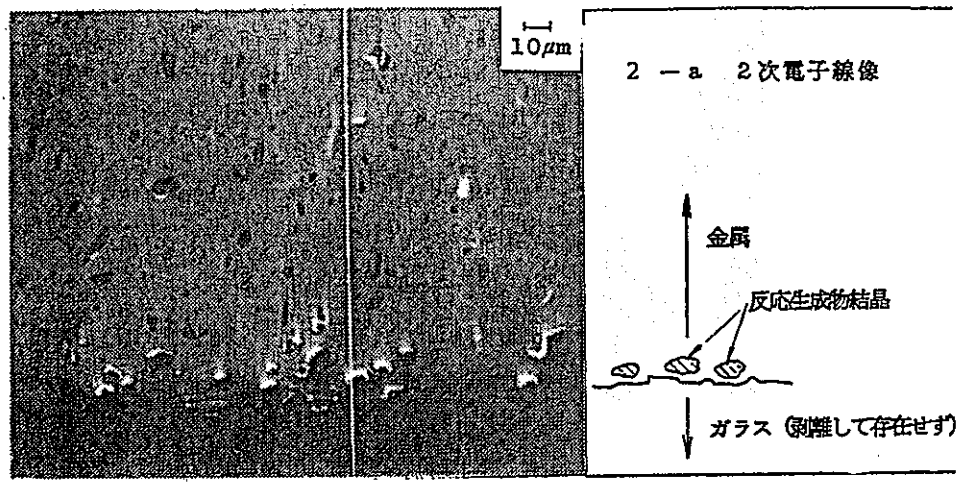
電極材料　　：inconel690
電流密度　　：0～1.2A/cm^2
溶融ガラス温度：1150～1300℃
通電時間　　：21日

分析方法

侵食量：マイクロメータ
表面観察：SEM/EPMA



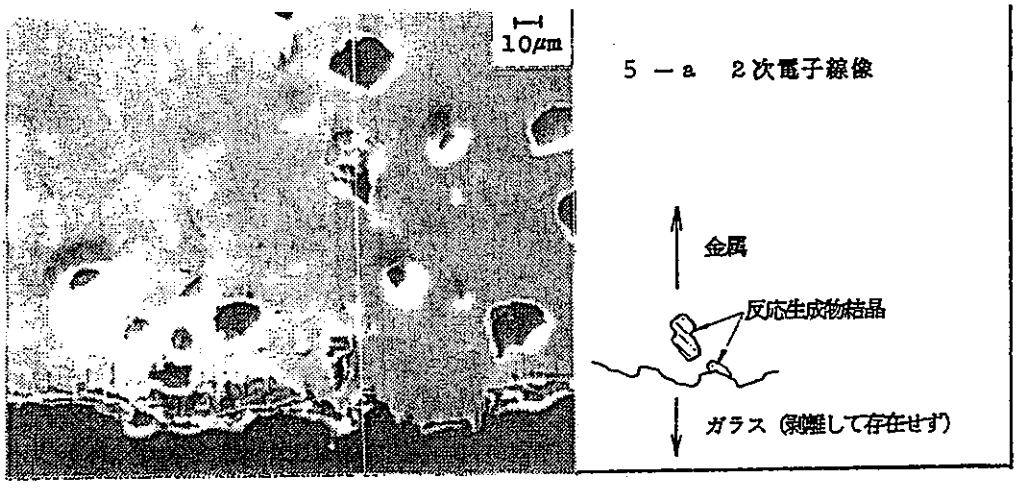
結果1（金属の腐食メカニズム調査）
試験片の観察



電極切断面SEM写真

電流密度　　：0A/cm^2
溶融ガラス温度：1250℃

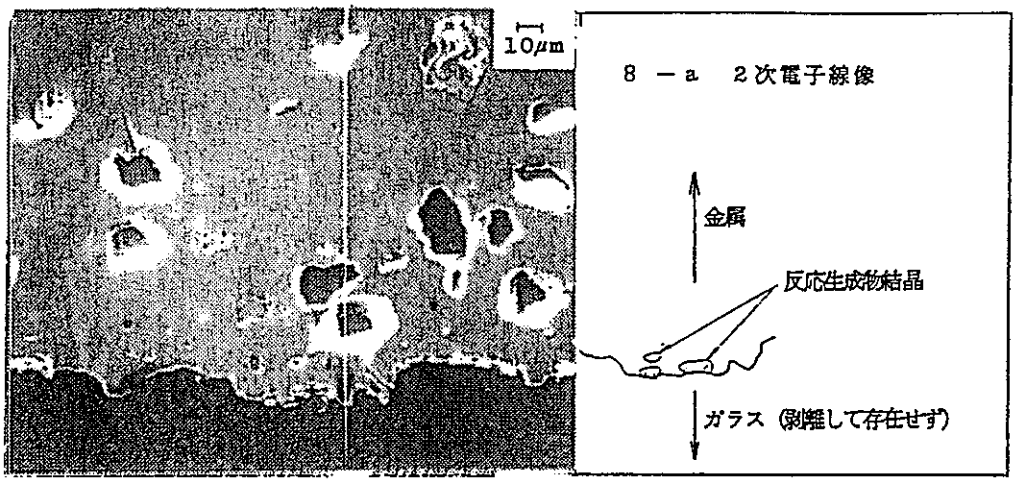
結果1（金属の腐食メカニズム調査）
試験片の観察



電極切断面SEM写真

電流密度　　：0.6A/cm^2
溶融ガラス温度：1250℃

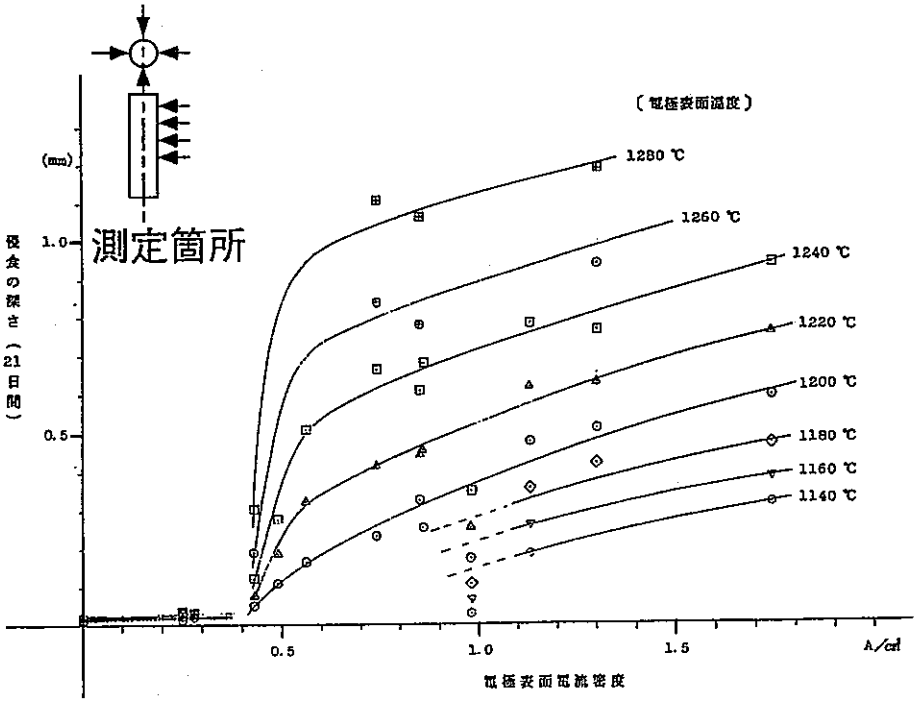
結果1（金属の腐食メカニズム調査）
試験片の観察



電極切断面SEM写真

電流密度　　：1.2A/cm^2
溶融ガラス温度：1250℃

結果2（電流密度と腐食速度の関係）



電流密度と侵食量の関係

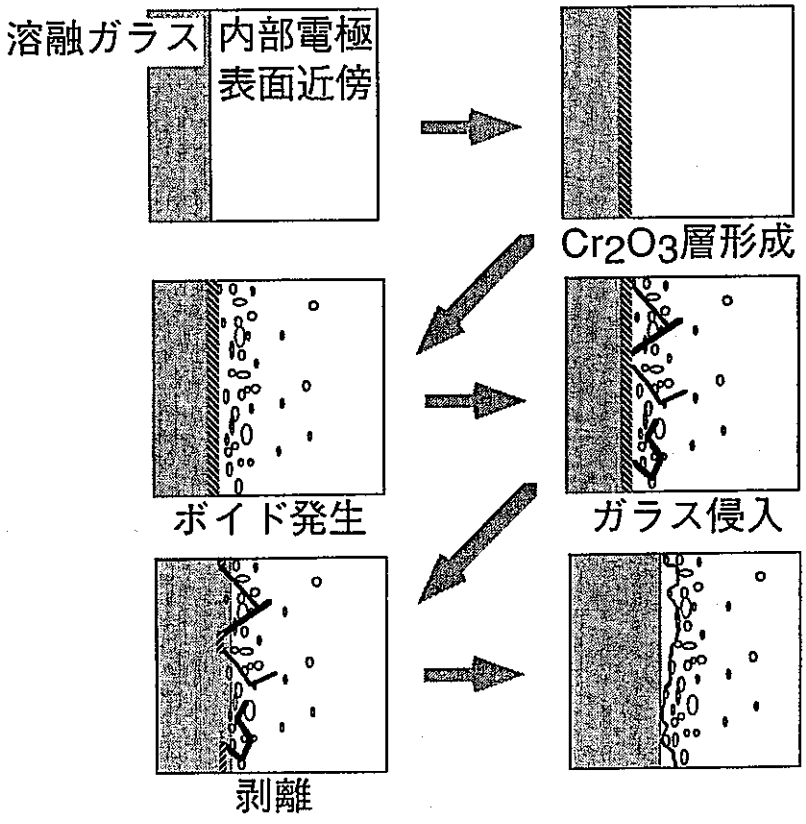
考察2（電流密度と腐食速度の関係）

侵食量は温度に関係なく電流密度=0.42A/cm²以上で急増する。

電流密度および温度の上昇に伴って、ボイドの直径が大きくなり数も増加している。

主として電流密度の増加に伴い、ボイドが増大する。このため金属表面が脆くなり、ガラス流動による侵食を受けやすくなったと考えられる。

考察1（金属の腐食メカニズム）



結論

1.金属の腐食メカニズム

ガラス融液中では金属表面に酸化クロムの保護膜が形成されるが、金属表面近傍ではクロム欠乏に伴うボイドが形成され、脆くなった金属表面がガラス流動による侵食を受けると考えられる。

2.電流密度/温度と腐食速度の関係

ガラス融液による電極金属の侵食は電流密度0.42～0.6A/cm^2の範囲で急増する。またその程度は温度が高いほど著しい。

電流密度および温度の上昇に伴ってボイドが増大しており、これにより金属表面が脆くなったと考えられる。

〔10〕新電極材料開発

高温溶融技術研究会

平成７年１０月６日

発表テーマ	新電極材料開発		
発表者所属	環境技術第一開発室	発表者氏名	正木　敏夫

発表要旨

1　緒言

高放射性廃液ガラス固化用溶融炉の電極は，1000℃を超える溶融ガラス中において通電状態で使用される。現在，電極材料として Inconel 690®が実用に供されているが，ガラス溶融炉の高性能化を図るため，より高融点で且つ通電状態での溶融ガラスに対する耐食性に優れた合金を開発し，電極材料としての特性を評価したので報告する。

2　試験方法

Table 1に示す今回開発したTi，Ｙを微量添加したNi－Cr－Fe系およびNi－Cr－Co系の計６合金ならびに比較のためのInconel 690 を供試材とした。

溶融ガラス中における侵食試験にはFig. 1に示す装置を用いた。模擬高放射性ガラスを溶融したルツボの中に直径10mm，浸漬深さ23mmの試験片を挿入し，表面電流密度0.8A/cm^2，温度1250℃の条件で20日間侵食試験を行ったのち侵食量を求めた。

融点は示差熱分析により測定した。

3　試験結果

Fig. 2に各供試材の侵食量と融点を示す。

この試験結果から次のことがわかった。

（１）耐食性は，全供試材が Inconel 690より優れており，特にＹを添加したものはInconel 690の侵食量の３分の１以下であった。

（２）侵食に対して保護膜としての役割を有する Cr_2O_3層／母相界面でのボイドの形成がCr_2O_3層の剥離の要因となると言われる[1]。本試験のTi，Ｙを添加した合金では，界面ではなく母相内部にTi，Ｙの酸化物とともにボイド形成が観察された。このことから，Ti，Ｙ添加による耐食性向上は，界面でのボイド形成抑制効果によるものと考えられる。

（３）Ni－Cr－Fe系の溶融開始温度はInconel 690 と同じであるが，Ni－Cr－Co系では30℃～60℃高くなった。

1) J.K.Tien, F.S.Pettit:Matall.Trans., 3, p.1587-p.1599, (1972).

Table 1 Chemical composition of experimental alloys

Alloys	Ni	Cr	Fe	Co
Ni-Cr-Fe system (2 alloys)	47	34	Balance	—
Ni-Cr-Co system (4 alloys)	Balance	32	—	31
Inconel 690	>58	27-31	7-11	—

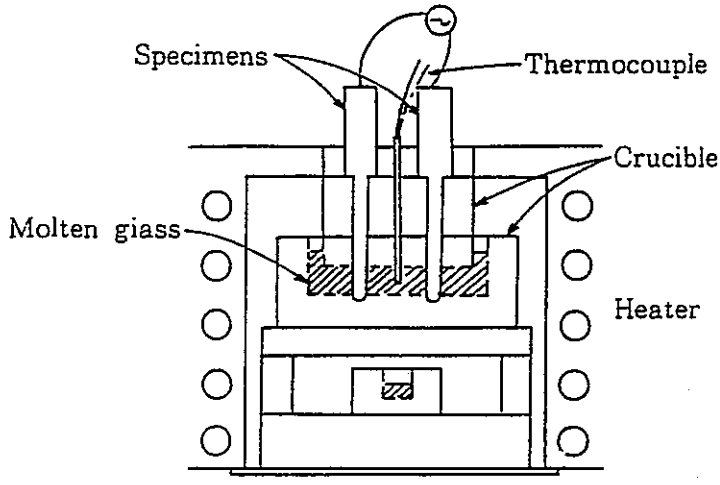


Fig.1 The apparatus of corrosion test

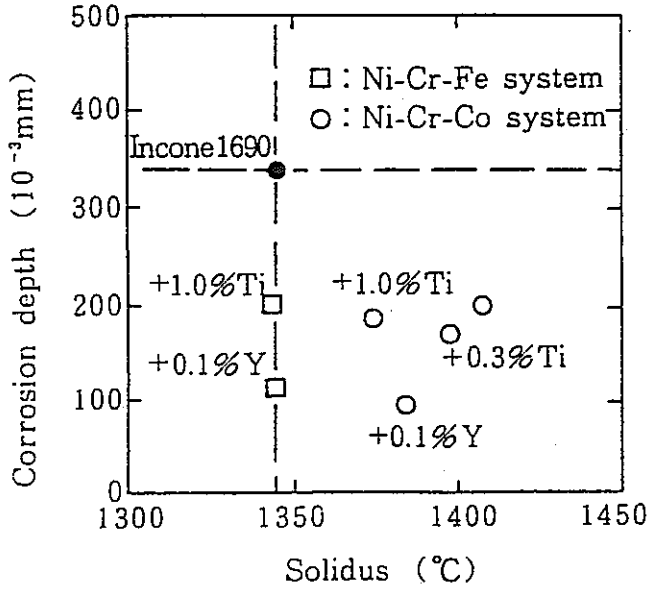


Fig.2 Corrosion resistance and solidus of experimental alloys

Corrosion test : in molten glass at 1250℃, 0.8 A/cm² for 20 days

新 電 極 材 料 開 発

平 成 7 年 10 月 6 日

高 温 溶 融 技 術 検 討 会

環境技術開発部　環境技術第一開発室

各国の高放射性ガラス固化用溶融炉の電極材料(金属炉容器)

国	機　関	ガラス溶融炉	電極材料(金属炉容器)
米　国	PNL	RLFCM	Inconel 690
	SRP	SGM	Inconel 690
	WVDP	SFCM	Inconel 690
西　独	PAMELA	K－5	Inconel 690
	KfK	KW－2	Inconel 690
フランス	AVM	——	(Inconel 601)
	AVH	——	(Inconel 601)
英　国	WVP*1	——	(Inconel 690)
日　本	動　燃	TVFメルタ	Inconel 690

