

製鋼における特殊製錬技術の現状

株式会社神戸製鋼所・中央研究所

成田 貴一

I. 緒言

近年における製鋼技術のめざましい進歩とともに転炉製鋼においても、また電弧炉製鋼においても多くの新技術がとり入れられ、現在ではいずれの場合も200～300 t炉が稼動しており、さらに400 t炉も操業されるようになってきた。また真空脱ガス法も溶鋼のたんなる脱ガス技術ということだけでなく、ガス成分、非金属介在物、不純物などの少ない清浄な鋼をつくる一つの積極的な精錬手段としてひろくとり入れられ、連続铸造法も普及し、一般的な方法として採用されるようになってきた。

さらに特殊鋼や高級鋼の分野では、上記の溶鋼の真空精錬法に加えて真空誘導溶解法、真空アーク溶解法、電子線衝撃溶解法あるいはエレクトロ・スラグ溶解法などが積極的に適用されるようになってきた。

そこで本稿では特殊鋼や高級鋼の製造という立場から、このような現在の製鋼体系下における特殊製錬技術の動向についてその概要を述べ、斯界の参考に供したい。

II. 真空溶解法

一般に金属を大気中で溶解、精錬する場合には多かれ少なかれ、酸素、窒素、水蒸気、耐火材などによる汚染を受け、金属材料の性質が低下する場合が多い。そこで金属材料の性質を向上させる一つの手段として、金属中のガス成分や不純物を減らそうとする試みが古くからおこなわれ、今世紀のはじめころから真空溶解铸造法（以下、真空溶解法と略記する）が用いられるようになってきた¹⁾。しかしながらこの方法が鉄鋼製錬にとり入れられるようになったのは比較的最近のことであり、第2次大戦を契

機として発展しためざましい真空技術の進歩ならびに鉄鋼材料の品質に対する高度の要求が真空溶解法の発展を促したといえよう。

真空溶解法はもともと大気中溶解法では製造の困難な金属の溶解、精錬を目的として発達した技術であるが、本法を適用することによってガス成分、非金属介在物および不純物の非常に少ない清浄な鋼が得られ、加工性がいちじるしく改善され、従来の方法では製品化することが困難な成分組成をもった合金鋼が容易に製造できるようになった。そうして設備の大形化とともに製鋼分野においては軸受鋼、ばね鋼、ステンレス鋼、耐熱鋼、電磁用鉄合金などのように高度な性質が要求される材料の製造に独自の分野を開拓してきた。工業的な規模における鉄鋼材料の真空溶解には真空誘導溶解法、消耗電極式真空アーク溶解法および電子線衝撃溶解法があり、すでにこれらの方法により数10 tの鋼塊が生産されるようになってきた²⁾³⁾⁴⁾。

1. 真空誘導溶解法 (VIM)

この方法は、衆知のように高周波誘導炉、鑄型および鑄込み装置をおさめた真空容器、排気系、操作調整系からなる設備を用い、低圧下で高周波誘導炉内で原料をとくして精錬したのち、必要な合金元素を加え、溶鋼を鑄型内に鑄込む方法であり、炉の容量および操業法などによって種々の形式がある。溶解炉は数kgの実験的な規模のものから数t程度のものが多く、最近では30 t以上の大形炉も稼動している。大気中溶解の場合には、大気、スラグ、耐火材、装入物などから溶鋼中に不純物が入ってくるわけであるが、VIMの場合には原理的に大気およびスラグの影響が除かれるため、不純物の導入経路は耐火材と装入物とに限定される。したがって

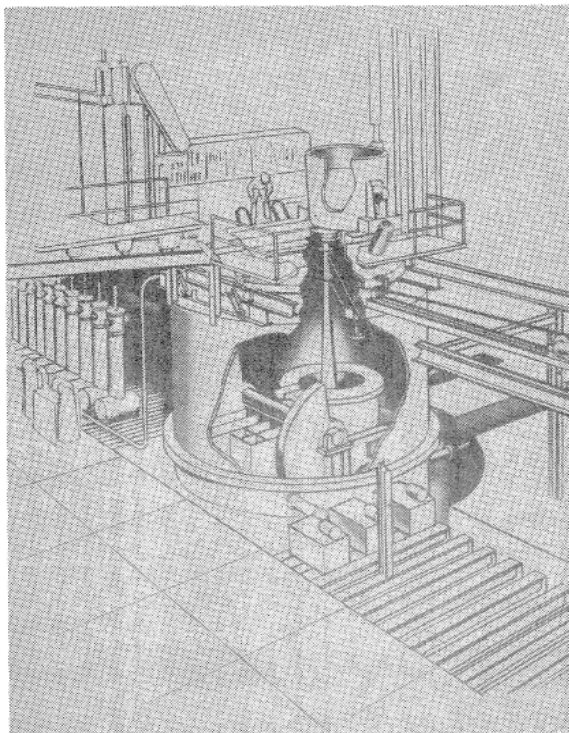


図1 Latrobe Steel Co.の大型真空誘導溶解炉

VIMの効果を十分に発揮させるためには、装入物はすべてよく精選し、不純物の少ないものを使用することが必要であり、スクラップも一般に真空溶解材のスクラップに限定して使用する。

大形炉の1例として Latrobe Steel Co.の30 t VIMの構造を参考までに示すと図1のとおりであり³⁾、設備は粗製溶鋼取鍋、真空容器排気系および制御系からなり、真空容器の内部には攪拌力の大きい誘導溶解炉および鑄込み装置をおさめ、スチーム・エジェクターポンプを用いて排気している。操業はあらかじめ電弧炉で大気中で溶解、精錬してつくった溶鋼を取鍋にとり、これを真空容器の上部に設置したのち、ストップを開いて溶鋼を流滴脱ガスしながら誘導溶解炉内に移し、さらに溶鋼を攪拌しながら0.5 mm Hg 圧以下で真空脱酸ならびに脱ガスし、合金元素を添加したのち、溶鋼を鑄型内に鑄込む。この方法はあらかじめ大気中で溶製した溶鋼を使用するという点で従来のVIMと多少おもむきを異にするが、規模がはるかに大きく、軸受鋼、ステンレス鋼、耐熱鋼などの製造には経済的にきわめて有利である。

そのほか特殊な誘導炉⁵⁾には外熱式のQuartz tube furnace があり、放射性物質の真空溶解

および鑄造や焼結などに用いられている。精密鑄造に対しては2種の形式があり、その一つは溶解室と鑄込み室を気密扉を介してわけた

Double chamber furnace 方式であり、もう一つは遠心鑄造方式であり、これはるつぼ中でとかした金属をその下部にとりつけた鑄型内に遠心鑄造する方法である。また真空溶解と加圧鑄造を組合せ、真空中で誘導溶解した融体中に上部より鑄型を挿入し、高圧の不活性ガスを導入して融体を鑄込む方法もある。

2. 真空アーク溶解法 (VAR)

本法は真空中でとかそうとする金属自体を電極とし、最初水冷銅鑄型、つづいて熔融金属との間にアークを発生させ、そのアーク熱によって電極をとかし、水冷銅鑄型内に直接凝固させる方法である。したがって装置もこのような特長を十分に発揮しうるように、図2に示したように円筒形の炉体の上部に気密シールを介して上下に運動しうる電極支持棒を取りつけ、下部には水冷銅鑄型を取りつけてある⁶⁾⁷⁾。炉体に排気系を連結し、そのほか遠隔制御装置、炉内の観察装置などが設置されている。電極はあら

