

小型実験炉による脱ガス作用の実験*

(真空アーク溶解法の精錬効果に関する研究—I)

渡辺 哲 弥**

Experiment on Degassing Effect in a Laboratory-Scale Furnace.

(Study on the refining process of vacuum arc melting—I)

Tetsuya WATANABE

Synopsis:

The purpose of this study was to evaluate the refining procedure during consumable arc remelting in a 2000-A laboratory-scale furnace. Electrodes used for remelting were air-melted and cast ingots of Fe-Cr alloys and commercial steels AISI-304.

The results obtained were as follows:

(1) The carbon in alloys acted as a powerful deoxidizer in molten pool by $C-O$ reaction under the reduced pressure. It was presumed that the flotation of inclusions contributed to the deoxidation.

(2) The residual nitrogen content in a vacuum-arc-melted ingot was proportional to the initial nitrogen content in electrodes used.

(3) The removal of high vapor pressure impurities such as Pb, Sn, Cu by vaporization in vacuum arc melting were not done so successfully as in vacuum-induction-melting process.

(4) Arc melting in Ar and N_2 atmospheres was also carried out with N-155 electrodes, that contained 0.20% nitrogen as an alloying elements, could be remelted successfully without any trouble in a 1/4 to 1 atm Ar-gas chamber. On the other hand, in arc melting of AISI-304 in N_2 gas atmosphere, an extremely high-arc voltage was observed and there was a remarkable nitrogen absorption up to 0.25%.

(5) Melting current extremely influenced the macrostructure. Higher current was apt to cause a coarse dendritic structure. Lower current, however, caused a worse ingot surface.

I. 結 言

真空アーク溶解法はチタニウム、ジルコニウムなどの高融点活性金属の溶解手段として開発されたものである。その後鉄鋼材料にこの溶解法を適用した場合にも種々の効果のあることが注目され漸次普及せんとする段階にある。その精錬機構の特徴は

(1) 金属ルツボ中で溶解が行なわれるため耐火材料による汚染のないこと。

(2) 酸化物、窒化物などの電極材に含有される介在物のアーク・プラズマ中における熱解離あるいはこれらの浮揚精錬による除去。

(3) 溶融プール中における減圧下の $C-O$ 反応による脱酸反応。

(4) 微量不純物の蒸発による除去。

(5) 水冷された銅ルツボ中の凝固による鋼塊マクロ組織の健全化。

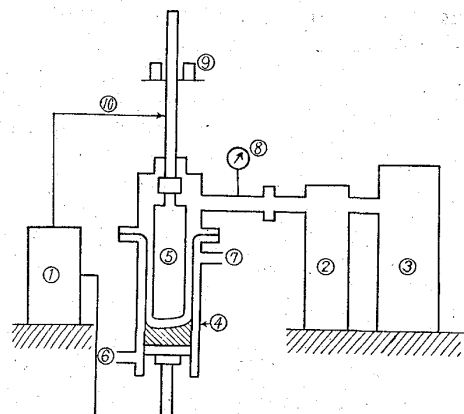
などがあげられよう。しかしながらその精錬機構の細部についてはいまだ系統的な研究報告も少なく、不明な点も多い。このため筆者は2000 Amp容量の試験室規模の真空アーク溶解装置を用い、主として鉄およびオーステナイト・ステンレス鋼を含む鉄-クロム合金について溶解し、炭素の精錬反応の上にあづかる役割、溶解する電極材の組成あるいは電極材中に含まれるガス含有量と脱ガス限界の関係、電極材中の合金成分、不純物の蒸發現象、マクロ組織と溶解条件の関係、アルゴンおよび窒素雰囲気中におけるアーク溶解の諸現象などの基礎的な要素について考察した。

II. 実 験 内 容

1) 溶解装置

* 昭和37年4月本会講演大会にて発表

** 日本冶金工業株式会社



- ① Selenium rectifier
- ② 10" oil-diffusion ejector-pump
- ③ Oil rotary pump. (Pumping speed 1400 l/mn)
- ④ Copper mould
- ⑤ Consumable electrode
- ⑥ Cooling water inlet
- ⑦ Cooling water outlet
- ⑧ Vacuum gauge
- ⑨ Direct motor for driving the electrode
- ⑩ Direct current feeder

Fig. 1. Apparatus for a laboratory-scale vacuum-arc furnace.

使用した溶解装置の原理図を Fig. 1 に示す。整流器はセレン整流器で直流側の最高出力 2200 A, 無負荷電圧 68 V の容量のものである。電極の駆動は電子管

式制御機構により一定アーク長による溶解が自動的に継続される。排気系は 10 吋油拡散エジェクター・ポンプ, 1600 l/mn 油廻転ポンプを直列したもので, ブランク時における到達真空度は $1\sim 3\ \mu\text{Hg}$ の排気能力を有する。

2) 脱酸, 脱窒反応

真空アーク溶解法の脱ガス効果は緒言においても述べたように熔融プール中における減圧下の平衡反応あるいは介在物の浮揚精錬効果があげられる。このため炭素量 Cr 量を変化せしめた純鉄および含クロム鉄合金, 実用合金として Ti, 窒素などを添加したオーステナイト・ステンレス鋼について真空アーク溶解を行ない, 炭素あるいは合金組成の脱酸効果におよぼす影響, 電極材の窒素量と脱窒効果の関係などにつき検討した。

電極材は高周波試験炉を用いた空气中溶解により, 約 $55\text{mm}\ \phi \times 600\text{l}$ の長い鋼塊に鑄造し, その表面をグラインダーにてスケールを除去した後真空アーク溶解に供した。真空アーク溶解の条件は溶解電流 2000 A, 使用した銅モールドの径は $80\text{mm}\ \phi$ である。えられた鋼塊は鋼塊中心部から試料をきり出し, ガス分析を含む分析試験に供し電極材組成と比較した。

Table 1. Operational data of vacuum-arc melting of Fe and Fe-Cr alloys.