*1 AVM技術を導入

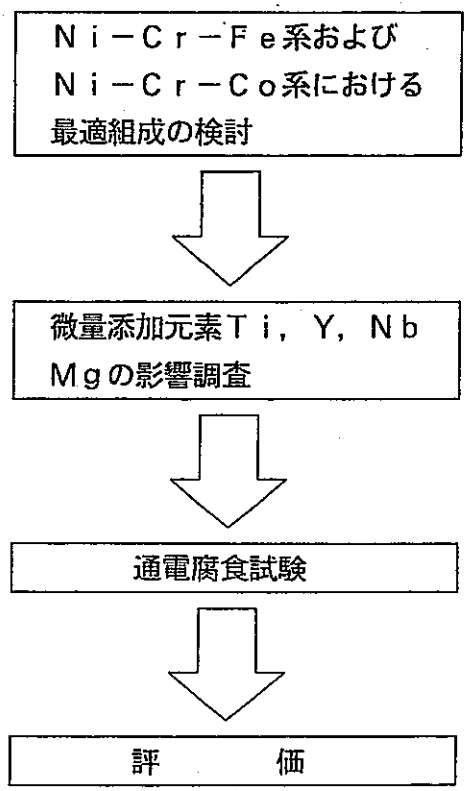
電極材料の開発目的

1. ガラス溶融炉の運転裕度の向上

→ 高融点電極材料の開発

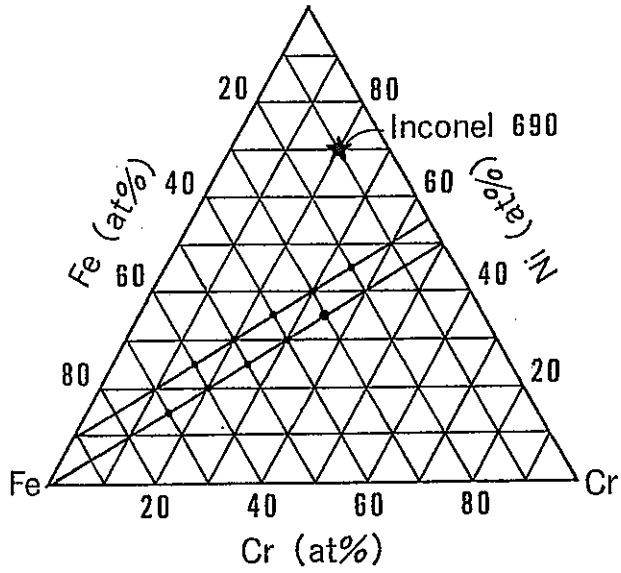
2. ガラス溶融炉の長寿命化

→ 溶融ガラス中での耐食性に優れた電極材料の開発

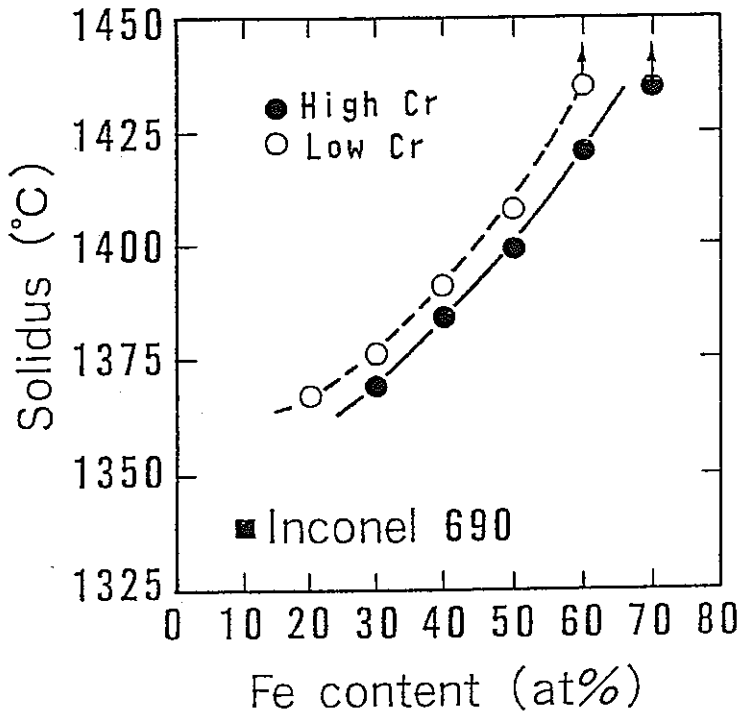


電極材料開発のステップ

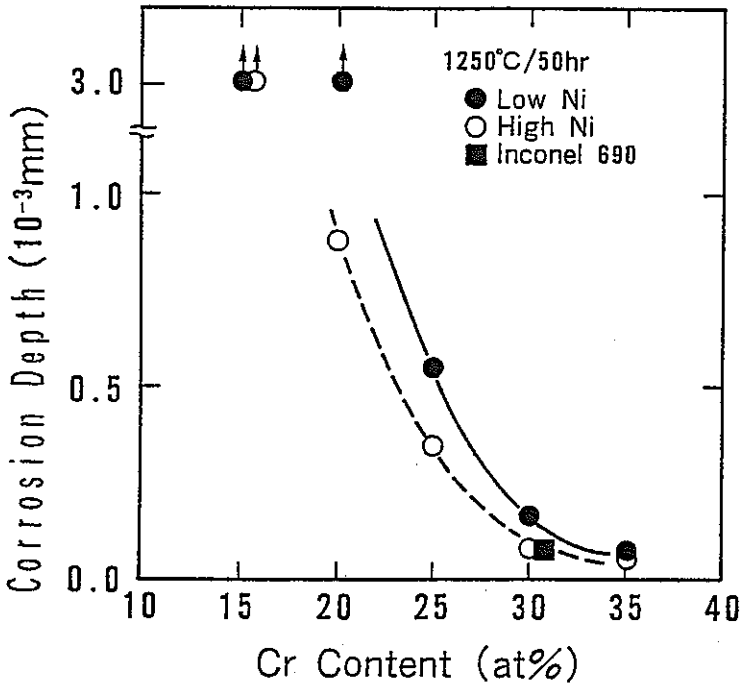
alloy	Chemical Composition (at%)		
	Ni	Cr	Fe
F 1	Bal.	15	70
F 2		15	60
F 3		20	60
F 4		20	50
F 5		25	50
F 6		25	40
F 7		30	40
F 8		30	30
F 9		35	30
F10		35	20



Experimental Ni-Cr-Fe alloys



Effect of Fe content on solidus

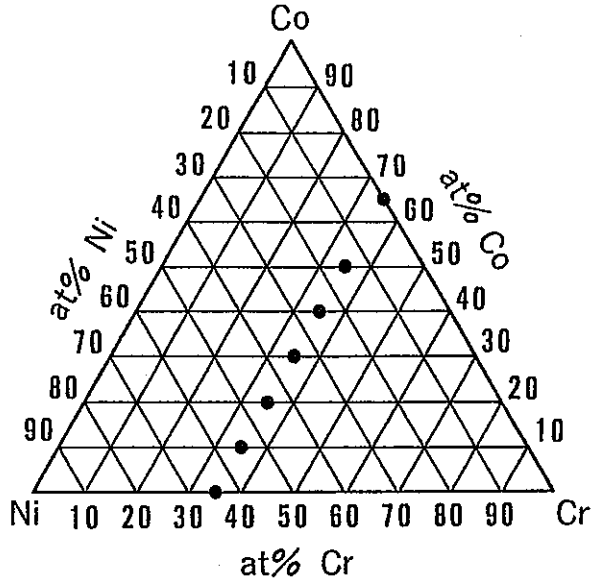


Effect of Cr content on Corrosion Depth

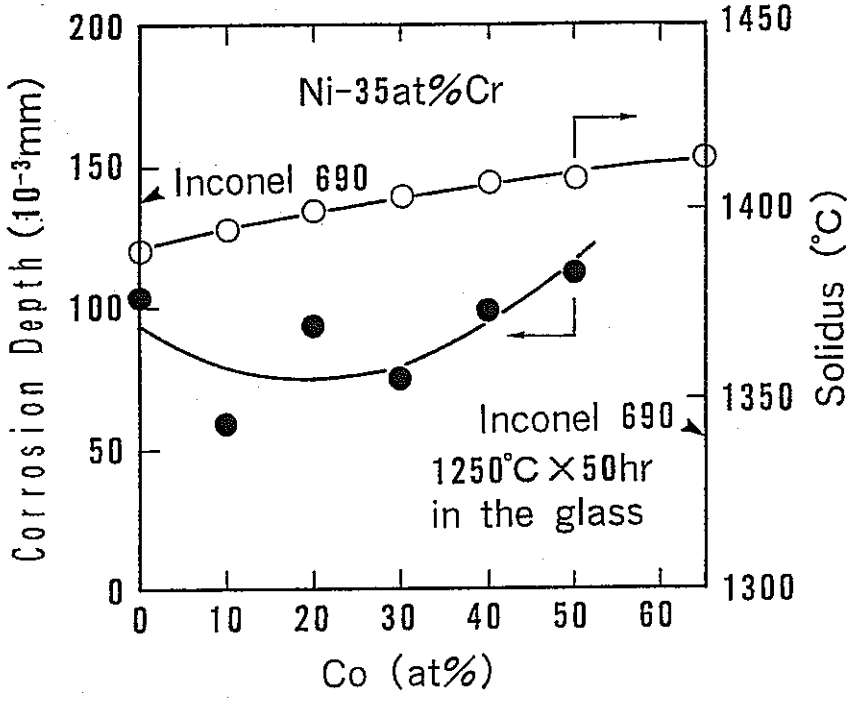
No.	Alloy	addition	Corrosion Depth (μm) 100 200	Solidus (°C) 1350 1400
1	F 8 Fe-40Ni-30Cr	no add.	219	1384
2		+0.3Ti	187	1377
3		+0.3Nb	152	1372
4		+0.3Mg	245	1383
5		+0.1Y	91	1385
6		+0.6Ti	140	1366
7		+1.0Ti	84	1360
8		+1.5Ti	120	1338
9		+1.0Nb	307	1357
10		+1.5Nb	282	1345
11	F 10 Fe-45Ni-35Cr	no add.	108	1380

Corrosion Depth in molten glass and soidus for experimental alloys

Alloy	Chemical composition (at%)		
	Ni	Cr	Co
C 1	Bal.	35	—
C 2			10
C 3			20
C 4			30
C 5			40
C 6			50
C 7	—		Bal.



Experimental Ni-Cr-Co alloys



Effect of cobalt content on Corrosion depth and solidus

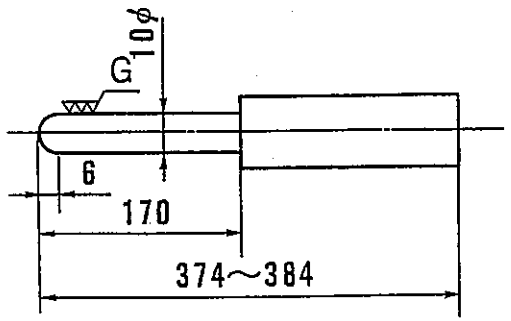
No.	Alloy	addition Ti	addition Y	Corrosion Depth (μm) 100 200	Solidus (°C) 1350 1400
1	C 4 Ni-35Cr-30Co	no add.		74	1408
2		+0.3	−.	54	1400
3		+1.0	−.	32	1377
4		.−	+0.1	45	1376
5		+0.3	+0.1	53	1384
6		+1.0	+0.1	100	1359

Corrosion depth in molten glass and solidus for experimental alloys

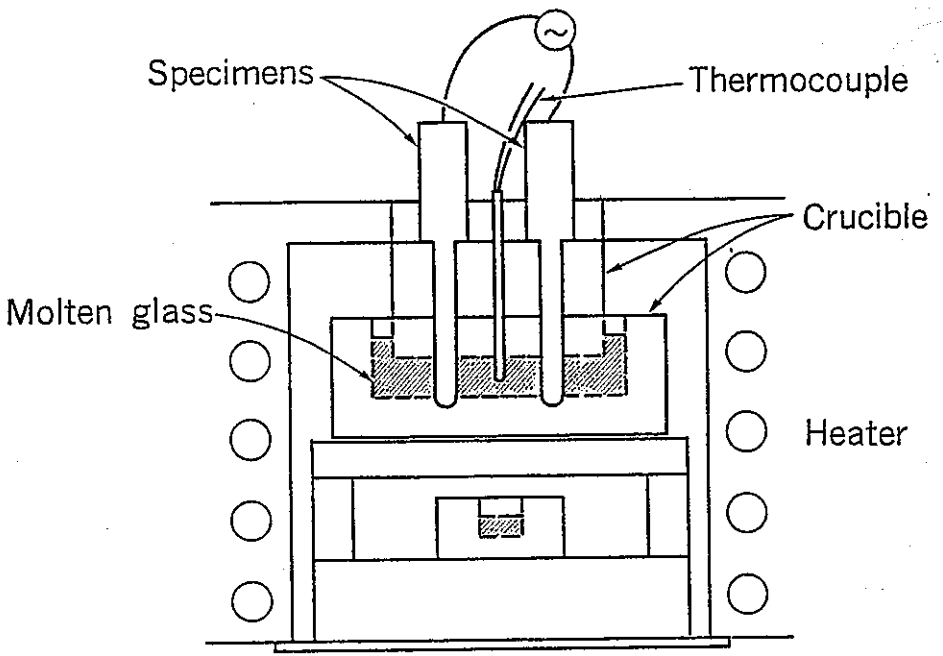
通電腐食試験への供試材

- Inconel 690
- Ni−Cr−Fe系
  - (1) Fe−45%Ni−35%Cr−1.0%Ti
  - (2) Fe−45%Ni−35%Cr−0.1%Y
- Ni−Cr−Co系
  - (1) Ni−35%Cr−30%Co
  - (2) Ni−35%Cr−30%Co−0.3%Ti
  - (3) Ni−35%Cr−30%Co−1.0%Ti
  - (4) Ni−35%Cr−30%Co−0.1%Y

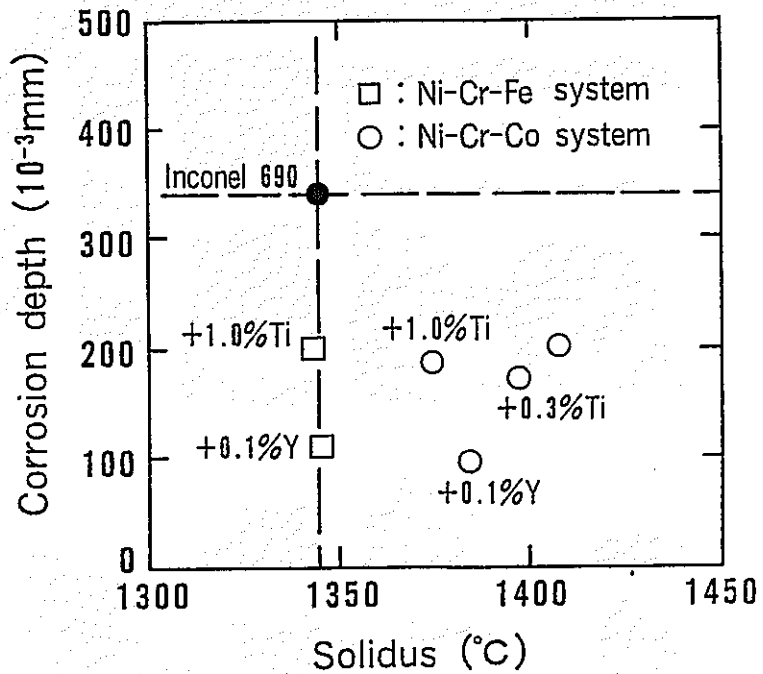
(以上at%)



