UDC 669.187.046.582:621.365.3

エレクトロスラグ溶解条件に及ぼす 溶解パラメータの影響*

岸 田 寿 夫**, 山 口 国 男**

富 岡 達 也**, 市 原 忠***

Effect of Melting Parameter in the Electroslag Remelting Process

Toshio Kishida, Kunio Yamaguchi,
Tatsuya Tomioka and Tadashi Ichihara

Synopsis

On the ESR operation results obtained for the past 3 years, in the ESR using a mold of 230~560mm dia. voltage, current, kind of slag, slag amount, electrode mold dia. ratio (d/D) and we analyzed the influences of these parameters on the optimum melting condition on the base of operation data and measuring results of depth and shape of molten metal pool by FeS addition.

In the ESR it is important to select proper melting parameters for obtaining the highest quality. And it is advisable to control the melting speed optionally from the point of balance with solidification.

1. ま え が き

エレクトロスラグ再溶解法 (ESR) の技術が開発され、実用化されて約10年を経過し、日本における月間溶解量も2~3千tに達するに至った。この間技術面での進歩は著しく、理論的な裏付けも徐々に行われ溶解法として一つの技術が確立しつつある。

ESR のおもな特徴である 高温スラグ中での精錬反応、薄いスラグ層を通しての伝熱による独特の凝固機構、入力パターンによる任意の溶解制御など、これら

の技術を最適に組合わせて最高の品質を得るためにはまだ未解決な面も残されており、とくに大型鋼塊においては凝固を中心として検討を要する課題が多い。

ESR は再溶解法として類似の 真空アーク再溶解法 (VAR) とよく品質、溶解技術を比較して論じられるが、VAR より条件、要素が多く複雑であり¹⁾、溶解上のノウ・ハウが重要である。

溶解条件選定のための溶解パラメータについては古くは H. Holzgruber²⁾、最近では A. Mitchell ら³⁻⁶⁾ による報告がある。また、スラグに関しても数多くの報告⁷⁻⁹⁾ があるが、実際操業と品質とを対比させた報告は各社のノウ・ハウに属するため少ない。今回は ESR の一連の報告の一つとして、溶解条件を決定するパラメータについて、径 230~560mm 鋼塊での溶解経験を基にして述べる。

溶解パラメーターのおもなものとして、

昭和49年 8 月 7 日受付

*第 4 回 ESR 国際シンポジウム (1973) 東京および学振19委 (1973) 11月に一部発表

**大同製鋼株式会社

***大同製鋼株式会社

1) 精錬および溶解を支配するスラグ条件。
 2) 溶解速度を支配する入力条件および電極条件。
 3) 凝固条件を支配する鋳型条件および冷却条件。
 などに分けられるが、これらの条件はさらに細分され、相互に関係がからみ合う。

ESR では要求される品質により スラグ条件を選定し、さらに溶解パターンを決定して溶解速度を制御する方法が一般に採用されるが、鋼種によっては逆に溶解速度を最初に決め、その後スラグ、溶解条件を選定する場合もある。

2. 溶解パラメータの溶解に及ぼす影響について

溶解パラメータの選定により、鋼塊のはた、内質などに影響のあることは衆知の事実である。その1例として溶解時に等速溶解を採用した場合、電極鋳型径比 (d/D)、および入力の減少により 鋳はだおよび内質が不良となった例を Fig. 1 に示す。等速溶解を採用

Fig. 1. Melting condition of inferior surface ESR ingot.

した場合溶解の後半入力が減少し d/D 比の増大と合わせてスラグ温度の低下を招き“Ripples”欠陥を生じた例である。この例でわかるように、ESR には適切な溶解パラメータの選定がより良い品質を得るために重要である。

2. 1 電圧の影響

ESR の溶解条件を決める要因として 電圧の影響がある。ESR における 電圧はスラグの抵抗、溶解法、 d/D などにより決まるが、普通40~60Vの間にある。したがって、入力としての変化量は50%に過ぎないが、溶解速度および品質には大きな影響を与える。

2. 1. 1 電極浸せき深さと電圧との関係

ESR における電圧が単純に電極とメタルプールの極間距離により決まるとすると電圧の決定要素は浸せき深さであるが、実際にはスラグ温度、電流の流れ方、アーク発生の有無、電極先端での界面条件によりかなり異なった様相を示す。これらについてはモデル実験での報告¹¹⁾も多い。

Fig. 2 は電極浸せき深さと電圧の関係を示した図であるが界面近くになり、微小アーク発生域となると

Fig. 2. Relationship between electrode immersion depth and voltage.

