
特 殊 鋼 特 集

真空アーク溶解における酸素の除去.....	85
合金工具鋼のじん性に及ぼす熱処理の影響.....	89
改良形 Mo 系高速度鋼 (YXM 1) について.....	93
海綿鉄を用いた各種特殊鋼の特性.....	98
各種耐熱鋼の高温硬度.....	103
各種鉄鋼材料のヤング率.....	108
厚鋼板打抜型鋼の研究.....	113

真空アーク溶解における酸素の除去

Removal of Oxygen in Vacuum Arc Melting

鈴 本 禎 一* 伊達山 静 男* 工 藤 武 司*
Teiichi Suzumoto Shizuo Dateyama Takeshi Kudô

内 容 梗 概

真空アーク溶解における電極材中の酸素の形態と真空溶解材の酸素除去の効果について調査した結果、酸素を Al₂O₃ よりも SiO₂ の形にした電極材を使用したほうが酸素除去効果の大きいことを知った。

1. 緒 言

真空アーク溶解は、大気中および耐火物中では溶解不可能な Ta, Ti, Zr などの、いわゆる活性金属、また W, Mo などの高融点金属の溶解方法として研究、開発されてきたものであるが、やがて超合金、磁性材料と範囲を広げ、1956 年以降は鉄鋼材料にも拡張され、耐熱鋼、工具鋼、超強靱鋼など高級鋼の諸性質を著しく改善することが知られ、真空溶解が鉄鋼業界で一躍脚光を浴びるにいたり、現在ではある種の高級鋼の製造に欠くことのできない有効な手段となっている。

日立金属工業株式会社安来工場では 1960 年 9 月、日本真空技術株式会社製 1 t 消耗電極式真空アーク炉⁽¹⁾を設置し、溶解法について検討のうえ、現在各種の高級鋼を製造している。

鋼の精錬が大気中で、また各種耐火物中で行なわれる限り、空気および耐火物によって鋼が汚染されることはまぬがれえない。これに対し真空アーク溶解法は真空誘導炉と異なり、高真空中で自溶電極を溶解し、大気による汚染を防ぐとともに、水冷銅鑄型に半連続的に鑄込む、いわゆる再溶解法であり、耐火物による汚染がない。ここでは、真空アーク溶解によるこれらの精錬効果のうち、酸素の挙動について報告する。

真空アーク溶解の電極材としては大気溶解による鍛造材、鑄造材および真空誘導炉で溶製したものが用いられるが、電極材の品質、特に微小介在物は、真空精錬による鋼質の改善を阻害し、種々のトラブルを生ずるといわれ、電極材の製造法は、真空アーク溶解における重要な作業であるといわれている⁽²⁾。

電極中の酸素の形態については、Al₂O₃ の形のほうが真空溶解時に減少が顕著であるという報告^{(3)~(8)}と SiO₂ が除去容易であるという報告⁽³⁾⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾とがあり、電極材中の酸素の形態によって、真空アーク溶解時の酸素除去の程度が異なってくるものと考えられるので、この点を明らかとすることを目的とした。

2. 試 験 方 法

2.1 溶 解 設 備⁽¹⁾

溶 解 量	特殊鋼最大 1,000 kg
真 空 排 気 系	20 in 油拡散ポンプ
排 気 速 度	8,000 l/s
到達真空度	2×10 ⁻⁴ mmHg
8 in メカカルブースターポンプ (10 HP)	
排 気 速 度	2,040 m ³ /h
油回転ポンプ (10 HP)	
排 気 速 度	6,000 l/min
到達真空度	3~5×10 ⁻⁴ mmHg
真 空 計	アルファトロン真空計
測 定 範 囲	0.001~1,000 mmHg
電 源	変 圧 器 油入自冷式 650 kVA
整 流 器	セレン整流器
	無負荷電圧 70V
	負 荷 電 圧 40V
	電 流 8,000 A