Configuration of test specimen

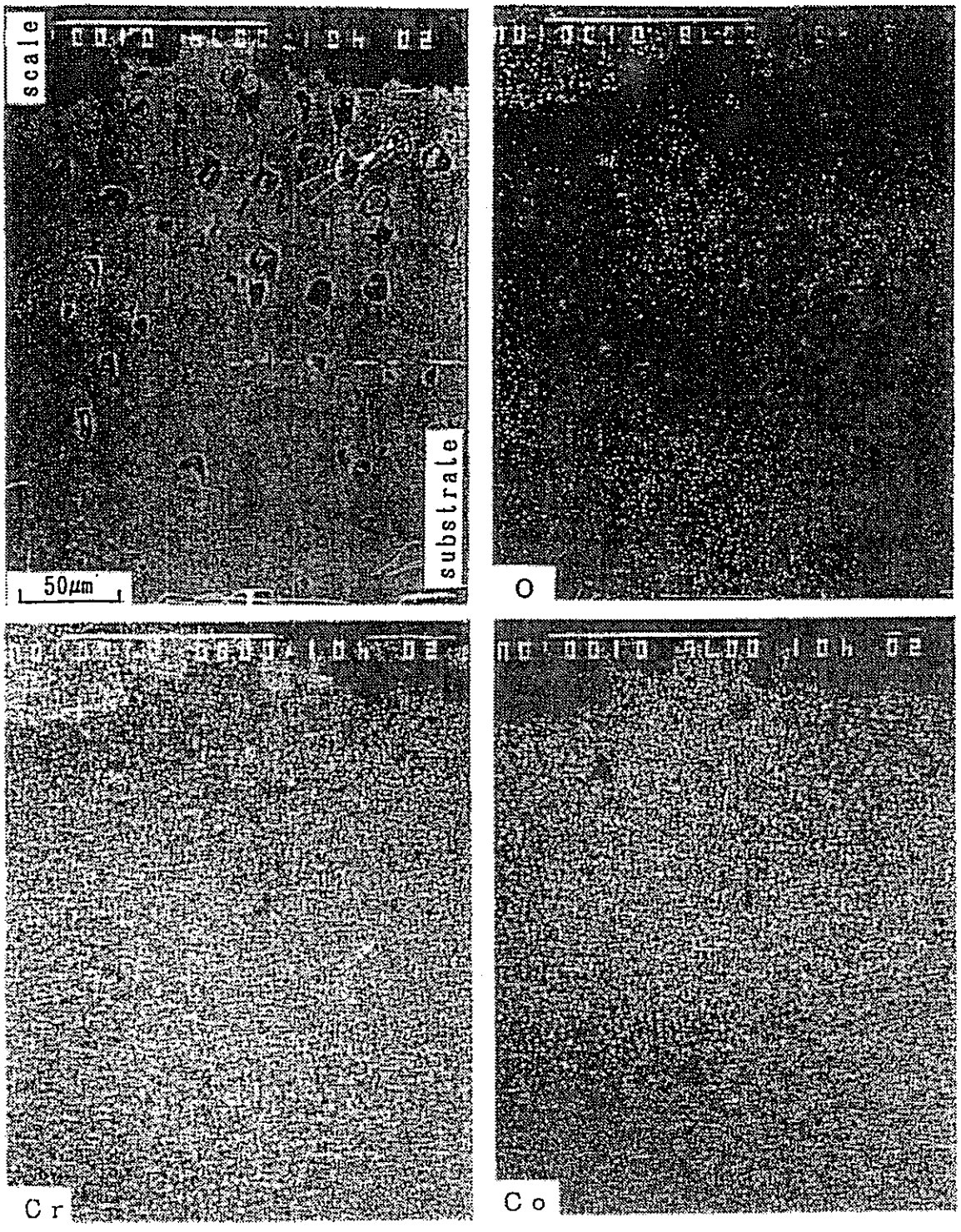


The apparatus of corrosion test

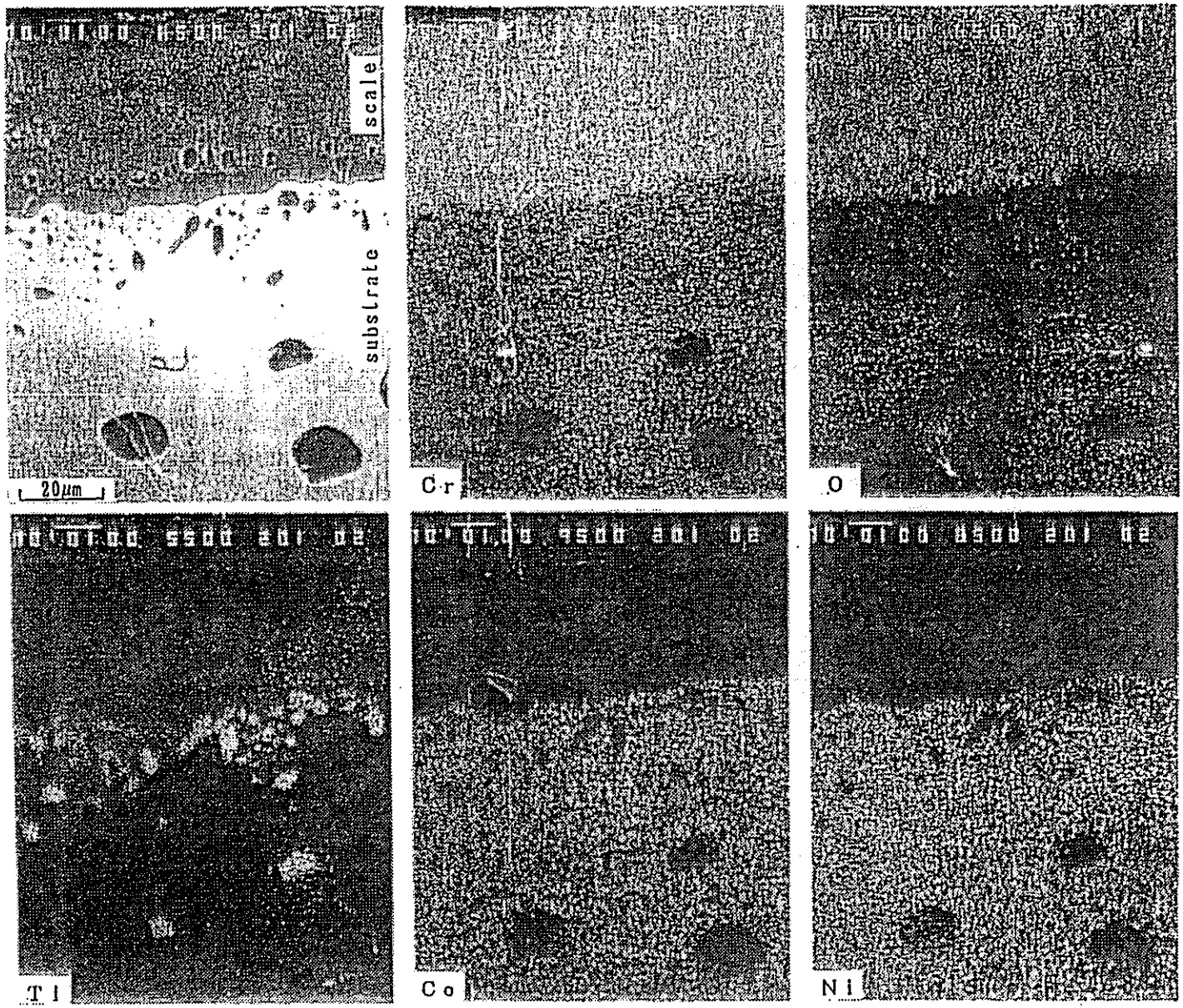


Corrosion resistance and solidus of experimental alloys

Corrosion test : in molten glass at 1250°C, 0.8A/cm^2 for 20days



Characteristic X-ray images of cross section of Ni-35at%Cr-30at%Co (C4) [1250°C,50hr]



Characteristic X-ray images of cross section of Ni-35at%Cr-30at%Co+1.0at%Ti (C9)
[1250℃, 50hr]

まとめ

1. 開発したＮｉ－Ｃｒ－Ｆｅ系合金は，溶融開始温度はＩｎｃｏｎｅｌ ６９０と同等であるが，耐食性はＩｎｃｏｎｅｌ ６９０よりも優れており，Ｙを添加したものはＩｎｃｏｎｅｌ ６９０の３分の１程度であった。

2. 開発したＮｉ－Ｃｒ－Ｃｏ系合金の溶融開始温度はＩｎｃｏｎｅｌ ６９０より３０℃～６０℃高く，耐食性についてもＩｎｃｏｎｅｌ ６９０よりも優れており，Ｙを添加したものはＩｎｃｏｎｅｌ ６９０の３分の１以下であった。

3. Ｔｉ，Ｙの添加は，溶融ガラス中における耐食性を向上させた。

〔11〕乾式再処理技術開発

高温溶融技術研究会

平成７年１０月６日

発表テーマ	乾式再処理技術開発		
発表者所属	再処理技術開発部　プラント設計開発室	発表者氏名	小山智造

発表要旨

1. 序

PUREX法による湿式再処理は経済的に問題が大きいとの認識から、米国やロシアの開発中の乾式法が最近話題になっている。

事業団でも先進リサイクル技術/新型燃料技術開発の一環として、金属燃料や窒化物燃料に適用できる乾式再処理技術を体系的に開発すべく、再開部内に専任Grが4月より発足し活動を開始した。

2. 乾式再処理への期待

以下の点に対する可能性を有している。

① 再処理工程の短縮や燃料製造との一体化による経済性向上
② 廃棄物発生量の大幅な低減化
③ MA核種と希土類元素の分離が湿式法に比べ効率的
④ 金属燃料や窒化物燃料の再処理に湿式法より適性を有する

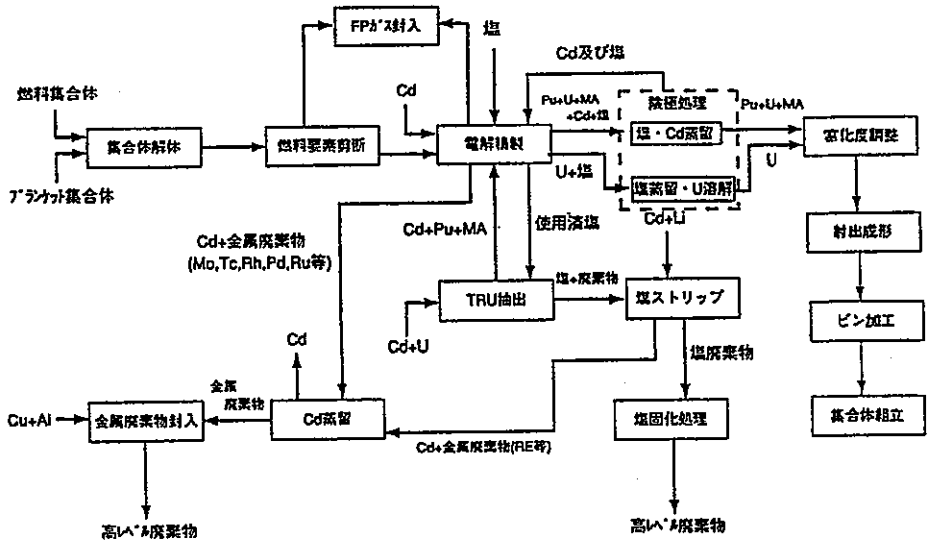
3. 開発の進め方

乾式再処理法は数多いため、当面は手法を絞らず進める。ただし同時並行で多くの手法の本格的開発は困難であり、暫定的にANLのIFRプロセスを開発の中心とする。これはKCl-LiCl等の溶融塩と溶融Cdを用いる溶融塩電解法であるが、前処理として還元を、後処理として酸化や窒化を行えば、酸化物や窒化物にも適用でき、また他の乾式法の周辺技術開発とも共通点の多い手法である。

これまで電中研を中心に傘下のメーカー群でウラン試験まで行った実績があり、特に工程技術開発はこれら関係機関と協力を密に開発を進める。ウラン試験はメーカーの既存施設を利用して行い、Pu試験・ホット試験を事業団内施設で実施する。

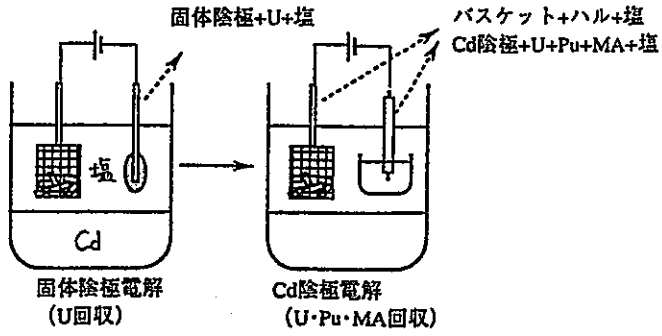
また、マテハンや分析等の基礎技術が乾式法の適用可不可を律すると考えられ、基礎技術開発に十分力を注ぐ必要があると考えている。

IFRプロセス

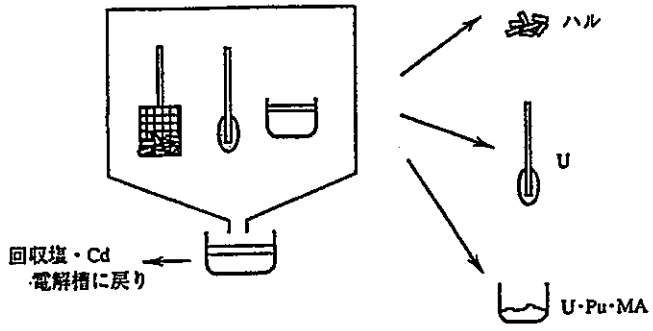


現在想定している主な工程概念

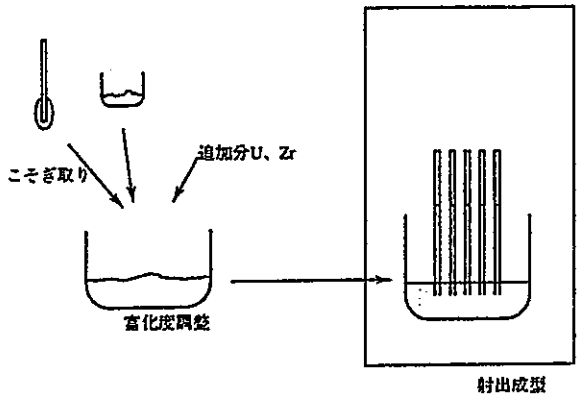
1. 電解精製
   (塩はLiCl-KCl)



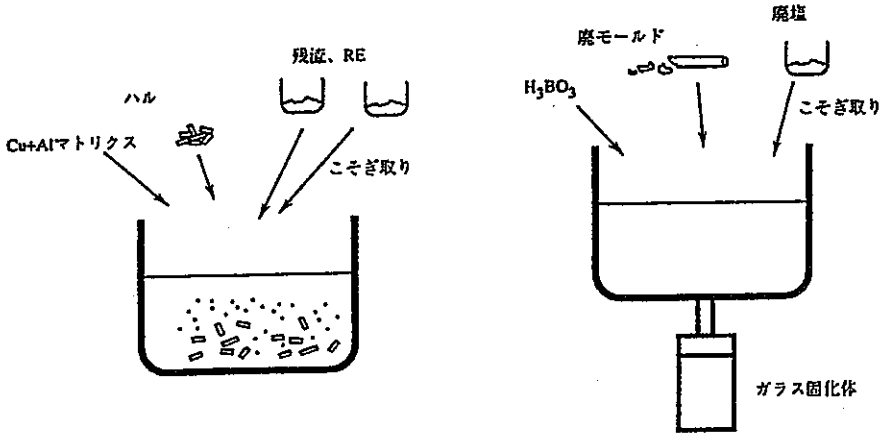
2. 電極処理



3. 射出成型



4. 廃棄物処理



乾式再処理技術開発

1.乾式再処理への期待する点

(1)工程の大幅な簡素化による経済性向上の可能性
- 再処理工程の短縮化
- 燃料製造との一体化

(2)廃棄物発生量の大幅な低減化

(3)MA核種と希土類元素、AmとCm等の分離が
湿式法に比べ効率的である可能性

(4)金属燃料や窒化物燃料等の新型燃料に対し
湿式法よりも適性である可能性

2.乾式再処理への要求

以下の点に対し湿式法改良が到達するレベルを越えること

(1)湿式法よりも工程が簡素で合理的であること

(2)PuやMA核種に対する高い回収率(99.9%以上)

