

低周波誘導炉による鑄鉄の溶解

Melting of Cast Iron by Low-Frequency Coreless Crucible Type Induction Furnace

小野 裕* 白石 征一**
Hiroshi Ono Seiichi Shiraishi

内 容 梗 概

低周波誘導炉で鑄鉄を溶解して、原価的に有利であるかまた炉材としてはどれが適当かを検討した。その結果キュボラやその他の溶解炉に比べ効果があることが判明した。炉材としてはケイ砂を用いることで十分その用を足すことがわかった。

1. 緒 言

近年、欧州において開発された低周波誘導炉は短時日の間に急速に発達し、欧州各国はもちろん、わが国においても相当数⁽¹⁾の誘導炉が設置されている。低周波誘導炉は商用周波数を使用するため、高周波誘導炉に比べ、設備費が低廉であり、大容量のものができること、キュボラに比べ、低級地金の溶解が可能であること、成分調整が容易であることなどの利点があるため、従来の溶解炉を過去のものとする勢いを示している。

誘導炉に関する文献は、国内外において数多くみられるが⁽²⁾、大部分が低周波誘導炉の特長および電気的設備関係のもので、金属の溶解に関しては数少ない。その中でも鑄鉄の溶解に関するものとしては特に少なく、大部分が銅合金関係の報告⁽³⁾である。日立製作所日立工場においては日立製作所国分工場製の2t 無鉄心ルツボ形低周波誘導炉を用いて鑄鉄の溶解を行なっているが、その結果キュボラに代わって原価的に効果があることが明らかとなった。

2. 例周波誘導炉の原理と構造

低周波誘導炉の原理については数多くの報告があるので、ここには簡単な溶解原理と当工場の2t 炉の概略寸法および電源容量などを示す。

低周波誘導炉の原理は高周波誘導炉の原理とほとんど同じであり、一次コイルに流れる電流によって材料中に生じる誘導電流のため、ジュール熱を発生し溶解する。

いま、溶解物の比抵抗を ρ 、透磁率を μ 、周波数を f とした場合、電流浸透深さ δ は次式⁽⁴⁾で示される。

$$\delta = \frac{1}{2\pi} \times 10^3 \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}} \quad (\text{cm})$$

また装入材の半径を a 、コイルにより生じる磁界を H_0 とすると、この装入材に吸収される電力 P は

$$P = 8\pi\rho H_0^2 \cdot \frac{a}{\delta} \cdot F$$

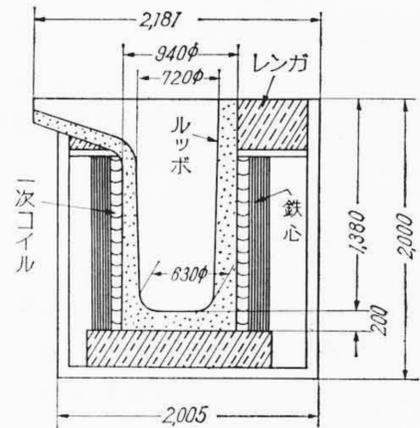
ただし

$$F = \sqrt{2} \frac{\text{ber}\left(\frac{\sqrt{2}a}{\delta}\right)\text{ber}'\left(\frac{\sqrt{2}a}{\delta}\right) + \text{bei}\left(\frac{\sqrt{2}a}{\delta}\right)\text{bei}'\left(\frac{\sqrt{2}a}{\delta}\right)}{\left[\text{ber}\left(\frac{\sqrt{2}a}{\delta}\right)\right]^2 + \left[\text{bei}\left(\frac{\sqrt{2}a}{\delta}\right)\right]^2}$$

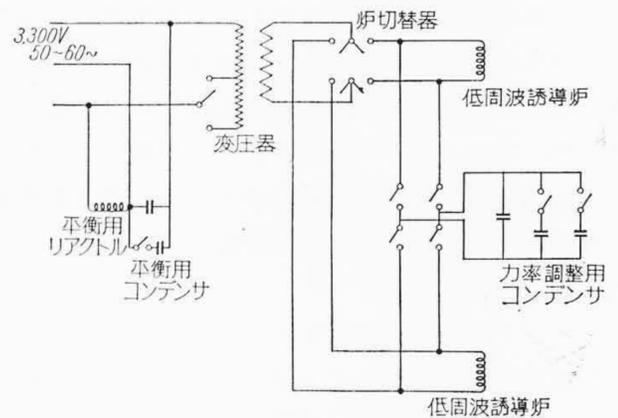
で表わされる。ゆえに電力 P は材質、形状、磁界速度一定のとき F に比例する。一方関数 F は a/δ が2以下になると急激に低下する。すなわち熱効率が低下することが考えられるので、 $a/\delta > 2$ なるように周波数を選ぶか、あるいは溶解材料の径を大きくすることが必要である。

