
5t 真空誘導溶解炉の建設および操業について

Construction and Operation of a 5t Vacuum Induction Furnace

江島 彬夫(Akio Ejima) 戸村 寿孝(Hisataka Tomura) 松本 藤一(Fujikazu Matsumoto) 宮崎 四郎(Shiro Miyazaki) 平松 輝男(Teruo Hiramatsu)

要旨：

5t 真空誘導溶解炉のおもな設備仕様は、1)溶解量：最大 5.75t, 通常 5.25t, 最小 2.5t, 2) 操業圧力：通常 5×10^{-2} Torr, 到達下限 5×10^{-3} Torr, 3)定格溶解電力：1500kW, 4)周波数：150Hz, 5)鑄造方式：タンディッシュ使用の真空鑄造方式である。これまでの溶解実績から、1)溶解消費電力：平均 5300kWh/ch, 2)製鋼時間：平均 340min, 3)到達真空度および時間：C 0.25% の場合, 5×10^{-2} Torr, 90min, 4)一定浴温保持電力：約 350kW, 5)湯面流速：1000kW の時 0.44m/sec, 6)窒素吸収速度定数：純鉄の場合, $4.0 \times 10^{-3} \text{min}^{-1}$, 7)合金歩留：70～100%, 8)ライニング寿命：約 20 チャージであることがわかった。

Synopsis：

In order to develop new products and new processes, a 5t vacuum induction furnace was installed as a melting facility of Research Laboratories of Kawasaki Steel Corporation. The furnace was carefully designed by giving consideration to the size and chemical composition of the ingot to be produced, the mode of operations, the maintenance and the environmental standards. In Feb., 1974, the furnace was put into operation and various grades of steel were successfully produced. In the present report, details of the furnace and the results of operations were described.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

5 t 真空誘導溶解炉の建設および操業について

Construction and Operation of a 5 t Vacuum Induction Furnace

江 島 彬 夫*

Akio Ejima

戸 村 寿 孝**

Hisataka Tomura

松 本 藤 一***

Fujikazu Matsumoto

宮 崎 四 郎****

Shiro Miyazaki

平 松 輝 雄*****

Teruo Hiramatsu

Synopsis :

In order to develop new products and new processes, a 5 t vacuum induction furnace was installed as a melting facility of Research Laboratories of Kawasaki Steel Corporation. The furnace was carefully designed by giving consideration to the size and chemical composition of the ingot to be produced, the mode of operations, the maintenance and the environmental standards.

In Feb., 1974, the furnace was put into operation and various grades of steel were successfully produced. In the present report, details of the furnace and the results of operations were described.

1. 緒 言

従来、当社の試験材の溶製は、技術研究所の小型高周波溶解炉（鋼塊重量 10～50kg）、西宮、知多工場の塩基性アーク炉（10～15 t）により行われてきたが、試験片の寸法や成分調整に制約が多かった。さらに、設備合理化により西宮、知多工場の小型アーク炉が廃止され、特に合金鋼試験材溶製が困難になったので、新製品開発専用の溶解設備を技術研究所に設置することになり、昭和47年 8 月計画に着手、48年 2 月建設を開始、49年 1

月検収運転を完了、同年 2 月より依頼溶解を開始して現在に至っている。

以下に、設備と操業の概略について報告する。

2. 建設経過

2.1 溶解炉のおもな仕様の決定

(1) 溶解量

標準溶解量は 5.25 t、最大溶解量は 5.75 t、最小溶解量は 2.5 t とした。標準溶解量は生産工程で試験材を加工するに必要なかつ十分な鋼塊寸法よ

* 技術研究所製鋼研究室主任研究員

*** 技術研究所試験課

***** 千葉製鉄所企画部第 1 設計課

** 技術研究所製鋼研究室

**** 技術研究所管理課課長

り、最大溶解量はライニング焼結のための溶解量と、上部炉壁に付着する地金の再溶解に必要な量として、最小溶解量は2本採り鋼塊単重と同等量を溶解できる量として、それぞれ決定した。

(2) 雰囲気

千葉、水島製鉄所にすでに設置されているRH、LRFなどの工業用真空脱ガス装置の操作圧力が0.2~0.5Torrであることと、注入中雰囲気を完全に制御することを考慮して、真空溶解、真空铸造方式を採用した。操作圧力は通常0.05Torr、到達下限0.005Torrとした。なお、1 atm 以下でのAr、N₂などの雰囲気調整は可能である。母材、合金材、铸型、サンプラー、測温用熱電対の装入あるいは引出しを溶解室の真空を破らずに行える

ように、溶解室と大気の間隔室を設けた。

(3) 周波数と溶解電力

加熱方法は真空溶解に最適な誘導加熱方式を採用した。周波数および電力は溶鋼の攪拌強さと溶解所要時間を考慮して150Hz、1500kWを採用した。参考のために一般の誘導溶解炉の溶解特性におよぼす周波数の影響をTable 1に示す。

2.2 環境上の配慮

溶解炉は騒音を伴うアーク炉、プラズマ炉を避けて誘導炉を採用し、しかも、周波数は高周波を避けるとともに周波数変換装置もMG方式でなくトランスフォーマー方式にした。

溶解電源設備の力率改善および出力制御用コン

Table 1 Effect of frequency on melting characteristics of conventional induction furnace

Frequency	High ($\geq 500\text{Hz}$)	Triple (150 or 180Hz)	Low (50 or 60Hz)
Efficiency	About 86%	About 92%	About 96%
Power loss without load	As the motor generator continues to rotate even when the melting discontinues, the power is lost	Nothing	Nothing
Input power for 1t furnace	900kW (at 1000Hz)	750kW	500kW
Start from cold furnace	Possible to start from small cold scraps	Possible to start from larger scraps	Possible to start from starting blocks or by the remained molten steel method
Minimum size of charging materials	6~12mm [□]	130~150mm [□]	200mm [□]
Full power operation	Possible throughout melting period	Possible, only in the case of large charging materials	Possible when two thirds or more of furnace volume are filled with metals
Stirring	Weak	Moderate	Strong
Suitableness of using basic lining materials	Easy	Not so difficult	Difficult
Minimum rated input power	20kW	200kW	300kW
Charging of materials	Easy	Not easy	Not easy

デンスーは、Inductothermo 社推奨の水冷式 PCB コンデンサーが性能も良くコンパクトな設計ではあるが、PCB 規制に関する国情を考慮し、あえて占有体積が10倍に近い自冷式非 PCB コンデンサーを使用した。

溶解は真空中で行われ、発生するダスト、蒸発物などはすべて排気装置前段の除塵装置で捕集される。

したがって本溶解炉は無騒音、無塵の無公害型溶解炉である。しかし、工業規模の溶解炉の分類上電気炉に属するので慎重に配慮し、首都圏工場設置協定に基づき住宅地より離れた西工場地区に設置した。