Kinds of samples	Sample No.	Chemical composition (%)									Observed pressure (μHg)	Q-value ($l \cdot \mu\text{Hg/s}$)
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	N	O		
Pure-Fe	* A-1	0.011	0.01	0.28	0.004	0.010	—	0.09	0.012	0.0180	4~8	1,920
	A V-1	0.006	tr	0.05	0.004	0.012	—	0.10	0.012	0.0072		
	** A-2	0.095	0.08	0.28	0.004	0.008	—	0.07	0.013	0.0092	3~8	1,610
A V-2	0.091	0.05	0.22	0.004	0.011	—	0.08	0.012	0.0027			
13% Cr-Fe	A-3	0.183	0.16	0.36	0.004	0.008	—	0.07	0.016	0.0069	5~10	1,730
	A V-3	0.187	0.15	0.29	0.004	0.010	—	0.10	0.009	0.0046		
	B-1	0.019	0.36	0.50	0.009	0.008	0.08	12.80	0.024	0.0078	4~10	2,220
B V-1	0.010	0.36	0.36	0.008	0.006	0.10	12.89	0.018	0.0022			
18% Cr-Fe	B-2	0.113	0.25	0.44	0.009	0.008	0.10	10.56	0.023	0.0067	10	1,400
	B V-2	0.102	0.25	0.36	0.007	0.009	0.13	11.44	0.019	0.0033		
	B-3	0.232	0.23	0.42	0.010	0.008	0.09	12.80	0.031	0.0112	50	1,460
B V-3	0.215	0.19	0.34	0.010	0.009	0.12	12.85	0.023	0.0049			
18% Cr-Fe	C-1	0.046	0.31	0.44	0.008	0.006	0.10	17.00	0.030	0.0136	80	2,200
	C V-1	0.031	0.28	0.35	0.011	0.007	0.18	17.18	0.031	0.0043		
	C-2	0.116	0.34	0.45	0.010	0.008	0.13	17.66	0.027	0.0099	10	3,250
C V-2	0.115	0.33	0.37	0.013	0.008	0.14	17.80	0.016	0.0027			
18% Cr-Fe	C-3	0.204	0.27	0.42	0.010	0.007	0.11	17.57	0.024	0.0156	20	3,300
	C V-3	0.201	0.24	0.34	0.011	0.008	0.12	17.66	0.020	0.0034		

* Electrode

** Vacuum-arc-melted steel

Table 2. Operational data of vacuum-arc-melting of austenitic stainless steels.

Sample No.	Chemical composition (%)									Observed pressure (μ Hg)	Q-value ($l \cdot \mu$ Hg/s)
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	N	O		
* ** D-1 DV-1	0.014 0.006	0.11 0.08	0.25 0.22	0.002 0.004	0.013 0.014	15.06 15.18	16.61 16.79	0.069 0.067	0.0386 0.0053	8	7,200
D-2 DV-2	0.066 0.056	0.24 0.22	0.24 0.18	0.004 0.005	0.012 0.014	14.73 14.95	16.61 16.66	0.049 0.043	0.0313 0.0083	50~80	6,550
D-3 DV-3	0.229 0.196	0.03 tr	0.32 0.31	0.003 0.004	0.013 0.014	15.22 15.19	17.53 17.57	0.029 0.031	0.0409 0.0089	>100	7,110
E-1 EV-1	0.025 0.014	0.27 0.24	0.33 0.28	0.013 0.012	0.015 0.017	15.02 15.09	17.14 17.79	0.039 0.036	0.0140 0.0064	5~10	2,180
E-2 EV-2	0.029 0.016	0.30 0.28	0.35 0.36	0.013 0.012	0.014 0.016	15.02 15.02	17.88 17.79	0.053 0.062	0.0058 0.0046	5~10	300
E-3 EV-3	0.029 0.013	0.37 0.34	0.37 0.35	0.013 0.012	0.015 0.016	14.94 15.10	17.92 17.89	0.097 0.078	0.0155 0.0058	50	6,200
E-4 EV-4	0.025 0.012	0.38 0.36	0.32 0.31	0.013 0.013	0.014 0.017	14.99 15.06	17.42 17.89	0.163 0.109	0.0085 0.0040	>100	8,200

* Electrode

** Vacuum-arc-melted steel

Table 3. Operational data of vacuum-arc melting of stainless steels containing Ti.

