

Table 5. Effect of slag remelting on mechanical properties of steel.

Sample	Tensile strength (kg/mm ²)	Elongation (%)	Reduction (%)	Charpy impact value (kg/mm ²)	Hardness HB	Composition (%)						
						C	Si	Mn	Cr	Mo	Al	
1	Electrode	85.7	23.2	62.7	13.0	256	0.44	0.21	0.49	1.47	0.21	1.14
	Remelted	87.9	23.1	63.1	15.9	261	0.42	0.43	0.49	1.47	0.18	0.76
2	Electrode	92.5	23.1	67.5	15.5	264	0.50	0.22	0.64	1.56	0.20	1.03
	Remelted	92.3	22.6	67.4	17.4	264	0.47	0.25	0.60	1.54	0.20	0.78

Heat Treatment: 910°C (Q)→710(⊕)

Table 6. Effect of slag remelting on corrosion resistance of 12% Cr steel.

Sample	5% H ₂ SO ₄ (g/m ² h)	10% H ₂ SO ₄ (g/m ² h)	Composition (%)					
			C	Si	Mn	Ni	Cr	
1	Electrode	1216	1962	0.13	0.43	0.50	0.22	12.94
	Remelted	1169	1252	0.12	0.40	0.51	0.23	12.85
2	Electrode	1214	1866	0.14	0.48	0.45	0.17	12.10
	Remelted	1126	1261	0.13	0.21	0.49	0.17	12.10

窒化鋼などでは衝撃値が向上する。しかし最初から清浄な SNC21 のようなものではほとんど差は認められない。Table 5 に窒化鋼の機械的性質を示す。

鋼のオーステナイト結晶粒度は窒化アルミニウムの含有量によつて影響される。溶解用電極として表面酸化物の多いものなどを使用すると溶解中 Al が減少し、混粒、粗粒鋼を発生することがある。かかるものでは電極材の Al 含有量を幾分高くするか、Vなどを添加して細粒効果を期待する必要がある。

非金属介在物の減少に伴う性質の改善効果は不銹鋼の耐酸化性、熱間加工性などにみられる。

Table 6 はスラッグメルトした SUS 22 鋼の硫酸に対する耐食性を比較した結果である。

9. 結 言

スラッグメルト再溶解法により 100~250 kg の鋼塊をつくり本溶解法の鋼質におよぼす影響をしらべた。

(a) 本溶解法によれば鋼塊は柱状晶がよく発達し、砂キズ、収縮孔などのマクロ欠陥は皆無に近くなる。

(b) 非金属介在物は約半減し、それに伴う衝撃値、耐食性などの向上が期待される。

(c) 鋼塊肌は美麗でキズ取が不要となる。

(d) ガス含有量、とくに O, N は約 70% 程度に減少する。

(e) 溶解に伴ない酸化性元素は若干減少する傾向にある。

文 献

- 1) 例えば A. F. TREGUBENKO & S. A. LEIBENZON: エレクトロスラッグ再溶解法 (昭 39-5) 日ソ通信社
- 2) N. ROBINSON, & J. A. GRAINGER: Metallurgia

(1963-4) p. 161

- 3) 出口, 吉村, 湯浅: 鉄と鋼, 51 (1965), p. 799.
- 4) 草道, 成田, 他: 鉄と鋼, 51 (1965), p. 802
- 5) Yu. A. SHUL'TE, A. F. TREGUBENKO, V. F. SMOLYAKOV, V. D. MAKSIMENKO, V. P. FRANTSEV, S. A. LEIBENZON and I. A. GAREVSKIKH: Stahl in English, (1960) 1, p. 37
- 6) G. A. KHASIN, R. I. KOLYASNIKOVA et ali.: Stahl in English (1963) 10, p. 788
- 7) V. V. TOPILIN, M. M. KLYUEV et ali.: Stahl in English, (1963) 9, p. 700
- 8) A. C. WILLIAMS: J. Iron & Steel Inst. (U.K.), (1964) 1, p. 581

(90) エレクトロスラッグ再溶解法における電極直径と電気抵抗に対するモデル的考察

日立金属工業, 安来工場

○一安 六夫・石川 勝久
工博 中村 信夫

Model Consideration Concerning the Electric Resistance and Electrode Diameter at the Electro-Slag Remelting.

