

平成21年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「繊維分散強化複合耐火物を用いた
高純度アルミニウム溶湯供給装置の開発」

研究開発成果等報告書

平成22年3月31日

委託者 関東経済産業局

委託先 有明セラコ株式会社

目 次

第1章	研究開発の概要	2
1-1	研究開発の背景・研究目的及び目標	3
1-2	研究体制（研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者）	4
1-3	成果概要	5
1-4	当該研究開発の連絡窓口	6
第2章	高純度アルミニウム溶湯供給装置の構想・設計	7
2-1	アルミニウム溶解工程の構想	7
2-2	アルミニウム溶湯精製・温度保持工程の構想	7
2-3	高純度アルミニウム溶湯供給装置の設計	8
2-4	高純度アルミニウム溶湯供給装置の仕様	9
第3章	繊維分散強化複合耐火物（ニカセラコ）の特性	10
3-1	ニカセラコの製法と一般特性	10
3-2	ニカセラコの耐熱特性の測定	11
第4章	アルミ急速溶解炉の開発・製作	13
4-1	アルミ急速溶解試験装置によるアルミニウム溶解試験	13
第5章	大型複雑形状の一体成型溶湯バスの開発	15
第6章	ニカセラコによる耐熱衝撃性パイプ状成形体の開発	18
6-1	ニカセラコ製インペラシャフトの製作	18
第7章	ニカセラコ製小型緻密質成形技術の開発	20
7-1	ニカセラコ製ラドルの製作	20
第8章	高純度アルミニウム溶湯供給装置の組立て製作	22
第9章	高純度アルミニウム溶湯供給装置の運転試験	25
9-1	アルミ溶湯溶解・汲出し試験	25
9-2	高純度アルミニウム溶湯供給装置の熱収支	27
9-3	アルミニウム溶湯の品質測定	29
第10章	総括	32

第1章 研究開発の概要

本研究開発は、新規に開発した新素材：熱損傷抵抗に優れた炭化ケイ素繊維分散強化耐火物（商品名：ニカセラコ、以下ニカセラコと書く。特許第4022661号「繊維強化複合耐熱成形体」、特願2008-106590「炭化ケイ素系繊維分散強化複合耐火物成形体」）を使用した高純度アルミニウム溶湯供給装置を開発し、リサイクル原料からの不純物を除去した高純度アルミニウム溶湯を川下の鑄造メーカーに供給し、鑄造品の品質向上を図るものである。

装置の各部には「ニカセラコ」を使用し、従来の耐火物あるいはセラミックスでは実現できなかった大型・薄肉・複雑形状の部材設計を行って、高度化目標を達成する。

アルミ溶解炉はガスバーナーと溶湯攪拌式溶解槽によりアルミ原材料を急速に溶解する。アルミ溶湯はニカセラコ製ラジアントチューブバーナーを使用して酸化物の発生を防止しながら効率的に昇温する。アルミ溶湯純化供給装置は、システム全体を気密性の高い密閉型とし、浸漬型パネルヒーターを使用して槽毎に加熱する。アルミ溶湯は回転型脱ガス装置で水素ガスおよび非金属不純物を除去した後、酸化物および異物等の不純物をフィルターで除去する。さらに静置して温度を調整した後、ラドルで鑄造機へ注湯する。

上記構造のアルミ溶湯保持槽は一体成形で製作する必要がある。従来のアルミナ系キャストブル、炭化ケイ素系キャストブルでは熱歪み、熱衝撃に弱く大型・複雑形状の槽の製作は不可能であった。炭化ケイ素繊維で分散強化された炭化ケイ素系耐火物「ニカセラコ」は熱歪み、熱衝撃に優れた抵抗性を有するため、従来キャストブルでは不可能な大型・複雑形状のアルミ溶湯槽の製作が可能である。従って、本計画の熔融アルミ保持槽はニカセラコで製作する。またアルミ溶解炉のラジアントチューブは長大な形状であるため窒化ケイ素等のファインセラミックスでは製作できない。そこで耐熱性・耐熱衝撃性に優れたニカセラコで成形・製作する。さらに、回転式脱ガス装置のガス吹き込み管、フィルターケース、ヒーター用浸漬ケース、アルミ供給用ラドル等もニカセラコで製作し、繰り返し熱歪み、熱衝撃による損傷を防ぎ使用寿命を向上させる。

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

本研究開発は特定ものづくり基盤技術高度化指針のうち、以下の項目に対応する。

(十) 鑄造に係る技術に関する事項

(1) 自動車に関する事項 (3) 家電に関する事項、(5) その他産業に関する事項

① 川下製造業者等の抱える課題及びニーズ。

ア. 高強度化 ク. 環境配慮

自動車、家電、その他産業ではシリンダーブロック、アルミホイール等各種部品に、多くのアルミニウム合金鑄造部材が使われている。これらはダイカスト法、金型鑄造法、重力鑄造、低圧鑄造法等で製造されている。原料であるアルミニウム合金は最近、リサイクル品の割合が増加しており、これに伴いアルミ溶湯中の不純物の増加が、鑄造品の品質低下および不良発生の要因となっている。

従来、鑄造用アルミニウムの溶解・保持炉には坩堝炉、あるいはガス燃焼バーナーによる反射炉型溶解・保持炉が使われている。しかし、坩堝炉は溶解に長時間を要しエネルギー効率が低く、酸化物の生成等により溶湯品質に問題がある。一方、ガス反射炉型溶解・保持炉は坩堝炉に比べて熱効率が良いが、アルミ酸化物や水素ガスなどの不純物が混ざりやすく、歩留まり率が落ちるのが欠点である。これら問題点を解決するため、坩堝炉と反射炉を併用したアルミ溶解・保持炉が開発され、それぞれの欠点が改良されてきているが、高品質・高歩留まり・省エネの3項目全てに優れ、リサイクル原料にも対応できる高品質なアルミニウム溶湯を供給できる溶解・保持炉が求められていた。

上記①を踏まえた高度化目標の達成に資する特定研究開発等の実施方法(高度化の方向性)は次の項目の開発が掲げられている。

シ. 品質の確保及び向上に資する鑄造技術の開発

ソ. 環境配慮に資する鑄造技術の開発

上記高度化の方向性指針をもとに本研究開発では、次のような内容で実施した。

アルミ鑄造プロセスにアルミニウム溶湯を供給する装置において、リサイクル品を含むアルミニウム原材料を直接アルミ溶湯に浸漬して溶解することにより、酸化物の生成を極力抑えると共にエネルギー効率を向上させる。アルミ溶湯の加熱・保持に際してはラジエントチューブバーナーおよび電気ヒーターによる間接加熱で

行い酸化物の生成を防止する。アルミニウム溶湯中の不純物は回転式脱ガス装置およびセラミックスフィルターで効率的に除去し、高純度なアルミ溶湯を供給する装置を開発する。開発に際しては、新規に開発したクラックが入り難い新素材：繊維分散強化複合耐火物（商品名ニカセラコ）を装置の主要部に使用して従来の耐火物では不可能な新しい構造の炉を製作する。

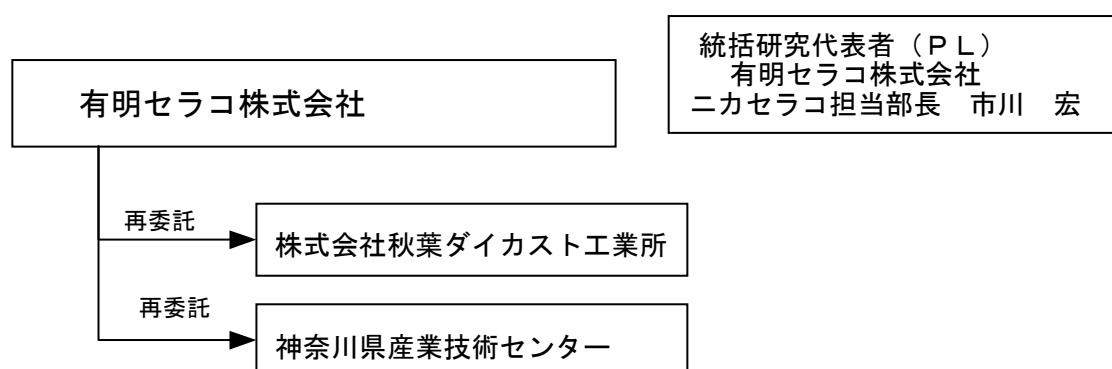
この様にして高純度のアルミ溶湯を鑄造機へ供給し、鑄造品の品質を高度化する。
（高度化目標）

