においてははく離的に破壊した領域が多く認められた。

(5) 破面からのデバイ写真を撮影した結果、 -196°C においてもデバイ環は半径方向にかなり拡がり、約15%の引張による塑性変形に相当した。

謝 辞 本研究において使用したアルミニウム溶接金属は三菱重工業株式会社長崎研究所から提供を受けたことを記して深く感謝します。

参 考 文 献

- 1) 箕田, 入沢, “超低温タンクにおけるアルミニウム合金の溶接”, 溶接学会誌, Vol. 44 (1975), No. 1, 35-47
- 2) 福井, 難波, “アルミニウム合金溶接部の機械的性質におよぼす結晶度およびデンドライトセルサイズの影響”, 軽金属溶接, (1972), No. 113, 203-210
- 3) 福井, 難波, 杉山, “アルミニウム合金 5083の溶接凝固組織とその機械的挙動”, 溶接学会誌, Vol. 42 (1973), No. 12, 1237-1244
- 4) 箕田, 永岡, “Al-Mg 合金 5083-O 厚板の溶接性 (第1報)”, 溶接学会誌, Vol. 45 (1976), No. 1, 61-68
- 5) 軽金属溶接技術会編, アルミニウムおよびその合金のイナートガスアーク溶接, 1971, 143
- 6) 迎, 加藤, 松本, “アルミニウム溶接金属におけるミクロ偏析”, 溶接学会誌, Vol. 42 (1973), No. 8, 742-749
- 7) 迎, 加藤, “Al-Mg 合金の溶接金属中に固溶される Mg 量の変化”, 溶接学会誌, Vol. 42 (1973), No. 12, 1170-1179
- 8) B.D. Cullity, Elements of X-ray Diffraction, Addison-Wesley, 1956, 邦訳, 松村源太郎訳, X線回折要論, アグネ, 1961, 157
- 9) 三好, 高井, 小林, “シャルピー衝撃試験における荷重一時間, 荷重一変位曲線の観察”, 鉄と鋼, Vol. 54 (1968), No. 24, 497-500
- 10) 日本金属学会編, 金属データブック, 丸善, 1974, 163
- 11) 迎, 加藤, 西尾, 草場, “アルミニウム合金 A5083 の衝撃特性に及ぼす均質化の影響”, 溶接学会誌投稿中
- 12) 立花, 幸田, “鋼の低温脆性破壊に関する研究 (第1報)”, 日本金属学会誌, Vol. 21(1957), No. 8, 475-477

サブマージアーク溶接における脱酸反応におよぼすスラグ塩基度の影響*

——サブマージアーク溶接における脱酸反応に関する研究 (第1報)——

寺嶋久栄** 西山 昇** 坪井潤一郎**

Influence of Slag Basicity on Deoxidation in Submerged-Arc Welding*

——Deoxidation in Submerged-Arc Welding (Report 1)——

by Hisaei Terashima**, Noboru Nishiyama** and Junichiro Tsuboi**

The effect of slag basicity on silicon and manganese deoxidation in the submerged-arc welding process is considered by bead-on-plate welding performed using agglomerated fluxes of $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ system.

Dissolved oxygen content in molten pool is remarkably affected by oxygen which is originated from dissociation of silica in slag, then oxygen content in weld metal can be decreased by a reduction of the activity of silica. The arc cavity is almost filled with CO gas, and PCO_2/PCO in the atmosphere is decreased with increasing slag basicity. Ratio of oxygen content in weld metal to FeO content in slag takes a constant value independently of the slag basicity. Oxygen in weld metal deposited with MnO-free fluxes seems to be quasi-equilibrium relation with silicon at about 1950°C independently of manganese content in weld metal.

1. 緒 言

鋼中酸素がその機械的性質に悪影響を与えることはよく知られている。一般に、溶接金属の酸素含有量は鋼板に比べて高く、その酸素量の低減が溶接金属の性能改善

に有効な手段となる。とくに、サブマージアーク溶接のように広範囲な入熱条件で使用する溶接法では同一組成の溶接金属でも溶接条件によって変態組織や炭化物などの析出状態が変化するため、安定したじん性を確保するために酸素量の低減はきわめて重要となる。

サブマージアーク溶接では溶鋼—スラグ間の反応が他の溶接法におけるよりも比較的容易に行なわれ、溶接金

*原稿受付 昭和51年7月15日 (昭和50年度秋季全国大会にて発表)

