

エレクトロスラグ再溶解法の現状



井 上 道 雄*

Present Status of Electroslag Remelting Process

Michio INOUE

1. は じ め に

エレクトロスラグ再溶解法(以下, ESR 法と記す)は, 1954 年ソ連 PATON 電気溶接研究所において開発されて以来, 30 年余を経過した。この間, 真空アーク再溶解法にくらべて真空排気設備を必要とせず, 比較的簡単な設備で, 消耗電極を CaF_2 を主成分とする溶融スラグの抵抗熱で再溶解し, スラグによる精錬効果とともに水冷銅鑄型中で, スラグスキンにつつまれて積層凝固させることによつて均質な鑄塊が得られるという利点が認識され, 急速に世界各国に広まった。殊に 1967 年, 米国 PITTSBURGH で第 1 回の ESR 技術に関する国際シンポジウムが開かれ, 以来同所において, 1969 年, 1971 年とひきつづき第 2 回, 第 3 回のシンポジウムが開催され, 一躍 ESR 法が脚光を浴びるようになった。これらのシンポジウムを通して, ソ連や欧州からは, 大型鍛造用鋼塊の製造技術が, また米国からは航空機用ジェットエンジン材料の超合金の ESR による試作結果が注目された。1973 年, 第 4 回真空冶金国際会議が東京で開催され, これにひきつづき第 4 回 ESR 法に関する国際シンポジウムが開かれた。この時期は, ESR 法の発展期でもあつて, 世界各国から 33 件, うちわが国から 12 件の論文発表があつて盛会であつた。以後, 3 年ごとに開かれる真空冶金国際会議の中の一部門として, ESR 法が組み込まれるようになった。最近では, 昨年 1985 年に第 8 回会議がオーストリア, Linz で開かれている。一方, 鉄鋼製錬における二次精錬技術の目ざましい進歩により, 鋼の高純度化がすすみ, 高級鋼の生産に ESR 法の占めるウェイトは必ずしも大きいとはいえなくなつたが, ESR 鋼塊は一方凝固に近い凝固過程をとるので, 成分偏析をはじめ, 内部欠陥のきわめて少ない均質な組織が得られ, 一般の造塊法からでは得られないすぐれた品質を保証できる特性は無視することはできない。

わが国では, ESR 法の冶金学的特性を明らかにする目的で, 1974 年, 鉄鋼基礎共同研究会に特殊精錬部会

が設置され, ESR の基礎的研究から生産面における技術的諸問題に至るまで, 広範囲な共同研究が行われた。その成果は「エレクトロスラグ再溶解法の物理化学と技術的諸問題」(昭和 54 年)²⁾としてまとめられている。ESR 法の宗原理や操業の特性などについては, すでに鉄鋼便覧 II³⁾や成田⁴⁾によつて詳しく解説されているので, ここではふれない。以下, できるだけ最近の資料にもとづいて, ESR 法の現状の解説を試みた。

2. わが国における ESR 法の稼動状況

わが国の ESR 設備の一覧表が, 前記の第 4 回 ESR シンポジウムの中で, 1972 年当時のものが紹介されている¹⁾。わが国では, ESR 設備の新設は, その後あまりふえていないが, 1986 年現在の ESR 法の稼動状況をまとめたものが表 1 である。ここでは ESR 設備の概要とともに, ESR によつて生産されている品種を列記してある。

表 1 から明らかなように, ESR 法の適用例は, 従来規模としては, 軸受鋼や工具鋼など高合金鋼を対象とした比較的小さいものが多いが, 大型 ESR による大型鍛鋼品や極厚板の生産も少なくない。前者は, 例えば, 高速度鋼についていえば, ESR によつて非金属介在物が減少し, かつ偏析が少なく細かく均一な炭化物分布をもつ組織が得られ, それによつて材料の性能が一段と向上することが認められている⁵⁾。大型鍛鋼品用の鋼塊についても, 普通的大型鋼塊に生じやすい種々の内部欠陥が, ESR によつていちじるしく改善されることが明らかで, この分野における成果が, これまでもいくたびかの国際会議で, 世界各国から発表されている^{6)~8)}。具体的な例について, 最近の注目される成果を以下, 4 に紹介する。また, ステンレス鋼や耐熱鋼などの高合金鋼, さらに超合金など, 以前は真空アーク再溶解法 (VAR 法) によつて製造されたものの, ESR 法による生産が急速に伸びている⁹⁾¹⁰⁾。

昭和 61 年 6 月 20 日受付 (Received June 20, 1986) (依頼解説)

* 名古屋大学 名誉教授 工博 (Nagoya University, 33 Umezono Hiroji-cho Showa-ku Nagoya 466)

