論 説

UDC 669.187.046.582:621.365.3

小型直流 ESR における電極先端での
滴生成について

小島康*, 加藤誠**, 豊田剛治***, 井上道雄*

On the Droplet Formation at the Tip of Electrode by
DC-ESR with Small Scale UnitYasushi Kojima, Makoto Katô, Takeharu Toyoda
and Michio Inoue

Synopsis

Melting phenomena of consumable electrode in electroslag remelting process were studied by using a wood alloy as a consumable electrode and a NaOH solution as a slag.

Based on the model study, the drop sizes formed at the tip of electrodes of pure iron and carbon steels, S55C and SK3, were measured during DC-electroslag remelting.

Drop sizes were closely dependent on the compositions of slags and electrode polarity. Drop weight formed at various operating ESR units were cleared up to be related with the melting rate, mode of current and slag compositions.

The reason, why the current efficiency in DC unit is reversed at a given scale, was discussed.

1. 緒 言

エレクトロslag再溶解法における鋼の精製過程を考察する場合、素材を消耗電極として再溶解し、インゴットとして凝固するまでの間の不純物質の移動に関する知見が必要となる。

電極素材とslag間の物質移動は下記の四つの溶融状態における溶鋼とslagの界面で行われる。

- 1) 電極表面の溶融部
- 2) 電極先端における滴生成時
- 3) slag中滴の落下時
- 4) メタルプール

一般的に界面が新しく生成されつつある時の物質移動係数¹⁻³⁾は、静止界面のそれに比べて数十倍大きくなることが知られている。ESR においては電極間に電圧を印加するので反応の素過程1), 2) および4) を通しての物質移動係数は、極性の影響を受けて大きくなったり小さくなったりする。すなわち、1), 2) および4) については電気化学的に、また3) については化学的反應をそれぞれ考察する必要がある。さら

昭和49年7月12日受付

*名古屋大学工学部, 工博

**工業技術院, 名古屋工業技術試験所

***名古屋大学工学部 (現日本鋼管㈱)

にスラグ直上部の電極表面の酸化およびスラグ成分の気相への移動⁴⁻⁶⁾が化学反応を取扱う場合に無視し得ない。

再溶解の諸条件を検討してみると、ACかDC、スラグ組成、電極径/モールド径の比、live mold か insulated mold などによって、それぞれの反応界面における電気化学反応の機構および速度が異なり、結果として再溶解されたインゴットの諸性質に重大な影響を及ぼす。ここでこれらの相互関係を記すとつぎのようになる。

- a) スラグ組成 { 諸元素の除去率、あるいは歩留り⁷⁻⁹⁾, 電気伝導度 (発熱, 電力消費量¹⁰⁻¹²⁾, 粘性¹³⁾, 界面張力¹³⁾ (インゴット表面¹⁴⁾, 介在物の除去¹⁵⁾ 溶滴の大きさ¹⁶⁻²⁰⁾ }
- b) 電気種 { 電気化学反応 (スラグ/メタル界面での反応方向, over potential^{20, 21)}, elec. capil. vib.¹⁹⁾, 溶解速度^{22, 23)} (電圧降下による局部的発熱²¹⁾, 消費電力, 設備費) }
- c) Fill ratio^{10, 19, 24)}: 電流密度²⁵⁾ (反応速度, 溶解速度, スラグの温度^{26, 27)})
- d) モールドの様式: メタル表面の電流密度 (同上)
- e) 操業規模: 比電力消費量 kWh/t, 電流密度 (同上)

このように相互に密接に関連しているので一つの条件を変えてその影響度を調べるという従来の実験的な手法を用いてESRを考察することは不可能となる。

著者らはESR操業時の物質移動を追求するためには先に記したようにまず最初に、電極先端での溶滴生成現象を明らかにすることが最も重要と考えた。このためにWood Alloyを消耗電極にNaOH水溶液をフラックスとしたモデル実験²⁸⁾および小型直流ESR装置による一連の実験を行った結果を報告する。また、小型装置から大型装置へScale upする時にどのように滴の大きさが変化するかについてこれまで報告されたデータに基づき検討した。

