

省エネ型アルミ溶解炉 Hybrid Freedom の紹介 (保持室ヒータ式酸化物抑制炉の開発)

(株) 梶谷 : 梶谷 健

日本坩堝(株) : ○益田 昌人, 楊 光

The development of the holding chamber heater type oxidation restraint furnace

Kajitani Co.,LTD : Tsuyoshi Kajitani

Nippon Crucible Co., LTD: ○Masato Masuda, Yang Guang

In order to minimize the aluminum oxide generation in the electric heater type holding chamber of the gas fired melting furnace, we introduced the combustion gas of the melting burner to the holding chamber.

1) Restrain aluminum oxide generation by creating aluminum oxide thin film on the metal surface of the holding chamber.

2) Maintain the molten metal quality at the satisfactory level by restraining aluminum oxide generation.

We assumed above two points as the concept of this development and worked on the oxidation restraining gas fired melting chamber with the electric heater type holding chamber. As a result, even if the holding chamber is cleaned only once every 3 months or even more months, aluminum oxide generation was restrained and the metal loss in the holding chamber was drastically reduced. For the energy saving, electricity consumption of the heater can be reduced due to the additional heat from melting burner combustion gas which heats the holding chamber metal surface. For the maintenance, safety feature is improved by designing the immersion type protector tube position to lower diagonal direction to prevent metal leakage and it makes possible to replace it during casting operation. Also this setting eliminates slag line on the tube so that the life of the tube can be prolonged.

1. はじめに

酸化物抑制炉（保持室での掃除が要らない溶解保持炉）については、2018年度日本ダイカスト会議にて発表させて頂いた。その概要としては、酸化皮膜の保護作用により、酸化物抑制効果、溶湯品質改善効果、作業性改善効果を得るものであり、市場においても、当初のコンセプト通りの効果を上げている。

今回はCO₂削減効果が高い、保持室にヒータを採用したハイブリット（ガス・電気）タイプの溶解保持炉（以下、「従来型溶解保持炉」と言う）に対し、酸化物抑制効果を狙った溶解保持炉の開発をテーマとした。

従来型溶解保持炉は、一般的なガス式溶解保持炉全体のガス使用量の約30%を占める、保持室のエネルギーを電気ヒータに変えることにより、CO₂削減を可能にする。また週末等の設備停止時に、電気のみで溶湯保持をすることで、設備使用者に無人運転時の安心を与える事が出来る、という特徴を持っている。

一方、従来型溶解保持炉では、保持室内溶湯の酸化が進み、毎日除去しなければならない程の酸化物が発生

する。これは保持室内の酸素とアルミ溶湯による酸化反応である為、電気ヒータで加熱したとしても酸化が進むことになる。

そこで従来型溶解保持炉の更なる性能向上を目指し、酸化物抑制、溶湯品質向上およびCO₂削減のための電力削減を具体的目的として、保持室ヒータ式酸化物抑制炉の開発に取り組むこととした。

2. 酸化物抑制炉

2-1. 酸化皮膜の保護作用

保持室のアルミ溶湯は、雰囲気中の酸素や水蒸気と速やかに化学反応し、アルミ溶湯表面に酸化皮膜を生成する。生成された酸化皮膜は、ガス吸収を抑えたり、その後の酸化を抑える効果も有る。作業工程に於いて酸化皮膜が破壊されると、新鮮な溶湯が露出し、ガス吸収や酸化が進行するだけでなく、酸化皮膜の破片がアルミ溶湯中に混入し、非金属介在物となって鋳物の特性を著しく妨害する。