- ・アルミ溶湯中の不純物K値：0.1以下（現状：0.5）
- ・アルミ溶湯中のガス濃度：減圧凝固法 1級（現状5級）
- ・アルミ鑄造製品の不良率の低減（現状の1／2以下）
- ・アルミロスの減少：1％以下（現状の5％）
- ・エネルギー消費の低減, アルミ保持炉の耐久性向上、設備寿命の延長によるコスト低減。

1－2 研究体制

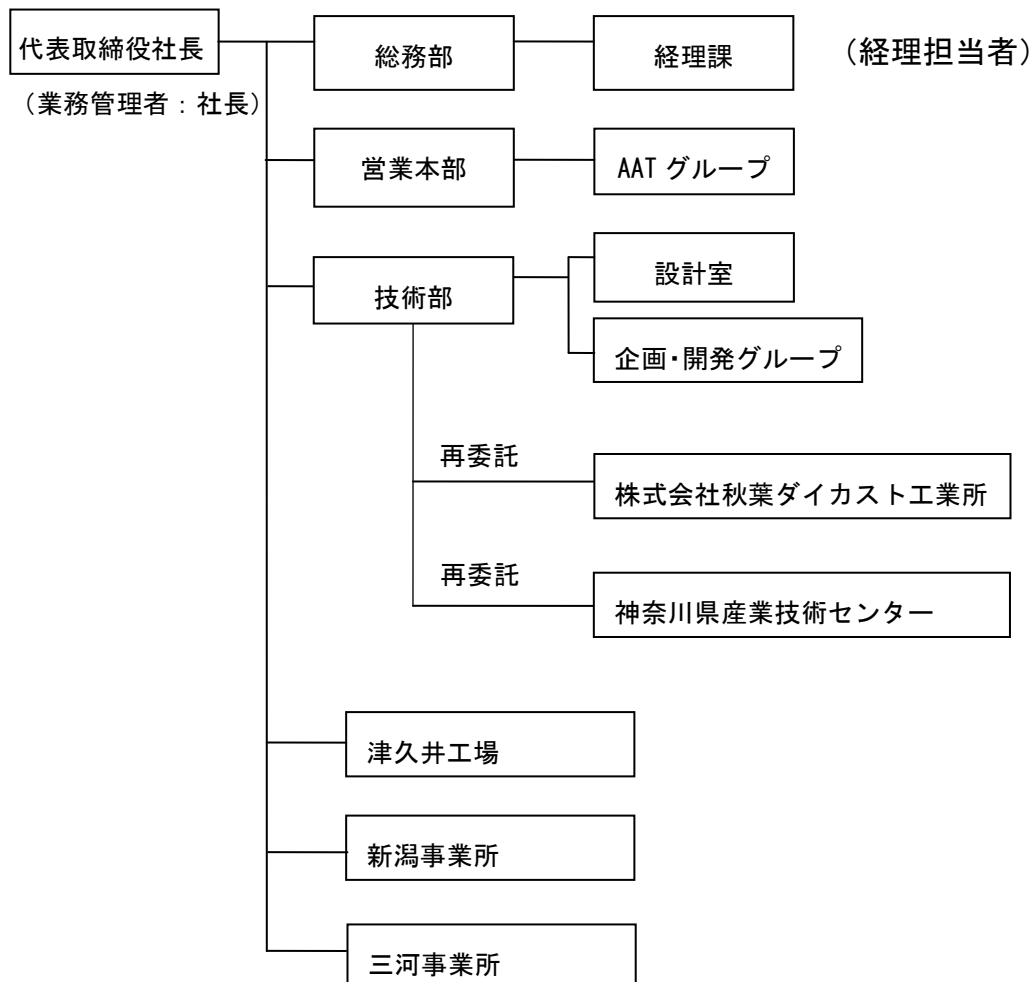
（1）研究組織と管理体制

1）研究組織（全体）



2) 管理体制

事業管理者：有明セラコ株式会社



1-3 成果概要

①高純度アルミニウム溶湯供給装置の構想・設計

切粉等のリターン材から酸化を極力抑えた清浄な溶湯を供給するため、溶湯攪拌装置とニカセラコのラジアントチューブバーナーを組み合わせた急速溶解炉と電気ヒーター（セラコヒーター）を使用した溶湯清浄化装置を有する温度保持炉を設計した。

②繊維分散強化複合耐火物（ニカセラコ）の基本的特性を測定し、ニカセラコの特長である破壊抵抗性、熱衝撃損傷抵抗、耐熱性等を調べ、理論的な裏づけを行った。

③急速溶解炉の開発では、溶湯攪拌装置を使用した試験装置で切粉の溶解試

験を行い本装置の設計および運転諸元を把握した。

④大型複雑形状の一体成形溶湯バスの開発

本装置の主要部であるラジアントチューブ一体成形溶湯バス（溶解室、保持室）、投入室、渦流室等はニカセラコ一体成形品で製作した。特にラジアントチューブ一体成形溶湯バスは初めての試みであったが、1回で成功した。

⑤ニカセラコでアルミ溶湯清浄装置用インペラシャフトを製作した。

⑥ニカセラコ製小型緻密質成形技術の開発ではニカセラコ製蓋付きラドルの製作に成功した。

⑦高純度アルニウム溶湯供給装置を組立て製作して、(株)秋葉ダイカスト工業所のダイカストマシンの横に据付けた。

⑧高純度アルニウム溶湯供給装置でアルミインゴットを使った溶解試験を行い、ダイカストマシンを同時稼働させ、時間当たり約200kgの溶解・汲出し運転に成功した。

リターン材50%を入れた溶解実験では、投入室の溶湯はK値が0.6、減圧法ガス量が6級と鑄造には適さない品質であったが、浄化装置（ガス吹込み式溶湯清浄装置、セラミックフォームフィルター）により浄化され、汲出し室の溶湯のK値は<0.1、ガス量は1～2級と目標品質を達成した。また、ニカセラコ製ラジアントチューブと溶湯攪拌装置を使用した溶解炉の熱効率は溶解時に47%と一般の溶解炉の20%と比べ非常に高いことが確認された。

装置が故障したため、当初計画していたアルミロス歩留まりおよび製品品質・不良率の確認はできなかった。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

窓 口：有明セラコ株式会社 技術部

担当者：ニカセラコ担当部長 市川 宏

住 所：〒243-0815 神奈川県厚木市妻田西3-11-2

連絡先：TEL：046-221-6049 FAX：046-221-6657

E-mail：h-ichikawa@ceraco.co.jp

第2章 高純度アルミニウム溶湯供給装置の構想・設計

2-1 アルミニウム溶解工程の構想

本装置では、アルミニウムの酸化を極力抑えるため、アルミニウム冷材原料を直接アルミニウム溶湯中に浸漬して溶解する方式をとる。また、アルミニウムの加熱溶解はガスバーナーの火炎が直接接触しないラジアントチューブバーナーで行う。ラジアントチューブは耐熱性と耐熱衝撃性を有し熱伝導率が高いニカセラコで製作する。また、永久磁石式アルミ溶湯攪拌装置によりアルミ溶湯を攪拌するとともに、渦流を発生させる。

アルミ溶解工程は投入室、渦室、溶解室からなり、通常のアルミインゴットは投入室でアルミ溶湯に浸漬して溶解する。アルミ切粉等のリターン材は渦室の渦流中に投入して溶解する。渦室ではアルミ溶湯が渦を巻いて下降しているため、従来溶解が困難であったアルミ切粉などのリターン材も容易に溶解する。溶解室のラジアントチューブバーナーで加熱されたアルミ溶湯は溶湯攪拌装置により3室を循環して、各室の温度を均一化する。