表 1 わ が 国 に お ける ESR の 稼 動

会 社 名	工 場 名	設置年	製 作 者 名	炉 体 方 式	公 称 能 力 (t)	モー ル ド の 大 径×長 (mm)	最大イン ゴ ッ ト (t)	電 源		
								変圧器 容 量 (kVA)	定格二 次電圧 (V)	最 大 電 流 (kA)
関東特殊製鋼	本 社	1975	大 同	移 動 式 及 び 固 定 式	15	500φ 900 750φ × 825φ 3 800 980φ	15	3 500	130	25
神 戸 製 鋼	高 砂	1970	自 社	固 定 式	70	360φ×2 500 480φ×1 985 570φ×2 150 690φ×3 200 750φ×3 150 840φ×3 500 1 030φ×3 500 1 410φ×4 200 1 820φ×4 500	70	5 000	100	50
山陽特殊製鋼	本 社	1972	ソ 連	固 定 式	2.0	427φ×1 900	2.0	1 255	104	15.5
新 日 本 製 鉄	八幡製鉄所	1974	ソ 連 パ ト ン 研 究 所	バイフィ ラー移動 鋳型方式	40 28 16	510×2 400×4 200 510×1 900×3 800 300×1 900×3 800	40	5 630	144.3~ 38.9	45
住友金属工業	鋼管製造所	1983	大 同	固 定 式	5	485φ×2 250 570φ×2 550	5	2 622	138	19
大 平 洋 製 鋼	富 山	1972	自 社	固 定 式	2.0	550φ×2 000	3.5	750	75	10
		1982	自 社	固 定 式	15	1080φ×2 550	14.5	2 500	90	38.5
大 同 特 殊 鋼	星 崎 洪 川	1973	自 社	固 定 式	1.0	420φ×2 000	1.2	1 000	85	9.5
		1967	自 社	固 定 式	6.0	720φ×2 000 600φ×2 500	6.0 4.0	2 400	75	27
		1971	大同- ヘラウス	固 定 式	2.0	525φ×1 800	2.6	1 300	85	16
		1973	同 上	固 定 式	1.0	315φ×1 850 400φ×1 800	0.9 1.0	570	75	7.5
		1973	自 社	固 定 式	0.5	245φ×2 000	0.8	540	77	7.0
東 北 特 殊 鋼	本 社	1974	大 同	固 定 式	0.5	230φ×1 500	0.5	478	73.5	6.5
日 本 製 鋼 所	室 蘭	1973	自 社	移 動 式	20	630φ 830φ 1 040φ	5.1 8.8 20.0	6 600	134	49.25
		1959	同 上	固 定 式	0.5	260φ×1500	0.5	288×2	80	800~ 2 500
日 本 高 周 波	富 山	1968	神 戸 製 鋼	固 定 式	1.0	360φ×1 800 280φ×1 200	1.0	675	90	7500
日 本 鉦 業	川 崎	1978	大 同	鋼 塊 引下げ式	1.2	380φ×1 050	1.2	1 650	110	15
		1971	日本真空技術	同 上	0.5	170×350×1 040	0.5	1 450	75	15
日 立 製 作 所	勝 田	1968	自 社	移 動 式	15	900φ×1 200 800φ×1 200 700φ×1 200	15	1 500	60	20
		1977	同 上	同 上	同 上	同 上	同 上	DC1850	75	25
日 立 金 属	安 来	1967	自 社	固 定 式	1.0	330φ×1 600	1.0	500	40	7.5
		1971	同 上	同 上	1.0	330φ×1 600	1.0	800	50	10
		1966	同 上	同 上	3.0	600φ×2 000	3.0	1 500	75	20
		1974	同 上	同 上	3.0	600φ×2 000	3.0	1 200	75	16
		1980	同 コンサーク	同 上	6.0	750φ×3 250	6.0	1 750	70	25
不 二 越	東 富 山	1973	ソ 連 パ ト ン 研 究 所	固 定 式	2.0	450φ×1 500 300φ×1 500 200φ×1 500	2.0	1 800	44~100	18
三 菱 製 鋼	宇 都 宮	1970	大同- ヘラウス	固 定 式	13	800φ×3 500 600φ×2 500 400φ×2 500	13	1 800	60	25

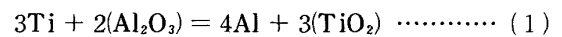
状 況

スラグ組成	製造品種	インゴットの加工	品種概要
$\text{CaF}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO}$ (40~70)	工具鋼 各種ロール鋼 金型用鋼	鍛造	鍛鋼ロール 一般鍛鋼品
$\text{CaF}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 系 及び $\text{CaF}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO}$ 系をベースに TiO_2 , SiO_2 を適 宜添加	炭素鋼 CrMo鋼 CrMoV鋼 高MnCr鋼 各種ステンレス鋼 各種超合金	鍛造	一般鍛鋼品
(例) $\text{CaF}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO}$ 65 30 5 この他鋼種により 種々の組成のフ ラックスを使用	低合金鋼 軸受鋼 ステンレス鋼 工具鋼 超合金	鍛造 及び 圧延	棒管鍛鋼品
$\text{CaF}_2\text{-CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ (ANF 28~29)	低合金鋼 炭素鋼	圧延	特殊厚板
$\text{CaF}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO}$	ステンレス	圧延	継目無鋼管
$\text{CaF}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO}$	合金鋼 特殊鉄 ステンレス鋼 超合金	鍛造	一般鍛造品 原子力部品 圧延用ロール
同上	同上	同上	同上
$\text{CaF}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO}$ (60~70)	各種ステンレス鋼 工具鋼 各種ステンレス鋼 工具鋼 超合金	圧延 鍛造 (圧延)	一般鋼材 一般鍛鋼品 圧延品
同上	同上	同上	同上
同上	工具鋼 ステンレス	圧延 (鍛造)	圧延品
同上	同上	圧延	圧延品
$\text{CaF}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ (70~80)	高速度鋼 工具鋼	鍛造	一般鍛鋼品
$\text{CaF}_2\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3$ (50~20~30)	低合金鋼 各種ステンレス鋼 高Mn-Cr鋼 低合金鋼 各種ステンレス鋼	鍛造	一般鍛鋼品
$\text{CaF}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ (80~20)	同上	鍛造	同上
$\text{CaF}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO}$ $\text{CaF}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-TiO}_2$	合金鋼 高合金鋼 ステンレス鋼 超合金	鍛造 圧延 伸線	鍛鋼品 棒線 材
$\text{CaF}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ (70~30)	高Ni-Fe 合金 同上	鍛造 圧延	板・条
$\text{CaF}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO}$ (60~70)	炭素鋼 Cr-Mo鋼 Ni-Cr-Mo鋼 ステンレス鋼	鍛造	鍛鋼焼入れロール 一般鍛鋼品 他
同上	同上	同上	同上
$\text{CaF}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO}$ 系 同上 同上 同上 同上	炭素鋼 合金工具鋼 耐熱鋼 ステンレス鋼 電磁気材 超耐熱合金	鍛造	圧延棒鋼 加工品素材 帯引拔棒鋼
$\text{CaF}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$	高速度鋼 合金工具鋼 軸受鋼	鍛造	一般鍛鋼品 圧延品
$\text{CaF}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO}$	高C-Cr鋼 その他	鍛造	鍛鋼品

3. ESR の操業技術

ESR 法は前述のように、すぐれた均質な凝固組織をもつ鑄塊が得られるという特色が高く評価されているが、鋼種により、また大型鋼塊になればやはり溶解条件が不適当であれば、Freckle といわれる欠陥が生じることが知られている¹¹⁾¹²⁾。このような欠陥を防ぎ、目的とするすぐれた鋼塊を得るためには、それぞれ適正な溶解速度が要求される。種々の材料について、この適正な溶解速度と鋼塊径の関係が、図1のように示されている¹³⁾。実際操業にあたっては、この溶解速度を正確に制御することが必要である。大型鋼塊、例えば鋼塊径 1.5 m 以上の鑄塊を製造するとき 1.5 t/h の溶解速度を得ようとする、電極の降下速度は 2 mm/min というように非常に小さくなるため、これをコントロールすることはきわめてむずかしく、電極につけたロードセルによつて、溶解速度を直接測定しながら、電圧、あるいは電流を制御して安定な溶解ができるようにシステム化されている¹⁴⁾。このようなシステム化された自動溶解によつて、鋼塊の品質の安定化が得られており、小型 ESR の場合もほぼ同様である。