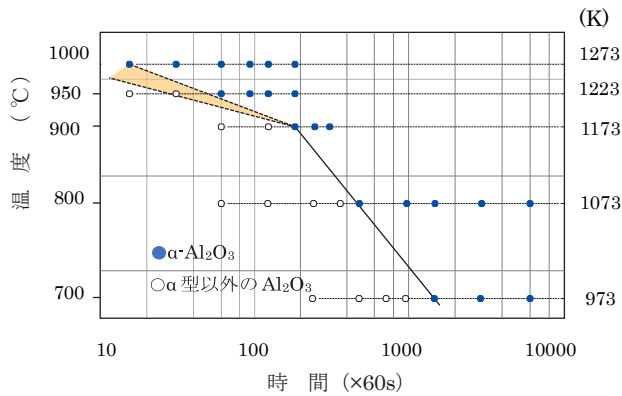


図1 純アルミニウム溶湯表面における α - Al_2O_3 生成の潜伏期間¹⁾

アルミ溶湯が長時間静置された場合、酸化皮膜には亀裂が発生する。溶湯アルミの表面に、非晶質の Al_2O_3 を経て速やかに結晶質の γ - Al_2O_3 の酸化皮膜が生成する。 γ - Al_2O_3 の酸化皮膜は緻密で保護作用が有り、溶湯ガス吸収や酸化を抑える働きが有る。しかし温度及び時間に関係した[図1]潜伏時間を過ぎると、準安定な γ - Al_2O_3 は安定な α - Al_2O_3 (コランダム) に変態する。密度 $3.42 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ の γ - Al_2O_3 から密度 $3.95 \sim 4.10 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ の α - Al_2O_3 に変態すると、体積収縮が起こり、酸化皮膜に亀裂が発生して酸化が進行するようになる。

アルミ酸化皮膜は、緻密で密着性が良く内部の保護作用が有るので、潜伏時間を長く生長させて行けば、その期間の掃除は要らなくなる。

2-2. 保持室ヒータ式酸化物抑制炉のコンセプトと概要
新開発炉のコンセプトは、溶解バーナの燃焼ガスを保持室に導入することにより、

- ①保持室の溶湯液面に酸化皮膜を生成し、その酸化皮膜の保護作用により、溶湯の酸化を抑制すること。
 - ②溶湯の酸化を抑制することにより、溶湯の品質を良好に維持すること。
 - ③保持室への燃焼ガス導入および溶湯の保持室への導入温度を上昇させることで、浸漬ヒータの電力使用量を削減すること。
- の3点である。

結果として、保持室の清掃を3ヶ月毎、又はそれ以上に延ばしても溶湯の酸化は抑制され、保持室のメタルロスが大幅に改善された。

また浸漬ヒータを補助し、かつ溶湯の保持室への導入温度を 610°C から 680°C に上昇させることによって、電気使用量を低減することができた。

保守性に関しては、保持室の溶湯液面の斜め下方向に浸漬チューブを取付け、溶湯が洩れないことで安全性を向上、また作業時でもチューブ交換可能な構造とした。更に、溶湯と浸漬チューブとのスラグラインが無いことにより、浸漬チューブの高寿命化を図った。

以下にその概要を紹介する。

3. 熱量の供給システム

保持室ヒータ式酸化物抑制炉の熱量供給システムを図2に示す。

3-1. 溶解室 (図2の(2-1))

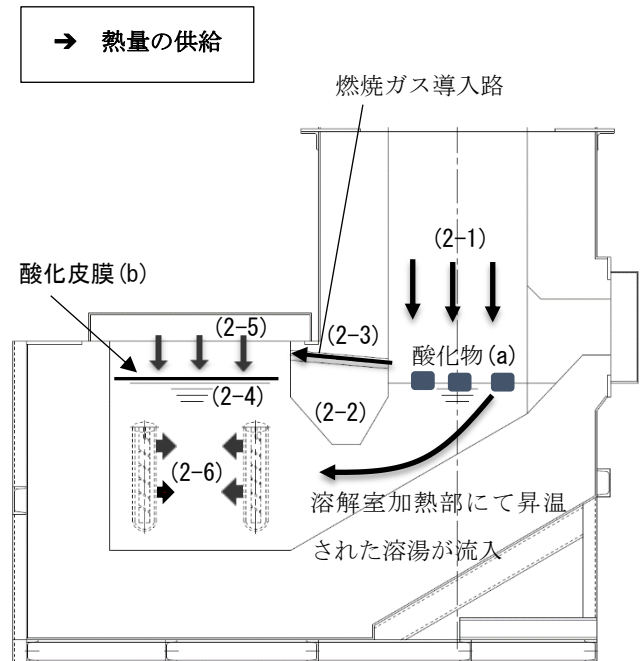


図2. 保持室ヒータ式酸化物抑制炉の熱量供給システム

アルミニウム材料が供給される溶解部と、溶解部のアルミニウム材料を溶解する為のバーナと、溶解部から溶湯を受け入れる加熱部が在り、その加熱部上方に近接して配置した溶解バーナからの火炎の輝炎輻射伝熱により溶湯を加熱し、溶湯温度を上昇させる加熱部が配設されている。