この様な構造であれば、アルミニウム投入原料を溶解する場合、酸化を最小限に抑えられる。

2-2 アルミニウム溶湯精製・温度保持工程の構想

溶解室のアルミニウム溶湯は酸化物が混ざらない様に、湯面下に設置された樋から保持室へ流れる。保持室ではアルミニウム溶湯中の不純物を取り除くとともに、溶湯中に溶け込んでいる水素ガスを除去して精製する。さらに、後工程の鑄造に適した溶湯温度に調整保持する。

保持室は脱ガス室と濾過室および温度調整室、汲出し室からなる。溶解室から脱ガス室に入ったアルミニウム溶湯は、回転式脱ガス装置により溶解している水素ガスが除去される。次に溶湯はセラミックフォームフィルターにより100 μ m以上の異物が除去されて保持室へ流れる。保持室には電気ヒーター（セラコヒーター）が設置されており、このヒーターでアルミニウム溶湯は所定温度 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ でコントロールされる。温度コントロールされた清浄なアルミニウム溶湯は汲出し室からラドル等で鑄造機に供給される。

2-3 高純度アルミニウム溶湯供給装置の設計

上記の構想にもとづき装置の設計を行った。装置の概略図を図1に示す。
アルミニウム溶湯を入れる槽および溶解槽加熱用ラジエントチューブはクラックが入り難く耐熱衝撃性に優れたニカセラコの一部成形体で製作する。

溶解室でのアルミニウム溶湯攪拌には永久磁石式アルミ溶湯攪拌装置を使用する。加熱用ガスバーナーはアルミ溶解重量と放熱量から12万Kcal/hのプロパンガスバーナーを2基使用する。

脱ガス装置は脱ガス効率の良いアルミ溶湯清浄化装置「静波」を採用し、インペラー(回転翼)はニカセラコで製作する。現状の標準回転翼はカーボン製であるが、酸化により寿命が短い。ニカセラコ製インペラーは長寿命で、ファインセラミックス製より安価なインペラーとして市場展開が期待できる。

アルミ溶湯濾過用フィルターはアルミナ系セラミックス・フォームフィルターの孔径20ppiを使用し溶湯中の100 μ m以上の異物を除去する。

汲出し室からアルミ溶湯を汲みだすラドルもニカセラコ製で試作する。ニカセラコ製ラドルは現行の鋳鉄ラドルと比較し、軽量・長寿命、鉄不純物の混入を防止できる。

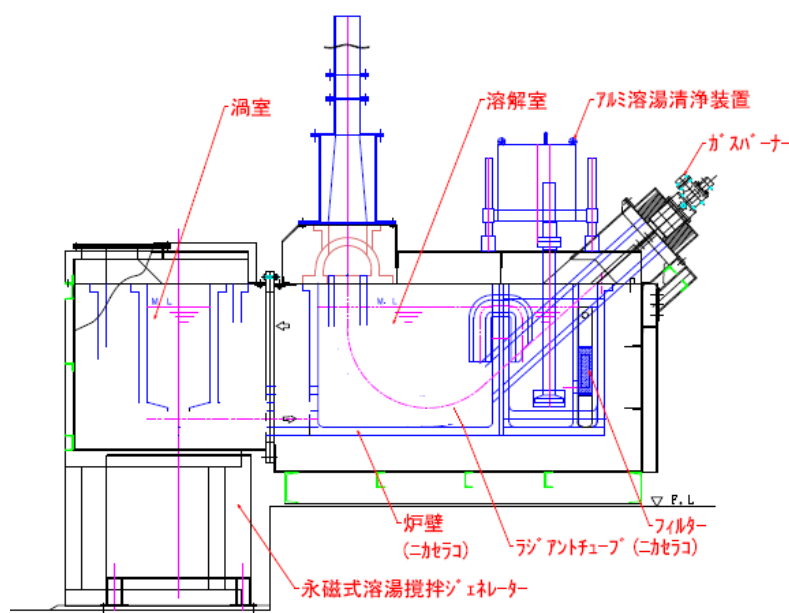


図1 高純度アルミニウム溶湯供給装置の概略図

2-4 高純度アルミニウム溶湯供給装置の仕様

1) 装置名：高純度アルミニウム溶湯供給装置 1 基

1)-1 寸法：3610mm 長さ×2410mm 幅×1600mm 高さ、一部 620mm 深さのピット

1)-2 本体重量：9.5 トン

2) 仕様諸元

2)-1 アルミニウム溶湯材質

ダイカスト用アルミニウム合金 ADC12

2)-2 容量：アルミ合金 3,100 kg

(1) 投入室・・・・・・・・・・アルミ合金 400 kg

(2) 溶解室・・・・・・・・・・アルミ合金 1300 kg

(3) 保持室（汲出し室を含む）アルミ合金 1400 kg

2)-3 加熱能力

(1) 起動時間：標準約 12 時間（但し、初期炉内乾燥・昇温完了後）

(2) 溶解能力：250 kg/h（680℃）

2)-4 保持温度：

投入室、溶解室、保持室 各室 680℃

2)-5 熱源

(1) ガスバーナー

加熱熱源：プロパンガス

燃焼機器：ガスバーナー 2 基

総発熱量 12 万 kcal/h×2

ガスおよび空気供給制御装置配管 一式

(2) 電気ヒーター

パネル型浸漬ヒーター（セラコヒーター） 12 KW 2 基

ヒーター用トランス 15 KVA 2 基

制御盤 一式

2)-6 永久磁石式アルミ溶湯攪拌ジェネレーター 一式

2)-7 アルミ溶湯清浄装置 一式

2)-8 セラミックフォームフィルター（孔径：20PPi） 一式

第3章 繊維分散強化複合耐火物（ニカセラコ）の特性

高純度アルミニウム溶湯供給装置のアルミ投入室、溶解室、保持室、汲出し室、ラジアントチューブにはニカセラコが使われる。ニカセラコは炭化ケイ素繊維で分散強化された耐火物で、クラックが入り難く、耐熱衝撃性に優れている。

そこで、本開発に当たりニカセラコの基本的特性を測定した。

3-1 ニカセラコの製法と一般的特性

ニカセラコの試験片は次のようにして製作した。

炭化ケイ素系不定形耐火物と炭化ケイ素繊維チョップ（繊維長 20mm）を混合し、水を加え混練機で混練した泥しょうを型に鑄込み成形した。成形品は乾燥後、600℃で焼成すると強度を持つ耐火物成形体を得られた。

ニカセラコの一般特性を市販の炭化ケイ素質およびアルミナ質不定形耐火物成形体と比較して表1に示す。ニカセラコのかさ密度、熱膨張係数、熱伝導率等の物理特性は炭化ケイ素質耐火物と同等であるが、曲げ強度、圧縮強度は一般的な耐火物成形体より若干高い。特に炭化ケイ素質のニカセラコはアルミナ質の耐火物と比べ熱伝導率が高い。

表1. ニカセラコの代表的特性

特 性		ニカセラコ	炭化ケイ素 質 耐火物	アルミナ質 耐火物
かさ密度 (g/cm ³)	600℃ × 3 Hrs	2.71	2.70	2.95
曲げ強度 (MPa)	600℃ × 3 Hrs	15	12	15
	1000℃ × 3 Hrs	30	17	16
圧縮強度 (MPa)	600℃ × 3 Hrs	61	50	80
	1000℃ × 3 Hrs	110	83	83
線変化率 (%)	900℃ × 3 Hrs	-0.1	-0.1	0
熱膨張係数 (K ⁻¹)	室温 ~ 1000℃	2.5×10^{-6}	2.5×10^{-6}	7×10^{-6}
熱伝導率 (W/mK)	900℃	10	11	2.1