**正 員 川崎製鉄(株)技術研究所 Member, Research Laboratories, Kawasaki Steel Corp.

属中酸素量に対するスラグ組成の影響はかなり大きく、スラグを高塩基性にすることによってその酸素量を確実に低減しうることが経験的に知られている。しかし、この機構については十分解明されているとはいえない現状である。

本報では、サブマージアーク溶接における酸素の挙動と溶接金属の性能の関係を検討するために、スラグ塩基度が溶接金属中酸素量におよぼす影響を主として Si との関連において検討した。

2. 供試材および実験方法

フラックスは Table 1 に示すように $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ で塩基度を変化させた $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 系であり、その中に脱酸剤および炭酸塩を全く含まない焼成型のものを用いた。なお、塩基度は表中に記した森の式 (B_L) で表示した。ワイヤは Si 量が異なる 3 種類の Si-Mn 系 (4.8 mm) のものを、鋼板は Si 量が異なる 12 mm 厚の軟鋼板を使用した。それらの化学組成を Table 2 にまとめて示す。

Table 1. Chemical compositions of fluxes used (%).

Code	CaO	MgO	Al_2O_3	SiO_2	Na ₂ O	B_L^*
G1	30.8	0.5	20.3	42.6	3.5	-0.72
G2	15.8	4.2	49.8	23.6	3.1	-0.29
G3	16.3	8.7	44.8	24.2	3.3	+0.13
G4	16.3	16.9	37.2	24.5	3.0	+0.73
G5	16.4	25.8	27.9	25.1	3.2	+1.11
G6	17.0	36.1	18.0	24.2	3.0	+1.49
G7	13.2	38.8	18.2	21.9	3.0	+1.80

*: $B_L = 6.05\text{Na}_2\text{O} - 6.35\text{SiO}_2 - 4.97\text{TiO}_2 - 0.2\text{Al}_2\text{O}_3 + 4.8\text{MnO} + 4.0\text{NMgO} + 3.4\text{NFeO}$

Table 2. Chemical compositions of wires and plates used (%).

Materials	Code	C	Si	Mn	P	S	O (ppm)
Wire (4.8mm)	a	0.07	0.05	1.67	0.007	0.012	17
	b	0.10	0.28	1.45	0.007	0.012	23
	c	0.07	0.82	1.28	0.014	0.011	41
Plate (12×200 ×250mm)	A	0.17	0.18	0.68	0.022	0.016	126
	B	0.18	0.03	0.98	0.013	0.015	95

溶接は、表面をグラインダ研磨した 12×200×250 mm の平板上に 600 A, 32 V, 26 cm/min の条件で約 200 mm 長の 1 層ビードを置いて行なった。フラックスは吸湿を排除するため溶接直前に 400°C で 1 hr 乾燥して使用した。

ビード中央部の横断面形状から母材溶融率を求めたのち、その部分の C, Si, Mn をカウントバック法によって、O を真空溶融法によって分析し、さらにその溶接スラグを磁選後 (FeO) の分析に供した。

3. 実験結果

3.1 スラグの塩基度と $[\text{O}]_R$ および $[\text{Si}]$

Fig. 1 はスラグ塩基度と溶接金属中酸素量 $[\text{O}]_R$ の関係であり、 $[\text{Si}]_W$ および $[\text{Si}]_P$ はそれぞれワイヤおよび母材中の Si 量を示している。

Fig. 1 Hv Relation between slag basicity and oxygen content in weld metal.

B_L の増加により $[\text{O}]_R$ が直線的に減少する傾向が明らかであり、また一定の B_L において $[\text{Si}]_W$ の増加は $[\text{O}]_R$ を減少させる。しかし、その減少量は $[\text{Si}]_W$ が 0.05 から 0.82% に増加しても 100 ppm 程度であって、スラグ塩基度の上昇による酸素量の減少に比べるとその度合は非常に小さい。

溶接金属中 Si 量 $[\text{Si}]_{\text{obs}}$ のスラグ塩基度による変化は Fig. 2 のごとくである。Si 量の異なったいずれのワイヤにおいても、 B_L の上昇とともに $[\text{Si}]_{\text{obs}}$ はほ

Fig. 2 Relation between slag basicity and Si content in weld metal.