(3)酸化物燃料への良好な適用性

(4)核拡散抵抗性

3.乾式再処理技術開発の進め方

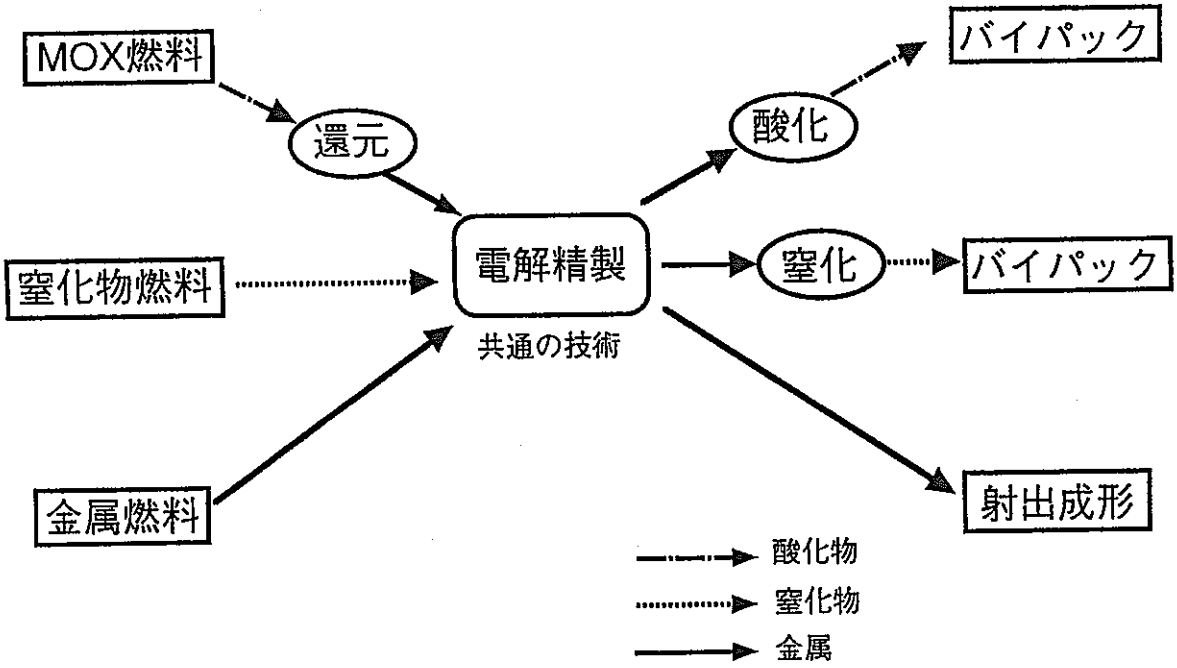
(1)手法の選定

① 乾式再処理手法は数多い。実績のあるものは
- IFRプロセス(ANL)
- オキシクロライド法(ロシア)
- ふっ化物揮発法(フランス、ロシア)

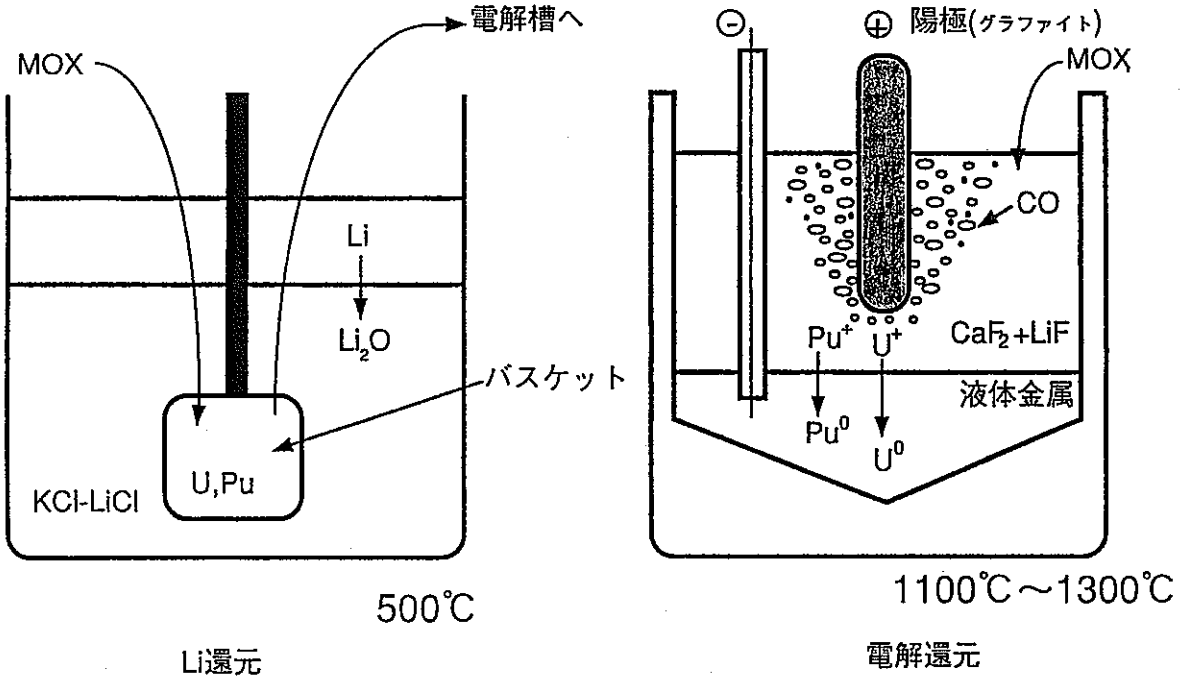
② 当面は手法を絞らず開発を進める。但し同時平行に複数の手法を本格的に開発するのは困難

③ まず開発の中心となる手法を選択し、これを開発しながら他の手法についても調査検討を進める。当面IFRプロセスを暫定的に開発の中心とする。

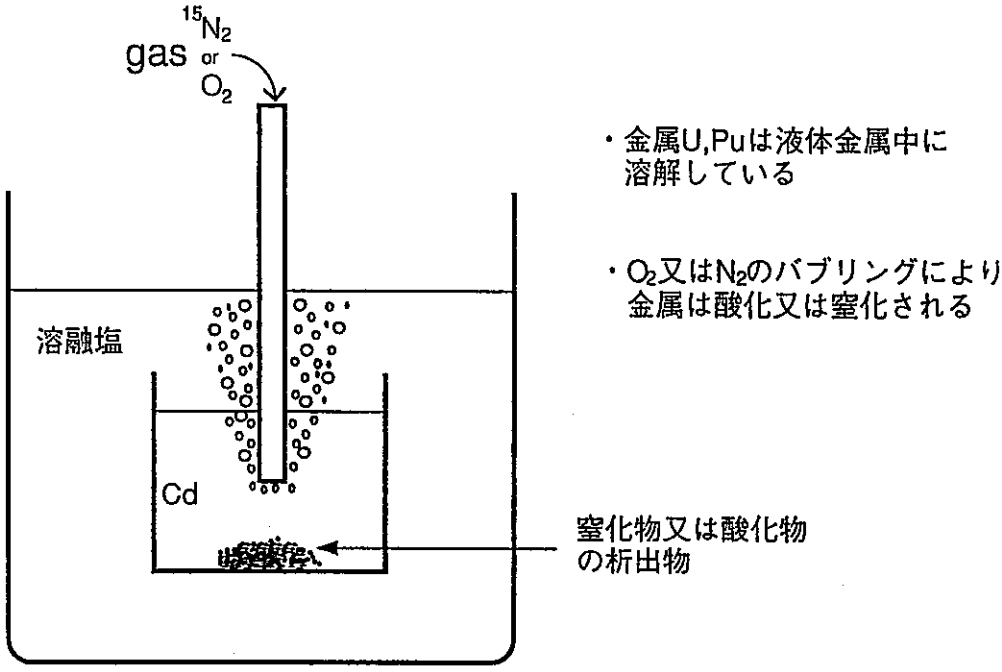
乾式再処理プロセス



酸化物還元プロセス(概念)



酸化処理法と窒化処理法(概念)

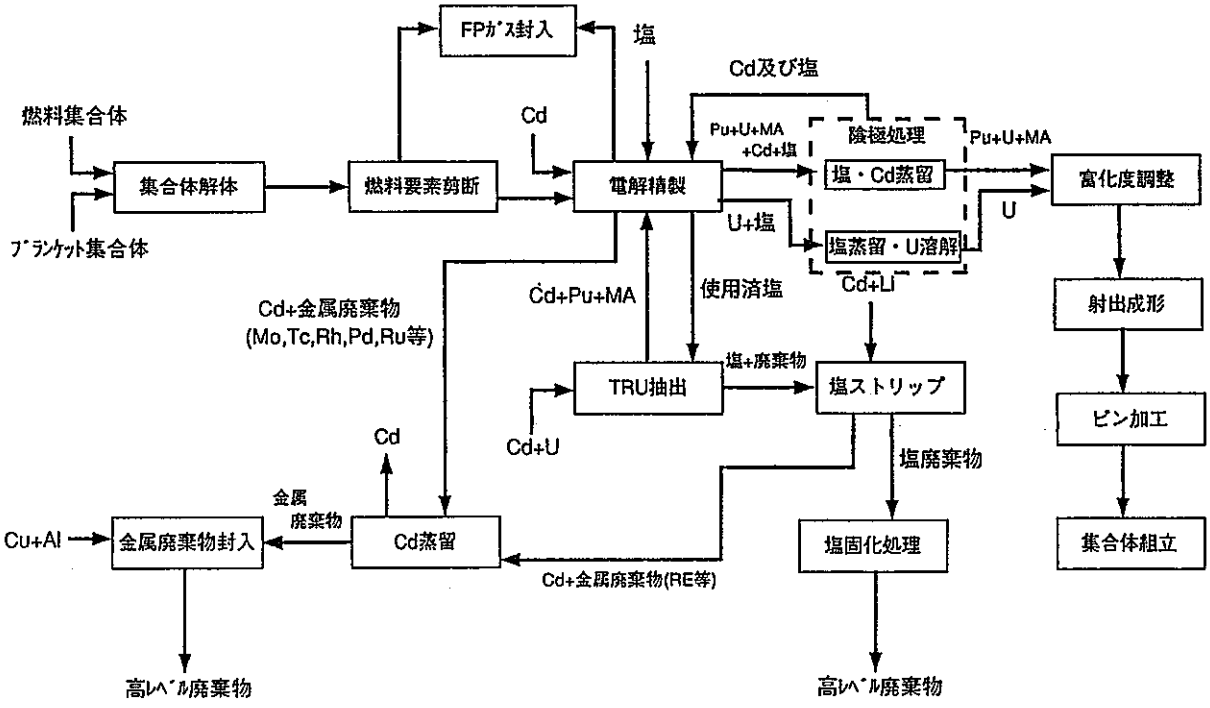


・金属U,Puは液体金属中に溶解している

・O_2又はN_2のバブリングにより金属は酸化又は窒化される

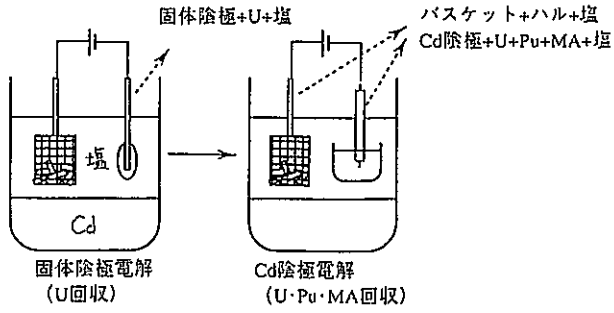
窒化処理、酸化処理

IFRプロセス

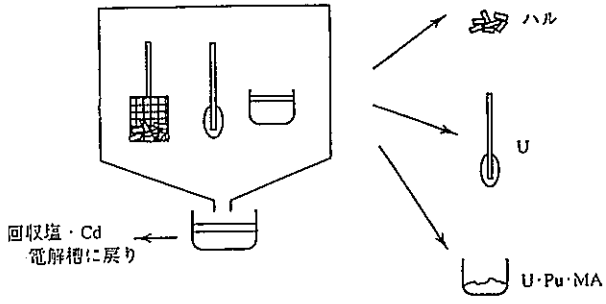


現在想定している主な工程概念

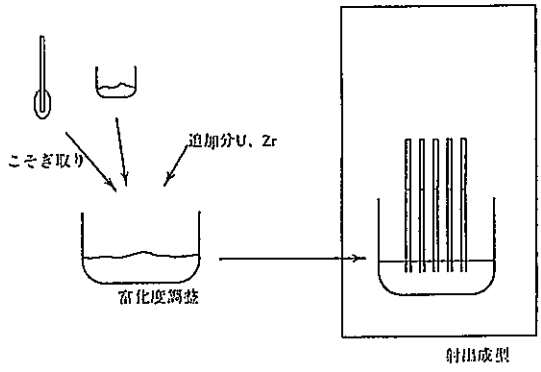
1. 電解精製
   (塩はLiCl-KCl)