第1表 電 極 材，真 空 材 鋼 塊 内 パ ラ ツ キ

試 料			化 学 組 成 (%)								サンド含有量 (×10 ⁻⁴ %)			酸 素 含 有 量 (PPM)	非金属介在物 d(A+B+C) 60×400
			C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	全サンド	SiO ₂	Al ₂ O ₃		
電 極 材	頭 部	外 周	0.19	0.40	0.40	0.019	0.015	0.22	11.88	0.07	188	103	77	53	0.08
		中 間	0.20	0.39	0.42	0.020	0.014	0.22	11.85	0.06	185	117	62	47	0.08
		中 心	0.18	0.39	0.42	0.020	0.015	0.22	11.97	0.07	200	101	92	51	0.08
	中 央 部	外 周	0.19	0.39	0.42	0.019	0.014	0.22	11.91	0.06	167	96	63	38	0.07
		中 間	0.18	0.38	0.41	0.019	0.015	0.22	11.96	0.06	165	97	58	53	0.07
		中 心	0.18	0.37	0.41	0.019	0.014	0.22	12.03	0.06	152	84	56	60	0.08
	底 部	外 周	0.18	0.38	0.41	0.019	0.013	0.22	11.99	0.06	105	63	33	44	0.09
		中 間	0.17	0.37	0.41	0.020	0.014	0.21	11.97	0.05	130	81	38	50	0.09
		中 心	0.18	0.38	0.40	0.019	0.014	0.19	11.87	0.06	116	63	45	67	0.08
	平 均		0.18	0.38	0.41	0.019	0.014	0.22	11.94	0.06	156	89	58	51	0.08
真 空 材	頭 部	外 周	0.18	0.39	0.29	0.018	0.013	0.21	11.81	0.06	70	5	50	10	0.01
		中 間	0.18	0.39	0.34	0.021	0.016	0.23	11.77	0.08	53	8	42	15	0.01
		中 心	0.19	0.38	0.33	0.020	0.016	0.22	11.75	0.07	56	4	41	15	0.01
	中 央 部	外 周	0.17	0.40	0.34	0.019	0.010	0.23	11.78	0.06	55	8	40	16	0.02
		中 間	0.18	0.39	0.34	0.019	0.013	0.22	11.86	0.06	44	8	33	18	0.02
		中 心	0.17	0.38	0.30	0.017	0.014	0.22	11.82	0.05	48	2	37	19	0.01
	底 部	外 周	0.18	0.36	0.35	0.019	0.011	0.22	11.84	0.05	49	8	36	16	0.02
		中 間	0.17	0.37	0.33	0.018	0.013	0.22	11.90	0.06	49	8	36	9	0.02
		中 心	0.17	0.38	0.33	0.019	0.013	0.20	11.93	0.06	56	7	41	11	0.03
	平 均		0.18	0.38	0.33	0.019	0.013	0.22	11.83	0.06	53	6	40	14	0.02

* 日立金属工業株式会社安来工場

第 2 表 試 験 溶 解 結 果																		
鋼 種	試 料	化 学 組 成 (%)									サンド含有量 (%)				酸 素 含有量 ppm	非金属介在物		脱 酸 剤
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	Al	全サンド	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO		d _{A60×400}	d _{B+C 60×400}	
純 鉄	電極材	0.02	0.01	Tr	0.005	0.009	Ni1	Ni1	0.06	0.02	0.0640	0.0017	0.0048	0.0556	205	0	0.49	Al
	真空材	0.01	0.01	Tr	0.005	0.009	Ni1	Ni1	0.06	Tr	0.0434	0.0006	0.0030	0.0371	137	0	0.25	
SUS22	電極材	0.18	0.38	0.41	0.019	0.014	0.22	11.94	0.06		0.0156	0.0089	0.0058		51	0	0.03	FeSi
	真空材	0.18	0.38	0.33	0.019	0.013	0.22	11.83	0.06		0.0053	0.0006	0.0040		14	0	0.01	
	電極材	0.18	0.49	0.29	0.016	0.011	0.20	12.22	0.08		0.0126	0.0020	0.0103		41	0.01	0.02	FeSi+Al (0.6k/t)
	真空材	0.18	0.48	0.23	0.017	0.011	0.19	12.19	0.07		0.0061	0.0011	0.0046		21	0	0.02	
SNC21	電極材	0.16	0.28	0.67	0.011	0.008	2.16	0.30	0.19	0.021	0.0143	0.0036	0.0090		65	0	0.03	FeSi+Al (0.3k/t)
	真空材	0.16	0.27	0.61	0.010	0.007	2.11	0.33	0.17	0.018	0.0038	0.0007	0.0034		23	0	0.02	
	電極材	0.18	0.23	0.63	0.010	0.007	2.10	0.41	0.18	0.031	0.0242	0.0083	0.0113		43	0.01	0.03	FeSi+Al (0.6k/t)
	真空材	0.18	0.23	0.60	0.009	0.006	2.11	0.42	0.17	0.028	0.0024	0.0006	0.0018		23	0	0.01	
	電極材	0.15	0.34	0.61	0.008	0.008	2.10	0.30	0.15	0.046	0.0125	0.0032	0.0074		52	0	0.05	
	真空材	0.14	0.31	0.57	0.007	0.007	2.09	0.31	0.16	0.025	0.0046	0.0008	0.0038		30	0.01	0.01	
	電極材	0.12	0.27	0.70	0.008	0.009	2.15	0.29	0.18	0.054	0.0092	0.0022	0.0052		45	0	0.03	FeSi+Al (1.0k/t)
	真空材	0.12	0.26	0.60	0.008	0.010	2.18	0.31	0.17	0.048	0.0022	0.0004	0.0018		28	0.01	0.02	

2.2 試験溶解方法
溶 解 量 500 kg
電 極 200 mmφ，鋳造材
鋳 形 内 径 305 mmφ
溶 解 電 流 8,000 A
溶 解 電 圧 25~30 V
アーク長さ 28 mm
操 作 真 空 度 真空タンク部で 0.7~0.9 μHg

2.3 試料採取方法
高周波電気炉および電弧式電気炉で 2 本以上の鋳造電極を造塊し，うち 1 本は電極材のままとし，そのほかのものは真空アーク溶解した。SUS 22 については電極材，真空溶解材ともに鋼塊頭部，中央部，底部よりそれぞれ外周部，中間部，中心部より計 9 個の試料を採取し，化学分析，ガス分析，サンド分析，非金属介在物試験を行ない，鋼塊内のバラツキを調査した。調査結果の一例を示すと第 1 表のとおりであり，中央部の中間部よりの試料が鋼塊を代表すると考えてよく，SUS 22 以外の鋼種については代表試料のみで比較した。第 1 表の非金属介在物試験結果は，電極材，真空材ともに鋳造状態のものであるが，以後の試験は 15 mmφ にまで鍛伸したものを検鏡した。