電圧の上昇が著しく、界面近く、すなわち高電圧での操業は優秀な制御装置を必要とする。また、浸せき状態で電力と同程度の電力で電圧を界面アーク状態に保った場合は溶解速度は約2倍に達することがあり、低電力で溶解速度を上げるには電圧を高く取ることが好ましい。Fig. 3 は浸せき状態および界面アーク発

Fig. 3. Electric current and voltage at the time of ESR.

生域での電圧の記録誌の例であるが、浸せき状態では電圧の変動がなく一定であり、一方界面状態では定速で下降させても電圧の変動は大きく、変動幅が5Vにも達することがある。

2. 1. 2 スラグ条件による電圧の推移

スラグの条件としては、スラグの種類とスラグの量（スラグ浴の高さ）とスラグ組成の溶解中の変化がある。スラグの固有抵抗は $0.6 \Omega \cdot \text{cm}$ から $0.2 \Omega \cdot \text{cm}$ 程度の値であり、スラグの組成すなわち Al_2O_3 および CaO 、 SiO_2 の量によって決まる。 Al_2O_3 、 CaO は抵

Fig. 4. Relationship between Al_2O_3 amount and voltage.

抗値の増大, SiO_2 は抵抗値を減少させることが知られている。界面アーク状態に近い状態での Al_2O_3 の量による溶解電圧の変化を Fig. 4 に示す。図でもわかるように界面アーク状態では Al_2O_3 の量による変化はそれほど大きくない。しかし、浸せき状態ではスラグ組成によってかなり変動する。実際には $\text{CaF}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ の2元系では溶解中に CaF_2 の分解による CaO 、また、3元系では CaO の量により抵抗値が異なり、同じ30% Al_2O_3 量でも CaO が30%添加されると抵抗は1.5倍にも達する。Fig. 5 はスラグ量一すなわちスラグ高さ

Fig. 5. Relationship between slag amount (height) and melting voltage.

と電圧の関係をプロットしたもので、極端に少ないスラグでは界面アークを発生し易いため採用されないが、ある高さまでは電圧はスラグ量に比例して増大し、その後はほぼ一定の値となる。この原因は鋳型側面を電流が流れるためとされており、実操業でも細い電極を使用すれば高い電圧を維持することができる。

2. 1. 3 溶解電流と電圧の関係

スラグ浴が抵抗を有して電圧が決まっているため、当然溶解電流は電流密度、すなわち電極断面積に左右される。溶解電流と電圧の関係は直線になるべきであるが、実際には前述のようにモールド側面に流れる電流、スラグ温度、および組成変化に伴う固有抵抗の変化により直線的には変化しない。その関係を Fig. 6 に示す。この関係から明らかなように VAR と異なっ

Fig. 6. Relationship between melting electric current and voltage.

て電流の制御だけで溶解速度を制御することが困難である。

2. 1. 4 電圧の品質に及ぼす影響

電圧が品質におよぼす影響についての報告は少ない。しかし、電圧が高くアークが発生した場合には鋼中の酸素が増加するとの報告¹²⁾もあり、アーク発生域(高電圧域)での溶解効率は著しく高いが実用的でない。

スラグ量を少なく径230mm 鋳型で40V前後で溶解した場合の欠陥の例を Photo. 1 に示す。この欠陥は溶解時のメタルプル形状の差によるものと考えられる²⁾。

Pit dendrite(Material SCM3)

Photo.1. Defect example due to low voltage melting.

