

© 1988 ISIJ

技術報告

# ESR 内孔肉盛法における中空鋼塊のとけ込みに及ぼす回転及び電磁攪拌の影響

近藤保夫\*・児玉英世\*<sup>2</sup>・赤堀公彦\*・新山英輔\*<sup>3</sup>

## Effects of Rotation and Electro-magnetic Stirring on Penetration of Hollow Ingots in ESR Core Remelting Process

Yasuo KONDO, Hideyo KODAMA, Kimihiko AKAHORI and Eisuke NIYAMA

### Synopsis:

The ESR core remelting process has been attractive for manufacturing of large monoblock ingots or composite ingots, but it has not been put into a practical use. The reason may be that the peripheral penetration depth of a shell was not uniform.

In this paper, to overcome this problem, effects of shell rotation and electro-magnetic stirring on the shell penetration were studied. The results were as follows.

(1) The peripheral penetration depth was made much uniform by applying shell rotation or magnetic stirring.

(2) Under the same remelting conditions, the penetration depth became smaller by applying rotation or magnetic stirring.

(3) Rotation or magnetic stirring resulted in increase of the electrode melting rate.

(4) By applying the phenomena described in (3) and by combining the shell rotation speed appropriately, the shell penetration depth was made almost uniform both along the peripheral direction and longitudinal direction.

**Key words:** ESR; composite ingots; rotation; magnetic stirring; penetration depth.

## 1. 緒 言

エレクトロスラグ再溶解法 (ESR 法) の持つ高品質製造能力を応用した技術のひとつとして、MHKW 法あるいは CZR 法と呼ばれる内孔盛法が開発され、大型鋼塊の製造に利用されている<sup>1)~3)</sup>。

内孔肉盛法は、適当な方法で製造した中空鋼塊 (以下シェルという) の中空部分を ESR 法によつて充填する方法である。本法は比較的小さい ESR 設備で大型鋼塊製造が可能であり、ESR 法に比べ製造コストが低いこと、内外層の材質を自由に組み合わせることができることなどから、大型一体あるいは複合鋼塊の製造法として今後の発展が期待されているが、完全に実用化されるに至っていない。その理由は、シェルのとけ込み量が円周方向で均一にならないためと考えられる。シェルのとけ込み量不均一は、組織、組成あるいは残留応力等の不均

一を招くので好ましくなく、解決しなければならない技術課題である。

そこで本研究では、シェルのとけ込み量均一化を図る方法について検討した。

## 2. シェルとけ込み量均一化方法<sup>4)</sup>

### 2.1 予備実験

まず最初に、シェルのとけ込み状況を観察するために予備実験を行った。内孔肉盛実験はシェルに外径 140 mm、内径 57 mm、高さ 350 mm の SS41、電極に直径 30 mm、長さ 1250 mm の SK3 を用い、900A、35V で行った。

Photo. 1 に内孔肉盛鋼塊のマクロ組織とマクロ組織より求めたシェルのとけ込み量を示す。ここで、 $R$  は縦断面の右側、 $L$  は左側の値である。シェルのとけ込み量は円周方向で均一でなく、縦断面上で右側の方が大

昭和 58 年 10 月本会講演大会にて発表 昭和 62 年 9 月 29 日受付 (Received Sep. 29, 1987)

\* 日立製作所日立研究所 (Hitachi Research Laboratory, Hitachi Ltd., 832-2 Horiguchi Katsuta Ibaraki pref. 312)

\*<sup>2</sup> 日立製作所日立研究所 工博 (Hitachi Research Laboratory, Hitachi Ltd.)

\*<sup>3</sup> 日立製作所日立研究所 (現: 東北大学) 工博 (Hitachi Research Laboratory, Hitachi Ltd. Now Tohoku University)

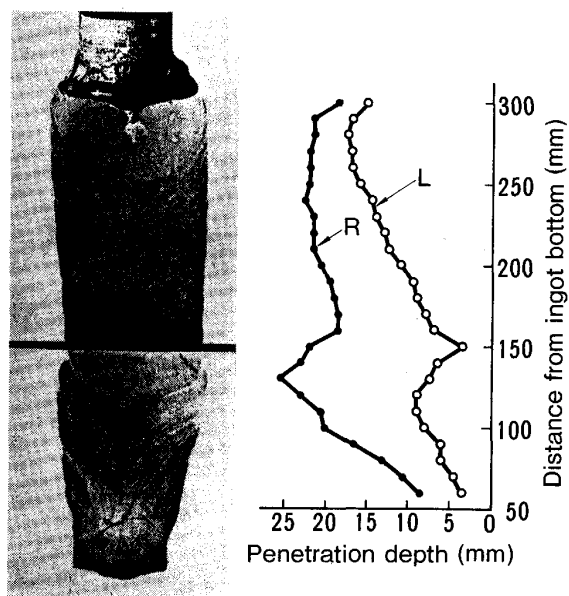


Photo. 1. Shell penetration obtained by preliminary experiment.