* 日立製作所勝田工場

** 日立製作所日立工場



第1図 2t 低周波誘導炉概略寸法図



第2図 低周波誘導路結線

構造としては第1図に示すように、被溶解物を装入するルツボ、その外周にある一次コイル、鉄心ヨークおよびこれらを支持する部分からなっている。ルツボの外周にある一次コイルは特殊な中空成形導体からなるコイルで、冷却のため管内に水を通す直接冷却方式である。コイルは支持金物によって熱による変形やルツボ成形の際の機械力などに安全であるように締め付けられている。炉体の傾動は電動機駆動によるワイヤ駆動方式で、溶湯を直接取りナベまたはインゴットケースに注湯できるようになっている。

電源設備としては、変圧器、力率調整用コンデンサおよび三相平衡装置としての平衡用リアクトルと平衡用コンデンサがおもなるものである。基本結線を第2図に示す。

(1) 変 圧 器

低周波誘導炉には炉用の電源変圧器により適当に降圧して電圧を印加する。この電圧は変圧器のタップを切り替えることにより調整することができる。

(2) 力率調整用コンデンサ

低周波誘導炉そのものが非常に力率が悪いので力率を調整するためにコンデンサを誘導炉に並列に接続する。このコンデンサの一部は炉の力率の変化に応じて、電磁接触器により開閉可能となっており、このコンデンサを適当に入れることにより、無効電力が0か、または力率が100%近くまで運転できるようになっている。

第1表 主要電気設備

部 品 名	定 格	数 量
OCB	7.2kVA 800A	1
Tr	1,000kVA (3,300/800, 700, 600, 500)	1
Ctt	3,300V 400A	4
進相コンデンサ	800V 10kVA	400
リアクタ	3,300V 540kVA	1
コンデンサ	3,300V 50kVA	3

第2表 マグネシヤクリンカの粒度

6~10mm	5mm 以下	60メッシュ以下
20%	50%	30%

(3) 三相平衡装置(平衡リアクトルおよび平衡コンデンサ)

低周波誘導炉は単相負荷であるので、三相電流の平衡装置を他の二相の間に入れて平衡をとる。設備の概要は第1表に示すとおりである。

3. ライニング

低周波誘導炉の生命はライニングの良し悪しによって大きく左右されるので、従来から種々の研究がなされ、多くのライニング材が使用されているが、マグネシヤクリンカおよびケイ砂を用いる方法が最も一般的である。銅合金用としては黒鉛ルツボを用いる方法が効果をあげているが、鋳鉄用としてはルツボ成形に限度があることからスタンプ法が用いられる。ルツボは溶解条件によって非常に影響を受けるので、使用条件によって選択すべきである。スタンプ材は耐火度、高温耐圧強度、耐き裂性などが要求されるとともに溶湯やその酸化物、スラグなどの侵入を防ぎ、衝撃にも抵抗力を示すものであることが望ましい。また溶湯やその中に含まれる成分に不利な影響を与えるようなものは好ましくない。

3.1 塩基性ライニング

塩基性スタンプ材の代表的なものにマグネシヤクリンカがある。ルツボ形低周波誘導炉の場合のスタンプ法は高周波誘導炉のそれとほとんど同じであるので高周波誘導炉のスタンプ法に準じて行なえばよい。われわれの研究では濠州産マグネシヤクリンカをサンドミルで粉碎し、第2表のような粒度に調整したのち、苦汁液5%を添加し、300kg/20分の割合で1,300kgを混練した。スタンピングはまず炉底を約200mmの厚さに突棒で突き固めたのち、金型を用いてルツボ成形を行なった。この際、突き固めによる断層ができないように連続的にマグネシヤクリンカを投入し、1回のスタンプ厚さが30mm以下であるようにすべきである。スタンプ終了後は金型を引き抜き十分乾燥すべきである。これを怠ると溶解中のガス発生などのほかに、水分の浸透によりコイルの層間絶縁不良などの溶解不可能なる事故を引き起こす原因となる。また金型を引き抜く際はライニングにき裂を生じないように慎重に行なわねばならない。マグネシヤライニングは焼結が十分行なわれないので、溶解回数は同一ライニング50~60溶解程度が普通である。しかもマグネシヤクリンカは高価であるので一般鋳鉄用としては、あまり有利でなかった。

