

実験室用真空アーク溶解炉の試作*

(真空および雰囲気中アーク溶解法の研究—I)

武田修三**・永井直記**・湯川夏夫***・堀 文雄****

Trial Manufacture of a Vacuum Arc-Melting Furnace for Laboratories.

(Study on the vacuum and inert arc-melting—I)

Shuzō TAKEDA, Naoki NAGAI, Natsuo YUKAWA and Fumio HORI

Synopsis:

An arc furnace for melting non-refractory and refractory metals and alloys in vacuum or an inert atmosphere was described.

The furnace was designed by the authors with an emphasis placed on adaptability to diverse requirements of research; and can be used for arc melting with either a consumable or a non-consumable electrode. Besides, the specially designed sliding crucible gives prospect of preparing electroderods for the use of consumable melting.

Refractory metals, such as Ti, Cr and Mo as well as steels were successively arc-melted with the aid of this furnace.

The melting variables, such as arc current, voltage and stability as well as ingot quality and degassing were discussed based on the melting experience of various steels.

I. 結 言

金属材料の真空溶解鑄造法として、いわゆる高周波真空溶解に次いで、最近冷鑄型を用いた消耗および非消耗電極式真空アーク溶解鑄造法（以下真空アーク溶解法と呼ぶ）が注目されて来た。

真空アーク溶解法については従来多くの報告がなされているが^{1)~13)}、DYRKACZ¹⁰⁾によれば本法による溶製材料の特徴はつぎのごとくである。(1) ガス含有量が低く、介在物が少ない。(2) 清浄度の向上および偏析の減少の結果鍛造性が向上する。(3) 水冷銅ルツボを用いてインゴットの冷却が速いため偏析がきわめて少なく、インゴットの組織が微細化される。その結果耐熱合金などについて従来より大径のインゴットが溶製可能である。

(4) 機械的性質の中で室温および高温における靱性、疲労強度の向上がいちじるしい。このことから逆に必要とする靱性限界内で他の強度を改善することができる。

(5) 組織の均一性が高く、加工および熱処理に対する信頼性から、製品のバラツキは減少する。

筆者らは従来からの耐熱合金の系統的研究の一つとして、すでに Cr 基および Mo 基合金の研究に着手しているが、これらの合金は普通の方法では溶解不能であつて、それらの溶解を第1目的として、実験室向きにいろいろの点を改良工夫した真空アーク炉の試作を企図し

た。

実験室用真空アーク炉^{14)~16)}は上述の(1)高融点金属の溶製の他に(2)H₂、O₂およびN₂の含有量の低い特殊鋼、耐熱鋼の研究試料作製、(3)工業用炉を製作、稼働するさいの諸元の決定、(4)真空および各種雰囲気中におけるアーク現象の解明などを目的とするものであり、今後ますます多くの研究室で必要とするものと考えられる。

筆者らはこの研究に着手以来、一昨年度第1号試作炉を完成し、その後その使用経験に基づき改造炉(2号炉)を完成し、現在までに十数種の各種金属材料を溶製研究しているが、それらの資料を基に実験炉についての諸問題に触れたいと考える。

II. 消耗電極溶解法について

1. 溶解炉の構造

Fig. 1 は筆者らが現在溶解に使用しているアーク炉(2号炉)の構造外観図を示す。

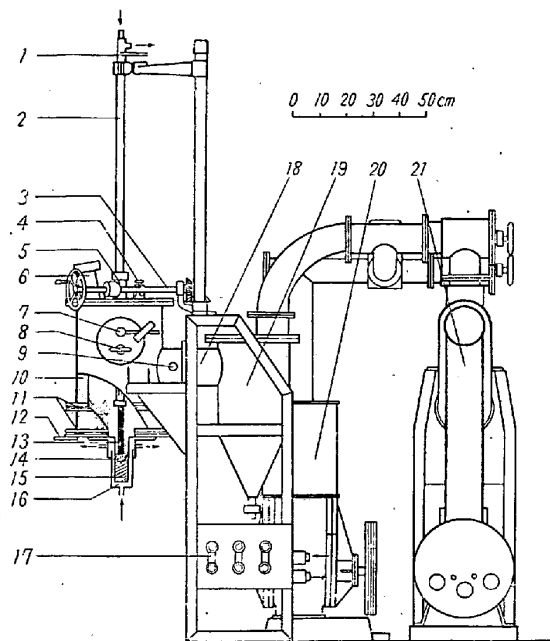
炉は図に見るごとく(1)炉体真空槽、(2)消耗電極保持棒(陰極)、(3)銅ルツボ(陽極)、(4)真空ポンプ