3-2. 溶解室と保持室の隔壁 (図2の(2-2))

保持室と加熱部とを仕切る隔壁であり、下端部が溶湯に浸漬し、隔壁の下方向に加熱部から保持室へ向か

って昇温された溶湯が流入し浸漬ヒータを補助する。
又、隔壁の下端が溶湯に浸漬されていることで、加熱部の液面に浮かぶ酸化物(a)は、保持室への流出を防がれている。

3-3. 溶解室と保持室のガス導入路 (図2の(2-3))
隔壁に溶解部と保持室とを連通する様に形成され、溶解バーナからの燃焼ガスの一部を、保持室の溶湯液面上の空間に導入するガス導入路を備え、その燃焼ガス量は溶解バーナのガス燃焼量の約10%以下に調整される。又、燃焼ガス中の酸素濃度は3%以下になるよう調整される。(酸素濃度は低い程良い)

3-4. 溶湯面の酸化皮膜 (図2の(2-4))

保持室内では燃焼ガス中の酸素と反応し、液面には薄い緻密な酸化皮膜(b)が生成される。

この酸化皮膜は液面に浮かぶと共に、緻密で保護作用が有る為、溶湯のガス吸収や酸化を防止するバリアの役割を果たす。その為、酸化皮膜によって溶湯の酸化が抑制され、溶湯の品質が良好に維持される。又、溶湯の酸化が進まない事により、保持室の清掃は3ヶ月不要となる。3ヶ月間清掃不要であるが、1年間作業後の状況より、3ヶ月以上でも問題無いのではないかと判断している。

3-5. 燃焼ガスによる溶湯加熱 (図2の(2-5))

燃焼ガスを保持室に導入し、溶湯液面を加熱して保持室の浸漬ヒータを補助することにより、電気使用量を低減することが出来る。

3-6. 浸漬ヒータ (図2の(2-6))

保持室には複数の浸漬ヒータが設けられている。その浸漬ヒータは、液面に対し斜めに挿入されるよう炉壁に取付けられている。

保持室内の溶湯は浸漬ヒータにより内部から加熱されると共に、保持室内に導入される燃焼ガスにより、液面から加熱され高い温度で保持される。

4. 特徴

保持室の断面図を図3に示す。

- 1) 燃焼ガスを導入し、保持室の溶湯液面から加熱することで浸漬ヒータを補助し、省エネルギーを図る。
- 2) 導入した燃焼ガスによる、溶湯液面の酸化皮膜の保護作用により下記を可能にしている。

- ① 溶湯の酸化を抑制し酸化ロスを少なくする。
- ② 溶湯の品質を良好に維持する。
- ③ 保持室の清掃は3ヶ月不要としている。

- 3) 湯洩れが無く、作業時でも浸漬チューブ交換を可能にする。
- 4) 浸漬チューブに酸化物の付着が無いので、高寿命化に繋がる。

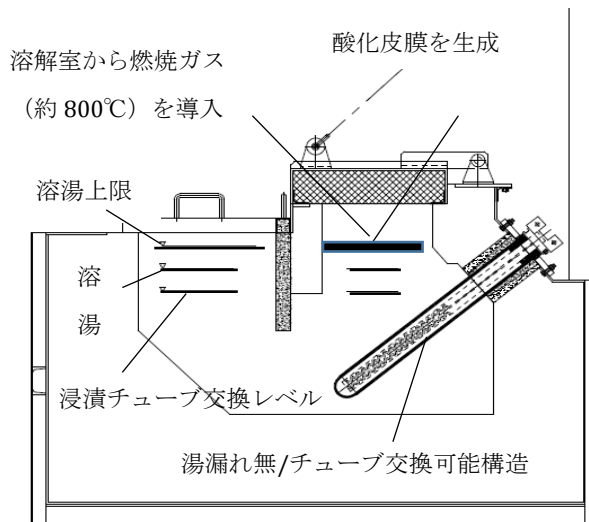


図3. 保持室の断面図

5. 浸漬チューブの取付け

保持室の溶湯液面に対して斜めに挿入されるよう、炉壁に取付けられている。

- 1) アンダー式浸漬ヒータ(炉床に対して水平取付)の様に、浸漬ヒータを常時溶湯にその全体を浸漬し、液面と浸漬ヒータとのスラグラインを作らないようにして、浸漬ヒータの高寿命化を図る。