3. 設備ならびに単位操作の概略

3.1 レイアウト

Fig. 1 に 5t 真空誘導溶解炉工場のレイアウト、Photo. 1 に設備概観を示す。原料は No.1 ス

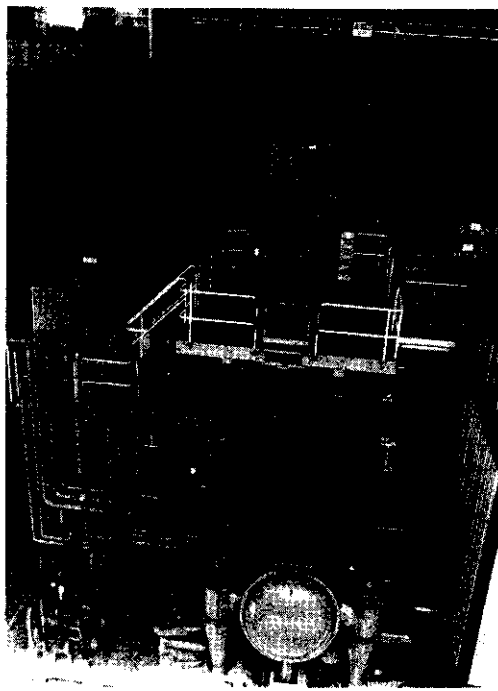


Photo. 1 General view of 5t vacuum induction furnace

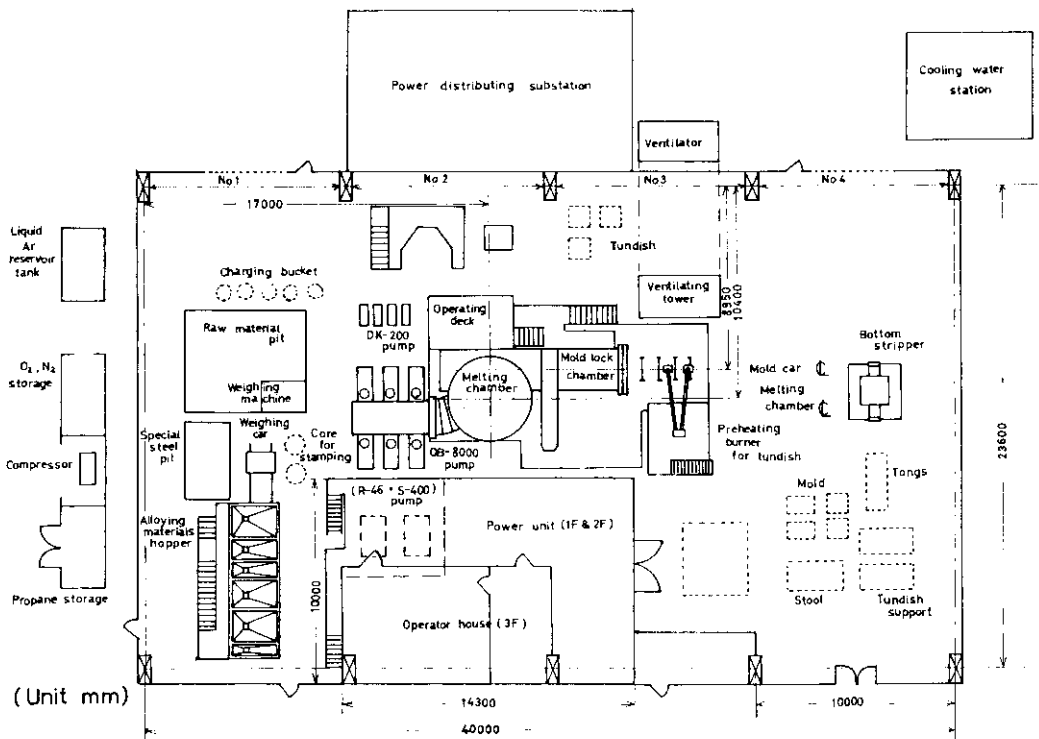


Fig. 1 Layout of 5t vacuum induction furnace plant

パン大扉より搬入し、溶製した鋼塊は No. 4 スパン大扉より搬出する。電気室の 1 階には主開閉器、トリプラー、トリプラー専用冷却装置、1 次コンデンサーバンク、高圧および低圧配電盤、2 階には 2 次コンデンサーバンクと継電器、低圧配電盤をそれぞれ配置した。その他、高圧受電設備(22kV

→3.3kV)、循環水設備、液化アルゴンタンク、酸素、窒素およびプロパンガス集合装置、エアコンプレッサーを屋外に配置した。

3.2 電源設備

Fig. 2 に本装置の電気系統図を示す。西工場受

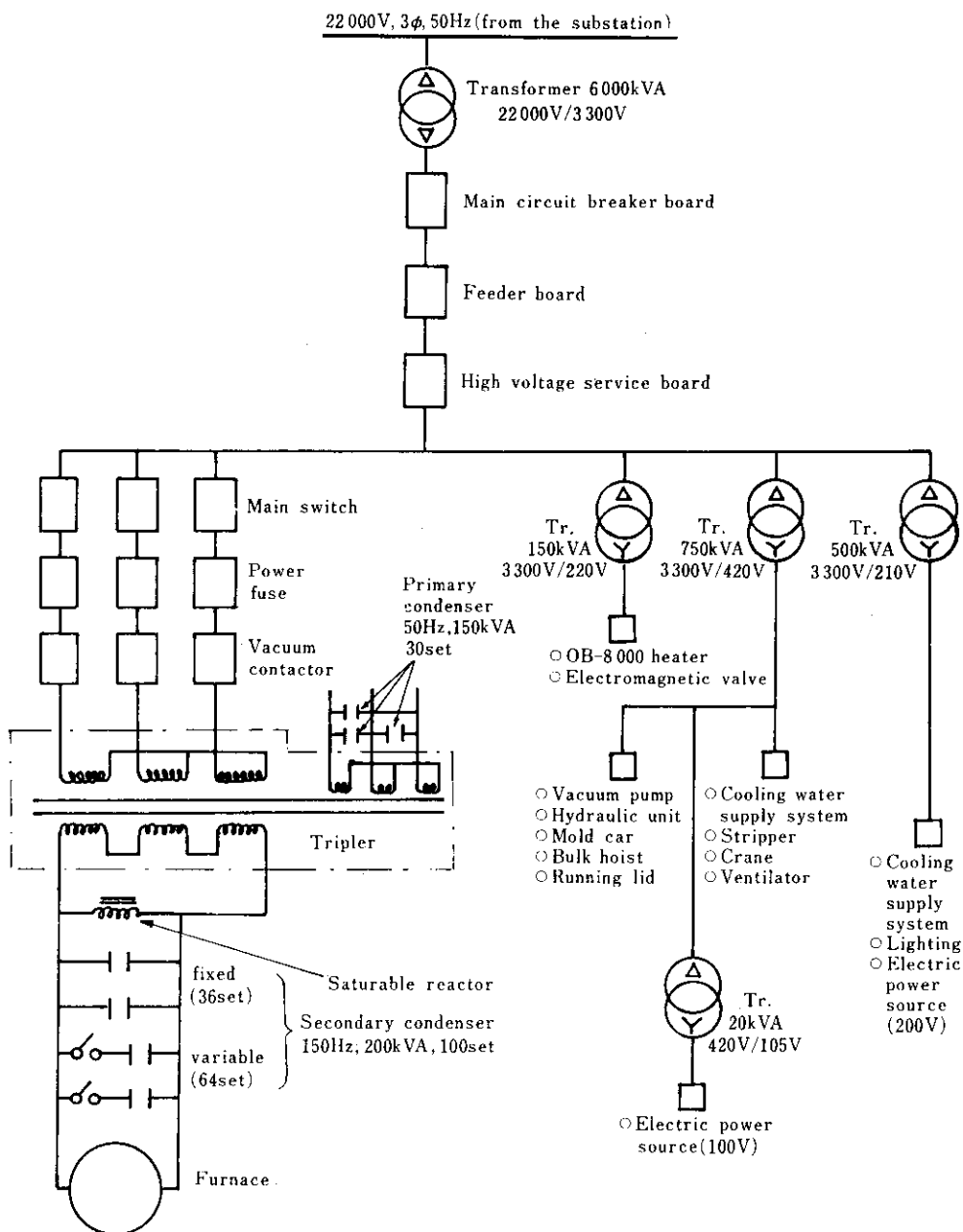


Fig. 2 Distributing system diagram

電所からの3相、50Hz、22kVを、屋外変圧器で3.3kVにし、溶解電源はメインブレーカー、高圧受電盤、主開閉器を通しトリプラーに供給する。トリプラーは、Fig. 3に示すように、飽和鉄心を用いた単相2巻線変圧器3台から成り、1次側はスター、2次側は開放デルタに接続されている。鉄心の磁束と誘起電圧の関係をFig. 4に示す。磁束飽和時には磁束の時間変化がないため2次コイルに電圧を誘起せず、非飽和時のみ磁束の時間変化領域において電圧を発生させるが、これら各相の2次側コイル誘起電圧は時間的遅れを保ちながら発生するので、2次側コイルには3倍周波が発生する。なお、周波数変換の際の電力損失分は熱エネルギーとなるので、内装された水冷銅管で冷却する。その際、要求される水質規制が厳しいので、専用の冷却水循環装置を取付けている。