きくなっている。緒言で述べたように、このようなとけ込みの不均一のために実用化に至っていないと思われる。

## 2.2 シェルとけ込み量均一化方法

シェルのとけ込み量が不均一になる原因について考察を進め、次のような推論を得た。すなわち、

(1) ESR のような大電流使用プロセスにおいては、電気の供給及びとり出しの回路特性（例えばケーブルのリアクタンス）により溶解電流の偏流が生じ、電極-スラグ浴-溶鋼プール-鋼塊-定盤から構成される通路において電流密度が不均一になる。

(2) このような電流密度の不均一は、スラグ浴内のジュール熱密度の不均一分布につながり、スラグ浴の円周方向及び深さ方向の温度が異なる原因となる。

(3) 従つて、スラグ浴からの入熱量の大小によつてほぼ決定されると考えられるシェルのとけ込み量が円周方向で不均一になる。

以上のことから、電流密度の分布は ESR 装置の特性により定まり、シェルの位置に応じてほぼ固定されていると考えられる。従つて、シェルのとけ込み量の均一化を図るためには、電流密度の不均一分布がそのままスラグ浴及びシェルのある位置に固定されるのを緩和すればよいことが考えられた。

本研究ではその手段として、シェルに回転を付与する方法及びスラグ浴に電磁攪拌を付与する方法をとり上げた。

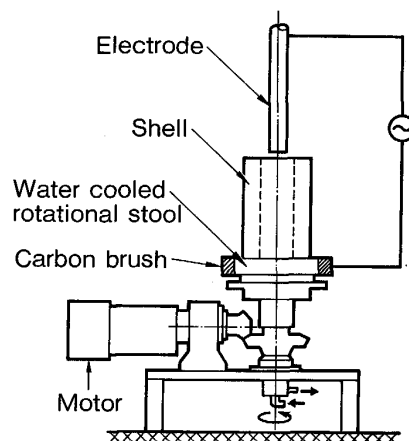


Fig. 1. Outline of experimental apparatus.

Table 1. Experimental conditions.

Shell	SFA55, SS41*, $\phi 140 \text{ mm} \times \phi 57 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$
Electrode	SFA55, SK3*, $\phi 30 \text{ mm} \times 1250 \text{ mm}$
Current	900A, 1200 A
Voltage	30V
Slag	40% $\text{CaF}_2$ -30% $\text{Al}_2\text{O}_3$ -30% $\text{CaO}$ , 400 g
Preheating of shell	None (R. T.)
Shell rotation (N)	0, 10, 20, 30, 40 rpm (constant)
Exciting current of coil	0 $\rightarrow$ 10 $\rightarrow$ 20 $\rightarrow$ 30 rpm (combined) AC250A

\* Used in experiment of combined shell rotational speed and EMS.

## 3. 実験装置及び方法

### 3.1 実験装置

Fig. 1 に回転機構を有する ESR 内孔肉盛実験装置の概略を示す。直径 270 mm の水冷回転定盤には 0.75 kW 可変速モーターとかさ歯車を介して 0~40 rpm の回転数が付与できる。定盤はロータリージョイントを介した同心二重パイプへの給排水により冷却される。

水冷定盤への電気接点のとりつけは、定盤側面にカーボンブラシをスプリングにより押しつける方法を採用した。

電磁攪拌は、電磁コイルにより励起される磁界と消耗電極に流した溶解電流との相互作用によつてスラグ浴及び溶鋼プールに円周方向の回転流を与える方法とした。電磁コイルは銅パイプ ( $\phi 10 \text{ mm} \times \phi 6.8 \text{ mm}$ ) を内径 250 mm, 高さ 400 mm に 31 ターン巻いて作製し、非磁性ステンレス鋼板を用いて装置架台に固定した。また、コイル内部は水冷し、励磁電流は交流とした。

### 3.2 実験方法

Table 1 に実験条件を示す。シェルは水冷回転定盤と同心に配置し、底部を固定リングのネジにより固定した。

実験の手順は、次のとおりである。鋼切粉とスラグをそれぞれ 50 g ずつシェル底部に置き、電極に通電して溶解を開始した。アークの発生時にスラグ 350 g を逐次

添加し、スラグが完全にとけ落ちたのを確認してから、Table 1 に示した電流、電圧条件で定常溶解を行った。

溶解中の電圧及び電流は記録にとり、その波形変化をもとに単位時間当たりの液滴数を求めた。また、断電後に溶鋼プール形状を明らかにするために、Pb 箔に包んだ FeS 3 g を添加した。

実験は、回転数一定及びシェルの高さ方向で回転数をステップ状に大きくする条件について行った。一方、電磁攪拌は定常溶解に移行直後に行い、コイルの励磁電流を 250 A 一定とした。