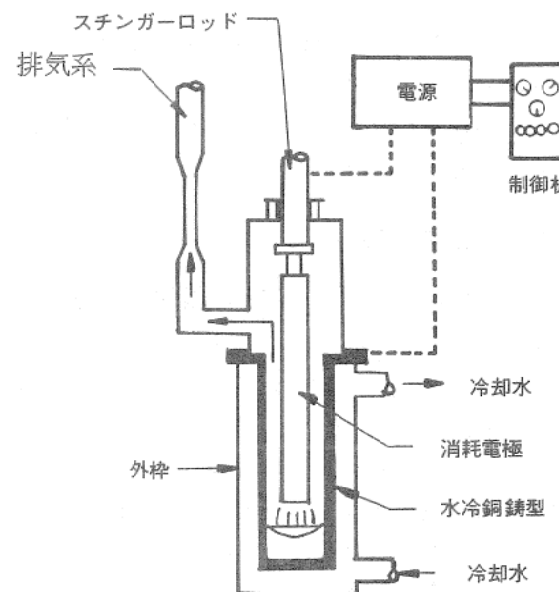


図2 真空アーク溶解法の設備

かじめ大気中溶解法または真空溶解法によってつくった鋼塊を所定の形、寸法に鍛造または圧延加工したもの、あるいは鑄造電極を使用する。また場合によってはスポンジや粉末金属を加圧成形したものを使用する。このようにしてつくった消耗電極を支持棒の先端に溶接してとりつけ、通常これを陰極、水冷銅鑄型を陽極とし、炉体内を排気したのち、電極の先端を炉底においた点弧板に近接させてアークを発生させ、アークを持続させて電極の先端をとかし、以下ひきつき電極を徐々に降下させながらアーク熱をもって溶解する。溶鋼は水冷銅鑄型内に滴下してプールを形成し、周囲から順次冷却されて積層凝固する。溶解時の真空度は $10^{-1} \sim 10^{-3}$ mm Hg 程度がもっとも適当であり、真空度が低い場合にはアークが不安定になり、鑄型をとかして事故を招く危険性がある。電源は大容量の生産炉では直流を用いたほうがアークの安定性からみてはるかに有利であり、直流電圧は15~45V程度、電流は鑄型の直径1 inあたり最高1000Aを供給する必要がある。またアークの安定化と溶鋼の攪拌をはかるため、鑄型の周囲に直流ソレノイドをおいて磁場を作用させる場合もある。

消耗電極を使用するVARはあらかじめ電極材を調製しなければならないという欠点はあるが、高温、低圧下におけるすぐれた精錬ならびに純化作用があり、積層凝固により凝固組織の健全な鑄塊が得られ、さらにVIMに比べて設備費が安く、耐火物による溶鋼の汚染を考慮する必要がなく、しかも溶解能力に柔軟性があるので大形鋼塊の溶製が可能であり、鉄鋼材料の真空溶解に対しては経済的にかなり有利である⁸⁾⁹⁾。製鋼におけるVAR法の適用はジェット・エンジン用耐熱合金の溶解を目的として最初特殊鋼メーカーで設備されたのがきっかけとなり、今日では高度の品質が要求される高級材料たとえば発電機用ロータ軸、タービン・ブレードなどの鍛鋼品の溶製にも広く採用されるようになってきた。このように消耗電極式のVAR法が健全な鋼塊を確実に得るための有力な手段として注目されるとともに、炉も大形化し、Allegheny Ludlum Steel Corp. では25t、Midvale - Heppenstahl Co. では直径約60 in

(> 50 t)の鋼塊を溶製しうる炉を設置しており、また100 t程度の大形炉の建設も計画されている³⁾。

VAR炉の基本的な設計概念はここ10数年間ほとんど変わっていないが、製造原価の低減をはかるには溶解前後の作業の合理化、生産性の向上、設備寿命の向上などが必要であり、この点については最近かなりの改善がおこなわれている。図3は最近の設備の1例を示したものであり⁵⁾、溶解位置を2箇所設け、水圧機で炉頂部をもちあげ、いずれの位置にも回転できるようになっている。一方で溶解をおこない、他方で鑄塊のとりはずしやつぎの溶解の準備をおこなう。また支持棒と消耗電極の接続はしめつけ装置により短時間内におこなうことができる。

そのほかWを電極とした非消耗式のVAR法¹⁰⁾や非消耗電極を使用し、不活性ガス雰囲気中で溶解材を同じ金属のスカル内でとかし、熔融金属を鑄型に注入して鑄塊をつくるスカル溶解法¹⁰⁾¹¹⁾もあるが、これらのアーク溶解法では電極からの夾雑物の混入が問題であり、あまり利用されていない。なおスカル溶解法も最近では消耗電極を用いて真空中でアーク溶解する方

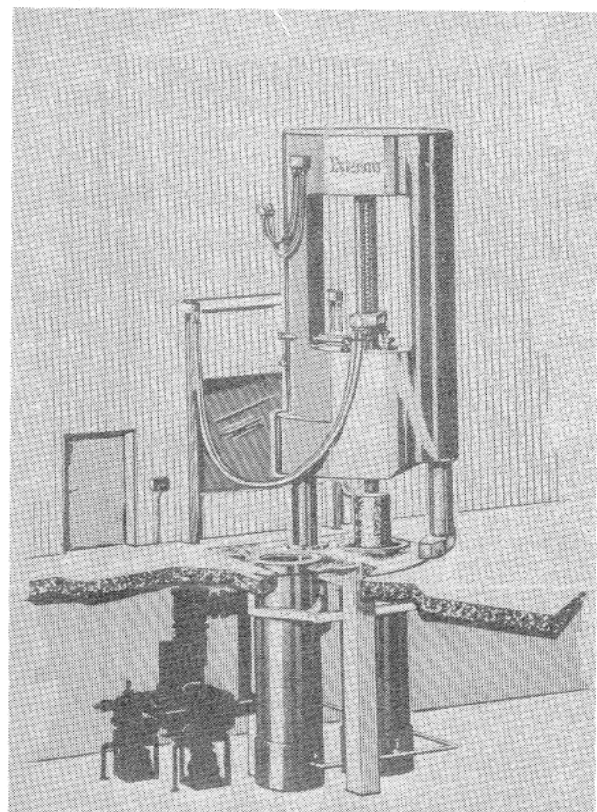


図3 最近の消耗電極式真空アーク溶解設備

法がとられるようになってきた。いずれにしてもこれらの方法はおもに化学的に活性な高融点金属の溶解に適用されており、鉄鋼材料の溶解にはあまり利用されていない。

3. 電子線衝撃溶解法 (EBM, EBR)

この方法はかなり古く、すでに 1905 年頃から試みられてきたが、往時は真空技術が未熟であったことに加えて電子線源の出力が低く、また水冷金属るつぼを使用する技術が発達していなかったため、実験室的な研究に終わってしまっていた¹²⁾¹³⁾¹⁴⁾。ところが第 2 次大戦とそれにつづくすばらしい技術革新の結果、真空技術が非常に進歩し、大容量の真空排気設備が使用できるようになったこと、また当時、VAR 法が先行して開発されたことが相まって、水冷金属るつぼの使用と連続鑄造方式とを折込むことによって 1958 年頃から EBM 法が工業的な規模で登場してきた⁵⁾¹⁰⁾¹⁵⁾¹⁶⁾。この方法の特長は、(1) 種々の真空溶解のうちで、もっとも高い真空度のもとで金属を溶解することができる、(2) 溶解速度を任意に調節することができるので、熔融金属を高温高真空下に必要な時間だけ自由に保持することができる、(3) 電子の加速電圧や電子電流を適宜に設定することにより溶解温度を任意に調節しうること、などである。金属の真空精錬において、その効果を左右する大きな因子は真空度、温度、時間であり、EBM 法は原理上、これらの 3 因子を自由に調節しうるという機能を備えており、もっとも理

想的な精錬手段であるといえる。

EBM 炉には現在いろんな形式のものがあるが、大別すると溶解しようとする金属を陽極とし、電子線を加速する Work acceleration 型と電子線源、加速電極、集束および偏向系を備えた電子銃を使用する Self acceleration 型となる。しかし溶解に使用する電子線源および照射方式の発展過程からみると下記の 3 方式に分類される。これらはいずれもその初期から高出力系の開発をめざして、互いに異なる別個の方向から開発が進められてきたことは興味深い¹²⁾¹⁷⁾。

3. 1. Ring beam 方式

EBM を工業的な溶解手段として最初に開発したのは米国の Temescal Metallurgical Corp. であり、これは環状陰極を使用する Ring beam 方式であり、図 4(a) に示したように溶解しようとする金属および熔融金属を陽極とし、環状陰極との間に高電圧をかけ、熱陰極から放出される電子を加速し、陽極にエネルギーを投入して溶解する方法である。この方式では溶解のおこなわれる空間に高電圧がかかっており、しかも陰極と陽極との距離が近いので、金属からのガス放出や金属蒸気によってグロー放電が生じやすく、溶解エネルギー効率が低く、また陰極フィラメントの汚染やイオン衝撃により陰極寿命が短いという問題がある。したがって今日ではこの種の Ring beam 方式の Work acceleration 型はほとんど採用されなくなった。そこで Ring beam 方式の利点を