※アンダー式浸漬ヒータ用チューブの寿命は4年以上のものが多く、それに匹敵する。

- 2) アンダー式浸漬ヒータは、浸漬チューブに亀裂が入った場合に溶湯洩れの恐れが有るが、保持室ヒータ式酸化物抑制炉の場合、浸漬ヒータ取付け開口部下端が液面より上に在るので、湯洩れが無く安心である。
- 3) 作業中でも液面を浸漬ヒータ取付口の炉内部側の開口部下端まで液面を下げ、浸漬ヒータ交換が出来る。
- 4) 蓋部を開けての酸化物除去作業に於いても、浸漬ヒータが常に液面より下に在るので邪魔にならず、容易に作業が出来る。

6. 溶湯の酸化物抑制結果

6-1. 保持室での溶解歩留の実績

保持室での酸化物除去（清掃）作業は3ヶ月経過後に実施したが、10kgのドロス発生量であった。このドロス発生量と溶解量を比較すると以下の通りとなった。

- ・溶解量：85kg/hr×11hr=935kg/直
- ・保持室のドロス量：10kg/3ヶ月
- ・溶解歩留（保持室）：1－（10kg÷（935kg×2シフト/日×6日/週×4週×3ヶ月））=99.993%
- ・酸化ロス発生率：0.007%

従来型溶解保持炉でも、同様の調査を実施した。

- ・溶解量：128kg/hr×11hr=1,408kg/直
- ・保持室のドロス量：8kg/直
- ・溶解歩留（保持室）：
1－（8kg÷1,408kg）=99.432%
- ・酸化ロス発生率：0.568%

6-2. 保持室清掃頻度の改善状況

保持室清掃頻度の改善状況を以下の通り示す。従来型溶解保持炉では、保持室内溶湯の酸化が進むため、毎日除去しなければならない程の酸化物が発生していた。保持室ヒータ式酸化物抑制炉の保持室においては、3ヶ月毎の清掃で問題ないレベルまで改善することができた。

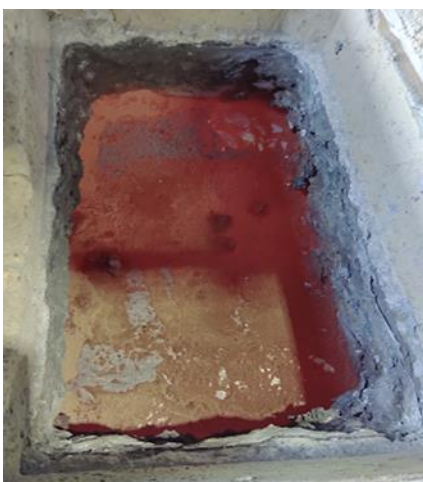


写真1. 3ヶ月清掃ナシの保持室（清掃前）

※酸化皮膜は3~5mm程度 ※2年経過



写真2. 3ヶ月清掃ナシの保持室（清掃後）

※15分程度で簡単にドロス除去可能

6-3. 溶湯品質

Kモールド法による介在物測定結果を以下に示す。試料Aは保持室ヒータ式酸化物抑制炉、試料Bは従来型溶解保持炉の試験結果である。

表1データに基づき、K10値平均値とRankで比較した結果を表2に示す。

表1. 介在物測定結果

試料名	介在物数	K10値	Rank
A-1	1	0.2	A
A-2	2	0.4	B
A-3	0	0.0	AA
A-4	0	0.0	AA
A-5	0	0.0	AA
B-1	14	2.8	D
B-2	17	3.4	D
B-3	7	1.4	C
B-4	4	0.8	B
B-5	11	2.2	D

表2. 介在物平均値の比較

	K10平均値	Rank
保持室ヒータ式酸化物抑制炉	0.1	AA~B
従来型溶解保持炉	2.1	B~D

保持室ヒータ式酸化物抑制炉は3ヶ月毎の掃除前、従来型溶解保持炉は毎日の掃除前での溶湯品質比較となった。

「6-1. 保持室での溶解歩留の実績」に示す酸化ロス発生量の差異の通り、保持室ヒータ式酸化物抑制炉の方が良好な結果を示している。

7. 保持室ヒータ式酸化物抑制炉と従来型溶解保持炉の熱収支

7-1. 保持室ヒータ式酸化物抑制炉の熱収支

保持室ヒータ式酸化物抑制炉の熱収支を表3に、その中の保持室のみの熱収支を表4に示す。溶解室に配設した加熱部で、溶解バーナ火炎の輝炎輻射伝熱により溶湯を約680℃迄昇温し、隔壁の連通口より保持室に流入させることで、浸漬ヒータは表4の保持室の熱収支の電力(13KW)で済むことになる。