Sample No.	Chemical composition (%)									Observed pressure (μ Hg)	Q-value ($l \cdot \mu$ Hg/s)	
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Ti	N			O
*F-1 **FV-1	0.061 0.056	0.29 0.30	0.44 0.37	0.011 0.011	0.007 0.008	0.13 0.16	17.92 17.93	0.51 0.52	0.020 0.021	0.0091 0.0028	4	1,400
F-2 FV-2	0.038 0.036	0.38 0.37	0.47 0.43	0.010 0.011	0.006 0.009	0.19 0.20	17.66 17.79	1.35 1.38	0.017 0.023	0.0115 0.0029	7	1,900
F-3 FV-3	0.043 0.042	0.42 0.43	0.57 0.51	0.010 0.010	0.006 0.008	0.17 0.20	17.14 17.97	1.80 1.90	0.017 0.013	0.0145 0.0057	4	1,950
F-4 FV-4	0.041 0.040	0.65 0.50	0.59 0.55	0.011 0.010	0.006 0.008	0.14 0.24	17.79 17.97	3.18 4.27	0.016 0.020	0.0130 0.0089	4	915
G-1 GV-1	0.057 0.057	0.38 0.37	0.50 0.46	0.010 0.011	0.013 0.017	12.88 12.89	18.41 18.15	0.16 0.12	0.075 0.059	0.0102 0.0048	10	2,750
G-2 GV-2	0.041 0.038	0.42 0.40	0.51 0.45	0.012 0.012	0.014 0.016	14.44 14.52	18.23 18.32	0.62 0.58	0.044 0.022	0.0076 0.0013	10	4,300

* Electrode

** Vacuum-arc-melted steel

Table 1 に純鉄および含クロム鉄基合金, Table 2 に窒素量を特に高くしたオーステナイト・ステンレス鋼 Table 3 に含 Ti クロム鋼についてそれぞれ電極材組成と真空アーク溶解せる鋼塊組成を対比して示した. 表中に示した排気量 Q value とは電極材と真空アーク溶解せる鋼塊中のガス成分の差から本実験における概略の溶解効率 0.5 kg/kA/mn を用いて, 単位時間当りの放出

ガス量を計算した値である.

真空アーク溶解中にガス放出があれば当然溶解真空度は劣化する. そこで溶解中に観察された真空度変化についてまず考察してみよう.

真空アーク溶解に際して炉内圧力が劣化するとアークが溶融プールと電極間で連続せずモールド外壁に分散しいわゆる "glow discharge" の現象を惹起する. この

状態が継続するとアークは不安定となり溶解効率は劣化するのみならずルツボ外壁を破る危険をとめない操業困難となる。glow discharge を起す臨界圧力は溶解電流、電極材質により若干移動するが50~100 μ Hg の order であろうと考えられている。

本実験の溶解中に観察された圧力値は大別して

a) 50 μ Hg 以下の正常な圧力値を維持して溶解しえたもの。

b) ガス放出がいちじるしく 50 μ Hg 以上あるいは break down 直前まで真空度が劣化したもの。後者の場合においては溶解中にはげしい沸騰現象が観察された。真空アーク溶解に際して脱ガスが電極材中に存在する酸化物、窒化物などの介在物がプールに浮揚することにより行なわれるものとすれば溶解中にガスの放出はともなわない。したがってこの場合溶解中の真空度には大きな影響を与えない。一方脱ガスが介在物の熱解離あるいは溶融プール中における減圧下の平衡反応で行なわれるものとすれば、ガス体として排気されるため真空度劣化を惹起するはずである。今、後者の場合を考えると脱ガス反応式は次式で示される。



(1), (2)式を用いて求めた前述の Q value と溶解中に観察された真空度の関係を示すと Fig. 2 のごとくなる。すなわちみかけの排気量 Q value に関係なくほぼ一定の圧力を示したものと、Q value と真空度がほぼ真空ポンプの排気曲線に近似した関係を示したものと2つのグループに分類される。含チタン・クロム鋼および C<0.02% の低炭素組成のものは前者のグループ

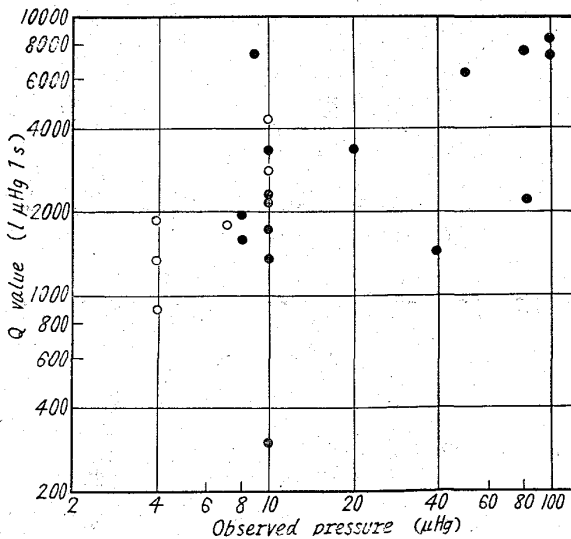


Fig. 2. Relation between Q value and observed pressure.

の傾向を示し、純鉄、クロム鋼、含窒素オーステナイト鋼は後者のグループの傾向を示した。このことは真空アーク溶解における脱酸、脱窒反応の機構が、溶融プール中における減圧下の (1), (2) 式で示される平衡反応と、電極材中に含有される酸化物、窒化物などの浮揚効果との両者により行なわれるものと考えられる。すなわち、電極材組成中にある程度の炭素量が存在すればプール中における C—O 平衡により酸素はガス体として排気除去され、窒素も (2) 式の反応により除去される。この場合放出ガス量に比例して溶解真空度が劣化する。一方酸素、窒素が安定な酸化物、窒化物として存在している場合、あるいは電極材中の炭素濃度がいちじるしく低い場合は(1), (2)式の反応は起こり難く、介在物は浮揚精錬作用のみにより溶融プールに補集濃縮される。この場合には電極材に含有される介在物はガス体として排気されないために炉内圧力に大きな影響を与えないものと思われる。