Fig. 5に溶解炉電源設備の断面および平面図を示す。1次側コンデンサーは、進相用油浸式、1200V、3 ϕ 、50Hz、4500kVA (150kVA $\times$ 30台)で、力率改善、高調波の吸収および1次側電圧の

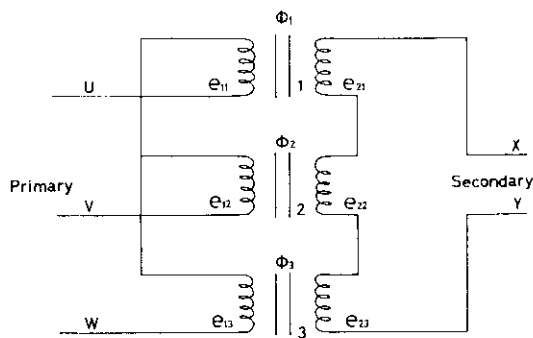


Fig. 3 Connection of tripler

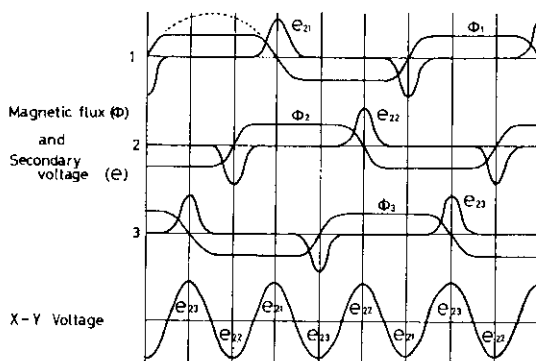


Fig. 4 Magnetic flux and induced voltage of each core

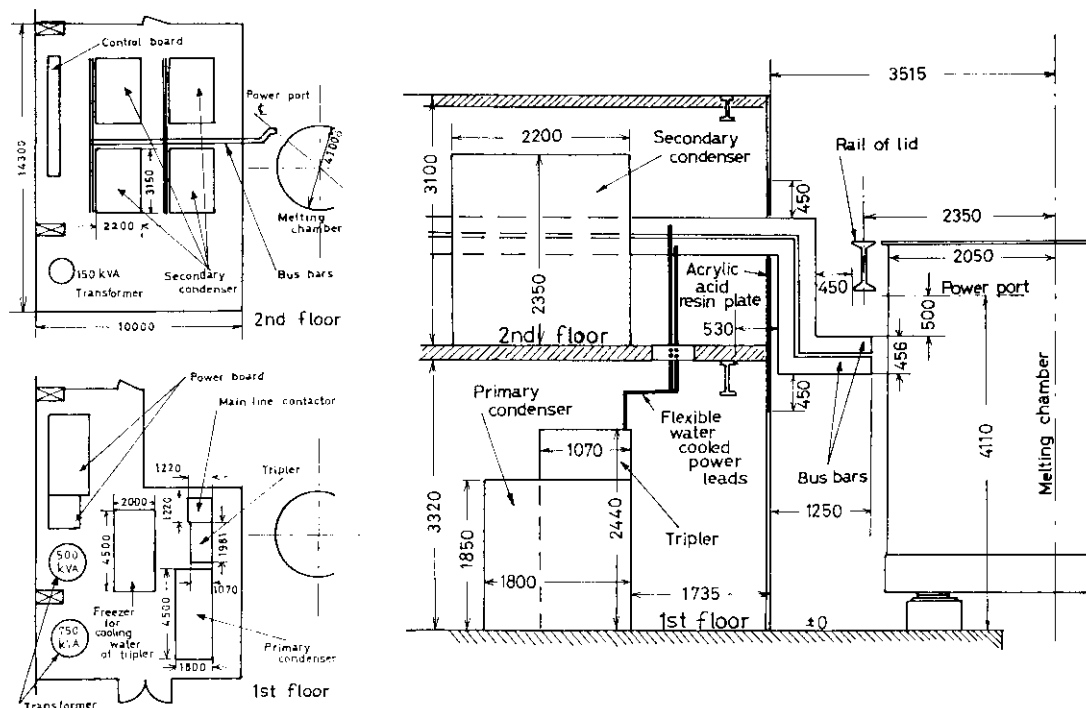


Fig. 5 Layout and cross section of power unit

安定化を行い、2次側コンデンサーは、進相用油浸式、550V、1 ϕ 、150Hz、20 000 kVA (200 kVA $\times$ 100 台)で、炉回路の力率改善および炉入力調整を行う。100 台中36台は固定、64台は可変である。2次側には、短絡電流を制限するチョークコイルが組込まれている。炉体コイル間端子電圧は550Vで、定格出力1 500kW、最大出力1 800 kW である。

操作は、操作デッキ上の遠隔操作盤 (Photo. 2 参照)で行う。各種操作ボタン、表示計およびサーキットモニターがあり、過負荷、短絡接地、冷却水温上昇、冷却水量不足等の重要なトラブルに対しては各々の故障表示灯、警報器を備え、事故発生の際には諸装置保護のため主開閉器が自動的に開く安全装置をそなえている。炉への入力制御は、所定電力をセットするのみで自動力率調整装置 (Inductomatic) により行われるが、手動操作も可能である。

3.3 真空溶解室ならびに付属装置

Fig. 6に真空溶解室の断面を示す。真空溶解室は内径4 100mm ϕ 、内高5 575mmの縦型で、同一系内に2 000W $\times$ 4 631H $\times$ 5 080 Lの鑄造室を含み、総内容積は約110m³である。鑄造室下面には1 800 mm ϕ 、深さ900mmの電極材鑄造ビットを設け、外径 945mm、高さ3 600mm鑄型への鑄込みを可能にしている。内ドアを介し鑄造室と隣接する2 000W $\times$ 4 631H $\times$ 3 904 Lのモールドロック室の内容積は約 46m³である。各ドアは油圧機構により作動し、真空溶解室上蓋は油圧で上下し、モーター駆動車輪にて横行する。上蓋全面と溶解室、鑄造室およびモールドロック室の上部1 000mmはジャケット方式で水冷し、溶鋼からの輻射加熱を防止している。真空溶解室上蓋上には、内容積約 6.5m³の材料装入室および0.36m³の合金材装入室があり、それぞれ油圧駆動水冷フラップバルブおよび手動ボールバルブにより真空溶解室から遮断できる。フラップバルブ下には、パッキングを保護するために、フラップバルブと連動する1 100mm ϕ のステンレス製水冷熱遮蔽板を設置した。