3.2 酸性ライニング

一般鋳鉄品の溶解には、価格、耐久度および性質などの点からケイ砂が有利と思われる。すなわち純度の高いケイ砂は耐火度が高いばかりでなく、温度の上昇につれて最初は水分(結晶水を含む)の蒸発などのため収縮現象を起こすが、575℃で低温石英が高温石英へ変態するとともに体積膨張を行ない収縮を補う。石英は870℃以上でトリディマイトへ、1,470℃以上でトリディマイトからクリストバライトへの変態が始まり熱膨張が起こる。一方著しく多孔質の石英には残留膨張が3~20%に達するものがあり、このようなスタ

ンプ材は溶湯で浸漬されやすい。このような理由からライニングにはち密かつ強固な石英ほど有利であるとされている。さらに耐圧強度を保持する場合、石英質の含有量が高く Al₂O₃ ができるだけ少ないことが炉材として重要な要素となってくる。またケイ砂に B₂O₃ を添加するとスタンプ材の溶融点を下げることなしに、低融点ガラスを形成して石英粒の焼結剤として働くので1~2%の添加でルツボ成形が容易になる利点がある。

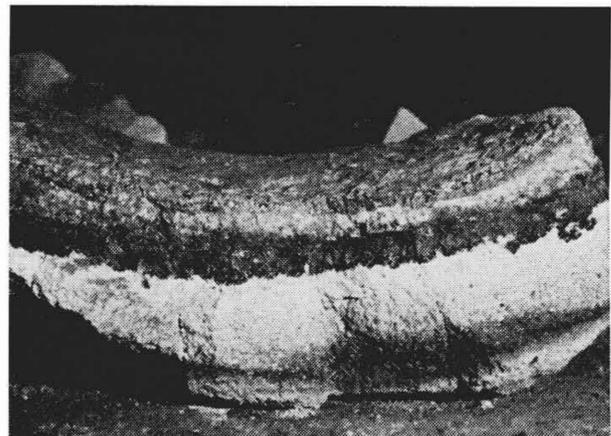
酸性ライニング、とくにケイ砂ライニングにあつては炉頂付近の焼結が十分に進まず、き裂を生じやすいのでこの部分の焼結には十分意を払う必要がある。十分な突き固めと慎重な作業によって長期の溶解作業に耐えることができる。最悪の使用条件である断続冷材溶解においてさえ100溶解以上は可能である。第3図にケイ砂の焼結状況を示す。黒い層がスラグ浸透層、白い層が焼結層である。

4. 低周波誘導炉の用途

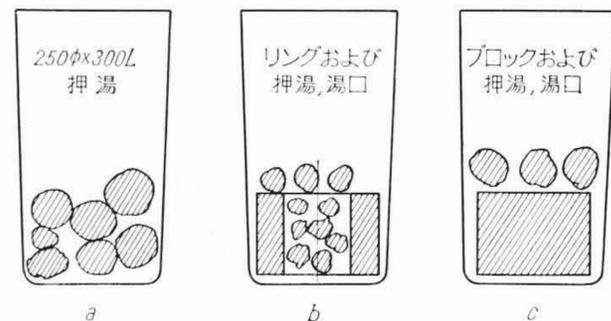
低周波誘導炉の使用法は(1)冷材溶解、(2)キュポラとの二重溶解に大別される。冷材溶解は低級地金の処理に効果があり、二重溶解法は成分管理を厳格に行なう場合および合金鋳鉄などの製造に好適である。両者とも低周波誘導炉の特長を生かした方法であつて、現場の設備に合致した方法を採用すべきである。