* 昭和34年5月本会東海支部講演会にて発表

** 名古屋大学教授 工博

*** 名古屋大学工学部

**** 日本特殊機械株式会社



- 1 Negative bus bar.
- 2 Stinger rod.
- 3 Electrode feeding mechanism.
- 4 Pressure release valve for safety.
- 5 Sliding seal.
- 6 Sighting port.
- 7 Partial pressure regulating valve and compound gage.
- 8 Geisler tube.
- 9 Vacuum gage.
- 10 Water jacket.
- 11 Insulating ring.
- 12 Crucible high current connection.
- 13 Electrode.
- 14 Arc.
- 15 Ingot.
- 16 Water-cooled copper crucible.
- 17 Cooling water valves.
- 18 Vacuum port.
- 19 Dust separator.
- 20 Rotary pump (2500 l/mn at 760mmHg)
- 21 Oil ejector booster pump (200 l/s at 0.1mmHg)

Fig. 1. Diagrammatic view of a consumable electrode furnace.

系および(5)電源より成る。

まず炉体真空槽は 18-8 ステンレス鋼を内張りした水冷ジャケットで、内径約 30cm のものである。その下部には銅ルツボの (+) と、炉体の (-) とを電気的に絶縁する中間部(水冷)が絶縁リング・パッキングを介して取り付けられる。

消耗電極(被溶解材)は(2)の水冷銅二重管の先端に銅製ホルダーにより取り付けられるが、これは(1)の頂部のウィルソン・シールを介して外部に貫通し、手動ギヤ機構により上下に動かすことができる。(2)を含めた炉の高さは 2.4m で、被溶解材(消耗電極)の最大長さは 500mm である。

(3)の銅ルツボには約 6mm 厚さの銅管を用い、内径 25~50mm φ のものを用意した。溶解が終つたなら

ば取外したルツボを反転して、インゴットを取出すわけであるが、このさい一般大型炉に比して直径収縮が小であるため、銅管の内側には長手方向に 2/100 程度の大きな勾配を付ける必要がある。

真空ポンプ系にはバックポンプとしてキネー型ロータリーポンプを、高真空用には油噴射ブースターポンプを用いている。当初 1 号機においては排気速度がロータリーポンプでは 500 l/mn, ブースターでは 50 l/s のものを用いて、アークの安定性、脱ガス効果などの研究を行なつたが、2 号炉においてはそれらの経験に基づき、それぞれ 2500 l/mn および 200 l/s のものに改変した。このポンプ系によつてブランクにおいて 10^{-4} mm Hg の真空度を保ち、溶解中は最大 2mmHg·l/s のガスを排気しつつ系内を 10^{-2} mmHg 以下に保つことが可能となつた。

電源には開路電圧 78V, 出力 40 KVA のユニオンメルト用直流溶接機 2 台を並列に接続して用い、最大 1000 A の容量を有する。電流調整および開閉は操作者の傍に置かれた遠隔操作器による。直流の陽極端子は炉体下部のクロムメッキをほどこしたルツボ取付板に直接取付けておき、ルツボ内の真空は O リングにより保たれると同時に、電気的にも接続される。

2. 溶解におよぼす諸因子の影響

良好なインゴットを溶製するには以下に述べるごとき諸因子が影響する。この諸因子は溶解材の組成によつても異なるが、筆者らが数十回の溶解により得た諸経験に基づき概説を試みよう。

(i) 電流密度: これはインゴットの良否、アークの安定性などに影響するもつとも重要な因子である。

Fig. 2 は溶解試験結果を電流密度、溶解速度および単位重量溶解に要する所要電力量(溶解効率)についてまとめたものである。この場合電流密度はアーク電流/電極棒断面積の値で示してあ

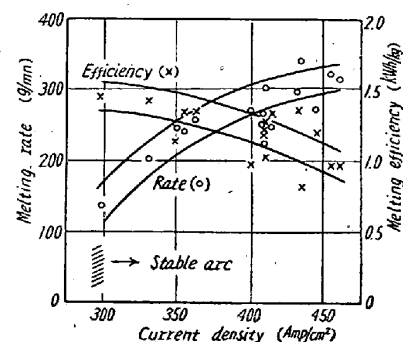
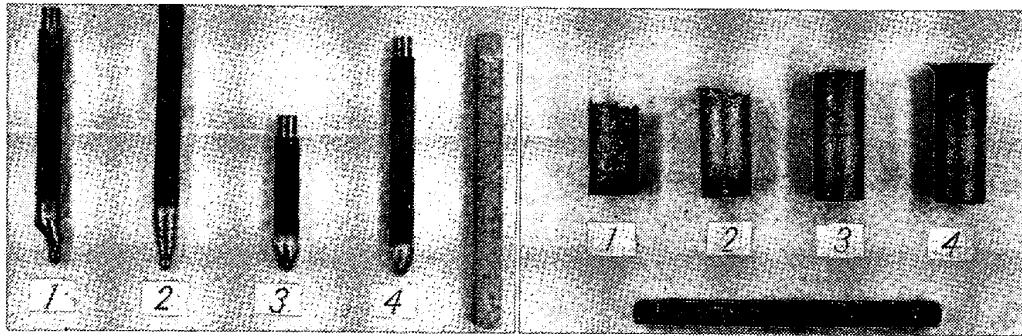


Fig. 2. Effect of arc current on melting rate and efficiency.

