

Fig. 2. Removal of non-metallic inclusion and two affecting factors, power applied and Si content in remelted steel.

(86) エレクトロスラグ法による鑄塊の鑄肌、鑄塊性および溶解速度について

(エレクトロスラグ再溶解-ESR-法に関する研究-I)

神戸製鋼所, 中央研究所

理博 草道 英武

工博 成田 貴一

○福原 義浩・小山 伸二

On Ingot Surface, Ingotism and Melting Rate of Electroslag Remelted Ingot. (Studies on electroslag remelting, ESR-I)

Dr. Hidetake KUSAMICHI,

Dr. Kiichi NARITA,

Yoshihiro FUKUHARA

and Shinji KOYAMA

1. 緒言

コンセルアーク溶解法の開発は高品質、高信頼性の特殊鋼の溶解技術に画期的な進歩をもたらした。たしかにコンセルアーク溶解法には周知のごとくいろいろの特徴があるが、また一方では2, 3の改良すべき点も残されている。すなわち1) 鑄肌があまり良好でない、2) 直流電源および真空排気系を必要とするので設備費が高価である、などである。ソ連ではエレ

コンセルアーク溶解法の開発は高品質、高信頼性の特殊鋼の溶解技術に画期的な進歩をもたらした。たしかにコンセルアーク溶解法には周知のごとくいろいろの特徴があるが、また一方では2, 3の改良すべき点も残されている。すなわち1) 鑄肌があまり良好でない、2) 直流電源および真空排気系を必要とするので設備費が高価である、などである。ソ連ではエレ

(3) 地疵については容易に極めて水準の高い材質を得ることができる。

(4) 非金属介在物の精錬には、素材の脱酸素素含量が十分で、溶解電力を余り上げず、かつ鋼の溶融点が高い場合に最も優れた結果を得た。溶解速度が早い時はA型介在物の除去率が悪く、脱酸素素量の少ない時にはB+C型が多く残留した。

(5) 化学成分は鋼塊底部に大きな変動がみられたがそれ以外の部分ではSiに多少の酸化損失がある程度でほかの元素には母材に比して問題となる程の差を見なかつた。なおS分析値は再溶解によりかなりの脱硫が行なわれることを示している。

文 献

- 1) トレグベンコ, レイベンソン: エレクトロスラグ再溶解法による製鋼 (1962) ソ連冶金出版局, 日ソ通信社訳。
- 2) A. F. TREGBENKO et al: Stal (in English), 3 (1961), p. 190.
- 3) V. V. TOPILIN et al: Stal (in English), 9 (1963), p. 700.
- 4) W. RICHLING: Neue Hütte, 9 (1961), p. 565.
- 5) A. C. WILLIAMS: J. Iron & Steel Inst.(UK), 7, (1964), p. 581.

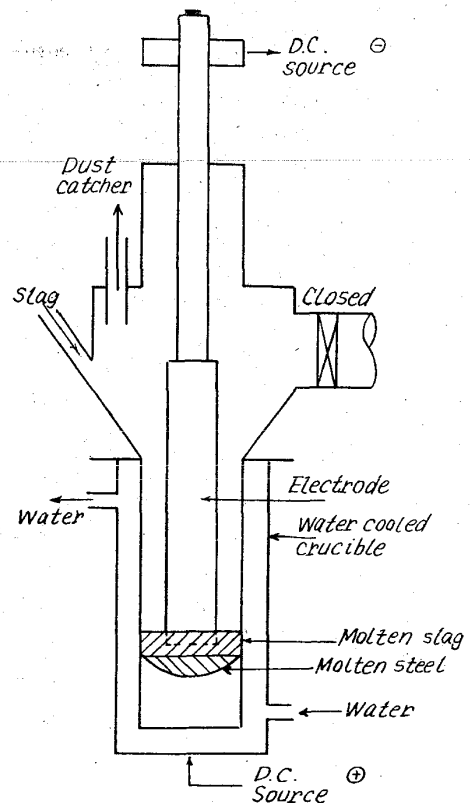


Fig. 1. Apparatus for ESR.

Table 1. Chemical Composition of Electrode (%).