3. 試験結果

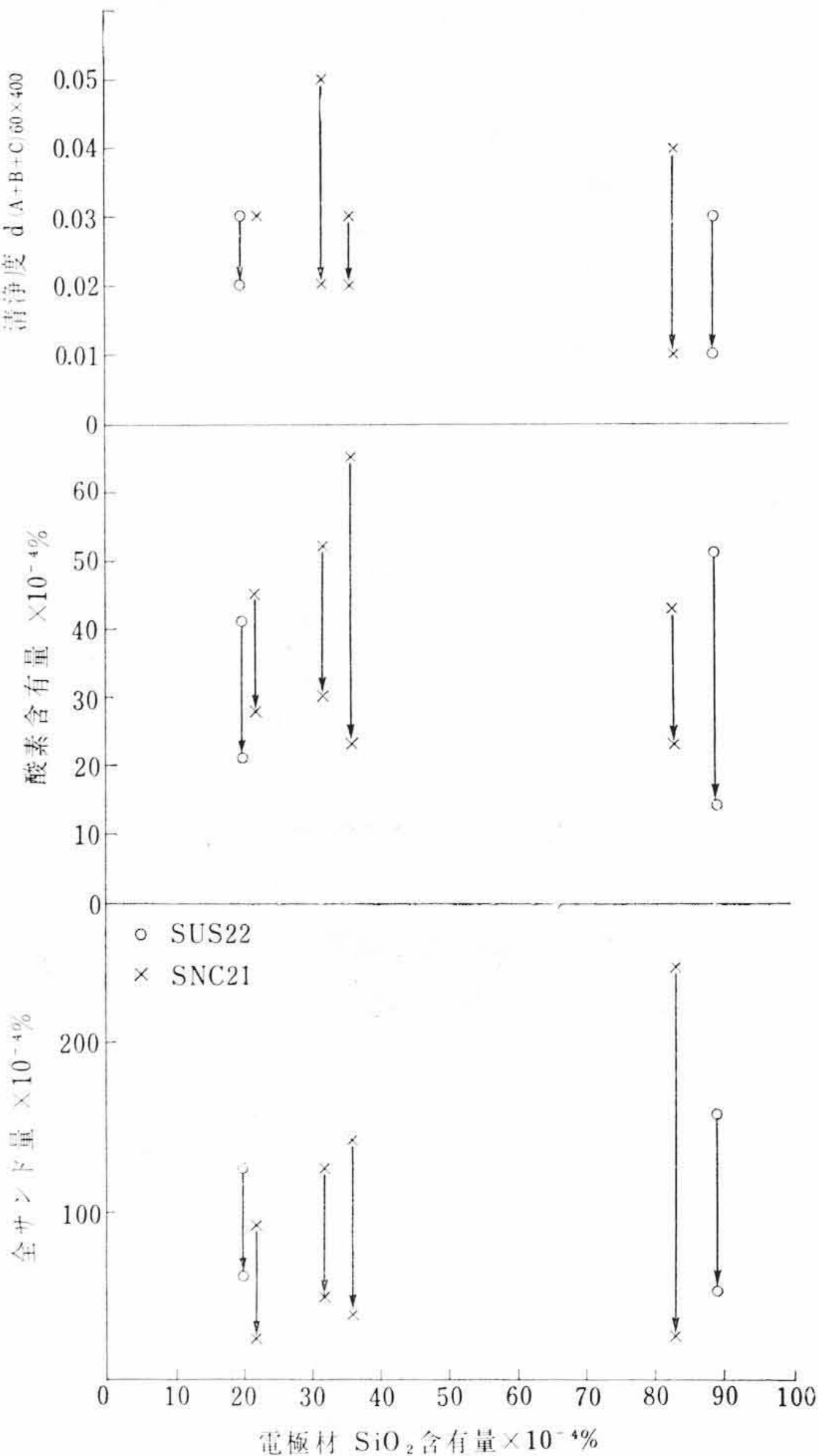
純鉄，SUS 22，SNC 21 についての試験結果を第 2 表に示す。サンド分析は温硝酸法，酸素分析は真空溶解法，非金属介在物は JIS 点算法で求めた。脱酸剤としての FeSi は炉中添加し，Al は取鍋中に添加した。

電極材中の SiO₂ 含有量と全サンド量，酸素含有量，清浄度との関係を SUS 22，SNC 21 について第 1 図に示す。図に示すように SiO₂ 含有量の高い電極材は全サンド量は高くなっているが，真空溶解を行なえば大幅に低下し，真空溶解材の全サンド量はかえって少なくなっており，SUS 22，SNC 21 とともに同じ傾向を示している。

酸素量の変化は電極中の SiO₂ が高い場合，真空溶解後の酸素量が少なくなる傾向であり，清浄度についても SiO₂ が高いほうが良好な傾向を示している。

電極材中の Al₂O₃ 含有量との関係は第 2 図に示すとおりで，一定の傾向は認められなかった。Al₂O₃ が高い場合，SUS 22 では酸素含有量が高く，清浄度の改善率は小さいが，SNC 21 では逆に酸素含有量，清浄度ともに良好となる傾向である。