原料ビットに貯蔵した主原料の工業用純鉄(寸



Photo. 2 Control panel

法15 $\times$ 200 $\times$ 200mm、化学成分は Table 2 参照)を、リフティングマグネットによりチャージングバケットに装入し、秤量後、上蓋デッキ上の手動ワゴンにより材料装入室に入れ、真空溶解室の真空を破らずに電動ホイストにて炉内に装入する。1バケットの装入所要時間は約10minである。少量の添加合金材は、合金材装入室の手動傾転カップ (5.6 l、8槽)から溶解室の真空を破らずに、旋回電磁フィーダーにより炉内に添加する。添加所要時間は1min以内である。

测温ならびにサンプリングは、材料装室内電動ホイストにより単独または同時に行うことが可能で、所要時間は5min以内である。装入、测温、サンプリング、溶解、精錬および注入状況の観察は、上蓋上の320mm ϕ のぞき窓および100mm ϕ ストロボ付のぞき窓より行う。出鋼時のタンディッシュ湯面状況は溶解室壁上の2個の320mm ϕ のぞき窓より観察する。ほかに、材料装入室扉に1個、モールドロック室に2個ののぞき窓があり、各室内の観察に使用する。

鑄型、定盤およびタンディッシュの移動は、電動チェーン駆動ローラーテーブル上の台車(1 400W $\times$ 415H $\times$ 2 750 L)で行う。移動方向は炉体傾動方向に直角で、移動速度は無段変速で最大7m/minである。

3.4 排気設備

本排気設備の系統図を Fig. 7 に、各真空ポンプ仕様を Table 3 に示す。主排気系は、オイルブースターポンプ (OB-8000) 6基、メカニカル

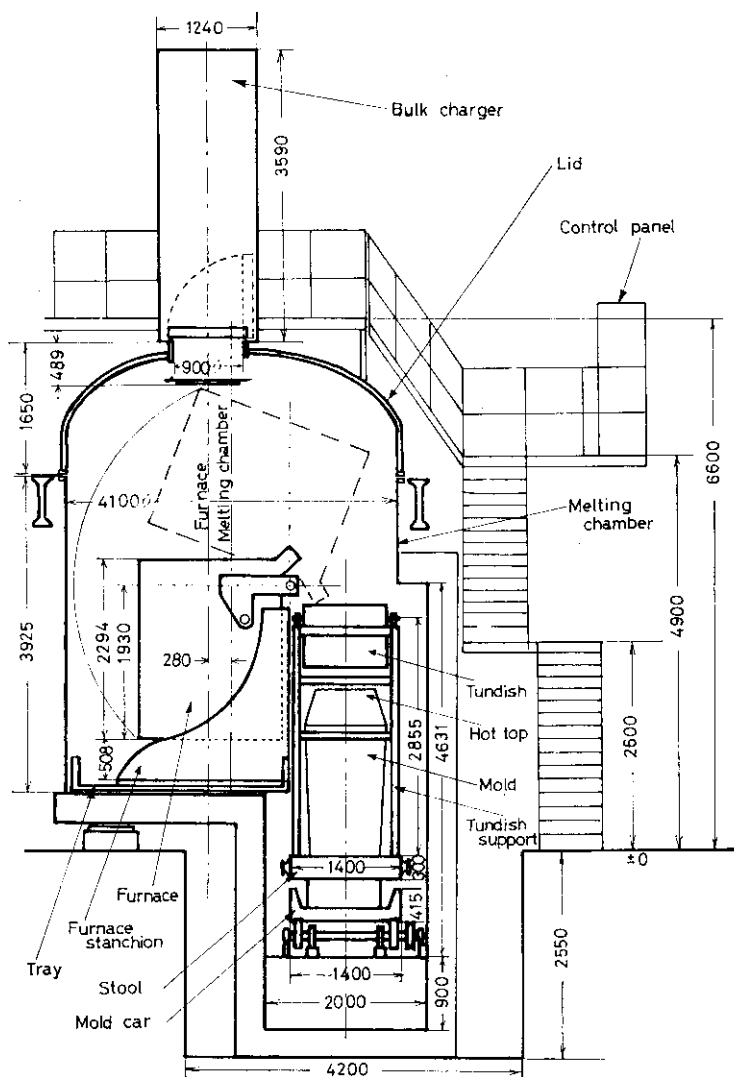


Fig. 6 Cross section of vacuum tank

Table 2 Chemical composition of mother metal (ppm)

C	Si	Mn	P	S	Al	Cu	Ni	Cr	Co	N	O
90	40	80	80	60	20	110	80	60	50	30	500~800

ロータリーポンプ (DK-200) 2基およびメカニカルブースターポンプ (Ruvac-46) とメカニカルロータリーポンプ (S-400) の組合せポンプ2組から成り、溶解室とモールドロック室を排気する。材料装入室および合金材装入室排気用として

DK-200ポンプ2基が設置されている。排気所要時間は3min以内である。排気所要時間を短縮する場合にはRuvac-46ポンプとS-400ポンプを併用する。

溶解時、真空室内ではダスト発生が著しいの

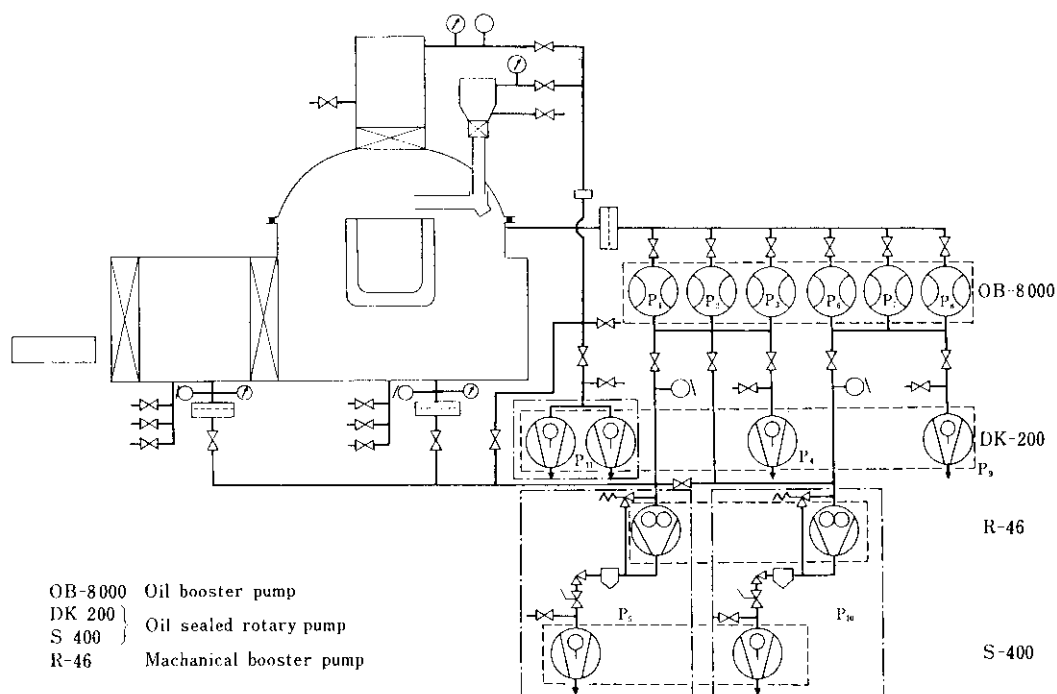


Fig. 7 Vacuum diagram

Table 3 Specification of vacuum pumps

Vacuum pump	OB-8 000	Ruvac-46	S-400	DK-200
Max. pumping speed (l/sec)	8 000	972.2	111.1	55.5
Ultimate total pressure (Torr)	1×10^{-4}	2×10^{-3}	Without gasballast 5×10^{-2}	Without gasballast 1×10^{-4}
Starting pressure (Torr)	1	760	760	760
Heater power (kW)	21.9	—	—	—
Oil filling (l)	50~55	4	13~22	4
Min. cooling water flow (l/hr)	1 800	100	190	—