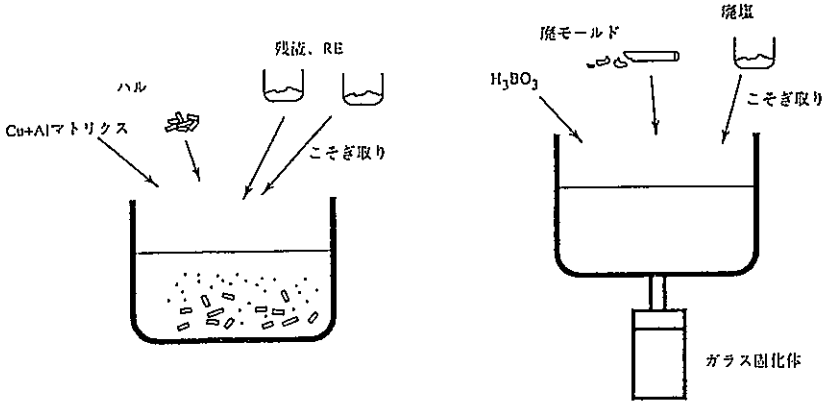
2. 電極処理



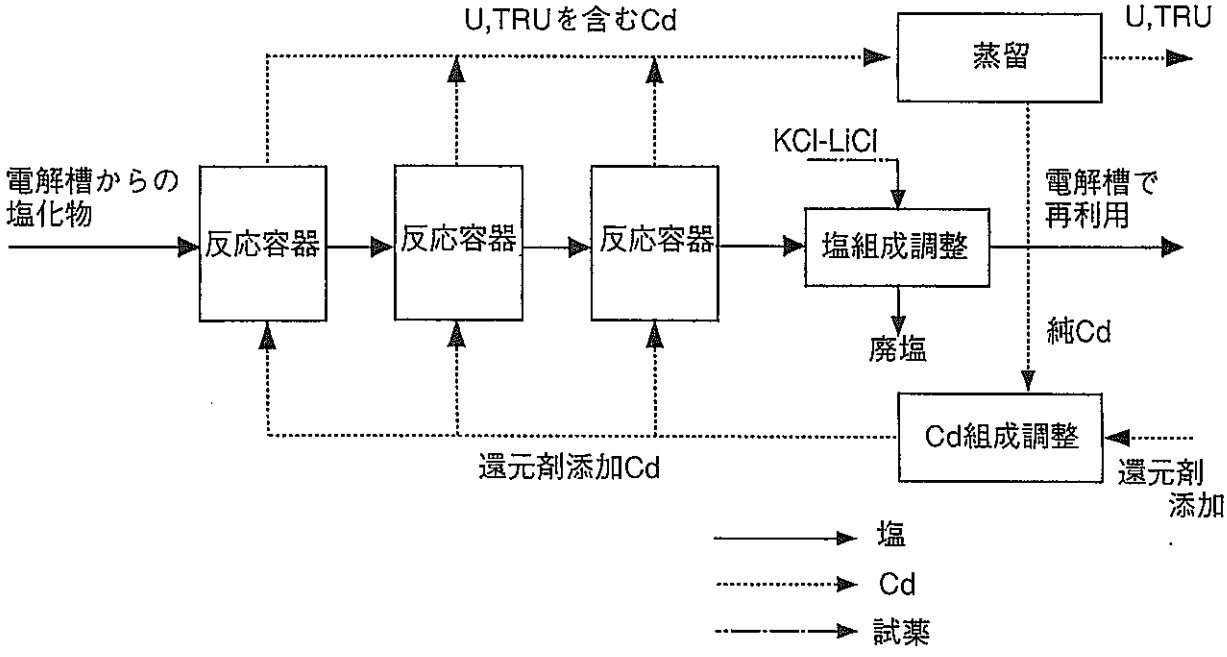
3. 射出成型



4. 廃棄物処理

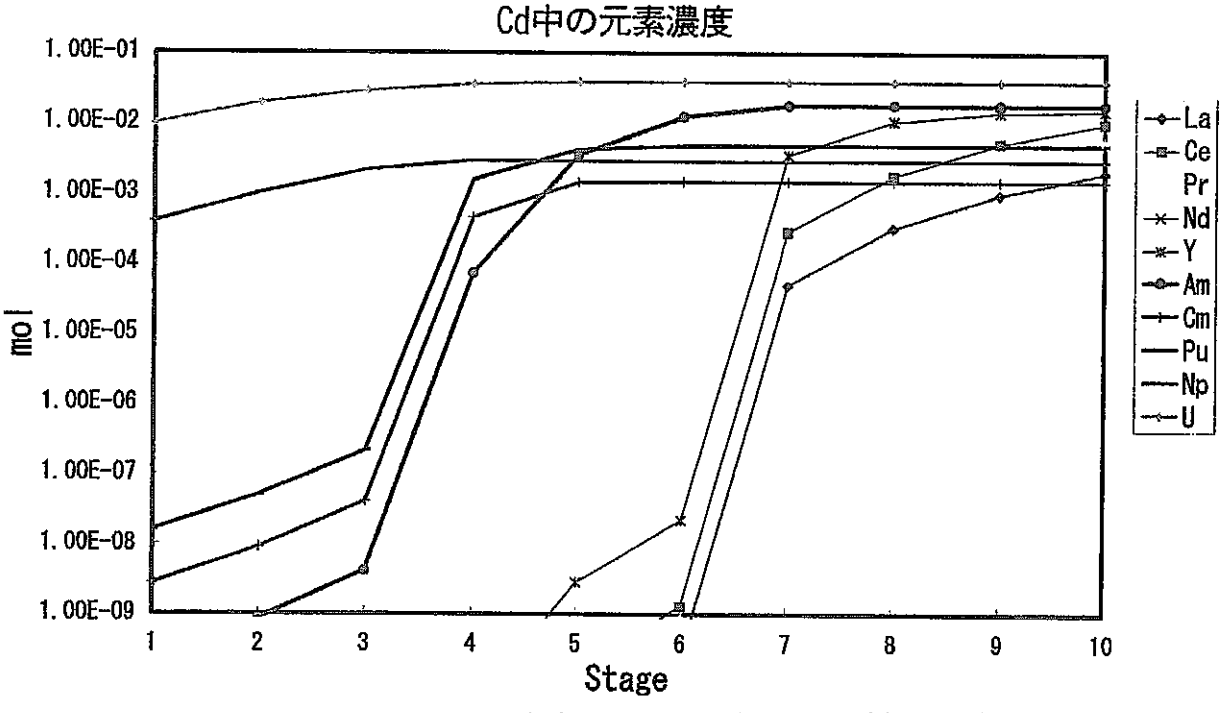


TRU回収プロセス



TRU抽出の熱力学的平衡に基く理論計算

還元剤(ここではU,Y,Nd)を含むCdと塩を接触させることにより、TRUを回収する。



・多段反応プロセスとし、各段で平衡に到達したとする。
・塩は理想溶液(稀薄溶液)とし、還元剤濃度はNd、0.01モルとする。

(2)開発の進め方

① 国内外関係機関との協力関係を密に開発を進める

② 工程技術開発は、先行している組織の経験知見を最大限に活用し、共同研究等も幅広く行う

③ 分析やマテハン等の基礎技術が乾式法の適用可不可を律すると考えられるため、基礎技術開発には十分な力を注ぐ

④ ウラン試験は、メーカーの既存設備を利用して行う

⑤ Pu試験は事業団の施設を用い、国内関係組織との協力のもとに実施する

⑥ Puの挙動、FP・MA共存系の影響などの評価を行う上で基礎的かつ重要な情報を早く入手するため、Pu試験、ホット試験を出来るだけ早期に実施する

海外における乾式再処理技術開発の現状

① 米国

IFRプロジェクトは中止、EBR-IIはデコミ段階へ

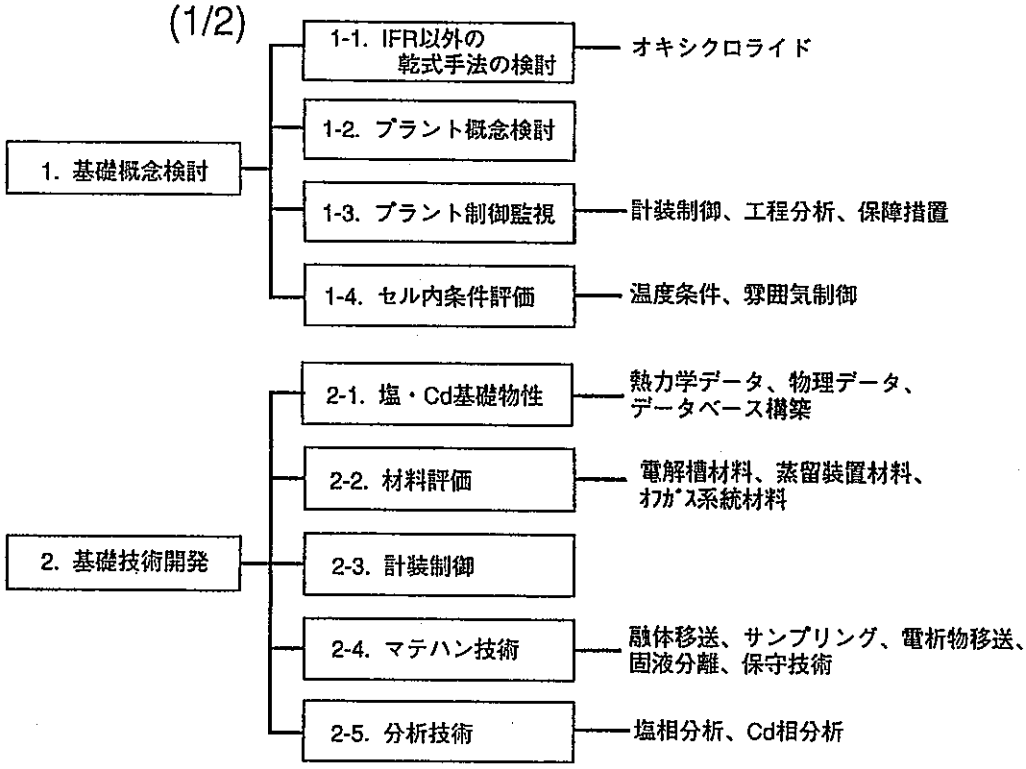
② 仏国

HAWからの白金属やMoの回収のために1994年から溶融塩電解の開発を開始

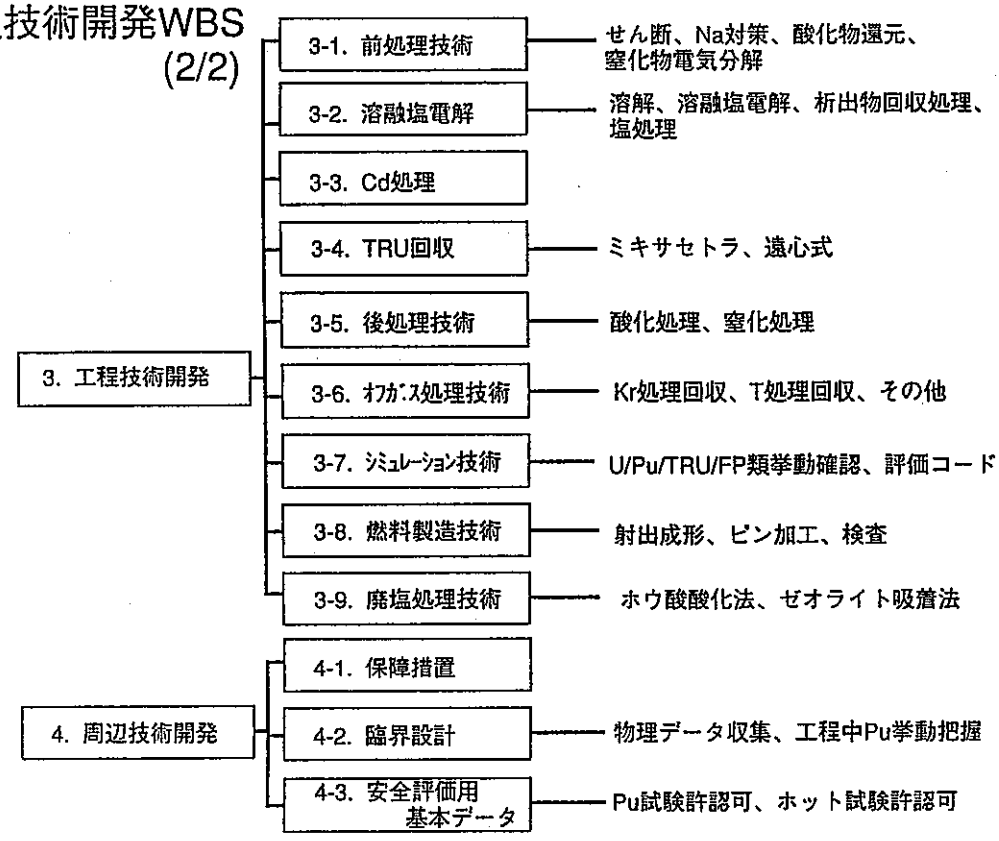
③ ロシア

デミトロフグラードでオキシクロライド法のホット試験を実施中

4.乾式再処理技術開発WBS (1/2)



4.乾式再処理技術開発WBS (2/2)



〔12〕溶融廃棄物ガラスの直流電解試験

高温溶融技術研究会　　平成７年１０月６日

発表テーマ	溶融廃棄物ガラスの直流電解試験		
発表者所属	HTS	発表者氏名	花本行生

発表要旨

１．目的
溶融廃棄物ガラスからの直流電解法による、元素分離の可能性を調査する。

２．実験条件

溶融ｶﾞﾗｽ　P0790（標準廃棄物組成）
溶融温度　1200℃
電極　インコネル690　W10mm t0.7mm L50mm(ｶﾞﾗｽ中浸漬部)
#800研磨仕上げ
電極間距離 30mm
電流密度　0.65mA/cm2 (3.25A)

３．試験結果
・溶融ガラス中で直流電解することにより、インコネル陰極は溶融する。
・溶融したインコネル中に白金族やＭｏなどの廃棄物成分が取り込まれる。
・陰極表面に、電極成分と共に白金族やＭｏなどの廃棄物成分が析出する。

４．今後の課題
・定電位電解による析出元素の調査
・電極材質の違いによる析出元素の調査
・析出物の定量的評価

廃棄物溶融ガラスの直流電解試験

○花本行生，　米谷雅之

高温溶融技術研究会

１９９５年10月 6日

環境技術開発部　環境技術第一開発室

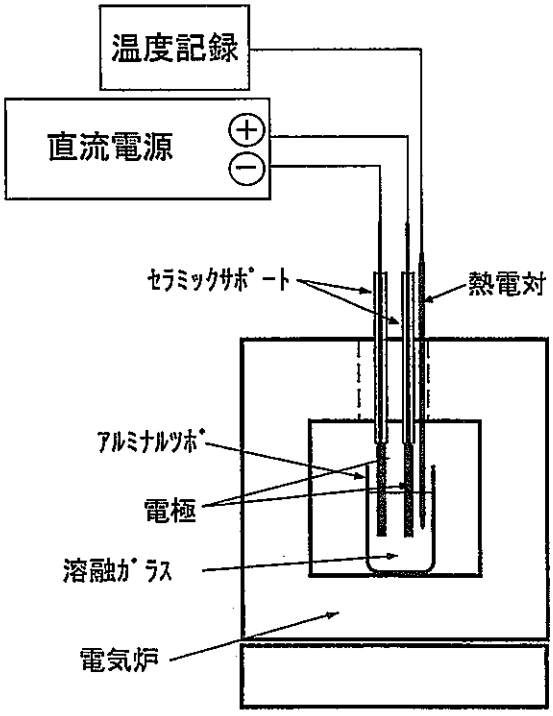
Power Reactor and Nuclear Fuel
Development Corporation　PNC

目　的

溶融廃棄物ガラスからの
電解法による元素分離の可能性を調査する

報告内容

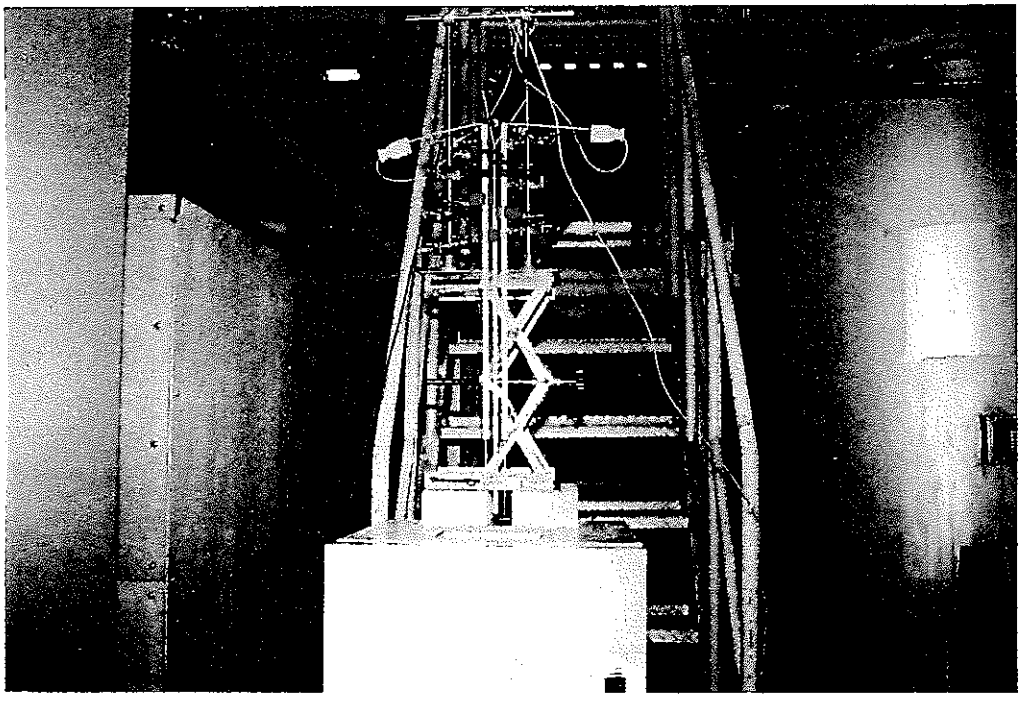
- インコネル電極による溶融ガラス中での直流電解試験
- 析出物のＥＰＭＡ観察
- 電極表面のＥＰＭＡ観察



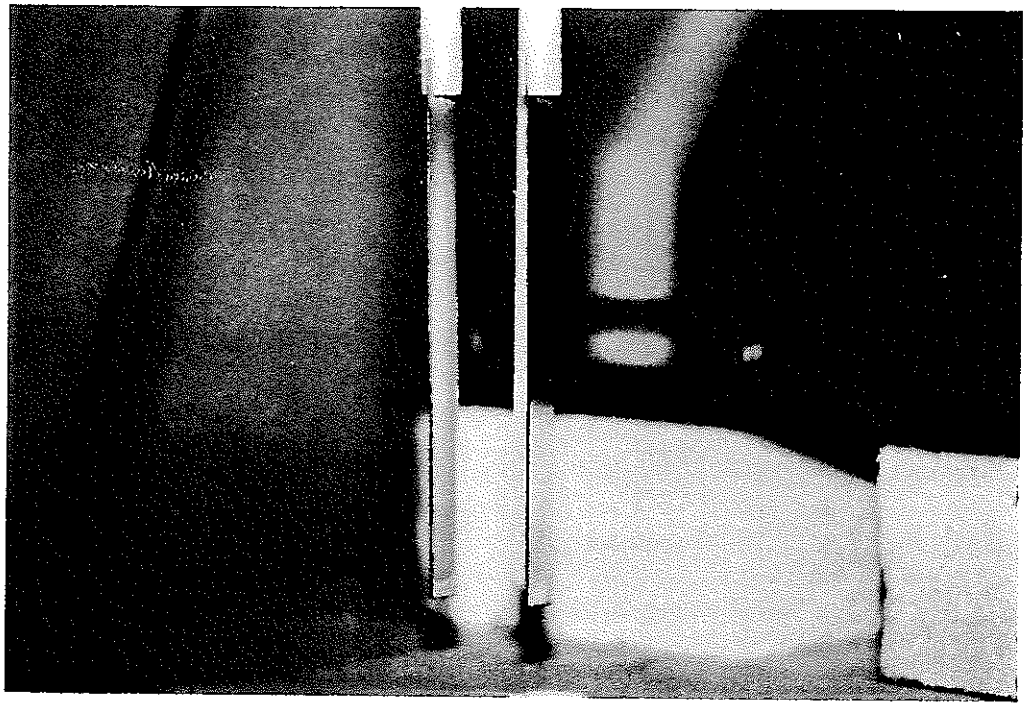
実験条件

溶融ｶﾞﾗｽ	P0790 （標準廃棄物組成）
溶融温度	1200℃
電極	インコネル690 W10mm t0.7mm L50mm（ｶﾞﾗｽ中浸漬部） #800研磨仕上げ
電極間距離	30mm
電流密度	0.65mA/cm2 (3.25A)