つぎに実際に観測された脱酸効果について考察してみる。Fig. 3 に純鉄、13% Cr, および 18% Cr の各種組成の試料について電極材と真空アーク溶解材の炭素および酸素の濃度変化を示した。前報において示したごとく²⁾誘導式真空溶解の炭素添加による脱酸精錬においては、溶鋼中に Cr が添加されると酸素の活動度が低下し脱酸限が劣化する傾向が明瞭に認められたが、真空アーク

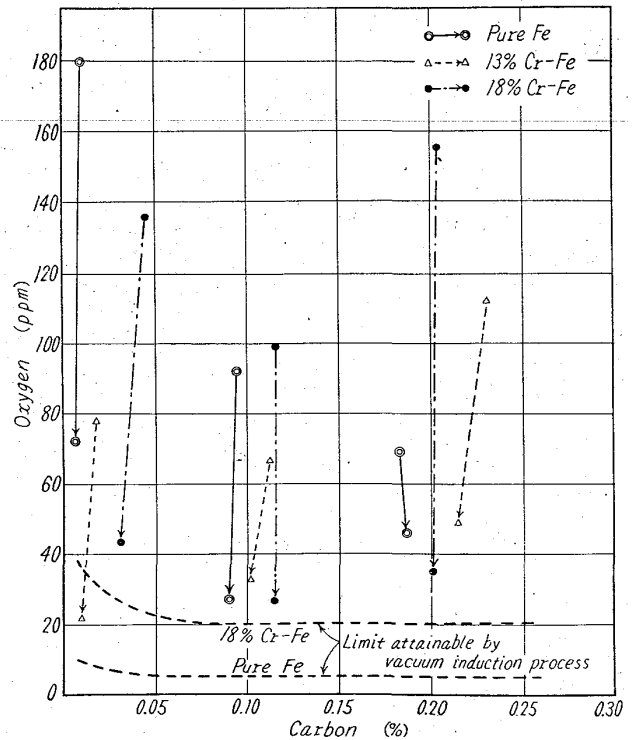


Fig. 3. Deoxidation effect in vacuum-arc melting of Fe-Cr alloys.

ク溶解においてはこのような現象が検出されず、各組成とも炭素量に関係なく 20~70 ppm の範囲の酸素到達値を示した。実用合金の各種オーステナイト・ステンレス鋼についても残留炭素量と酸素量に相関性はみとめられない。脱炭量と脱酸量の関係は炭素分析値の精度を考慮すれば、ほぼ(1)式に示される化学量比の関係を満足しているものと考えられる。

脱窒効果については Fig. 4 に純鉄、13% Cr、18% Cr の各組成について、Fig. 5 にオーステナイト・ステンレス鋼の場合の高窒素含有量の電極材を用いた場合について、電極材窒素量と真空アーク溶解材窒素量を対比

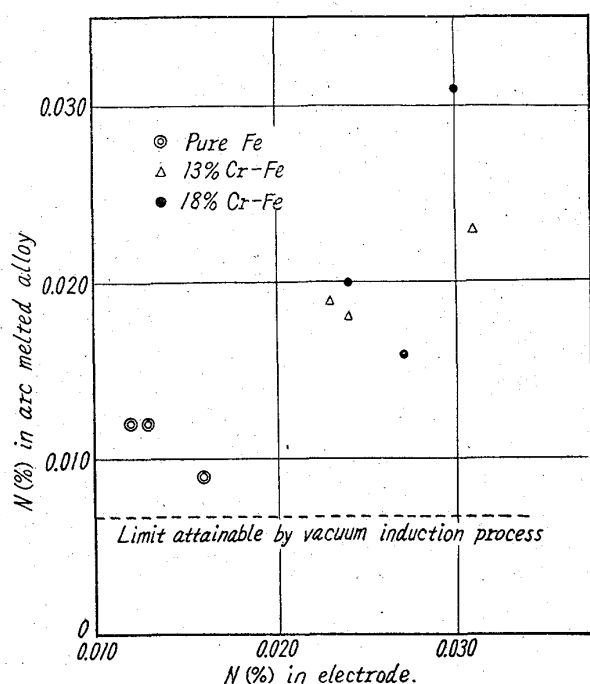


Fig. 4. Denitrifying effect in vacuum-arc melting of Fe-Cr alloys.

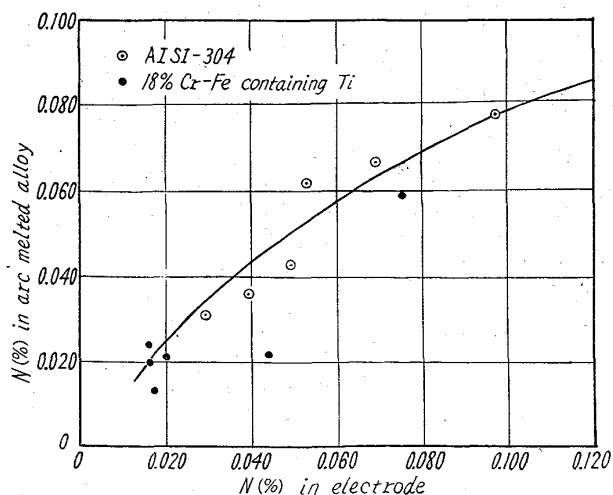


Fig. 5. Denitrifying effect in vacuum-arc melting of 18% Cr alloys.