で、真空溶解室ならびにモールドロック室排気管に手動巻取式グラスファイバー製フィルターを設置し、ポンプをダストから保護している。

真空溶解室およびモールドロック室の真空度測定は、不変抵抗熱伝導真空ゲージ (<1 Torr) およびダイヤフラム真空計 (≥ 1 Torr) で行い、真空度記録計に記録する。材料装入室および合金

材装入室の真空度は、ブルドン管真空計で測定する。

すべての操作は操作デッキ上の押ボタン付グラフィックパネル (Photo. 2 参照) で行い、真空ポンプ、バルブおよび冷却水回路は、誤操作から諸装置を保護するためインターロックが設けてある。なお、各真空バルブ、リークバルブおよび不

活性ガス導入バルブは電磁圧空式である。

3・5 炉 体

炉体構造をFig. 8に示す。炉体はスタンションにより支持され、油圧傾動装置により -10° から 110° まで傾転が可能であり、最大傾動速度は $1.5^{\circ}/\text{sec}$ である。また、溶解温度は通常 1600°C 、最高 1700°C である。耐熱性絶縁を施した6ターン4セグメント計24ターンの水冷銅パイプの誘導コイルと、炉上部に $2\frac{3}{4}$ ターン、下部に $5\frac{3}{4}$ ターンのステンレス製水冷コイルが設置してある。誘導コイルとブスバーはフレキシブル水冷パワーリードで接続している。炉体の交換は、ブスバーからパワーリードをはずして行う。なお、溶湯のボー

リングおよび添加材の投入状態などの監視が重要であるので炉蓋を設置していない。

耐火物に対する湯差しは、炉底ライニング材中に埋設した金属線検出端とアース間に与えられている直流電流の変化で検出する。湯差しが銅コイルにおよんだ時の直流電流の変化を操作デッキ上の遠隔操作盤(Photo. 2参照)電流計で検出し、電流値が約 70mA 以上になるとリレーが働き、電源がトリップする。

3・6 ライニング、焼結および自動保熱

ライニング材は、Table 4に示す組成の低 SiO_2 電融マグネシアで適当な粒度構成をもつものである。ライニングは乾式で行う。まず、炉底部にラ

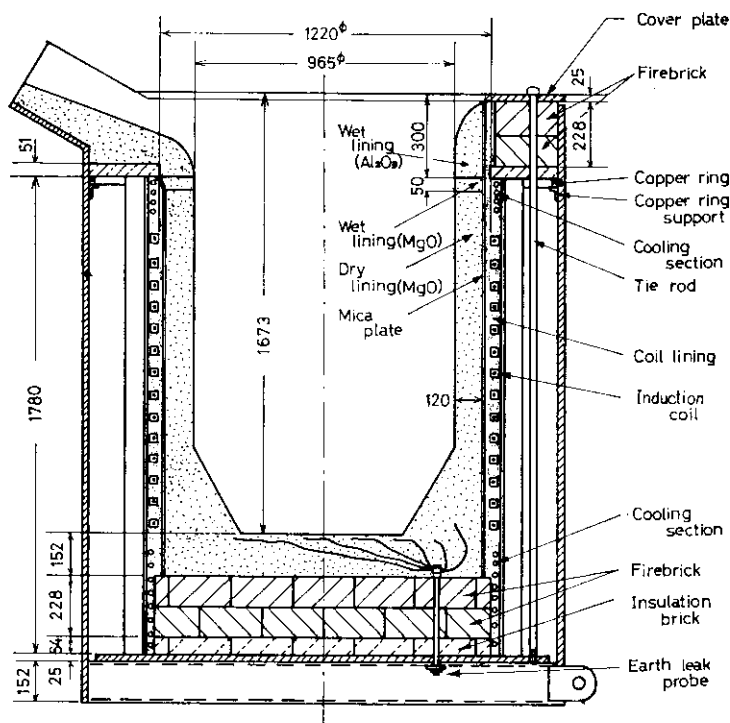


Fig. 8 Profile of furnace

Table 4 Chemical composition of lining material

(%)

MgO	Al ₂ O ₃	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	B	C
≥93.37	<4.8	<0.8	<0.83	<0.1	<0.1	<0.1

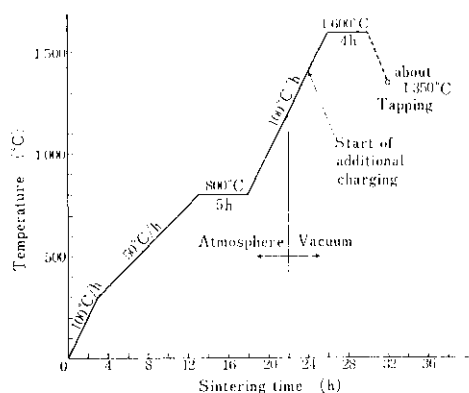


Fig. 9 Program of sintering

イニング材を装入し、パイブレイティングランマーにより所定厚みにつき固める。次に、コイル内側に同心円状にマイカを張り、工業用純鉄板製円筒状コアを装入し、マイカとコア間にライニング材を充填し、順次下方よりランマーでつき固める。炉上面下 350mm まで乾式ライニングを行ったのち、湯口を含む炉上端までは水ガラスをバインダーとし、マグネシアあるいはアルミナで湿式ライニングを行う。完了後、約 1 昼夜ライニング材の炭火乾燥を行い、鉄鉄を装入して、Fig. 9 に示す焼結ダイヤグラムに従い焼結を行う。冷鉄は加熱時のコア変形を防止し、棚吊りを起さない程度に十分密に充填する。冷鉄はワークコイル上端まで充填し、溶落後、溶湯面が乾式ライニング上端よりさらに上 100mm になるよう追加装入する。大気溶解時の測温は、コア内面に溶接したパイプ内に C A 熱電対をセットして行い、真空時には、経験値に基づく炉入力調整により昇熱し、材料装入室からの吊下測温装置によりチェックする。

溶解を休止する場合には、ライニングのクラック発生防止のため炉体の自動保熱を行う。出鋼後、次回の溶解母材約 1.5 t を炉内に装入、昇熱し、真空溶解室上蓋のぞき窓に装備したパイロアイにより母材表面温度を検知し、820°~950°C の間で、炉入力の自動 on-off 制御を行っている。1 サイクルは、炉入力 on→off(昇熱)に約 70min、off→on(冷却)に約 140min である。

3.7 造塊設備

造塊段取はモールドロック室外ドア前にて行

い、Fig. 6 に示したように台車に定盤、鋳型、押湯保温枠およびタンディッシュを組立てる。この組立て位置で、出鋼の 2hr 前からワイドフレームバーナーによりタンディッシュ予熱を行う。予熱温度は約 1000°C である。

鋳型の諸次元を Table 5 に示す。押湯比は約 13% で、押湯保温枠は上乗せ式である。Table 6 に真空溶解用発熱スリーブ(発熱量 1400cal/g)の化学組成を示す。Fig. 10 にタンディッシュの平面および断面を示す。ノズル流れの乱流を防ぐため、ノズル位置を片側に寄せ、ノズル対向位置に注入できるようにした。また、内底はノズル方向にテーパーをつけ、地金付を極力防止した。ノズルは内装式で、内径 30mm から 80mm までのノズルを注入速度に応じ、羽口レンガを交換することなく替えることが可能である。ワーキングレンガは高アルミナレンガ、パーマネントレンガは断熱レンガであり、羽口およびノズルは焼成ジル