2. 2 溶解電流の影響

溶解速度を決定する最大のパラメータとして電流がある。溶解速度が電流に比例することはよく知られており、たとえば溶解速度の決定の式として S. Joshi

らの式⁴⁾…… $R \propto V^a \cdot I^b \cdot d^c / D^e \cdot (1/D)^f$ がある。
この式で電圧 (V) の選定範囲が40~60V程度、 d/D は0.5~0.75の範囲であるのに比し電流(I)は鋳型径の15倍から35倍程度の範囲に選ぶことができるため制御要素としては重要である。溶解量はスラグが一定の場合、投入電力量に比例するといわれているが、実際には後述のように、初期スラグ温度および装置の力率、前述の電圧条件などによって左右され直線的には比例しない。

溶解速度を一定、あるいは任意に制御したいという要求の一つは凝固とのバランスでメタルプール深さ一すなわち凝固速度を任意に制御したいという理由による。

2. 2. 1 溶解電流と溶解速度の関係

溶解速度は前述のように入力(電圧×電流)によって決まるが実際には Fig. 7 のように溶解スタート後

Fig. 7. Variation of melting speed during ESR process.

の時間に伴い変化する。この原因はスラグの温度上昇、電極の温度上昇、スラグ浴からの輻射、伝熱、メタルプールから冷却水への伝熱と熱バランスが多岐にわたり、有効に使用されるエネルギーが20~40%と少ないためである。Fig. 8に電極の温度上昇の一例を示すが電極の断面積一すなわち d/D により温度上昇に

Fig. 8. Variation of electrode temperature during remelting.

差がでるがいずれもある平衡点まで上昇する。したがって、溶解電流による平衡に達した溶解速度を求めるには時間の要素を考える必要がある。

2. 2. 2 溶解電流によるメタルプールの変化

同一スラグを使用し、溶解電流を変えた場合のメタルプール深さの変化を調べたのが Fig. 9 である。溶

Fig. 9. Relationship between metal pool depth and melting current.

解電流が増加するとプールが深くなるが、溶解電流に比例して深くはならない。これはすでに文献にあるように円錐状のプール上に円筒状のプールが存在しているためと推察される。しかし、ある限界を越えた溶解速度になると凝固が遅れメタルプールが深くなることは衆知の事実である。

2. 3 スラグの影響について

2. 3. 1 スラグの種類について

ESRに使用されるスラグについては多くの報告⁷⁻⁹⁾があり、いまだに取り上げるまでもないが溶解パラメータとしての意義から考えてみたい。

スラグの基本系としてつぎのようなスラグがある。

上記のスラグは基本系であり、CaO、 Al_2O_3 などの配合より数多くのスラグに分かれるが、実際に使用されるスラグはそれほど多くはなく10種類程度である。その代表的なスラグとおもな特徴を Table 1 に示す。

スラグの溶解におよぼす影響としては電流、電圧な

Table 1. Main characteristic of ESR slag.

Slag of composition	Melting point	Recharge slag in USSR	Character of slag	use
100% CaF_2		ANF-1P	Proper electrical resistance is low and hard to use.	In cluding Ti, Ni alloy and other.
80% CaF_2 - 20% CaO	1,200~1,240	ANF-7	Effective for desulphurization, but it easily gets wet and proper electrical resistance is low and hard to use.	for desulphurization and deoxidation.
70% CaF_2 - 30% Al_2O_3	1,320~1,340	ANF-6	This is basic and suitable to any steel grade and the composition changes at the time of melting. It is suitable for such steel whose solidifying point is low like high speed steel.	Steel in general for big type ingot.
70% CaF_2 - 15% CaO - 15% Al_2O_3			It is possible to reform ANF-6 and to desulphurize. Productivity is high.	for high speed steel.
60% CaF_2 - 10% CaO - 30% Al_2O_3			Suitable for stainless steel and steel for construction. This can be used for all steels and its desulphurization is effective, but hydrogen defects are inclined to grow easily.	General use better than 70-30 in desulphurization.
60% CaF_2 - 20% CaO - 20% Al_2O_3	1,240~1,260	ANF-8	Suitable for alloys of low melting point like Ni-alloys. The desulphurization effect is not exactly perfect.	General use, but attention is to be paid for hydrogen defect.
40% CaF_2 - 30% CaO - 30% Al_2O_3			The composition is stabilized and the slag is of high productivity.	Suitable for steel and alloy of low melting point and for low speed melting.
80% CaF_2 - 10% Al_2O_3 - 10% MgO		ANF-291	Suitable for sulphur bearing steel. It is oxide slag and proper electrical resistance is low and re-use is not available.	Steel in general and Ni-alloy
18% CaF_2 - 25% CaO - 40% Al_2O_3 - 17% MgO			Suitable for titanium bearing steel, but re-use is not available.	Steel including sulphur.
50% CaF_2 - 25% Al_2O_3 - 25% SiO_2	1,220~1,240	ANF-21		Steel including titanium.

