

## 技 術 資 料

### エレクトロスラグ溶解法の現状\*

草 道 英 武\*\*・福 原 義 浩\*\*\*

#### Review on Electroslag Remelting

Hidetake KUSAMICHI and Yoshihiro FUKUHARA

#### 1. は じ め に

エレクトロスラグ溶解法は 1954 年頃、ソ連ウクライナ共和国キエフ市のパトン研究所において発明された特殊鋼溶製新技術で、わが国には神戸製鋼所顧問川村宏矣博士を通じ、1963年に初めて紹介された。筆者は再度訪ソの川村博士に同行して、パトン研究所を訪問し、(B. E. PATON 所長には共産党大会開催中のため面接できなかったが)発明者の 1 人である Pr. Dr. B. I. MEDOVAR に直接面接し、種々懇談の機会を得、この新技術に関する認識を深めることができた。その後、訪ソ特殊鋼調査団(団長 大同製鋼株式会社副社長林達夫氏)の調査報告中国訪日鉄鋼調査団の講演会などにおいて、エレクトロスラグ溶解技術は漸次明らかになりつつあるが、まだ大部分はベールに包まれた状態にあることに変わりはない。ソ連における年間生産量は数万 t とも 10 数万 t とも表明されている。

わが国では日本特殊鋼、日立金属工業、神戸製鋼所などの特殊鋼メーカーがソ連の情報を基礎にしながらも、それぞれ独自の立場からエレクトロスラグ溶解法を研究中で、学会発表も活発に行なわれている。しかし、衆知の通りわが国ではすでにコンセル溶製材が高級特殊鋼市場に一定の地位を確保しているため、工業化は容易でない。

米国ではホプキンス法と称するエレクトロスラグ溶解法と似た方法が 1937 年頃からあつたが、めざましい発展をせず、戦後はコンセル溶製材が高級鋼や合金市場の主流を占めたため、いつそう衰微したようである。現在米国ではエレクトロスラグ溶解法がぜんぜん注目されていないわけではないが、実績が少ないようでコンセル溶解のように規格化された例をまだみない。英国では 2, 3 の研究報告がみられる程度である。またフランスではソ連より技術導入して企業化を進めているといわれる。

このようにエレクトロスラグ溶解法はコンセル溶製技術のあまり進歩していないソ連においてのみ発展しているため、米国などではこの技術が高く評価しない向きもあるように聞かすが、筆者らは各種の溶製技術を公平な立場から比較研究し、評価したいと考え、1965年に中間工業化試験炉を建設し、目下運転中である。これらのデータを基礎にして、今回鉄鋼協会特殊鋼部会の求めに応じて、とりまとめたのが本資料である。調査不十分のところも多々あるが、本文が関係各位、業界発展のための一

助ともなれば幸いである。

#### 2. 歴 史

エレクトロスラグ溶解法と原理的にはことなるけれども、よく似た方法であるホプキンス法は 1930 年代末に米国で考案され、1940 年代から実用化されて、第 2 次大戦中は主として高速度鋼の溶解に使用された。しかし、この方法には 2, 3 の欠点があつたために、戦後はあまり発展をみながつた。米国では航空機産業などに必要な高級金属材料は主としてコンセルアーク溶解法でまかなわれてきた。

ソ連では戦後、宇宙開発をはじめとする新分野の産業活動が活発になつてきたが、そこでは高級金属材料の新らしい溶製方法の開発を必要とした。1954年、ウクライナのキエフにある E. O. PATON 記念電気溶接研究所 Dr. B. E. PATON 所長, Pr. Dr. B. I. MEDOVAR らはそれまで開発してきたエレクトロスラグ溶接法を溶解法にまで発展させ、やがて、清浄で欠陥のない鋼塊の溶製に成功し、これをエレクトロスラグ溶解法と名付けた。これが本技術のはじまりである。1957年にはこの方法に関する研究結果がソ連において発表され、1958年 5 月にはザポロジスク「ドネプロスベチスタリ」電気冶金工場でソ連ではじめての単相試験炉が稼働をはじめた。同年 10 月には 3 相溶解炉が操業をはじめたといわれる。1910年 1 月には単重 1.1 t の鋼塊が溶製できる炉が実用化された。その後、単重 13 t の鋼塊が得られる 3 相炉が完成し、現在は 40 t 級の炉の製作がいそがれていると伝えられる。

#### 3. 原理と特徴

##### 3-1 鑄塊性

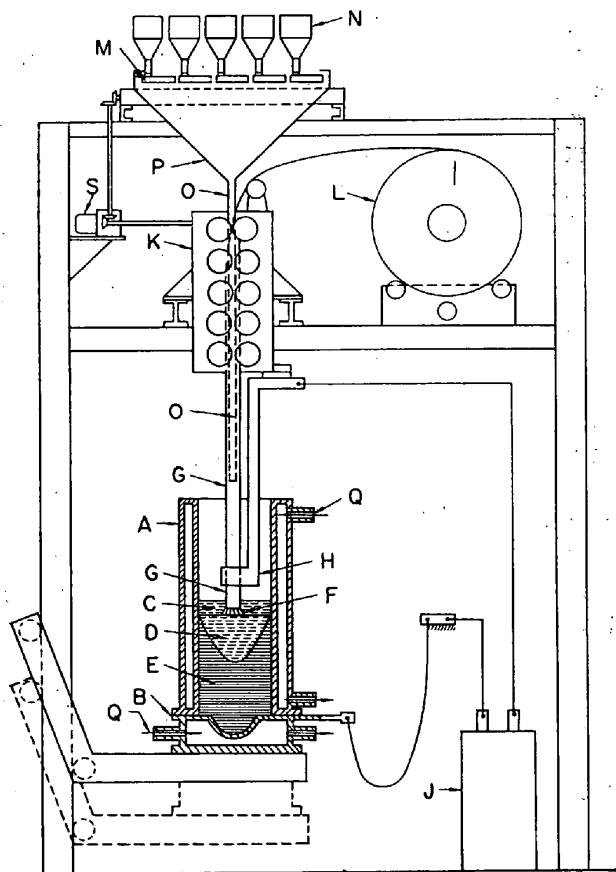
エレクトロスラグ溶解法の原理は図 2 に示すように、溶融スラグの電気抵抗熱によつて消耗電極を溶解し、水冷鑄型の中で連続的に凝固させていく方法である。消耗電極を水冷鑄型を用いて溶解と同時に凝固させていくという方式はコンセルアーク溶解とまったく同じである。

\* 昭和 41 年 3 月 10 日日本鉄鋼協会共同研究会  
特殊鋼部会にて発表

昭和 41 年 6 月 17 日受付

\*\* (株)神戸製鋼所中央研究所 理博

\*\*\* (株)神戸製鋼所中央研究所



- |                                   |                            |
|-----------------------------------|----------------------------|
| A. Water-cooled mold.             | J. Power supply.           |
| B. Water-cooled stool.            | K. Tube-forming machine.   |
| C. Molten flux.                   | L. Coil of strip.          |
| D. Molten metal.                  | M. Alloy-metering devices. |
| E. Solid metal ingot.             | N. Alloy hoppers.          |
| F. Current discharge.             | O. Alloy conduit           |
| G. Tubular electrode, consumable. | P. Collecting hopper.      |
| H. Contact shoe.                  | Q. Water inlet.            |
|                                   | S. Motor drive.            |

図1 ホブキンス法の原理図<sup>1)</sup>

コンセルアーク溶解は真空によつて熔融金属を大気の汚染から保護すると同時に、熔融金属中のガスを除去することができる。また、一定深さのプールを保ちながら溶解と凝固が連続的に行なわれるために、偏析や体積的欠陥がなく、健全鑄塊が得られる。また、ある大きさ以上の非金属介在物はストークスの式に従つて浮揚除去される。かくして清浄にしてかつ健全な鑄塊が得られるのがその特徴である。

エレクトロスラグ溶解では真空のかわりに熔融スラグによつて熔融金属を大気の汚染から保護すると同時に、酸化物、硫化物および窒化物をスラグに吸収除去させる。また溶湯プールの深さは写真1のようにかなり浅いが、非金属介在物の浮揚除去はコンセルアーク溶解と同一原理によつて期待できる。そのうえ、溶湯プールが浅いと凝固組織はより微細化するので好ましい。したがつて、エレクトロスラグ溶解法はコンセルアーク溶解と同様に、清浄にしてかつ健全な鑄塊が溶製できるのがその特徴である。

上述のとおり、コンセルアーク溶解にくらべてエレクトロスラグ溶解では溶湯深さが浅いのがその特徴の1つ

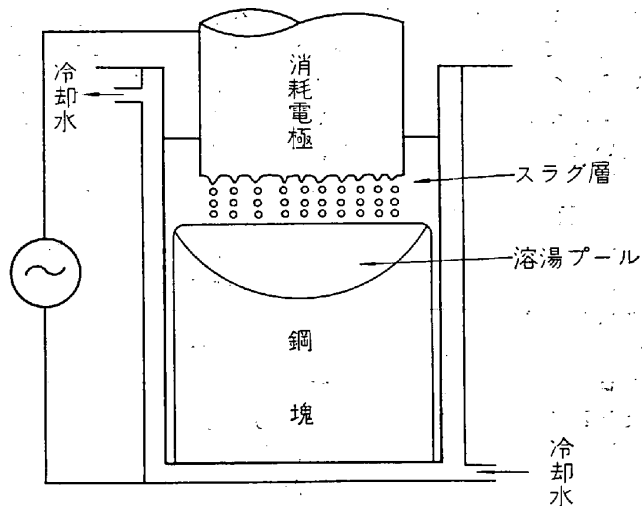


図2 エレクトロスラグ溶解の原理



写真1 100 kg 鋼塊縦断面のオートラジオグラフ (プールの形を示す) ×1/3

となつては、以下その現象について検討してみよう。コンセルアーク溶解では消耗電極と溶湯面の間隔が一般に 20~30 mm であつて、その間に高温のアークが発生するために熱効率がよい。しかし、これがプールを深くするという欠点にもつながっている。これに対してエレクトロスラグ溶解では消耗電極と溶湯面の間隔が少なくとも 50 mm はあり、そのうえ熔融スラグが広い面積で溶湯、水冷鑄型および大気に接しているため放熱しやすく、そのために溶湯に与えられる熱量はコンセルアーク溶解の場合よりも少ないと考えられる。鑄塊の冷却の面から見るとコンセルアーク溶解では輻射が主体である