Ti や Al を含む高合金鋼、あるいは超合金などは、従来主として VAR によつて再溶解されていたが、最近では ESR による製品の品質がすぐれていることがわかり、このような品種への ESR 法の適用が行われるようになった¹⁵⁾¹⁶⁾。具体的な例は4で述べるが、ESR に際して Ti と Al を正確に制御することが重要である。このとき TiO_2 を含む $\text{CaF}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 系スラグが用いられるが、溶解中に(1)式の反応が生じる。



したがつて、適正なスラグ組成を選ばなければならないので、あらかじめこのようなスラグとメタル間の平衡関係を基礎実験により明らかにし、(2)式の結果が得られている¹⁵⁾。

$$\log K = \log a_{\text{Al}}^4 \cdot a_{(\text{TiO}_2)}^3 / a_{\text{Ti}}^3 \cdot a_{(\text{Al}_2\text{O}_3)}^2 \\ = -35\,300/T + 9.94 \cdots \cdots (2)$$

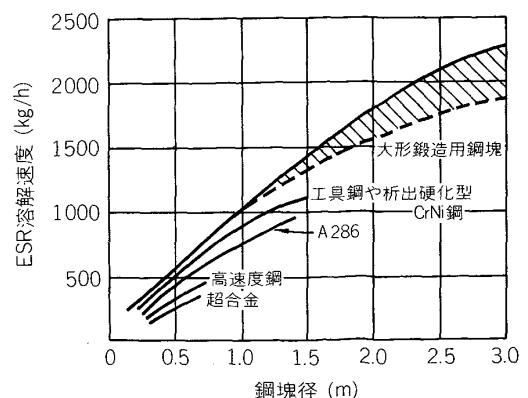
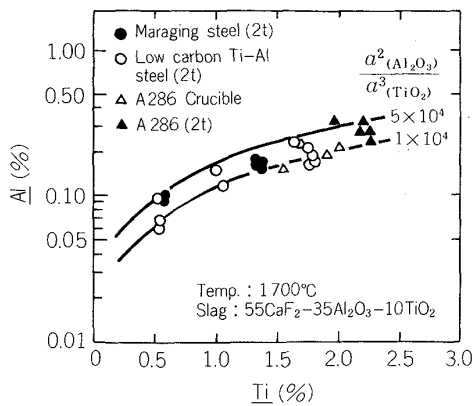


図1 ESR における平均溶解速度と鋼塊径の関係¹³⁾

図 2 A286 鋼とマルエージング鋼の Ti と Al の関係¹⁵⁾

$$(e_{\text{Ti}}^{\text{Ti}} = 0.046, e_{\text{Al}}^{\text{Al}} = 0, e_{\text{Ti}}^{\text{Al}} = 0)$$

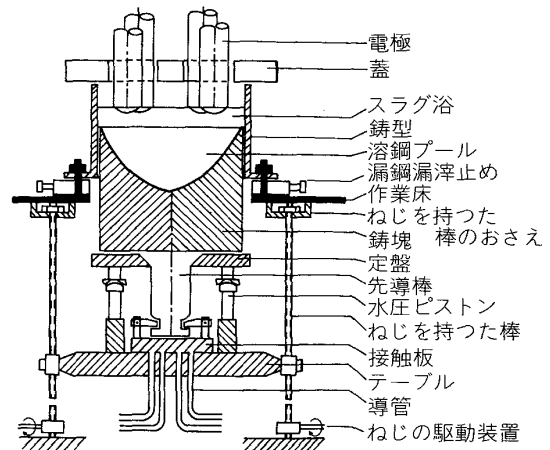
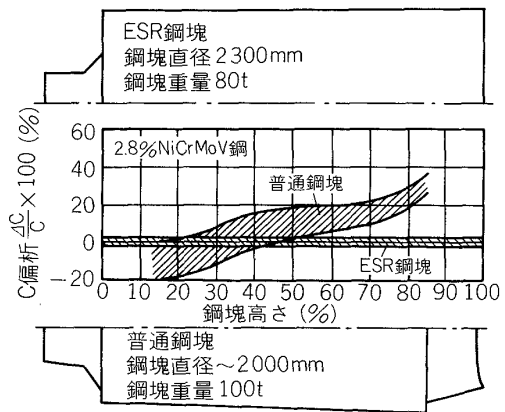
ここで, K : 平衡定数, T : 絶対温度, a_i : i 成分の活量

図 2 は 55 % CaF_2 -35 % Al_2O_3 -10 % TiO_2 スラグを用い, 種々の Ti と Al を含む鋼を溶解し, (2) 式で整理した結果で, 耐熱合金 A286 の 2 t 鋳塊の例が示されている。

4. ESR による大型鍛鋼品の製造

ESR 法による鍛鋼品の製造は, 早くから冷延用ワークロール材やプラスチック用金型材などに, その表面層が均質で組織も緻密であるという特性が活用されてきたが, 最近では, 高い応力下で信頼性をきびしく要求される発電用タービン部品への適用がめざましい¹¹⁾¹⁷⁾。すなわち, タービンロータ材 (3.5 % NiCrMoV 鋼, CrMoV 鋼, 12 % Cr 鋼), タービンロータディスク, 保持リング (18 Mn 5Cr 鋼など), 原子力発電用オーステナイトステンレス鋼やインコネル, クランクシャフト, 圧力容器, 海洋構造物などがあり, さらに高速増殖炉や核融合炉, 超電導発電機用素材にも適用されている¹⁴⁾。これらの目的のため, 鋼塊径が 1 m を越える大型 ESR 鋼塊がつくられている (表 1 参照)。わが国で最も大きいものは, 神戸製鋼・高砂の 70 t 炉で, 1500 mm 径の ESR 鋼塊から, 12 % Cr 鋼のロータ材が製造されている¹⁸⁾。海外では, 24 t 以上の大型 ESR 設備が, 約 30 基存在する (東側諸国を除き) との報告¹⁹⁾があるが, 西独 Völklingen の Röchling-Burbach 工場には, 125 t (最大 160 t まで可能), 2300 mm 径の超大型 ESR が 1971 年に設置され, 大型鍛鋼用鋼塊の製造に成功している²⁰⁾。ここでは, 800 mm 径の 4 本の電極が使用され, 固定式モールドではなく, 鋼塊引抜き方式をとっている (図 3)。1980 年には 160 t 鋼塊が製造された²¹⁾。

図 4 は, 大型 ESR 鋼塊の成分偏析が, 普通鋼塊に比べて, きわめて小さいことを示す一例である²²⁾。また, 普通鋼塊と ESR 鋼塊の中心部の 2 次デンドライトアームスパーシングと鋼塊径の関係を, 図 5²³⁾ に示してい