2. モデル実験の結果および考察

Cambell²⁹⁾はPb, Znなど低融点金属を消耗電極としてまたスラグとしてはLiCl-KCl (59:41)をモールドとした透明石英を用いモデル実験を行い、電極先端での滴の生成現象を観察した。使用した電極径が細い時と太い時では補正係数が異なるが溶解速度が遅ければ滴の重量は界面張力から計算できることを明らかにした。中間の溶解速度になると数滴が合体した

ような大きな塊りとなって不連続に落下するようになる。さらに溶解速度が大きくなると電極先端はほとんど平面近くなるが中心部から層流液柱となって、スラグ中に延びその先端で滴が生成する。

著者らは、電極先端で滴生成現象をさらに詳しく検討するために、電極材としてWood合金を、またスラグとしてはNaOH水溶液を選び水溶液下部に設置したNi板をメタル表面として通電しNaOH水溶液のJoule熱およびArc熱により電極を溶解した。使用した装置の概略をFig. 1に示した。なおNi板の中心部に穴をあけた。溶落したWood合金がこの穴を通り抜け下部に落下するのでNi板は実験中常に平面に保たれた。

Fig. 1. Apparatus used for model study.

ここで消耗電極棒の溶出速度が大きくなり平衡状態に近い条件で滴が生成するとしたときにどのような大きさの滴が電極先端で形成されるかを考察してみる。

界面張力と密度差から滴形成時の最大径 $d_{\max}$ ³⁰⁾は次式によって求められる。

$$d_{\max} = \left\{ \frac{\sigma \cdot H}{(\rho_M - \rho_S) \cdot g} \right\}^{1/2} \dots \dots \dots (1)$$

ここで σ : 界面張力, ρ_M, ρ_S : メタルおよびスラグの密度, g : 重力加速度, H : 補正係数。

この補正係数は滴の生成条件によって変化し、液滴の最大直径より電極棒径が大きい場合 H は3.3となりまた小さいときには1.1となる。

電極径が8 mm, NaOH水溶液濃度, 0.5N, 電極間距離 80mm AC 25V 4Aの実験条件のもとで溶解を行った。この場合、滴はおおよそ1 secごとに生成し落下した。その大きさは写真撮影の結果約0.3cmであった。

ここで第1式につぎの諸物性値を代入して計算し

た。

$\sigma: 360 \text{ dyn/cm}^{80, 81)}$, $\rho_M = 10 \text{ g/cm}^3$, $\rho_S = 1.0 \text{ g/cm}^3$ および $H = 3.3 \sim 1.1$

$d_{\max}$ は $0.37 \sim 0.21 \text{ cm}$ となり、この計算結果から歩測値は計算値の範囲内に入っていることがわかる。したがって、溶解速度が小さい場合には平衡に近い条件で滴が生成することが確認された。

実際操作の場合スラグとの界面張力を $1,000 \text{ dyn/cm}^{84)}$ $\rho_M - \rho_S = 4.6$ を代入して計算すると $d_{\max} = 0.85 \sim 0.50 \text{ cm}$ となりこの範囲の滴が生成するものと推定できる。

本実験においても溶解速度を大きくするために入力高めると Cambell が示したように、数滴合体した大きなかたまりが不連続に落下するのが認められた。NaOH 水溶液の深さを適正に保ち、すなわち電極を浅く浸し溶解速度を上昇させると、不連続な落下はなくなり電極先端に層流液柱が認められ、その先端で滴が生成した。このような速度になると肉眼的には落下滴数は数えられなくなる。

落下滴数と電磁オシロに記録された電流変化（鋸の歯状）が対応するので溶解速度と滴数から滴径を計算により求めた。

層流液柱の長さや溶解速度の関係を Fig. 2 に示した。この長さや物性値の関係は Weber⁸³⁾ の式を用いることによって明らかにすることができる。

Fig. 2. Effect of the melting rate of wood alloy on the length of the laminar flow.