る。図示のごとく電流密度が大となるにしたがい漸次溶解速度は増大し、所要電力は減少する。これらの場合溶解中の炉内圧力は 1 号炉において $0.1 \sim 5 \times 10^{-2}$ mmHg, 2 号炉において $0.5 \sim 3 \times 10^{-3}$ mmHg であるが、溶解



(a) Shape of electrode burnt off.

(b) Surface of ingots.

Photo. 1. Effect of arc current, (1) 600A (2) 710A (3) 800A (4) 900A.

速度および効率の点では大きな差は認められなかつた。ただし、アークの安定性は電流密度により大きく変化し、炉内圧が $10^{-2} \sim 10^{-3}$ mmHg の範囲内であつて電流が約 300 A/cm^2 (16mm ϕ 電極で 600A) 以上であれば、真空度にあまり関係なく安定な放電電弧 (stable arc) を示すが、それ以下でははなはだしく不安定となり後述のごとく陰極点 (cathode spot) の駆上、あるいは分散アーク (diffused arc) などの異常アーク (wild arc) が発生する。したがつてインゴチズムの問題の他に、操作上の安定性を含まれば上の電流値の下限を割らぬように注意する必要がある。

Photo. 1 (a) および (b) は 0.55% C 炭素鋼につき電極棒の太さを 16mm ϕ と一定にして、一定電圧 (20V) でいろいろ電流密度を変えた場合の電極棒溶解の状態、および溶製されたインゴットの良否をそれぞれ示す。

(a) の各電極の中 (1) および (2) は電流密度が不足の場合の形状で、電極先端が drop by drop で溶解して行く様子が知られる。(3) および (4) は電流密度が大きく充分溶けた例で、とくに (3) では先端が一様に集中加熱して溶け、電極上部が不必要に過熱 (写真で黒く見える部分) されていない。

このときのインゴット表面 (Photo. 1 (b)) を見ると、(1) では電流密度がもつとも小さく充分な溶解速度が得られないため、鑄肌もざらざらしてはなはだ不良である。電流が大となるにしたがい鑄肌はじだいに良好となつて来ることが明瞭に分る。

Photo. 2 は電流が極端に少ない溶解例 (1 気圧, Ar 中) で, molten pool を形成するに足る溶解速度が得られず、溶けて滴下するとただちに凝固して完全なインゴットが得られない。

なお溶解後のインゴット頂部には、そのときの molten pool の形によるスカルを形成する。このスカルは電流が大になるとともに深くなり、さらに中心部に収縮孔を

形成する傾向が大となつてインゴットの歩留が悪くなる。これを避けるため工業用炉では一般に溶解終期において電流を漸減し、インゴット上部の冷却を緩徐ならしめるいわゆるホット・トップ法が採用されている¹⁷⁾。

Photo. 3 はホット・トップ法によつてスカルが減少する状況をインゴットの切断面について示す。

結局、電流密度の適否は溶解速度にいちじるしく影響し、したがつてできるインゴットの良否に大きく影響する。最適電流密度は溶解すべき材料の組成によつても変化するので、一般的にその値を決定することは困難であるが、後述の脱ガス効率およびインゴチズムの問題も考慮しつつ決定する必要がある。すなわち脱ガスを充分ならしめるには可及的アーク中の金属の移動を微細な流滴

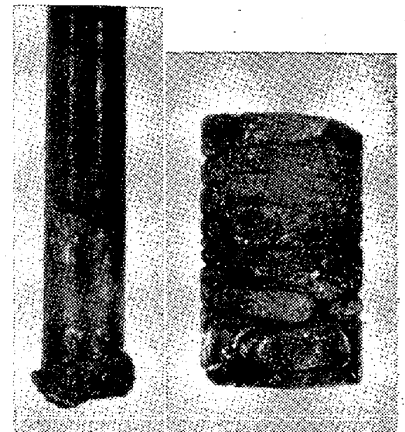
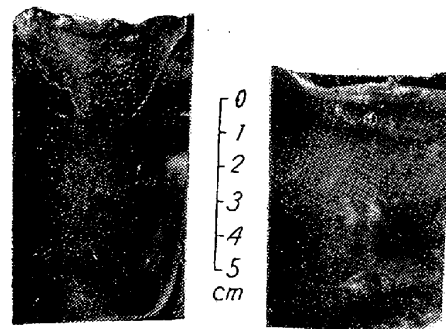


Photo. 2. The shape of an electrode burnt-off and a consolidated ingot melted by poor arc current, (SNC-2, 400A in 1atm.Ar).