4.1 冷材溶解

原理的にいっても高周波誘導炉のように小塊から溶解することが困難であるので種々の方法が組み合わされて行なわれる。冷材溶解の代表的な例をあげると(1)溶湯を30~50% 装入したのち冷材を投入する方法、(2)炉の径とほぼ同一の外径を有するリングを用いる方法、(3)ブロックを用いる方法などである。このうち(1)の方法は所要電力、所要時間などの点から最も有利な方法であるが、溶湯の得られない工場では採用することができない。第4図と第3表に完全冷材溶解の際の材料装入要領と消費電力、所要時間の関係を



第3図 ケイ砂の焼結



第4図 冷材溶解の場合の材料装入法

第3表 冷材溶解結果

材 料 装 入 法	a	b	c
所 要 時 間 (h)	5.2	5.5	2.5
消 費 電 力 (kWh/t)	1,600	1,790	920

示す。これらからみてもわかるように完全冷材溶解の場合はブロックを用いる方法が最も有利である。リングを用いる方法はリングの厚さを十分検討しないと、リングにき裂が生じ溶解不能となることがあるので、鋳鉄の冷材溶解には有利な方法とはいえない。初溶解後は残留溶湯を常に確保するようにすればそれ以後の溶解は容易となりドライ粉などの装入も容易である。

4.2 キュボラとの二重溶解

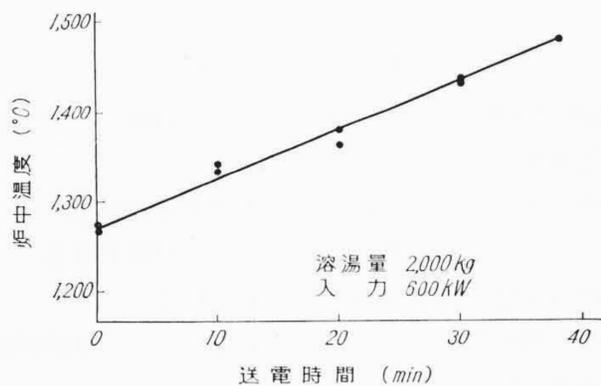
低周波誘導炉は冷材溶解が比較的困難であることから、キュボラ溶湯を一度受けて昇温、成分調整を行ない一種の前炉として使用することが考えられる。この場合キュボラ溶湯は、現在要求されているような成分温度などを考慮する必要がないので、地金配合、ヨークス比、送风量などの管理も緩和されるので作業が容易になり原価低減が可能である。第5図からもわかるように短時間で昇温できるので冷材溶解に比べ湯の供給が容易に行なわれる利点がある。この場合昇温のために消費される電力はわずかである。また通電を中止し、溶湯を空气中にさらした場合の温度降下は第6図のように大きいので輻射による放熱を防ぐ意味からも炉ぶたなどを考慮せねばならない。常に前炉として使用する場合には、専用炉としての機能を備えたものを設置すべきである。

5. 操業結果

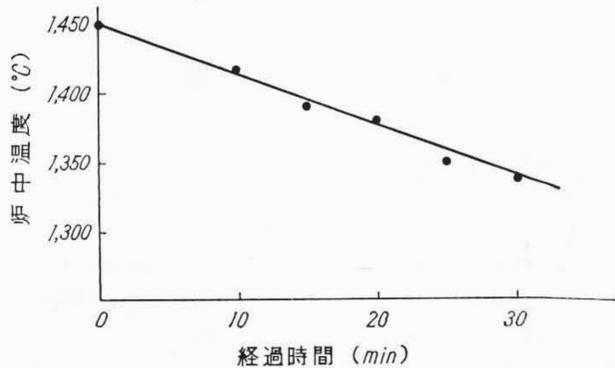
日立製作所日立工場においては日立製作所国分工場製の2t無鉄心ルツボ形低周波誘導炉を用い、酸性ライニングにより操業を行なっているが、昭和36年9月より昭和37年6月までの操業結果について述べる。当工場は全冷材断続溶解法を行なっているが、連続溶解が採用されればさらに実績があがるものと思われる。第4表に操業結果を示す。

5.1 使用材料および配合

使用材料は押湯、湯口を主体とし、このほかヨナゲ銑（砂処理機のマグネットセパレータで抽出されたものでくぎなどを含む）および銑ドライなどの低級地金を使用している。銑ドライの使用量は0~80%まで可能であるが操業には物量の関係から20~30%配合で行なっている。戻材は炉にはいる大きさのものであればどのような形状であってもよく、キュボラのように地金の形状をそろえる必要がないので大幅な労力の節減ができる。