ば同様の傾向で減少する。

$[\text{Si}]_w$ を一定にして B_L を -0.72 から $+1.49$ まで上昇させると、 $[\text{O}]_R$ は約 0.04% 減少し (Fig. 1), これらがすべて Si の脱酸作用によって実現されたとすれば 0.035% の Si を要することになる。しかし、この場合の実際の Si 減量 $\Delta[\text{Si}]_{\text{obs.}}$ はこれに対して非常に大きく約 0.2% であり (Fig. 2), サブマージアーク溶接金属におけるスラグ塩基度の変化に伴う Si および O の物質収支についてはさらに詳細な検討が必要となる。

$\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 系スラグにおける CaO の活量 a_{CaO} に関する Bell ら¹⁾ の関係式および Chipman ら²⁾ の SiO_2 の活量 (a_{SiO_2}) 曲線を用いて、供試フラックスの a_{SiO_2} を求めると Fig. 3 の結果が得られる。実験で用いたスラグ組成では B_L と a_{SiO_2} はほぼ直線関係にあり、したがって前述の B_L の効果は a_{SiO_2} の効果として認識してよいと思われる。

Fig. 4 は溶接金属中 Mn 量 $[\text{Mn}]_{\text{obs.}}$ とスラグ塩基度の関係であって、 B_L の上昇によって $[\text{Mn}]_{\text{obs.}}$ が増加する傾向が認められる。しかし、その増量はきわめて

Fig. 3 Relation between slag basicity, B_L and activity of silica.

Fig. 4 Relation between slag basicity and Mn content in weld metal.

少なく、 B_L が -0.72 から $+1.49$ まで上昇したときの Mn の増量は約 0.06% にすぎない。この Mn がすべて脱酸に供されるとした場合の $[\text{O}]_R$ の変化は約 100 ppm であり、前述の $\Delta[\text{Si}]_{\text{obs.}}$ に化学量論的に対応する $[\text{O}]_R$ の変化は 2300 ppm となるから、Mn による $[\text{O}]_R$ の変化は Si によるその $1/20$ 程度となる。したがって、本実験ではおもに Si に着目して考察を行なった。

3.2 溶接過程における Si の収支

母材熔融率を A とすると、ワイヤと母材から供給される Si 量 $[\text{Si}]_e$ は次式で近似される。

$$[\text{Si}]_e = (1-A) \cdot [\text{Si}]_w + A \cdot [\text{Si}]_p, (\%)$$

溶接過程での Si 変化量 ΔSi は $[\text{Si}]_{\text{obs.}} - [\text{Si}]_e$ で求められ、これとスラグ塩基度の関係は Fig. 5 のようになった。 ΔSi は低塩基性スラグでは正であるが、塩基度の上昇に伴って減少し高塩基性スラグでは負となる。すなわち、低塩基性の場合には脱酸作用による Si 減よりもスラグから還元される Si 増のほうが多いが、高塩基性スラグでは SiO_2 の還元が減じ Si による脱酸が優先するようになると推定できる。

Fig. 5 Relation between slag basicity and Si increment in weld metal.

一定 B_L の場合に、 $[\text{Si}]_w$ の 0.05 から 0.82% までの増加で ΔSi は約 0.10% 減少するが、これは SiO_2 還元抑制および Si による脱酸の増加に基づくと考えられる。しかし、Fig. 1 に示した $[\text{O}]_R$ の減量から推定すると脱酸作用による Si 減量はただか 0.01% であるので、上述の ΔSi の減量 0.10% には SiO_2 還元抑制が主体となっていると思われる。

Fig. 6 は塩基度の異なる3種類のフラックスと $[\text{Si}]_p$ の異なる2種類の鋼板を用いて $[\text{Si}]_e$ と $[\text{Si}]_{\text{obs.}}$ あるいは ΔSi の関係を調べた結果である。いずれのフラックスにおいても $[\text{Si}]_e$ に対して $[\text{Si}]_{\text{obs.}}$ は正の、 ΔSi

Fig. 6 Relation between Si in weld metal and $[Si]_e$.