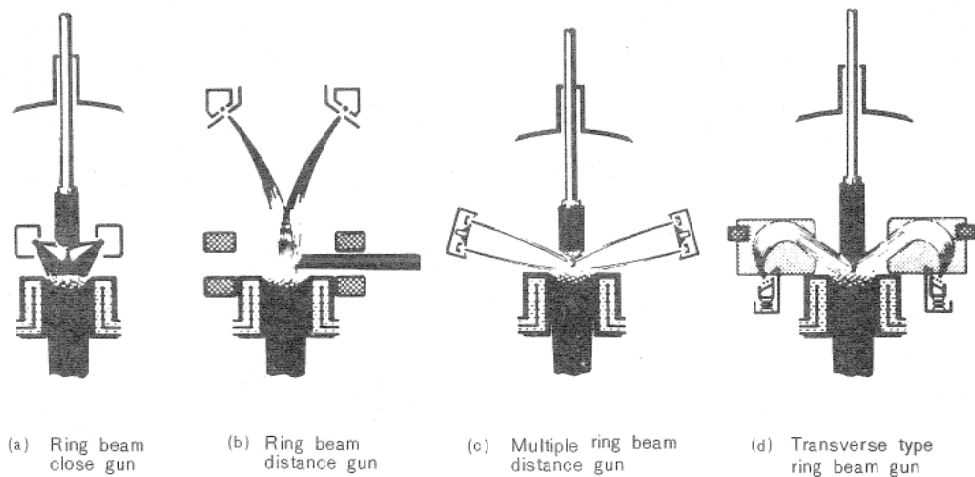


図 4 電子線衝撃溶解法

生かし、これに改良を加え、図4(b)に示したように陽極と電子線の集束・偏向系を加えた Ring beam distance gun 方式が採用された。この方式では消耗電極を横から供給するようになっているが、電子線が溶解室内にあるため、やはり陰極寿命はそう長くない。これに対し図4(c)および(d)は3個の環状陰極を用い、これらの電子線源を熔融金属の影になる場所に配置したものであり、上述の図4(a)および(b)の方式よりも陰極寿命は長い。図4(c)の方式を Multiple ring beam distance gun、図4(d)の方式を Transverse type ring beam gun とよんでいる。

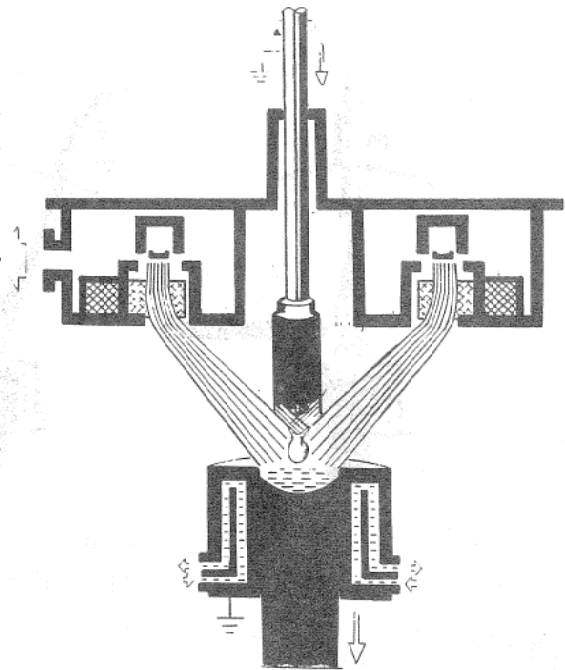
一般に線源の出力は加速電圧が12~15 kVで300~400 kWであり、3個の線源を備えることによって容易に1 MW級の出力が得られる。Temescal Metallurgical Corp. でその後開発された大形炉は3個の線源を備えた図4(d)の方式で1 MW級のものである。しかしいずれにしても、線源が図4(a)および(b)の方式と同様に溶解室内にあるため、溶解時における放出ガスや金属蒸気に起因する放電現象を完全に除くことは困難である。

3. 2. Multiple linear beam distance gun 方式

上記 Ring beam 方式の電子線源の開発と並行して、ソ連の Paton 研究所では線状陰極を複数個(8個)、放射状に配置した装置が開発された。図5はその1例であり、この種の構造ではある程度、線源を別の排気系で排気することができ、電子線を加速する陽極のスリットが大きいので、そう大きな効果は期待できないといわれている。

3. 3. Pierce-type electron beam gun 方式

以上に述べた2種類の方式にみられるような欠点に対し、1953年 Lorenze は電子銃の部分と溶解室とをそれぞれ別個に排気し、充分圧力差をもたしうる可能性のあることを指摘し、種々の困難に遭遇したが、1958年に出力140 kWの溶解炉をつくり、その操業に成功した。この方式は図6に示したように、Self acceleration 型すなわち電子線の加速、集束

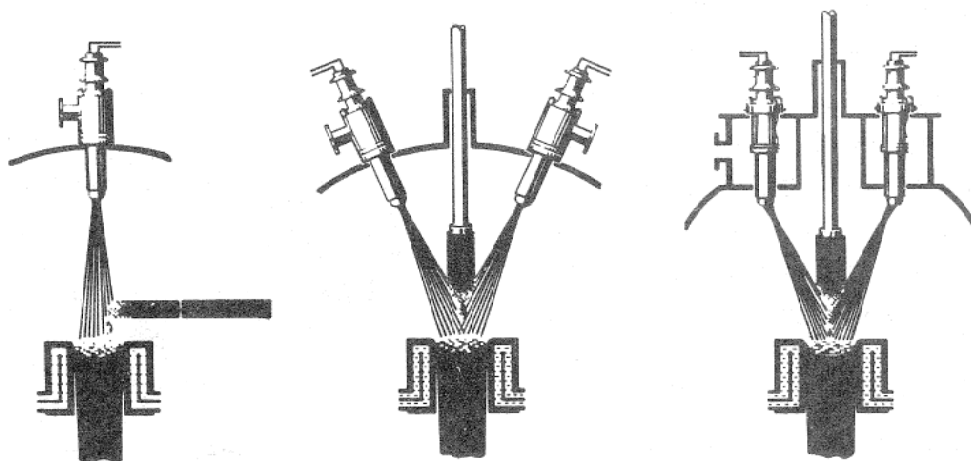


Multiple linear beam distance gun

図5 電子線衝撃溶解法(ソ連, Paton 研究所)

および偏向系を組み込んだ電子銃を用い、これを溶解室から離れた部分にとりつけ、電子銃からでた電子線がちょうど通る程度の細い孔を介して電子銃室と溶解室とを隔て、それぞれを別の排気系で排気する。したがって溶解中に放出されるガスや金属蒸気によって溶解室の真空度が低下しても電子銃室の真空度は高く保持され、グロー放電が生ずる心配はない。この種のEBM炉は v. Ardenne 研究所、National Research Corp.、日本真空技術、Alcatel、Heraeusグループなどによって開発が進められてきた。写真1は4個の電子銃を備えた EBM 炉であり、全出力は500 kW であるが、通常は250~300 kW で操業され、鑄型室は2個ある。写真2は1.7 MWの電子銃を備えた v. Ardenne の EBM 炉であり、溶解材は両側から水平に供給され、直径30 inの10 tの特殊鋼鑄塊が生産されている。

図7は多目的用の EBM 炉であり¹⁸⁾¹⁹⁾、各250 kW の電子銃6個を備え、種々の方法(消耗溶解、炉内溶解、スカル溶解など)によって鑄塊をつくることができる。溶解原料はどんな形状のものでも使用でき、合金元素の添加も可能である。操作真空度は普通10 μHg 程度であり、るつぼを取換えることにより図8に示したように鑄物にも適用できる。この場合、電子線