$$\frac{\pi a^2 L}{C} \times \frac{\sigma^2 \cdot \rho_{m-s}}{27 \eta^3} = \ln \frac{a}{\delta^*}$$

$$\left\{ \left(\frac{2 \rho_{m-s} \cdot a}{9 \eta^2} \right)^{3/2} + \frac{2 \rho_{m-s} \cdot a}{9 \eta^2} \right\} \dots \dots \dots (2)$$

ここで L : 層流液柱の長さ, a : 層流液柱の径,

ρ_{m-s} : 溶鉄とスラグの密度差, C : 溶解速度, η : 粘性, δ^* : 振動因子。

実験的につぎの関係が認められる。

$$\ln \frac{a}{\delta^*} = 12$$

諸物性値を(2)式に代入し実験で求められた層流液柱の長さや相当する a を逆算すると $0.03 \sim 0.15 \text{ cm}$ となる。この径の大きさはちょうど平衡条件下で生成する滴の半径に等しいかその2倍に相当する。電極棒が鉄の場合は $r = 0.4 \text{ cm}$ の滴が生成すると推定されるのでモデル実験で得た比率をそのまま応用し層流液柱の長さや溶解速度の関係を計算した結果を Fig. 3 に示した。また実際操作での極間距離も併示した。もし、層流液柱が極間距離よりも長くなると極間を短絡する結果電流は非常に不安定となる。実際操作での滴の大きさは $12 \sim 13 \text{ mm}^{17)}$ と大きいのでモデル実験で得た比率をそのまま適用するのは誤りであろうが、この計算で得た層流液柱の長さや極間距離がほぼ等しいのはたいへん興味深い。

Fig. 3. The calculated length of the laminar flow of molten iron and the electrode distance on the practical electroslag remelting.

これまで ESR についての論文の中にこの層流液柱の存在について記されたものは全くない。もし存在するならば——可能性は大きい——この部分に電流が集り局所的に高温となり ESR の操作に有利な条件の一つとなる。

電極棒径を変え NaOH 水溶液の濃度を 0.5 および 1 規定とし溶解速度を変化させた場合の滴の大きさを測定した結果を Fig. 4 に示した。溶解速度が 1 g/sec までは電極径が大きければ大きいほど生成する滴も大きくなる。しかし、これ以上の溶解速度では滴は電極棒の太さに関係なく溶解速度だけの関数となる。 1 g/sec の溶解速度を Weber の式に代入し層流液柱の

数えることができなかった。

DCRP では電極棒周辺に陰イオンから生ずるガスの層が形成される。このガス層の成分や厚み(量)は使用したスラグや鋼の成分および操業電流によって決められる。いずれにせよ、この滴の大きさは先のモデル実験に基づいて推定したように表面張力による力学的平衡条件下で生成すると仮定して計算を行った大きさの範囲である。

CaF_2 および $\text{CaF}_2\text{-CaO}$ スラグ中には陰イオンとして、 F^- および CaO や FeO から解離した O^{2-} が存在する。純鉄の再溶解では全く溶鉄中に脱酸剤がないので、電極表面で放電した O^{2-} はスラグ/メタル界面で FeO となり、一部はスラグへまたは溶鉄中へ溶解酸素として入る。炭素鋼では溶鉄中の炭素と反応するので電極周辺には CO ガス層が形成される。したがって、上記2種類のスラグを使用する場合には滴の大きさは純鉄と炭素鋼で異なった大きさとなる理由が理解できる。

これに反し $\text{CaF}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 系スラグでは陰イオンとして AlO_3^{3-} が加わり、この陰イオンは電極で放電して Al_2O_3 となるが、同時に O^{2-} イオンと同様酸素を放出する。電極表面で生成した Al_2O_3 は再びスラグに巻きこまれるが一部は溶鉄中に移動する。電気化学反応にあずかる AlO_3^{3-} イオンの占める割合が多ければ多いほど電極界面に Al_2O_3 が多く生成し、 CO ガス相の溶滴径に及ぼす影響を少なくする。したがって、 $\text{CaF}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 系スラグによる再溶解では他の系のスラグを使用した場合に比較して、純鉄と炭素鋼の間の滴の大きさの相異が少ない。