得られた鋼塊は、縦及び横断面についてサルファプリント及びマクロ腐食による調査を行い、シェルとけ込み量や溶鋼プール形状を求めた。

#### 4. 実験結果

##### 4.1 シェル回転数一定実験

Photo. 2 にシェル回転数  $N=10, 20, 30, 40$  rpm の各内孔肉盛鋼塊の縦断面及び底面より 250 mm の横断面のマクロ組織を示す。各鋼塊とも底面より 50~100 mm の範囲でシェルのとけ込みが大きくなっているが、それは肉盛溶解初期に固体スラグの溶融を促進させるため

に、設定電圧及び電流値 (30 V, 900 A) よりも大きな値で溶解を行ったためである。その後、設定電流、電圧条件で溶解を行い、シェルには底面より約 150 mm の位置で回転を付与した。回転なし ( $N=0$  rpm) の鋼塊では、縦断面においてシェルのとけ込み量が左右で異なり、横断面でも円周方向で異なっているが、シェルに回転を付与 ( $N=10, 20$  rpm) すると、とけ込みは縦及び横断面においてほぼ均一になることがわかる。しかしながら、 $N=30$  rpm ではとけ込みが不均一になり、シェルとコアが溶着していない部分が生じるようになる。そして、 $N=40$  rpm 鋼塊では定常溶解期部分においてシェルのとけ込みが生じなくなる。

シェルのとけ込み量及びとけ込みの均一性に及ぼす回転付与の効果を定量的に表すために、Photo. 1 の鋼塊縦断面マクロ組織上で平均とけ込み量  $\delta$  及びとけ込み量の差  $\Delta\delta$  を求めた (Fig. 2)。

Fig. 3 に  $\delta$  に及ぼすシェル回転数 ( $N$ ) の影響を示す。定常溶解期における  $\delta$  は、回転数が大きいほど小さくなり、 $N=40$  rpm ではとけ込みが生じなくなる。また、鋼塊高さの増加に伴って  $\delta$  は大きくなっているが、増加割合は回転数が大きいほど小さくなることがわかる。

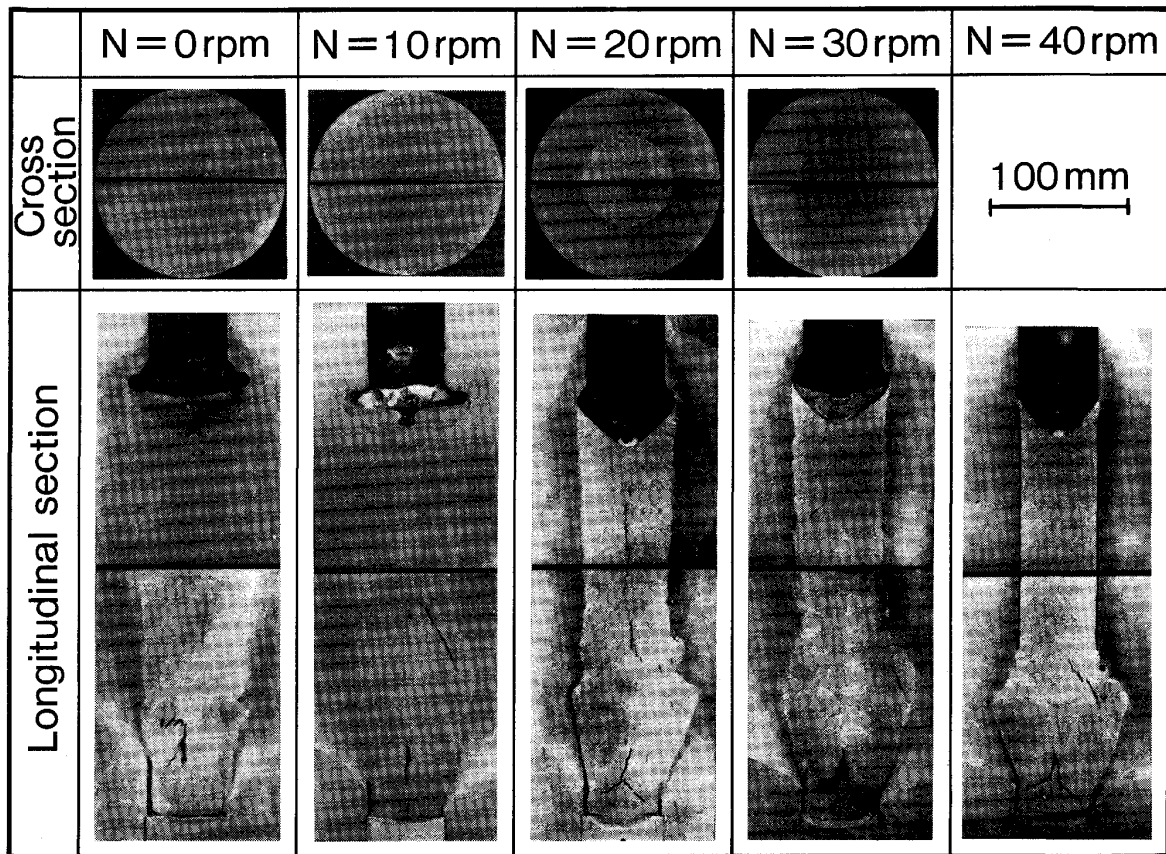


Photo. 2. Macrostructure of ESR core remelting ingots.