が、エレクトロスラグ溶解では空気の熱伝導による冷却も可能である。しかし、後者ではスラグ衣による断熱という逆の効果も考えに入れなければならないので、冷却効果については云々できない。とにかく、溶湯プールが浅いことは事実であるから、エレクトロスラグ溶解法は高速度鋼などの溶解に適しているといわれる<sup>21)</sup>。

### 3.2 鑄肌と歩留

つぎに、エレクトロスラグ溶解には衣造塊の効果がある。衣造塊自体はかなり以前から知られているが、衣用のスラグをあらかじめ溶解しておかなければならないというような不便さがあつて、普及が遅れている。エレクトロスラグ溶解ではきわめて理想的な条件で衣造塊が行なわれるので、鋼塊の鑄肌がきわめて平滑であるのをその特徴としている。溶解条件は容易に標準化できるので鑄肌の平滑性のバラツキが少なく、平滑な鑄肌が安定して得られる。鑄肌が平滑であつて、前述の通り鑄塊性がよいので、鍛造や圧延の前に皮削りしなくてもよい。したがつて、歩留りが高い。現在、大気中で溶製されている高級特殊鋼では、鋼塊の皮削りを必要とするものが多いが、皮削りに要する費用をエレクトロスラグ溶解費にあてれば、歩留りの向上ともあいまつて再溶解費はカバーされることになる。

コンセルアーク溶解ではホットトップ操作によつて、鋼塊頭部の引け巣を小さくして、歩留りをあげることができるが、引け巣を完全になくすために溶解電流を極端に低くすることはアーク現象の点から難しい。ところがエレクトロスラグ溶解は抵抗熱による溶解であるから、溶解電力を0まで連続的にさげることができるので、引け巣を完全になくすことは容易である。

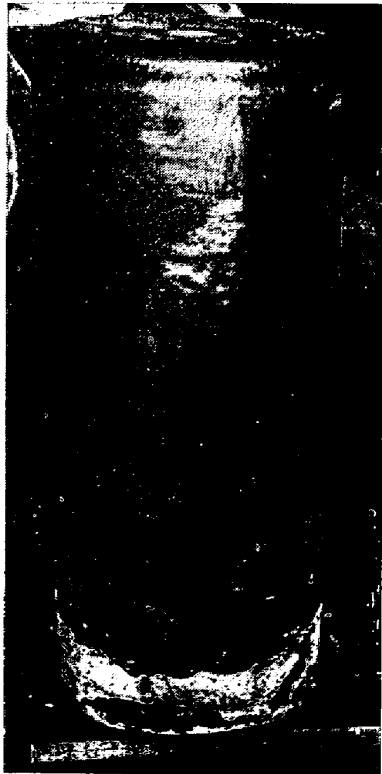


写真2 100 kg 鋼塊の外観  
鋼種 SUJ-2 ×1/6.7

### 3.3 生産性と生産原価

エレクトロスラグ溶解法は装置が簡単で、安価であることも長所の1つである。装置についてはあとで詳しく述べるが、コンセルアーク溶解炉とちがつて高価な整流器と真空ポンプを必要とせず、炉の構造も気密にする必要がないために簡単である。したがつて設備費が安く、このことは減価償却の点からみて溶解原価が安くなるので、広範囲の鋼種に対して経済的に適用できることを意味している。真空装置を必要としないことから、少なくとも真空引きの時間だけは待ち時間を短縮できるために生産性が高く、溶解原価が低減できる。

コンセルアーク溶解は押湯が不要であるために、歩留りが高いとされているが、消耗電極を作製する際には、押湯を除去した健全な材料を使用しなければ、結果がおもわしくない。この点生産性の低下が問題となる。エレクトロスラグ溶解では押湯の部分でも廃却材でも消耗電極になるとされている<sup>22)</sup>。この点の確認はいまだ筆者らは行なっていないが、対象鋼種がさほど高級でなければ、そのようなこともある程度可能であろう。

### 3.4 スラグの精錬作用

さて、エレクトロスラグ溶解に使用するフラックスとしては  $\text{CaF}_2$  を基本にしたものが多いようである。表1にソ連においてエレクトロスラグ溶接用に使用されているフラックスの一覧表<sup>23)</sup>を掲げる。ソ連ではエレクトロ



写真3 100 kg 鋼塊のマクロ組織  
鋼種 SUJ-2 ×1/4.8

表1 ソ連におけるエレクトロスラグ溶接用フラックス規格<sup>3)</sup>

種類	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O K <sub>2</sub> O	FeO	CaF <sub>2</sub>	S	P	TiO <sub>2</sub>
AN 8	33~36	11~15	21~26	4~7	5~7	—	≤1.5	13~19	≤0.15	≤0.15	30~40
AN 8M	35~38	≤5.5	28~32	4~8	≤1.0	3.0~4.0	≤1.5	12~16	≤0.15	≤0.15	
AN 22	18~21.5	19~23	7~9	12~15	11.5~15	1.3~1.7	≤1.0	20~24	≤0.05	≤0.05	
FTS 7	46~48	≤3	24~26	≤3	16~18	0.6~0.8	≤1.5	5~6	≤0.15	≤0.10	
AN 25	6~9	—	—	12~15	2~4	—	—	33~40	≤0.10	—	
ANF 1	≤5	—	—	—	—	—	—	≥92	≤0.10	—	
ANF 7	—	—	—	20	—	—	—	80	—	—	
ANF 6	—	35	—	—	—	—	—	60	—	—	
48-OF-6	≤4	20~27	0.3	16~23	3.0	—	≤1.5	45~60	≤0.05	—	

スラグ溶解にも、溶接と同じフラックスを使用しているといわれる<sup>2)</sup>。この中でとくに ANF 6 が広く用いられているようである。この外に用途によつて ANF 1, 48-OF-6, ANF 7, AN25 などが使用される。ANF 1 は純 CaF<sub>2</sub> であつて、Ti や Al のように活性な元素を含有する合金鋼の溶解に使用される。それは金属酸化物を含有したフラックスでは Ti や Al が酸化損失するからである。ただし、ANF 1 を使用しても雰囲気を Ar などで不活性にしておかないと、空気中の O<sub>2</sub> の拡散によつて Al や Ti の酸化損失が大きい<sup>2)4)</sup>。ANF 7 は CaO を多量に含有しているために塩基度が高く、脱硫力がきわめて強いが、吸湿性が強く、電気伝導度が良すぎる

(適正電圧をうるために多量のスラグを要す) という欠点がある。そこで電気伝導度が比較的低くて、作業性のよい ANF 6 に ANF 7 の長所をもたせたものに 48-OF-6 がある。ソ連から発表されている文献にはむしろ ANF 6 の方が多く、48-OF-6 を使用した例は少ないが、英国およびわが国では 48-OF-6 のように CaF<sub>2</sub>-CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 系に注目している<sup>5)12)13)</sup>。

筆者らの実験においても 48-OF-6 の方がいろいろな点で ANF 6 よりもすぐれているように思われる。AN25 は TiO<sub>2</sub> を多量に含有した酸性フラックスであるが、用途としては低温でも電気伝導度が良いということで、溶解開始時に点火用として使用したといわれる<sup>2)</sup>。しかし、ソ連ではその後あとに述べる方法で点火する方法に変えており、AN25 は使用されて

いないようである。

米国の状況は明らかでないが、ホプキンス法でも CaF<sub>2</sub> に SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO などを添加したものを使用しているといわれる。<sup>6)</sup>

エレクトロスラグ溶解では脱硫が可能である。筆者らの実験では 0.006% S の消耗電極材から 0.003% S の鋼塊を得ることは、さほど難かしいことではないことがわかっている。ソ連では脱硫という点を強調して、S 含有量の高い消耗電極材からでも S 含有量の低い鋼塊が容易に得られるとしているが、原料事情のよいわが国では、はたしてこのようなことが大きな利点になるかどうか疑がわしい。もし、脱硫と同時に脱磷ができるならば、原料の選択の上で利点があるかもしれないが、脱磷は化学的にも脱硫と同時にこなせることが難しい。

エレクトロスラグ溶解では脱酸が行なわれることが大きな特徴となつており、筆者らの実験においても認められている。SUJ2 の場合、0.0040~0.0050% O の消耗電極から 0.0015~0.0020% O の鋼塊を得ることも可能である。したがつて、O 含有量が寿命におよぼす大きな因子となつている軸受鋼には、エレクトロスラグ溶解法は適している。

コンセルアーク溶解法では通常いかなる種類の金属を溶解しても、多かれ少なかれ脱酸効果が認められる。エレクトロスラグ溶解では材料の種類によつては脱酸が認められないばかりか、かえつて O が増加することもありうる<sup>7)</sup>。とくに Al や Ti を含有する耐熱鋼または合金の場合、これが問題となる。このような材料では O の問題だけでなく、Al や Ti の酸化損失も大きな問題といえる。これをいくらかでも防止するために、すでに述べたようにスラグとして酸化物を含まない弗化物系のもを使用し、雰囲気は Ar などの不活性ガス雰囲気にするが行なわれているが、これはあくまで苦肉の策といふべきものである。このような材料に対してはコンセルアーク溶解法ははるかにすぐれている。米国ではもつとも高い信頼性が要求されるロケット用およびジェットエンジン用材料としては、一般にコンセルアーク溶解法を使用することが規格化されていて、ホプキンス法では ASTM の D 型介在物が多くて規格はずれになることが多いといわれている<sup>8)</sup>。

### 3.5 大型鋳塊

エレクトロスラグ溶解では砂疵の原因となるような巨視的非金属介在物がスラグによる洗浄効果と溶湯プールからの浮揚によつて除去されるということと、凝固組織



写真4 オーステナイト系ステンレス鋼のマクロ組織<sup>9)</sup>



写真5 ソ連における角型鋼塊の

が健全であるという長所を生かせば、大型鍛鋼品（ロータージャフトその他）に適用できる。ただし、単相交流による溶解は電氣的に直径 500 mm  $\phi$  (2 t 相当) どりであり、大型鋼塊の溶製は3相交流方式の炉で行なう必要がある。ソ連ではすでに3相交流炉の開発が行なわれており、現在単重 13 t のインゴットが発表されている(写真6)<sup>9)</sup>。英国においても3相交流炉の開発が行なわれており、その実験に成功しているようである(写真9)<sup>10)</sup>。したがって、将来さらに大型の鋼塊が溶製できるようになることは明らかである。蒸気タービンロータ材も現在の低合金鋼から高クロム鋼系の耐熱鋼にかわつ