O^{2-} と AlO_3^{3-} イオンがどのような比率で電荷を運ぶのかを決定することがきわめて重要であると著者らは考え、現在このテーマについての研究を計画している。

電流波形を詳細に調べると、電極先端で滴が成長するにつれて極間距離が小さくなるので電流が増加し、溶滴が電極先端を離脱直前に瞬間的に大電流が流れることを示している。もし落下直前に瞬間電流が流れなければ、最大電流 $I_{\max}$ と最少電流 $I_{\min}$ の間にはつぎの関係が成立する。

$$I_{\max} - I_{\min} = a \cdot \kappa \cdot d \cdots \cdots (3)$$

ここで a はセル常数で電極、モールドの寸法、スラグ組成および量が決まれば一定の値となる。 d は滴径であり κ は電気伝導度である。この電気伝導度はつぎの関係がある。

$$1/\kappa = 1/\kappa_{\text{gas}} + 1/\kappa_{\text{slag}}$$

ここで κ_{slag} はスラグの電気伝導度であり κ_{gas}

は Anode 周辺に生成するガス層の電気伝導度でこれは、電流密度、極間距離、スラグ組成によって決められる。

したがって $I_{\max} - I_{\min}$ はスラグ組成と極性を一定にすれば、滴径と比例関係を示すことになる。しかし、測定結果について滴径と $I_{\max} - I_{\min}$ の関係を調べてみると定性的関係——DCRP の方が DCSP に比して $I_{\max} - I_{\min}$ は一定の d に対してガス相のため大きな値となる——は認められるものの明確な定量関係は得られなかった。この原因としては瞬間電流が考えられ、極間距離が最小の時に流れるが、これはアークによるのかあるいは単純に両極の短絡によるのか確認できなかったが、この瞬間電流により何らかの力(電流のピンチ効果、アークあるいは短絡によるショックなど)が溶鉄の離脱すなわち滴の大きさに作用したものと考えられる。なおこの瞬間電流は DCRP の方が DCSP に比して大きい。

Fig. 5 に平均操業電流と溶滴の大きさの関係を示した。 $\text{CaF}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 系の一部のデータを除き(Table 1 参照)すべてが 60g/min の溶解速度で、また消耗電極径は 10mmφ を用いた場合のものである。低電流 200~300A で電圧は 29~27V であるのに対し 500~600A では 25~23V であった。

Fig. 5. Effects of compositions of slags and electrode polarities on the drop sizes formed at the tip of the electrode.

すでによく知られているように、 CaF_2 や $\text{CaF}_2\text{-CaO}$ 系スラグを使用すると電気伝導度が高いためスラグの抵抗発熱が不充分となる。したがって $\text{CaF}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 系スラグに比して電流効率が悪くなる。

DCSP での再溶解で DCRP のそれに比して電流効率が悪いのはなぜかの疑問に対し Mitchell²¹⁾ はそれぞれの極における電圧降下にその原因を求めた。すなわち、アノードにおける電圧降下はカソードにお

けるよりも大きいので熱の局部的発生を考慮すれば溶解速度を一定とするために、DCSPの方がDCRPに比し再溶解のために大きな電流が必要となる。しかし著者ら⁸⁵⁾が明らかにしたように、他の文献を詳細に検討すると消耗電極径が50mm以上になると逆となり、DCSPの方がDCRPに比して電流効率が良くなる。したがって、Mitchellの理由では電極径が50mm以上の範囲に関しては成立しなくなる。