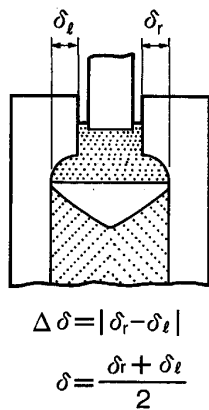


Fig. 2. Schematic illustration of shell penetration.

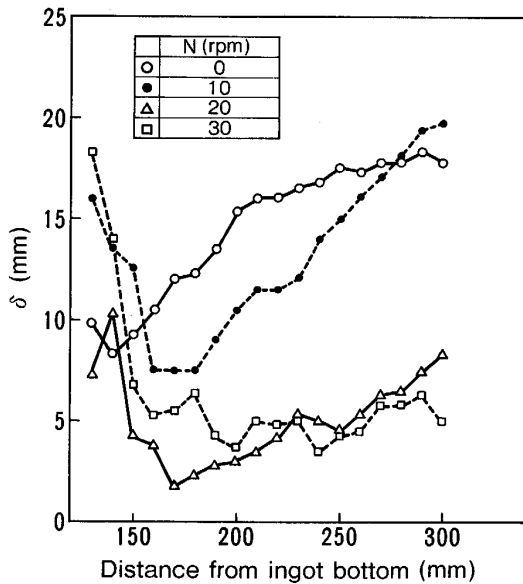


Fig. 3. Effect of shell rotation on mean penetration depth  $\delta$ .

Fig. 4 に  $\Delta\delta$  に及ぼすシェル回転数の影響を示す.  $N = 0$  rpm では値が大きく, 例えば鋼塊底部より 250 mm の位置で約 10 mm である. これに対して 10 rpm では底面より約 200 mm までは非定常溶解による影響が残る, とけ込み量は左右で異なっているが, それ以上になると, 左右でほぼ同じになり, 250 mm では  $\Delta\delta$  は 2 mm にすぎず, シェルに回転を付与することによってとけ込みの均一性が著しく向上することがわかる. 20 rpm でもほぼ 10 rpm と同様の傾向を示す. これらに対して 30 rpm では回転付与の効果が認められるが, 10 及び 20 rpm の場合に比べて  $\Delta\delta$  が大きくなっている. これは Photo. 1 のマクロ組織で観察されたように, 局所的な不溶着によってシェルへの入熱量に差が生じたためと考えられる.

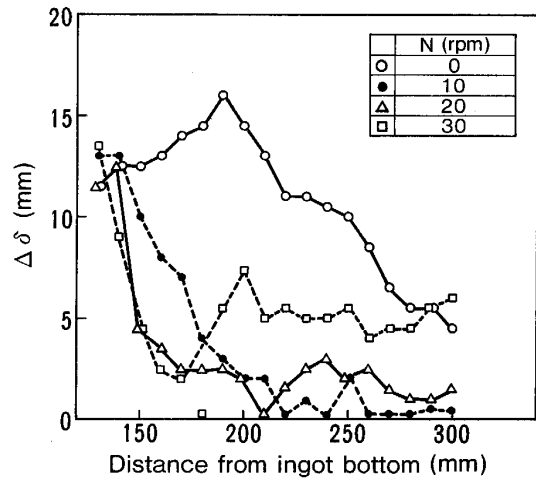


Fig. 4. Effect of shell rotation on difference of penetration depth  $\Delta\delta$ .

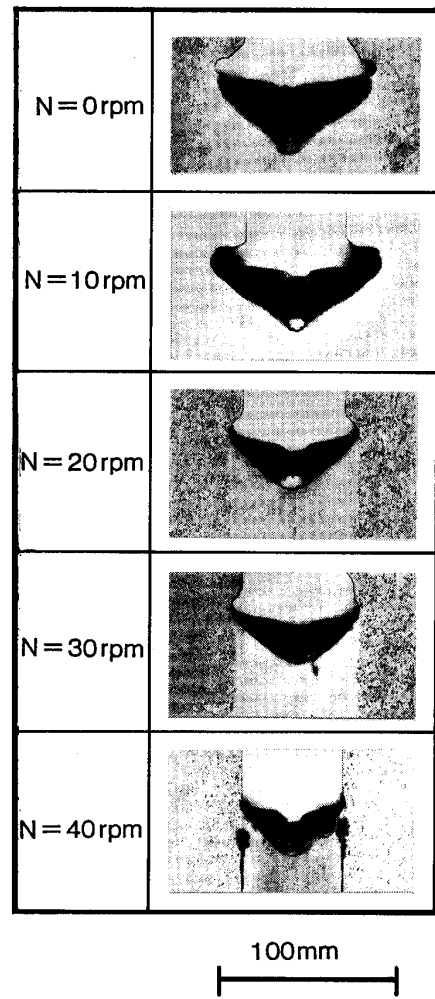


Photo. 3. Shape of molten metal pool.