写真6 ソ連における 13 t 鋼塊の

ていくものとされているが、このような高合金鋼にはコンセルアーク溶解法が冶金学的にも最適であることはいうまでもない。しかしながら、蒸気タービンロータ材のように 50 t 以上もの大型鋼塊を必要とする品種に対して、コンセルアーク溶解法を適用することは設備的にもわが国ではかなり困難である。このような鋼種に対してはエレクトロスラグ溶解法の長所がかなり生かされるものと思われる。

ところで、大型鋼塊で問題になるのは巨視的介在物や凝固にともなう欠陥だけでなく、Hによる欠陥も問題である。エレクトロスラグ溶解した鑄塊ではHの偏析がわずかで、白点その他の欠陥が減少することは期待できるが、積極的に溶湯中のHが除去されるとは考え難く、実際の結果については現状では云々し難い。ソ連ではエレクトロスラグ溶解によつてHは減少するが、その程度はコンセルアーク溶解におよばないことを認めている<sup>9)</sup>。その対策として真空鑄造した電極材の使用を提案している<sup>9)</sup>。

以上でエレクトロスラグ溶解法の特徴の概要を述べたが、それをコンセルアーク溶解法と比較表示すれば表2のとおりとなる。

#### 4. 装置および操作方法

##### 4.1 水冷鑄型

代表的な装置の概略図を図3に示す。機能的には水冷鑄型、消耗電極昇降機構、電極昇降制御装置、電源、その他に分けられる。水冷鑄型はコンセルアーク溶解に使用しているものと同じものでよい。コンセルアーク溶解では高温のアークにふれるおそれがあるため、ほとんどの場合熱伝導のよい高純度銅を使用している。エレクトロスラグ溶解では温度が低いので、鉄製的水冷鑄型でもよいとして、ソ連では実用化されている<sup>9)</sup>。構造はウォータージャケット方式が普通であるが、ソ連ではウォータージャケットをはずして、鑄型内筒の上部から冷却水を滝状に流して冷却する方式も考えている<sup>9)</sup>。鑄型内筒には鋼塊を取り出しやすいようにわずかの抜き勾配が付け

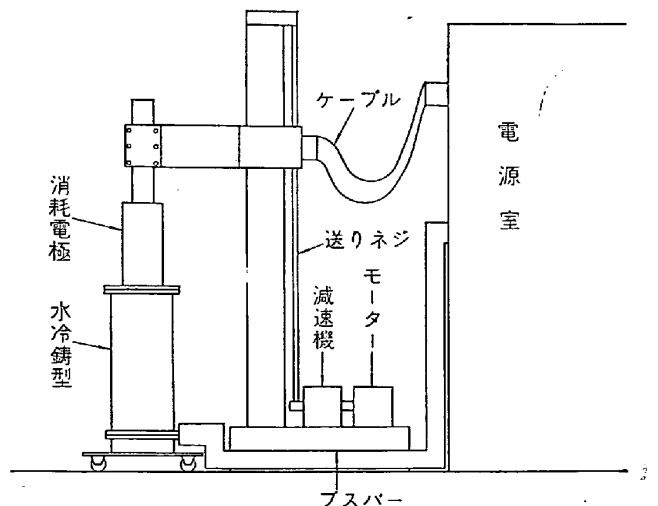


図3 エレクトロスラグ溶解炉の概略図

表2 エレクトロスラグ溶解法とコンセルアーク溶解法の特徴比較表

	エレクトロスラグ溶解法	コンセルアーク溶解法
精錬作用	(1) スラグによつて大気からの汚染を防ぐ。(スラグ精錬)	真空によつて大気からの汚染を防ぐ。(真空精錬)
	(2) 水素の除去は難しい。	水素は十分に除去される。
	(3) 窒素の除去は難しい。	窒素は 20~30% 除去される。
	(4) 酸素の除去は可能である。	酸素の除去は顕著である。
	(5) Ti, Al など活性元素の歩留りがよくない。	Ti, Al など活性元素の歩留りは極めて良い。
	(6) 脱硫は可能である。	脱硫は不可能である。
	(7) 脱磷は可能であるが副反応がともなう。	脱磷は不可能である。
鑄塊性	(1) Progressive solidification のため偏析がない。	Progressive solidification のため偏析がない。
	(2) コンセルアーク溶解の場合よりも溶湯プールが浅い。また、収縮孔がないので健全鑄塊が得られる。	溶湯プールが浅い。また、収縮孔がないので健全鑄塊が得られる。
	(3) 非金属介在物の浮揚除去は可能である。	非金属介在物の浮揚除去が可能である。
鑄肌と歩留	(1) 押湯が不要であるから歩留りが高い。頭部の切捨て不要。	押湯が不要であるから歩留りが高い。頭部の切捨て少量。
	(2) 鑄肌がきわめて良好であるから皮削りが不要である。	鑄肌がよくないので一般には皮削りが必要である。
生産性と生産原価	(1) 交流溶解であるから高価な整流装置が不要である。	直流溶解であるから整流器が必要である。
	(2) 真空ポンプが不要で炉体の構造も簡単である。	真空ポンプが必要で、炉体の構造が複雑である。
	(3) 待ち時間がほとんどないので生産性が高い。	真空引きなどのための待ち時間が必要である。
大型鑄塊	(1) 大型鑄塊の溶製が容易である。丸以外の比較的複雑な形状の鑄塊の溶製も容易である。	大型鑄塊の溶製が可能である。丸以外の比較的複雑な形状の鑄塊の溶製は可能である。

られている。

#### 4.2 炉底

鑄型の底板(炉底)も構造はコンセルアーク溶解炉に使用するものと基本的には同じで、水冷方式になっている。筆者らの経験ではコンセルアーク溶解に使用しているものより冷却効果をよくしておかないと、しばしば過熱による焼損をおこすことがある。コンセルアーク溶解ではアークが拡散して1点に集中することがなく、電流をはじめのうちは低めにしているために炉底の焼損はおこらない。ところが、エレクトロスラグ溶解では熔融スラグの抵抗熱による溶解とはいえ、溶解初期にはアークによつて固体フラックスを熔融する必要がある。このアークは空気中で飛ぶために拡散しない傾向がある。また固体フラックスを急速に熔融するために、コンセルアーク溶解の場合とは逆に溶解初期に溶解電力を高くして、そのあと徐々に下げていく方式がとられるので、炉底がいたみやすいのである。

炉底の上にはコンセルアーク溶解の場合と同じく、共金または普通鋼製の円板をおくが、溶解の初期にしばしばこの円板が消耗電極に溶着してもちあげられ、そのために円板と炉底の間でアークが飛ぶという現象が起こる。これを防止するためにソ連では炉底の中心に植込ボルトを立ててナットで円板を固定する方式を考案した<sup>2)</sup>。しかし、その後溶解開始の方式が改善されるにおよんでこの方式は使用されなくなつて、もとの平らな炉底を使用するようになった。筆者らも溶解開始時のアークによる炉底の焼損を経験したが、溶解開始の方法を改善することによつて、炉底をいためることがなくなつた。

#### 4.3 昇降機構

消耗電極の昇降機構としてはコンセルアーク溶解炉の場合と同様に鎖式、ネジ式および油圧式が考えられる。鎖式は精度は必ずしもよくないが、安価である。ネジ式は精度がよいが、やや高価である。油圧式はいろいろな点でもつとすぐれているが、価格はもつとも高いもの

になりそうである。コンセルアーク溶解では消耗電極先端と溶湯面の間隔が短かく(約 20~30 mm)、アーク現象の変化が急速であるため、電極昇降の制御もかなり急速かつ精密に行なう必要がある。しかし、エレクトロスラグ溶解では消耗電極先端と溶湯面の間隔が長く(約 50 mm)、急速な変化も起こらないので、比較的粗な制御でもかまわない。

#### 4.4 自動制御

コンセルアーク溶解では消耗電極と溶湯面の間隔を制御するのに、一般に極間電圧を標準電圧と比較して、その差電圧に比例して電極を昇降させる方式が多い。エレクトロスラグ溶解でも同様な制御方式が利用できるはずである。しかし、ソ連では電圧による制御でなく、つぎに述べるような電流による制御の方式を採用しているようである<sup>2)</sup>。変圧器では電流と電圧の関係は一定であり、定性的にはタップを一定にして、負荷によつて電圧を増すと電流が減少するという性質がある。したがつて、極間距離すなわち極間電圧を一定にしたければ、電流が一定になるようにし、ある設定電流よりも溶解電流が低いときは消耗電極を降下させ、それが設定値に達したら降下を止めるようにすればよいわけである。ただし、電圧による制御方式にするか電流による制御方式にするかは、つぎに述べる電源の方式によつてきまってくる。

#### 4.5 電 源

エレクトロスラグ溶解では交流によつて溶解する。ホプキンス法の場合にははじめは交流を使用していたが、消耗電極と水冷鑄型の間でしばしばアークが飛んで、鑄型をいためるために直流にかえたといわれる<sup>3)</sup>。交流溶解の場合、電源は基本的には変圧器だけでよい。実際の操業においては鋼塊の大きさや鋼種によつて電力を変えたり、一つの鋼塊においても溶解の終期には溶解電力を下げて、いわゆるホットトップ操作を行なうために、電圧または電流調整器が必要である。このほかに溶解中、とくに溶解初期における短絡による過電流を防止するためにリアクターも必要である。

電圧調整方式としては変圧器にタップ変換器を付ける方式と誘導電圧調整器を使用する方式がある。誘導電圧調整器は連続的に電圧を調整できる利点があるが、かさばると高価である点が欠点である。タップ方式はもつとも簡単であるが、ホットトップ操作その他の時タップを変換するたびに電流を遮断しては困るので、必ずオンロードタップ変換方式でなければならない。これらの方式ではともに過電流防止のためのリアクターが必要である。

電流調整方式としては可飽和リアクター方式がもつとも普通である。この方式では電圧をほぼ一定にして、電流だけを連続的に変えられるという長所のほかに、過電流防止の作用が強いため別にリアクターがいらない。また、垂下特性をもたせると溶解開始時の作業性がよい。欠点はかさばることと高価であることである。エレクトロスラグ溶解炉は安価であるのを特徴とするために電源としてはオンロードタップ変換式変圧器を用いるのがよいと思われる。ソ連においてははいかなる方式を用いているかつまびらかでないが、つぎに述べる理由からみてもオンロードタップ変換方式と思われる。