ここで見かけの電流密度 (A/mm^2 電極断面) と電極径の関係を調べてみると50mm以下の電極の場合には $0.5A/mm^2$ 以上となり、また100mm以上の電極径では $0.5A/mm^2$ 以下となる。電流密度が $0.5A/mm^2$ を境にして電極界面で電圧降下がアノードとカソードと逆転するとは考えられない。先にも記したように、本研究の小型炉による再溶解では電流密度が、 $3 \sim 5 A/mm^2$ と高く、アノード周辺に薄いガス層が生成する。このガス層は電流密度が大きければ大きいほど厚くなる。極間距離も大型炉に比して短いの、電極界面でアーク (Mitchell²¹⁾ によれば softarc) が発生し電極周辺における局部的高温が得られる。先に記した瞬間電流はこのアークに相当するものと推定される。大型炉での再溶解では電流密度も小さく、したがってガス相の厚みも小さくなるがアークが発生するのに必要な電圧が得られない。同一組成のスラグを用いたとしてもDCRPではDCSPに比して $1/\kappa_{gas}$ が大きくなり見かけ上電気伝導度が小さいスラグで再溶解することになる。したがってDCSPと同じ溶解速度を得るためには、極間距離を $1/\kappa_{gas}$ に相当するだけ短くしなければならない。極間距離が短くなれば、メタルプール表面の温度は高くなるので結果としてメタルプールからインゴットへと逃げる熱が多くなる。したがって電極の再溶解に使用される熱量が少ないので電流効率が悪くなる。

電極棒径を10mmと一定として溶解速度を変えたときに生成する滴の大きさはモデル実験によって推定されるように大きくなるのかを確かめるために溶解速度 $45 \sim 75 g/min$ と変化させ $CaF_2-Al_2O_3$ 系スラグを用いS55Cについて測定した結果をFig. 6に示した。

これまでに報告された滴の大きさに関する研究においても個々の実験範囲に限られるのでそれらの論文を詳細に検討してもスケールアップして実際操作においてどのような大きさの滴が生成するのか決定することはできない。またこれまでのそれぞれの研究結果をどのようにして相互に関連づけ、どう評価するかについてはどの論文にも何も示されていない。

モデル実験から明らかなように、ある溶解速度以上

Fig. 6. Effects of the melting rate of consumable electrode on the drop weight formed at the tip of the electrode. (diameter of the electrode = 10mm)

になると滴の大きさは電極径の大きさに関係なく溶解速度に依存する。これまでに報告された滴の大きさとスラグ組成、溶解速度で整理しFig. 7に示した。

Fig. 7. Effects of melting rate and slag composition on the drop weight.

$CaF_2-Al_2O_3$ 系 (CaF_2 の分解によって数%の CaO を含む) では Whittker¹⁹⁾ の3元系も含めてDCSPの場合の方がDCRPの場合よりも大きな滴が生成する。この系では両極性とも溶解速度が増加するにもかかわらず滴の大きさは微増するにすぎない。一方、 CaF_2-CaO 系²⁰⁾では $CaF_2-Al_2O_3$ 系と異なりDCSPおよびDCRPいずれの場合も滴の大きさはほとんど同じであるが、しかし溶解速度の増加に伴って滴は急激に大きくなる。

Kammel¹²⁾らの論文によればACでの溶解で

$\text{CaF}_2\text{-CaO}$ 系の方が $\text{CaF}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 系に比して大きな滴が生成したと報告していたので他の研究結果と矛盾すると考えられたが、この図によって初めて他の研究結果との関連が明らかとなった。

Bhat¹⁸⁾ は AC の方が DC に比して大きな滴が生成すると報告しているが、溶解速度が大きくなり溶解電流も大きくなると Kammel らが示したように、溶解速度の増加とともに滴が小さくなるので Bhat が示したような単純な結論は正しいとは限らない。すなわち、滴先端へ電流が集中する結果 Pinch 効果が無視できなくなるからである。

Topilin¹⁷⁾ らによれば実際操業規模の ESR において 7~12g (溶解速度: 2.3~3.8kg/min) が、また成田らによれば 5g 以上の滴 (1~5 kg/min) が生成すると推定した。このように溶解速度の増加に伴って生成する滴が大きくなるが大型装置についてはさらに複雑な要因を考慮する必要がある。