(a)

(b)

Photo. 3. Upper portion of ingots, (a) constant current (800A) (b) hot-topped.

状で行なう、と同時に molten pool を長い時間保持しその表面積は大なるごとく、すなわち電流密度を大にすれば良いが、インゴツムの点から見ると柱状晶が成長しやすく組織が粗大化する。ただし本炉のごとく小型であれば、ルツボの冷却が大であるため粗大化はあまり起っていないので、アークの定安性の面からも溶解初期には比較的大電流 (900~800A) をとり、末期の約 30 s 内で電流を 700A 程度まで漸減保持し、そこで溶解を打ち切るようにすれば、いずれの場合でもほぼ完全な溶解ができる。なおアルゴン雰囲気を用いる場合は真空中におけるより電流は少なくて良い。

(ii) アーク電圧: 一般にアーク内における電圧降下は両極面における陰極降下 (cathode drop) と陽極降下 (anode drop)、および電弧柱 (arc column) 内におけるプラズマ降下 (plasma drop) より成る¹⁸⁾¹⁹⁾。自然電弧および真空電弧の研究によれば、一般に陰極および陽極降下量は雰囲気にはあまり影響されないが、プラズマ降下すなわち電弧柱部の電圧勾配は真空度により大きく変化するといわれている^{20)~23)}。他の条件が同一ならばこの勾配は真空度が高いほど低くなり、したがって真空度が低い場合はアーク長に比例した明瞭な電圧変化が現われるが、高真空の場合は電圧変化は小となる。

本炉の場合、一般にアーク電圧は $20 \pm 2V$ の範囲で、その場合アーク長は 10~15mm 程度と推定される。

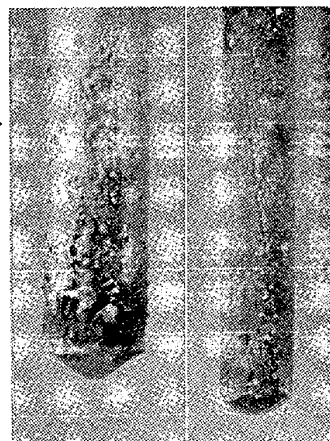
(iii) アークの安定性および side arc: 既述のごとく、アークの安定性は第 1 にアーク電圧、真空度により左右されるが、低電圧一大電流にするのがアーク安定化の必須条件である。前述のごとくアーク電流が小さく、さらに炉内真空度が $5 \times 10^{-2} \text{mmHg}$ 以上に落ちたときにしばしばいわゆる side arc が発生する。この side arc は別名 glow discharge とも呼ばれるが、アーク観察の詳細な研究^{20)~22)}によるとこの名称は実は不適當で、あたかも“glow”のごとく見えるが、実際はアークの電弧柱が消失し、陽極点および陰極点がそれぞれ単独に発生している diffused arc と見るべきである。不安定アークにおいては上の陰極点が電極棒上で諸々に高速で移動し、一見上方に駆上する状態となる。

Photo. 4 の (a) および (b) はこのような side arc が発生した状況を示し、電極棒側面には cathode spot が駆上しつつ、その部分を熔融した痕跡が残っている。このような状態で溶解を続けるとさらに真空槽内でも side arc を起し、絶縁部および真空ゴムパッキングを損傷するにいたる。

真空アーク炉におけるアークは主として、ガス、揮発

性金属および組成金属蒸気によるものと考えられるが、電流が小さすぎるときは金属蒸気がいちじるしく減少し、ガスイオンによる放電が主として起るため、このような不安定性が生ずるものと考えられる。

電流が充分大なる場合は不安定アークは、炉内真空度が $5 \times 10^{-2} \text{mmHg}$ 以下になると急に安定化し、以後真空度とともに安定度を

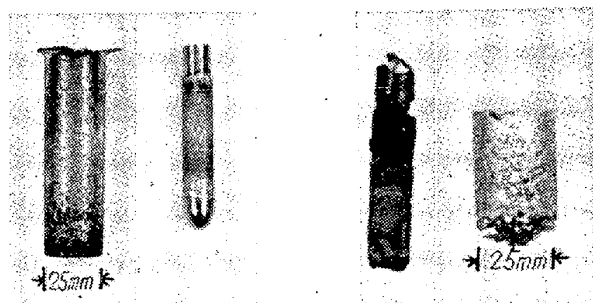


(a) (b)
Photo. 4. Side-arced electrodes.