Photo. 3 にサルファプリントによる定常溶解末期の溶鋼プール形状を示す. シェルのとけ込み量は, スラゲ

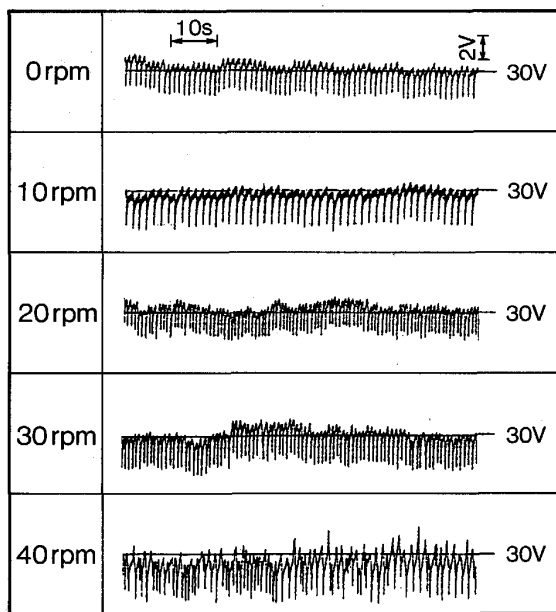


Fig. 5. Effect of shell rotation on voltage ripple.

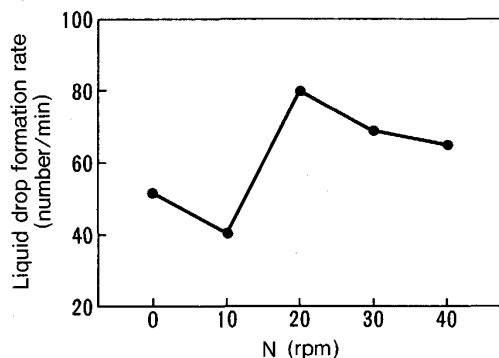


Fig. 6. Effect of shell rotational speed  $N$  on liquid drop formation rate.

浴/溶鋼プール界面で最大になっており、とけ込み現象はスラグ浴からシェルへの入熱が支配していることがわかる。溶鋼プール深さは、回転数の増加とともに浅くなっている。プール形状はシェルとけ込みのなかつた 40 rpm の鋼塊も含めて、回転を付与することにより中心軸に対する対称性が良好になっており、スラグ浴からシェルへの入熱が円周方向で均一になっていることが推察される。

Fig. 5 に定常溶解期の電圧波形を示す。波形変化のひとつの周期は、一個の液滴生成数に相当するといわれている<sup>5)</sup>。Fig. 6 に電圧波形より求めた液滴生成数を示す。液滴生成数は回転を付与することによって増加する傾向がうかがわれるが、回転数の影響は明瞭でない。

Fig. 7 に電極溶解速度とシェル回転数の関係を示す。

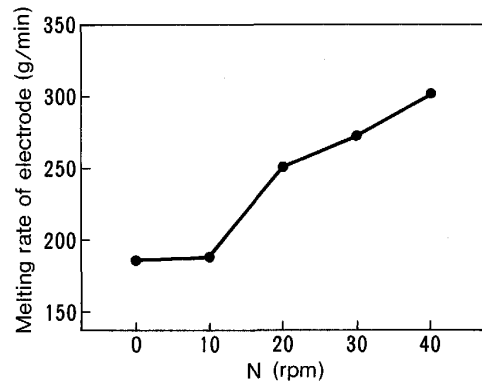


Fig. 7. Effect of shell rotational speed  $N$  on melting rate of electrode.

電極溶解速度は、回転数の増加につれて大きくなっており、回転付与でスラグ浴から電極への入熱量が大きくなることがわかる。

#### 4.2 シェル回転数変化実験

前節の結果の中で、シェル回転数の増加に伴ってとけ込み量が減少し、電極溶解速度が増加することは予想しなかつた現象であり、しかも重要な意味を持つていると考えられる。

0 rpm の場合も含めて回転数が一定の条件下では、とけ込み量は鋼塊高さの増加とともに大きくなっているが、これは内孔肉盛中にシェルに蓄積される熱量がしだいに増加するためと考えられる。従つて、この蓄積される熱量を適当な手段で制御しないと、とけ込み量を鋼塊高さ方向で一定にできないばかりか、著しい時にはシェルが完全に溶解してスラグ流出に至つてしまうことになる。この対策として、スラグ浴温度が鋼塊上方にいくに従つてしだいに低くなるように、電流及び電圧を調節することが考えられるが、スラグ浴温度に及ぼす電流及び電圧の影響が現状では明らかでないこと、肉盛中のとけ込みをモニタリングする手段がないことから、実用上は難しい。