4. 結 言

Wood Alloy と NaOH 水溶液の組合せで ESR に関するモデル実験を行い、電極先端での滴生成現象を明らかにした。また直流小型 ESR 炉で純鉄、S55 C, SK 3 の 3 種類の鋼種を CaF_2 , $\text{CaF}_2\text{-20}\%$ Al_2O_3 および $\text{CaF}_2\text{-20}\%$ CaO スラグで再溶解し、モデル実験から得られた結果から予想される諸現象と小型 ESR の実験結果と比較した。得られた結果はつぎのとおりである。

1) 溶解速度が小さい小型溶解炉で電極先端での滴生成は力学的平衡状態では生成され、その大きさは界面張力からほぼ計算できる。しかしさらに詳細に検討すると滴の大きさは、極性、スラグ組成によって決定されるが、さらに電極界面に生成するガス相に影響される。

2) モデル実験から溶解速度が大きくなるにつれて溶鉄の層流液柱がスラグ層中へ延び出すことを示しているが、実際の小型溶解炉での実験ではその存在を確認できなかった。

3) 種々の溶解規模で行われてこれまでに報告されたデータを整理し、溶解速度、溶滴径およびスラグ組成の間の関係を明らかにした。すなわち $\text{CaF}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 系では溶解速度が大きくなっても滴径はそれほど大きくならないが、 $\text{CaF}_2\text{-CaO}$ 系では急激に大きくなる。

4) 直流による再溶解で溶解規模によって電流効率が変わり、すなわち電極径が 50mm までは DCRP が、また 100mm 以上では DCSP の方が電流効率が良い理

由を明らかにした。

この研究は昭和48年度文部省科学研究費の補助によって行われた。また溶解に使用した S55C および SK 3 は愛知製鋼から支給されたものであり、また、大同製鋼中央研究所から文献収集および実験上のご援助を賜ったことを最後に付記し、感謝の意を表します。

(文 献)

- 1) W. J. Beek and H. Kramers : CES, 16 (1962), 909.
- 2) J. B. Angelo, E. N. Lightfoot and D. W. Howard : A. I. Ch. E Journal, 12 (1966), 751.
- 3) B. D. Marsh and W. J. Heideger : IEC/F, 4 (1965), 129.
- 4) W. Holzgruber und E. Plöckinger : Stahl u. Eisen, 88 (1968), 638.
- 5) H. J. Klingerhöfer, P. Mathis und A. Choudhury : Archiv für das Eisenhüttenwesen, 42 (1971), 299/306.
- 6) M. W. Davies, R. J. Hawkins and P. N. Smith : Steel Times, 197 (1969), 237.
- 7) 成田貴一, 尾上俊雄, 岩本勝利 : 鉄と鋼, 55 (1969), 981.
- 8) 加藤剛志 : 電気製鋼, 41 (1970), 302.
- 9) O. Jarleborg : Soviet-Swedish Symp. on "Clean Steel" Sandviken, Sweden, (1971), 54.
- 10) R. J. Roberts : 2nd Int. Symp. on ESR, (1969), Part 2, Mellon Inst. Pa, USA.
- 11) R. C. Parson : 3rd Int. Symp. on ESR, (1971), Part 1, 176, Mellon Inst. Pa, USA.
- 12) R. Kammel and H. Winterhager : Erzmetall, 21 (1968), 399 and 21 (1968), 471.
- 13) H. Winterhager, R. Kammel and A. Gad : Forschungsherichte des Landes Nordrhein-Westfalen, (1970), No. 2115.
- 14) A. Mitchell and M. Etienne : Trans. Met. Soc. AIME, 242 (1968), 1462.
- 15) M. M. Klyuev and V. M. Shpitzberg : Stal in Eng.
- 16) 一安六雄, 石川勝久, 中村信夫 : 鉄と鋼, 51 (1965), 1946.