3-2 ニカセラコの耐熱特性の測定

本開発ではアルミニウム溶解炉のガスバーナーのラジエントチューブをニカセラコで製作する計画である。そこで、ニカセラコの耐熱特性を測定した。

(1) 試験方法

①試験用試料：

40mm×40mm×160mm のニカセラコ成形体を製作し、そこから、40mm×40mm×118mm の曲げ試験片と40mm×40mm×40mm の圧縮試験片を切り出した。

②熱処理：

カンタルスーパーマuffle炉を用いて、大気中1200℃、1300℃、1400℃各6時間保持で行った。試料は各温度水準でn=6で行った。熱処理前後の重量変化を測定した。

③強度試験：

各温度で熱処理した試料および熱処理なしの試料を室温で曲げ強度、圧縮強度を測定した。試験装置は1000kN 万能材料試験機（東京衡機 RUEⅢ-TK18A 型）。強度試験方法は JIS R 2553 「キャストブル耐火物の強さ試験方法」に従って実施した。

(2) 熱処理試験結果

①重量およびかさ密度の変化

ニカセラコの熱処理前後のかさ密度と重量変化を表2に示す。

表2. ニカセラコの高温熱処理後のかさ密度と重量変化（n=6の平均）

	熱処理前	1200℃	1300℃	1400℃
かさ密度 (g/cm ³)	2.66	2.66	2.61	2.54
重量変化率 (%)	—	-0.82	-0.60	-0.41

ニカセラコは1200℃熱処理により僅かに重量が減少するが、処理温度が上がるに従い回復する。しかし、かさ密度は1200℃までは変わらないが、1300℃で若干低下し、1400℃では明らかに減少する。

②熱処理による試験片の外観変化

図 2 に熱処理前と熱処理後試験片の外観写真を示す。

1 2 0 0℃、1 3 0 0℃熱処理後の試験片の外観は変化が認められなかった。但し 1 3 0 0℃熱処理品の一部が互いに接着しているものがあった。

しかし、1 4 0 0℃熱処理品の表面は釉薬のようなガラス質で覆われ、互いに固着していた。これは表面の炭化ケイ素が酸化して酸化ケイ素 (SiO_2) となり熔融したためと考えられる。

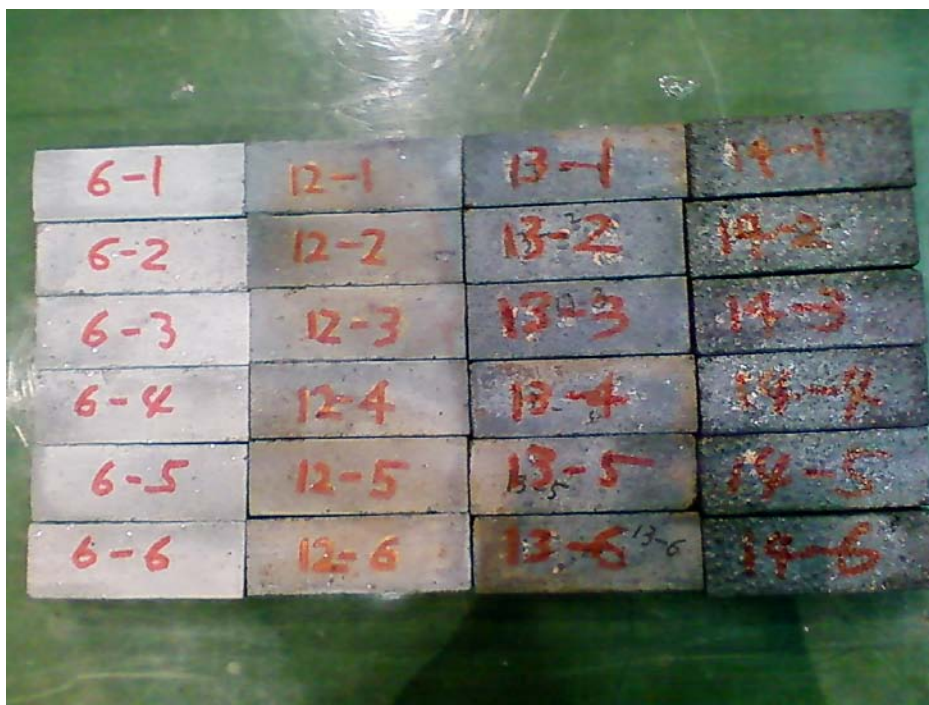


図 2. ニカセラコ試験片熱処理後の外観写真

左から順に熱処理前 (600℃), 1200℃, 1300℃, 1400℃熱処理品

(3) 強度試験結果

ニカセラコ高温熱処理品の曲げ強さおよび圧縮強さを表 3 及び図 3 に示す。

表 3 ニカセラコ高温熱処理後の曲げ強さおよび圧縮強さ特性

熱処理温度 (℃)	熱処理なし	1 2 0 0	1 3 0 0	1 4 0 0
曲げ強さ (MPa)	17.6	31.0	37.5	42.4
圧縮強さ (MPa)	92.0	137.5	172.0	143.1

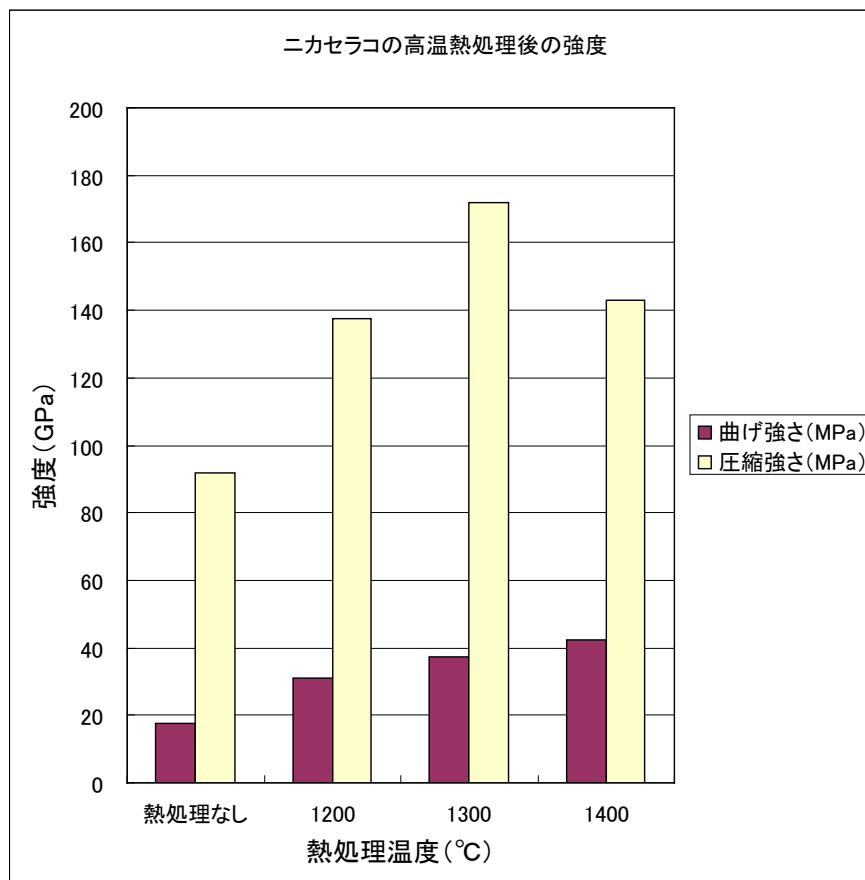


図3 ニカセラコの高温熱処理後の強度特性

ニカセラコの高温熱処理後の曲げ強さおよび圧縮強さは熱処理温度が高くなるほど増大する。特に 1400℃-8 時間熱処理後でも、表面がガラス状の酸化皮膜に覆われているにも拘らず、熱処理なし(600℃焼成品)よりも高強度を保持している。