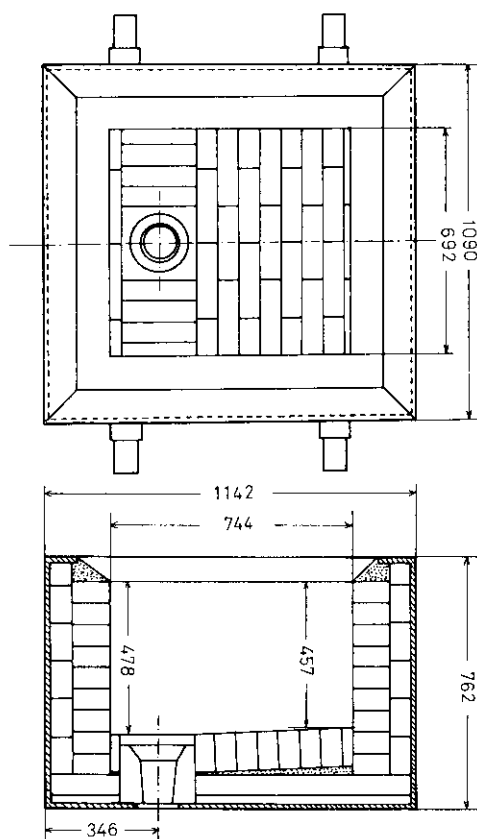


Fig. 10 Profile of tundish

Table 5 Dimension of molds

Name of mold	VL5A	VL5B	VS5	VL2.5	VS2.5
Height (mm)	1 500	1 500	1 500	1 500	1 500
Length of wide side of top(mm)	1 145	845	745	850	556
Length of narrow side of top (mm)	516	625	745	367	556
Length of wide side of bottom (mm)	1 055	755	595	760	406
Length of narrow side of bottom (mm)	366	475	595	217	406
Curvature of corner (mm)	50	50	50	50	50
Weight of mold (t)	6.09	5.17	5.15	3.67	3.27
Weight of ingot (t)	4.64	4.54	4.54	2.27	2.37
Mold/Ingot ratio	1.31	1.14	1.13	1.62	1.38
Wide side/Narrow side	2.50	1.45	1.00	2.75	1.00

Table 6 Chemical composition of hot top sleeve

(%)

M.Al	SiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	Ig-Loss
30~35	21~27	15~20	10~15	10~13	trace	trace	3~5

コンレンガである。必要に応じて下注造塊を行うこともできる。

鋼塊ストリッパーは油圧駆動のボトムストリッパーであり、主シリンダーは最大押上力300t、ストローク500mm、押上速度約150mm/minで、铸型支持シリンダーは最大力4t、ストローク250mm、押速度1000mm/minである。

鋼塊や铸型の運搬は、電動チェーンブロックにより開閉するトンク（最大荷重17t）で行う。

型抜きした鋼塊は、必要に応じて、断熱レンガ敷、ガラスウールおよびカオウールの2重張りの徐冷ボックスに装入し、徐冷する。冷却速度は平均0.4°C/min (700°~500°C) である。

3.8 冷却水供給設備、コンプレッサーおよび諸ガス供給設備

これら付帯設備のおもな仕様を Table 7 に示す。炉体、真空溶解室および上蓋、铸造室、モールドロック室、フラップバルブ、熱遮蔽板および真空ポンプ等への冷却水は、屋外の還水設備より供給する。給水ポンプおよび冷却塔ポンプは、それぞれ2台設置し、自動交互運転可能で、かつ一方の故障時には他方が自動的に送水を行う。また、溶解中停電した場合、炉体コイルおよびOB-8000真空ポンプのみを保護するための非常送水設備を設置した。

Table 7 Specification of auxiliary equipment

Equipment	Element	Specification
Cooling water recirculating system for 5 t vacuum induction furnace	Flow rate	Max. 2.5 m ³ /min
	Pressure	4.8~5.8 kg/cm ²
	Temperature	Inlet~46°C, Outlet~32°C
Cooling water recirculating system for emergency(4 cycle diesel engine)	Flow rate	Max. 0.5 m ³ /min
	Supply time	Max. 16 hr
Cooling water recirculating system for tripler	Cooling capacity	280 000 kcal/hr (at 11°C of water temp.)
	Temperature	Outlet 19°~27°C
Air compressor	Exhaust quantity	1.5 m ³ /min
	Pressure	7 kg/cm ²
Liquid Argon reservoir tank	Preservative quantity	1 020 m ³ (at 35°C)
	Pressure	Max. 9.5 kg/cm ²
	Evaporative quantity	Max. 100 m ³ /hr

電磁圧空式真空バルブは、屋外のロータリーコンプレッサーから供給される圧縮空気により作動する。また、真空室内雰囲気調整用 Ar, N₂ ガスおよびタンディッシュ予熱用プロパンガスは、それぞれ屋外の Ar リザーバータンクおよび集合装置から供給する。

4. 操 業

周波数 150Hz, 定格出力 1 500kW, 到達真空度 5×10^{-3} Torr, 標準溶解量 5.25 t の半連続式真空溶解炉の稼動は日本においては最初であり、また工業用純鉄を母材として、低炭素鋼から高合金鋼におよぶ非常に広範囲の鋼種を溶製する操業は外国においても例がない。したがって、昭和49年2月操業開始以来、付帯設備も含めて数多くの障害に遭遇したが、適宜対策を施し現在では安定した操業を続けている。

4.1 溶解実績

昭和49年2月から50年3月までの溶解量を Table 8 に、最近6ヶ月間の溶解電力を Table 9 に、製鋼時間を Table 10 にそれぞれ示す。アーク炉や低周波炉¹⁾に比べて製鋼時間が長いのは、本操業の場合、溶解態様がバッチ型であり、浴のポ

Table 8 Results of operation

(Feb., 1974~Mar., 1975)

	Number of melting(ch)	Melting weight (t)
Stainless steel	24	129.36
Silicon steel	5	25.95
Manganese steel (Mn $\geq$ 10%)	2	10.50
High carbon steel (C $\geq$ 0.5%)	2	10.30
Nickel bearing steel (Ni 3~5%)	4	21.30
Other steels	34	178.80
Washing	5	28.25
Sintering	8	43.76
Remelting	7 (5)*	33.79
Total	91	482.01

* Remelting due to equipment troubles

Table 9 Power consumption

	Period	Maximum	Minimum	Average
Power per charge (kWh/ch)	Switch on ~Melt down	4 380	2 580	3 682
	Melt down ~Tap	2 890	900	1 625
	Total	6 520	4 200	5 307
Power per steel ton (kWh/t)	Switch on ~Melt down	842	488	718
	Melt down ~Tap	566	178	317
	Total	1 276	830	1 036

Table 10 Steelmaking time

	Period	Maximum	Minimum	Average
Time per charge (min/ch)	Melting	199	122	153
	Degassing	180	64	100
	Sampling and temperature measurement	41	13	24
	Alloying	100	40	66
	Total	412	284	341
Time per steel ton (min/t)	Melting	38	24	30
	Degassing	35	12	19
	Sampling and temperature measurement	8	2	5
	Alloying	19	8	13
	Total	80	52	67

イリングを抑制しつつ減圧中で溶解するために電力投入量と時間が制約され、さらに、真空処理時間と炉から3.8km離れた研究所分析装置で炉前分析を行うための待時間が加わるためである。