第5図 昇温と送電時間の関係



第6図 通電中止した場合の温度降下

5.2 消費電力量

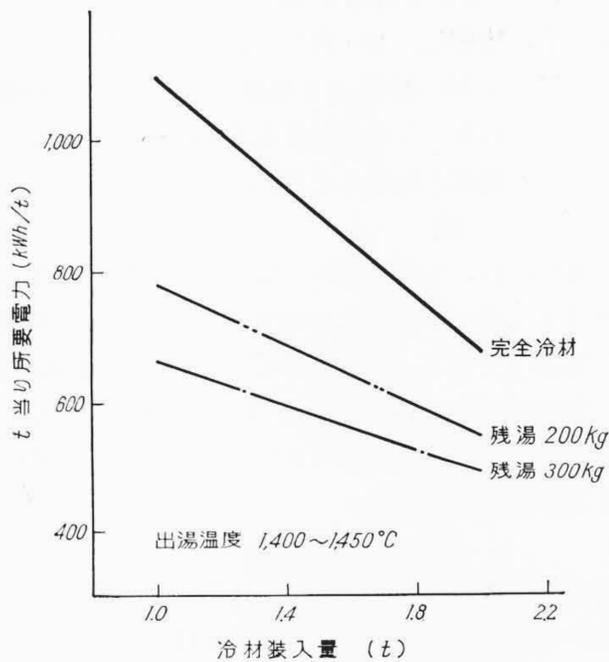
溶解に要する電力量は使用する地金の形状と装入法によって異なる。日立製作所日立工場においては完全冷材および残湯200~300kgで操業しているが、これについて冷材 ton 当たり電力消費量と冷材装入量との関係を示すと第7図のようになる。すなわち完全冷材溶解では装入量の増加とともに所要電力は低下し、2t溶解では700kWh/tである。溶湯を残した上に冷材を装入した場合も同図に示してあるが、この場合の所要電力量は残存させた溶湯量を除いた冷材装入量に対して算出している。明らかに残存する溶湯量の増加とともに所要電力量は低下しており、1,700kg以上の装入では500~550kWh/tとなり、溶湯の残留が有効で低周波誘導炉における冷材溶解は連続操業が原価低減の一要素となる。第8図には銑ドライの配合を変えた場合の電力消費量を示す。これより銑ドライの配合を増しても電力消費量が変わらないことがわかる。

5.3 溶解所要時間

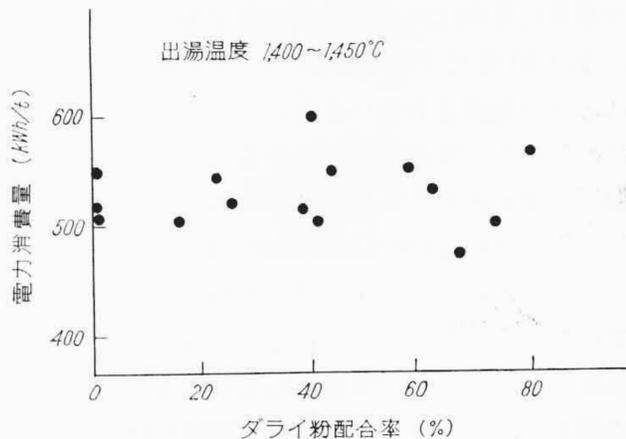
冷材装入量と溶解所要時間の関係を第9図に示す。完全冷材の場合は装入材料の形状、大きさなどの違いから所要時間にいくぶんば