Pierce-type electron beam gun

図6 電子線衝撃溶解法

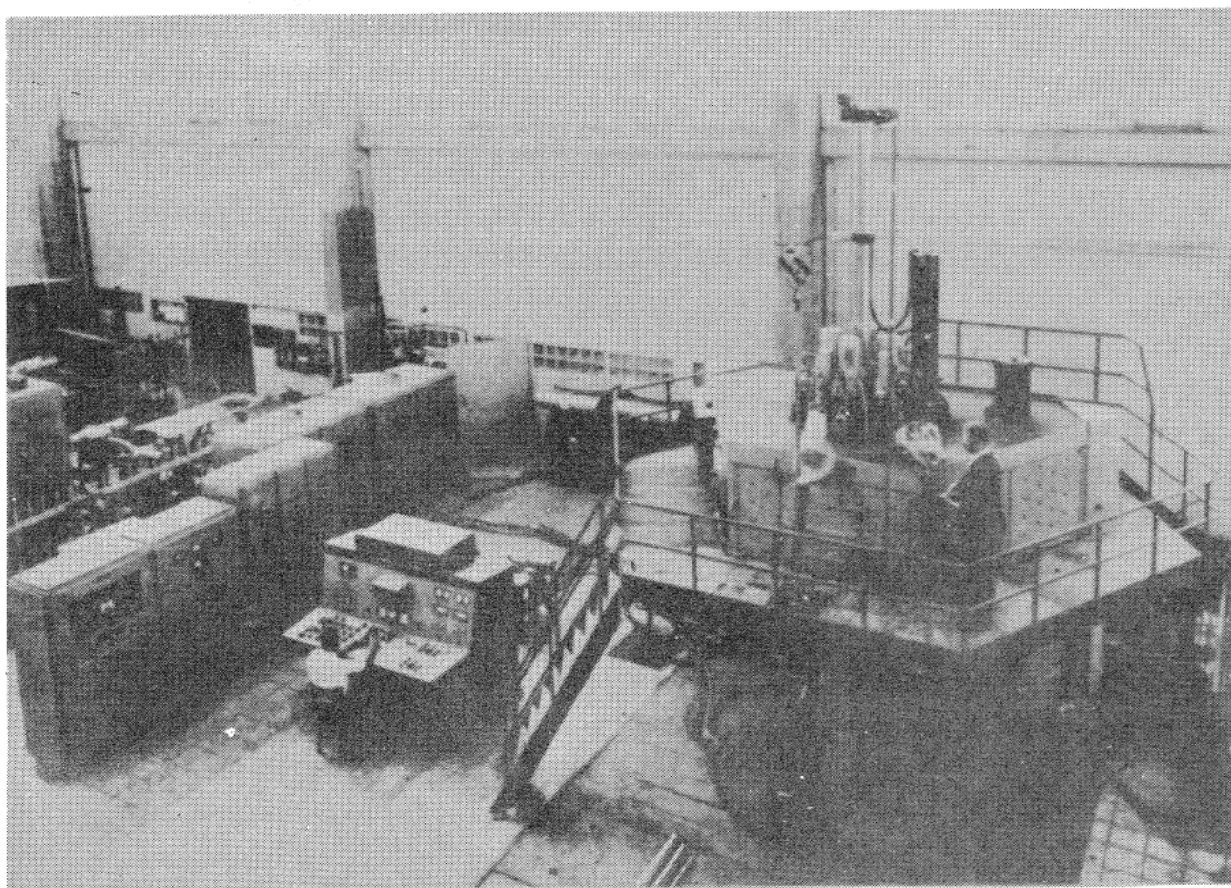


写真1 500 kW電子線衝撃溶解装置 (v. Ardenne)

を注入流や鑄型内にも照射し、鑄込温度の調節をおこなうことができる。

AIRCO 法

この方法は Airco - Temescal 社で開発された連続精錬法であり、VIMとEBMとを組合せたものである。15 t 炉の構造を示すと図9のとおりであり、VIM炉、保持炉、電子線照

射精錬炉および鑄込装置からなっている¹²⁾。

VIM炉は容量15 t、4500 kWであり、原料の溶解と予備精錬をおこない、溶鋼を耐火物で内張りした桶を通して保持炉内に移す。つぎに保持炉から溶鋼を連続的に同鋼種のスカルを上張りした銅製の水冷精錬炉に流す。精錬部は前段炉および4段炉よりなり、溶鋼はここで高真

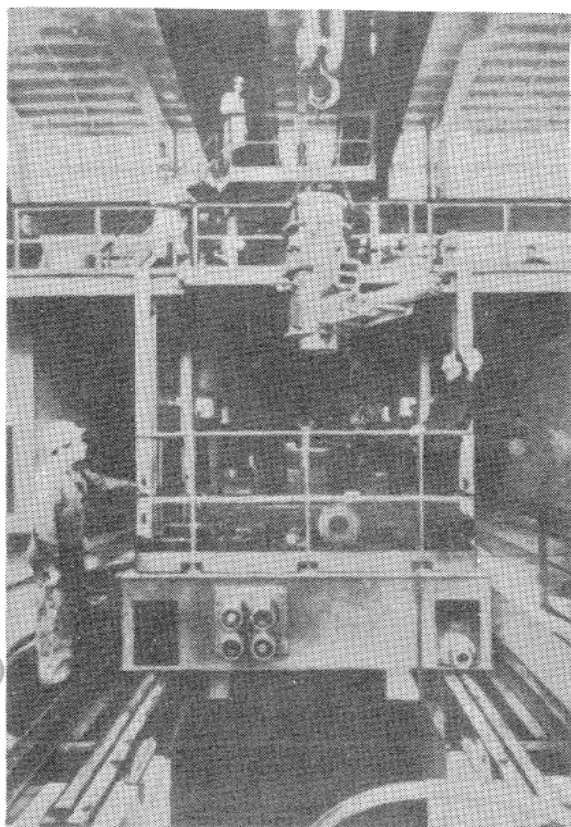


写真2 1.7 MW電子銃 (v. Ardenne)

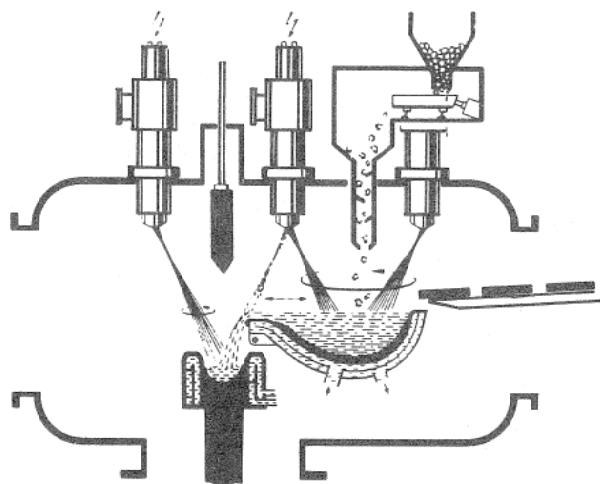


図7 多目的電子線衝撃溶解装置 (連続鋳造方式)

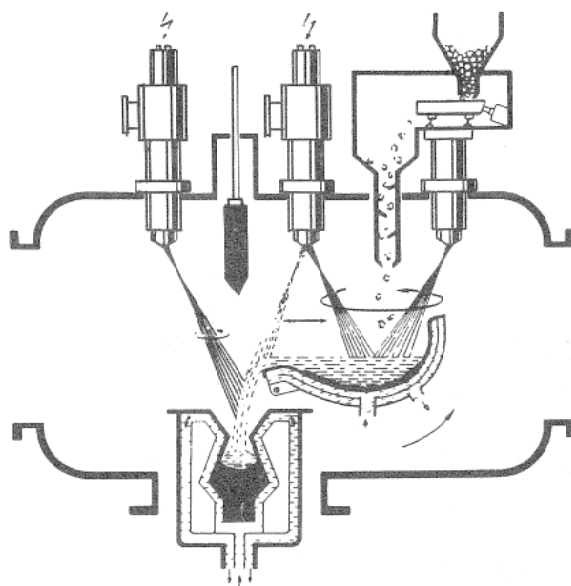


図8 多目的電子線衝撃溶解装置 (鋳型鋳造方式)