さて、電極の昇降制御方式は電源の方式によつてきまるといつたが、そのことについて少しふれたい。電源を電圧調整方式と電流調整方式とに分けると、それぞれ出力特性は図 4 および図 5 のような曲線群で表わされる。電圧調整方式ではタップ変換式変圧器のタップの変換または誘導電圧調整器の鉄心角の変化によつて無負荷電圧が変わり、電流調整方式では可飽和リアクターの直流制御電流によつて無負荷電圧は不変で、短絡電流が変わる。

われわれが制御したいのは極間距離であるが、極間距離を一定にすれば抵抗  $R$  は一定になり、この時の電圧と電流はほぼオームの法則にしたがつて直線で表わされる。極間距離を変えると  $R$  が変わり、それは第 4 図および第 5 図の直線群で示される。したがつて、出力特性を一定にして極間距離を変えると、電圧調整方式では電圧はあまり変わらず電流が大きく変わり、電流調整方式では電流があまり変わらずに電圧が大きく変る。コンセルアーク溶解炉がほとんど例外なく電極昇降制御に電圧制御方式を採用しているのは、コンセルアーク溶解炉の電源がほとんどの場合、可飽和リアクターによる電流調整方式であるためである。逆に電圧調整方式による電源

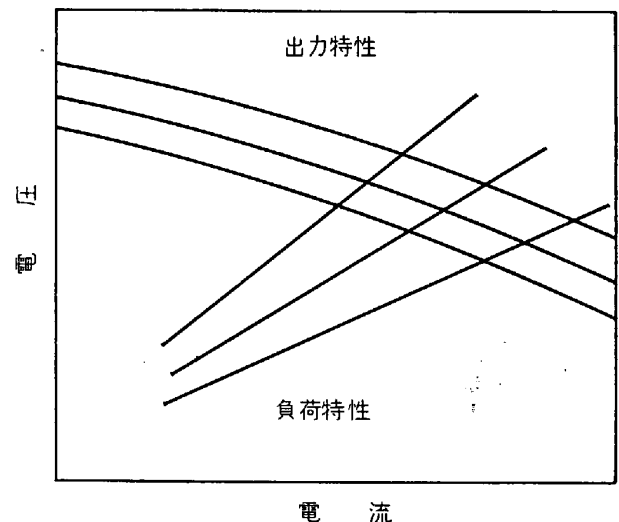


図 4 電圧調整式電源の電气的特性

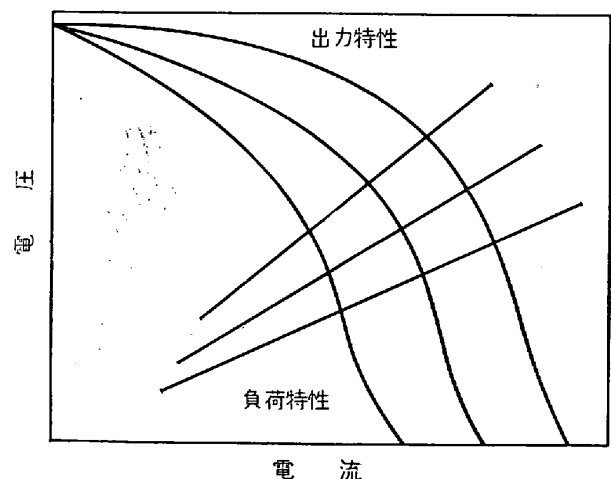


図 5 電流調整式電源の電气的特性



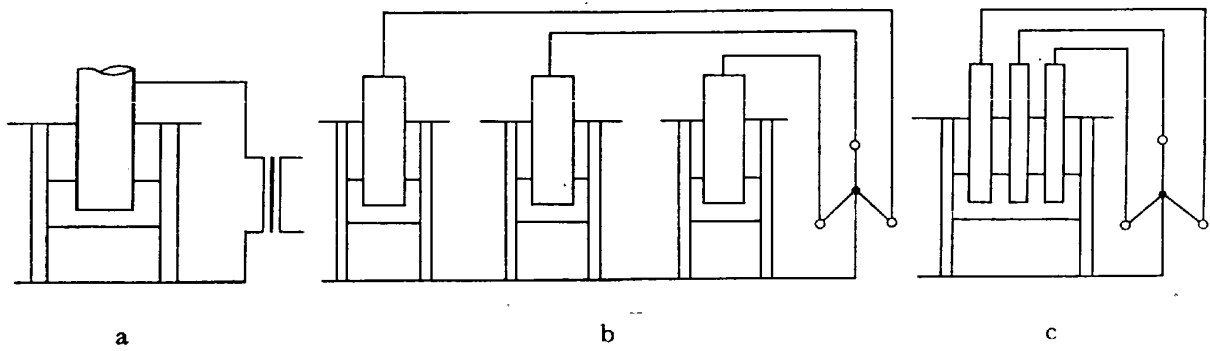


図6 各種の電気結線方式

を使用するエレクトロスラグ溶解炉ではコンセルアーク溶解炉に採用されている差電圧方式の制御装置は使えない。先にソ連では電極昇降の制御に電流方式を採用していることを述べたが、これによつて電源は電圧調整方式を採用していることがわかる。事実、電源としては電弧炉用の電源でよいということが報告されている<sup>2)</sup>。電弧炉の電源はタップ変換式変圧器である。

交流には単相交流と3相交流とがあるが、エレクトロスラグ溶解には原理的にいずれを使用してもよい。簡単なのは図6 aのような単相交流方式であるが、単相で大電力を使用することは電氣的アンバランスのため好ましくない。したがつて、この方式は普通 700 kVA (鋼塊直径約 500 mm 相当) くらいが限度である。これ以上の容量の大きな炉は3相交流方式にする必要がある。3相交流方式には図6 bとcの方式があるが、bの方式では鋼塊を1本または2本だけ溶製することが不可能であり、

そのうえに3本の鋼塊の溶解をほぼ同じ条件で同時に行なわなければならないので実用的でない。ソ連ではこの方式も開発されたが、その後あまり使用されていないと聞く。cの方式では鋼塊の寸法に制限なく大型の鋼塊が溶製できるという長所がある。ただし、消耗電極を3本づつ作るのが不便であつて、この点3相全波整流のために電氣的アンバランスのないコンセルアーク溶解炉のほうが便利である。写真7には図6 bの方式、写真8、9にはcの方式の炉を示す<sup>9)10)</sup>。

4.6 その他付属装置

以上述べてきた装置のほかに溶解中にフラックスを補給するフィーダー、発生するガスとヒュームを集める排気集塵装置などが付属装置としてあるが、ここでは省略する。

4.2 操作

つぎに操作方法について若干述べよう。まず消耗電極表面のスケール、錆、汚れなどを除去したのち、電極昇

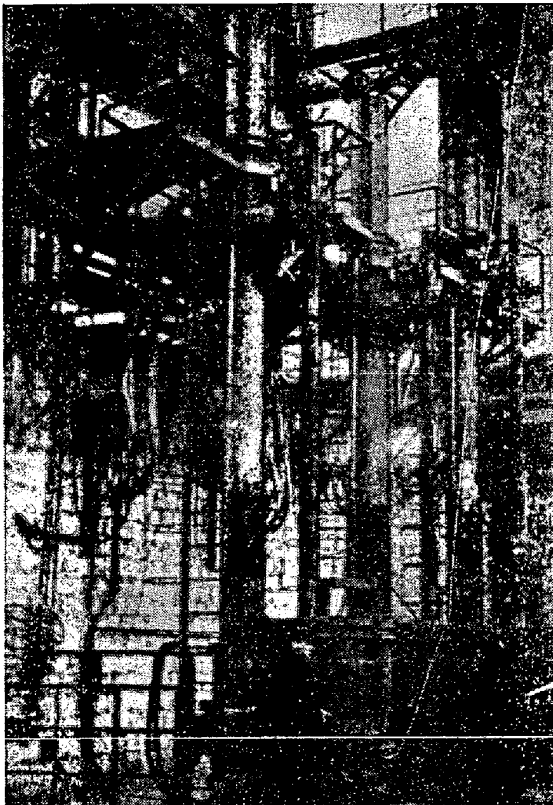


写真7 ソ連における3相溶解炉<sup>9)</sup> (3 鑄型)

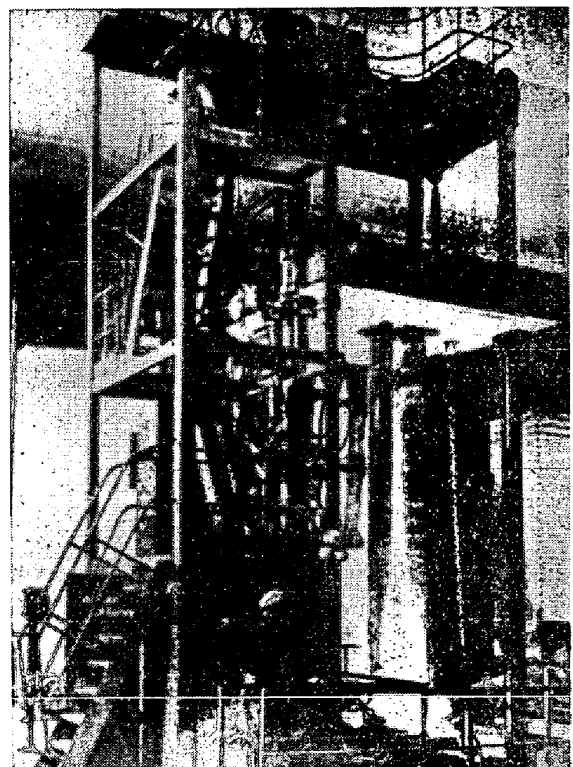


写真8 ソ連における3相溶解炉<sup>9)</sup> (1 鑄型)



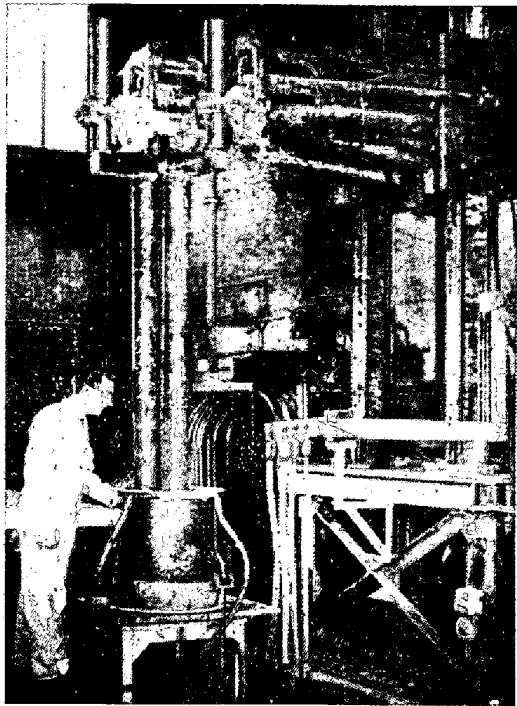


写真9 英国における3相溶解炉<sup>10)</sup>(1 鑄型)