Fig. 11 に溶解・精錬・成分調整・出鋼に伴う

炉内圧力の変動の一例を示す。

4.2 到達真空度

転炉製工業用純鉄（0.005% C）を真空溶解した場合の排気曲線図を **Fig. 12** に示す。200Torr

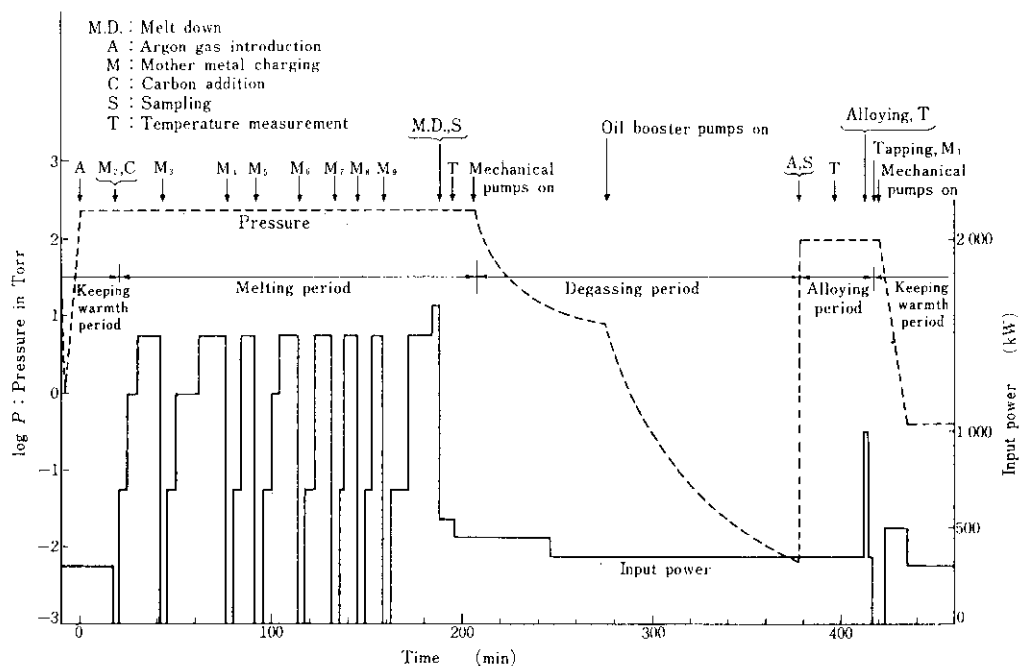


Fig. 11 Typical operation diagram

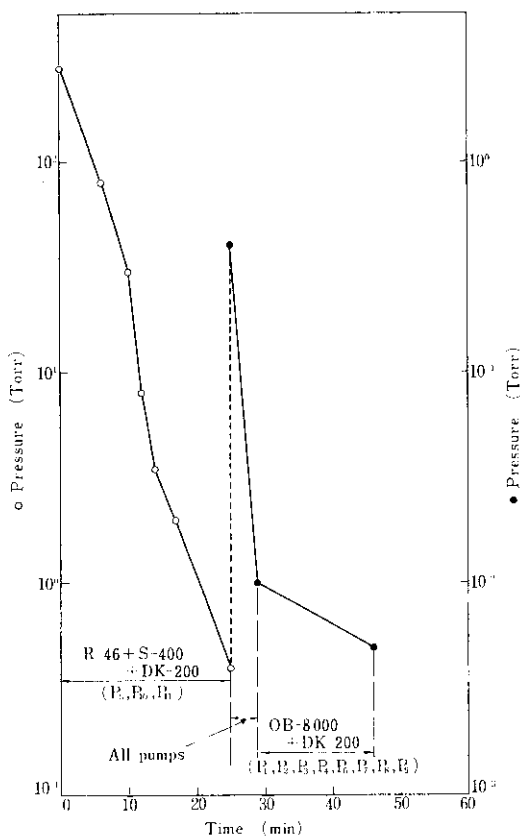


Fig. 12 An example of evacuating curve

から 5×10^{-3} Torr に到達するまでの所要時間は 46min である。鋼浴中の C 濃度が増すとライニング材 (MgO) の還元による CO 発生量が増すので、到達圧力は高く、到達時間は長くなる。たとえば、C 0.25% の場合、 5×10^{-2} Torr, 90min となる。

4.3 昇温速度

電力投入量と鋼浴温度の上昇速度との関係を Fig. 13 に示す。同図より、浴温を一定に保持するに要する電力は約 350kW であり、浴温上昇に利用される電力効率は約 88% と見積られる。

4.4 鋼浴の攪拌

鋼浴に流れる誘導電流と磁界との相互作用により、Fig. 14 に示すように、溶鋼を中心部に移動せしめる力 G が働き、 G はコイル中心部で最も大きいので鋼浴は流線のように攪拌される。この作用により浴表面を盛り上げる力 F は (1) 式²⁾ で与えられている。

$$F = h \cdot \rho_s = 31.6 \sqrt{\frac{\mu}{r \cdot f}} \cdot \frac{W}{\pi \cdot d \cdot L} \quad \cdots (1)$$

炉中心軸上においては、盛り上り部の溶鋼静圧と

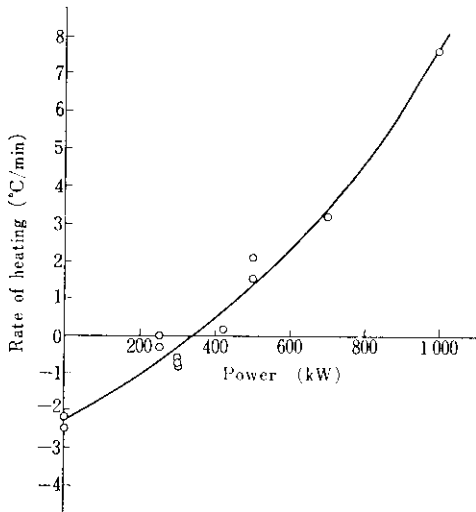


Fig. 13 Relation between power and rate of heating

I : Electric current
 H : Magnetic force
 G : Stirring force

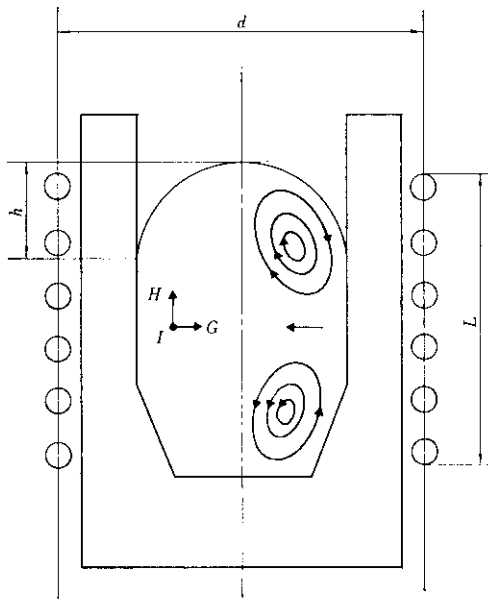


Fig. 14 Flow pattern of molten steel in induction furnace

溶鋼上昇流の運動エネルギーは均衡を保っている
 ので(2)式が成立する。

$$v = \sqrt{2gh} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 h : 浴中心の盛り高さ (cm), ρ_s : 溶
 鋼密度 (g/cm³), W : 電力投入量 (kW), μ : 誘

Table 11 Calculated and observed linear flow velocities of molten steel

Power (kW)	400	1 000	1 800
Linear flow velocity			
v (m/sec)	0.71	1.12	1.51
v_s (m/sec)	—	0.44	0.57

v : Calculated

v_s : Observed

Table 12 Final contents of oxygen and nitrogen

	[O] ppm	[N] ppm
Plain carbon steel (0.2%C)	11	19
Stainless steel (11%Cr, 0.6%Ti)	18	61
Silicon steel (3%Si, 0.6%Al)	10	31