図 3 165 t 鋼塊が製造できる ESR 装置の概略図²⁰⁾²¹⁾図 4 普通鋼塊と ESR 鋼塊の C 偏析の比較²²⁾

るが, 明らかに同一径で比べると, ESR 鋼塊の方がアームスパーシングが小さい。たとえば, 1000 mm 径の ESR 鋼塊の組織の緻密さは, 普通鋼塊ではたかだか 300 mm 径のものに相当する。またマイクロ偏析の例を示すと, 図 6²⁴⁾ に示すように, 3.5 NiCrMoV 鋼塊の Cr, Mo のマイクロ偏析は ESR 鋼塊の方がすぐれていることが明らかである。

ここで, 近年, ESR 法の適用がさかんに進められている, タービンロータ材を中心に, これらの品質に及ぼす ESR の効果について述べる。

3.5 % NiCrMoV 系タービンロータ材は, 中圧の蒸気タービン用であるが, 近年の発電機用蒸気タービンの容量の増大にともない, タービンロータも大型化し, その使用条件も苛酷になりつつある。したがって, ロータの材質にはきびしい検査が行われるが, 特に軸心部の品質が問題になり, 多くの場合中心孔を開け, 軸心部より試料を採取し機械的性質を確認する。それと同時に中心孔の内面, あるいは近傍の欠陥の有無を確かめるため, 磁粉探傷検査や超音波探傷検査が中心孔から直接行われ

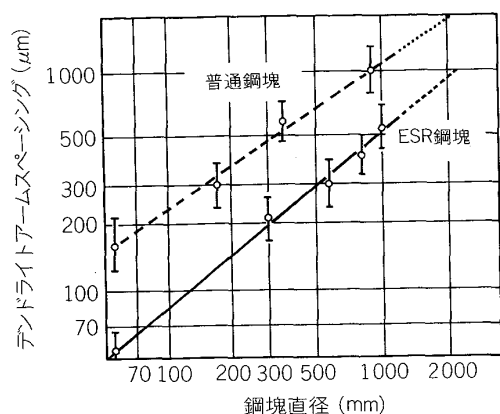


図 5 二次デンドライトアームスペースングと鋼塊直径の関係²³⁾

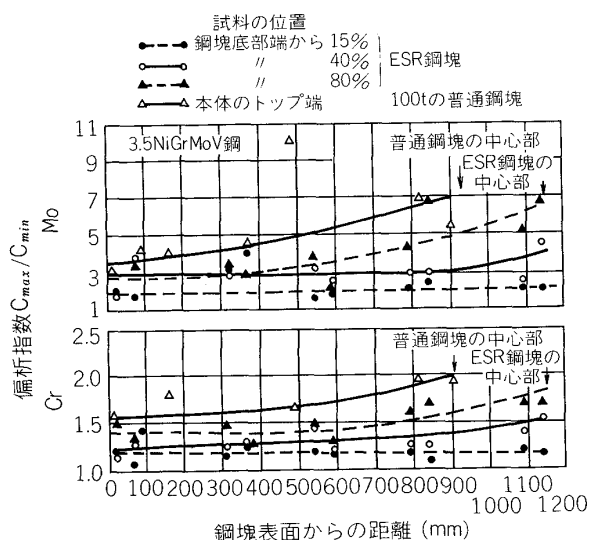


図 6 普通鋼塊と ESR 鋼塊の Cr Mo のミクロ偏析の比較²⁴⁾

る。この軸心部の品質を保証するために、真空脱炭を含む二次精錬による溶鋼の高純度化とともに ESR 法の適用が積極的にとりあげられている¹⁹⁾。1500 mm 径、40 t ESR 鋼塊から製造したロータシャフトの製品各部の機械的性質は、十分規格を満足する値が得られ、大型 ESR 鋼塊の信頼性の高いことが確かめられた¹⁷⁾。一方、6で述べる ESHT (Electroslag Hot Topping)²⁵⁾ も、この種の大型鋼塊を対象として、欧州において開発され、実用化が進んでいる。

さらにより高温、高压で使用するロータ材として、フェライト系ステンレス、12% Cr 鋼 (11Cr-1Mo-0.2V-Nb-N)²⁶⁾ があるが、Nb を 0.05% 程度含有するため、普通造塊法では、凝固過程に鋼塊中心部に共晶の NbC が出やすい難点があり、これも二次精錬の進歩により改善されつつあるが²⁷⁾、ESR によればこの点

は解決される。ESR 法による 12% Cr ロータ材は、1975 年ごろから試みられ²⁸⁾²⁹⁾、西独では、80 t、2200 mm 径の鋼塊が試作されたという報告がある²⁹⁾。わが国でも、最近、70 t ESR により、1350 mm 径の低 Al、低水素 (それぞれ、50 ppm、1.5 ppm) の 12% Cr ロータ用鋼塊が製造され、きわめて均質な、すぐれた材質が得られている¹⁸⁾。この例では、製品に要求されるクリープ強度の点から、低 Si、低 Al が要求され、また窒素も正確にコントロール (0.04%) することが必要であるため、電極材はアーク炉で溶製後、取鍋精錬で脱酸、脱硫を行い、アルゴン雰囲気中で下注铸造した。ESR では、Al を低く抑えるため、適切なスラグ組成を確保することが重要で、SiO₂ を含有するスラグを用い、ホットスタート法で、アルゴン雰囲気下で溶解し、水素ピックアップを抑え、ほぼ [H] 1.5 ppm を得ている。図 7 は、1400 mm 径の ESR 鋼塊の凝固中の Al、Si、S、O の挙動を示す。いずれもきわめて低い値が達成されており、鍛造後のロータ材は、内部性状は中心部で C、P、S の偏析は認められず、清浄度もすぐれていることが確認された。

さらに高温の、650℃ 用ロータ材としてのオーステナイト系耐熱合金 A286 (15Cr-26Ni-1.3Mo-2.15Ti-0.2Al-0.3V) は、以前からジェットエンジン用耐熱材料として開発されたもので、航空機材料として特に品質に対する信頼度の厳しいものであるため、従来二重真空溶解、つまり真空誘導炉 (VIM)-真空アーク再溶解法 (VAR) の組合せで溶製されている。近年、核融合炉や超電導発電機用素材として、より大型部品が使用されるようになり、1 t 以上の鋼塊が要求され、ESR での製造が行われるようになった¹⁶⁾³⁰⁾。この系の合金は、Ti および Al を含むため、ESR に際しては、Ti、Al の歩留り、成分の均一性などが問題となるが、前述のように、スラグ-メタル間平衡の基礎データにもとづき、Ti