は負の比例関係を示した。また, $[Si]_e=0$ に外挿したときの $[Si]_{obs.}$ および ΔSi はいずれも正となり, サブマージーク溶接では SiO_2 還元がほとんどの場合生じていると考えてよい。また, $[Si]_{obs.}$ や ΔSi の変化に対して $[Si]_P$ と $[Si]_W$ は等価的作用をしており, これはサブマージーク溶接においてはスラグ酸化や脱炭反応が溶融池で行なわれることを示唆するものである。

3.3 溶融池における反応

Fig. 7 に示すように底辺 14 mm, 高さ 4 mm の三角形の固型フラックスを鋼板 A の内部に埋込み, その上を $B_L=0.13$ のフラックスで 1 層ビード置き溶接を行なった。固型フラックスとしては $MgO-Al_2O_3$ 系のものを採用し, その混合比を変化させて実験に供した。

Fig. 8 が $[Si]_{obs.}$ および $[O]_R$ の分析結果である。固型フラックスが塩基性となるほど $[Si]_{obs.}$ は明らかに減少し, かつ, 固型フラックスと溶接フラックスが合体された溶接後の生成スラグの塩基度は図中に併記したようにあまり変化しなかった。したがって, $[Si]_{obs.}$ はワイヤ先端付近に存在する上部フラックスよりもアーク直下の溶融池だけに存在するスラグ組成によって著しく

Fig. 7 Dimension of the plate implanted solid flux.

Fig. 8 Influence of solid flux on Si and oxygen contents in weld metals.

Fig. 9 Observed value and extrapolated value of apparent equilibrium constant $K'_{Si}(=[\%Si] \cdot [\%O])^2$.

変化すると考えられる。また, $[O]_R$ も同様に固型フラックスの塩基度上昇によって減少した。

これらのことから, サブマージーク溶接においてはアーク直下の溶融池で $(SiO_2) \rightarrow Si + 2O$ の解離反応が生じ, 溶融池内の溶解酸素はこの O によって著しく影響されると考えられる。

SiO_2 還元の見掛けの平衡定数 $K'_{Si}(=[\%Si][\%O]^2)$ と a_{SiO_2} の関係は Fig. 9 のごとくであり, K'_{Si} は厳密には $[Si]_e$ が少ないほど小さくなっているものの 1900 および 1950°C の外挿平衡値²⁾内に収まる。したがって, サブマージーク溶接における脱炭反応はスラグ塩基度に無関係に見掛上 1900~1950°C での平衡関係で取扱うと考えられる。

3.4 アーク雰囲気組成の検討

溶融池で SiO_2 の解離が生じ, またそれは a_{SiO_2} に

よって変化するから、アーク雰囲気組成もスラグの塩基度によって変化すると予想できる。そこで Fig. 10(A) に示すような真空サンプラを用いて下記のとおりでアーク雰囲気ガスを採取し、その組成を分析した。まず Fig. 10(B) に示すように溶接線前方にサンプラを置き、その先端とワイヤの距離 L が約 30 mm に達したときに、サンプラを急激にアーク直下まで押し込み、先端の溶損でサンプラ中に雰囲気ガスが侵入したのち、大気への混入を防ぐためだけにコック⑤を閉じる。つぎに真空ホース④からマイクロシリンジでガスを採取してガスクロマトグラフィでその組成を分析した。なお、 L を 30 mm としたのは本実験における溶接条件ではクレータ長さが約 70 mm であるからである。

Fig. 10 Method of extracting gas from arc cavity.

Fig. 11 がこのようにして求めたアーク雰囲気ガスの分析結果で、 B_L の増加で P_{CO_2}/P_{CO} 比は減少することがわかった。この結果からスラグ塩基度の上昇によってアーク雰囲気中の P_{O_2} は減少すると推定でき、この傾向は高塩基性スラグで a_{SiO_2} が低下し溶接金属中酸素量が減少することと一致する。

Fig. 11 P_{CO_2}/P_{CO} in the gas extracted from arc cavity and slag basicity.

いま、アーク雰囲気は全圧が 1 atm で CO_2 , CO , O_2 で構成されているとすると次式が成立つから、アーク雰囲気組成を仮定すると構成ガスの分圧が求まる。

$$2CO + O_2 \rightleftharpoons 2CO_2 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\log K = 29530/T - 9.071 \quad \dots\dots\dots (2)$$

Table 3 はアーク雰囲気組成を 3000°K として算出した構成ガスの分圧である。塩基度が最小のスラグの場合でも P_{CO} が 0.96 atm になり、アーク雰囲気組成の主成分は CO ガスと考えられる。

Table 3. Presumed values of gas compositions in arc cavity.