磁率 (溶鋼の場合は1), f : 周波数 (Hz), d : コ
 イル直径 (cm), L : コイル高さ (cm), v : 坩
 埚中心軸上昇流速 (cm/min), g : 重力加速度
 (cm/sec²), r : 溶鋼の電気抵抗 ($\Omega \cdot \text{cm}$)である。

(1) および (2) 式より計算した v の値と高速
 度カメラを用いて測定した表面流速 v_s を Table 11
 に示す。 $W=1\,000\text{ kW}$ における v は R H 脱ガスの
 際の下降管中の溶鋼流速と同程度である。

4.5 脱酸と脱窒

普通炭素鋼, ステンレス鋼, 珪素鋼について現
 在までに得られた酸素および窒素含有量の最低値
 を Table 12 に示す。

4.6 窒素吸収速度

純鉄浴, 1 600°C における窒素吸収速度を窒
 素分圧をパラメーターとして Fig. 15 に示す。
 $\log [\%N]$ と時間 t の直線関係から1次反応と
 みなせる。窒素溶解の平衡に関する学振推奨式³⁾
 ((3) 式参照)より導出される(4)式を用いて各窒
 素分圧に平衡する窒素濃度 N_e を求め, 初期条件
 ($t=0$, $N=N_0$) と境界条件 ($t=\infty$, $N=N_e$) か

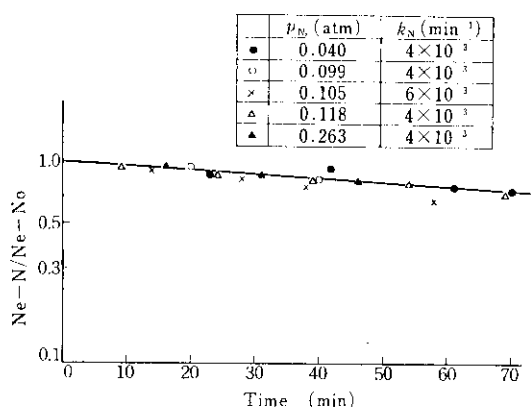


Fig. 15 Rate of nitrogen absorption

ら導かれる(5)式の窒素吸収速度定数 k_N を計算した。

$$\frac{1}{2} N_2(g) = N$$

$$\log K = \log \left(a_N / \sqrt{p_{N_2}} \right) = -\frac{188}{T} - 1.248 \quad \dots (3)$$

$$[\% \text{Ne}] = 0.045 \sqrt{p_{N_2}} \quad (\text{at } 1600^\circ \text{C}) \quad \dots (4)$$

$$\log \frac{[\% \text{Ne}] - [\% \text{N}]}{[\% \text{Ne}] - [\% \text{N}_0]} = -k_N t \quad \dots (5)$$

ここで、 a_N ：ヘンリー基準による窒素の活量， p_{N_2} ：雰囲気中の窒素分圧 (atm)， $[\% \text{Ne}]$ ：平衡窒素濃度， $[\% \text{N}_0]$ ：初期窒素濃度， $[\% \text{N}]$ ：時間 t (min)における窒素濃度， T ：溶鋼温度($^\circ \text{K}$)である。

Fig. 15 に示すように k_N の計算値として p_{N_2} に依存しない一定値 ($4.0 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$) が得られ、溶鋼中の N の移動が律速過程であることを示唆している。

4.7 合金歩留り

真空処理後、成分調整のため添加した合金の歩留りを Table 13 に示す。

4.8 ライニングの寿命

ライニング材はエイト電化機製 MR-101B を使用している。ライニング焼結層厚さと溶解回数との関係を Fig. 16 に示す。熱炉冷材装入時に坩堝内面に発生する割れは焼結層中を容易に伝播し、貫通する。したがって、焼結層がライニング全層を占めた時をライニング寿命とすれば、Fig. 16 よ

Table 13 Yields of alloying elements

Alloying element	Yield (%)	Alloying element	Yield (%)
C	95.3	Cr	97.6
Si	98.5	Nb	93.2
Mn	97.3	Mo	99.7
P	95.0	B	97.2
S	100.0	V	100.0
Al	85.6	Ti	98.8
Ni	95.5	REM	69.8

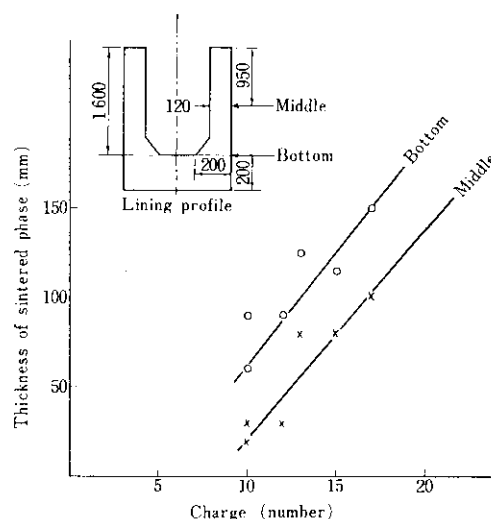


Fig. 16 Lifetime of furnace lining

り MR-101B の寿命は 20 回と推定される。

4.9 初期事故

操業開始以来、現在までに経験したおもな初期事故とその対策について述べる。

(1) 電気関係

本装置に多数組み込まれているインターロック機構の作動不良が多く、すべて原因はリミットスイッチの動作不良によるものであった。リミットスイッチを旋回アーム基部の摩擦抵抗の小さいも

のと交換し、塵埃による動作不良を防ぐため点検を強化している。

(2) 冷却水関係

夜間保熱中に材料装入室フラップバルブ（水冷真空仕切弁）から洩水する事故が発生した。これは、フラップバルブ内流水仕切板のプラグ溶接の不完全さが原因で、再溶接を施し、溶接箇所を増加補強して以来洩水はない。

またトリプラー盤内のトランス冷却用水用ゴムホースに亀裂がはいり洩水し、1次側電流が制御回路にリークして整流器を破壊する事故が発生した。全ホースを強化ゴムホースと交換して以来洩水はない。

(3) 真空関係

炉体とブスバーを繋ぐ水冷ケーブルの真空シール部（パワーポート）ベークライト板破損によるリークが発生したが、ベーク板の改造交換により解決した。

また主原料装入後および溶落サンプル採取後、材料装室内を大気圧に戻すべくエアリークした際、CO 爆発を2度経験した。いずれも、前装

入CによりCO量が最高となる溶落期で、火点は、前者の場合チャージングバケット付着溶鋼で、後者はポンプサンプルである。本装置の場合、CO発生および爆発火点は不可避なので、従来のエアリークをアルゴンリークに切り替え爆発を回避している。

5. 結 言

5 t 真空誘導溶解炉の設備概要および操業について紹介した。操業当初いくつかの初期事故が発生したが、随時対策を講じ、現在は順調に稼働している。今後は、より広範囲の鋼塊溶製に応じられるように設備機能を改善し、溶解能率の向上を計っていきたい。

おわりに、本設備の建設計画および工事施行にあたりご指導ご協力をいただいた千葉製鉄所、松阪貿易㈱、Leybold-Heraeus 社、Inductothermo 社、佐世保重工㈱、日新電機㈱、富士電気工事㈱の各位に謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 小玉寛, 有本武司: 川崎製鉄技報, 5 (1973) 4, 107
- 2) 林主税, 村松宏司: 真空冶金, (1968), 74, [日刊工業新聞社]
- 3) 学振製鋼第19委編: 製鋼反応の推奨平衡値, (1968), 158, [日刊工業新聞社]