第4表 操業実績

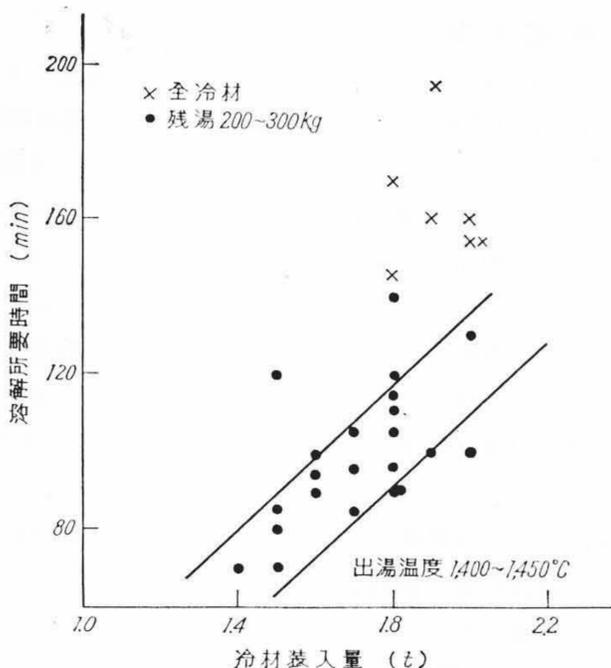
日付	溶解数	溶解量 (t)	消費電力 (kWh)	kg/回	kWh/t
S36 9/18~10/11	85	140.9	87,050	1,660	617
12/ 4~12/20	52	78.0	47,920	1,500	615
12/25~ 1/12	53	86.5	52,850	1,640	610
1/16~ 1/31	70	107.7	65,200	1,540	606
2/ 5~ 2/21	62	102.7	63,210	1,660	615
2/26~ 3/16	65	105.1	62,000	1,620	590
3/20~ 4/10	76	116.9	76,450	1,540	650
4/16~ 4/28	49	71.8	49,350	1,460	685
5/ 2~ 5/30	98	136.5	100,010	1,390	730
Total	610	946.1	604,040	1,550	636



第7図 冷材装入量と所要電力の関係



第8図 ドライ粉配合率と電力消費量の関係



第 9 図 冷材装入量と所要時間の関係

第 5 表 加 炭 結 果

No.	加 炭 剤	加炭温度 (°C)	溶湯量 (kg)	加炭重量 (kg)	炭素分析結果(%)			歩どまり	
					元湯	10分後	20分後	10分後	20分後
1-1	コークス粉	1,250	1,800	10.4	3.24	3.42	3.48	0.31	0.42
2	コークス粉	1,270	2,000	10.0	3.26	3.46	3.48	0.40	0.44
3	コークス粉	1,330	2,000	10.0	3.26	3.47	3.50	0.42	0.48
2-1	りん状黒鉛	1,240	2,000	10.0	3.21	3.40	3.43	0.38	0.44
2	りん状黒鉛	1,270	1,500	8.0	3.30	3.50	3.56	0.38	0.49
3	りん状黒鉛	1,310	2,050	10.0	3.21	3.41	3.45	0.40	0.49
3-1	ピッチコークス	1,210	2,000	10.0	3.31	3.49	3.55	0.36	0.48
2	ピッチコークス	1,290	2,000	10.0	3.40	3.58	3.67	0.36	0.54
3	ピッチコークス	1,340	2,000	10.0	3.30	3.49	3.58	0.38	0.56

ラツキがみられる。十分に大きなブロックであれば平均して 150~170 分程度である。しかし溶湯を 200~300 kg 残存させた場合の所要時間は装入量に比例し、ton 当たり約 60 分である。これに鋼くずを配合した場合は 10~15% ほど増加し、銑ダライの場合は逆に下回る傾向がみられる。この点からみても銑ダライの配合量が原価の低減を左右する要因となることがわかる。

5.4 溶 損

低周波誘導炉においては溶損が少ないことが特長となっている。日立製作所日立工場の炉でもきわめて少なく、スラグの総重量を加味しても 3% 以下である。保温中の C, Si, Mn の溶損は 80 分間で TC 0.1%, Si 0%, Mn 0.02% 程度, Ni 0%, Mo 0% であり溶解中の溶損も少ない。また特殊元素の歩どまりもよく、電弧炉と同等あるいは少し上回る程度である。