表3. 保持室ヒータ式酸化物抑制炉の熱収支 (Al-200kg/Hr)

		入熱		出熱	
		kcal/Hr	%	kcal/Hr	%
QL ₁	燃料の持込入熱量	84,405	88.3		
QL ₂	浸漬ヒータの持込入熱量	(13KW) 11,160	11.7		
QL ₃	アルミ溶解に必要な熱量			51,900	54.3
QL ₄	排ガス損失熱量			22,449	23.5
QL ₅	炉壁放散熱量			11,000	11.5
QL ₆	汲出口からの放散熱量			3,512	3.7
QL ₇	ラドルからの持出熱量			3,750	3.9
QL ₈	その他損失熱量			2,954	3.1
	計	95,565	100	95,565	100

熱効率 $\eta = 51,900 / 95,565 \times 100 = 54.3\%$

『条件』

①溶解量：200kg/Hr

②ダイカストマシンからの汲出溶湯温度：680℃

③燃料：LNG

『諸元』①アルミ溶湯680℃の必要熱量

$(680+273) \times 0.2595 + 12.2 = 259.5 \text{ kcal/kg} \cdot \text{Al}$

②LNG (真発熱量 9,930kcal/Nm³)

③アルミ溶解に必要な熱量 (680℃)

$200 \text{ kg/Hr} \times 259.5 = 51,900 \text{ kcal/H}$

表4. 保持室ヒータ式酸化物抑制炉の保持室の熱収支

		Kcal/Hr	%
1	保持室及び汲出口の炉壁放散熱量	3,700	33.2
2	汲出口からの放散熱量	3,512	31.5
3	ラドルからの持出熱量	3,750	33.6
4	導入燃焼ガスからの供給熱量	△840	△7.6
5	その他の損失熱量	1,038	9.3
	浸漬ヒータの持込入熱量	11,160	100

$(11,160/860=13\text{KW})$

7-2. 従来型溶解保持炉の熱収支

従来型溶解保持炉の熱収支を表5に、その中の保持室のみの熱収支を表6に示す。従来型溶解保持炉は、溶解室に十分な受熱面積を有する加熱部が配設されておらず、溶湯の昇温は保持室にて行う為、その分浸漬ヒータの使用電力が増加する。また、溶解バーナの燃焼ガスを保持室の溶湯液面上に導入していないので、その分浸漬ヒータの電力が増加する。従って表6の保持室の熱収支により浸漬ヒータの電力(18KW)となる。

表5. 従来型溶解保持炉の熱収支 (Al-200kg/Hr)

		入熱		出熱	
		kcal/Hr	%	kcal/Hr	%
QL ₁	燃料の持込入熱量	79,440	83.7		
QL ₂	浸漬ヒータの持込入熱量	(18KW) 15,500	16.3		
QL ₃	アルミ溶解に必要な熱量			48,260	50.8
QL ₄	溶湯610℃から680℃迄の昇温熱量			3,500	3.7
QL ₅	排ガス損失熱量			20,408	21.5
QL ₆	炉壁放散熱量			11,000	11.6
QL ₇	汲出口からの放散熱量			3,512	3.7
QL ₈	ラドルからの持出熱量			3,750	3.9
QL ₉	その他損失熱量			4,510	4.8
	計	94,940	100	94,940	100

熱効率 $\eta = (48,260 + 3,500) / 94,940 \times 100 = 54.5\%$

『条件』

①溶解量：200kg/Hr

②ダイカストマシンからの汲出溶湯温度：680℃

③燃料：LNG

『諸元』①アルミ溶湯 610℃の必要熱量

$$(610+273) \times 0.2595 + 12.2 = 241.3 \text{ kcal/kg} \cdot \text{Al}$$

②LNG (真発熱量 9,930kcal/Nm³)