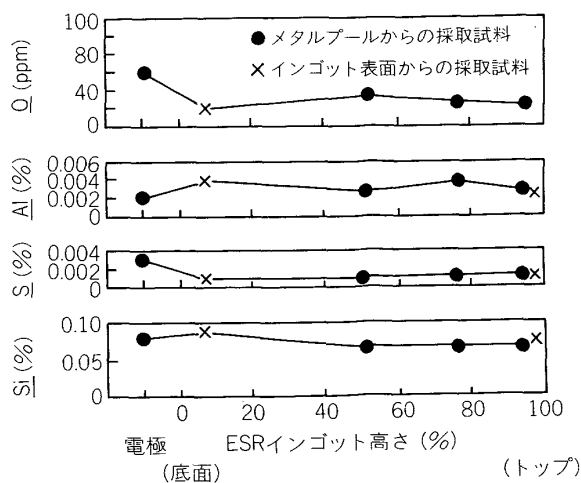
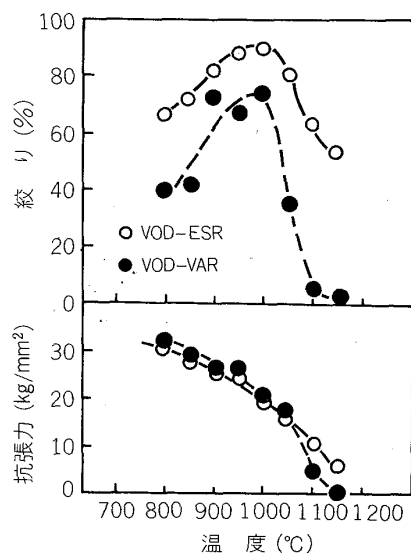


図 7 1400 mm 径 ESR における 12% Cr 鋼の Al、Si、O 及び S の挙動¹⁸⁾

及び Al の正確な制御が可能となつた。これにより、ESR による鋼塊の歩留りの高いこと、熱間加工性のよいこと、また溶鋼プールが浅いため内部品質がすぐれていること、などのメリットが認識され、このような耐熱合金への ESR 法の適用が行われるようになった。この場合、電極はステンレス鋼の精錬と同様に、アーク炉で溶製後、VOD 精錬を行い、低窒素、低硫黄 (10 ppm) 化とともに Ti と Al を正確にコントロールすることが要求される。図 8 は、A286 合金の VAR 鋼塊と ESR 鋼塊の熱間加工性を比較したもので、ESR 鋼塊が一段とすぐれていることが明らかである³¹⁾。また、図 9 は、同様に VOD-ESR 法によつて製造された鋼塊径 480 mm、2t 鋼塊について、Ti 系介在物による清浄度の評価をあらわしたもので、VAR 鋼塊と全く遜色がない。



	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
ESR	0.047	0.42	1.20	0.016	0.001	24.95	15.11
VAR	0.046	0.42	1.12	0.016	0.001	25.20	15.11
	Mo	V	Al	Ti	B		
ESR	1.30	0.27	0.34	2.33	0.0079		
VAR	1.31	0.27	0.26	2.40	0.0077		

図 8 A286 合金の ESR 鋼塊と VAR 鋼塊の熱間加工性の比較³¹⁾

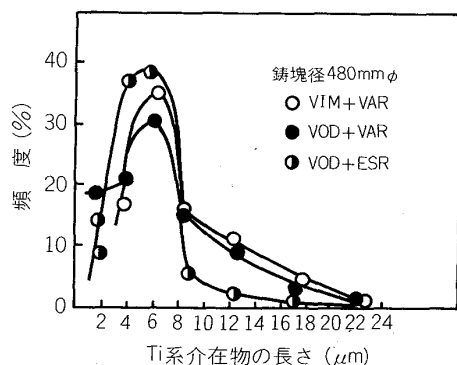


図 9 各プロセスにより製造された鋼塊の Ti 系介在物の長さの比較³¹⁾

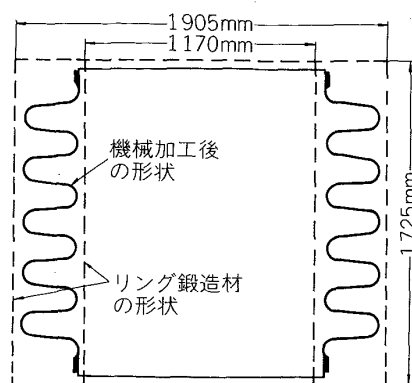


図 10 エキスパンションジョイントの概略の形状³⁵⁾

機械的性質についても、両者の差異はほとんど認められなかつた³¹⁾。最近試作された、16t 鋼塊 (1000 φ × 2550) から鍛造された 880 mm 径のロータ材の各種性能試験の結果は、十分満足できるものであると報告されている³²⁾。

Ni 基耐熱合金インコネル 718 のガスタービン用ディスクも、やはりこれまで VIM-VAR の二重真空溶解でつくられていたが、VAR に代わつて ESR のほか、エレクトロンビーム溶解 (EB) などがとりあげられるようになった³³⁾。この合金では、ESR 鋼塊に Nb が濃化した Freckle が生じやすい³³⁾ことが問題であるが、最近試作された、VIM-ESR 法による 2t ESR 鋼塊からの、580 mm 径のインコネル 718 ディスクの確性試験の結果は、VAR とくらべて遜色のないものであることが確かめられた²⁴⁾。

高速増殖炉の蒸気発生器用鍛鋼品として、エキスパンションジョイント (Convolute Shell Expansion Joint-CSEJ) があるが、これは運転中に生じる熱膨張を吸収するための一種のペローズで、ESR 鋼塊から製造される。図 10 に概略の形状を示すが、47t、1500 mm 径の大型 ESR 鋼塊 (2 ¼ Cr-1Mo) から円筒に鍛造し、機械加工によつて最終製品は、1945 mm 外径、1130 mm 内径、1885 mm 高さのリングに仕上げられる³⁵⁾。使用条件が 3 軸応力となるので異方性がないことが必要で、かつ鋼塊の清浄性、均質性が強く要求されているが、ESR による試作品は、これらを満足するのみならず、機械的強度、靱性、超音波検査等すべての試験に合格した³⁵⁾。

5. ESR による大型スラブ鋼塊

大型スラブ製造用 ESR 炉として、1974 年、ソ連 PATON 設計の、40t ESR 炉が八幡製鉄所に設置され稼動を開始した。本 ESR 炉の特色は、文献³⁶⁾に詳しく紹介されているのでその詳細は省略する。この ESR 鋼塊から圧延された厚板材 (50 kgHT 100~130 mm 厚) は延