従って、ニカセラコ製ラジアントチューブはガスバーナーの火焰温度 (1300℃) に十分耐えられることが分かった。

第4章 アルミ急速溶解炉の開発・製作

4-1 アルミ急速溶解試験装置によるアルミニウム溶解試験

(1) アルミ急速溶解試験装置の構造

アルミ溶解装置を設計するにあたり、アルミ急速溶解試験装置を製作して溶解試験を行った。試験装置は渦流室と加熱保持室の2つの部分で構成されている。渦流室の下には永久磁石式溶湯攪拌ジェネレーターが設置されており、このジェネレーターの作用によりアルミ溶湯は攪拌される。加熱保持室にはニカセラコ製パネル式

電気ヒーター（有明セラコ㈱製「セラコヒーター」）容量 12KW が 2 基設置されており、これでアルミ溶湯を加熱する。渦流室の投入間口は 400mm×400mm、渦流室および加熱保持室は何れもニカセラコ製の一体成形体で製作した。

アルミニウム溶湯は渦流室下部で溶湯攪拌ジェネレーターにより攪拌され、隣の溶湯保持室へ流れる。保持室のセラコヒーターで加熱された溶湯は保持室上部の樋から渦流室上部に流れ込み、渦となって下部の攪拌室に流れ込む。アルミニウム原料（冷材）は渦流室へ投入して溶解した。

(2) 運転試験：①渦流室（投入室）でのアルミ溶湯の挙動

- ・試験装置にアルミニウム溶湯を汲み入れ、永磁式溶湯ジェネレーター運転し、渦流室におけるアルミ溶湯の挙動をビデオカメラで観察した。投入アルミ量は 750kg、溶湯温度は 720℃で行った。渦流室におけるアルミ溶湯の状態を撮った写真を図 4 に示す。



図 4 渦流室のアルミ溶湯の渦の状態

- i) アルミ溶湯は写真の左上の導入樋から流れ出し、左回りに回りながら渦を巻き、中心部に吸い込まれていく。
- ii) 丸い渦に対し渦室の内部形状は四角形（正方形を基本としてコーナー部に大きめの R をとった形状）の器となっているため、コーナー部に乱流が発生している。この乱流は湯面上に浮いたままになるアルミ切粉をすばやく溶湯中に巻き込ませるのに有効である。
- iii) 渦の発生と共に、渦室内の湯面位置は下がることが分かった。

② 渦流への切粉およびリターン材投入実験

アルミ切粉（ドライ粉）の溶解において、従来の溶解炉では切粉自体が雰囲気加熱される際に酸化してしまうことである。試験炉では加熱源を雰囲気から溶湯に替えることにより、無酸化溶解を目指すものであり、出来るだけ短時間で切粉を溶湯中に巻き込ませることがポイントである。

切粉を渦流に投入すると、切粉は溶湯上に浮いているが数秒間で渦に巻き込まれ没する。但し、切粉に付着している油が燃える炎が、切粉が没した後も数秒間残った。切粉を投入して実験した結果、100Hz では乱流による湯面の乱れが激しくなるため、70Hz 付近の渦は切粉の巻き込みがスムーズであり、インバーター周波数 70Hz（1050rpm）の条件が切粉の溶解には適当と判断した。

リターン材の溶解実験では、投入冷材が吐出管に詰まる恐れがあるため、大きさを 50mm 以下に切断して行った。リターン材は投入と同時に渦の中に没した。

第 5 章 大型複雑形状の一体成形溶湯バスの開発

本開発の高純度アルミニウム溶湯供給装置では、溶湯バス（溶解室、保持室）、投入室、渦流室、汲出し室およびアルミ溶解用ガスバーナーのラジアントチューブ、溶湯を加熱する電気式ヒーターの溶湯浸漬パネル、導炎管等アルミニウム溶湯と直接接触する全ての部分をニカセラコで製作した。

これは第 3 章で述べた様に、ニカセラコが耐食性、耐熱性、耐熱衝撃性、優れた損傷抵抗性を有しているからである。従って薄肉・複雑形状の大型の成形体を製作できるのである。しかし、今回の装置には今まで作ることがない斬新な設計のニカセラコ成形体の製作が計画された。特に、この装置の最重要部分であるラジアントチューブは溶解室および保持室バスと一体型で設計された。

この項ではニカセラコ製ラジアントチューブ一体成形バスの製作を中心に、その製作過程について述べる。

① 成形型の製作：設計図に従ってニカセラコ泥しょうを鋳込む成形型を製作した。

一般にキャストブル耐火物は混練の際添加する水の量が少ないため、成形硬化後は養生・乾燥工程で寸法変化がほとんどない。従って設計寸法に基づいて成形型を作ってよい。バスとかチューブの成形型は外型と中子（内型）を組み合わせで作った。外型には鋼鉄製、中子には樹脂が使った。泥しょうの比重は 2.7 と重いため、

浮力で中子が浮かないよう固定を十分行わなければならない。泥しょうは上から投入し上から下へ流れる。泥しょうが型の内部にくまなく充填されるよう、クリアランスは7mm以上確保した。成形用鋳型に空気溜まりが出来ない様な設計とした。

今回製作した溶解室と保持室はバスとラジアントチューブとの一体型である。溶解室の寸法は1000mm×1100mm×深さ900mm、保持室は500mm×1900mm×深さ900mmであり、中に外径237mmφ、内径161mmφのU字型と直管型のラジアントチューブが2本入った構造となっている。

溶解室の成形型を図に示す。図5-1はラジアントチューブの中子である。また、図5-2はラジアントチューブを内蔵した溶解室の中子成形型である。図5-3は中子型を鋼鉄製の外型にセットした溶解室の一体成形型である。ラジアントチューブは溶解バスの側壁と底部で固定され一体化した構造となっている。この複雑な形状をした中子型および外型は全て内作で行った。

次に水と混練したニカセラコの泥しょうを成形型枠へ鋳込んだ(図5-4)。バイブレーターにより鋳込んだ泥しょうが型の隅まで良く充填させると共に、気泡を追い出した(図5-5)。水と混和したキャストブルセメントは、混和後30分から硬化を始めるので、作業はすばやく行う必要がある。ニカセラコの成形工程はまさに匠の技である。鋳込み後の成形品は型枠に入れたまま炉に入れ30～40℃で48時間養生を行った(図5-6)。養生後成形品は硬化し、強度を持つようになるため、脱型して乾燥・焼成を行った。中子型を入れたまま焼成して燃やしてしまう場合もあるが、中子との歪みが原因で亀裂が入る場合があるため、今回は中子型を全て除去した。乾燥工程は80℃から350℃まで合計48時間かけゆっくりと乾燥した。



図 5-1 ラジアントチューブの中子型



図 5-2 溶解室の中子成形型

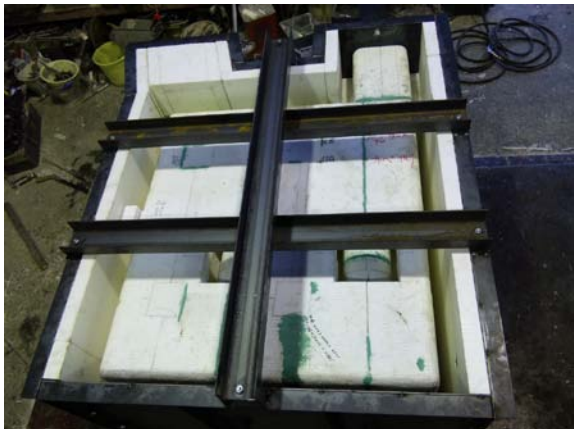


図 5-3 溶解室の鑄込み成形型枠



図 5-4 ニカセラコ泥しょうの鑄込み



図 5-5 バイブレーターによる充填・脱泡



図 5-6 鑄込み後養生炉へ挿入

この段階でニカセラコは緻密になっており残留している水分は蒸発して飛びにくい。急速に加熱すると水蒸気が組織に閉じ込められて爆発する爆裂という現象が起こり成形体は粉々に破壊されてしまうため、長時間掛け徐々に昇温する。乾燥後さらに70時間かけて600℃まで加熱処理をしてニカセラコ成形体が完成した。