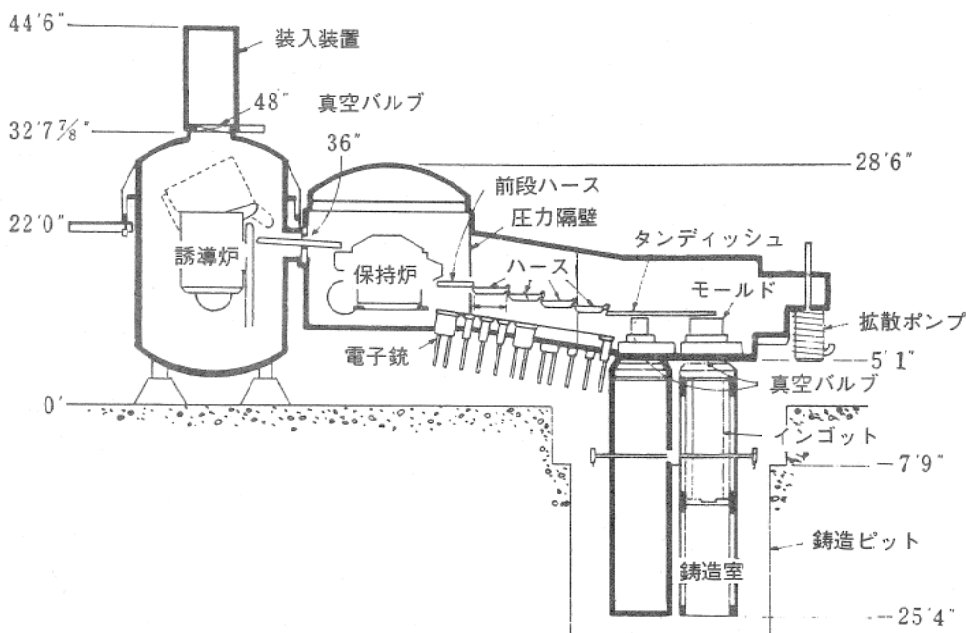


図9 AIRCO TEMESCAL社の真空誘導溶解—電子線衝撃加熱設備

空にさらされ、電子線で加熱される。電子銃は 18 個装備されており、精錬部には隔壁があり、保持炉と前段炉の部分は $5 \sim 10 \times 10^{-3} \text{ mm Hg}$ 圧、あとの 4 段炉と鑄型部分は $10^{-3} \sim 10^{-4} \text{ mm Hg}$ 圧に保持される。この精錬炉では真空にさらされる溶鋼の表面積が非常に大きく、しかも電子線によって局部的に高温に加熱されるため、その付近の溶鋼の動きが大きく、精錬効果もきわめて大きくなる。したがって蒸気圧の大きい不純物元素はほとんど蒸発して除去される。精錬炉を通過した溶鋼はタンディッシュを通過して連続鑄造方式によって鑄型内に注入される。鑄型は通常 2 個あり、交互に切換えて使用し、また鑄型部にはホット・トッピング用の電子銃がそれぞれ 2 個ずつ装備されている。この装置の場合、電力原単位は $1100 \sim 1300 \text{ kWh/t}$ であり、VIM や VAR の場合と同程度かやや大きい程度であるといわれている。

4. その他の特殊溶解・製錬法

EBM 法における操作真空度の範囲をもっと拡げようとする試みの一つにプラズマを用いた (1) プラズマ電子線溶解法²⁰⁾ と (2) 冷陰極電子線溶解法²¹⁾²²⁾ とがある²³⁾。前者はいわゆるホロー陰極グロー放電によって発生する大電流、低電圧でしかも磁氣的に閉じこめられた電子を加熱源に使用する方法であり、陰極には Ta などを用い、イオン衝撃によって $2300^{\circ} \sim 2400^{\circ} \text{ C}$ に保持し、高周波電圧を重畳して放電させる。図 10 はその 1 例であり、ホロー陰極の穴から Ar を流出させ、陰極と溶解材および熔融金属 (陽極) との間で低圧 Ar 放電をおこして溶解する装置であり、中程度の真空度で金属の溶解をおこなうことができる。後者は制御電極を有する冷陰極を使用する方法であり、おもに溶接装置などに用いられる。いずれも従来の EBM 炉では不可能で $10 \sim 10^{-2} \text{ mm Hg}$ 圧下で金属を溶解することができる。

そのほか金属を溶解する場合、真空下では不純物元素を効果的に除去しうるが、設備費が高く、また合金元素の蒸発による損失が大きいという不利な面もある。したがって場合によっては不活性ガス雰囲気中で溶解することが望ましい場合もある。そのような場合にプラズマ・ア

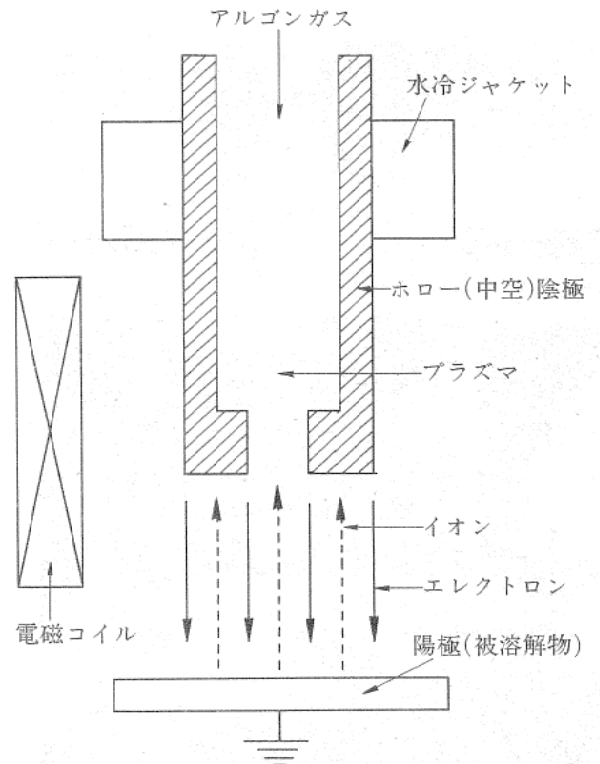
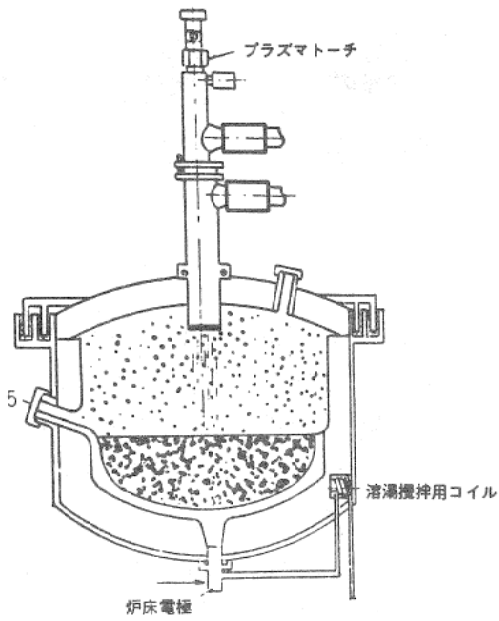
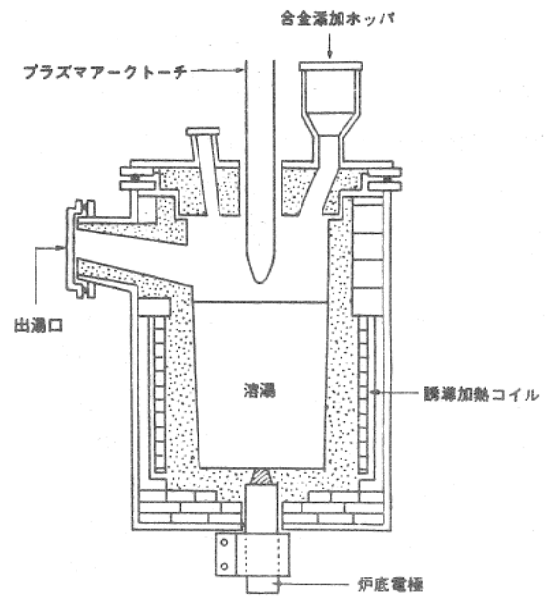