増す²²⁾²³⁾。しかし、アークが発生しているルツボ内の真空度は炉内における測定真空度よりはるかに低く、理論的計算⁷⁾ およびシュミレーターを用いて実測した結果²⁴⁾²⁵⁾を総合すると、約 2~6 倍の圧力を示している。これは電極棒とルツボの間隙をなすリング状断面を有する管のコンダクタンスによるため、GRUBER²⁷⁾は過大な排気速度の不要なことを指摘している。

したがってコンダクタンスを大にし、ルツボ内の真空度を高めるためには、電極棒とルツボ管の断面積の比 (size ratio) を小にすれば良いが、そうすると充分な長さのインゴットを得るための電極棒長が過大に必要となつたり、錆肌が不良となるため、size ratio はあまり小にはできない。

一方アークの安定性から見ると、GRUBER⁷⁾ はアーク長は必ず電極-ルツボ間隙より小にとらねばならず、したがって一般に直径 40mm 以下のインゴットの溶製は不可能といっている。筆者は実験室用試料として溶製可能な下限を確かめるべく直径 33mm および 25mm のルツボを用い、電極棒の太さをいろいろ変化させて溶解実験を行ない、遂に 13mm ϕ の鋼電極棒および後述の方法によつて作製した純クロムの 15mm 角の消耗電極棒



(a) 18-8 stainless steel (b) Pure chromium
Photo. 5. Consumable arc melted metal, melted in 25mm ϕ moulds.

によつて、25mmφのインゴットの溶製に成功した。

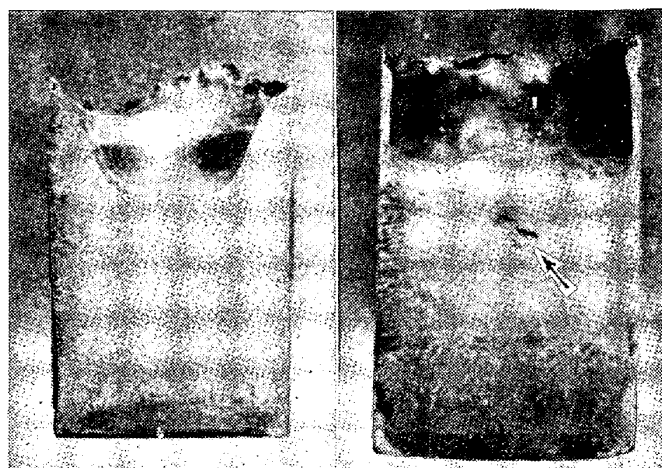
Photo. 5 (a) および (b) は得られたインゴットを示す。いずれの場合もインゴットの鑄肌はきれいであり、電極も理想的な溶解を示している。25mmφの真空アーク溶解インゴットは恐らく世界でも最小のものと考えられるが、このような場合、(1) 小型であるためルツボの冷却が完全である。(2) 電流を適当にさえすれば molten pool の温度も高まり、アーク自体の安定性を増す、などの理由で溶解可能となるものと考えられる。

なお、クロムによる上のような消耗電極法による溶解例も今まで見当らなく、筆者らが始めて成功したものである。

3. インゴチズムについて

真空アーク溶解によるインゴットの鑄肌は他の方法によるそれよりも一般にきれいではあるが、良好な鑄肌を得るためには電流密度を大にすること、size ratio を大にすることが提唱されている²⁾。このことは筆者らの実験でも認められたが、鑄肌をきれいにするために電流密度を大にすれば、溶解速度が速くなりインゴットの組織を粗大化することが知られた。

Photo. 6 は電流量を変えて溶解したインゴットの切断面を示したもので、(a) の 750 A 溶解に対して 950 A の (b) はスカルが大きく深くなつている。また溶解速度が大で一時に多量の湯ができてその温度が高く、凝固に時間がかかるため、凝固組織は普通のインゴットに似て縁部に柱状晶が発生しており、さらに矢印で示す大きな収縮孔がある。これに対して (a) の場合は組織も



(a) (b)

Photo. 6. Effect of melting rate (arc current) on ingotisms, (a) 132 g/mn (b) 366 g/mn. The arrow indicates shrinkage holes.