Rokuo ICHIYASU, Katuhisa ISHIKAWA and Dr. Nobuo NAKAMURA.

1. 結 言

エレクトロスラッグ再溶解法では溶融スラッグは抵抗

発熱体として働らき、その電流分布はインゴット肌に影響を与える。例えば鑄型内径に比して電極直径が特に小さいときは鑄型壁近接部の温度上昇が不十分で、肌じわ、くびれなどの原因となる。この電極直径と鑄型直径との間には、ある限界値があると考えられる。

この限界値は鋼の種類、記入溶解電流その他の因子によつて若干の差が予想されるが、すくなくとも直径比にして半分程度は必要であろう。

また表面欠陥のないインゴットを作るためには、供給熱エネルギーの変動の少ないことが必要で、そのために

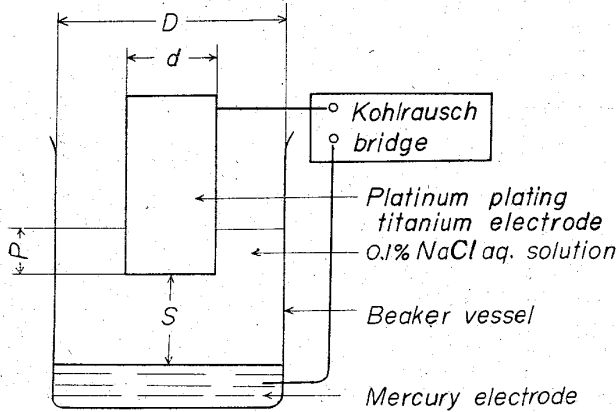
Table 1. Experimental results measuring of electric resistance of 0.1% NaCl solution. (Ω)