どに関係して溶解速度に与える影響、鋼塊のはた、精錬反応などに与える影響を考える必要があり、要求される品質によりスラグの種類を決めなければならない。また、使用上の注意としては CaF_2 の高いスラグを使用する時、モールド条件、溶解条件によるが CaF_2 が分解して CaO となりスラグ組成を変化させる。Fig. 10 に その一例を示すが、大型鋼塊ではこの組成の変化は重要な問題である。

Fig. 10. Variation of CaF_2 and CaO during remelting.

2. 3. 2 スラグの溶解速度に及ぼす影響

スラグの種類により同一溶解速度を得るための投入電力を調べたのが Table 2 である。溶解速度は、前述のように同一電力でも時間とともに変化するのでできるだけ平衡に近い所を採用してある。表からわかるようにスラグの種類によってかなり異なる。

2. 3. 3 スラグ量の影響について

スラグの量を定める因子は鋳型寸法と電極鋳型径比である。スラグ量については今までに断片的に報告¹²⁾されているが、 d/D および溶解法によるスラグ量の範囲を Fig. 11 に示す。

Fig. 11 は溶解のおよその目安を与えるものであってこの範囲をはずれたら品質が悪くなるということはない。しかし、考え方として若干多めのスラグ量の方が安定した溶解が行われる。

なお、スラグ量で注意をする点は溶解中スラグ高さを一定にすることで、溶解中に鋳型壁との間に生ずる薄い固相スラグ層による減少を補正することが必要で、とくに大型鋼塊では留意する必要がある。

Table 2. Relationship between slag composition and melting electric power.

Slag composition	Melting Power (kW)	
	150kg/hr	200kg/hr
70%CaF ₂ —30%CaO	280	340
70%CaF ₂ —30%Al ₂ O ₃	220	280
70%CaF ₂ —15%CaO—15%Al ₂ O ₃	280	330
60%CaF ₂ —20%CaO—20%Al ₂ O ₃	260	320
40%CaF ₂ —30%CaO—30%Al ₂ O ₃	230	280
80%CaF ₂ —10%Al ₂ O ₃ —10%MgO	320	400

Mold 230mmφ . . Electrode 150mmφ

Fig. 11. Relationship between mold value and slag amount (slag height).

2. 4 電極鋳型径比の影響

d/Dにより溶解速度に大きな差があることはすでに報告¹³⁻¹⁶⁾されており、その一例を Fig. 12 に示すが、同一電力を投入した場合には d/D により溶解速度、および電力消費量に差を生じる。d/D と溶解速度の変化の程度はスラグの固有抵抗によっても異なり、その関係を Fig. 13 に示す。CaO/Al₂O₃ が約 1 のス

Fig. 12. Relationship between electrode mold diameter ratio and melting rate, power consumption.

Fig. 13. Relationship between electrode mold diameter ratio and melting speed.

ラグは溶解速度の変化が比較的ゆるやかであるが、CaOの少ないスラグは変化が大きい。この原因の一つはスラグの組成変化と考えられる。

2. 5 電力消費量について

電力消費量は投入電力に対する溶解速度で決まるが t 当たり 1,000~2,400kWh にも達する。モールド径の小さい場合には電流密度、すなわち単位面積当りの電力投入量が高く電力消費量も多い。

Fig. 14 にスラグの種類、溶解速度との関係を示すが、省電力対策としては d/D を大きく取り、固有抵抗の高いスラグを使用することにより 1,000kWh/t に近い値が得られる。しかしスラグ浴を介し、なお温度が高いため VAR に比較して 20% 以上電力消費量が多い。

3. 溶湯プール深さの実測と溶解パラメータとの関係

溶解時のメタルプール深さの実測方法として Y 線を用いて行う方法があるが一般的でなく、普通はプール

Fig. 14. Relationship between melting speed and power consumption.