そこで、前述の結果から、回転数を一定とせず溶解の経過とともにしだいに大きくすることにより、シェルの高さ方向におけるとけ込み量を均一にできる可能性が導きだせる。すなわち、一定の回転数ではとけ込み量がしだいに大きくなるので、回転数を徐々に大きくして電極の溶解速度を大きくし、その結果として生じるスラグ浴の移動速度を大きくして、シェルへの入熱量を小さくすることであり、電圧や電流を変える必要はない。以上のような考え方に基づいて Table 1 に示した回転数を変化させた内孔肉盛実験を行った。

Photo. 4 に回転数を 0-10-20-30 rpm とステップ状

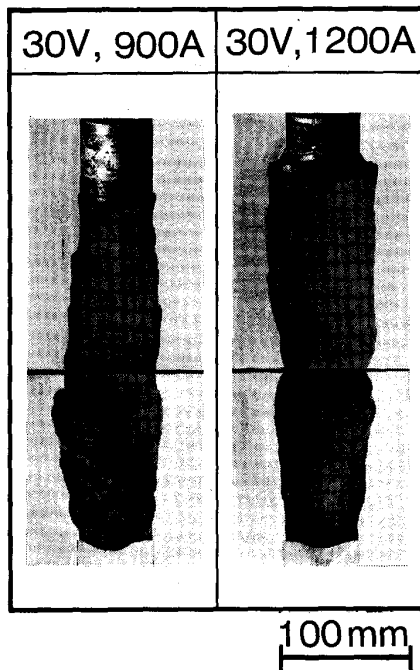


Photo. 4. Macrostructure of combined shell rotational speed ingots.

に大きくした 30 V, 1200 A の肉盛鋼塊の縦断面マクロ組織を, Fig. 8 及び Fig. 9 に同マクロ組織より測定した  $\delta$  及び  $\Delta\delta$  の変化を示す。図から明らかなように, 前述した 10 rpm 一定の場合と  $\delta$  の変化の傾向が違っている。すなわち, 回転数一定の場合には  $\delta$  はしだいに大きくなるのみであるが, 回転数を変化させることによつて 900 A では  $\delta$  はしだいに減少し, 1200 A ではほぼ一定となっている。これらから, 回転数を適当に変化させることによつて  $\delta$  を高さ方向でも一定にできる可能性が見出される。なお,  $\Delta\delta$  は回転数一定の場合とほぼ同じ値となっている。

#### 4.3 電磁攪拌実験

Fig. 10 及び Fig. 11 に 900 A, 300 V で溶解した時の  $\delta$  及び  $\Delta\delta$  の変化を示す。図から明らかなように, 電磁攪拌を付与しない鋼塊では鋼塊高さの増加につれて  $\delta$  がしだいに大きくなり, 例えば, 底面より 250 mm の位置で 19.5 mm である。これに対して電磁攪拌を付与すると,  $\delta$  は顕著に減少して底面より 250 mm で 1.5 mm にすぎない。

電磁攪拌することによつて  $\delta$  が小さくなる理由として, シェルに回転を付与した場合と同様に電極溶解速度の増加が考えられる。すなわち, 電磁攪拌しない鋼塊の電極溶解速度が 212 g/min であるのに対し, 電磁攪拌を付与すると 290 g/min と増加しており, その結果, スラ

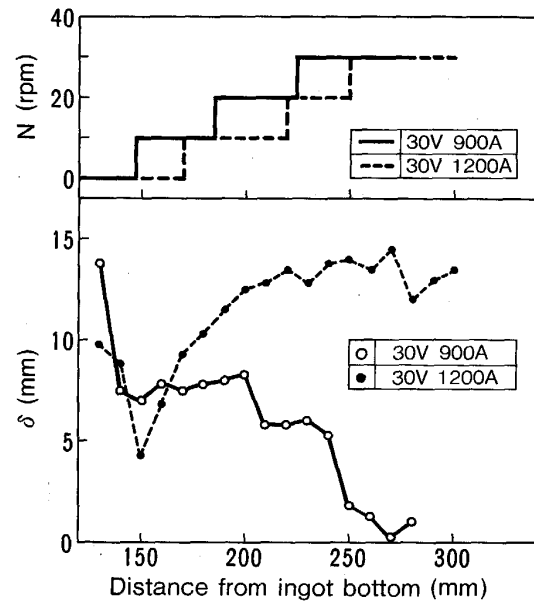


Fig. 8. Effect of combination of shell rotational speed  $N$  on mean penetration depth  $\delta$ .

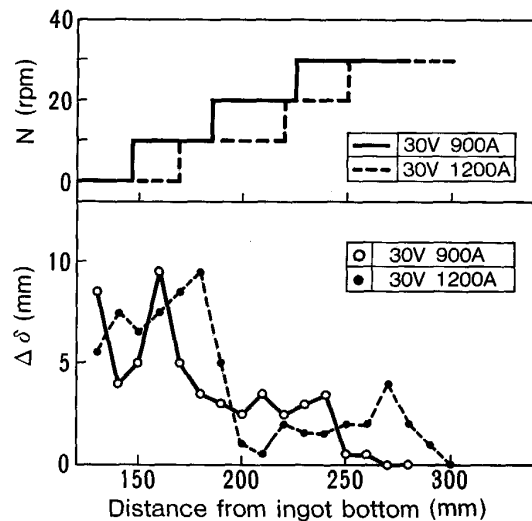


Fig. 9. Effect of combination of shell rotational speed  $N$  on difference of penetration depth  $\Delta\delta$ .