Pmm	Smm					Pmm	Smm				
	5	10	15	20	30		5	10	15	20	30
d ₁ =13mm D ₁ =40mm						d ₁ =13mm D ₃ =64mm					
5	63.5	90.0	117.0	136.0	179.0	5	65.0	88.5	102.5	110.5	123.0
10	54.0	78.0	103.0	122.0	163.0	10	51.0	67.0	78.5	89.0	103.0
20	49.0	72.5	96.0	116	—	20	40.5	52.5	62.0	72.0	87.0
30	47.5	71.5	94.0	—	—	30	36.5	47.5	56.0	66.0	82.5
d ₁ =13mm D ₅ =76mm						d ₁ =13mm D ₆ =86mm					
5	62.9	77.0	94.5	101.5	110.0	5	62.0	73.0	88.0	95.5	107.0
10	51.0	61.2	72.0	81.0	91.0	10	50.2	58.0	68.0	73.5	86.9
20	39.7	48.0	55.5	63.0	74.5	20	38.0	44.0	51.5	57.5	67.5
30	34.7	42.0	50.0	57.0	68.0	30	33.0	38.1	44.5	51.0	60.6
d ₂ =20mm D ₁ =40mm						d ₂ =20mm D ₃ =64mm					
5	40.0	62.5	84.0	107.0	148.0	5	38.0	55.0	63.0	73.5	88.0
10	37.0	59.0	80.1	102.0	142.0	10	32.0	45.0	53.5	62.0	78.5
20	36.7	57.1	79.5	100	—	20	27.0	37.7	46.5	55.0	72.0
30	36.2	57.0	79.5	—	—	30	25.3	35.5	44.5	53.0	69.5
d ₂ =20mm D ₅ =76mm						d ₂ =20mm D ₆ =86mm					
5	35.0	52.0	62.0	68.0	78.5	5	33.0	46.5	55.5	65.1	73.5
10	29.5	40.3	52.3	57.0	68.5	10	27.0	39.2	47.0	54.5	62.5
20	25.0	34.1	42.5	48.0	60.0	20	22.2	32.5	37.3	45.0	52.8
30	22.6	31.7	39.5	45.0	57.0	30	20.2	29.0	33.6	40.5	49.5
d ₃ =40mm D ₃ =64mm						d ₃ =40mm D ₅ =76mm					
5	13.8	23.7	33.5	42.2	58.0	5	13.6	22.2	27.8	34.4	47.0
10	13.0	22.6	31.6	40.0	56.2	10	12.2	20.5	26.0	32.0	45.5
20	12.7	21.9	31.3	39.6	56.1	20	11.5	18.8	24.5	31.0	44.5
30	12.6	21.7	31.2	39.5	56.0	30	11.4	18.5	24.4	30.5	43.5
d ₃ =40mm D ₆ =86mm						d ₃ =40mm D ₄ =68mm					
5	12.1	21.7	26.6	32.0	42.0	5	11.4	18.8	—	34	46.7
10	11.1	19.6	23.8	28.5	38.5	10	10.5	17.4	—	32.5	44.8
20	10.2	17.5	21.6	26.5	36.5	20	10.35	17.0	—	31.5	44.2
30	9.8	16.6	21.0	25.9	36.0	30	10.2	16.9	—	31.2	44.0
d ₃ =40mm D ₂ =50mm						d ₄ =60mm D ₅ =76mm					
5	12.5	22.6	—	46.5	67.0	5	7.1	14.5	—	27.5	40.5
10	12.4	22.3	—	46.0	66.8	10	7.0	14.0	—	28.0	40.0
20	12.3	22.5	—	45.5	66.8	20	6.9	14.0	—	27.0	40.0
30	12.2	23.0	—	45.2	—	30	6.8	14.0	—	27.0	40.0
d ₄ =10mm D ₆ =86mm						d: Electrode diameter D: Beaker inner diameter S: Distance between two electrodes P: Immersion extent of electrode					
5	6.7	12.1	—	22.8	33.2						
10	6.2	11.5	—	22.0	32.5						
20	6.1	11.5	—	21.5	32.3						
30	6.0	11.3	—	21.3	32.3						

は溶解電流の厳密な制御が必要である。

この制御方法を知るためには抵抗の変化すなわち、電極直径の鑄型に対する割合、極間きより、電極浸漬量、などの各因子を考慮し、さらに熔融スラッグ層の温度、それに伴う抵抗の変化などを見積る必要があり、実際の溶解装置でこれらを検討することは不可能に近い。

本報告では、これら電気抵抗をモデル的に取り扱い、



Titanium electrode 13. 20. 40. 60 mm ϕ
Beaker inner dia. 40. 52. 64. 68. 76. 86 mm ϕ

Fig. 1. Experimental method.

電極の浸漬量、鑄型内径に対する寸法比、極間距離の相互の関係を食塩水を媒体として考察した。また併せて交流電流を通じた場合の現象を観察した結果を報告する。

2. 実験方法および装置

熔融スラッグの代りに食塩水を用い、一方の極は白金メッキしたチタン棒を用い、他極は水銀を用いてビーカー中に Fig.1 のように配置し、この両極間に交流を通じて調査した。

3. 電気抵抗の測定

Fig.1 に示すようにコールラウシュブリッジ(島津KR-2型, 800 サイクル)を使用して測定した。

測定条件: 食塩水 0.1% 溶液, 21.5°C \pm 1°C

各因子は次のような組み合わせで測定した。

電極直径(d) 13, 20, 40, 60mm ϕ

ビーカー内径(D) 40, 52, 64, 68, 76, 86mm ϕ

浸漬深さ(P) 5, 10, 20, 30mm

極間距離(S) 5, 10, 15, 20, 30mm

Table 1 にこれら組合せの抵抗測定結果を示す。これから次のことが伺える。(a)極間距離、浸漬量が一定であれば、総抵抗Rはビーカー内径Dに依存する。(b)浸漬量Pはとくに直径比 D/d が 1 に近いところでは総抵抗にあまり影響しない。