形状を凝固後鋼塊を縦断してサルファープリント、マクロ腐食して測定する方法が取られている。

凝固前線を固定する方法として

- 1) 同位元素を用いる方法。
- 2) 合金、合金鉄 (Fe-W) を添加する方法。
- 3) 硫化物を添加し、サルファープリントにより確認する方法。

などがある。手軽にできる方法としては Fe-S を投入する方法が採用されており、VAR の時の プール測定 などにはよく使用される。しかし、ESR の場合は投入するのが強塩基性のスラグの上であり、投入後、プール全体に拡散混合するのに時間がかかる。

プール深さの実測の一例を Photo. 2 に示す。

Photo. 2. Sulfur print of ESR ingot (310mm).

Fig. 15. Dispersion of sulphur and de-sulphurization in metal pool.

Fig. 15 は Fe-S を 500g (モールド径320mm) S 換算 182g を投入した場合で S の分析値の例である。

Photo. 2 および Fig. 15 でわかるように中心部の半凝固相で拡散の遅れが認められるが、固相—液相の幅の少ない周辺部では明確に判別できる。

強塩基性スラグを介しての S の添加歩留は 12~20% であり、スラグ中の S は最大 0.5% まで増加し、スラグ中への S の歩留は 75% 程度で、添加時には SO_x のガスが放出される。スラグ中の S は 20min 後に 0.5% から 0.08% まで減少し、ある程度の間隔をおけばかなり細かくプールの経時変化の測定が可能である。

3. 1 スラグの種類によるプール深さの変化

プール形状、メタルプール深さの実測結果を Fig. 16 に示すが、同一投入電力を投入してもスラグの種類に

Fig. 16. Variation of molten pool depth during remelting.

よってかなり異なり、溶解速度が増大する後半はかなりプールが深くなり末期電力の調整を必要とすることがわかる。なお、図中でもわかるがスラグの固有抵抗が大きく組成変化の少ないスラグ—たとえば50-20-30を使用した場合、プールがかなり深いことがわかる。

3. 2 溶解速度とプール深さの変化

Fig. 17 に溶解速度の変化とプール深さの変化の関

Fig. 17. Variation of melting speed and molten pool depth during remelting.

係を示すが、溶解速度とプール深さとは必ずしも比例しない。この原因は下部冷却の影響があると同時にスラグの種類、プール浴の温度にかなり差があることに基因する。

4. 溶解パラメータの相互関係について

溶解パラメータの相互関係については Muller-Aue¹⁾により明らかにされている。報告では詳細が記載されていないが、溶解パラメータ単独で条件を選定することは難しい。

相互関係を整理するとつぎのとおりである。

溶解速度—投入電力、スラグ組成、鋼種、 d/D , kWh/t
 —電流、電圧
 入力(電流・電圧)—溶解速度、スラグ組成、量、 d/D
 スラグ組成—電圧、電流、プール深さ、溶解速度
 スラグ量—電圧、プール深さ、 d/D

以上のように溶解パラメータは互に関連しあっており、独立に変化し得るものでなく相互の関連において溶解条件が決まる。

一方、品質の面から見るとつぎのような要因によって決まる。

品質—スラグ条件…脱酸、脱硫、鋼塊はだ
 —溶解条件…凝固組織（偏析、均一性など）はだ
 —冷却条件…凝固組織、鋼塊はだ

溶解にはこれらの諸条件を踏まえて Fig. 18 にその

Fig. 18. Schematic drawing of melting pattern.

例を示すような通電パターンを採用して溶解を制御する。

5. あとがき

溶解パラメータの相互関係については公表されたデータが少なく、断片的であり再品質との関連づけでは充分検討されていない。ESR は装置そのものが各社で異なり、電極の作り方もまちまちであり、また品質に対するニーズも一様でないため、一つのまとまった結論を得ることは困難である。

今回記述した溶解パラメータについても内容が断片的となり、とくに品質との関連については詳述できなかったが、ESR の溶解の参考になれば幸いである。とくに径が600mm以上の大型鋼塊に対するデータがなく、大型鋼塊に発生する凝固上の問題、スラグ組成の安定性、ホットトップ法などは今後の研究を待つ必要がある。