グ浴の移動速度が大きくなり, シェルへの入熱量が減少したためと考えられる。一方,  $\Delta\delta$  についてみると, 電磁攪拌の付与によりその値は小さくなっており, とけ込みの均一性が向上することがわかる。

## 5. 考 察

### 5.1 シェルとけ込みの均一化

ESR においては回路特性からみて, 電気通路で電流密度が不均一になるという推論は 2 章で述べた。ここで,

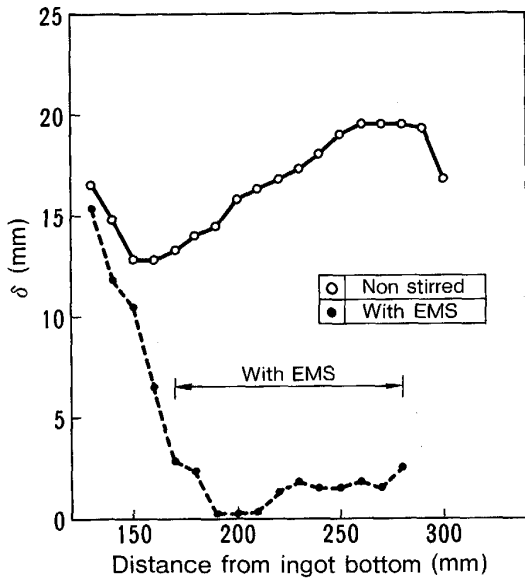


Fig. 10. Effect of EMS on mean penetration depth  $\delta$ .

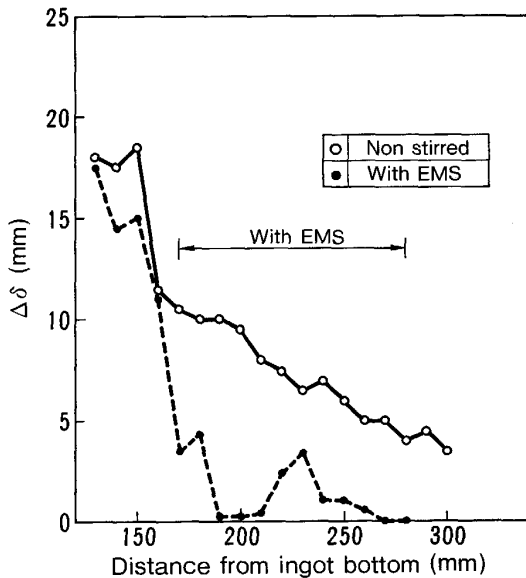


Fig. 11. Effect of EMS on difference of penetration depth  $\Delta\delta$ .

内孔肉盛実験に用いた小型 ESR 炉についてこの点につき述べる。前述した内孔肉盛実験では、溶解を開始してからしばらくの間は、Fig. 12 に示すようにシェルの E 側表面温度が最も速く上昇し、次いで N と S 側、最後に W 側が上昇するのがすべてのチャージで観察された。従って、同図に模式的に示すように、溶解電流密度は E 側、N と S 側、W 側の順で徐々に小さくなっていると考えられる。シェルのとけ込み量の測定データにおいて、とけ込み量は E 側 ( $\delta_r$ ) が大きく、W 側 ( $\delta_l$ ) が小さい

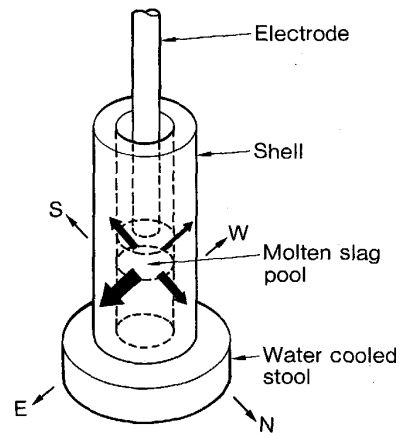


Fig. 12. Electrical characteristic of experimental apparatus (Depth  $\delta$ ).