Element	C	Mn	Si	P	S	O	N
Electrode	0.32	0.44	0.24	0.013	0.010	0.008	0.008

クトロスラグ溶接法からエレクトロスラグリメルト法 (ESR) をウクライナ共和国のパトン電気溶接研究所で開発し、コンセルアーク溶解法の欠点を補う方法として工業化している。ESR では溶融スラグが鑄塊と水冷するつばの間隙に入つて、いわゆる衣造塊の効果によつて極めて平滑な鑄肌が得られるといわれる。また凝固はコンセルアーク溶解と同じく layer by layer に行なわれるので偏析がなく、溶鋼よりも軽い介在物は浮上分離し、スラグ反応によつても介在物が減少するといわれている。筆者らは ESR に実際このような特徴があるものかどうかを調査するため、容易に得られる 4 種類のスラグを用いて、コンセルアーク溶解炉によつて ESR の予備の実験を行なつてみた。本研究では ESR 溶解条件およびスラグの種類と鑄肌および溶解速度との関係を統計的に調べた結果を述べ、あわせて非金属介在物の挙動についても言及する。

## 2. 実験方法

実験にはすでに述べたごとくコンセルアーク溶解炉を用いた。溶解装置の概略を Fig. 1 に示す。電極材は塩基性高周波炉溶解材で、その化学組成を Table 1 に示す。電極の寸法は 140mm φ で、るつばは 200mm φ のものを用いた。スラグとしては溶接用ユニオンメルト Grade 80 (以下 G80)、G80 に CaO および CaF<sub>2</sub> を添加して塩基度を上げたもの (以下変性滓)、電気炉の還元期のスラグおよび合成チタニア系滓 (以下チタニア系) の 4 種類を用いた。その使用前の化学組成を Table 2 に示す。ESR は溶融スラグの電気抵抗によつて電極材を溶解するのであるが、溶融スラグ浴を作るまでが難

しく、いろいろ試験した結果、厚さ約 10mm の鋼板の上に直径約 10 mm、高さ約 20 mm の鋼の突起を溶接したものに約 500g のスラグを置いて、その突起と電極を接触させてアークを飛ばし、そのアーク熱でスラグを溶解する方法をとつた。スラグ 500g では十分な厚さのスラグ浴ができないので、5~10kg くらいのスラグを 0.5kg~1kg づつに分けて投入する。電極の降下はコンセルアーク溶解の場合と同様であつて、電圧と電極間隔がほぼ比例するので、電圧が一定になるように降下させる。もし電極の降下が速すぎると短絡が起きるのですぐ判る。逆に降下が遅すぎると電極がスラグ層から離れて、スラグと電極の間にアークが発生するので、電圧の激しい変動と振動音から判る。

実験条件の組合わせは第 3 表から判るごとくスラグの種類を 4 水準、スラグ量 2 水準、電力を 2 水準として 3 元配置法によつて 16 通りとした。

## 3. 実験結果

### 3.1 鑄肌

鑄肌の代表的な例を Photo. 1~Photo. 3 に示す。鑄肌の良否の判定結果は第 3 表に示すが、G-80 を使用した場合の最も良好な鑄肌を基準にして判定した。それによると G-80 では總体的に鑄肌は良好で、スラグ量が多くて電力が高い場合にのみやや表面に小さくぼみが認められた。そのほかのスラグでは電力によつてかなり鑄肌の状態に差があり、75kW では十分良好な鑄肌のものも得られなかつた。しかし電力を 150kW にするといずれのスラグについてもほぼ良好な鑄肌のものも得られた。

### 3.2 サルファプリント

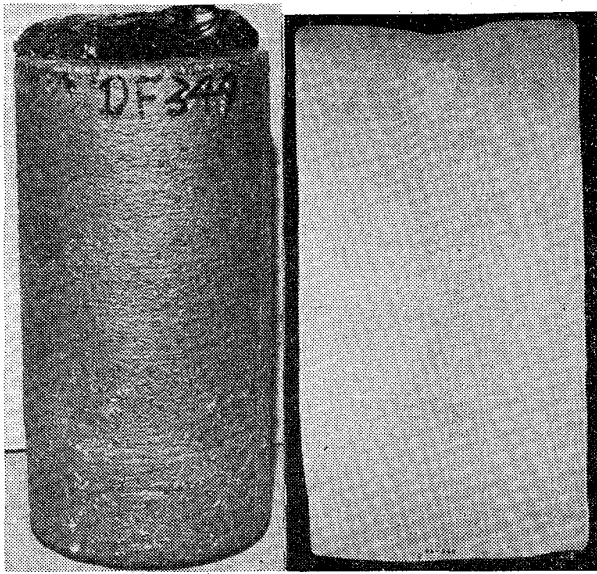
鑄塊を縦割りして、縦断面のサルファプリントを行なつたが、その内代表的なものを Photo. 1b~Photo. 3b に示す。鑄肌が良好な場合には偏析も極めて少ないようであるが、鑄肌が特に悪い Photo. 2 ではプール状の模様が認められる。

Table 2. Chemical Composition of Slags (%).