5.5 加 炭

冷材溶解を行なう場合でもキュボラとの二重溶解を行なう場合でも、低周波炉の加炭は欠くことのできない作業である。とくに二重溶解の場合は加炭がキーポイントとなるので加炭剤および加炭時期はいずれがよいか調査した。その結果を第 5 表に示す。加炭後 20 分で試料を採取したのは、二重溶解の際 2,000 kg の溶湯を 100°C 昇温するのにはほぼ 20 分で十分であること、また所要量がほぼ吸収されそれ以上はあまり加炭されないと考えられるからである。調査した結果からは温度によって加炭率に若干変化はみられるが、大体 20 分程度で加炭速度がおそくなる傾向がみられた。湯温が 1,250°C 付近では逆に加炭後 20 分ほどで加炭率が上昇するのがみられたが、この場合所要値をうるにはさらに時間がかかることが考えられ、加炭時期としてはなるべく高い温度で行なうのがよく、1,320~1,350°C 付近が出湯温度、铸込温度との関連からもよいように思われる。なお冷材溶解の場合には銑ダライとともに加炭剤を混入する方法が有効である。この場合にはコークス粉で行なっても 55% 以上の歩どま

第 6 表 制 輪 子 分 析 結 果

No.	炉 中 分 析 値		製 品 分 析 値	
	T.C	Si	T.C	Si
1	2.78	1.50	3.10	1.40
2	2.68	1.59	3.15	1.34
3	3.60	1.40	3.13	1.31
4	3.03	1.20	3.09	1.40
5	3.13	1.40	3.10	1.35
6	3.08	1.40	3.09	1.35
7	3.08	1.40	3.15	1.30
8	2.91	1.35	3.09	1.31
\bar{x}	3.04	1.41	3.11	1.35
σ	0.262	0.105	0.025	0.0341

目標成分 T.C 3.0 ~ 3.2 (3.1%)
Si 1.10 ~ 1.70 (1.4%)

第 7 表 溶 解 原 価 構 成

(単価は 36.10.1 日刊工業新聞による)

品 名	単 価 (¥/kg)	全 装 入 量 (t)	装 入 t 当 たり 配 合 (kg/t)	装 入 t 当 たり 金 額 (¥/t)
故 鉄	22.5	91.3	716.4	16,119
銑 ダ ラ イ	16.5	33.9	266.0	4,389
Fe-Si	86.0	0.37	2.9	258
Fe-Mn	72.5	0.08	0.6	44
ヨ ナ ゲ 銑	22.5	1.8	14.1	317
地 金 費 小 計		127.4	1,000.0	21,127
電 力	5.2 ¥/kWh	77.750 kWh	610 kWh/t	3,172
炉 材 費 (ケイ砂)	29,000 ¥/回			230
合 計				24,529

りである。これはコークス粉やりん状黒鉛の飛散による損失が防がれることによるものと考えられる。このように加炭が容易にでき、しかも合金元素の歩どまりが良好なことから、溶湯の成分調整は容易に行なうことができる。第 6 表には制輪子の炉中分析と成分調整を行なった本体の分析値が示してある。

6. 原 価 の 検 討

操業実績のうち一例として 1961, 9/18~10/7 間の 77 溶解(同一ライニング) から算出した結果を第 7 表に示す。この単価を溶湯 ton 当りに換算すると、溶損を 3% とみても単価は 24,600 ¥/t ほどで一般のキュボラ溶湯より大幅な原価低減となる。連続溶解によりさらに溶解量が増せば、高価な設備費の償却も容易である。

7. 結 言

2 t 無鉄心ルツボ形低周波誘導炉によって鑄鉄の溶解を行なった結果次のことが明らかとなった。

- (1) 炉のライニングは良質のケイ砂で十分である。
- (2) キュボラ溶解に比較して低級地金が利用できる。
- (3) 溶損が少なく、成分調整が容易である。
- (4) 温度上昇が早く加炭が容易であるため、二重溶解炉として利用して効果がある。

終わりに、種々ご指導ご協力いただいた関係者各位に厚くお礼申しあげる次第である。

参 考 文 献

- (1) 正林：現代鑄造, 4, 142 (1959)
- (2) B. Marinček: Giesserei., 43, 2 (1956)
K. H. Brokmeier: Giesserei., 43, 57 (1956)
O. Junker: Giesserei., 43, 236 (1956)
- (3) W. Zschintzsch: Giesserei., 39, 381 (1952)
K. H. Brokmeier: Aluminium., 28, 391 (1952)
- (4) 百田, 北村: 電学誌, 75, 300 (1955)
- (5) H. Rohn: Giesserei., 43, 40 (1956)
R. Rasch, D. Harkort: Giesserei., 48, 770 (1961)