オームの法則によれば総抵抗は断面積に反比例し、極

Table 2. Comparison of electric resistance, calculated, with measured value.

d cm	Dcm	P cm	S cm	Calculated res. Ω	Measured res. Ω	ΔR	d cm	Dcm	P cm	S cm	Calculated	Measured res. Ω	ΔR
1.3	4.0	0.5	0.5	58	63.5	- 5.5	1.3	6.4	0.5	0.5	62	65.0	- 3
		1.0	1.0	80	78.0	+ 2			1.0	1.0	65	67.0	- 2
		2.0	1.5	86	96.0	-10			2.0	2.0	70	72.0	- 2
		3.0	3.0	152	163.0	-11			3.0	3.0	71	83.5	-11.5
1.3	7.6	0.5	0.5	65	62.9	-2.1	1.3	8.6	0.5	0.5	69	62.0	- 3
		1.0	1.0	67	61.2	-5.8			1.0	1.0	67	58.0	+ 9
		2.0	2.0	65	63.0	+2			2.0	2.0	67	57.5	+10.5
		3.0	3.0	65	68.0	+3			3.0	3.0	66	60.6	+ 5.4
2.0	4.0	0.5	0.5	37	40.0	- 3	2.0	6.4	0.5	0.5	37	38.0	- 1
		1.0	1.0	57	59.0	- 2			1.0	1.0	42	45.0	- 3
		2.0	2.0	87	100.0	-13			2.0	3.0	51	55.0	- 4
		3.0	3.0	125	—	—			3.0	3.0	57	69.5	-12.5
2.0	7.6	0.5	0.5	30	35.0	- 5	2.0	8.6	0.5	0.5	37	33	+ 4
		1.0	1.0	38	40.3	- 2.3			1.0	1.0	40	39.2	- 0.8
		2.0	2.0	47	48.0	- 1			2.0	2.0	45	45.0	0
		3.0	3.0	39	57.0	+ 2			3.0	3.0	47	49.5	- 2.5
4.0	6.4	0.5	0.5	13	13.8	- 0.8	4.0	7.6	0.5	0.5	13	13.6	-0.6
		1.0	1.0	22	22.6	- 0.6			1.0	1.0	20	20.5	-0.5
		2.0	2.0	38	39.6	- 1.6			2.0	2.0	31	31.0	0
		3.0	3.0	51	56.0	- 5.0			3.0	3.0	40	43.5	-3.5
4.0	8.6	0.5	0.5	12	12.1	- 0.1	4.0	6.8	0.5	0.5	12	11.4	-0.6
		1.0	1.0	19	19.6	- 0.6			1.0	1.0	21	17.4	+3.6
		2.0	2.0	27	26.5	- 0.5			2.0	2.0	34	31.5	+2.5
		3.0	3.0	35	36.0	- 1.0			3.0	3.0	39	44.2	-5.2
6.0	7.6	0.5	0.5	7	7.1	- 0.1	6.0	8.6	0.5	0.5	7	6.7	+0.3
		1.0	1.0	13	14.0	- 1.0			1.0	1.0	12	11.5	+0.5
		2.0	2.0	23	27.0	- 4.0			2.0	2.0	22	21.5	+0.5
		3.0	3.0	32	40.0	- 8.0			3.0	3.0	31	32.3	-1.3

間距離に比例する。これと次元解析の概念から補正項を導入してつぎのような関係式を作った。

$$R = CS/D^2 \sigma (d/S)^q (d/P)^r \dots\dots\dots (1)$$

R: 総抵抗, S: 極間距離, D: ビーカー内径
d: 電極直径, P: 電極浸漬量, σ : 電気伝導度
C, q, r は直径比 D/d によつて決まる数。

最初は直径比(D/d)^pの項を考慮したが, S, P の変化に応じて指数pの値が決まらず, しかもCの値も(D/d)の値の変化に応じて変るため, この項は省略して(1)式の関係式とした。