	FeO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	MnO	CaO	P	S	TiO <sub>2</sub>	CaF <sub>2</sub>
G 80	1.32	36.68	14.15	10.16	7.66	25.96	0.015	0.014	—	3.00
Converted	0.32	23.60	9.82	7.91	5.18	33.30	0.020	0.008	—	16.26
Basic	0.88	25.24	5.48	12.07	0.99	53.77	0.069	—	—	—
Titania	1.04	31.38	9.22	6.88	0.28	24.66	0.006	0.003	19.54	—

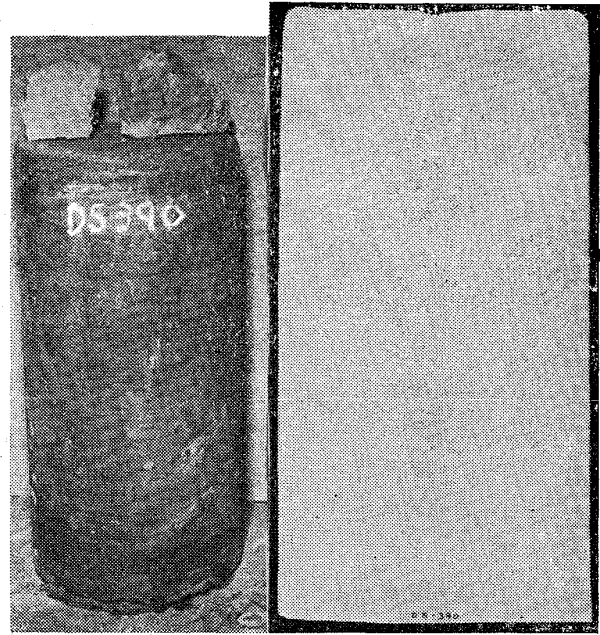
Table 3. Results of experiment.

Power	Properties	Slag		G80		Basic		Converted		Titania	
		5 kg	8 kg	5 kg	8 kg	5 kg	8 kg	5 kg	8 kg	5 kg	10 kg
Power 75kW	Ingot surface	good	good	good	fair	bad	bad	good	fair		
	Melting rate kg/min.	1.60	1.46	0.76	0.82	1.65	1.11	1.41	0.96		
	Melting efficacy %	35.5	32.4	16.9	18.1	36.6	24.6	27.5	21.3		
	Sulfur print	good	good	good	bad	good	good	good	bad		
Power 150kW	Ingot surface	good	fair	good	good	good	fair	good	good		
	Melting rate kg/min.	2.14	2.49	1.12	1.31	2.24	2.36	1.63	1.41		
	Melting efficiency %	23.8	27.7	12.5	14.5	24.9	26.2	18.1	15.7		
	Sulfur print	good	good	good	good	good	good	good	good		



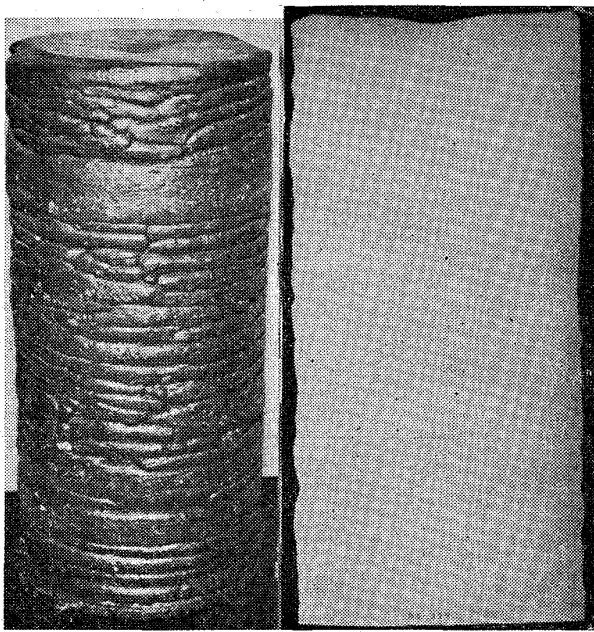
(a) Ingot (b) Sulfur print

Photo. 1. ESR ingot with G80.