Flux code	B _L	P_{CO_2}/P_{CO}	P_{CO} (atm)	P_{CO_2} (atm)	P_{O_2} (atm)
G 1	-0.72	4.4×10^{-2}	9.61×10^{-1}	3.84×10^{-2}	2.84×10^{-4}
G 4	0.73	1.6×10^{-2}	9.84×10^{-1}	1.57×10^{-2}	3.76×10^{-5}
G 7	1.80	4.0×10^{-3}	9.99×10^{-1}	3.98×10^{-4}	2.35×10^{-6}

Fig. 12 はスラグの塩基度と溶接過程での C 変化量 ΔC の関係である。 ΔC は約 -0.02% となりスラグ塩基度によってほとんど変化しない。この ΔC がすべて $C + O \rightarrow CO$ の反応の結果とするならば、母材溶融率が約 50% であるから、溶着金属 100 g を作るために損失する C 量は 0.04 g で、これによる CO ガスの体積は 3000°K で 820 cc となる。いっぽう、溶着金属 100 g に対応するアーク空洞の体積を 181 cc⁴⁾ とすれば、前記 820 cc はアーク空洞の体積の約 5 倍となる。また、 CO ガスはおもに溶融金属の凝固時に発生すると考えて、1500°C における CO ガス量を求めるとこれはアーク空洞の体積の約 2.7 倍となる。したがって、溶接中にアーク空洞から逸出するガス量を考慮に入れてもアーク空洞はほとんど CO ガスで満たされていると考えることができ、Table 3 の結果を支持する。

Fig. 12 ΔC and slag basicity.

3.5 スラグ中酸化鉄と酸素量

いままでの $[O]_R$ 測定結果をスラグ中の (FeO) 量で整理すると Fig. 13 が得られる。 B_L が -0.3 ~ +1.5 の広範囲にわたって $[O]_R = 0.028(\%FeO) - a, (\%)$ の関

Fig. 13 FeO contents in slags and oxygen contents in weld metals.

係が存在し、スラグ塩基度により $[\%O]/(\%FeO)$ が変化すると伊藤⁵⁾の報告と異なった結果を示した。同一フラックスを用いても $[Si]_w$ が増加すると $[O]_R$ と (FeO) は上式の関係を満たしつつ減少するが、これは溶融池内の溶解酸素は一定比で (FeO) と共存しており、Si 量が増すほど溶解酸素が減少するためと考えられる。ちなみに、ESW においても $[O]$ と (FeO) が直線関係にあることが報告⁶⁾されている。

3.6 Mn に関する検討

スラグの塩基度による溶接金属中の Mn 変化が Si のそれに比べて小さいことから本項までは Si に着目して考察したが、ここではさらに Mn と O の関係について若干の検討を加えた。

スラグの塩基度と Mn 変化量 ΔMn の関係は Fig. 14 のごとくであり、 ΔMn は $[Si]_w$ の多少にかかわらず負となった。また、一定 B_L の場合には $[Si]_w$ が多いほど、一定 $[Si]_w$ では B_L が増すほど Mn 減量が少ない結果を示した。

スラグの塩基度と生成スラグ中 MnO 量の関係は Fig. 15 である。MnO は一定 B_L では $[Si]_w$ が多いほど、一定 $[Si]_w$ では B_L が上昇するほど少なくなり、Fig. 14 における Mn 減量と一致した傾向を示した。本実験にけるフラックスは MnO を含まないから、この MnO はすべて溶接過程で生成したものと考えられる。

スラグ中 MnO の分析値を用いて Mn と O の関係を求めると Fig. 16 のようになり、 K_{Mn} は 2450~2700°C の外挿平衡値に相当する値になった。Si と O の関係が 1900~1950°C での擬平衡にあるのに対して、 K_{Mn} がこのような高温の値になるのはフラックス中に MnO が存在しないから反応の初期においては MnO の還元は起りえず Mn の脱酸反応の進行途中で反応が中止したことを示すものと考えられる。ESW においてはフラックス

Fig. 14 Influence of slag basicity on Mn decrease through welding reaction.

Fig. 15 Relation between slag basicity and MnO contents in slags.

Fig. 16 $(MnO)/[\%Mn] \cdot [\%O]$ and slag basicity.