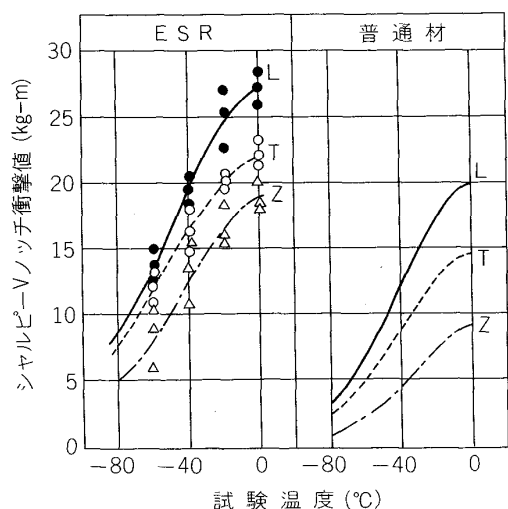


図 11 Si-Mn 鋼 (HT50, 板厚 100 mm) の衝撃値³⁶⁾

性、靱性にすぐれ、その衝撃特性は、図 11 に示すように、普通鋼塊材に比べ著しく向上するのみならず、L, C, Z 方向の差がきわめて小さいことが認められる。特に、ESR 材では圧延方向と直角方向 (T 方向) や Z 方向の衝撃値の向上が目立っており、圧延方向 (L 方向) との差が小さくなり異方性が改善されていることが明らかである。この例からも明らかなように、ESR 法によって製造された厚板材は、靱性がすぐれているばかりでなく、板厚方向の特性も良好で、板内変動も小さく、高い信頼度を要求される特殊高級材の製造に活用されている。また海外でも高級厚板材を目的とする 35t 級のスラブ用 ESR 炉が稼動していることが報告されている³⁷⁾³⁸⁾。

6. ESR 法の応用技術

ESR 法を応用した技術も種々開発されてきたが、その主なるものをあげると次のようなものがある。

(1) エレクトロslagキャスティング法 (ESC)

複雑な形状をした大型鋳鋼品や、中空鋼塊の製造に ESR 法を応用した技術が、PATON 電気溶接研究所で開発された³⁹⁾。この方法により、一般の鋳物に生じやすい欠陥、すなわち気孔や成分偏析のない製品をつくることができ、かつ材質的には機械的性質に異方性がなく、鍛鋼品と比べて遜色がないといわれている。この特性をいかして、船舶用クランクシャフト³⁹⁾⁴²⁾をはじめ、種々大きさの中空鋼塊⁴⁰⁾⁴¹⁾⁴³⁾、コネクティングロッド、圧延ロール³⁹⁾などの製造例が報告されている。

(2) エレクトロslagホットトッピング法 (ESHT)

1975 年ごろから、材質に対するきびしい要求のあるタービンロータの品質を改善する目的で、大型鋼塊の造塊時に ESHT 法の適用が試みられた²⁵⁾。この方法は、大型鋼塊に生じやすい諸欠陥を防止するために、特別の

設備投資なしに、ESR を押湯保温技術に利用し、品質のすぐれた鋼塊を得ることを狙ったもので、BEST 法 (Boehler Electroslag Topping) (図 12)、TREST 法 (Terni Refractory Electroslag Topping) (図 13)、および ESHT-J 法 (図 14) などがある。BEST 法^{44)~48)}は 1975 年、オーストリアの Vereinigte Edelstahlwerke で開発されたもので、インゴットは上注ぎ、または下注ぎでモールドに鋳込まれたのち、溶融スラグでカバーし、1本の消耗電極をスラグプールに挿入して加熱する。これにより鋼塊頭部への熱の供給が行われ、凝固速度がコントロールされて鋼塊頭部近傍の欠陥の発生を抑えることができる。同工場では NiCrMoV 鋼の 52t 鋼塊が BEST 法で製造され、偏析の少ない品質が達成されている⁴⁷⁾、鍛鋼用インゴットのみならず、スラブ材にも適用が試みられ、35t BEST スラブが製造されており⁴⁶⁾、ESR 法に比べてコストが低い利点が認められている⁴⁵⁾。TREST 法は、イタリア Terni 社と CSM 社で開発されたもので⁴⁹⁾、溶鋼は流滴脱ガスによりモールドに注入

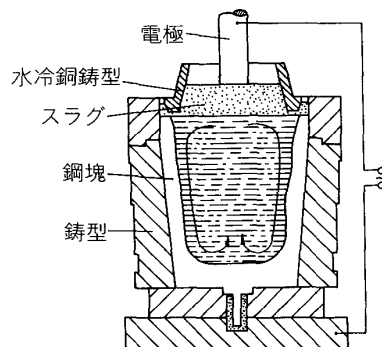
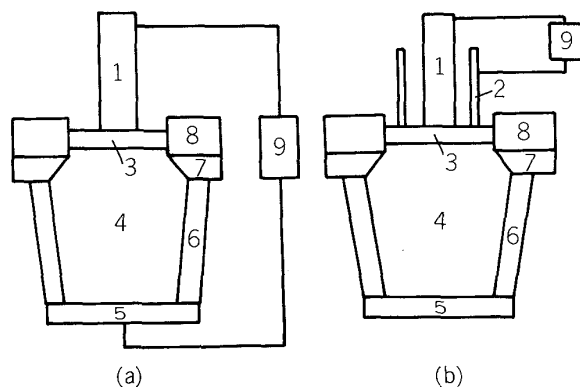


図 12 BEST プロセスの原理^{44)~48)}



単一電極：電流は定盤を通して流される

Twin 電極：電流は外側の円筒状電極から流される

- 1) 電 極 2) Twin 電極 3) スラグ 4) 鋼 塊
- 5) 定 盤 6) 鑄 型 7) 耐スポーリング性の耐火物
- 8) 耐溶損性の耐火物 9) 電 源

図 13 TREST プロセスの原理⁴⁹⁾

される。図 13 に示すように、モールドの上部は耐火物で、その上に本法の特徴である耐火物でライニングした特殊のホットトップカバーが乗っており、溶鋼はこの部分まで注入され、さらにその上に溶融スラグ ($\text{CaF}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO}$ 系) がカバーする。スラグ中に消耗電極が挿入され (単極あるいは Twin)、これを通してスラグが加熱され溶融状態に保たれる。インゴットが凝固するにつれ収縮孔の部分は電極の再溶解によつて満たされ、内部欠陥の少ない鋼塊を得ることができる。この方法で 62 t のロータシャフト用 CrMoV 鋼塊がつくられよい結果が得られている⁵⁰⁾。ESHT-J 法もまた同様に大型鋼塊の品質の安定、向上を狙つて、日本鑄鍛鋼 (株) で開発された⁵¹⁾。本法の特徴は図 14 に示すように 3 本の黒鉛電極を用い、三相交流がスラグ相内のみを流れるように設計されている。この方法によつて、高圧蒸気タービンロータ材として、60 t CrMoV 鋼塊が製造された。鋼塊中心部断面のマクロ組織は、従来法にくらべて改善され、また ESHT 処理中の高温塩基性スラグの脱硫、脱酸効果も大きく、清浄度が一段と優れている。この鋼塊から鍛造されたロータ材は、高感度超音波探傷による欠陥は認められず、また中心孔内面の磁粉探傷の結果、500 A/in の磁化電流密度 (中心孔直径 1 inch あたりの電流値で表示したもの) でも、磁粉探傷インディケーションは認められなかつた。またこの鋼塊の鍛造歩留りは約 80 % で、普通鋼塊にくらべて、15~20 % 向上するといわれる⁵¹⁾⁵²⁾。