指数q, r は d/S, d/P の一定の場合の測定値のみを拾いあげ, 両対数グラフの勾配より容易に求めることができる。これを求めると, 各 d/S, d/P の変化にもかかわらず, 測定範囲内では直径比 D/d の変化に対応してほぼ一義的に決定される結果となつた。

これより求めた指数q, r からCを計算したところ, Cの値も D/d に応じてほぼ一義的にきまる結果となつた。この計算結果を Fig. 2 に示す。

以上の関係式の導入結果から, 各C, q, rの値をFig. 2から求めて, 測定値と対比した結果を Table 2 に示す。この両者はかなり近い一致を示している。特に D/d の値が1に近い場合は十分測定値に代用し得る。

実際のスラッグメルト溶解法では直径比が2以上になることは装置, 作業性の点からも好ましくなく, この場合本式は十分な近似を示す。

4. 等電位面の観察

電気抵抗が両極の直径比に応じて変る原因は食塩水内の電流分布に関係する。電流分布を測定することは相当困難であるので等電位面を測つた。電流はこれと直角に流れるからこれから電流分布が予想される。

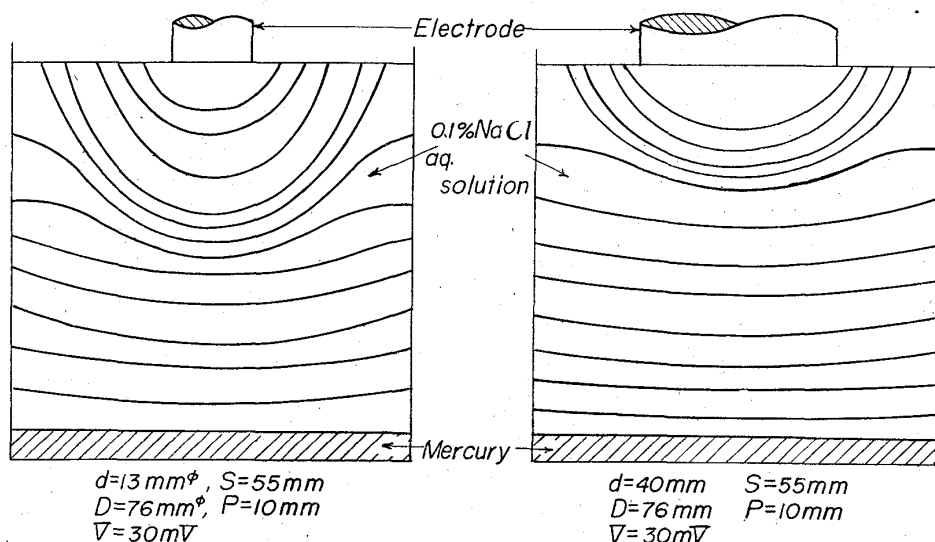


Fig. 3. Isovoltage in 0.1% NaCl solution.

食塩水中に絹糸を張つたビニール枠を置き交流電圧, 300mV を両極に与えて, 探針子によつて等電位面をたどつて, 図上に再現した結果が Fig. 3 である。探針子は絶縁被覆した白金線からなり, 検流計を通して摺動抵抗に通じ電極の一端と連結する。検流計が揺れない点を各摺動抵抗の値に応じて絹糸面上に求める。

等電位面は電極近傍で半円状を呈し, ビーカー内の水銀電極面に対するこのみだれが直径比に応じて大きくなる。

(1) 式から Fig. 3 の両図の抵抗増加割合 R/R₀ (R₀ は D=d すなわち両電極が等しいときの推定抵抗) を求めると,

D/d = 5.85 のとき R/R₀ = 2.06, D/d = 1.9 のとき R/R₀ = 1.17 となる。前述のC, q, r の変化はこの等電位面のみだれに対応して興味深い。