させて示した。これからあきらかなように窒素は酸素よりも除去され難くその脱窒限は電極材中の窒素含有量にいちじるしく左右され、特に窒素量 0.010% 程度のものではその効果は十分ではない。窒素を添加して故意に窒素量を高くした電極材の場合でもその脱窒率は 20~40% 程度である。

これらの酸素、窒素の到達値は前出(1)、(2)式に溶解雰囲気圧力を平衡圧として与えて求めた平衡値をいちじるしく逸脱することはあきらかである。この理由としてはアーク・プラズマ近傍に圧力勾配の存在が予想されることや、また熔融状態に保持される時間がきわめて短時間でこるため十分な平衡状態に達成しがたいためと考えられる。また高尾²⁾らの測定結果によれば、この程度の容量のアーク溶解炉においては溶鋼がプール中で熔融状態に保持される時間は 5mn 程度であるといわれている。したがって本実験の場合においては、平衡状態への到達過程において凝固することになり、このような理由から組成による到達酸素値の相違が検出されなかつたのかもしれない。

このように真空アーク溶解の脱ガス反応が熔融プール中において支配的に行なわれるものとするれば、炉の容量により当然溶鋼が熔融プール中に保持される時間もことなってくるはずであるから、その反応条件もことなるものと考えられる。したがって上述の結果はあくまで 2000 A 容量の炉による実験結果であり、本溶解法の特質についての定性的な見解を示したものであることを附言する必要がある。

また誘導式真空溶解法によりこれら合金組成のものを溶解した場合にえられる脱ガス効果と、本実験でえられた脱ガス効果を比較するために、Fig. 3, Fig. 4 にそれぞれ誘導炉精錬の場合の脱ガス限を併記した²⁾。すなわち本実験でえられた脱酸効果は誘導式真空溶解の場合のそれにほぼ匹敵することがわかる。一方脱窒効果については真空誘導炉の方がはるかに低い窒素量に到達する。誘導式真空溶解の脱酸反応はきわめて長時間の精錬時間をあたえてもルツボからの酸素の導入反応があり、到達脱ガス限を規制する。一方真空アーク溶解の場合にはルツボからの汚染がないためきわめて短時間の精錬条件においても真空誘導炉に匹敵する効果がえられるものと考えられる。窒素については前述のように真空アーク溶解の場合には十分な精錬時間がえられないことによるものであり、特に窒素の低い材料をうるためには、真空誘導炉により電極を溶製し、低窒素電極を用意する必要がある。

本実験においては、いづれも使用した電極材のガス量に関係なく、各組成の電極材とも一定条件で溶解することができ、一応の脱酸効果がえられている。しかしながら、工業生産炉の場合、操業上の安全性からこのようなガス量の高い電極材を用い、真空ポンプの排気能力を無視した条件下で溶解を継続することは不可能である。そのため真空アーク溶解の脱ガス効果は使用電極材の品質にのみ依存するものと考えてよいであろう。

3) 電極材中の不純物、合金成分の蒸発による組成変化。

真空アーク溶解により期待される効果の一つとして、真空中の高温アークによる蒸発にもとづく不純成分の除去があげられる。このため鉄基に Mn, Cu, Cr, Sn, Pb などを添加して溶製した電極材を用いアーク溶解した場合のこれら元素の組成変化を検討した。溶解条件は前項の場合と同じく大気中溶解によりこれら元素を添加

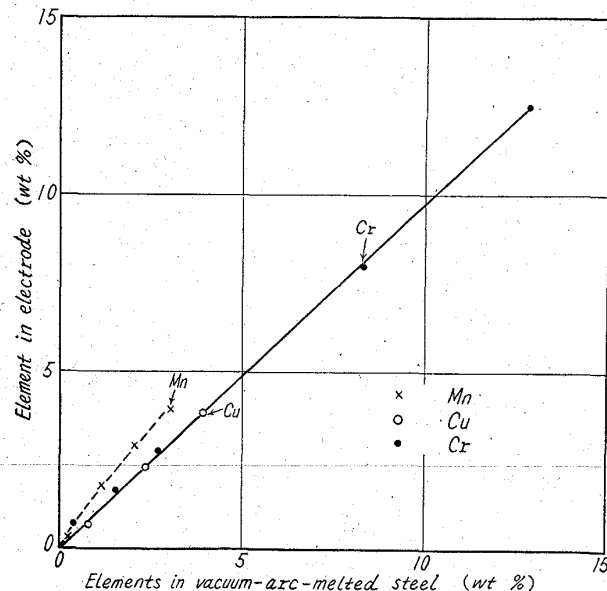


Fig. 6. Composition change caused by vacuum-arc melting.