SNC 21 については電極材中の Al₂O₃ が高いほうが酸素量，清浄度は良好であるが，Al 含有量との関係については第 3 図のように，



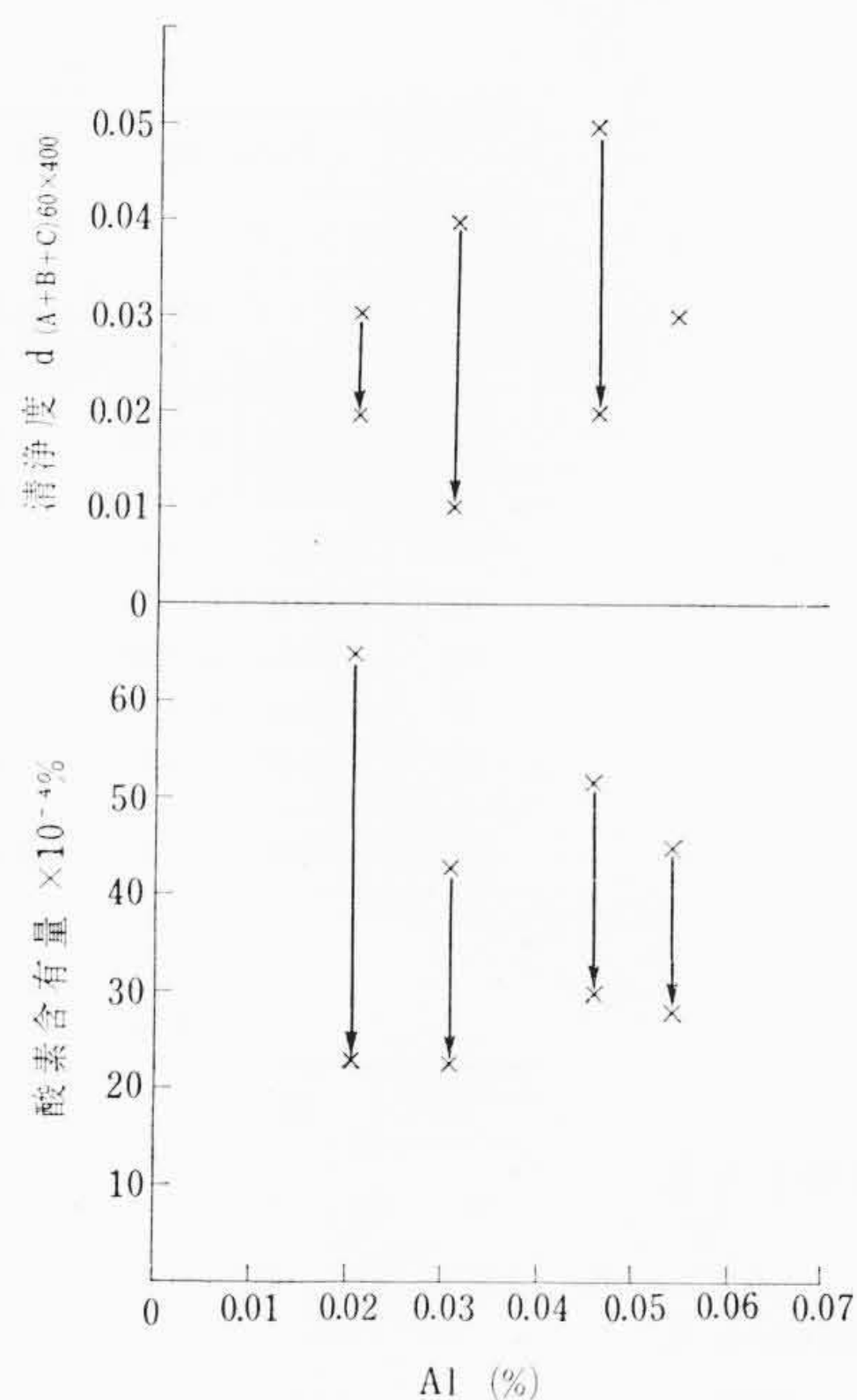
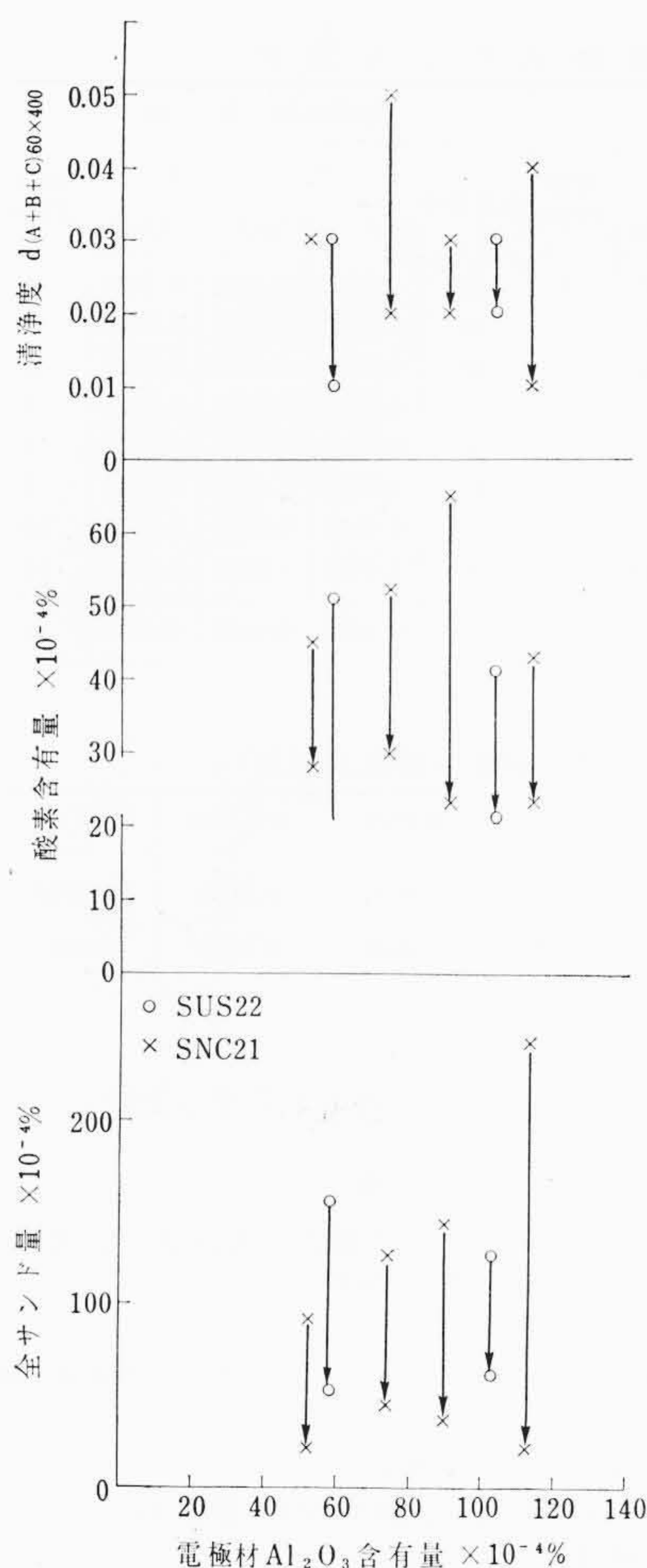
第 1 図 電極材 SiO₂ による全サンド量，酸素量，清浄度の変化