ことからみても先述した電流密度の不均一に対する考察は正しいと思われる。

シェルへの回転付与によるとけ込み均一化の理由を以下に推察する。

回転付与中のスラグ浴の動きに注目したところ、目視観察によれば、スラグ浴はシェルとともに回転しているのが観察された。溶解開始直後のスラグ浴表面温度は必ずしも円周方向で同じではなく、温度分布のあることが観察され、回転を付与しても数分間はそのまま温度の不均一が存在し、その後徐々に均一化されることが確認された。従って、電流分布の不均一さは依然として存在するが、より高温のスラグは表面からの熱放散が大きいため温度上昇の程度が小さい。これに対して低温スラグは、回転によつて移動し、電流密度分布の大きい位置を通過するときに、より加熱されて温度上昇が大きくなり、これを繰り返すことによつてスラグ温度が平均化され、その結果、とけ込みが均一化されたと考えられる。従って、本実験で用いた諸条件では、回転なしの場合の内孔肉盛鋼塊が中心軸に関して周期的に回っているとマクロ的には考えられる。

以上のような検討から、回転付与による円周方向のとけ込み量均一化の理由をまとめると、

装置固有の電流密度の不均一は、回転を付与しても存在するが、シェルに回転を付与すると、電流密度の不均一の位置がシェルに対して相対的に移動する。その結果、スラグ浴からシェルへの入熱量が平均化され、とけ込み量の均一化が図られることがあげられる。

### 5.2 電極溶解速度の増加

実験結果で述べたように、シェル回転及び電磁攪拌を付与すると、電極溶解速度が増加することがわかった。

溶解条件 (30 V, 900 A) が一定であることからみて, シェル回転あるいは電磁攪拌によりスラグ浴から電極への入熱量が増加したためと考えられる。以下, この点につき考察する。

電極は回転するスラグ浴中にその先端が 5~10 mm 浸漬していた。従つて伝熱面からみると, 電極への入熱経路として 2 とおりが考えられる。第 1 は電極側面からの入熱である。このような熱伝達に関しては, 二重円管すきまの熱伝達に関する無次元相関式<sup>6)</sup>  $Nu = 0.195 Ta \cdot Pr$  ( $Nu$ : ヌッセルト数,  $Ta$ : テイラー数,  $Pr$ : プラントル数) を適用することができよう。この式で  $Ta$  は電極とスラグ浴の相対速度すなわち回転数あるいは攪拌力に比例する。

入熱経路の第 2 は, 電極下端面からの入熱である。この場合, 平板がスラグ浴に浸漬されているとみなせるので, 強制対流による平板の熱伝達に関する相関式<sup>7)</sup>  $Nu = 0.332 Re \cdot Pr$  ( $Re$ : レイノルズ数) を適用できよう。この式で  $Re$  は相対速度に比例する。従つて, 第 1 及び第 2 の経路を通じて相対速度の増加により  $Nu$  が大きくなることがわかる。

さらにもうひとつ, 回転によるスラグ浴の温度分布の変化が推定される。すなわち, 回転付与で密度の大きい, 従つて温度の低いスラグが外側にいき, 電極近傍には密度の小さい, 温度の高いスラグが位置すると考えられる。スラグ浴から電極への入熱量  $q$  ( $\text{cal}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ ) は,  $q = h(T_{sb} - T)$  で表すことができる。ここで,  $h$  はスラグ浴-電極間の熱伝達係数,  $T_{sb}$  はスラグ浴温度,  $T$  は電極表面温度を示す。 $h$  は相対速度の増加につれて大きくなることが知られており, 先述した  $Nu$  の増加は  $h$  が大きくなることと同じである。また,  $T_{sb}$  が高くなるのでス

ラグ浴から電極への入熱量が増加し, その結果, 電極溶解速度が増加したものと考えられる。

以上のように, 本実験によりシェルのとけ込み制御及び均一化方法が見出されたが, 電磁攪拌はコイル攪拌力の調整が難しく, 装置も複雑大型化することから, 回転方法の方が実用上有利と考えられる。

## 6. 結 言

ESR 内孔肉盛法におけるシェルのとけ込み量の均一化を目的としてシェルの回転を付与する方法及びスラグ浴に電磁攪拌を付与する方法について検討した結果, 次のようなことが明らかになった。

- 1) シェルの円周方向のとけ込み量を均一にでき, かつ同一電氣的条件でもとけ込み量が減少した。
- 2) 電極の溶解速度が増加することを発見した。
- 3) シェルの回転数の増加につれて電極の溶解速度が大きくなることを応用して, シェルの回転数を変化させることにより円周方向だけでなく, 高さ方向でもシェルのとけ込み量を均一にできる見通しを得た。

## 文 献

- 1) W. AUSTEL and Ch. MAIDORN: Proc. 5th ICVM (1976), p. 241
- 2) W. AUSTEL, H. HEYMANN and Ch. MAIDORN: Proc. 6th ICVM (1979), p. 747
- 3) K. ROSENBAUGH: 8th ICVM, 2 (1985), p. 1240
- 4) 特公昭 61-54097, 米国特許 No. 4544019, 他出願中
- 5) 荻野和巳, 原 茂太, 木本辰二, 橋本英弘: エレクトロスラグ再溶解法の物理化学と技術的諸問題 (日本鉄鋼協会編) (1979), p. 15
- 6) 伝熱工学資料 (日本機械学会編) (1975), p. 108
- 7) 伝熱工学資料 (日本機械学会編) (1975), p. 15