- 17) V. V. Topilin et al. : *Stal in Eng.*, (1963), 700.
- 18) G. K. Bhat : 1st Int. Symp. on ESR, (1967), Part 1, Mellon Inst. Pa, USA.
- 19) D. A. Whittker, R. G. Ward and G. R. Purdy : 2nd Int. Symp. on ESR, (1969), Part 3, Mellon Inst. Pa, USA.
- 20) A. Mitchell and G. Boynon : *Met. Trans.*, 2 (1971), 3333.
- 21) A. Mitchell : 2nd Int. Symp. on ESR, (1969), Part 1, Mellon Inst. Pa, USA.
- 22) M. A. Maulvault and J. F. Elliott : *Elec. Furn. Proceedings*, (1970), 13.
- 23) A. E. J. Forno, M. E. Peover and J. S. Powell : *JISI*, 209 (1971), 966.
- 24) O. Madono : 2nd Int. Symp. on ESR, (1969), Part 1, Mellon Inst. Pa, USA.
- 25) A. Mitchell, S. Joshi and J. Cameron : *Met. Trans.*, 2 (1971), 561.
- 26) T. Ohmura, M. Wakabayashi and T. Hosoda : 3rd Int. Symp. on ESR, (1971), Part 2, 87, Mellon Inst. Pa, USA.
- 27) A. Mitchell and S. Joshi : *Met. Trans.*, 4 (1973), 631.
- 28) Y. Kojima, M. Kato, T. Toyoda and M. Inoue : 4th Int. Symp. on ESR, (1973), 35. Tokyo.
- 29) J. Cambell : *J. Metals*, 22 (1970), 7, 23.
- 30) S. Fordham : *Proc. Roy. Soc.*, A 194 (1948), 1.
- 31) C. J. Smithells : "Metals Reference Book", Butter worth Sci. Pub. London, (1949).
- 32) Landolt Börnstein (1956), 421.
- 33) C. Weber : *Ztsch. für angew. Math u. Mech.*, 11 (1931), 136.
- 34) S. I. Popel, O. A. Esin and N. K. Dzhemilev : *Izv. VUZov, Chern, Met.*, (1963), 15.
- 35) 井上道雄, 小島康, 加藤誠 : 学振 19委 9680 (反応 353) (1973).

鋼の割れ抵抗と流動性に及ぼす組成並びに脱酸法の影響

〔Steel USSR, 3 (1973) 9, 740~742〕

30KhNMD 鋼の割れに対する抵抗性、流動性並びに自由収縮に及ぼす化学組成の影響を調査するため、C (0.25%), Si, Mn は一定とし Ni, Cr, Cu, Mo, V の 5 元素の量を変え試験を行なった。5 元素は Ni 3.8±0.5%, Cr 0.7±0.6%, Cu 0.7±0.65%, Mo 0.7±0.3%, V 0.05±0.15% とし、基本成分のもの以外は乱数表により合計 17 種について調査した。

鋼は 13kg マグネサイトライニングの誘導炉で溶解し、脱酸は 0.08%Al と SiZr (0.1%Zr) で行なった。脱酸後レードルにタップし、1570℃で供試材に鑄造した。

供試材から得られたデータにより流動性、割れ抵抗性、収縮に関する数式モデルを作成した。数式モデルから Ni は流動性に対し最も好結果を与える。Mo, Cr は流動性を減じる。Mo, Cu, Cr を上限まで同時に添加すると逆の効果がでる。割れ抵抗性については単に

Ni の増加によってのみ得られる。収縮率は調査の組成範囲内ではほとんど影響を示さないが、これはまた割れに対する抵抗性へも影響がないことを表わしている。

脱酸剤の相違による引張強さ、延性に及ぼす影響を調査した。鋼の収縮率に対しては本質的な変化は見られないが、RE 金属 (FeCe) の使用したものは結晶化温度近くでの引張強さ、延性が著しく増加し、同時に割れ抵抗性も増加した。Al を 0.05 から 0.08% に増加すると熱間引張強さ、延性はある程度増加するが、割れ抵抗性は増加しない。Al と CaSi の使用は赤熱脆性または高温引張強さ、延性に対してはほとんど影響を及ぼさない。

以上のごとくこの調査の化学組成範囲内においては、30KhNMD 鋼の割れ抵抗性の増加法としては、合理的な脱酸法採用が効果的である。(表 2)