本装置に使用したニカセラコの一体成形体は、投入室、渦室、溶解室、保持室および連通管、導炎管など数多くあり、何れも上述の様な工程を経て製作し、全ての成形体が亀裂・損傷なく1回の成形で製作できた。

製作したニカセラコ成形体の写真を図 6-1、6-2、6-3、6-4 に示す。



図 6-1 溶解室ラジアントチューブ



図 6-2 保持室ラジアントチューブ



図 6-3 渦室



図 6-4 投入室

第 6 章ニカセラコによる耐熱衝撃性パイプ状成形体の開発

ニカセラコの特長を利用して、炉の耐火物だけでなく、工業用セラミックス部材としての用途を展開するため、工業的の多くの需要があるニカセラコ製パイプ状成形体の開発を目的として試作を行った。

6-1 ニカセラコ製インペラシャフトの製作

具体的には、本開発の高純度アルミニウム溶湯供給装置で使用する回転式アルミ溶湯脱ガス装置のインペラシャフトの製作を行った。

1) 形状設計

本開発のアルミニウム溶湯供給装置ではアルミ溶湯清浄装置「静波」を使用する

ため、製造メーカーに協力して頂き、基本形状を決定した。

シャフトの中心部は不活性ガスを通す孔が開いており、インペラー部の形状はガスの攪拌・小泡化するために羽状になったいる。インペラーシャフト回転して使用するため、回転軸に対する精度が非常に重要になる。

2) 金型製作

シャフト金型は2ないし3分割、インペラー部羽根型はさらに細分化して8分割とした。これらを機械加工面に沿って組立て、硬質塩ビパイプの中芯を内型としてセットした。組み合わせた金型を図 7-1 に示す。

3) 鋳込み成形

型組みを行った後垂直度を確認した。金型をバイブレーターの上に載せ、ニカセラコの泥しょうを上部から流し込み振動を掛けて充填した。 鋳込み成形の状態を図 7-2 に示す。



図 7-1 インペラー成型用金型



図 7-2 インペラー鋳込み成形

4) 養生・乾燥・焼成

成形品は30～40℃で48時間養生した後、金型を外した。その結果第一回試作ではシャフトの金型継ぎ目部分にクラックが入った。

そのため、第二回試作では継ぎ目部分の合わせと固定を十分チェックするとともに離型剤を十分塗り再度試作した。

その結果、クラックのない成形体を得られた。試作したインペラシャフト成形体を図7-3に示す。



図7-3 試作したインペラシャフト成形体

得られた成形体は未だ表面にポアが多く観察され、成形の際のガス抜き方法等改善の余地がある。今後、回転性能を確認して、アルミニウム溶湯中での実地テストを実施する予定である。

第7章ニカセラコ製小型緻密質成形技術の開発

7-1 ニカセラコ製ラドルの製作

1) 目的

ニカセラコの特性を生かした応用製品のの一つとして薄肉・複雑形状のアルミ溶湯汲出し用セラミックラドルを試作する。

2) 製作方法

①形状：密閉型（汲出し口および注湯口のみ開）

汲出し量 アルミ 2.5kg

ラドルの形状を図8に示す。

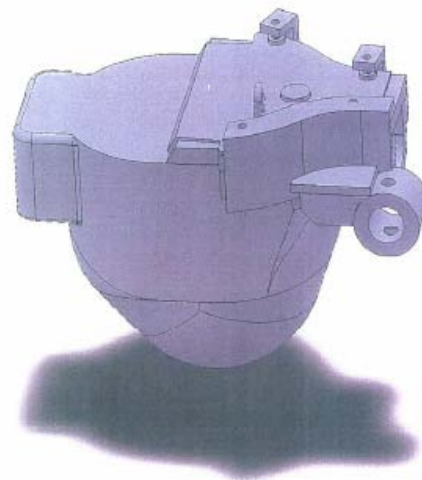


図8 ニカセラコ製ラドル形状

②成形型

ニカセラコを鑄込む成形型は次のように製作した。

外型：プラスチック製（恒久使用）

内型：第1回試作；発泡ウレタン加工品

第2回試作；発泡スチロール加工品（使い捨て）

③製作手順

- i) 成形：内型を外型にセットし、ニカセラコの泥しょうを型に流し込みバイブレターによる振動で充填した。
- ii) 養生： 25℃48時間
- iii) 脱型：外型をはずし、内型は穿り出す。
- iv) 乾燥・焼成：最高温度～600℃

3) 製作結果

①第1回試作品

成形－養生－脱型までは異状なかったが、焼成後両側壁上端部に微細なヘアークラックを確認した。

②第2回試作品

[第2回試作の改良点]

内型を発泡ウレタンから発泡スチロールに変えた。これは養生時に起こる収縮に対する応力を減らすためがある。

[結果]

焼成後両側壁面上部にヘアークラックを確認。

③第3回試作品

[第3回試作の改良点]

- ・側壁上端部を全集にわたり10mm厚くした。
- ・上端のコーナー部の面とりをした。(2mm)
- ・振動鑄込み時間を長くした(6→10分 鑄込み充填の均一性を良くする。)
- ・より温度分布の良い大型炉で焼成を行った。

[結果]

焼成後異状なし(クラックなし)

取付け金具ヲセットした完成品形状は図9の通り。

4) 今後の展開

ニカセラコを使用したラドルの製作が可能となった。今後、実機においてアルミ溶湯汲出しの耐久性確認を行い実用化を進める。



図9 ニカセラコ製ラドル完成品

第8章 高純度アルミ溶解・溶湯供給装置の組み立て製作

第5章で述べたように一体成形によるニカセラコ製ラジアントチューブ内蔵溶湯バスほか、主要構成部品の製作が完了したので、高純度アルミニウム溶解・溶湯供給装置の組み立て製作を行った。

炉体枠の内側には、断熱材が張られ（図10）、そこへ、それぞれニカセラコで製作された保持室（図11-1）溶解室（図11-2）、投入室（図11-3）がセットされた。

炉の組み立ては、これまでの経験と実績から高度の固有技術が使って行われた。



図10 鋼鉄製炉体枠への断熱材の敷設



図 11-1 保持室のセット



図 11-2 溶解室のセット

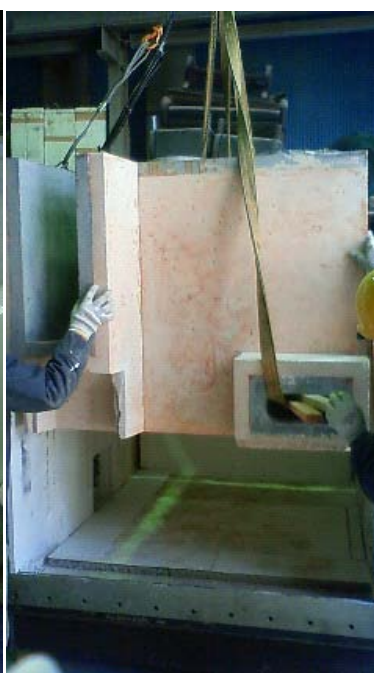


図 11-3 投入室のセット

組み上がった装置は二つの部分に分割され2月23日工場から搬出され、群馬県高崎市の株式会社秋葉ダイカスト工業所のダイカスト工場に搬入据付された。



図 12-1 高純度アルミニウム溶湯
給装置（投入室側）



図 12-2 装置（保持室・ラジエント供給装置（投入室側）
バーナー側）



図 12-3 ダイカストマシン(左)と本装置 (右)

高純度アルミニウム溶湯供給装置は、同社のダイカストマシン (500ton) の横に設置された。

設置された装置を図 12-1 から図 12-5 に示す。図 12-1 は投入室側から見た装置で手前左側にあるのがアルミインゴットの投入口である。中央部に断熱材で覆われている部分が渦流室で切粉を投入して溶かす。