(3) MHKW 法 (Midvale-Heppenstall-Klöckner Werke)

この方法も大型鋼塊の中心部偏析欠陥を除く目的で、ESR の技術を応用した例である。CZR 法 (Central Zone Remelting) ともいわれ、普通の造塊法でモールドに溶鋼を注入後、中心部を Trepan punching によつて取り除き、この部分を ESR によつて、消耗電極を再溶解して埋めるというものである。このとき、中心の溶融帯

はもとの鋼塊の直径の $\frac{1}{3}\sim\frac{2}{3}$ になる。1976 年、Osnabrück の Klöckner 工場が開発され、最大 120 t までの MHKW 鋼塊が製造された⁵³⁾。この方法によれば、ESR 法よりも低いコストで大型鋼塊ができるメリットがあるといわれ、さらにその後、200 t の大型鋼塊の製造に成功したといわれる⁵⁴⁾⁵⁵⁾。

(4) Portioned Electroslag Casting (PESC 法)

この方法は水冷銅鑄型内で、非消耗電極で加熱溶融したスラグ層を通して、あらかじめ脱ガス処理をした溶鋼をいくつかに分割して注入し順次凝固させることによつて、大型鍛造用鋼塊の品質の向上をねらつてソ連で開発された⁵⁶⁾。ロータ材用の 75 t PESC 鋼塊についての試験結果によれば、同じ鋼種の 52 t BEST 鋼塊に比べて機械的性質はすぐれ、また Mo および Cr の偏析度は 80 t ESR 鋼塊の値に近いもので、大型鋼塊への PESC 法の適用が有利であるという。最大 200 t 鋼塊が製造されている⁵⁶⁾。

(5) その他

複合ロール、すなわちロールの表面を耐摩耗性のよい高合金層とし、コアの部分は靱性の高い鋼とするロールの製造に、ESR の技術が利用されている。イタリアの Centro Sperimentale Metallurgico 社で開発された方法⁵⁷⁾ は、オリジナルシャフトの外側に、メタルパウダー電極をセットし、これを ESR で溶解する。このときシャフトの一部も溶解する。熱間仕上ロール用に製造された例が報告されている。日立製作所、勝田工場でも、同様の方法で Cr 含量の高い耐摩耗性の層をもつ冷延用複合ロールが試作され、すぐれた表面層をもつことが確かめられている⁵⁸⁾。

加圧 ESR 法は含窒素オーステナイト合金鋼、例えば Cr-Mn オーステナイト鋼に窒素を溶解させる目的で、1980 年、西独で 42 bar 圧まで可能な、加圧 ESR 炉が設置され、14 t、1 000 mm 径の鋼塊が製造されたという⁵⁹⁾。

7. お わ り に

ESR 法は、70 年代前半に華々しく発表したが、最近はやや落ちつくべきところに落ちついた感がある。しかし、品質の信頼性をきびしく要求される部品、殊に本文でふれたようなタービンロータ材のような大型鍛鋼品や、ジェットエンジン用材料に代表される超合金部品の製造法として、ESR 法は重要な地位を占めているといえる。

本稿をまとめるに当たり、快よくアンケートに御協力いただいた各社の担当の方々に厚く御礼申し上げます。殊に有益な資料をお送りいただき、あるいは直接現状の御説明の労を惜しまれなかつた、(株)神戸製鋼所高砂事業所、岡村正義氏、新日本製鉄(株)八幡製鉄所、大河平和男氏、