(a) Ingot (b) Sulfur print

Photo. 3. ESR ingot with titania slag.



(a) Ingot (b) Sulfur print

Photo. 2. ESR ingot with converted G80.

3.3 溶解速度

溶解速度を電極の降下速度から算出して、Table 3 に示した。Table 3 の値を統計的に解析して、その分散分析表を Table 4 に示すが、A (電力)、C (スラグの種類) の効果が高度に有意であり、電力の高い方が溶解速度は速く、スラグについては G-80 が最も速く、変性滓、チタニア系、塩基性滓の順に溶解速度が遅くなっている。しかし G80 と変性滓の間には溶解速度に差があるとはいえない。A×B (電力とスラグ量の交互作用) および B×C (スラグ量とスラグの種類の交互作用) が5% 有意水準で有意であつて、電力が低いときはスラグが少ない程溶解速度は速く、電力が高いときは逆に

り、またスラグによつてスラグ量と溶解速度との関係が一定ではない。さらに溶解速度から溶解効率を算出して Table 3 に併記したが、溶解効率は電極材を溶解するのに必要な理論的热量を消費電力で除した商であつて、同一寸法の鑄塊をコンセルアーク溶解する場合には効率は約 17% であつて、コンセルアーク溶解よりもむしろ効率は高いようである。

4. 考 察

鑄肌はスラグの流動性、融点、表面張力などによつて影響されると考えられる。流動性はハーティ法用の金型に流してみたが、いずれも流動性がよくて差が認められなかつた。融点はいずれも 1100°C ~ 1200°C の範囲にあり、表面張力については測定を行なつておらず、参考にはできなかつた。鑄肌とスラグの特性については粘性、融点、表面張力からだけでは判定できず、やはり実際に使用してみないと微妙な違いは判らないようである。すなわち良好な鑄肌は適正なるスラグと適正なる溶解条件の組合わせによつて得られるもので、良好な鑄肌を得るにはかなり高度の技術を要するようである。

なお G80 を用いて CrMo 鋼の 2 トン鋼塊を ESR 法で溶製して、直接圧延を行なつてみたが、ほとんど手入を必要としないほど表面疵の少ないピレットが得ら

Table 4. Variance Analysis.

f	d. f.	s. s.	m. s.	F <sub>0</sub>	F <sub>(0.05)</sub>	F <sub>(0.01)</sub>
A	1	15189	15189	136**	10.13	34.21
B	1	248	248	2.21	10.13	34.21
C	3	22397	7466	66.6**	9.28	29.46
A×B	1	1427	1427	12.7*	10.13	34.21
A×C	3	2365	788	7.03	9.28	29.46
B×C	3	6582	2194	19.6*	9.28	29.46
l	3	337	112			
	15					

669.187.26.649.046.582

れ, ESR による鑄塊の鑄肌はきわめて良好であることが判つた。

サルファプリントは一般に良好で, 鑄肌が良好なときはサルファプリントも良好で, 鑄肌が悪いときはサルファプリントも悪く, インゴットパターンがあらわれるようである。

溶解速度が電力によつて変るのはうなづけるが, スラグの種類によつてかなり差がある点については考察を加えなければならない。スラグの電気伝導度が低いほどスラグ層における発熱量が多く, 導体におけるジュール損失が少ないので効率は高くなるが, 本実験結果はそれだけでは説明がつかないようである。電圧と電極間隔の関係はいずれのスラグについてもほぼ 10V/cm に近く, 大きな差がみられなかつたことから, 実際溶解が行なわれている温度(実測約 1830°C)での電気伝導度には差がないともいえる。実際電気伝導度を約 1400°C から 1100°C くらいの範囲で測定してみると明らかに差があるが, 温度が上がるにしたがつてその差が小さくなる傾向がある。

本研究では溶解電源としては直流を用いたが, そのためスラグの電気分解が起つて, その方にエネルギーが消費されたとも考えられるが明らかでない。

### 5. 結 言

コンセルアーク溶解炉を利用して, 直流で4種類のスラグによる ESR の予備的試験を行なつたが, スラグの種類と溶解条件によつて鑄肌, サルファプリント, 溶解速度にいちじるしい差がみられ, ESR は高度の技術を要することが判つた。

### 文 献

- 1) B. E. PATON, B. I. MEDOVAR: Engineering Materials and Design, 10 (1961), p. 718.