降装置に取り付ける。つぎに炉底の上に共金または普通鋼の円板(点弧板とよぶ)をおき、その上に直径10mm 高さ20mm くらいの突起を付けるか、あるいは同じくらいの大きさの金属の小片を置く。この点弧板の上に使用するフラックスとカリ硝石、Al 粉末および Mg 粉末の混合物を置いて、これがちょうど突起の高さとほぼ同じになるようにする。この状態で消耗電極を下げてきて、突起にふれるようにしておく。このあと消耗電極と水冷鑄型の間に必要なフラックスの全量を入れて棒で軽く詰める。ここで水冷鑄型に冷却水を流し、排気集塵装置を始動し、各部を点検したのち通電する。通電と同時に突起と消耗電極の間でアークが飛び、続いてテルミット混合物が燃焼をはじめて、小さな熔融スラグ浴を作る。一度スラグ浴ができると電流が切れる心配はまずない。エレクトロスラグ溶解の初期は非常に不安定であるから、最初は電力を高めにして溶着や冷込みを防止する必要がある。消耗電極はむしろはじめは少し引き上げ気味にして、消耗電極と水冷鑄型の間にある未熔融フラックスを下に落して、急速に熔融するのが望ましい。

フラックスの量は100kgの鋼塊に対しては4~8kg、1tの鋼塊に対しては30~50kgが適当だと思われる。フラックスが完全に溶解したら、あらかじめ設定した電圧、電流値に電源の出力特性と極間距離を調整して溶解を続ける。フラックスの補給は100kg くらいの鋼塊では普通不要である。1tの鋼塊では溶解中に数kgのフラックスを補給すれば十分であろう。

溶解の終期には電力を徐々に下げていくことによって、鋼塊頭部の引け巣を完全になくする。いわゆるホットトップ操作を行なう。エレクトロスラグ溶解では熔融スラグが鋼塊の頭部に乗っているの、ホットトップが完全に行なわれる。

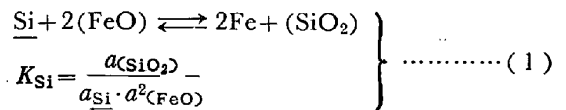
## 5. 精 錬 反 応

### 5.1 炭 素

各元素の挙動について述べてみたい。まずCはすでに報告されているように<sup>11)12)13)</sup>、一般にはほとんど変化しないとみてよい。ただし、鋼塊の底部ではやや減少する傾向が認められる。<sup>11)</sup>これは溶解の初期に熔融スラグによる溶鋼の保護が不完全なためである。また、スラグ中のFeO含有量が高くてもCの酸化損失はおこる(表4参照)<sup>5)</sup>。

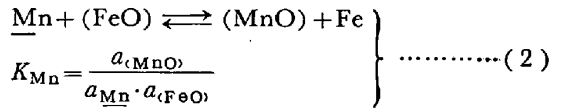
### 5.2 珪 素

Siは高SiO<sub>2</sub>系の酸性スラグを使用すると増加し、塩基性スラグを使用すれば減少する。Siの減少量と塩基度(B<sub>L</sub>)<sup>15)</sup>の関係を調べてみると、明らかに回帰関係が認められる<sup>11)</sup>。Siは(1)式の反応にしたがって挙動するとして、 $N_{SiO_2}/[\%Si](N_{FeO})^2$ の値を調べると、この値も塩基度が増加すると減少するという回帰関係が認められ、Siの減少はスラグの塩基度が高く、酸化性が強いほど顕著であることがわかる。



### 5.3 マンガン

Mnは(2)式にしたがって挙動するとして、 $N_{\text{MnO}}/[\%Mn](N_{FeO})$ の1850°C(100kg鋼塊の直流溶解における実測値<sup>11)</sup>)における値をCHIPMANら<sup>14)</sup>による平衡定数の1900°Kから2100°Kにおける値と比較すると、かなりよい一致を示した<sup>11)</sup>。



したがって、Mnは(2)式にしたがってほぼ平衡に

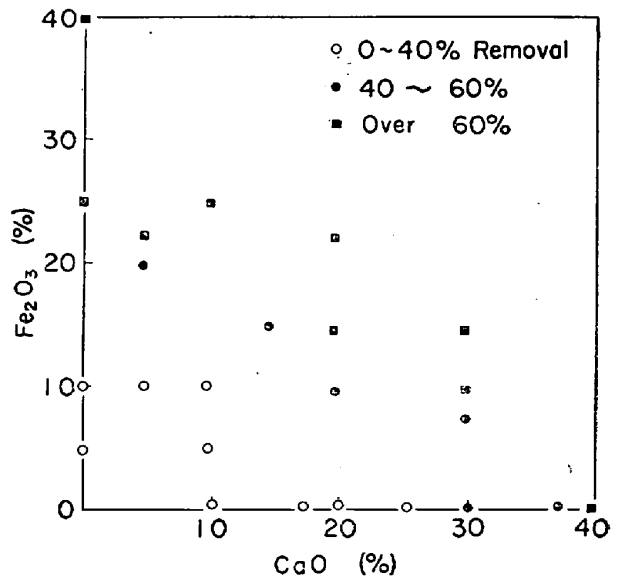


図7 脱磷におよぼすCaOとFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の効果<sup>5)</sup>  
(C 0.15%, P 0.034%)

表3 CaF<sub>2</sub> 基スラグの精錬能力におよぼす CaO と Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 添加の効果(%)<sup>5)</sup>

スラグ使用量		ス ラ グ 400 g										ス ラ グ 800 g								
添加物		CaO (%)					Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)					20% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 10% CaO	CaO (%)					Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)		
元 素	電 極	0	10	20	30	40	10	20	30	40	0		10	20	30	40	10	30		
C	0.74	0.73	0.73	0.74	0.75	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73	0.74	0.74	0.74	0.73	0.73	0.73	0.73	0.74		
S	0.042	0.021	0.018	0.012	0.009	0.009	0.020	0.016	0.017	0.020	0.015	0.020	0.013	0.009	0.006	0.007	0.016	0.016		
P	0.015	0.016	0.014	0.011	0.009	0.010	0.015	0.015	0.016	0.015	0.014	0.015	0.014	0.007	0.006	0.006	0.015	0.015		
Si	0.21	0.12	0.05	0.02	0.01	0.01	0.09	0.11	0.09	0.11	0.08	0.10	0.02	0.01	0.01	0.01	0.11	0.10		
Mn	0.74	0.71	0.70	0.69	0.67	0.68	0.68	0.71	0.72	0.70	0.71	0.71	0.69	0.70	0.67	0.66	0.69	0.70		
Al	0.014	0.008	0.006	0.007	0.005	0.006	0.019	0.025	0.027	0.036	0.022	0.005	0.006	0.006	0.005	0.006	0.023	0.045		
O <sub>2</sub>	0.020	0.006	0.006	0.007	0.007	0.006	0.005	0.005	0.009	0.012	0.006	0.006	0.008	0.010	0.010	0.009	0.008	0.010		

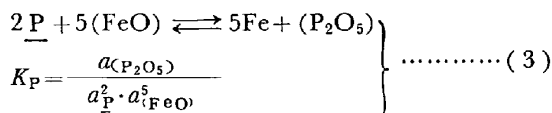
表4 スラグの精錬能力におよぼす酸化鉄の効果(%)<sup>5)</sup>

元素	スラグ 区分	95%CaF <sub>2</sub> +5%Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		90%CaF <sub>2</sub> +10%Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		75%CaF <sub>2</sub> +25%Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		60%CaF <sub>2</sub> +40%Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		
		電 極	Bottom	Top	Bottom	Top	Bottom	Top	Bottom	Top
C	—	0.15	0.09	0.15	0.11	0.15	0.02	0.15	0.018	0.023
Si	—	0.27	0.06	0.11	0.04	0.05	0.03	0.04	0.01	0.02
S	—	0.048	0.029	0.022	0.033	0.026	0.036	0.026	0.046	0.032
P	—	0.034	0.031	0.034	0.023	0.030	0.010	0.031	0.009	0.013
Mn	—	0.90	0.70	0.79	0.69	0.76	0.16	0.58	0.05	0.09
O <sub>2</sub>	—	0.030	0.021	0.009	0.037	0.017	0.041	0.015	0.064	0.023
CaF <sub>2</sub>	—	—	90.1	—	88.4	—	86.0	—	79.4	—
CaO	—	—	1.6	—	2.0	—	1.9	—	1.5	—
SiO <sub>2</sub>	—	—	2.2	—	4.2	—	3.9	—	4.1	—
MnO	—	—	3.1	—	3.2	—	5.2	—	7.7	—
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	—	—	—	—	0.6	—	0.3	—	1.2	—
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—	—	1.11	—	1.8	—	1.6	—	4.4	—
S	—	—	0	—	0.17	—	0.0	—	0.4	—

達していると考えられる。実際にはスラグ中の(FeO)はとくに添加しないかぎりかなり低いので、Mnが減少することはほとんどない。ただし、ユニオンメルト溶接などに使用されるスラグは(MnO)が高いので、復Mnの傾向が強い<sup>11)</sup>。

5.4 磷

Pの挙動はエレクトロスラグ溶解においては興味ある問題である。Pは(3)式にしたがつて挙動すると考えて、 $N_{P_2O_5}/[\%P](N_{FeO})^5$ を算出し、塩基度(B<sub>L</sub>)<sup>15)</sup>との関係を調べると回帰関係があることが認められた<sup>11)</sup>。この値は100kg鋼塊の直流溶解の場合 B<sub>L</sub>=0 においてほぼ 10<sup>7</sup> であり、B<sub>L</sub>の増加とともに急激に増加する<sup>11)</sup>。交流による直径 35mm の小型鋼塊においてもほぼ同様な関係が認められる<sup>7)</sup>。