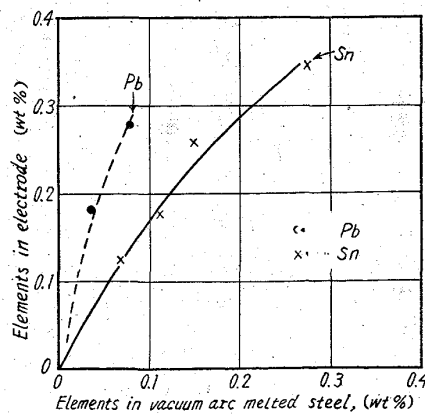


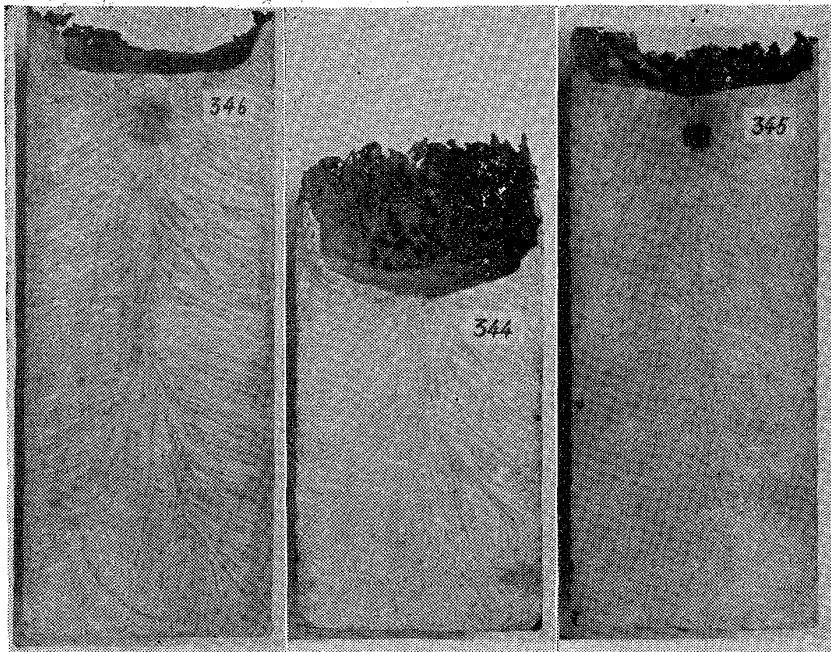
Fig. 7. Composition change caused by vacuum-arc melting.

して製造した 55mm ϕ の電極を用い、溶解電流 2000 A, ルツボ径 100mm ϕ で真空度 $1\sim 3\mu\text{Hg}$ でアーク溶解を行なった。Fig. 6 に Mn, Cu, Cr, Fig. 7 に Sn, Pb について真空アーク溶解に際しての組成変化を電極材と真空アーク溶解材中の各成分含有量と対比させて示した。Cr, Cu はほとんど組成変化がなく、Mn, Sn はやや減少し、Pb はかなりよく除去される。これらの蒸発傾向は誘導式真空溶解の場合ほど十分な反応効果は期待されず、この程度では不純成分の除去には不十分であると思われる。勿論ルツボの外壁に蒸着した蒸発成分が溶融プールの上昇にもなつて再溶解されることもありうるが根本的には真空処理の時間が短かく十分な蒸発時間が得られないことによるものと考えられる。したがつてこの場合においても溶解炉の容量によりプール中において溶鋼が保持される時間が変化すればその蒸発程度もことなつてくることも予想され単に定性的な見解を示したものであることを附言する必要がある。

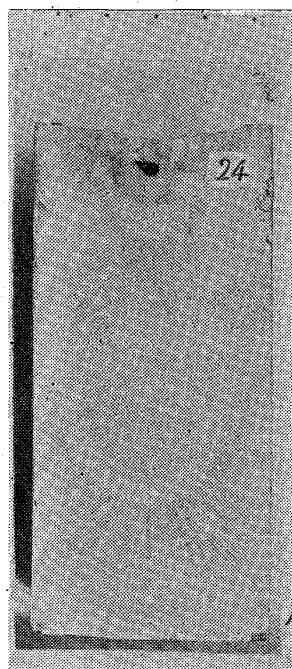
4) マクロ組織

真空アーク溶解の目的は脱酸、脱ガス反応とともに鋼塊のマクロ組織の改善である。真空アーク溶解の凝固条件は水冷された銅ルツボ中で漸進的な凝固により進行するため理想的な形態であるといわれている。アーク溶解材のマクロ組織に影響をあたえる因子としては溶解時の電流、溶融プールの攪拌条件あるいは溶融プールにおける沸騰現象の有無などがあげられよう。以上のことから筆者はさらにオーステナイト・ステンレス鋼の組成をえらび、マクロ組織におよぼす溶解電流の影響、プールの磁場による攪拌作用の影響、および特に酸素、窒素などのガス量を高くした電極材を用い、プール中にはげしい沸騰現象を起さしめた場合の影響について調査した。

Photo. 1 は AISI-347 について 100 ϕ のモールドに溶解電流を 2200 A \sim 1000 A の範囲で変化して溶解したマクロ組織を示す。電流値をますほど dendrite は粗になり通常の造塊条件に近いマクロ組織を呈する。溶解電流値の低いものは組織は微細化するが鋼塊肌は劣化し相当量の皮削りが必要となる。Photo. 2 は同じく AISI-304 について溶解過程において溶解電流を 2000 A から 1500 A に変化せしめた場合のマクロ組織で溶解電流の変化した位置でプールの形状、組織の粗密度の変化が明瞭に識別される。Photo. 3 は溶解中にプールを磁気攪拌した場合の影響を示したものである。電極材は AISI-304、磁気攪拌を行なったものは約 50 Gauss の磁場をあたえた。このように stirring coil でプール攪拌すると組織は微細化する傾向がある。



Current: 2200 A Current: 1500 A Current 1000 A
 Photo. 1. Macro-etched structure of some vacuum-arc-melted AISI-347 ingots.



Melting current 1500 A

Melting current 2000 A

Photo. 2. Effect of melting current on macrostructure of a vacuum-arc-melted AISI-304 ingot.