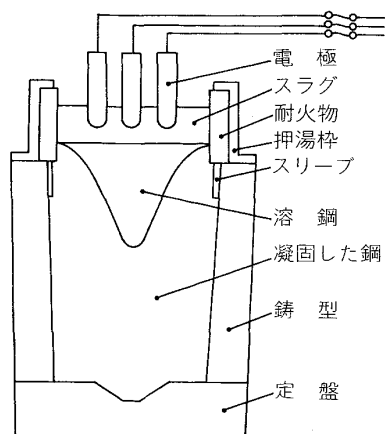


図 14 ESHT-J プロセスの原理⁵¹⁾

大同特殊鋼(株) 中央研究所, 湯淺悟郎氏, および(株)日本製鋼所室蘭製作所, 竹之内朋夫氏, の各位に深く感謝する。

文 献

- 1) Proceedings of the 4th International Symposium on Electroslag Remelting Processes (日本鉄鋼協会編) (1973)
- 2) エレクトロスラグ再溶解法の物理化学と技術的諸問題 昭和54年2月, 鉄鋼基礎共同研究会特殊精錬部会
- 3) 鉄鋼便覧 II 製鉄・製鋼 (日本鉄鋼協会編) (1979) [丸善]
- 4) 成田貴一: 鉄と鋼, **63** (1977), p. 1996
- 5) G. YUASA, T. YAJIMA and K. SHIINA: Proc. 4th Int. Sympo. ESR (1973), p. 229
- 6) A. WAHLSTER and R. SCHUMANN: Proc. 4th Int. Sympo. ESR (1973), p. 337
- 7) T. NIIIMI, M. MIURA, S. MATSUMOTO and A. SUZUKI: Proc. 4th Int. Sympo. ESR (1973), p. 332
- 8) R. SCHUMANN: Proc. 5th ICVM (1976), 229
- 9) C. F. ELLIOTT, J. W. VORBERGER, M. G. STATON and G. L. MILLS: Proc. 4th Int. Sympo. ESR (1973), p. 298
- 10) K. S. CREMISIO and D. A. SHINN: Proc. 4th Int. Sympo. ESR (1973), p. 276
- 11) 三浦正淑, 新美実保, 松本重喜, 鈴木 章: 鉄と鋼, **62**(1976), p. 1698
- 12) 広瀬 豊, 大河平和男, 清水高治, 佐藤宣雄, 平居正純, 西脇 実: 鉄と鋼, **63** (1977), p. 266
- 13) H. JAEGER: 8th ICVM, **1** (1985), p. 497
- 14) 岡村正義: 第110・111回西山記念技術講座 (日本鉄鋼協会編) (1986), p. 175
- 15) 例えば, M. OKAMURA, K. HIROSE, M. KOHNO and A. SUZUKI: Proc. 7th ICVM (1982), p. 1511
- 16) 鈴木 章, 岡村正義, 広瀬和夫: 日本金属学会会報, **23** (1984), p. 410
- 17) 鈴木 章, 岡村正義, 広瀬和夫, 田中重明: 鉄と鋼, **69** (1983), p. 861
- 18) M. OKAMURA, K. HIROSE, K. SEKIMOTO, H. NAGATA and T. NIIIMI: 10th Int. Forging Conf., Sheffield (1985)
- 19) Advanced Steelmaking Processes for Rotor Forgings, EPRI RD-3336 (1983)
- 20) R. JAUCH, A. CHOUDHURY, F. TINCE and W. R. LEMOR: Ironmaking Steelmaking (1979) **2**, p. 75
- 21) R. JAUCH, A. CHOUDHURY, F. TINCE and H. STEIL: Stahl Eisen, **101** (1981), p. 685
- 22) A. CHOUDHURY, R. JAUCH and H. LÖWENKAMP: Proc. 5th ICVM (1976), p. 233
- 23) J. RADIĆ, W. HOLZGRUBER, M. ŠVAJGER and J. ŠEGEL: 8th ICVM, **2**(1985), p. 1060
- 24) R. JAUCH, A. CHOUDHURY, H. LÖWENKAMP and F. REGNITTER: Stahl Eisen, **95** (1975), p. 408
- 25) 例えば, A. MITCHELL: Proc. 3rd Int. Iron and steel Congress(1978), p. 695
- 26) 例えば, 藤田利夫: 金属 (1986) 1月
- 27) N. MORISADA, M. KADOSE, I. YOSHIOKA and K. AKAHORI: 10th Int. Forging Conf, Sheffield (1985)
- 28) R. E. NOWLIN, V. K. NANGIA, D. L. NEWHOUSE: Proc. 5th ICVM (1976), p. 213
- 29) A. CHOUDHURY, R. JAUCH, H. LÖWENKAMP and F. TINCE: Proc. 5th ICVM (1976), p. 237
- 30) 阿部良一, 菊間征司, 岡村正義, 広瀬和夫: R-D神戸製鋼技報, **32** (1982) **3**, p. 16
- 31) M. OKAMURA, K. HIROSE, M. KOHNO and A. SUZUKI: Proc. 7th ICVM (1982), p. 1511
- 32) 高野正義, 本庄武光, 木下修司, 鈴木 章: 鉄と鋼, **72** (1986), S582
- 33) K. G. YU, J. A. DOMINGUE, H. D. FLANDERS: 8th ICVM, **2** (1985), p. 1279
- 34) 高野正義, 岡村正義, 山田哲夫, 広瀬和夫, 本庄武光, 青田健一: R-D神戸製鋼技報, **34** (1984) **3**, p. 16
- 35) M. A. HEBBAR, S. KINOSHITA and C. A. NAYLOR: Metal Progress (1982) Sep., p. 42
- 36) 広瀬 豊, 大河平和男, 清水高治, 佐藤宣雄, 平居正純, 西脇 実: 鉄と鋼, **63** (1977), p. 2208
- 37) D. N. POCKLINGTON, J. B. CARTWRIGHT and D. O. LANE: Proc. 6th ICVM (1979), p. 727
- 38) D. LOHR, L. ROHDE: Proc. 3rd Int. Iron and Steel Congress (1978), p. 701
- 39) B. E. PATON, B. I. MEDOVAR, G. A. BOJKO and I. I. KUMISH: 4th Int. Sympo. ESR (1973), p. 209
- 40) G. K. BHAT: 4th Int. Sympo. ESR (1973), p. 196
- 41) B. E. MEDOVAR, V. M. BAGLAI and L. V. CHEKOTILO: Proc. 5th ICVM (1979), p. 195
- 42) B. E. PATON, B. I. MEDOVAR, G. A. BOJKO, L. V. POPOV, S. S. ANTSEFEROV and S. P. EGOROV: Proc. 6th ICVM (1979), p. 872
- 43) A. UJIE: Proc. 6th ICVM (1979), p. 708
- 44) P. MACHNER, G. KÜHNELT, H. JÄGER, E. PLÖCKINGER and F. J. WEISS: Proc. 5th ICVM (1976), p. 223
- 45) E. PLÖCKINGER, STRAUPE, P. MACHNER and F. J. WEISS: Proc. 5th ICVM (1976), p. 227
- 46) P. MACHNER: Proc. 6th ICVM (1979), p. 757
- 47) P. MACHNER, R. TARMANN and B. BISANZ: Stahl Eisen, **102** (1982), p. 805
- 48) M. MEYER, W. MITTER, P. MACHNER, G. KÜHNELT, H. BARG and H. BARTOSCH: 8th ICVM, **2** (1985), p. 1250
- 49) A. RAMACCIOTTI, E. REPETTO, S. BASEVI, M. SCEPI and L. TONI: Proc. 3rd Iron and Steel Congress (1978), p. 706
- 50) S. BASEVI, E. REPETTO and M. SCEPI: Proc. 6th ICVM (1979), p. 773
- 51) 守中康治, 広瀬 豊, 渡辺司郎, 佐伯 毅, 松藤茂行: 日本金属学会会報, **23** (1984), p. 282
- 52) Y. HIROSE, K. MORINAKA and S. WATANABE: 9th Int. Forging Conf. (1981)
- 53) W. AUSTEL and Ch. MAIDORN: Proc. 5th ICVM (1976), p. 241
- 54) W. AUSTEL, H. HEYMAN and Ch. MAIDORN: Proc. 6th ICVM (1976), p. 747
- 55) K. ROSENBAUGH: 8th ICVM, **2** (1985), p. 1240
- 56) Y. V. LATASH, A. E. VORONIN, F. K. BIKTAGIROV, R. G. KRUTIKOV, A. N. FESENKO, YA. M. VASILJEV and V. I. ASTAKHOV: 8th ICVM, **2** (1985), p. 1079
- 57) A. RAMACCIOTTI, E. REPETTO, P. SOMMOVIGO, G. SONGINI: Proc. 7th ICVM (1982), p. 1478
- 58) H. KODAMA, Y. KONDO, K. AKAHORI, E. NIYAMA, C. SHITAMURA and I. YOSHIDA: 8th ICVM, **2** (1985), p. 1207
- 59) W. HOLZGRUBER: Proc. 7th ICVM (1982), p. 1452