③アルミ溶解に必要な熱量 (610℃)

$$200 \text{ kg/Hr} \times 241.5 = 48,260 \text{ kcal/H}$$

表 6. 従来型溶解保持炉の保持室の熱収支

		Kcal/Hr	%
1	保持室及び汲出口の炉壁放散熱量	3,700	23.9
2	汲出口からの放散熱量	3,512	22.7
3	ラドルからの持出熱量	3,750	24.2
4	溶湯610℃から680℃迄の昇温に必要な熱量	3,500	22.6
5	その他の損失熱量	1,038	6.6
	浸漬ヒータの持込入熱量	15,500	100

$$(15,500/860=18\text{KW})$$

7-3. まとめ

上述の様に理論計算上、保持室ヒータ式酸化物抑制炉は従来型溶解保持炉に対して、浸漬ヒータの電力は約 28% (13KW vs 18KW) 減少する。

その差は、燃焼ガスを導入することによって保持室に供給された熱量、および従来型溶解保持炉において 610℃から 680℃まで保持室のヒータで溶湯を加熱することに要した熱量によるものである。

8. 電力量削減結果

電力計にて、保持室ヒータ式酸化物抑制炉と従来型溶解保持炉の電力使用量を測定した。

表 7. 電気使用量測定結果 単位 (KWh/hr)

	保持室ヒータ式酸化物抑制炉	一般的な本タイプ溶解保持炉
稼動時	8.94	12.35
溶解バーナ停止時	9.81	14.15
全平均	9.08	12.95

表 7 示す通り、保持室ヒータ式酸化物抑制炉では 9.08 KWh/hr、従来型溶解保持炉では 12.95KWh/hr という結果となった。しかしながら各炉の作業条件が異なった為、その補正を行い比較した。補正項目は炉壁放散熱量 (保持室及び汲出口)、汲出口からの放散熱量、ラドルからの持出熱量、溶解量 (溶解汲湯量) の違いの 4 項目。これらの詳細試算により、ヒータ式酸化物抑制炉に合計で 0.55KW を加算する事とした。

・保持室ヒータ式酸化物抑制炉：

$$9.08 + 0.55 = 9.63 \text{ KW/hr}$$

・従来型溶解保持炉：12.95KW/hr

以上により、保持室ヒータ式酸化物抑制炉は従来型溶解炉に比して、作業条件補正後で 26% の電力使用量削減となった。

9. 結言

CO₂削減の溶解保持炉である保持室ヒータ式溶解保持炉の更なる性能向上を目指し、酸化物抑制、溶湯品質向上および CO₂削減の為の電力削減を具体的目的として、保持室ヒータ式酸化物抑制炉の開発に取組んだ。この開発により、以下の知見を得ることができた。

- 1) 燃焼ガス中の酸素濃度を 3% 以下の低濃度に制御し、その燃焼ガスを保持室に導入することで、保持室の溶湯液面に酸化皮膜を生成する。その酸化皮膜の保護作用により、溶湯の酸化を抑制することができた。
- 2) その結果、保持室でのアルミ合金の酸化ロス率を 0.007% に抑制する事ができた。(従来型溶解保持炉では約 0.6%)
- 3) アルミ溶湯の酸化ロスが大幅に減ったことにより、保持室の清掃頻度は 3ヶ月毎まで延ばしても溶湯品質が維持できるまでに改善された。(従来型溶解保持炉では毎日清掃)
- 4) Kモールド法にて溶湯品質を確認した所、K10 平均値 0.1, Rank で AA~B まで改善できた。(従来型溶解保持炉では、K10 平均値 2.1, Rank で B~D)
- 5) 燃焼ガスを保持室に導入、溶湯を加熱して保持室の浸漬ヒータを補助する事で、電気使用量は従来型溶解保持炉に比して 26% 削減された。
- 6) 浸漬ヒータを常時溶湯にその全体を浸漬し、液面と

浸漬ヒータとのスラグラインを作らないことで、浸漬ヒータの高寿命化を図れた。

- 7) 浸漬ヒータ取付け開口部下端を液面より上にすることで、湯洩れの無い構造を確立できた。

参考文献

- 1) 萩野谷生郎、本間梅夫：鋳物 第66巻 第6号
「溶湯のガス吸収と介在物」P.449 ~ 457 (1994)
- 2) 益田昌人、佐野佑介、楊光、梶谷健：工業加熱
VOL. 58 NO. 3 (一社) 日本工業炉協会