したがって、脱磷を促進するためには、一般の製鋼作業の場合と同様にスラグは強塩基、強酸化性のものを使用し、なるべく低温で溶解する必要がある。事実 WILL-

IAMS<sup>5)</sup>は表4および図7に示すように強塩基性スラグにFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>を多量に添加したものでは顕著な脱磷を認めている。ただし、このようなスラグではC、Mnなどが同時に酸化されるため実用的でない。彼は表5のようにCaF<sub>2</sub>-CaO系でも脱磷を認めているが、筆者らはCaF<sub>2</sub>-CaO系スラグでは脱磷を認めていない。

5.5 硫黄

Sの挙動はもつとも興味ある問題の一つである。エレクトロスラグ溶解では合成スラグを使用するため、スラグ中のSとFeOを低くし、塩基度を自由に上げることができる。また、温度もかなり高い(実測約1850°C<sup>11)</sup>)のために脱硫にとっては好都合である。また、スラグの酸化力は低いほどよいが、この点も他の元素の歩留り向上と脱酸の面から好都合である。直流による100kg鋼塊の溶解においては(%S)/[%S]の値はB<sub>L</sub>=3において約1.5であつたが<sup>11)</sup>、交流による直径35mmの小型鋼塊の溶解では、図8のようにB<sub>L</sub>=1においてすでに(%S)/[%S]は2以上になつてゐる<sup>7)</sup>。48-OF-6ではこの値は10~20の間になつており、強い脱硫力をもつてゐることがわかる。

もし、スラグメタル反応によつて脱硫が行なわれるな

表 5 脱磷におよぼす CaO と BaO の効果 (%)<sup>5)</sup>

ス ラ グ		80% CaF <sub>2</sub> 20% CaO		70% CaF <sub>2</sub> 30% CaO		70% CaF <sub>2</sub> 30% BaO		70% CaF <sub>2</sub> 15% CaO 15% BaO	
元 素	電 極	Top	Bottom	Top	Bottom	Top	Bottom	Top	Bottom
C	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.1	0.15
Si	0.27	0.03	0.03	0.02	0.01	0.03	0.02	0.02	0.02
S	0.048	0.018	0.017	0.011	0.010	0.018	0.028	0.013	0.013
P	0.034	0.022	0.022	0.016	0.014	0.016	0.015	0.019	0.017
Mn	0.90	0.76	0.77	0.78	0.79	0.79	0.81	0.80	0.78
O <sub>2</sub>	0.030	0.009	0.010	0.010	0.013	0.012	0.014	0.012	0.013

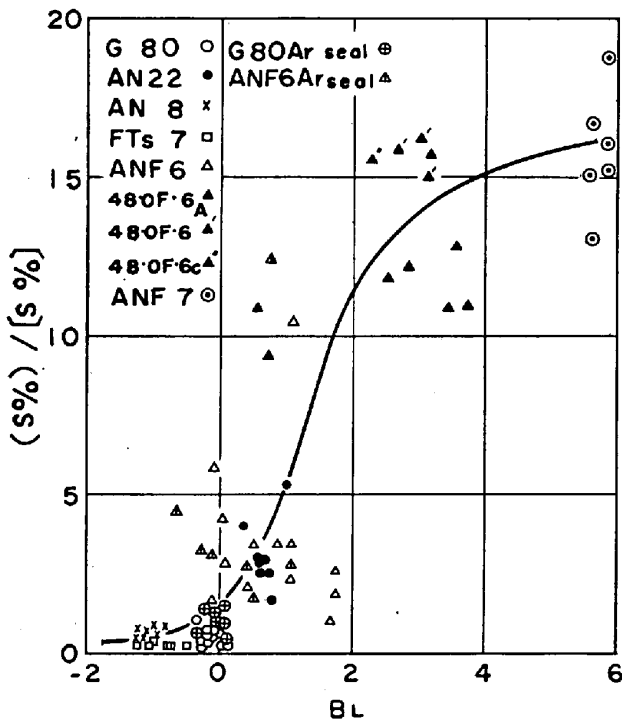


図 8 (%S)/[%S] と塩基度との関係<sup>7)</sup>

らば、脱硫が行なわれたときには、スラグ中の S 含有量は元の値よりも高くならなければならない。ところが脱硫が行なわれたとき、スラグ中の S 含有量も同時に減少し、S は系外に放出されたものと考えなければならない。S は SO<sub>2</sub> あるいは SF<sub>6</sub> になつて逃げるといわれているが<sup>2)</sup>、脱硫機構についてはいまだ明らかにされていない。さらに、S はスラグ中では電気化学的挙動をすることはよく知られており、直流による溶解の場合には S の挙動は複雑である。直流で溶解した場合は、ほとんど脱硫が起こらないが<sup>11)</sup>、交流で溶解した場合はすでに報告されているように<sup>2)5)7)12)13)</sup>明らかに脱硫が認められ、筆者らも 100 kg 鋼塊の交流溶解では脱硫を認めた。その結果はまた追つて報告したい。

5.6 クロム・バナジウム・モリブデンその他

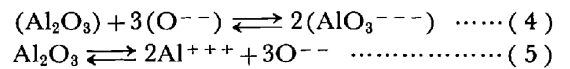
Cr, V, Mo その他の金属元素は実際上はほとんど変化しないとみてよい。ただし、Cr や V などのように O との親和力の比較的強い元素では溶解の初期においてやや酸化減少する傾向がある。もつとも問題になるのは Ti と Al であつて、これらはかなり多量に酸化減少す

るといわれている。その対策として純 CaF<sub>2</sub> をスラグとして、雰囲気 Ar などで不活性ガス雰囲気にするのはすでに述べた。この効果についてはいまだ確認していない。

5.7 酸素

O の挙動は非金属介在物の挙動と関連してもつとも注目すべき問題である。直流溶解においては O はほとんど減少しないばかりでなく、増加する場合も多いことはすでに報告した<sup>11)</sup>。この時使用したスラグは酸化物系であつたが、その後 CaF<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 系スラグを用いてあらためて実験してみても、やはり O は減少しなかつた。交流溶解においては多くの研究者<sup>2)5)12)13)</sup> が O の減少を認めており、筆者らも 100 kg 鋼塊においてたしかめた。このように使用する電流の種類によつて挙動がちがうのは S の場合と似ており、O も電気化学的挙動を示すことを意味している。

CaF<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 系スラグ中において Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> がいかなる形態で電離しているかは明らかでないが、つぎの2つの方式が考えられる<sup>16)</sup>。いずれの方式にしても直流溶解では溶湯の



方を陽極にしておく、溶湯面で AlO<sub>3</sub><sup>---</sup> または O<sup>--</sup> が析出して O 増加の原因になる。CaF<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 系スラグを用いて直流で消耗電極を陰極にして溶解すると鋼塊中の Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の激増が認められた。Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 以外の酸化物を含むスラグについても同様な機構が考えられよう。

しかし、交流溶解でもつねに脱酸が行なわれるわけではなく、スラグの安定性によつて O の挙動は変つてくる。スラグの安定性を表わす方法として、スラグを構成する各酸化物の標準生成自由エネルギーから成分ごとの安定度係数 Mi を求め、それにその成分のモル分率 Ni を乗じたものの和をそのスラグの安定度 S<sub>s</sub><sup>7)</sup> とすることが考えられており、O の挙動を説明するうえで有効な方法となつている。図 9 にスラグの安定度と鋼塊中の O との関係を示す。

5.8 窒素

N はソ連では減少するといわれており<sup>2)9)17)</sup>、わが国においても同様なデータが報告されているが<sup>13)</sup> 筆者らの実験<sup>11)</sup> その他<sup>7)12)</sup> においては減少しないか、あるいはむしろ増加するというデータが出されておられ、結果はまちまちである。

5.9 水素

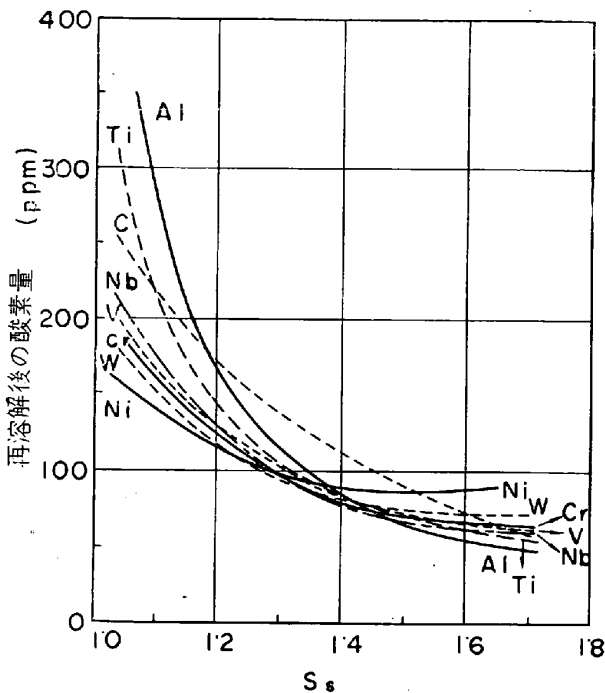
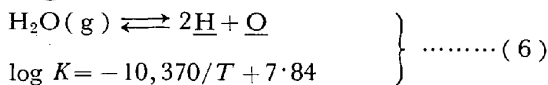


図9 再溶解後の %O とスラグの安定度との関係<sup>7)</sup>

Hはソ連では減少するといわれているが<sup>2)9)17)</sup>、減少率はコンセルアーク溶解におよばないとしている<sup>9)</sup>。ただし、これらのデータは分析試料の採取方法が明らかでないので、そのままでは参考にならない。筆者らはCr-Mo-V鋼の2t鋼塊を直流で溶解したとき、Hはほとんど変わらないという結果を得た。この時の試料はともに塊から切り出したものである。中村ら<sup>13)</sup>もHはほとんど変わらないとしている。

Hの挙動は空気中の水分とスラグとの反応によつて生成されたOH<sup>-</sup>が溶湯と反応して、溶湯中にHとして吸収される速度と溶湯中のHが逆に放出される速度とのバランスから考えなければならないが、ここでは単に空気中の水分と溶湯との直接反応を考えると、その反応は(6)式<sup>13)</sup>で示される。この反応は温度が高くOが低いほど右に進む。



エレクトロスラグ溶解では温度が一般の電弧炉その他

による溶解の時よりも高く(約1850°C<sup>11)</sup>)、Oも低いので、Hはむしろ空気中の湿度が同じであるかぎり増加するはずである。しかし、溶解中は厚いスラグで完全におおわれているので、真空鑄造した電極を使用すればHの比較的低い鋼塊が得られる可能性はある。ソ連においてはこの方法を推奨している<sup>9)</sup>