細くなつており、表面の鑄肌も良好である。

結局、鑄肌をきれいにするには電流密度を大にすれば良いが、さりとてあまり溶解速度を大にすると組織の粗大化を招くから、鑄肌を多少犠牲にしても緻密な組織を得るようにすべきであろう。

4. 真空アーク溶解に伴う諸元素の移動

既述のごとく、真空アーク溶解はきわめて高温(4000~5000°C)下における溶解であるので、ガス元素との化合物の熱解離を起し、一方介在物の浮揚作用と相まつて含有ガス量の低いインゴットが得られる。

筆者らが溶解を行なつた各種鋼材の内数種の炭素鋼および不銹鋼につき、溶解前後の成分元素およびガス元素

Table 1. Change of chemical composition

Steel type	Melting	Metallic elements wt%								
		C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Others
0.55C-a	Before	0.539	0.27	0.78	0.017	0.011	0.20	0.09	0.17	
	After	0.519	0.27	0.75	0.016	0.009	0.20	0.09	0.17	
0.55C-b	Before	0.556	0.31	0.66	0.019	0.015	0.31	0.13	0.13	
	After	0.554	0.28	0.62	0.020	0.015	0.33	0.13	0.13	
13 Cr	Before	0.134	0.19	0.45	0.035	0.013	0.15	0.38	12.69	
	After	0.118	0.20	0.41	0.035	0.008	0.19	0.36	12.51	
18-8	Before	0.134	0.45	0.88	0.030	0.010	0.08	7.87	18.19	
	After	0.126	0.46	0.79	0.033	0.006	0.12	7.98	17.81	
13 Cr	Before	0.157	0.20	0.76	0.035	0.007	0.19	0.29	13.04	
	After	0.152	0.17	0.68	0.040	0.010	0.18	0.28	13.04	
17 Cr	Before	0.091	0.30	0.43	0.033	0.010	0.20	0.30	17.02	
	After	0.078	0.31	0.24	0.033	0.008	0.18	0.29	17.00	
18-8-Cb	Before	0.05	0.59	1.37	0.030	0.005	0.11	10.70	17.70	0.74 Cb
	After	n.a. ⁽²⁾	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
18-8-Mo	Before	0.06	0.71	1.74	0.027	0.014	0.27	13.26	17.55	2.41 Mo
	After	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
18-8-Ti	Before	0.06	0.46	1.41	0.021	0.010	0.09	11.70	17.40	0.52 Ti
	After	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.

(1) (Electrode dia. in mm)/(Crucible dia. in mm).

の分析値を Table 1 に示した。

まず、成分元素について見ると、その分析値は真空アーク溶解によつてあまり大巾な変化を示さない。ただし C, Mn および S は僅かに減少する傾向を示す。このことは従来の結果¹¹⁾²⁶⁾²⁷⁾とも良く一致する。

つぎに Table 1 中のガス元素の H₂, O₂ および N₂ の分析結果とそれらより求めた脱ガス比を見ると、まず H₂ については 1 号炉の 10⁻²mmHg 台の圧力下では炭素鋼では 90~100% の脱水素比であるが、13% Cr 鋼では 70%, 18-8 鋼では 40% に減少している。しかし 2 号炉では真空度の向上のためにほぼ完全な脱水素が行なわれている。

つぎに O₂ について見ると 1 号炉では 34~56% で、2 号炉ではこれが 46~60% と向上していることが認められる。

N₂ ではもともと供試材には炭素鋼を除き、いずれも窒素量の高いものを用いているが、1 号炉では脱窒素はあまり充分とはいえず 4~13% 程度である。しかし、2 号炉においては 320~460 ppm (13~53%) 程度まで脱窒されていることがわかる。

一般に真空アーク溶解を行なうにあつては、溶解する材料のガス量はできる限り低くしなければならないといわれるが³⁾、上の結果からわかるごとく含有ガス成分は一定の割合で脱ガスされるものであるから、溶解素材としては高周波真空溶解材を用いるか、あるいは一度アーク溶解したものを再溶解するいわゆる double melting または triple melting を行なえば、さらに充分 of steels by vacuum-arc melting.

ガス元素の低い材料を得ることが期待される²⁸⁾²⁹⁾。

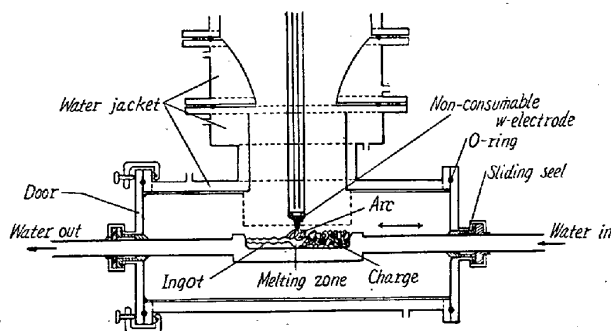
III. 非消耗電極溶解法について

1. 非消耗電極溶解用装置について

非消耗電極溶解は主として高融点金属のボタン試料、および消耗溶解に用いる電極棒材を作製するに用いており、とくに後者は筆者らの考案した特殊な水冷横引ルツボ法 (sliding water cooled crucible method) によるものである。

非消耗電極にはいずれの場合も thoriated W を用い、ボタン溶解用ルツボとしては中央に径 30mm、深さ 25mm の凹みを付した水冷銅ルツボを用いた。

つぎに棒状の試料(消耗溶解電極棒)を溶解するには、Fig. 3 に示すごとく横引きルツボを使用する。真空室は本体の場合と同様水冷ジャケットより成り、さらに図の



註: 図中 Non-consumable w-electrode は Non-consumable W-electrode の誤り

Fig. 3. Diagrammatic view of sliding a crucible.