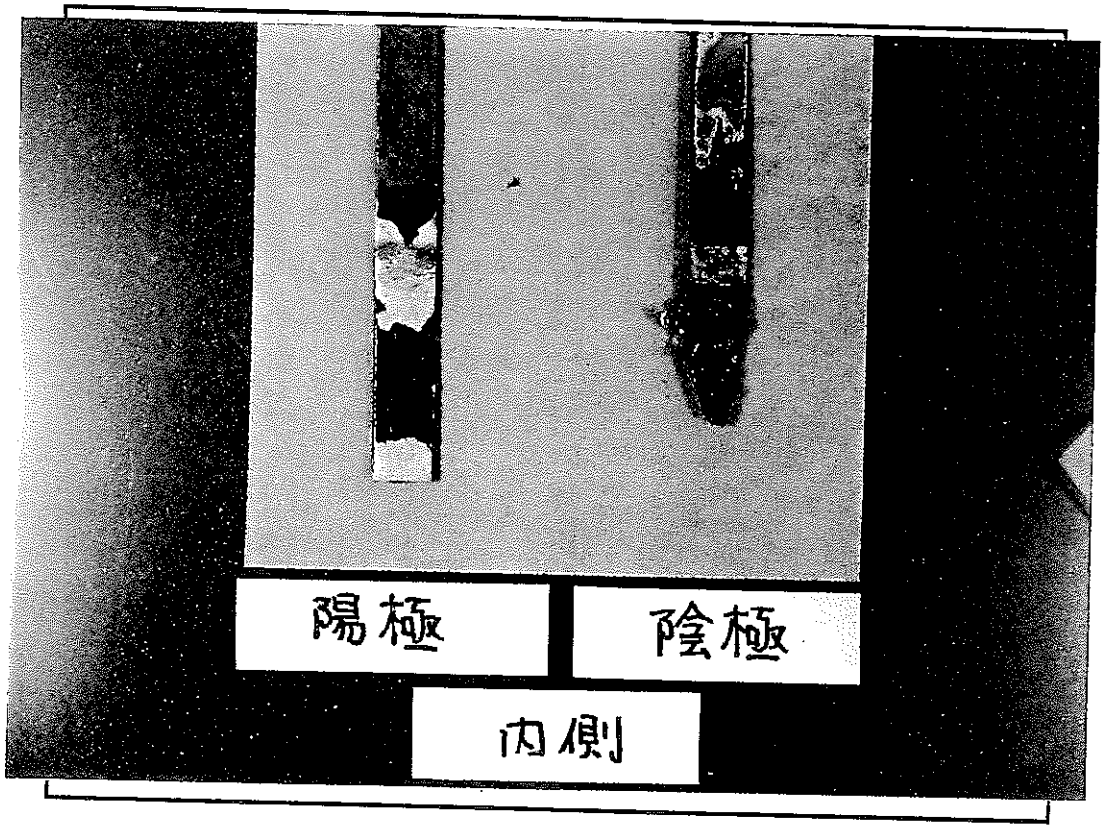
実験装置及び条件



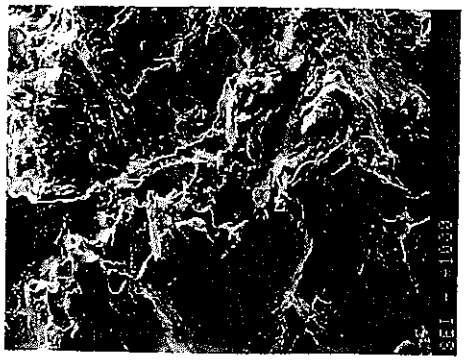
試験装置



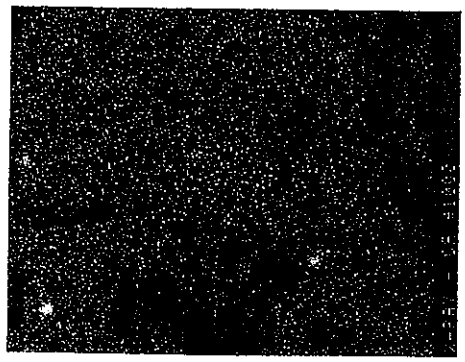
試験前電極



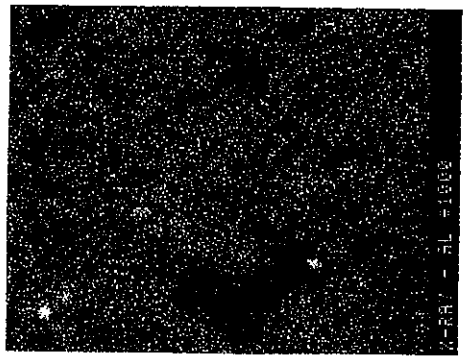
試験後電極



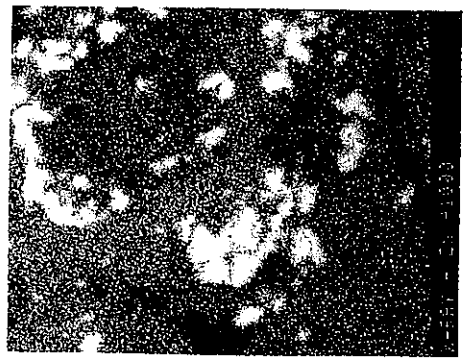
SEM写真　100倍



Ca　1000倍

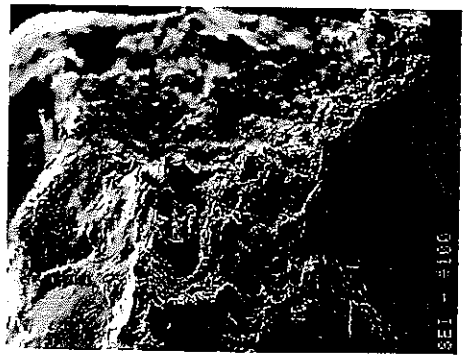


Al　1000倍



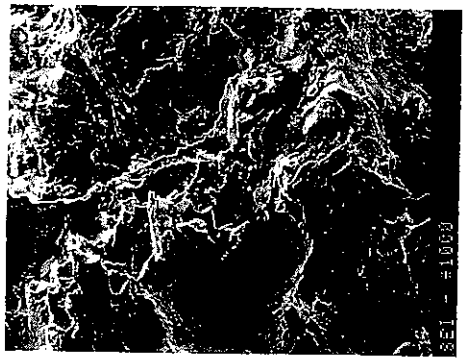
Zn　1000倍

EPMA観察（析出物）

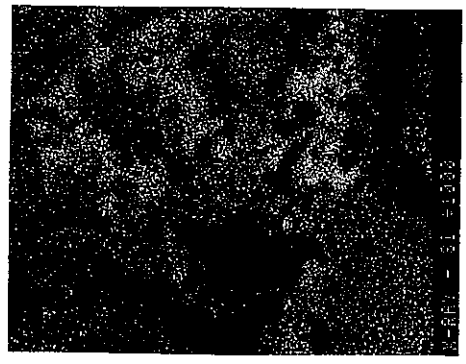


SEM写真　100倍

O　1000倍



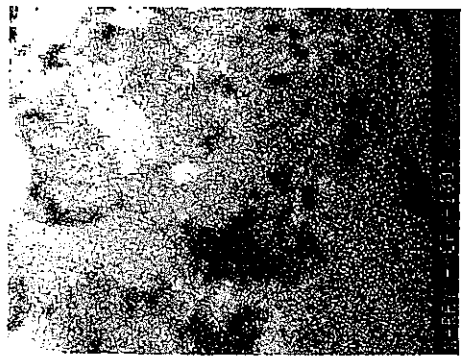
SEM写真　1000倍



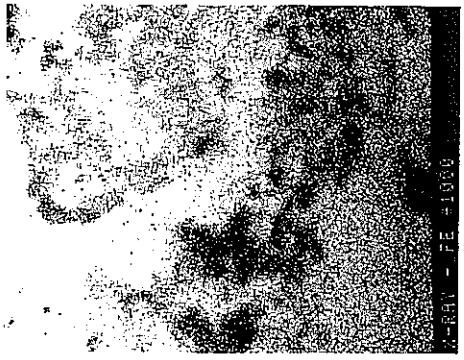
Si　1000倍

EPMA観察（析出物）

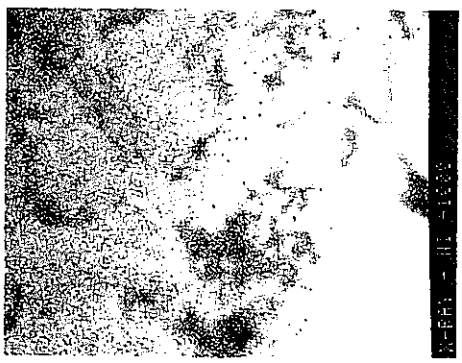
P　1000倍



Cr　1000倍

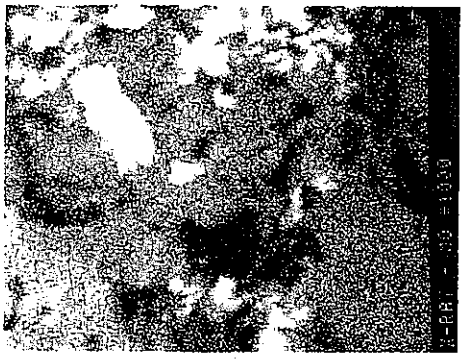


Fe　1000倍

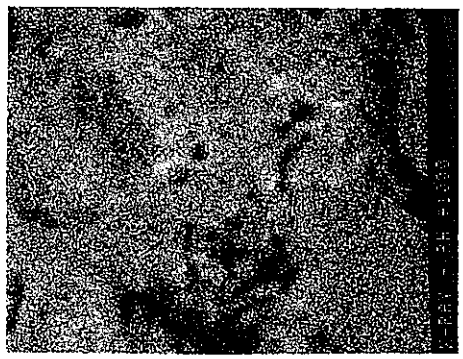


Ni　1000倍

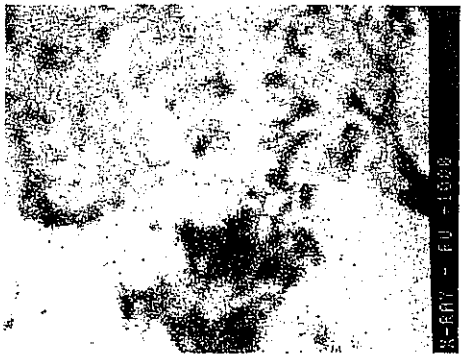
ＥＰＭＡ観察（析出物）



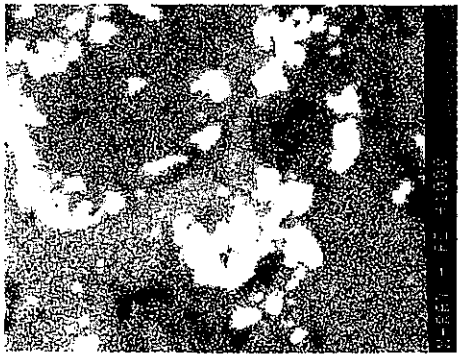
Mo　1000倍



Rh　1000倍

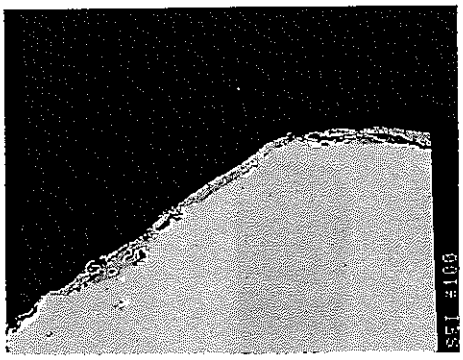


Ru　1000倍

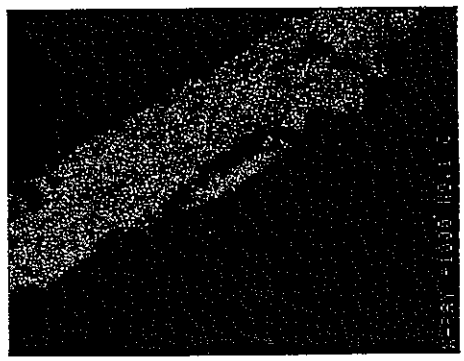


Pd　1000倍

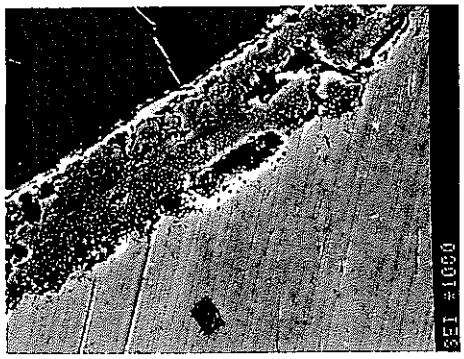
ＥＰＭＡ観察（析出物）



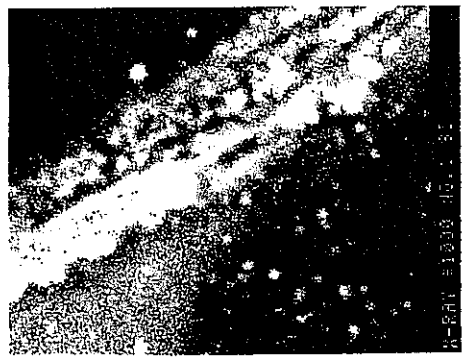
SEM写真　１００倍



Ｏ　１０００倍

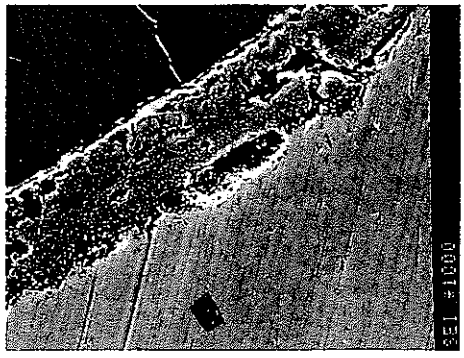


SEM写真　１０００倍

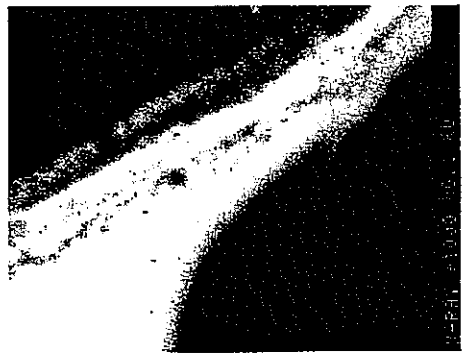


Ｓｉ　１０００倍

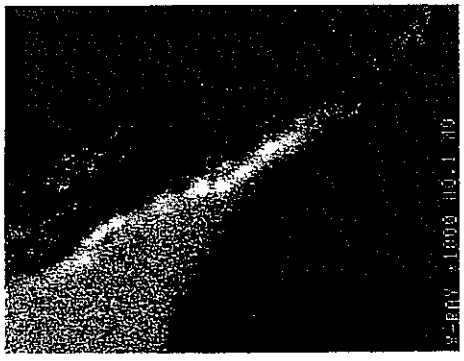
ＥＰＭＡ観察（断面）



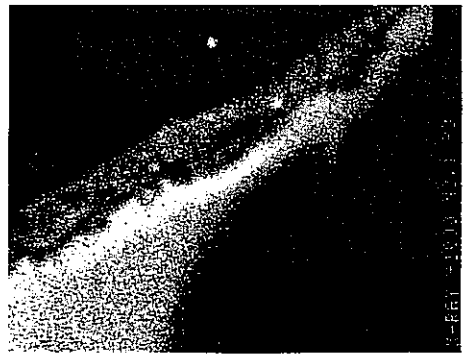
SEM写真　１０００倍



Ｒｕ　１０００倍



Ｍｏ　１０００倍



Ｐｄ　１０００倍

ＥＰＭＡ観察（断面）

結　論

溶融廃棄物ガラスからの、

電解法による元素分離の可能性を見いだした

・溶融したインコネル電極材中に白金族やＭｏなどの廃棄物成分が取り込まれる
・陰極表面に、溶融した電極成分と共に白金族やＭｏなどの廃棄物成分が析出する

今後の課題

・定電位電解による電解電位と析出元素の関係把握
・電極材質と析出元素の関係把握
・析出物の定量的評価

〔13〕塩化物スラグの酸化処理

高温溶融技術研究会

平成7年10月6日

発表テーマ　塩化物スラグの酸化処理

発表者所属　環境技術開発部 環境技術第一開発室　　発表者氏名　小林 洋昭

発表要旨

1. まえがき

乾式再処理プロセスの電解精製工程等から発生する塩化物形態の廃棄物については,その処理,処分方式が課題となっており,米国では,セメント固化やゼオライト固化法の検討が進められている。