実際のスラッグメルト溶解法では鑄型外壁は水冷されている場合が多く, 電導スラッグの温度分布は中心部が

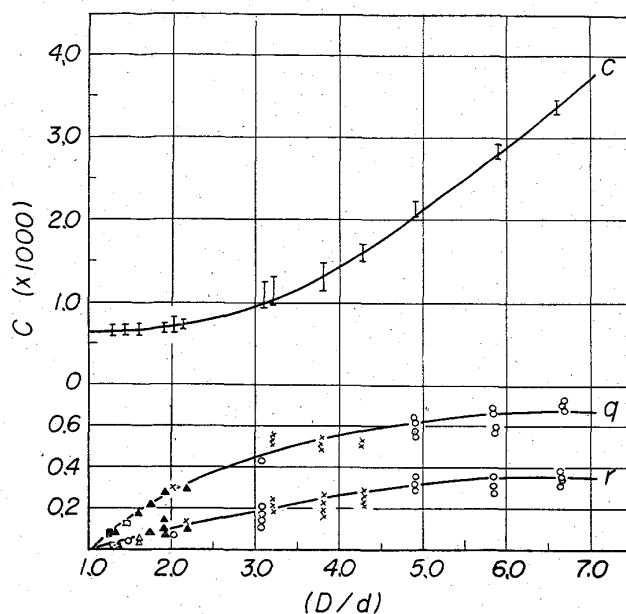


Fig. 2. Relation between c, q, r and D/d.

高く, ますます中心部が電流密度が高くなることが予想される。

5. 電流を通じたときの挙動

交流電流を通ずると当然発熱によつて食塩溶液は強い対流運動をする。実際のスラッグメルト溶解法にても観察されるように電極下から外周へと進み, 外壁に沿つて下降する。また水銀極は波立ちが生じ, その状況は電圧が低い(電流が少ない)ときは比較的大きな凹凸がゆつくりと揺れているが, 電流を増加すると小さな凹凸にかわり, 揺れも速くなり, 水銀面の中央を中心として等円円の波となつて外周に向つて拡がる。

水銀面上に異物が存在していると, それが金属, 非金属, 磁性, 非磁性にかかわらず, 外周に向つて急激に移動する。この移動は比較的少ない電流によつてもおこる。これらの現象はおそらく, イオン流と関係があり, 電流密度の低い方へと押しやられるものと思われる。

このような現象は実際のスラッグメルト溶解時にも現

われておられると思われる。溶鋼プールはイオン流によつて常に叩かれ波立っており、実際、電極溶融スラグ層に深く浸漬すると、時として溶鋼面が電極下端を打つような音響を發する。またこの異物を外周部へ押しやる現象は非金属介在物の分離と関係が深いと考えられる。

本結果と実際の溶解時の現象と照合すれば興味ある点を得られるものと考えられる。

6. 結 言

エレクトロスラグメルト溶解法の電極と鑄型との寸度の差による電気抵抗への影響をモデル的に取り扱い、実験式 $R=C S/\sigma D^2(d/S)^q(d/P)^r$ を導き、C, q, r の値を D/d に対応させて図から求めた。

電流を通じたときのスラグの運動、電極の運動を調べて、実際の溶解現象と対比して考察する資料を求めた。

(91) エレクトロスラグ再溶解法における溶解時の 2, 3 の現象に対する考察

日立金属工業, 安来工場

○一安 六夫・石川 勝久
工博 中村 信夫

Consideration of Some Phenomena at Electro-Slag Remelting.

Rokuo ICHIYASU, Katuhisa ISHIKAWA and Dr. Nobuo NAKAMURA.

1. 緒 言

エレクトロスラグ溶解法の原理は早くから hopkins process や kellogg process などとして知られていたが工業化されるまでにはいたらなかつた。しかし近年になつて特にソ連においてその開発がなされ高品質の鋼を得る精錬方法として注目されるようになってきた。著者らも昭和36年以来パイロットプラントによりその精錬効果を確認してきた。