Al が多いと酸素低下度，清浄度向上率はよくなく，電極中の Al 含有量を高くすることは好ましくない。

4. 考 察

第 2 表の純鉄のように脱酸剤が不足している場合は電極材中に FeO が認められ，酸素含有量はきわめて高く，清浄度も悪いが，一般に Si または Al で脱酸した電極材中における酸素は常温ではほとんどが SiO₂ あるいは Al₂O₃ の形になっていると考えてよい。

酸素を SiO₂ あるいは Al₂O₃ のいずれかの形にしておいたほうが真空溶解時の精錬効果が大で，酸素含有量が少なくなるかによって電極材の脱酸方法を決定しなければならない。



第3図 Al 含有量による酸素量, 清浄度の変化

第2図 電極材 Al_2O_3 量による全サンド量, 酸素量, 清浄度の変化

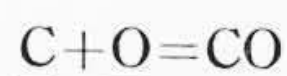
真空アーク溶解における精錬効果は, これら酸化物の

- (1) 熱 解 離
- (2) 浮 揚 精 錬
- (3) 脱 酸 精 錬

が考えられる。

脱酸精錬については,

C-O 平 衡



$$\log \frac{P_{\text{Co}}}{a_{\text{C}} a_{\text{O}}} = \frac{1,160}{T} + 2.003^{(11)}$$

[% C] = 0.10 ~ 1.0 では

$$\log f_{\text{C}} = 0.298 \quad [\% \text{ C}]$$

$$\log f_{\text{O}} = -0.421 \quad [\% \text{ C}]$$

CO ガス気泡が発生するためには, 次式の P_{Co} 以上の圧力が必要である。

$$P_{\text{Co}} = P_0 + \rho h + \frac{2\sigma}{r}$$

$$\rho = 7.2 \text{ g/cm}^3$$

$$\sigma = 1,835 \text{ dyne/cm}^{(12)}$$

$$r = 4 \times 10^{-2} \text{ cm}^{(13)}$$

$$P_0 = 15 \text{ mmHg}^{(14)}$$

$h=0$ の場合

$$P_{\text{Co}} = 0.11 \text{ atm}$$

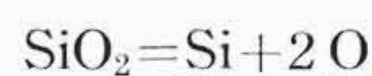
となる。

すなわち溶鋼表面近くにあっても, 気泡発生には 0.11 atm 以上の圧力が必要である。 P_{Co} 0.11 atm のとき, 1,600°C, 0.20% C に平衡する酸素量は 0.0013% となり, 電極中に $\underline{\text{O}}$ として存在する場合は C による脱酸が考えられる。前述のように Si あるいは Al で脱酸し

た電極材を使用する場合には, 酸素はほとんど酸化物となっており, 実際にはこの反応は期待しがたいと考えられる。

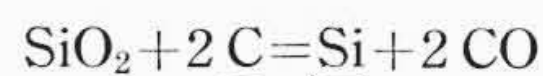
第2表に示すように多量に FeO を含有していても純鉄では C 含有量が低く, 脱酸効果はきわめて少なく, FeO は約 1/3 しか除去されなかった。