動燃では,ガラス固化体の安定性に着目し,塩化物のガラス固化法を目指した検討を行ってきた。その結果,湿式法のゾルゲル法,イオン交換法等に対し,乾式プロセスにより,直接ガラスまたは結晶質の酸化物に転換可能なホウ酸による処理法が考えられた。

2. 目的

ホウ酸による酸化物への転換処理について,適用性を評価するための基本データを取得した。具体的には,転換条件について,ホウ酸と各塩化物の混合比,反応温度,反応時間等をパラメータにバッチテストを実施した。

3. 反応形態

次式に示すように,ある温度条件においてアルカリ金属等の塩化物はホウ酸と反応して酸化物になることが知られている。

$$6MCL + 2H_3BO_3 \longrightarrow 3M_2O + B_2O_3 + 6HCL\uparrow$$

(M ＝ Li,Na,K 等)

4. 試験方法

・代表元素として 1 価(Li,Na,K,Cs) , 2 価(Ba,Sr) , 3 価(Ce)それぞれの塩化物を対象に・複合または単元素系でホウ酸との混合比を 1;1～1;3 に調整し白金ルツボ容器を用いて・800～1000℃の条件で 1hr 反応させ,予想される反応後の重量変化から反応率を算出・尚,生成物を XRD 測定と IR スペクトルにより同定した。

5. まとめ

・ホウ酸との混合比が 1;3 以上であれば Cs の揮発を除いてほとんどの元素は酸化物に移行,また, ・KCL-ホウ酸系では 800℃条件でも酸化物に移行

・これらの結果から,塩廃棄物のガラス固化を前提としたホウ酸処理法の適用性を確認した

PNC PN8440 95－044

『塩化物スラグの酸化処理』

高温溶融技術研究会　　1995年 10 月 6日
環境技術開発部　環境技術第一開発室
小林　洋昭

背　景

F．P等を含んだ塩廃棄物（LiCl，NaCl，KCl 等）
処分手段・・現状ではガラス固化が最も有効
直接ガラス固化するのは難しい
塩素分離技術・・ホウ酸による酸化物化処理

反応想定

・・ホウ酸による酸化物化反応・・

一般にアルカリ金属等の塩化物は，次式に示すように
ホウ酸と反応して酸化物になることが知られている

$$6MCl + 2H_3BO_3 \longrightarrow 3M_2O + B_2O_3 + 6HCl\uparrow$$

（M ＝ Li，Na，K 等）

試験条件（ホウ酸との混合割合）

・１価の金属塩化物・・・ LiCl ，NaCl，KCl ，CsCl

・２価の金属塩化物・・・ $BaCl_2 \cdot 2H_2O$，$SrCl_2$

・３価の金属塩化物・・・ $CeCl_3 \cdot 6H_2O$

これらとホウ酸との混合割合（モル比）を変えて反応率測定

・反応終了後の生成物の同定

生成物は，以下の分析法により測定

結晶質： XRD測定

非晶質： IR スペクトル（拡散反射法）

試験条件の詳細

・・ホウ酸による混合割合試験・・

・ LiCl ， NaCl ， KCl ，CsClとH_3BO_3 との混合系

・（LiCl+KCl）とH_3BO_3 との混合系

・（LiCl+NaCl+KCl)とH_3BO_3 との混合系

・（LiCl+KCl+$SrCl_2$）とH_3BO_3 との混合系

・（LiCl+KCl+ $BaCl_2$ ・$2H_2O$）とH_3BO_3 との混合系

・（LiCl+KCl+ $CeCl_3$ ・$6H_2O$）とH_3BO_3 との混合系

・・反応温度試験・・

・ KCl とH_3BO_3 の混合系

試験方法

- 塩化物とホウ酸との混合割合が１：１，２，３，に調製
- 約３ｇを精秤し，白金ルツボ中で電気炉にて加熱溶融

  加熱条件：
  - 室温より１時間で1000℃に昇温
  - １時間保持
  - 白金ルツボを取り出し，水にて急冷
- 冷却後，デシケータにて恒量になるまで乾燥し，重量測定
- 加熱前後の重量変化と想定反応式による理論減少量から反応率を算定
- 生成物の組成分析により反応状況を評価

・理論減少量の求め方（例）

$$6LiCl + 2H_3BO_3 \longrightarrow 3M_2O + B_2O_3 + 6HCl\uparrow$$

$$2H_3BO_3 \longrightarrow B_2O_3 + 3H_2O\uparrow$$

LiCl ：a g　　M.W ＝ 42.39

H_3BO_3：b g　　M.W ＝ 61.83

HCl 分　　：(a/42.39) ×34.46 g

未反応H_3BO_3: b-61.83 ×(a/42.39)/3

H_2O 分　　：(未反応H_3BO_3)/61.83×(3/2) ×18.0

理論減少量　＝ HCl分　＋ H_2O分

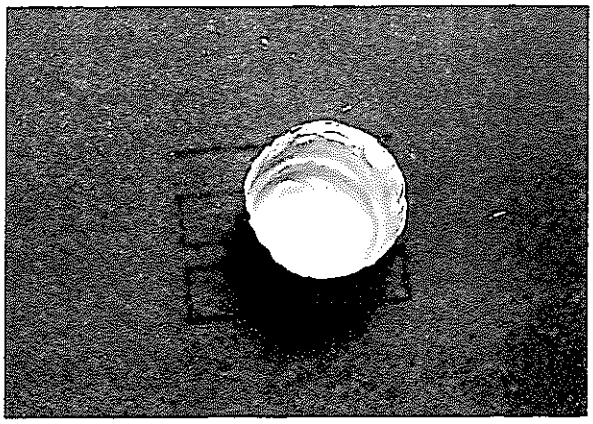
試験条件・方法（ホウ酸との反応温度）

・KCl とホウ酸の１：１，１：２の混合系

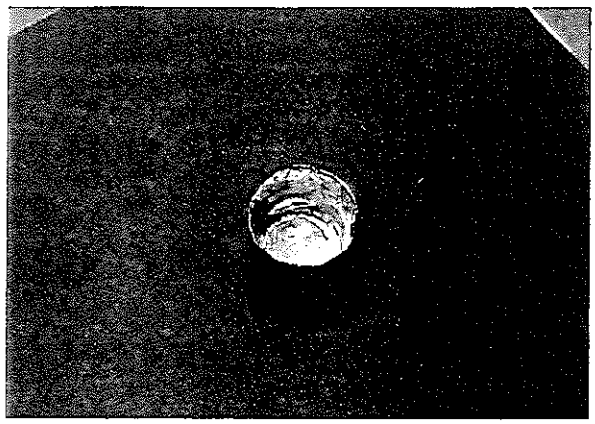
・保持温度：800 ，900 ，1000℃

・保持時間：１時間

・試験方法はホウ酸との混合割合と同様



KCL－H_3BO_3（1＋1）



KCL－H_3BO_3（1＋2）

試験結果

(a) LiCl, NaCl, KCl , CsClとH_3BO_3 との混合系

- H_3BO_3 が過剰の条件（塩化物とホウ酸比が1：3）では十分に酸化物化
- 生成物は，非晶質の $M_2O \cdot 2B_2O_3$(M=Li、Na、K)系のガラス質
- LiClおよび(LiCl+KCl)とH_3BO_3 の1：3混合系の生成物の組成分析では，反応率からの予想値組成と一致

(b) CsClとH_3BO_3 との混合系

- 全混合系において，反応率は見掛上100%を超えた
（組成分析から，Cs_2Oの揮発影響によると考えられる）

(C) (LiCl+KCl+$SrCl_2$)とH_3BO_3 との混合系

- 塩化物中の$SrCl_2$ の割合が多いと$Sr_2B_5O_9Cl$ と $M_2O \cdot 2B_2O_3$ 系ガラスとの混合物が生成
- 塩化物中の$SrCl_2$ の割合が 10%位以下であれば完全酸化

(d) ($LiCl+KCl+BaCl_2 \cdot 2H_2O$) と$H_3BO_3$ との混合系

・H_3BO_3 が過剰の条件（塩化物とホウ酸比が１：３）では十分に酸化物化

・生成物は(M_2O+MO)・$2B_2O_3$（M= Li , K , Ba）系ガラス質

(e) ($LiCl+KCl+CeCl_3 \cdot 6H_2O$) と$H_3BO_3$ との混合系

・H_3BO_3 が過剰の条件（塩化物とホウ酸比が１：２）で十分に酸化物化

・生成物はCeO_2とM_2O ・$2B_2O_3$（M=Li , K)系ガラス質の混合物

（反応温度）

KCl とH_3BO_3 との混合系（１：２）では，800 ℃でも酸化物に移行

結論

それぞれの評価結果から判断し，ホウ酸による酸化物化処理は，塩廃棄物のガラス固化にいたる前処理技術として適用の可能性が確認できたと考えられる

〔14〕ガラス固化の低レベル廃棄物への適用性

高温溶融技術研究会

平成７年１０月６日

発表テーマ	ガラス固化の低レベル廃棄物への適用性		
発表者所属	環境技術開発部 環境技術第一開発室	発表者氏名	捧賢一

発表要旨

ガラス固化の低レベル廃棄物処理への適用の例として，ロシアＳＩＡラドンのコールドクルーシブル溶融法，米国セイラー社の処理プロセスについて紹介する。

コールドクルーシブルの特徴としては，処理温度が高くできること，プラント規模を小さくできること，Cs等が揮発しやすいことが挙げられる。

セイラー社の処理プロセスの特徴としては，有機物・無機物混合廃棄物を処理でき，しかも有機物は補助燃料として活用することが挙げられる。

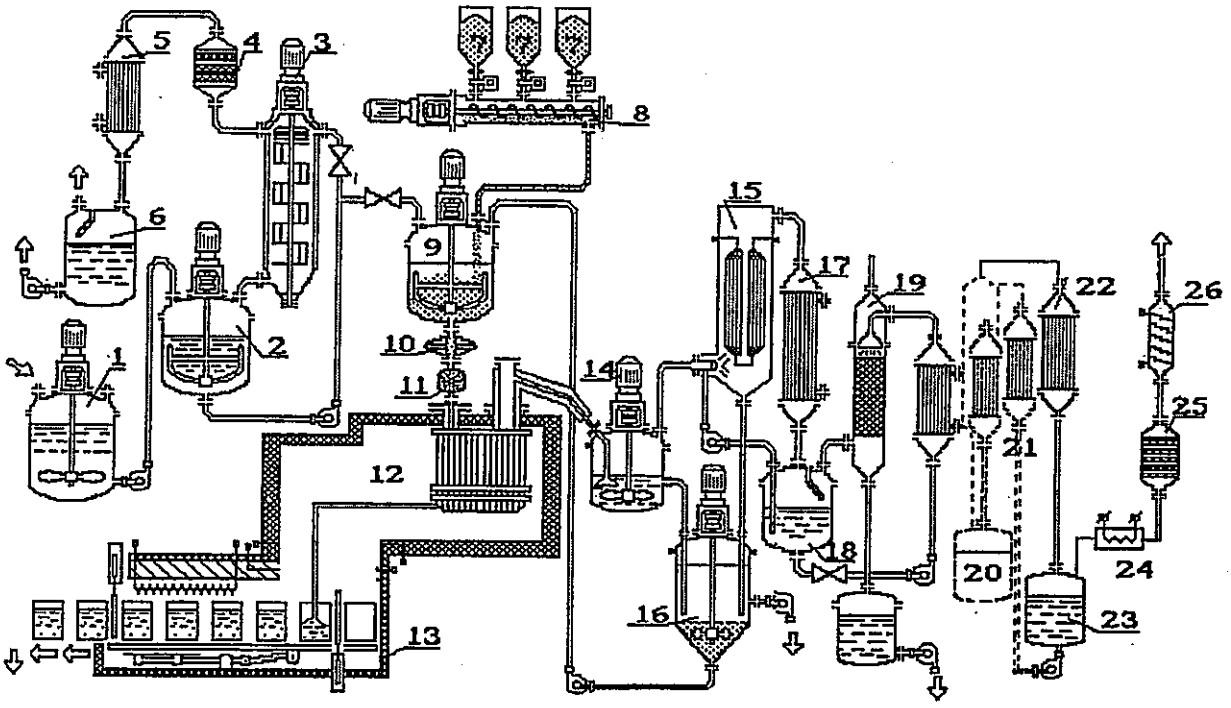


Fig. 1. Flow sheet of liquid radioactive waste vitrification plant.
1-waste storage tank, 2-concentrated waste tank, 3-rotary evaporator, 4,26-filters, 5,17,21,22-heat-exchangers, 6,16,18,20,23-reservoirs, 7-glass forming additives bins, 8-screw feeder, 9-batch mixer, 10-charging feeder, 11-apparatus for mechanical activation, 12-melters, 13-annealing furnace, 14-wet scrubber, 15-sleeve filter, 19-absorption column, 24-heater, 25-catalytic reactor.

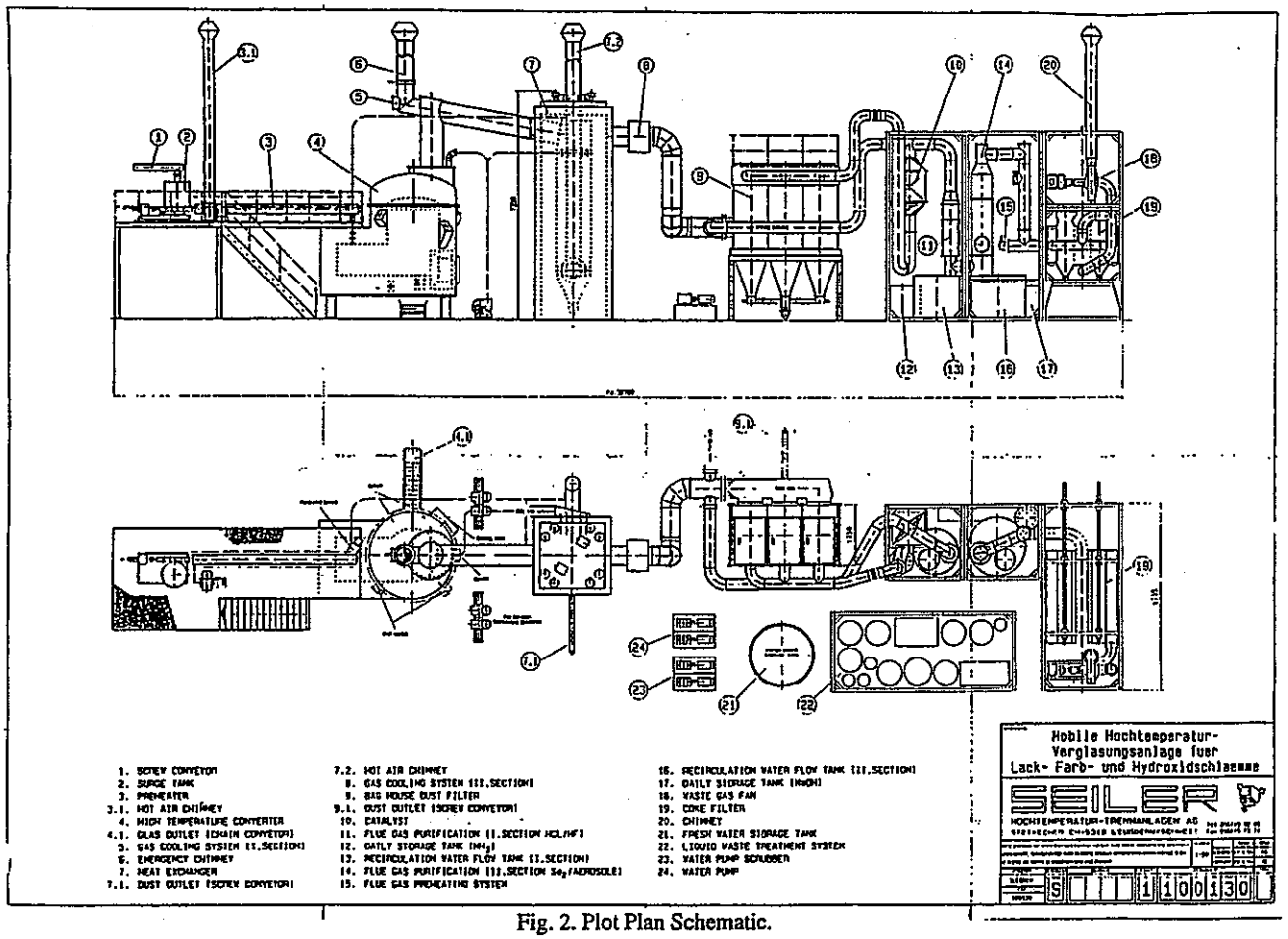


Fig. 2. Plot Plan Schematic.