が MnO を含まない場合でも Si と O および Mn と O はともに 1800~1900°C での平衡関係にあるが⁶⁾、これは ESW ではサブマージーク溶接よりもスラグと溶融金属の反応時間が長いことや比反応表面が大きいことによると考えられる。

Mn 減量およびスラグ中 MnO が B_L の上昇によって減少し、その結果として Fig. 16 の K_{Mn} が B_L の上昇とともに小さくなる傾向を示したが、これは B_L 上昇による a_{SiO_2} の低下で SiO_2 解離に基づく $[O]$ が減少して脱酸で消費される Mn が少なくなるためと考えられる。また、 $[Si]_w$ が増すほど Mn 減量およびスラグ中 MnO が減少するのは $[Si]_e$ の増加で SiO_2 解離が抑制されて $[O]$ が減少するためであり、フラックスから Si を添加して溶接金属中の Si を増すと MnO はさらに減少し、 a_{SiO_2} が最小のフラックス G7 では $[Si]_{obs.} = 0.91\%$ のときに MnO は 0.1% となった。

つぎに、 $[Si]_w$ が 0.02% とほぼ一定で $[Mn]_w$ が 0.44, 0.91, 1.78% のワイヤを用いて $[Mn]_w$ が溶接金属中の Si, Mn および O 量におよぼす影響を調べた。

Fig. 17 が $[Mn]_e$ と ΔSi および ΔMn の関係であり、 $[Mn]_e$ の増加によって ΔMn は直線的に減少した。いっぽう、 ΔSi は $[Mn]_e$ とともに増して、 $[Mn]_e$ の増加で SiO_2 の解離が促進されることを示した。

Fig. 17 Influence of $(Mn)_e$ on ΔSi and ΔMn .

Fig. 18 は $[Mn]_w$ が異なる場合の K_{Si} と a_{SiO_2} の関係を求めたものであり、見掛けの平衡定数は 1900~1950°C の外挿平衡値内に収まり、 $[Mn]_e$ とは全く無関係に Si と O の関係は擬平衡状態にあることが明らかになった。これから、フラックス中に MnO が存在しない場合にはアーク雰囲気や SiO_2 解離でスラグから溶融池に供給された酸素の Mn による脱酸が進行すると SiO_2 解離が促進されて溶融金属中の Si および O が増加し、この酸素がアーク雰囲気への逸出や脱酸によって減少するとさらに SiO_2 解離が進行し、Si と O は 1950°C の擬平衡に達する。しかし、反応時間が短いた

Fig. 18 Influence of Mn contents in wires on apparent equilibrium constant $K'_{Si} = ([\%Si] \cdot [\%O])^2$.

めに Mn と O は擬平衡関係に達するまでに至らないと考えられる。

4. ま と め

サブマージアーク溶接における脱酸反応におよぼすスラグ塩基度の影響について検討し、つぎのことを明らかにした。

- 1) 一般に広く用いられる溶接フラックスにおける塩基度 B_L の計算値はスラグ中 SiO_2 の活量 a_{SiO_2} とよく対応し、溶接金属中酸素量は a_{SiO_2} の減少によって低減できる。
- 2) サブマージアーク溶接における脱酸反応はアーク直下の溶融池で SiO_2 の解離が生じ、これによる酸素が溶解酸素量に著しく影響を与えるとして説明できる。
- 3) アーク雰囲気ガスの主成分は CO ガスであり、スラグの塩基度が増すほどアーク雰囲気中の P_{CO_2}/P_{CO} 比は減少する。
- 4) 溶接金属中の酸素はスラグ中 (FeO) と一定比で対応しており、この比率はスラグ塩基度によって変化しない。
- 5) フラックスが MnO を含まない場合、溶接金属中の酸素量は Mn 量に無関係に Si との擬平衡関係で取扱いうる。

参 考 文 献

- 1) M. R. Kalyanram, T. G. Macfarlane and H. B. Bell; JISI, 179 (1960), 58-64
- 2) R. H. Rein and J. Chipman; Trans. Met. Soc. AIME, 233 (1965), 415-425 WM-5-795 (1975)
- 3) 学振才19委: 製鋼反応の推奨平衡値, 日刊工業新聞社, 1968
- 4) 坪井, 寺嶋: 溶接学会誌, 42 (1973), 38-47
- 5) 伊藤, 中西: 溶接学会全国大会講演概要, 15 (1974), 148-149
- 6) 中野, 玉置, 坪井: “エレクトロスラグ溶接における冶金反応の検討(第1報)”, 本誌投稿中