図 10 プラズマ電子線溶解装置 (Hot-hollow cathode discharge electron beam furnace) の概略図

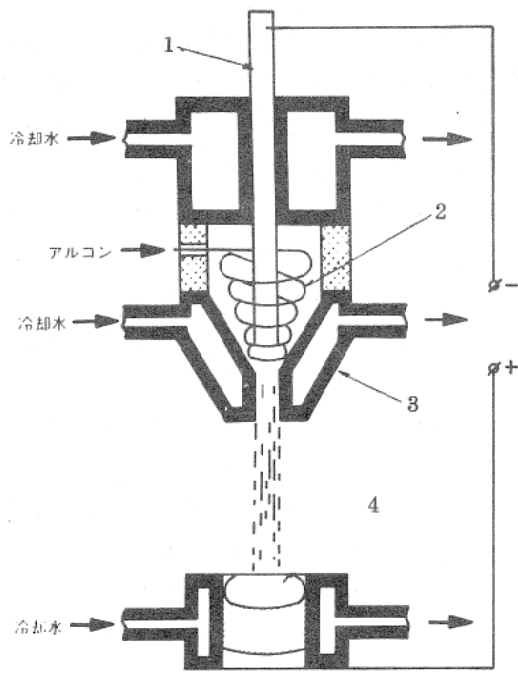
ークを用いることができる。それには W または W-Th 合金陰極のまわりを水冷銅ノズルで覆ったトーチを用い、陽極との間に直流アークを発生させ、アーク柱に陰極とノズルの間隙から不活性ガス (Ar) を吹きつけ、アークにガス・ピンチを加えてアークを高温安定化し、プラズマ・ジェットを噴出させる。この場合、移行型と非移行型とがあり、移行型では炉床や熔融金属または溶解原料を陽極として両極間にプラズマ・アークを発生させて金属の溶解をおこなう。非移行型は水冷銅ノズル電極と陰極との間に直流アークを発生させ、さらにこのノズルと熔融金属との間に交流アークを重畳させる方式である。一般に移行式のほうが熱効率がすぐれているので、溶解にはほとんどの形式が採用されている。図 11 (a) は Union Carbide Corp. のプラズマ・アーク炉²⁴⁾、(b) はプラズマ・アークと誘導加熱を組合せたプラズマ誘導炉²⁵⁾、(c) は水冷銅のつぼ中で金属を再溶解して精製する溶解炉²⁶⁾、(d) は溶解しようとする金属を陽極すなわち消耗電極とする溶解炉²⁷⁾である。



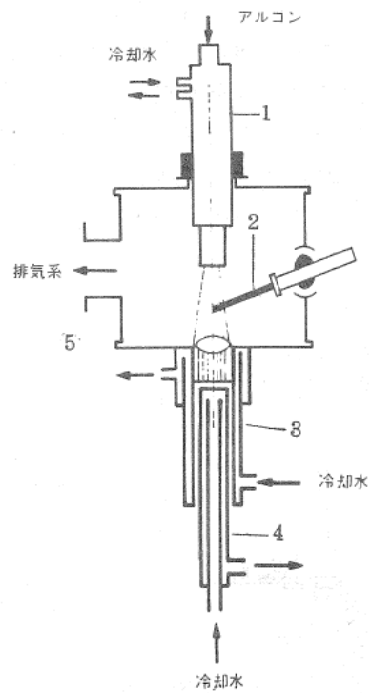
(a) プラズマ・アーク炉(Union Carbide社)



(b) プラズマ・アーク誘導加熱炉(大同製鋼)



(c) プラズマ・アーク炉(Paton研究所)



(d) 消耗電極式プラズマ・アーク炉(チニコ)

図 11. 代表的プラズマ・アーク溶解炉

III. エレクトロ・スラグ溶解法 (ESR)

この方法はエレクトロ・スラグ溶接法²⁸⁾²⁹⁾の原理にもとづいて1954年頃からソ連のPaton研究所で開発がすすめられ、1957年に完成された技術であり、最近では広範囲の特殊鋼の生産に適用されており、その規模も大きくなり、数10tの鑄塊がつくられている³⁰⁾³¹⁾³²⁾³³⁾³⁴⁾。

ESR法の設備は図12に示したようにVAR法の装置とよく似ており、水冷式の銅または鋼製の鑄型と定盤、消耗電極およびその昇降装置、鑄型の引出し装置などからなっている。水冷鑄型底部の定盤上に点弧板をのせ、その上にスラグを置き、消耗電極の先端と点弧板との間にアークを発生させ、その熱によってスラグを融解する。スラグ浴が形成されたら、消耗電極の先端をスラグ浴中に浸漬し、溶解作業を開始する。この場合、VARとことなり、消耗電極の溶解における熱源はスラグ浴中を流れる電流の抵抗熱であり、これによって電極の先端がとけ、溶鋼粒が溶融スラグ層を通過して下部に滴下し、鑄型内に集って溶鋼プールを形成し、うすいスラグ層につつまれたまま逐次凝固していく。溶解条件が安定な段階に達すると熱的に準平衡状態に達し、溶鋼プールの形状と深さがほぼ一定に

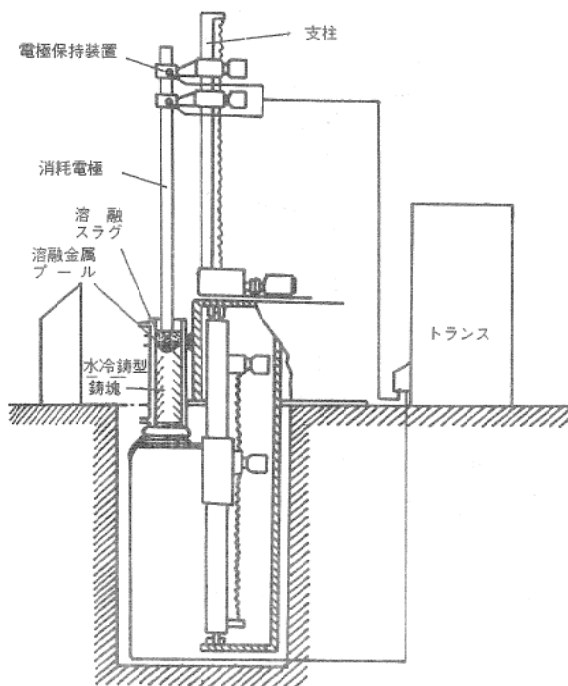


図12 エレクトロ・スラグ溶解装置

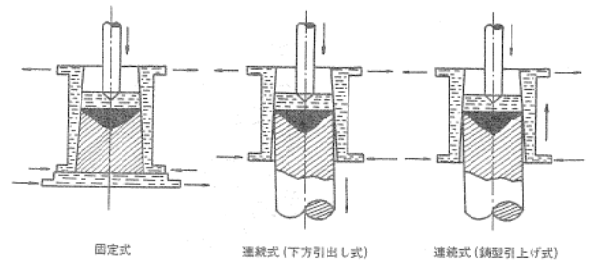


図13 エレクトロ・スラグ溶解法の形式

なるので、溶鋼と溶融スラグ間の反応および溶鋼の凝固条件もほぼ定常状態になる。消耗電極はVAR法の場合と同様に鍛造材、圧延材あるいは鑄造材が用いられ、断面は丸形でも角形でもよい。溶解形式には図13に示したように固定方式と連続的に鑄塊を下方に引出す方式、また鑄塊を固定し、鑄型を上方に移動する方式がある。水冷鑄型の中央に水冷式の中子(なかご)を置き、その周囲に消耗電極を配置して中空鑄塊をつくることもできる。VAR法とことなり、真空排気系を必要とせず、交流を使用することができるので、設備の構造と電力供給の方法が非常にかんたんであり、また交流を使用するとスラグ浴を通過する溶鋼粒にいわゆる“electro-capillarity vibration”がはたらき、溶融スラグによる大きな精錬効果が期待されるので、この点からも交流のほうが直流よりもよい。電力は溶解炉の容量によってもことなるが、通常40~80Vで電極断面1cm²あたり10~60Aが標準である³⁵⁾³⁶⁾。

ESRにおけるスラグは、(1)電気的な抵抗発熱体であり、溶解時の熱の供給源としてはたらく、(2)溶鋼を覆い、外気および鑄型から溶鋼を保護するとともに(3)溶鋼を精製および浄化する役割を果すので、スラグの選択は非常に重要な問題である。それにはまず適当な電気伝導度を持ち、操業温度(1700°~1800°C)下において酸素ポテンシャルの小さい安定なスラグであることが必要である。一般に使用されているスラグの成分組成の1例を示すと表1のとおりである³²⁾³⁴⁾³⁷⁾。スラグの使用量は鑄塊重量の3~5%程度であり、溶解の進行とともに鑄塊と鑄型との間に形成されるスラグ層に消費される程度のスラグを溶解中に適宜に補充すればよい。