5-10 非金属介在物

非金属介在物の挙動については多くの報告があり、いずれも清浄度の向上を認めている<sup>2)5)9)12)13)17)</sup>。これはOおよびSの挙動から考えても十分うなづける結果である。非金属介在物が減少する機構は消耗電極から溶け落ちる溶鋼が小さな溶滴となつてスラグ層を通過する際に、溶滴の表面にでている非金属介在物はスラグに吸収される。吸収される確率は介在物が大きいほど大きいので、砂疵の原因となるような巨視的な介在物はほとんど除去されるとみてよい。溶鋼中に溶け込んでいる不純物は溶滴の表面でスラグ-メタル反応によつて除去される。

溶滴の大きさについての報告は、2, 3あるが<sup>13)19)20)</sup> GAREVSKIKHら<sup>19)</sup>は鋼塊表面の衣の中と溶解後のスラグキャップ中に残っている溶滴の大きさを調べている。それによると衣の中の溶滴の平均直径は2.37mmでありスラグキャップの中のそれは0.25mmであつた。ただし、スラグキャップの中に大きな溶滴があつてもすぐに沈下してしまうので、スラグキャップを凝固させたのち調べても、もはや大きな溶滴は認められないであろう。筆者らが直径380mmの消耗電極を直流で溶解したとき、衣の中には直径2~3mmの鋼球が多数認められた。消耗電極の端面を見ても溶滴がしずくとなつて落ちたあとが認められ、その大きさから判断しても、溶解中の溶滴の大きさは直径数mmのものもあることが想像される。エレクトロスラグ溶解ではこのように一般に溶鋼が小さな溶滴となつてスラグと接触し、その温度も高いので化学反応が急速に行なわれるのである。非金属介在物はスラグキャップを通過する際に除去されるが、溶湯プールにおける浮揚精錬も行なわれる。

6. エレクトロスラグ溶解材の性質と用途

1-6 低合金鋼

実際的な用途としてはNi-C-Mo-V鋼によるタービンローター材、2%Mn鋼による圧力容器用厚板(原子

表6 エレクトロスラグ溶解におけるガスの挙動<sup>9)17)</sup>

鋼種	区別	ガス量		
		O (%)	N (%)	H (ml/100g)
OX18H9 (18-9ステンレス)	電鑄 極塊	0.00346	0.07568	12.7
		0.00222	0.02725	9.7
X12H2B2Mφ (12Cr-2Ni-2W-Mo-V)	電鑄 極塊	0.00400	0.02500	—
		0.00210	0.01900	—
耐熱合金 (Ni-Cr-Ti-Al)	電鑄 極塊	0.00104	0.00616	4.7
		0.00059	0.00311	2.4
III X15 (SUJ2相当)	電鑄 極塊	0.0033	0.0123	—
		0.0023	0.0081	—

表7 軸受鋼の清浄度におよぼすエレクトロスラグ溶解の効果<sup>9)</sup>

鋼 種	区 別	S (%)	非金属介在物量 (wt%)	清 浄 度 (GOST)		
				酸化物	硫化物	球状介在物
III X15	電 極 材 塊 電 鋳	0.009	0.0116	2.69	2.27	1.40
		0.006	0.0050	1.03	0.75	0.46
III X15Cr	電 極 材 塊 電 鋳	0.010	0.0104	2.66	2.37	1.58
		0.007	0.0053	1.04	1.05	0.29

III X15 : C 1.0%, Cr 1.5%

III X15Cr: C 1.0%, Cr 1.5%, Si 0.5%, Mn 1%

表8 エレクトロスラグ溶解せるステンレス鋼の清浄度<sup>9)</sup>

鋼種	区 別	清 浄 度 (GOST)			
		酸化物	硫化物	珪酸塩	球 状 介 在 物
OX18H9	電 極 材 塊 電 鋳	2.25	0.50	1.83	3.58
		0.85	0.50	1.11	1.57
X17H2	電 極 材 塊 電 鋳	3.64	1.14	—	—
		1.04	0.50	—	—
X28	電 極 材 塊 電 鋳	4.33	0.67	—	—
		1.00	0.50	—	—
2X13	電 極 材 塊 電 鋳	3.40	2.50	—	—
		0.86	0.53	—	—

X18H9: Cr 18%, Ni 9%

X17H2: Cr 17%, Ni 2%

X28 : Cr 28%

2X13 : Cr 13%, C 0.2%

炉用), 2% Cr-2%Ni 高張力構造用鋼などが報告されている<sup>9)</sup>. これらの材料ではエレクトロスラグ溶解によつて機械的性質の向上が期待されるが, 機械的性質そのものの向上はあまり顕著でなく<sup>13)</sup>, むしろ横目と縦目の靱性の差が少なくなるのが特徴である. 表9にローター用 Ni-Cr-Mo-V 鋼の機械的性質を示す. これらの材料にはゴースト, キャピティ, ラミネーションなどの問題があるが, エレクトロスラグ溶解ではこれらの問題がほとんど解決されるといわれる.

6.2 ステンレス鋼

ソ連においては継目無鋼管用材の溶製に利用されているといわれる. その理由は熱間加工性とくに穿孔性の向上, 機械的性質の異方性の軽減, 耐食性の向上, 溶接性の向上などである<sup>2)9)17)</sup>.

6.3 耐熱鋼および耐熱合金

オーステナイト系耐熱鋼およびマルテンサイト系耐熱鋼にも利用されている. オーステナイト系耐熱鋼ではW, Nb などで強化した鋼に関するデータは発表されている<sup>9)</sup>. Al, Ti による析出硬化型にも適用されているといわれるが, 詳細なデータはない. マルテンサイト系耐

表9 ローターシャフト用大型鍛鋼品の機械的性質<sup>9)</sup>

材 料	特 性 試 片 方 向	機 械 的 性 質					異方性		縦目 横目
		弾性限 (kg/mm <sup>2</sup> )	引張り強さ (kg/mm <sup>2</sup> )	伸 び (%)	絞 り (%)	衝撃値 (kgm/cm <sup>2</sup> )	伸び	絞 り	衝 撃 値
① 平 炉 鋼 真空処理せず	軸 方 向	71.0	85.0	15.2	49.6	6.7	0.44	0.19	0.37
	半 径 方 向	71.0	85.0	6.7	9.6	5.2			
② ①をエレクトロスラ グ溶解せるもの 鍛 錬 比 5	軸 方 向	63.0	81.0	20.6	61.0	8.9	0.85	0.82	0.65
	半 径 方 向	63.0	80.6	17.5	50.0	5.8			
③ ②に同じ 鍛 錬 比 2	軸 方 向	64.5	81.0	18.3	53.5	7.2	0.94	0.89	0.83
	半 径 方 向	63.4	81.7	17.2	47.1	6.0			
④ 平 炉 鋼 真空処理せるもの	軸 方 向	61.4	85.5	18.2	52.0	6.1	0.47	0.27	0.49
	半 径 方 向	65.2	88.7	8.5	14.0	3.0			
⑤ ④をエレクトロスラ グ溶解せるもの 鍛 錬 比 5	軸 方 向	65.5	79.5	20.5	64.0	10.9	0.82	0.82	0.72
	半 径 方 向	63.0	79.0	16.8	52.2	7.9			
⑥ ⑤に同じ 鍛 錬 比 2	軸 方 向	65.1	80.3	18.9	58.6	8.4	0.98	0.89	1.00
	半 径 方 向	66.0	80.5	18.5	52.2	8.4			

成分 C 0.34% Cr 1.0% Ni 1.5% Mo 0.4% V 0.2%

表10 Ni基耐熱合金の機械的性質におよぼすエレクトロスラグ溶解の効果<sup>9)</sup>

材料	機 械 的 性 質						900°C, 22 kg/mm <sup>2</sup> における長時間強度および靱性		
	20°C			900°C			破断時間 (hr)	伸 び (%)	絞 り (%)
	引張り強さ (kg/mm <sup>2</sup> )	伸 び (%)	絞 り (%)	引張り強さ (kg/mm <sup>2</sup> )	伸 び (%)	絞 り (%)			
電 極 材	91.0~97.2	1.8~3.2	4.0~6.0	62.5~76.1	0~2.3	2.0~2.8	66.3~87.2	1.2~2.0	2.0~2.2
	平均93.1	平均2.7	平均5.1	平均69.4	平均1.5	平均2.3	平均78.3	平均1.6	平均2.1
エレクトロスラグ溶解材	114.2~119.1	11.3~16.5	12.2~16.2	67.3~77.6	13.8~16.2	14.1~16.5	81.3~92.1	4.1~5.0	4.9~8.3
	平均117.1	平均14.4	平均14.5	平均73.5	平均15.4	平均14.9	平均86.3	平均4.5	平均7.1

材質 ㊄M867 Nimonic 系合金

熱鋼としてはタービンブレード材に利用されており、成果をあげているといわれる<sup>9)</sup>。耐熱合金としてはわずかに表 10 に示す Nimonic 型合金に関するデータ<sup>9)</sup>のみが発表されている。短時間クリーブ破断試験結果はやや改善されているというものの、あまり顕著とはいえない。また、Al, Ti の挙動についてもふれられていない。

6.4 軸受鋼

ソ連ではエレクトロスラグ溶解法は軸受鋼 (SUJ 2 相当) の溶解にもつとも広く利用されているといわれる。非金属介在物の減少により軸受の寿命が 2~3 倍に延びるとされている。実際の寿命試験のデータはないが、疲労試験結果は発表されている<sup>9)</sup>。その結果を図 10 に示すが、疲労限のいちじるしい向上が認められる。軸受鋼と

同様な成分の仕上圧延用ロール鋼に適用するとロールの寿命が 3 倍になったといわれる<sup>9)</sup>。

6.5 工具鋼

高速度鋼やダイス鋼の溶解に適用すれば、材料の清浄度と炭化物の分布の均一性の向上によつて工具寿命が延びるといわれる<sup>9)</sup>。高速度鋼では鑄造組織が微細になるので、デンドライトの軸に対して適正な角度でチップを鋼塊から切り出せば、as cast で寿命の長いバイトが製造できるといわれる<sup>21)</sup>。そのデータを表 11 に示す。