PNC PN8440 95－044

ガラス固化の
低レベル廃棄物への適用性

高温溶融技術研究会

1995年10月6日

捧　賢一

動力炉・核燃料開発事業団
東海事業所

Power Reactor and Nuclear Fuel
Development Corporation

誘導加熱による中レベル放射性廃棄物のガラス固化
SIA "Radon", Russia

危険な廃液を処理するための
米国Seiler社のガラス固化プロセス
Seiler Pollution Control Systems, Inc., USA

Fifth International Conference on Radioactive
Waste Management and Environmental Remediation
(ICEM '95)

表　ロシアにおける溶融方式の比較

溶融方式	ジュール加熱 セラミックメルタ	コールド クルーシブル
開発年代	1980～	1980年代末～ （フルスケールプラント：1990～）
利点	・固化体の化学的耐久性が高い ・放射性核種の揮発が低い	・固化体の化学的耐久性が高い （ホウ素フリー、Al-Si、Ti-Si） ・耐火物や電極が不要なため2000～3000℃で運転できる
欠点	・耐火物の浸食が起こるため1200℃以上で運転できない ・小型化できない ・遠隔操作が難しい ・安全性に乏しい	・Csが揮発し易い

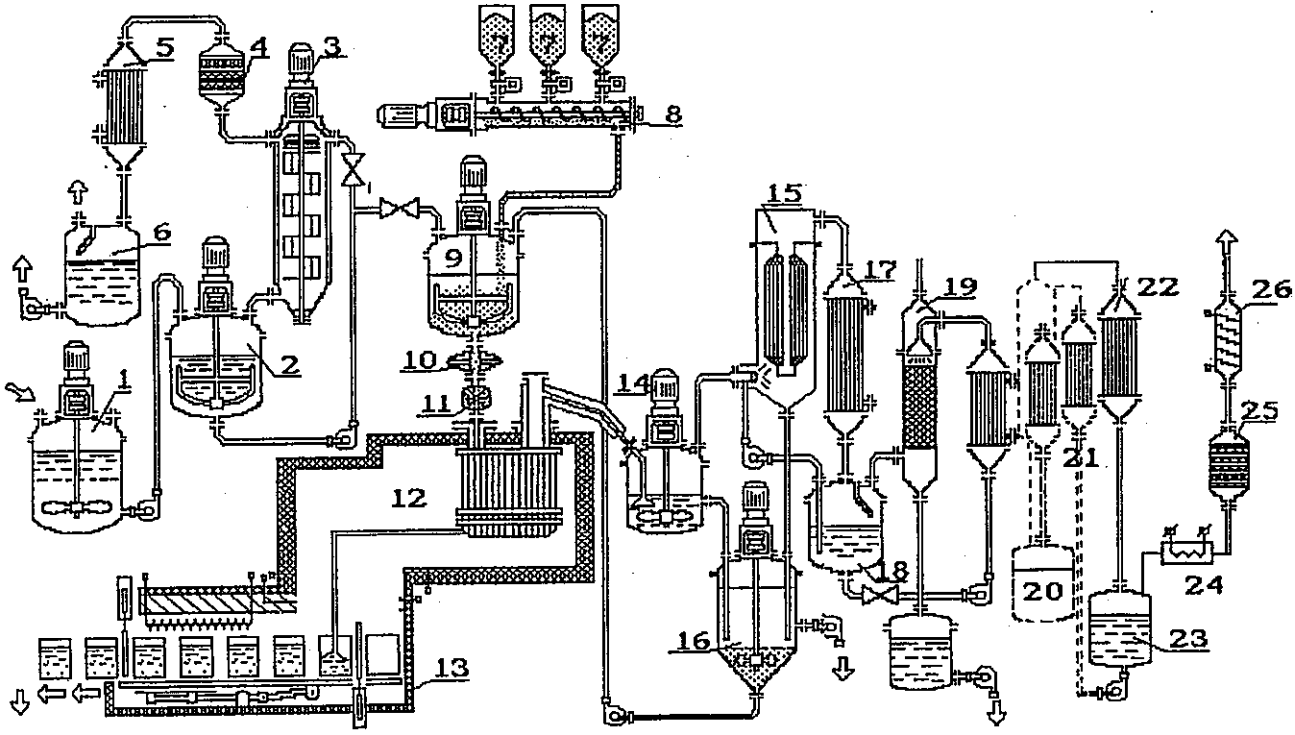


Fig. 1. Flow sheet of liquid radioactive waste vitrification plant.
1-waste storage tank, 2-concentrated waste tank, 3-rotary evaporator, 4,26-filters, 5,17,21,22-heat-exchangers, 6,16,18,20,23-reservoirs, 7-glass forming additives bins, 8-screw feeder, 9-batch mixer, 10-charging feeder, 11-apparatus for mechanical activation, 12-melters, 13-annealing furnace, 14-wet scrubber, 15-sleeve filter, 19-absorption column, 24-heater, 25-catalytic reactor.

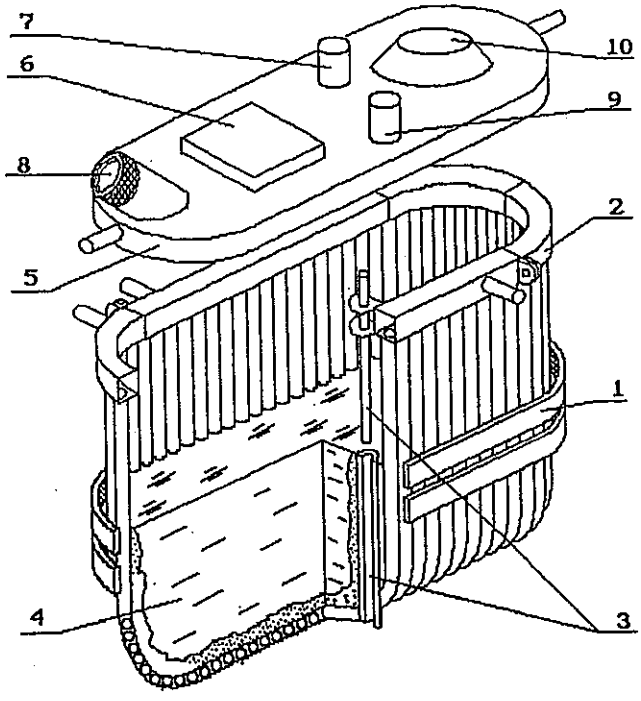


Fig. 2. Cold crucible.
1-inductor, 2-cold crucible, 3-pouring unit, 4-melt, 5-lid, 6-hatch, 7-joining, 8-looking window, 9-batch feeding port, 10-off-gas outlet connection.

表　溶融方式の能力比較

溶融方式		ジュール加熱 セラミックメルタ	コールド クルーシブル	
処理能力	(kg/h)	最大25	最大25	最大30
比処理能力	(kg/m^{2}h)	最大40	最大170	最大400
溶融効率	(kWh/kg)	2.3～3.2	4.4～6.4	4.5～7.0
溶融温度	(℃)	最大1300	最大3000	
Csの減少	(%)	3以上	5以下	
メルタ重量	(kg)	1000以上	200以下	
耐火物と融液の接触		有り	なし	

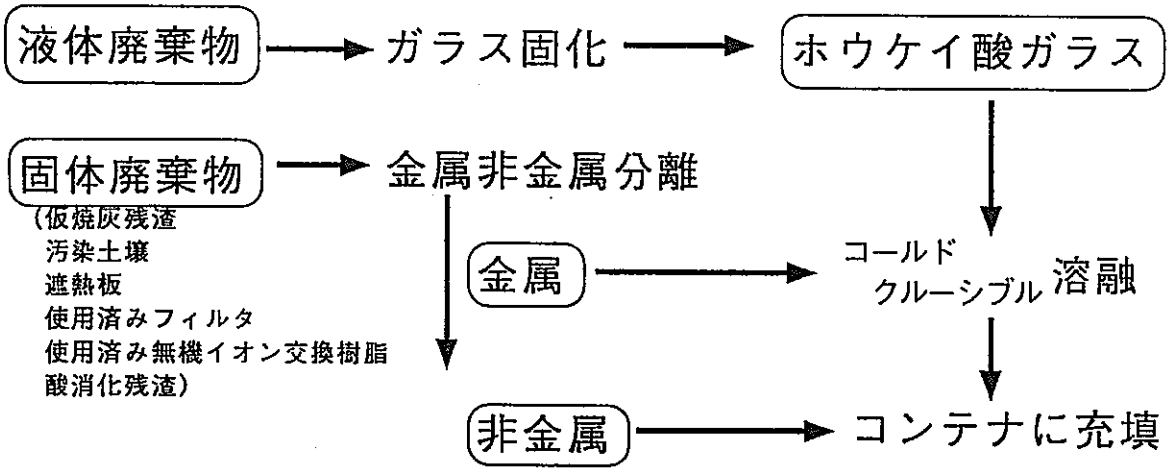


図　中レベル廃棄物処理の流れ

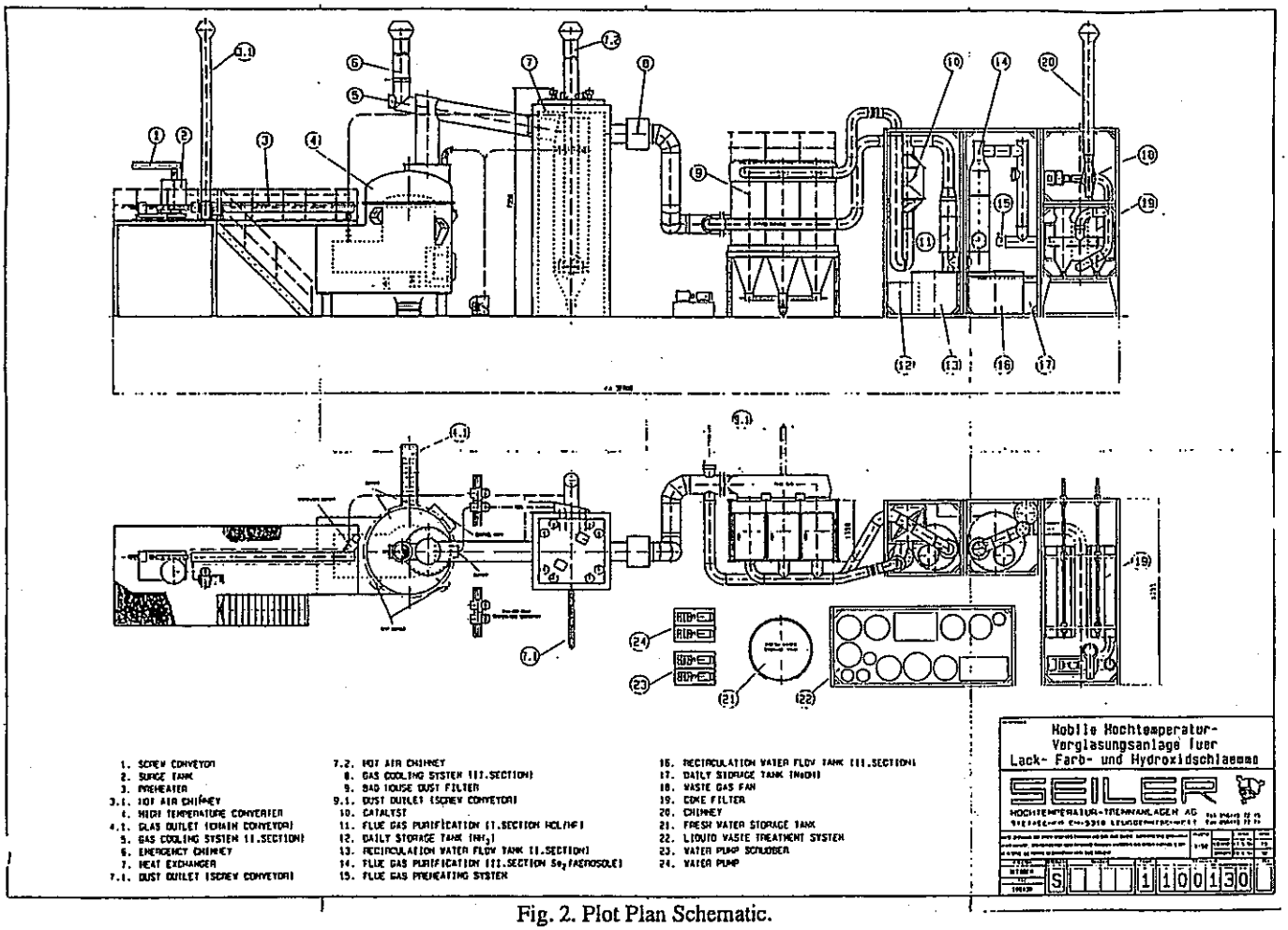


Fig. 2. Plot Plan Schematic.

Metal	TCLP test	USEPA Toxicity limit	Percent of limit
	mg/l	mg/l	%
Barium	6.641	100	6.64
	Measured	Limit	
Arsenic	<.020	5	Nondetect
Cadmium	<.020	1	Nondetect
Chromium	0.153	5	3.1
Lead	<.010	5	0.2
Mercury	<.002	0.2	Nondetect
Selenium	<.020	1	Nondetect
Silver	<.010	5	Nondetect

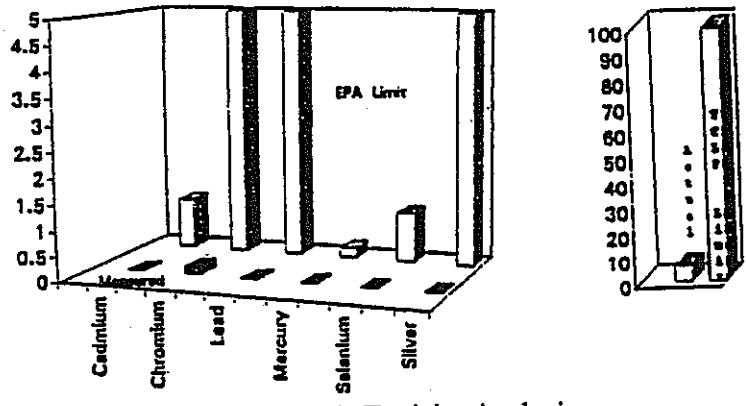


Fig. 4. Metals Toxicity Analysis.

表2.2.7－2　固化法の分類

項目		セメント	アスファルト	プラスチック	水熱	ガラス	シンロック
固化原理		水和反応	冷却による硬化	重合反応	水熱反応	ガラス化反応	合成岩石反応
生成物		無機物	有機物	有機物	無機物	無機物	無機物
浸出率 (g/dm²)	アクチニド	2×10^{-5}～10^{-7}	3×10^{-8}～10^{-2}	7×10^{-6}～3×10^{-7}	7×10^{-5}～1×10^{-3}	10^{-9}以下～8×10^{-8}	7×10^{-5}～7×10^{-7}
	核分裂生成物	10^{-3}～10^{-5}	3×10^{-4}～6×10^{-6}	不明	10^{-8}～10^{-3}	8×10^{-8}～10^{-5}	10^{-6}～10^{-3}
	ｱﾙﾌｧ、ｱﾙﾌｧ以上	4×10^{-3}～9×10^{-7}	4×10^{-7}～4×10^{-4}	6×10^{-7}～8×10^{-4}	7×10^{-3}～8×10^{-3}	8×10^{-6}～6×10^{-5}	7×10^{-5}～8×10^{-3}
廃棄物の法固化手	液	混練	混練	不可（水分除去）	不可（水分除去要）	注入混合	不可（水分除去要）
	スラッジ	混練	混練	混練	混練	注入混合	不可（水分除去要）
	灰・粒子	混練	混練	混練	混練	注入混合	混練
	塊物	充填	充填	充填	不可	注入混合	不可
処理温度		室温	90～300 ℃	乾燥 175℃ 固化 室温	300 ℃	1250℃	1150℃
処理圧力		常圧	常圧	常圧	30 MPa	常圧	50～100MPa
設備費		低	中	やや高	やや高	高	非常に高
原子力での実績		稼働中	稼働中	稼働中	実プラント設計中	稼働中	実験室規模
評価		◎	×	×	◎	○	×