表1 スラッグの化学成分組成(%)

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MnO	CaO	MgO	Na ₂ O K ₂ O	FeO	CaF ₂	S	P	
AN-8	33-36	11-15	21-26	4-7	5-7	—	<1.5	13-19	<0.15	<0.15	
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	19-23	7-9	12-15	11.5-15	1.3-1.7	<1.0	20-24	<0.05	<0.05	
AN-348A	41-43	<4.5	34-37	<5.5	5.5-7.5	—	<1.0	3.5-4.5	<0.15	<0.15	
FZ-7	46-48	<3.0	24-26	<3.0	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	—	30-40
ANF-1	<5	—	—	—	—	—	—	>92	<0.10	—	TiO ₂
ANF-7	—	—	—	20	—	—	—	80	—	—	
ANF-6	—	35	—	—	—	—	—	65	—	—	
48-OF-6	<4	20-27	0.3	16-23	30	—	<1.5	45-60	<0.05	<0.04	

IV. 溶鋼の2次精錬法

1952年に大形鍛造用鋼塊の水素による白点欠陥を防止しようとする立場から、主として脱水素を目的とした溶鋼の大規模な真空処理技術が確立され、熱処理工程の合理化に画期的な成果をあげるとともに、これにより大形鋼塊の質的健全性が保証されるようになり³⁸⁾、それ以来、鋳鍛鋼材はもちろんのこと圧延材にも広く適用されている³⁹⁾。この種の方法は大気中で溶製した多量の溶鋼を出鋼以後の工程で真空処理して脱ガスし、同時にそれに付随した精錬をおこなおうとするものであり、一般に真空脱ガス法とよばれている。これにはその機構上いろんな形式のものがあるが⁴⁰⁾⁴¹⁾⁴²⁾、操業上の立場から分類すると表2のとおりであり、なかにはこれらの方法を組合せて、さらに真空処理効果の向上を企図した方法もある。しかしながらこれらの方法は、いずれもその機構上、温度低下が比較的に大きく、真空処理時間にも限度があるので³⁹⁾、さらに高度の精錬を望む場合には若干の改良が必要である。

一方、今世紀後半から現在にかけて特殊鋼の分野における製造技術の進歩は非常にめざましく、酸素転炉による特殊鋼の製造とその量産化に対処し、(1)電弧炉製鋼においても設備の大形化とともに高電力操業技術がとり入れられ、量産体制の基盤が確立されるとともに、一方で

は(2)全スクラップ装入や還元鉄装入による操業が可能であるという柔軟性と、さらに(3)2次精錬技術の進歩により、電弧炉を能率のよい溶解または1次精錬の専用炉として使用しようとする契しが大きくなってきたこと、などにより電弧炉製鋼はいまや特殊鋼の量産プロセスとしての確固たる地位を築きつつある。

また耐火物工業の進歩とともに取鍋の内張りに酸素ポテンシャルの小さい塩基性耐火物やジルコン質、アルミナ質耐火物が使用されるようになり、取鍋における製錬を積極的にこなえるようになってきた。とくにスライディング・ノズルの導入により、従来のようにストッパーの組立とノズルの設置に取鍋をいったん冷却するという工程が省略され、取鍋の熱間繰返し使用が可能となり、生産性が向上するとともに取鍋の内張り寿命も非常に向上した。さらにこれに加えて電磁誘導やアークによる加熱方式ならびに電磁誘導やガス吹込みによる攪拌技術が積極的に採用され、2次精錬技術が非常に進歩した。このような取鍋精錬法によって、塩基性スラッグや脱硫剤を用い、S量が50ppm以下の低硫鋼も容易に製造しうるようになった。この種の代表的な方法にはASEA-SKFプロセスがある⁴³⁾⁴⁴⁾。

また真空中における酸素吹錬や不活性ガスで希釈した酸素を用いて溶鋼を吹精し、低C領域における脱炭を効果的かつ能率的におこなう方

表2 溶鋼の真空脱ガス法

出鋼過程において溶鋼を真空脱ガスする方法

出鋼脱ガス法 (Tap-degassing)

二重脱ガス法 (Double degassing)

取鍋内の溶鋼を真空脱ガスする方法

取鍋脱ガス法 (Ladle degassing)

攪拌取鍋脱ガス法 (Ladle degassing by stirring) *

流滴取鍋脱ガス法 (Stream degassing in ladle)

真空吸上げ脱ガス法 (Vacuum lifter degassing, Partial degassing, Dortmund-Hörder degassing) **

循環脱ガス法 (Circulation degassing) ***

溶鋼を鑄型内に注入する場合に脱ガスする方法

真空鑄造法 (Vacuum casting, Stream degassing in mould)

Gero法 (Simple vacuum casting)

U.S.Steel法 (Vacuum casting by turn table)

台車真空鑄造法 (Vacuum casting by car)

鑄型内の溶鋼を真空脱ガスする方法

鑄型脱ガス法 (Mould degassing)

* 攪拌取鍋脱ガス法には磁気攪拌法とガス攪拌法とがあり、前者はStokes法、後者はFinkl法ともよばれている。

** 一般にDortmund-Hörder法、D-H法という。

*** Ruhrstahl法、Ruhrstahl-Heraeus法、R-H法ともよばれている。

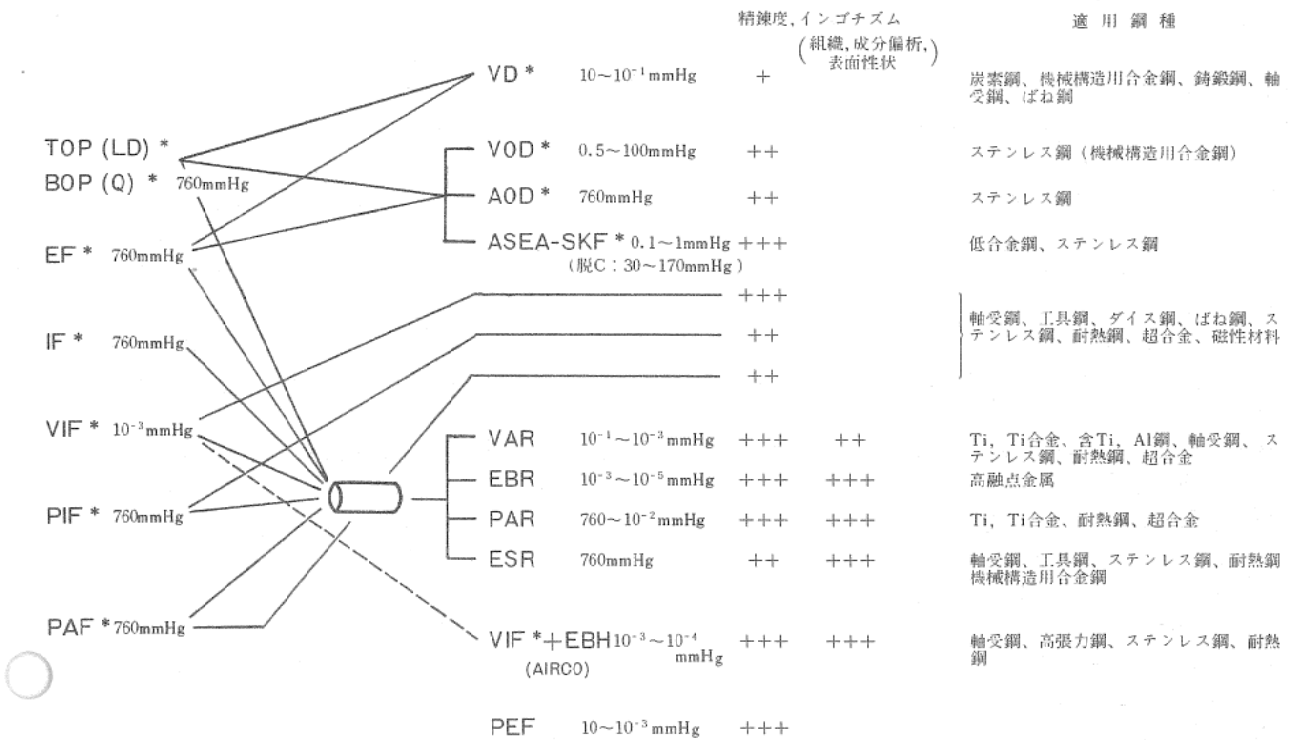
法が開発され、低C高Cr鋼が合理的にしかも経済的に安く生産しうるようになった。この種の代表的な方法にはVOD法(真空酸素脱炭法)⁴⁵⁾およびAOD法(アルゴン-酸素脱炭法)⁴⁶⁾⁴⁷⁾がある。