Gaseous elements (ppm) and ratio of removal (%)						Size ⁽¹⁾ ratio	Note
H	ratio	O	ratio	N	ratio		
0.22 tr.	~100	41 27	34	125 109	13	16~38	Melted by No.1 furn. at ~10 ⁻² mm Hg.
1.43	94	59	56	94	4	18~38	"
0.09		26		90			"
1.20	71	163	40	464	7	16~38	"
0.35		98		432			"
1.15	40	107	42	456	13	"	"
0.69		62		396			"
3.2 tr.	~100	89 39	56	380 326	14	20~50	Melted by No.2 furn. at ~10 ⁻³ mm Hg.
4.1 tr.	"	134 54	60	980 460	53	"	"
5.8 tr.	"	97 52	49	680 320	53	18~50	"
4.1 tr.	"	69 32	46	720 380	47	16~40	"
3.7 tr.	"	44 23	48	520 380	27	"	"

(2) Not analysed.

ごとく内側には 18-8 ステンレス製内管を挿入し、側面扉は Oリングパッキングによつて真空を保っている。横引き水冷銅ルツボは $15 \times 15 \times 200$ mm の溝を付したもので、その両端は水冷銅管と結合して水平に保たれる。この銅管は両扉でウィルソンシールを介して外部に貫通し、手動ギヤ機構により水平方向に 200 mm まで可動である。

2. 非消耗溶解法について

ボタン試料を作製する場合は、ボタン用ルツボに原料金属を入れて W 電極との間に 18~20 V のアークを飛ばして溶解する。高融点金属の Cr, Mo 等とくに合金試料³⁰⁾の場合は一旦溶解したら取出し破碎し、数回溶解を繰返せば均質な試料が得られる。

つぎに消耗電極用棒の製造は Fig. 3 のルツボ溝内の上と同様原料（合金の場合は粉末を混和し軽くプレスしたものか、粒を適当に混合したもので、つぎに消耗法によつて再溶解するので偏析は極く少ないものと考えられる）を所定量盛る。アークを発生させたならばアーク長は 10~15 mm と一定にしたまま、視窓よりアークを監視しつつルツボを 5~10 cm/mn の速度で平行移動させる。ルツボ内の金属を連続的に溶解または焼結させることができる。雰囲気としてはアルゴンを 200~760 mm Hg 封入した方が加熱が充分行きわたりアークも安定である。



Photo. 7. View of a non-consumable arc on the sliding crucible.

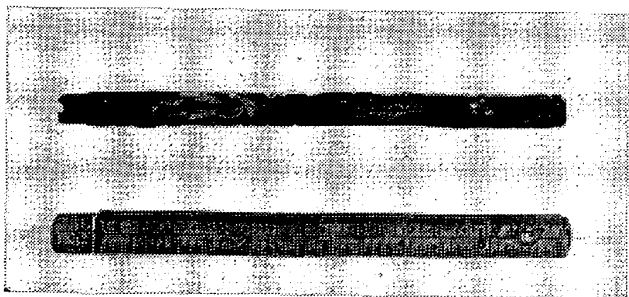


Photo. 8. Electrode of chromium manufactured in the sliding crucible.

Photo. 7 は Ti 溶解中のアークの状況を示す。アークは溶湯に対して尾を引いており、高温部の中心部 (arc column) と、周辺の主としてガス状物質より成るオーロラ部とに分れている。銅ルツボは高温アークの接触にもかかわらず安定で、電流 900 A 程度までは変化を認めない。筆者らの経験によると、この製造に要する電流は Ti では 400~500 A, Cr では 500~600 A, Mo では 800~900 A である。

Photo. 8 はこれらの一例として、上述の方法で溶製した純クロムの消耗電極用棒を示す。消耗溶解を行なうにはこれらを 2~3 本溶接して実施する。それを用いて溶製したインゴットは、Cr についてすでに Photo. 5 に示した。

とくに Cr, V のごとく粉末一焼結の方法が困難な材料のアーク溶解は一般に棒材の製造が困難であるため、振動式フィーダーなどにより金属原料を供給し W アーク溶解を行なう方法が取られている。これらは複雑な装置を要するが、筆者らの考案した方法では、いかなる脆い金属または合金でもそれを棒状に溶製することができ、さらにインゴットにまでなし得るもので、とくに今後高融点金属または合金の研究に活躍するものと期待される。