投入室の下のパットには永久磁石式溶湯攪拌ジェネレーターが設置されており、アルミ溶湯は渦室→溶解室→投入室→渦室と循環する。

図 12-2 は保持室・ラジアントバーナー側から見た装置で、ガスバーナーが 2 基設置されている。ラジアントチューブは保持室側から溶解室へU字型に通っており、溶解室のアルミニウムはガスバーナーで加熱されたチューブを通して、間接的に加熱される。また、保持室にはニカセラコ製パネル式電気ヒーター (セラコヒーター) が 2 基設置されており、アルミ溶湯の温度を一定の温度で保持する。

図 12-3 は本装置とダイカストマシンとの位置関係を示す。本装置の左側にある汲出し室にダイカストマシンからラドルがついたロボット腕が伸び、アルミ溶湯を汲出して、ダイカスト鑄造により製品を作る。

図 12-4 はガスバーナー側から見た装置で空気供給用ブロアーとガスと空気の供給配管がある。

図 12-5 は制御盤で左側が保持室のセラコヒーターの温度制御装置である。また、右側は溶解室のガスバーナーのコントロール装置と永磁式溶湯攪拌ジェネレーターの制御装置である。



図 12-4 ガスバーナーと空気用ブロアー



図 12-5 装置制御盤、空気・ガス配管

第 9 章 高純度アルミニウム溶湯供給装置の運転試験

9-1 アルミ溶解・汲出し試験

1) 炉の昇温とアルミ溶湯受湯

運転するに当たり、装置は空の状態ですべての機器を点検し、室温から 680℃ まで昇温し、680℃ で 12 時間保持した。その後、アルミ溶湯（ADC12）を汲出し口と投入口から 3200kg 注入した。

アルミ溶湯は 200kg/回づつ 16 回合計 3200kg 投入された。その後投入口から 5 kg のアルミインゴットを 240 本計 1200kg 投入した。その結果合計 4.4ton のアルミ溶湯を受け入れ本装置はアルミ溶湯が満湯となった。

次にアルミ溶湯が満湯の状態ですべての機器を点検し、装置が計画の性能がでているかをチェックした。

表 4 に満湯で保持状態での温度およびバーナー、ヒーターの諸元を示す。

表 4 アルミ溶湯満湯で保持した状態での溶湯温度および炉の諸元

日付	時刻	溶解室	汲出室	積算量		バーナ出力	ヒータエレメント温度		ヒータ出力						湯面レベル	
				電力	ガス		ヒータ1	ヒータ2	ヒータ1			ヒータ2			溶解室	汲出室
		℃	℃	kwh	m ³	%	℃	℃	A	V	KW	A	V	KW	mm	mm
3月4日	9:53	690	685	663	207	7	729	-	22	51	1.12	0	0	0	740	620
	14:30	690	686	693	216.5	7	749	-	23.5	60	1.41	0	0	0	740	620
Δ	4h37m (=4.62h)	0	1	30	9.5	一定	20	-	ほぼ一定			出力なし			0	0

表 4 に示された様に溶解室・汲出し室のアルミ溶湯温度は一定しており、ガスバーナーおよび電気ヒーターの出力は能力の 10 % 以下と非常に良好な値であり、当初の設計通りであることが確認された。

2) アルミ溶解汲出し試験

アルミインゴットを投入して溶解し、汲出し口からアルミ溶湯を汲出しダイカストマシンを稼働させて、アルミ溶解汲出し試験を行った。

アルミ溶解は 5 kg のアルミインゴットを 85 秒に 1 本ずつ投入室へ投入した。時間当たりの投入量は 211.7 kg であった。同時にダイカストマシンを稼働させ、汲出し口からラドルでアルミ溶湯を汲み出した。ダイカストマシンの動作サイクルは 47 秒/サイクル。ラドル汲出しアルミ量は 2.63 kg /サイクル。時間当たりの汲出し量は 201.4 kg であった。連続投入・汲出し時間は 67 分間。

図 13-1 に汲出し室からラドルでアルミ溶湯をダイカストマシンへ汲みだす状況を示す。ダイカストマシンでは本事業で購入した試験用金型を取付けて鑄造を行った。その鑄造品を図 13-2 に示す。



図 13-1 ラドルによる溶湯の汲出し



図 13-2 試験金型によるダイカスト鋳造品

9-2 高純度アルミ溶湯供給装置の熱収支

高純度アルミ溶湯供給装置の性能確認の一つとしてアルミ溶解および保持時の熱収支を調べ、熱効率の確認を行った。

1) 方法

下記の方法により入熱および出熱を調べ、熱効率を計算した。

(入熱)

- ①ヒーター出力：ヒーター電力、電流から使用電力を算出し、使用エネルギーを算出した。
- ②バーナー出力：ガス消費量から使用エネルギーを算出した。

(出熱)

- ①アルミ融解熱：時間当たりの溶解量を測定した後、融解エネルギーを算出した。
- ②アルミ温度上昇：溶解量、加熱温度、比熱より加熱エネルギーを算出した。
- ③炉体からの放熱量：炉体表面の測定結果から放散エネルギーを算出した。
- ④湯温変化：各室容量、温度変化、比熱より消費エネルギーを算出した。

(湯温が低下する場合は出熱がマイナスとなる。)

2) 結果

これらも含めた溶解・汲出し時の熱収支および熱効率の計算結果を表 5 に示す。

3) 考察

①一般に溶解炉の熱効率は20%程度と言われているが、これに比較して熱効率が大幅に高くなっていることを確認した。

溶解時は47%と特に高い熱効率を示しており、バーナーの伝熱効率が良いことに加え、溶湯攪拌による冷材への伝熱効率が良いものと推定された。

また、今回は予熱の再利用はしていなかったが、予熱再利用のシミュレーションでも示した通り、排ガスの再利用によりさらに熱効率が向上し、50%以上の可能性もうかがえた。

②放散熱量の計算は断熱構成から計算したものと炉体表面の実測温度をベースとした計算値とほぼ一致をしており妥当なものと思われる。

表5 溶解・汲出し時の熱収支および熱効率

(1)溶解、汲出し時(3月4日 14:37~15:44)

入熱					余熱を再利用した場合のシミュレーション
① ヒーター出力	1.4 kw		860 kcal/kwh	1,204 kcal/h	
② バーナー出力	5.5 m3/h		22350 kcal/Nm3 (発熱量)	122,925 kcal/h	
③ 余熱を再利用した場合の消費減	212 kg/h (溶解量)	-180 °C (20→200)	0.22 kcal/kg°C (比熱)		-8,395 kcal/h
合計				124,129 kcal/h	115,734 kcal/h
出熱					
① アルミ融解熱	212 kg/h (溶解量)		95 kcal/kg (融解熱)	20,140 kcal/h	
② アルミ温度上昇 (溶湯温度-室温)	212 kg/h (溶解量)	660 °C (20→680)	0.22 kcal/kg°C (比熱)	30,782 kcal/h	
③ 炉体からの放散熱 注1				15,917 kcal/h	
④ 溶解室湯温変化 による消費エネルギー	1300 kg (容量)	-28 °C (690→662)	0.22 kcal/kg°C (比熱)	-8,008 kcal/h	
合計				58,831 kcal/h	
熱効率				47.4 %	50.8 %

注1 炉体表面の実測温度をベースとした計算値(表-2参照)

9-3 アルミニウム溶湯の品質測定

本開発プロジェクトの目的はアルミリターン材を原料として使っても高純度なアルミ溶湯が供給できる装置を開発することである。そこで実際にリターン材の溶解試験を行って、溶湯の品質（K値、減圧法ガス量）の測定を行った。

1) 試験方法

切粉を含むアルミリターン材 50%、アルミインゴット 50%を投入して溶解し、本装置の付属設備、即ちガス吹込み管式溶湯清浄装置（静波：窒素ガス吹込み）および溶湯フィルター（アルミナ系セラミックス・フォームフィルター、孔径 20ppi）を通して溶湯を清浄化する試験を行った。そして、投入室と汲出し室で各 2 回ずつ溶湯サンプルを採取し、K 値と減圧法ガス量の測定を行った。