またガス量の高い電極材を用い溶解中に熔融プールに烈しい沸騰現象をおこさせたものでもマクロ組織に本質的な影響はみいだされず、前述の溶解電流の影響のみ顕著に検知された。

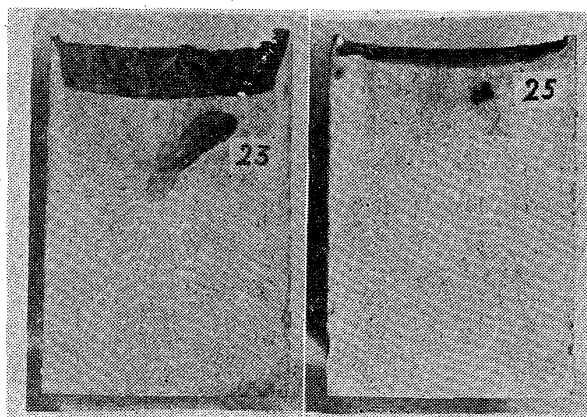
このように真空アーク溶解材のマクロ組織は溶解電流、磁気攪拌の有無によりいちぢるしい影響をうけることは

あきらかであり、その溶解条件の設定は溶解鋼種あるいは爾後の加工条件を考慮して決定すべきであろうと考えられる。

5) 雰囲気ガス中におけるアーク溶解
 実用合金の中には LCN-155 などのごとく窒素が合金成分として熔融温度の飽和溶解度近くまで含有されているものもある。このような合金は真空中でアーク溶解を実施すると窒素を放出し規格成分を維持することができないのみならず溶解過程において真空度を劣化し溶解困難におちいる。したがってこの種の合金は適当な雰囲気下において溶解を行なう必要がある。このためまず真空および Ar, 窒素などのガス雰囲気中におけるアーク電圧について AISI-304 ステンレス鋼の電極を用い検討した。さらに LCN-155 を 1 atm 以下の Ar ガス雰囲気下で溶解しアーク溶解の諸現象を実験観測した。

た。

まずアーク電圧と溶解雰囲気ガスとの関係をしるために、あらかじめ Ar, 窒素などのガスを真空槽中に種々の圧力に封入し、電極材を固定した状態でアークを点火し、アークがきれるまで溶解を継続した場合の電圧変化とアーク長の関係を調べた。この場合使用したルツボは 80mm φ, 電極径は 40mm φ である。Fig. 8 に観測されたアーク電圧とアーク長の関係を示した。すなわち真空中のアークはアーク単位長当りのアーク電圧変化 $\Delta V/\Delta l$ はきわめて小さく、1 吋のアーク長変化に対するアーク電圧変化は 1~2V 程度である。一方雰囲気



Induction stirrer was not operated Induction stirrer was operated
 Photo. 3. Effect of an induction stirrer on macrostructure of vacuum-arc-melted AISI-304 ingots.

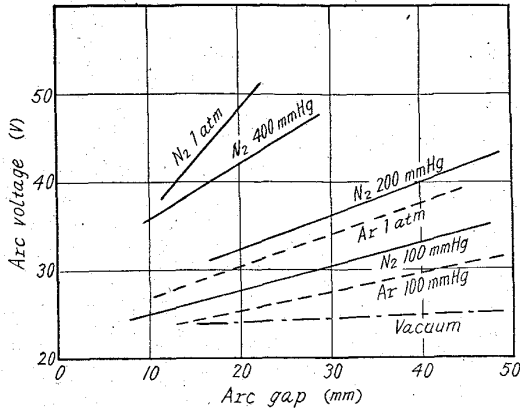


Fig. 8. Relation between arc length and arc voltage of AISI-304 in various atmospheres. (Electrode : AISI-304. Melting current : 2000 A)

ガス中においてはアーク電圧は増加するのみならずアーク長の変化に対する電圧変化もいちぢるしく増加する。特に窒素雰囲気下の場合にはアーク電圧はきわめて高く、窒素 1 atm 雰囲気下のアーク溶解は出力電圧のきわめて高い特殊な整流器を用いなければ事実上溶解は不可能であろう。Ar ガス雰囲気下の場合には窒素雰囲気中の場合に比しアーク電圧も低くかつアーク単位長あたりの電圧変化も少く、通常の垂下特性を有する整流器により溶解可能である。またいづれのガス雰囲気の場合でもガス圧力が増加するほどアーク電圧は増加する傾向が示される。

次に窒素ガス雰囲気中にてアーク溶解を行なった場合、その鋼塊の窒素吸収現象につき実験した。この場合も使用した電極材は AISI-304、電極径およびルツボ径はそれぞれ 42mm φ, 80mm φ で約 5kg の鋼塊に製造し、鋼塊は縦断して鋼塊各位置から分析資料を材取し窒素吸収量を測定した。溶解中は溶融プールの沸騰現象

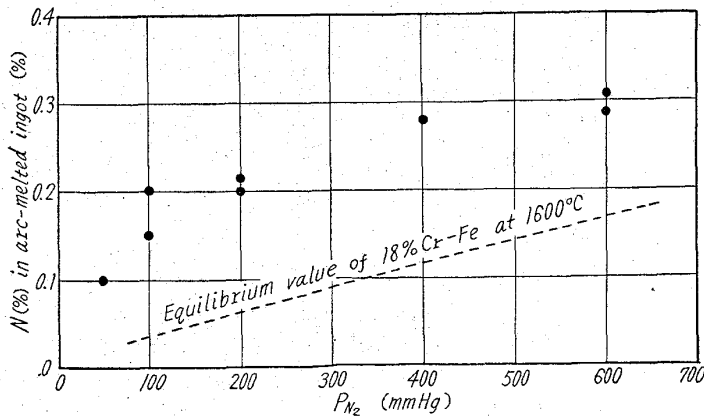


Fig. 9. Relation between nitrogen and P_{N₂} in arc melting of AISI-304.