6.6 その他

純鉄、高マンガン鋼、モネルおよび銅の溶解にも適用できるといわれる<sup>9)</sup>。

7. 経 済 性

経済性を論ずる場合の基礎となるデータが LEIBENSON<sup>22)</sup>らによつて表 12 のように報告されている。このデータは 1959 年中に 700~720 kg 鋼塊を溶解したときの平均値である。これらの値は筆者らが 2 t 鋼塊を直流で溶解したときの値と比較的よく一致している。筆者らの実験結果およびコンセルアーク溶解の実績では冷却水の消費量は表 12 の値の約 1/10 である。また、スラグの使用量は 15 kg/t というデータ<sup>23)</sup>もあるが、これはむしろ 35 kg/t のほうが妥当のように思われる。そこで、電気料金を 4円/kWh, ANF 6 スラグを 100円/kg, 水道料金を 20円/m<sup>3</sup> と仮定して、表 12 のデータから正味の溶解費を概算すれば表 13 のようになる。

すなわち、正味の溶解費は 13,300円/t であつて、これ他に労務費、減価償却費を加えると約 2 万円/t になる (炉の価格は容量 2 t の炉では約 4,000 万円くらいと考え、3 人で操作して月産 150~200 t 生産できるとして実際の原価計算は各事業所の実情を加味して試算)。冷却水の費用は筆者らの実績からみると表 13 の値よりも 4千円は安くなり、さらに将来大規模の専門工場で大量生産すれば再溶解費は約 1.5万円/t に近づくはずである。

エレクトロスラグ溶解した鋼塊は鑄肌が平滑であり、押湯が必要でないので、圧延歩留りも 90% 近くになる。これを従来の方法と比較すると 10% 以上の歩留り向上になる。したがつて、溶解費を 2 万円 (1.5万円) まで下げられると、圧延材の価格が 20万円/t (15万円/t) 以

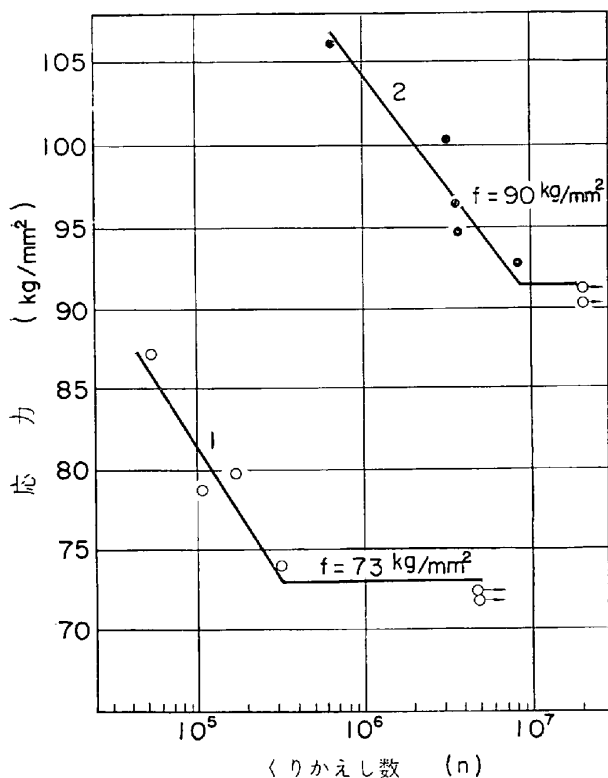


図10 軸受鋼の疲労特性<sup>9)</sup>

(1は普通材, 2はエレクトロスラグ溶解材)

表11 エレクトロスラグ溶解せる高速度鋼の寿命<sup>21)</sup>

チップ番号 (下図)	材 料	総切削長さ (mm)	チップの寿命 (min)	比 寿 命 (%)
1	80 mm φ 圧延材	459	12.4	100
2	75 mm φ エレクトロスラグ溶解鋼	782	21.1	170
3	同 上	993	26.8	216
4	75 mm φ 高周波溶解鋼塊	552	14.9	120
5	75 mm φ エレクトロスラグ溶解鋼	836	22.6	182
6	同 上	1192	32.2	260
7	同 上	696	13.8	152
8	同 上	970	26.2	212
9	同上を20 mm φ に鍛造したもの	449	12.1	98

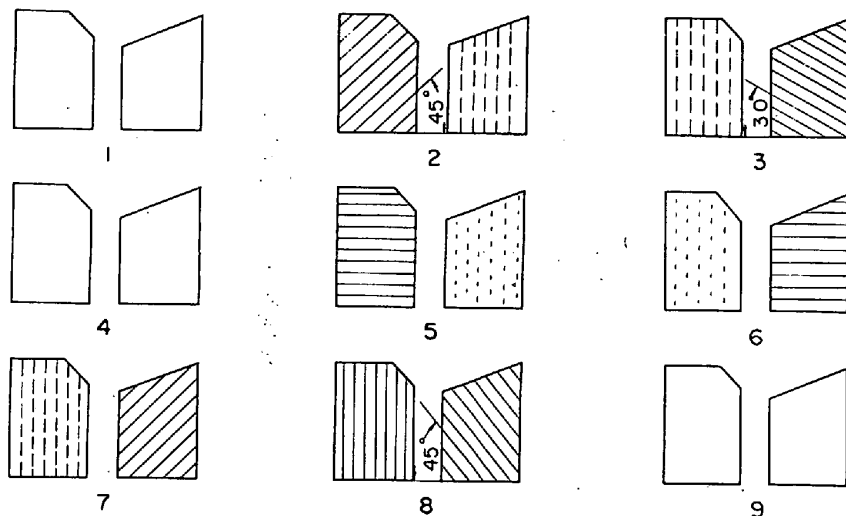


表12 エレクトロスラグ溶解の原単位<sup>22)</sup>

生産性(準備時間も含む)	460kg/hr
電力消費量	1250kWh/t
電極消費率(電極/鋼塊)	1.02
ANF6スラグ使用量	35kg/t
冷却水消費量	240m <sup>3</sup> /t

表13 エレクトロスラグ溶解の原価表

項 目	使用量	単 価	価 格
電力費	1250kWh/t	4円/kWh	5,000円/t
スラグ	35kg/t	100円/kg	3,500円/t
水道料	240m <sup>3</sup> /t	20円/m <sup>3</sup>	4,800円/t
計			13,300円/t

上のものならば経済的に引き合う可能性がある。大気溶解材では皮削りを必要とするような鋼種に対しては皮削り費が不要となり、歩留りが向上することによつて溶解費をカバーできる。大型鍛鋼品に適用する場合には、材料費としてはある程度割高になるかもしれないが、品質の向上による製品廃却率の低下で溶解費をカバーしてあまりあると思う。

### 8. 将来の展望

エレクトロスラグ溶解法の原理、特徴および用途について述べたが、その内容から判断して本法の将来性はおのずと明らかであろう。再溶解はそれだけ経費の高くなることを意味している。しかし、今後金属材料に対する要求がますます厳しくなるにしたがつて、コンセルワーク溶解法や本法のような方法が当然考慮されるようになってくる。本法は小型鋼塊の分野では軸受鋼、高速度鋼、ダイス鋼、ステンレス鋼などに適している。このような材料に本法を適用するときは、溶解費が比較的に安上に材料歩留りの高い点が大きな利点となる。コンセルワーク溶解法はその性質上、高級耐熱鋼または超合金の溶解に今後ますます利用されるだろう。

大型鋼塊の分野では脱水素の点からコンセルワーク溶解の方が望ましいが、設備費が高いという大きな障害がある。エレクトロスラグ溶解法では炉の容量が大きくなるにつれて設備費が割安となるので、この点きわめて有利である。脱水素の問題も真空鑄造した電極材を使用すれば一応解決できると思う。将来、ローター材などが高級化されると、エレクトロスラグ溶解法は必ず注目されるようになってくるはずである。

諸外国特にソ連圏諸国ではエレクトロスラグ溶解法は普及する可能性が強い。その評価も高い。近年、これらの諸国に対する鉄鋼製品の輸出が増加しつつあるが、今後高級材料を輸出する場合には当然この点を考慮しておかなければなるまい。

最後に当社におけるエレクトロスラグ溶解法の開発に



御指導をいただいた高尾顧問役、菅野中央研究所長なら  
びに窪田動力課長に感謝の意を表したい。

文 献

- 1) Electric Furnace Steel Proceedings, (1948),  
p. 91 [A.I.M.E.], New York
- 2) A. F. TREGUBENKO and S. A. LEIBENSON: エ  
レクトロスラグ再溶解法 (昭39-5), [日ソ通信社]
- 3) B. E. PATON: Electroslag Welding, (1962),  
[Amer. Weld. Soc.], New York
- 4) W. RICHLING: Neue Hütte, **6** (1961), p. 565
- 5) A. C. WILLIAMS: J. Iron & Steel Inst. (U.K.)  
(1962), July, p. 581
- 6) W. A. McKEEN et al.: Metal Progress, **82**  
(1962), Sept., p. 86
- 7) 成田, 伊藤, 松本: 鉄と鋼, 51(1965)10, p.1948
- 8) 33/Magazine of Metals Producing, (1965),  
June, p. 57
- 9) B. E. PATON, B. I. MEDOVAR et al.: Rev.  
Met., No. 2(1965), p. 87
- 10) Iron and Steel, (1965), Nov., p. 571
- 11) 草道, 成田, 福原, 小山: 鉄と鋼, 51(1965) 4,  
p. 802
- 12) 出口, 吉村, 湯浅: 鉄と鋼, 51 (1965) 4, p.799
- 13) 一安, 石川, 中村: 鉄と鋼, 51 (1965) 10,  
p. 1940
- 14) J. CHIPMAN, J. B. GERO and T. B. WIN-  
KLER: Trans. Met. Soc., Amer. Inst. Min.,  
Met. & Pet. Eng., 188 (1950), p. 341
- 15) 森: 鉄と鋼, 46 (1960) 4, p. 466, 金属学会誌,  
24 (1960), p. 383
- 16) E. T. TURKDOGAN: J. Iron & Steel Inst. (U.  
K.), (1955), p. 147
- 17) B. E. PATON and B. I. MEDOVAR: Enginee-  
ring Materials and Design, (1962), Oct., p.718
- 18) Basic Open Hearth Steelmaking, (1964), p.707  
[A.I.M.E.], New York
- 19) I. A. GAREVSKIKH et al.: Stal in English,  
(1962) 1, p. 32
- 20) N. ROBINSON et al.: Metallurgia, (1963),  
April, p. 161
- 21) V. G. RADCHENKO et al.: Automatic Welding,  
18 (1965) 8, p. 38
- 22) A. F. TREGUBENKO et al.: Stal in English,  
(1961) 3, p. 190