SiO_2 -C 平 衡



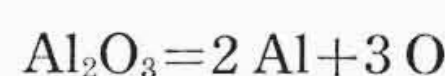
$$\log a_{\text{Si}} \cdot a_{\text{O}}^2 = -\frac{30,720}{T} + 11.76^{(15)}$$

C-O 反応式と組み合わせて

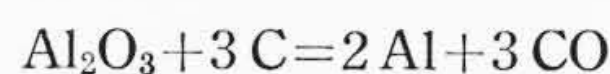


$$\log \frac{P_{\text{Co}}^2 \cdot a_{\text{Si}}}{a_{\text{C}}^2} = -\frac{28,400}{T} + 15.77$$

Al_2O_3 -C 平 衡



$$\log a_{\text{Al}}^2 a_{\text{O}}^3 = -\frac{68,610}{T} + 22.85^{(16)}$$



$$\log \frac{a_{\text{Al}}^2 P_{\text{Co}}^3}{a_{\text{C}}^3} = -\frac{65,130}{T} + 28.859$$

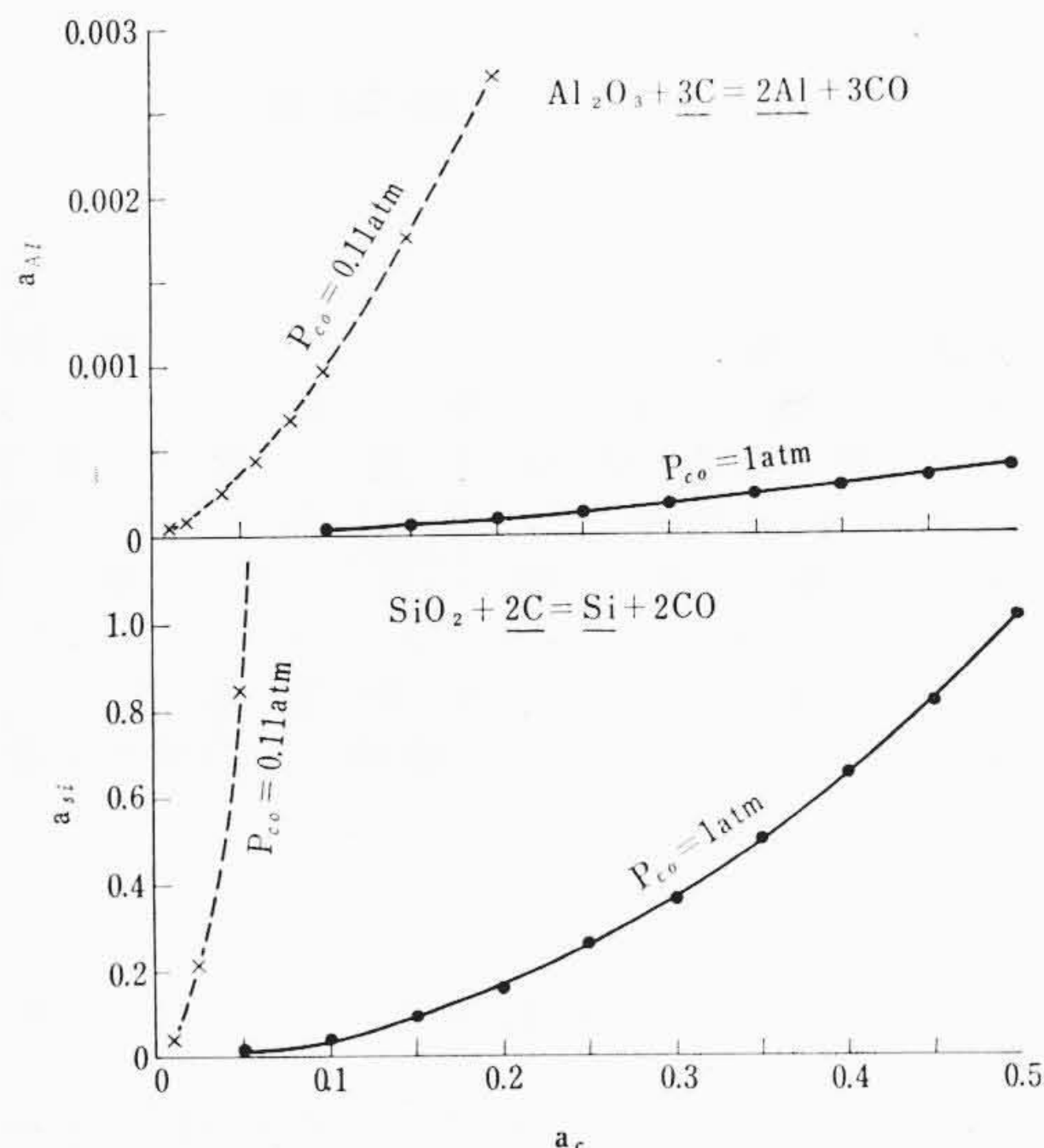
両者の関係を図示すると第4図のようであり, C 0.20% 程度では Al_2O_3 の還元は期待できないが, SiO_2 は C によって還元されることになる。