ESR そのものはある条件を与えれば容易に美麗なはだの鋼塊が得られるが、最低の電力消費量、頭部から底部までの均一な品質、炭化物の微細化、VAR と同等の Q レベルの鋼の溶解といった問題を追求する時、溶解パラメータが重要な意味を持ってくる。したがって未解決な面の理論的解明が必要である。

(文 献)

- 1) H. J. Muller-Aue : Proceedings of Vacuum Metallurgy conference (1971) N. Y 19~23
- 2) W. Holzgruber, E. Plöckinger : Stahl u. Eisen 88 (1968) 638~648
- 3) H. J. Klein : Electric furnace Proceedings 28 (1970), 21
- 4) S. Jashi, A. Mitchell : Proceedings of 3rd ESR Symposium (1971) Part 1
- 5) H. Kajioka et al. : Proceedings of 4th ESR

- Symposium (1973), 102~104
- 6) T. Ohmura et al.: Proceedings of 3rd ESR Symposium (1971) Part 2
- 7) D. J. Salt: Proceedings of First ESR Symposium (1967) Part 1
- 8) 山口, 梶岡: 日本金属学会シンポジウム “溶融スラグの物性と製錬” (1972) No. 4
- 9) 江口: 金属材料 11 (1971) 11, 12
- 10) W. E. Duckworth, G. Hoyle: Electroslag refining (1969), 80 Chapman and Hall
- 11) J. W. Tommaney, A. Kraai: Proceedings of 3rd ESR Symposium (1971) Part 1
- 12) R. Schlatter: Metals Engineering Quarterly 12 (1972) 1, 48~60
- 13) 草道, 福原: 鉄と鋼 52 (1966) 13, 1890
- 14) K. Yamaguchi et al.: Proceedings of 4th ESR Symposium (1973), 91~101
- 15) 泉田ら: 鉄と鋼 59 (1974) 4, S119
- 16) W. Holzgürber et al.: proceedings of 3rd ESR Symposium (1971) Part 3

ShKh 15 ボールベアリング鋼の EBR 中におけるアルミナ介在物の挙動

Steel USSR, 3 (1973) 9, 742~743

EBR により ShKh 15 ボールベアリング鋼を再溶解し, 溶鋼を直接モールド中またはタンディッシュを通してモールド中に鋳込んだ場合のアルミナ介在物の挙動について調査した。

再溶解プロセス中, 電極の先端およびタンディッシュ端部の鋼滴から採取した試料および電極, 鋼塊から採取した試料について顕微鏡 (625 倍) による介在物の測定を行なった。

溶解酸素の 60~80% は EBR により CO として除去され, 残部の酸素は新しい介在物として凝固中に遊離

する。大型介在物は再溶解中にメタル/ガス界面に移行することによりある程度除去される。移行速度は介在物の直径の 2 乗にほぼ比例する。10 μ m より大型のアルミナ介在物は完全に除去され, 5~8 μ m 径のものは約 50% が除去される。

EBR でタンディッシュを使用したものは, 使用しないで直接鋳込んだものに比較して, メタルの熔融状態の時間の増加のため, アルミナ介在物は半量近くまで減少する。(図 2, 表 1)

ステンレス鋼及び合成 $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$ スラグの表面性質

Steel USSR, 3 (1973) 10, 828~830

合成スラグ組成の正しい選択並びに精錬中における種々の要因 (メタルおよびスラグの温度と化学組成など) の影響測定のため, Cr および Cr-Ni ステンレス鋼並びに合成 $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$ スラグの表面性質について調査した。

Cr, Cr-Ni ステンレス鋼および組成の異なる合成 $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$ スラグの 1600, 1650, 1700°C における密度, 表面張力の測定を行なった。

メタルおよびスラグの密度と表面張力, メタル/ス

ラグ界面における粘着性は温度低下と共に増加する。通常溶解したメタルの表面張力は, 合成スラグで処理したメタルより幾分低く, また Na_2O および NaCl を添加した $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$ スラグの表面張力は通常の $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$ スラグよりも低い。

Cr, Cr-Ni ステンレス鋼の処理においては, 一般の組成を有する合成スラグ——50%CaO, 42.5% Al_2O_3 , 2.5% SiO_2 , 2%MgO, 0.5%Fe——を推奨する。(図 3, 表 2)