## (87) メタル—スラグ反応について

(エレクトロスラグ再溶解-ESR-法に関する研究—II)

神戸製鋼所, 中央研究所

理博 草道 英武・工博 成田 貴一

○福原 義浩・小山 伸二

### On Metal-Slag Reaction.

(Studies on electros slag remelting, ESR—I)

Dr. Hidetake KUSAMICHI, Dr. Kiichi NARITA,  
Yoshihiro FUKUHARA and Shinji KOYAMA

### 1. 結 言

コンセルアーク溶解法の開発は高品質, 高信頼性の特殊鋼の溶解技術に画期的な進歩をもたらした。たしかにコンセルアーク溶解法には周知のごとくいろいろの特徴があるが, また一方では 2, 3 の改良すべき点ものこされている。すなわち, 1) 鑄肌があまり良好でない, 2) 直流電源および真空排気系を必要とするので設備費が高価である, などである。ソ連ではエレクトロスラグ溶接法からエレクトロスラグリメルト法(ESR)をウクライナ共和国のパトン電気溶接研究所で開発し, コンセルアーク溶解法の欠点を補う方法として工業化している。ESR にはコンセルアーク溶解にはみられないスラグ—

Table 1. Chemical composition of electrodes (%).

C	Si	Mn	P	S	O	N
0.32	0.24	0.44	0.013	0.010	0.008	0.008

メタル反応がありこれによつて脱硫, 脱酸だけでなく, 場合によつては脱燐も可能だとしている。筆者らは ESR のこの長所に着目し, 容易に得られる4種類のスラグを用いてコンセルアーク溶解炉を利用して, 直流で ESR の予備的試験を行なつた。本研究では主としてスラグ—メタル反応に注目し, 実験結果を統計的に解析し, 熱力学的な考察を加えた。

### 2. 実験方法

#### 2.1 電極材

塩基性高周波炉溶解材 (JIS-SF50)

寸法 140mm φ × 1m, 約 100kg, 表面旋削

#### 2.2 スラグ

市販の溶接用ユニオンメルト Grade 80 (以下G80), G80 変性滓 (G80 に CaO, CaF<sub>2</sub> を添加して塩基性を上げたもの, 以下変性滓), 塩基性滓 (塩基性電弧炉の還元期におけるスラグ) および合成チタニア系スラグ (以下チタニア系) の4種類を用いた。その化学組成を Table 2 に示す。

#### 2.3 ESR

コンセルアーク溶解炉により, 20mm φ のるつぽを用いて直流で溶解した。溶解条件としてはスラグ量約 5 kg と約 9kg の2水準, 電力 75kW と 150kW の2水準, スラグの4種類水準の合計 16 通りの組合わせとした。

#### 2.4 試験

溶製された鑄塊を縦割りして, 鑄塊の上中下の各外周, 中心, 中間の合計9カ所の分析を行なつた。

#### 2.5 結果

各元素の挙動を Fig. 1~Fig. 5 に示した。

##### 2.5.1 Cの挙動

G80 の場合Cの分布は均一であつたが, 他の3種類のスラグでは鑄塊底部にかなり脱炭が認められ, 特に底部外周部の脱炭がいちじるしい。

##### 2.5.2 Mnの挙動

G80 と変性滓の場合 Mn は増加しており, その傾向は底部の方がいちじるしい。逆に塩基性滓とチタニア系の場合は減少しており, その傾向は底部側の方がいちじるしい。

##### 2.5.3 Siの挙動

塩基性滓と変性滓の場合には Si が減少しており, その傾向は中央部が頭部および底部よりもいちじるしい。G80 とチタニア系の場合には逆に Si はやや増加している。

##### 2.5.4 Pの挙動

いずれのスラグについても P は増加しており, 特に塩基性滓の場合がいちじるしいがその他のスラグでは増加量は僅少である。底部ほど増加が多い。

##### 2.5.5 Sの挙動

変性滓, チタニア系では若干脱硫が認められるが, 塩