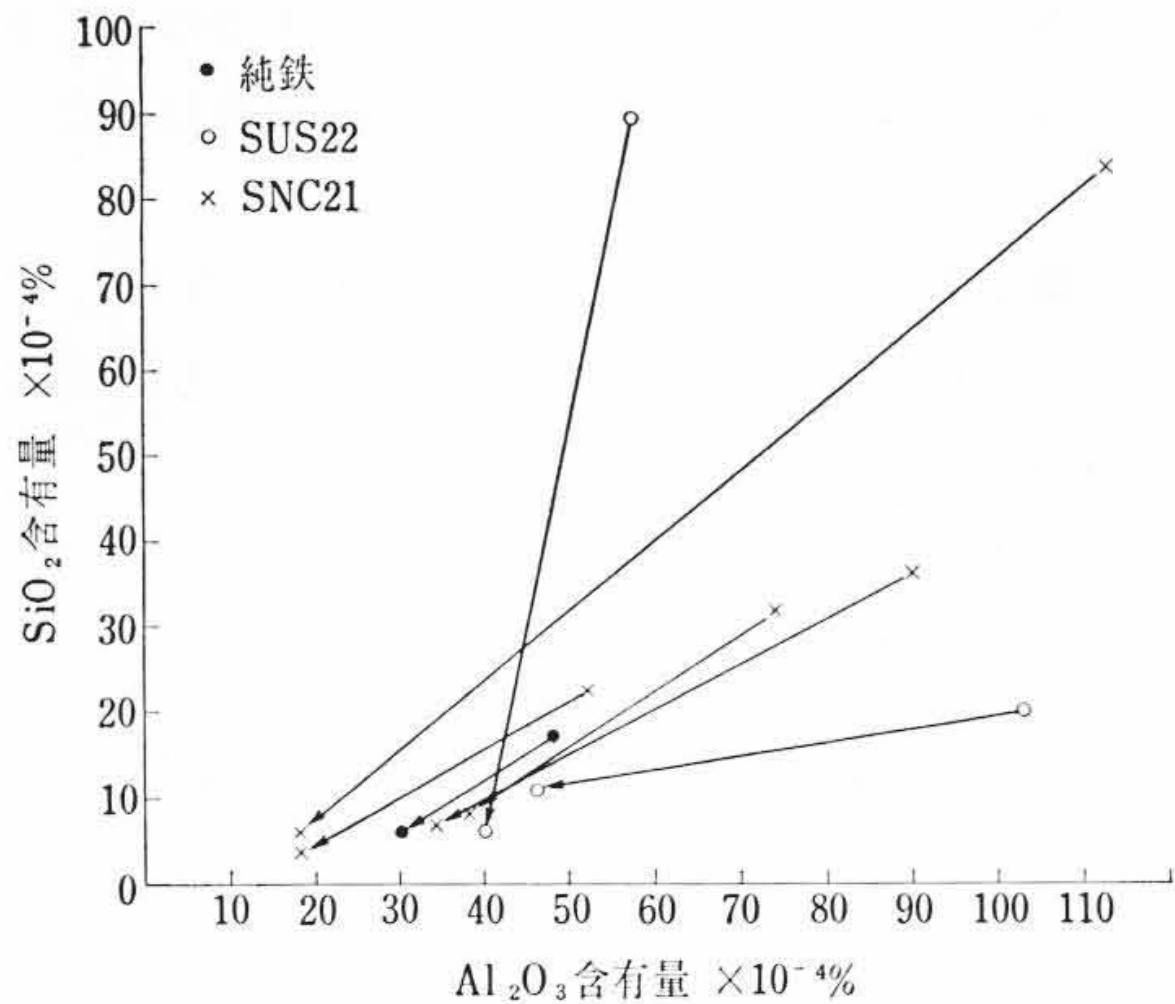
(1)の熱解離についても, Al_2O_3 よりも SiO_2 のほうが C によって還元され, 亜酸化物を生成して除去される可能性が大きいと考えられる。

(2)浮揚精錬については(1), (3)の効果と総合されており確認できなかったが, 第1表に示すように中心部は SiO_2 , Al_2O_3 とともに低い傾向であり, その程度は SiO_2 のほうが大であった。

以上のように Al_2O_3 よりも SiO_2 が脱酸効果を期待でき好ましいものと考えられる。また C が少ない場合, 第2表の純鉄のように FeO の形よりも SiO_2 のほうが低下率は大きであった。

SiO_2 と Al_2O_3 の組成変化を図示すると第5図のようであり, 電極材中の SiO_2 , Al_2O_3 組成にかかわらず真空溶解を行なうと, SiO_2 は 0.0004 ~ 0.0011%, Al_2O_3 は 0.0018 ~ 0.0046% となり低下限度は SiO_2 が大である。

第4図 Al_2O_3 および SiO_2 の C による還元平衡関係



第 5 図 SiO₂, Al₂O₃ 組 成 変 化

SUS 22 で FeSi のみの脱酸したものと、FeSi+Al の脱酸したものとの比較を第 3 表に示す。

表が示すように FeSi のみの脱酸が全サンド量、SiO₂、Al₂O₃ ともに少ない。酸素量については平均値では両者に差はないが、標準偏差は FeSi+Al 脱酸の 0.00031% に対し FeSi 脱酸では 0.00053% と大きく、真空溶解条件による差が大きくなり、よく管理された状態では 0.0010% 以下の酸素量のものをうる事が可能である。