象、および溶解完了後、鋼塊上部が膨張する傾向が観察された。鋼塊を縦断してみると鋼塊外周部に blowhole が発生し健全な鋼塊とはいえない。Fig. 9 に 50mmHg ~600mmHg の範囲内に窒素ガス圧力を変化してアーク溶解を行なった場合に鋼塊中に吸収された窒素量と雰囲気中の窒素ガス分圧の関係を示した。図中破線にて 18% Cr 鋼の 1600°C における窒素飽和溶解度を示した。すなわちこのように窒素雰囲気中のアーク溶解によりえられる窒素吸収量はプール中における溶融温度の窒素飽和溶解度よりはるかに高い値である。このことはアーク溶解においてきわめて活性化された雰囲気から多量の窒素の吸収が行なわれているということである。また溶融プール中においては、逆に容器中の窒素ガス圧の平衡値までのガスの放出現象があり、これが沸騰現象として観察されるものと考えられる。

窒素ガス雰囲気中のアーク溶解を実用性の見地から考察すると、400mmHg 程度のガス分圧中の溶解で、通常の空気中溶解における常圧以上の窒素圧の平衡値まで窒素を吸収合金化することができるが鋼塊に気泡を残し健全な鋼塊とはなしがたい。したがって Ar などの不活性ガスで混合し、全圧を増加して窒素ガスの放出を防止するなどの処置や整流器の垂下特性に対する特別の配慮が必要である。

つぎに含窒素実用合金 LCN-155 のアーク溶解の場合についてのべる。この場合使用した電極材の組成は

C=0.12%	Co=20.15%
Si=0.30%	Nb=1.03%
Mn=1.45%	W=1.98%
Ni=19.95%	Mo=2.76%
Cr=19.72%	N=0.20%

である。60mm φ の鍛造 bar について、Ar 1 atm, 1/2 atm, 1/4 atm の三条件について 2000 A の溶解電流により 100mm φ ルツボを用いアーク溶解を実施した。

実験結果を Table 4 に一括して示す。すなわちこれからあきらかなように実験した範囲内の Ar ガス分圧のもとでは溶融プール中からのガス放出は行なわれず、電極材中の窒素量を保持することができた。また雰囲気圧力の増加につれてアーク電圧はあがり消費電力は増加して溶解効率は向上する。そのため雰囲気圧力が高くなるほどルツボ冷却の温度上昇が大きくなる傾向がある。このことは雰囲気中のアーク溶解はアーク電圧の増加分だけ溶解効率は増加し、雰囲気ガスの対流による熱損失は大きなもの

Table 4. Summary of arc melting of N-155 in Ar-gas atmosphere.

No.	Pressure (atm)	Melting current (A)	Arc voltage (V)	Melting efficiency (kg/kA/mn)	Temp. rise of cooling water (°C)	N (%) in ingots
VA-230	1	2000	31	0.57	33	0.18
231	1	2000	31	0.57	28	0.21
232	1	2000	31	0.57	25	0.20
233	1/2	2000	29	0.50	23	0.20
234	1/4	2000	25	0.46	15	0.17

(N content in electrode: 0.20%)

ではないと考えられる。これら試料のマクロ組織をみると低圧側の Ar ガス分圧下で溶解したものは鋼塊外壁に若干 blow hole を残したが概して健全である。

以上窒素および Ar ガス雰囲気中のアーク溶解についての諸現象についてのべた。このように雰囲気ガス中のアーク溶解は真空中の場合とかなり様相がことなり特異な現象もあるが、窒素を合金元素として含有する合金も雰囲気中のアーク溶解により健全な鋼塊とすることができる。

III. 結 言

消耗電極式真空アーク溶解法の精錬効果について、その基礎的な条件を追求するため 2000 A 容量の実験室規模の溶解炉を用い、炭素濃度のことなる鉄、鉄-クロム合金などについて溶解を行ないその脱ガス機構につき検討を加えた。これらの結果を総括するとつぎのごとくである。

1) 脱酸反応は主として溶融プール中における介在物の浮揚精錬効果、および C-O 脱酸反応によつて行なわれるものと考えられる。窒素は酸素に比較し除去され難くその脱ガス程度は電極材中の窒素量に依存する模様である。

2) 溶融プール中に溶鋼が保持される時間が短いため平衡条件に到達しがたい。したがって誘導式真空溶解

のように組成による脱酸限の相違は検出されず、組成に関係なくほぼ一定値までの脱酸効果がえられた。

3) 真空アーク溶解材のマクロ組織は溶解電流、磁気攪拌の有無に影響をうけやすい。

4) 真空アーク溶解に際しての微量不純物の蒸発による除去は真空誘導炉のような十分な効果は期待できない。Mn, Sn, Pb のような高蒸気圧元素は蒸発により減少するがその減少率は電極材中の含有量に支配される。この場合も脱ガス反応と同じく溶融プール中に溶鋼が保持される時間がみじかいことによるものであろう。

5) 真空アーク溶解における脱酸、脱ガス反応、組成元素の蒸発反応がこのように溶融プール中における溶鋼の保持時間に規制されるものとすれば、その反応効果は炉の容量、溶解電流などによりその反応程度もことなるものと予想される。

6) 窒素を合金元素として含有する N-155 合金は、Ar 雰囲気中のアーク溶解により健全な鋼塊とすることができる。窒素ガス雰囲気中のアーク溶解はアーク電圧がきわめて高いこと、窒素吸収があることなどの理由で実際に適用することは困難であらう。(昭和37年4月寄稿)

文 献

- 1) H. GRUBER: Proc. Electr. Furn., 15 (1957), p. 110~132
- 2) 川畑, 渡辺: 鉄と鋼, 47 (1961), p. 715
- 3) 高尾: 学振19委, 6382