①K 値（K モールド法）

採取アルミ溶湯は、図 14 に示すような鋳型で板状に鋳造し、ハンマーで 5 片に破断して介在物について破面観察を目視で行った。1 回の採取測定に対して K モールド鋳造品を 3 本とり、15 片について介在物数を測定し、次式から K 値を求めた。

$$K \text{ 値} = S / n$$

K 値：1 小片に認められる介在物数（ヶ/片）

S： n ヶの小片に認められた介在物数の合計

n： 観察した小片の数（片）

参考までに日軽金株の K 値による溶湯清浄度判定基準を表 6 に示す。



図 14 K モールド試験片鋳型

表6 K値による清浄度判定基準

級	K 値	清浄度の判定	鑄造可否の判定
A	<0.1	清浄な溶湯	鑄造しても良い
B	0.1~0.5	ほぼ清浄な溶湯	できれば処理したほうが良い
C	0.5~1.0	やや汚れている溶湯	処理の必要がある
D	1.0~10	汚れている溶湯	"
E	>10	著しく汚れている溶湯	"

②減圧凝固法ガス量

アルミ溶湯を鉄製小坩堝に約 5cc 入れ、720mmHg の減圧下で凝固させ、溶湯中の溶存ガスを気泡として放出させた。凝固した試料を切断、研磨後、限度見本をもとに目視により測定を行った。気泡の発生が少ない状態（1 級）＜多い状態（7 級）とし、気泡状態を観察して、アルミ溶湯中のガス量を判定した。減圧凝固法は炉前のガス含有量測定の手段として現場で多く利用されている。

2) 測定結果

① 投入室溶湯採取品（リターン材 50%+インゴット 50%）

・ サンプル A 1

K 値：0.6 やや汚れている

酸化皮膜、引け巣、ガスが存在する。

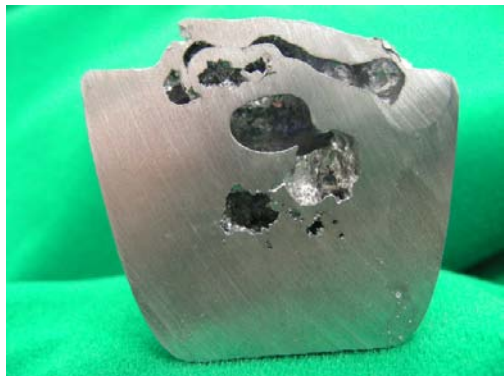
サンプル A 2

K 値：0.6 やや汚れている

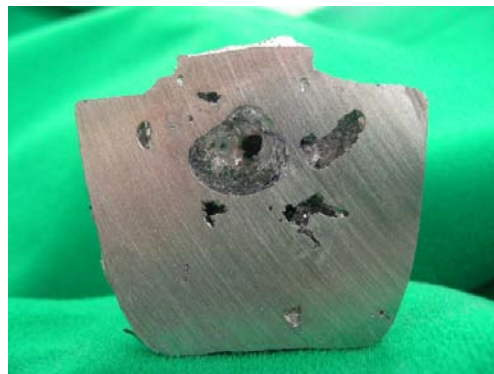


・減圧凝固法：

サンプルA 1：6級



サンプルA 2：6級



②汲出し室溶湯採取品

サンプルB 1

K値：<0.1 清浄な溶湯



サンプルB 2

K値<0.1 清浄な溶湯



・減圧凝固法：

サンプルB 1：1級



サンプルB 2：2級



3) 考察

投入室でのアルミ溶湯はK値が0.6、減圧法ガス量が6級と鑄造に適さなかった。しかし、本開発のアルミ溶湯供給装置で清浄化した結果汲出し室では、K値が<0.1、ガス量も1～2級と大幅に向上し、鑄造に適した溶湯となった。

この結果本装置が目標としたアルミ溶湯品質は達成できたと考えられる。

第10章 総括

「研究開発成果」

本研究開発は、新規に開発した新素材：熱損傷抵抗に優れた炭化ケイ素繊維分散強化耐火物（商品名：ニカセラコ）を使用した高純度アルミニウム溶湯供給装置を開発し、リサイクル原料からの不純物を除去した高純度アルミニウム溶湯を川下の鑄造メーカーに供給し、鑄造品の品質向上を図る目的で行った。

技術の高度化目標は次の通りである。

- ・アルミ溶湯中の不純物K値：0.1以下（現状：0.5）
- ・アルミ溶湯中のガス濃度：減圧凝固法 1級（現状5級）
- ・アルミ鑄造製品の不良率の低減（現状の1／2以下）
- ・アルミロスの減少：1％以下（現状の5％）
- ・エネルギー消費の低減, アルミ保持炉の耐久性向上、設備寿命の延長によるコスト低減。

この目標達成すべく以下のような研究開発を行った。

①高純度アルミニウム溶湯供給装置の構想・設計

切粉等のリターン材から酸化を極力抑えた清浄な溶湯を供給するため、溶湯攪拌装置とニカセラコのラジアントチューブバーナーを組み合わせた急速溶解炉と電気ヒーター（セラコヒーター）を使用し溶湯清浄化装置を有する温度保持炉を設計した。

②繊維分散強化複合耐火物（ニカセラコ）の基本的特性を測定し、ニカセラコの特長である破壊抵抗性、熱衝撃損傷抵抗、耐熱性等を調べ、理論的な裏づけを行った。

③急速溶解炉の開発では、溶湯攪拌装置を使用した試験装置で特に切粉の溶

解試験を行い本装置の設計および運転諸元を把握した。

④大型複雑形状の一体成形溶湯バスの開発

本装置の主要部分のラジアントチューブ一体成形溶湯バス（溶解室、保持室）投入室、渦流室、電気ヒーター（セラコヒーター）の溶湯浸漬パネル、導炎管などをニカセラコで成形製作した。特にラジアントチューブ一体成形溶湯バスは初めての試みであったが1回で成功した。

⑤ニカセラコでアルミ溶湯清浄装置のガス吹込み攪拌用インペラシャフトを製作した。

⑥ニカセラコ製小型緻密質成形技術の開発ではニカセラコ製蓋付きラドルの製作に成功した。

⑦高純度アルミニウム溶湯供給装置を組立て・製作して、(株)秋葉ダイカスト工業所のダイカストマシンの横に据付けた。

⑧高純度アルミニウム溶湯供給装置の運転試験でアルミインゴットを使った溶解・汲出し試験を行いダイカストマシンを同時稼働させ、時間当たり約200kgの溶解・汲出し運転に成功した。

リターン材50%を入れた溶解実験では、投入室の溶湯のK値が0.6、減圧法ガス量が6級と鑄造には適さない品質であったが、本装置の浄化装置（ガス吹込み式溶湯清浄装置、セラミックフォームフィルター）により浄化され、汲出し室のアルミ溶湯のK値は<0.1、ガス量は1～2級と目標品質を達成した。

本開発の高純度アルミニウム溶湯供給装置の熱効率は溶解時に47%と一般の溶解炉の20%と比べ非常に高いことが確認された。これは本装置がアルミ原材料を溶湯に浸漬して溶解する方式であり、ニカセラコ製ラジアントチューブと溶湯攪拌装置を使用した効率的な熱利用を行った為と考えられる。

但し、装置が故障したため、当初計画していたアルミロス歩留まりおよび製品品質・不良率の確認はできなかった。

「研究開発後の課題・事業化展開」

高純度アルミニウム溶湯供給装置は故障箇所を早期に修復し、運転データ

を採取して事業化用実用機として完成させる。そして、この装置をモデル機として営業活動を行って事業化展開を図っていく。

さらに、今回成功したニカセラコ製ラジアントチューブの技術を発展させ高効率・省エネルギータイプのアルミ溶解保持炉および熱処理用工業炉への展開を図っていきたい。

今回開発したニカセラコ製品即ち、アルミ溶湯脱ガス装置用インペラージャフトおよびアルミ溶湯汲出しラドルは、実用試験を行って製品の信頼性・寿命等を確認して事業化していく。

以上