その他の鋼種について酸素含有量を調査した結果の一例は第 4 表のようであり、0.0020% 以下の酸素量にまで除去されている。

5. 結 言

主として SUS 22, SNC 21 について電極材中の SiO₂、Al₂O₃ による真空アーク溶解時の酸素除去効果について調査した結果、次の点が明らかとなった。

- (1) C が少ない場合 FeO の除去は 1/3 程度であった。
 - (2) Al₂O₃ よりも SiO₂ を多くした電極材を使用したほうが真空材の全サンド量、酸素量、清浄度が良好となる傾向である。
 - (3) SNC 21 については Al 添加量を少なくした電極材のほうが良好な傾向である。
 - (4) 電極材の SiO₂、Al₂O₃ の組成にかかわらず真空材の SiO₂ は 0.0015% 以下、Al₂O₃ は 0.0015~0.0046% 程度となる。
- 終わりに分析についてご援助いただいた研究所のかたがた、なら

第 3 表 脱 酸 法 に よ る 比 較

FeSi 脱 酸					FeSi+Al 脱 酸				
溶解番号	サ ン ド (%)			酸素 PPM	溶解番号	サ ン ド (%)			酸素 PPM
	全サンド	SiO ₂	Al ₂ O ₃			全サンド	SiO ₂	Al ₂ O ₃	
78	0.0028	0.0006	0.0021	8	59	0.0054	0.0006	0.0046	9
06	0.0030	0.0005	0.0022	13	28	0.0033	0.0015	0.0018	11
16	0.0042	0.0002	0.0038	18	58	0.0042	0.0010	0.0029	15
34	0.0022	0.0002	0.0018	9	31	0.0048	0.0012	0.0034	14
02	0.0032	0.0004	0.0026	4	65	0.0042	0.0014	0.0026	12
43	0.0023	0.0005	0.0015	9	47	0.0038	0.0013	0.0021	5
18	0.0045	0.0010	0.0031	9	98	0.0046	0.0006	0.0031	10
04	0.0048	0.0003	0.0029	21	30	0.0040	0.0010	0.0028	14
平均	0.0035	0.0005	0.0028	11	平均	0.0043	0.0011	0.0028	11

第 4 表 その他の鋼種の酸素量 (%)

鋼 種	白 一	SUJ2	HXV3	HXV3B	YX1
電 極 材	0.0033	0.0015	0.0036	0.0038	0.0046
真 空 材	0.0013	0.0009	0.0020	0.0012	0.0017

びにご指導いただいた浅田技術開発部長に厚くお礼申し上げます。

参 考 文 献

- (1) 日立金属工業株式会社安来工場：鉄鋼技術共同研究会第 10 回真空冶金分科会資料，真冶 71 (1960-11)
鈴木：特殊鋼 12 (1960)
- (2) Edoward A. Loria：Blast Furnace & Steel Plant, 46 (1959)
- (3) 西原ほか：鉄と鋼 47, 1419 (1961)
- (4) 大同製鋼：鉄鋼技術共同研究会，真冶 93 (1962-3)
- (5) 上野，中島：鉄と鋼 45, 506 (1959)
- (6) 高尾ほか：鉄と鋼 47, 492 (1961)
- (7) 平野ほか：鉄と鋼 48, 394 (1962)
- (8) 前川ほか：鉄と鋼 48, 1415 (1962)
- (9) 前川ほか：鉄と鋼 47, 384 (1961)
- (10) A. M. Samarin：J. I. S. I., 98 (1961-6)
- (11) 学振 19 委-6675 (1960)
- (12) P. P. Kozakevitch, G. Urbain："The Physical Chemistry of Steelmaking" (1956) 27. J. F. Elliott. Edt.
- (13) 丹羽，下地：鉄と鋼 46, 19 (1960)
- (14) E. W. Johnson：Jr. of Metal 12 Nov., 850 (1960)
- (15) 的場，郡司，桑名：鉄と鋼 45, 312 (1959)
- (16) 丹羽，新明，工藤，宮村：日本金属学会誌 26, 769 (1962)

第 26 卷

日

立

第 12 号

目

次

- ・随 筆.....岡 村 夫 二
- ・空 気 清 浄 器 の 効 果
- ・画 期 的 な 淀 川 下 流 の 総 合 制 御 装 置
- ・マンモス火力への歩み ③タービン発電機編
- ・北 海 道 篠 津 地 域 開 発
- ・デパートとエスカレーター
- ・日本最大の抗生物質培養プラント
- ・一夜あければスキー場が人工降雪装置の威力一

- ・F M ステレオを <日立ステレオ> できこう
- ・バイパスケーブルで「工事中停電」はなくなりました
- ・明日への道標：ヨーロッパへ進出するクリスタレータ
- ・日立ハイライト：新しい日立ステレオをあなたに
- ・電線百話 ④ VHF アンテナと共用回路
- ・新しい照明施設：羽田空港庭園および噴水の照明
- ・日 立 だ よ り
- ・読者の声：ミラクルこたつ

発行所 日 立 評 論 社

取次店 株式会社 オーム 社 書 店

東京都千代田区丸の内1丁目4番地
振替口座 東京 71824 番
東京都千代田区神田錦町3丁目1番地
振替口座 東京 20018 番