本報では溶解時の 2, 3 の現象に対する考察を行なつたので報告する。

2. 溶 解 方 法

原理および溶解方法についてはすでに多くの文献^{1)~6)}によつて紹介されてきたものであるから本報では省略する。

なお実験に使用した装置の容量を下に示す。

電 圧	電 流	鋼塊寸度
1) 30V~40V	300~800 A	70φ, 100φ
2) 40V~50V	3500~4500A	210φ, 270φ

3. 鋼塊肌におよぼす電流変動および電極寸度の影響

スラグ溶解を行なつた鋼塊の1つの特徴は鋼塊側面がスラグの衣で覆われ美しい肌を有していることである。しかし溶解中の条件によつては鋼塊側面に凹凸を生じキズ取りを必要としたり時としては割れの発生やインゴットパターンの原因となる。これらの原因として溶解電流の変動と電極寸度の影響があげられる。

3-1 電流変動と鋼塊肌

溶解過程中的電流の変動は溶解途中スラグの添加を行なう場合一時に多量のスラグを装入すると溶融スラグの温度が急激に下り、抵抗の変化電流の変化をもたらす。他の1つは装置自体の問題すなわち電極下降速度が一定速度に制御されていないと溶鋼プール面と電極間隔が一定せず著しい電流の変動となつてあらわれる。前者はスラグの投入を溶解初期に行なつてしまい途中で添加をなくすかまたは少量にすることによつて解決される。後者は主に制御方法が問題となる。

以上の2点の外に鋼塊肌の状況は溶解スラグの性質によつて変化する。すなわち電気抵抗の小さいスラグは発熱量が不足し鋼塊の外側が波打つようになる。特に SiO₂ の含有量の高いスラグは電気伝導度が低下する。電気伝導度が増大しても最大電流が制限され十分電流が供給されない場合はスラグの発熱量は低下し鋼塊肌は悪くなる。しかし電気伝導度が低下したスラグを使用する場合は設定電圧を高くすることにより幾分スラグ

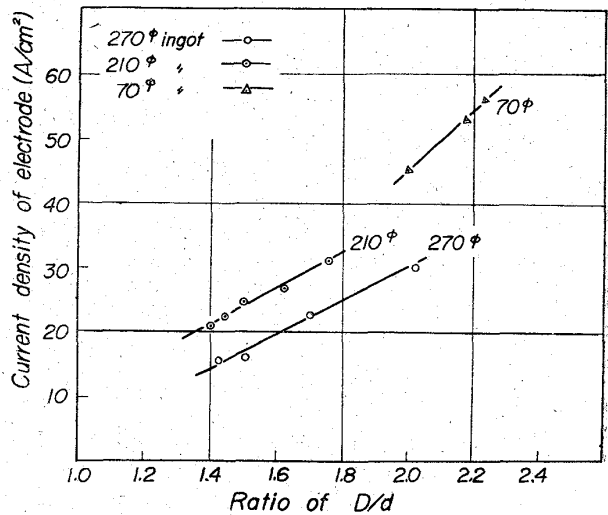


Fig. 1. Relation between current density of electrode and ratio of mold dia. D/electrode dia. d. The region above each line denote fine ingot surface.

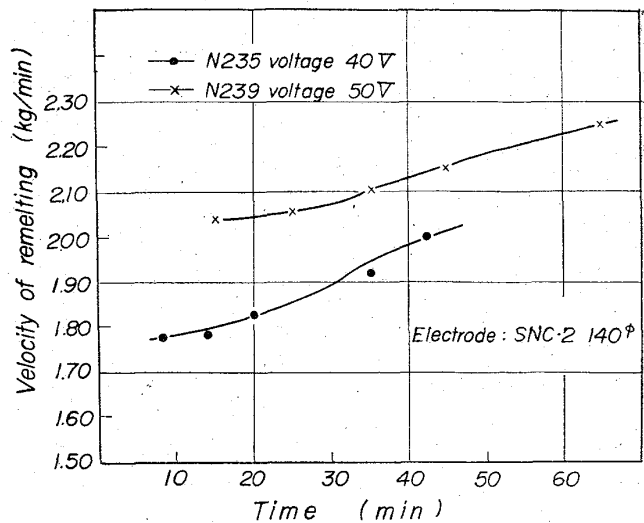


Fig. 2. Variation of the remelting speed with time.