IV. 結 言

高融点金属および合金の実験試料の作製のため、まず実験室用アーク炉を試作し、これにつき構造、機構および操作上の諸条件を数十回の溶解経験に基づき調べ、これを基として改造炉を作製した。さらに溶解におよぼす諸因子の影響の解明を行なった。

とくに本炉は消耗、非消耗法の両法を同一炉で行なえるようにした独特のもので、筆者らの考案に基づく高融点金属の電極棒製造装置（横引きルツボ）を備え、今後この方面の研究に大いに役立つものと信じられ、広く利用されんことを期待する。

現在真空アーク溶解の工業化の進展とともに本炉のごとき実験室用アーク炉の国産、普及化が望まれているがこの一文が諸研究者の参考になれば幸いである。

本研究の実施にあたりいろいろ御協力を頂いた愛知製鋼株式会社および静岡県工業試験場花井、平井両工学士に厚く感謝する。なお、本研究は文部省機関研究費によつたことを付言して謝意を表す。（昭和35年10月寄稿）

文 献

- 1) C. A. DORMUS: Trans. Electrochem. Soc., 13 (1908) p. 347

- 2) W. SIEMENS: Brit. Patent, No. 4208 (1878)
- 3) H. GRUBER: J. Metals, 10 (1958) 3, p. 193~198
- 4) O. WINKLER: Z. Metallkunde, 44 (1953) p. 333~340
- 5) M. COOK and E. SWAISON: J. Inst. Metals, 89 (1959) 2, 161~173
- 6) W. E. KUHN: Arcs in Inert Atmosphere and Vacuum, Wiley (1956) p. 1
- 7) H. GRUBER: Z. Metallkunde, 47 (1956) p. 149
Arcs in Inert Atmosphere and Vacuum, Wiley (1956) p. 118~148
Symposium on Vacuum Technology, Pergamon (1957) p. 182~189
Vacuum Metallurgy, Reinhold (1958) p. 138~152
- 8) W. W. DYRKACZ, R. S. DEFRIES and R. K. PITLER: Arcs in Inert Atmosphere and Vacuum, Wiley (1956) p. 97~111
- 9) W. W. DYRKACZ: J. Metals, 9 (1957) p. 1513~1516
- 10) R. K. PITLER, E. E. REYNOLDS and W. W. DYRKACZ: High Temperature Materials, Wiley (1959) p. 378~387
- 11) H. C. CHILD and G. T. HARRIS: J. Iron & Steel Inst. (U.K.), 190 (1958) p. 414~431
Blast Furn. & Steel Plant, 47 (1959) 4 p. 384~398
- 12) 高尾, 草道, 八木: 鉄と鋼, 44 (1958) 11, p. 1294~1304
- 13) 高尾, 八木: 日本金属学会誌 (真空冶金特集) 24 (1960) 1, p. A23~28
- 14) M. HANSEN, H. D. KESTLER and D. J. MCPHERSON: Trans. Amer. Soc. Metals, 44 (1952) p. 518~524
- 15) M. L. NIELSEN and I. B. JOHNS: Rev. Sci. Instruments, 25 (1954) p. 596~598
- 16) Metallurgia, 57 (1958) 341, p. 163~165
- 17) D. R. CARNAHAN: Metal Progress, 74 (1958) 2, p. 100~102
- 18) 福田: 電弧 (物理学集書 17 卷), 河出書房 (1947) p. 204
- 19) W. FINKELNBURG and H. MAECKER: Handbuch der Physik, Berlin 22 (1956) p. 259
- 20) E. W. JOHNSON and F. R. ITOH: Symposium on Vacuum Technology, Pergamon (1956) p. 170~174
- 21) E. W. JOHNSON, G. T. HAHN and F. R. ITOH: Arcs in Inert Atmospheres and Vacuum, Wiley (1956) p. 19~40
- 22) E. W. JOHNSON: Vacuum Metallurgy, Reinhold (1958) p. 101~120
- 23) E. D. SAYRE and A. J. STOPH: Symposium on Vacuum Technology, Pergamon (1957) p. 175~181
- 24) J. W. SUITER: J. Electrochem. Soc., 105 (1958) 1, p. 44
- 25) S. T. NOESEN: Symposium on Vacuum Technology, Pergamon (1957) p. 150~156
- 26) G. M. GILL, E. INESON and G. WESBY: J. Iron & Steel Inst. 191 (1959) 2, p. 172~175
- 27) 沢村, 他: 鉄と鋼, 45 (1959) 12, p. 1334~1340
- 28) A. M. AKSOY: J. Metals, 11 (1959) p. 468~470
- 29) Staff report: Metal Progress, 74 (1958) 2, p. 94~99
- 30) 武田, 湯川: 日本金属学会, 1961年4月発表