前述の真空脱ガス法においてもこのような技術がとり入れられ、たんに脱ガスだけではなく、非金属介在物や不純物の少ない清浄な鋼をつくる一つの積極的な精錬手段として鑄鍛鋼、機械構造用合金鋼、特殊用途鋼、圧延用鋼の製造に大きな成果をあげつつある。

V. 結 言

現在の製鋼精錬体系を示すと図14のとおりであり¹²⁾、従来の大気中における製鋼・造塊法を比較の基準にすれば、本稿に述べた方法はいずれもガス成分、非金属介在物ならびに不純物の少ない清浄な鋼の製造法として非常に重要な意義を有していることがわかる。

真空溶解法は(1)大気中溶解法では合金元素の添加が非常にむつかしく、成分組成の一定した製品をつくるのが困難であり、真空溶解によってはじめて工業的生産が可能な場合とか、



(注) TOP: 上吹酸素転炉, BOP: 底吹酸素転炉, EF: 電弧炉, IF: 誘導炉, VIF: 真空誘導炉, PIF: プラズマ誘導炉, PAF: プラズマ・アーク炉, VD: 真空脱ガス処理, VOD: 真空酸素脱炭法, AOD: アルゴン脱炭法, VAR: 真空アーク再融解法, EBR: 電子線衝撃再融解法, PAR: プラズマ・アーク再融解法, ESR: エレクトロ・スラグ再融解法, VIF+EBH: 真空誘導融解-電子線衝撃加熱法, PEF: プラズマ電子線溶解法
* 耐火物を使用するプロセス

図 14 現在の製鋼精錬体系

(2) 従来の方法では製造歩留りが非常に低く、真空溶解法を適用することによって加工性が向上し、製品歩留りがいちじるしく向上する場合、あるいは (3) 大気中溶解法で充分生産はできるが、真空溶解を適用することによって品質がいちじるしく向上し、信頼度が高まり、新たな需要が期待される場合、などに有利である。

また水冷金属鋳型やるつぼを使用する再溶解法 (VAR, EBR, PAR, ESR) は組織ならびに成分偏析が非常に小さく、非金属介在物の少ない均質な清浄鋼をつくるもっとも効果的な手段であるといえる。ESR 法は溶鋼がスラグに被覆されたまま凝固するので、表面肌の良好な鋳塊が得られるという特長がある。

2次精錬法は一般に量産特殊鋼の生産に適しており、VOD法やAOD法は低C高Cr鋼とくにステンレス鋼の量産プロセスとして経済的にかなり有利である。

いずれにしてもこのような特殊溶解・精錬法の選択に際しては、生産鋼種すなわち規格成分組成、品質要求、用途、経済性などをよく考慮し、また工場の立地設備条件に応じ、それらに

もっとも適した方法を適宜に採用することが必要である。

文 献

- 1) W.C.Arsem: Trans. Amer. Electrochem. Soc., 9 (1906), 154
- 2) Blast Furnace & Steel Plant, No. 2 (1964), 163
- 3) 成田貴一: “鉄鋼製錬の技術II” 鉄鋼工学講座 3, (1972), 朝倉書店
- 4) 高尾善一郎: 鉄と鋼, 45 (1959), 1202
- 5) F.Sperner, H.C.Child: “International Transactions Vacuum Metallurgy Conference” (1967), 73
- 6) H.Gruber: J.Metals, 10 (1958), 193
- 7) H.Gruber: Proc. Electr. Furn., 15 (1957), 110
- 8) 高尾善一郎: 金属, Feb. 1, (1964), 29
- 9) 西原守, 八木芳郎, 湯河透: 真空, 4 (1961), 228
- 10) R.F.Bunshah: “Vacuum Metallurgy” (1958), Reinhold Pub. Corp.

- 11) D. I. Broun : Iron Age, 170 (1952), 112
- 12) 成田貴一 : “特殊鋼の真空溶解について” 日本鉄鋼協会・日本金属学会関西支部、鉄鋼技術研究会、化学冶金研究会合同講演会、1973年8月、(神戸)
- 13) H. O' Bryan : Rev. Sci. Instr., 5 (1934), 125
- 14) R. Hulfgren : J. Appl. Phys., 11 (1940), 643
- 15) R. Bakish : J. Metals, No. 9 (1963), 654
- 16) R. F. Bunshah : J. Metals, No. 3 (1963), 210
- 17) H. Gruber, W. Dietrich, E. Erben, J. Heimerl, H. Stephan : “Transactions Vacuum Metallurgy Conference” (1962), 68
- 18) H. Gruber : Z. Metallkunde, 52 H5 (1961), 291
- 19) H. Gruber, H. Stephan, W. Dietrich, R. Lesser : “1961 Transactions 8th Vacuum Symposium and 2nd International Congress” (1962), 722, Pergamon Press
- 20) J. R. Morley : “Proc. 5th Annual Electron Beam Symposium”. (1963), 368
- 21) M. A. Cocca, L. H. Stauffer : “Proc. 5th Annual Electron Beam Symposium” (1963), 342
- 22) R. F. Bunshah : 真空, 7 (1964), 79
- 23) 林主税、村松宏司 : “真空冶金” 真空技術講座 9, (1965), 日刊工業新聞社
- 24) R. J. McCullough : J. Metals, Dec., (1962), 907
- 25) 野田浩、浅田千秋、江口勇、足立敏夫、林清英 : 電気製鋼, 4 (1970), 267
- 26) B. E. Paton, I. S. Prianishnikov : Avtomaticheskaya Svarka, Aug., (1966), 1
- 27) Iron Age, Oct. 9, (1969), 77
- 28) A. M. Horsfield : Brit. Welding J., 7 (1960), 337
- 29) E. Bishop : Welding & Metal, 27 (1959), 316 ; 461
- 30) B. E. Paton, B. I. Medowar, Yu. V. Latash : Iron & Steel, 34 (1961), 102
- 31) W. Richling : Neue Hütte, 6 Heft 9, (1961), 565
- 32) B. E. Paton, B. I. Medowar : Eng. Materials & Design, Oct., (1962)
- 33) B. E. Paton, B. I. Medowar : Avtomat. Svarka, H-11 (1958), 5
- 34) 成田貴一 : 日本金属学会会報, 5 (1966), 247
- 35) Qualitätserhöhung bei legierten Stählen durch Elektro-Schlacken Umschmelzen, Maschgis, Moskau-Kiev, (1960)
- 36) J. W. Latasch : Avtomat. Svarka, H-6 (1958), 76
- 37) 成田貴一、伊藤孝道 : 鉄と鋼, 51 (1965), 1948
- 38) A. Tix : Stahl u. Eisen, 76 (1956), 61
- 39) 成田貴一 : 神戸製鋼技報, 15 (1965), 200 ; 261
- 40) F. Harders, H. Küppel, K. Brotzmann : Stahl u. Eisen, 76 (1956), 1721
- 41) H. Tielmann, H. Mass : Stahl u. Eisen, 79 (1959), 276
- 42) 日本鉄鋼協会、特殊鋼部会報告 “鋼の真空溶解および真空脱ガス法の進歩” (1969)
- 43) M. Tiberg, T. Buhre, H. Herlitz : ASEA J., 39 No. 6/7, (1966), 87
- 44) V. Ardito, R. B. Shaw : Iron & Steel Eng., Aug. (1972), 58
- 45) H. Bauer, O. Etterich, H. Fleisher, J. Otto : Stahl u. Eisen, 90 (1970), 725
- 46) W. A. Krivsky : Met. Trans., 4 (1973), 1439
- 47) R. Aucott, D. Gray, C. Holland : J. West Scotland Iron & Steel Inst., 79 (1972), 97