

.....  
**技術資料**  
 .....

UDC 669.187.26-982 : 621.746.585

## 最近の真空アーク溶解について\*

朝 熊 利 彦\*\*

### Recent Development of Consumable Vacuum Arc Remelting

Toshihiko ASAKUMA

表 1 真空アーク溶解法の特徴

プロセスの長所	使用者側の利点
耐火材との反応がない。 脱ガスが行なわれる。 非金属介在物を低減する。 化学的均一性がすぐれている。 一方凝固が行なわれる。 マクロ偏析がない。 大型鋼塊が可能。 鋼塊頭部の健全性がすぐれている。	高温靱性がすぐれている。 表面亀裂を減少する。 歩留がすぐれている。 熱間加工性を改善する。 鍛造比が小さくてよい。 大型ピレットが可能。 再現性がすぐれている。
プロセスの短所	使用者側の欠点
高品質の電極が必要である。 成分調整が困難である。 生産性が低い。 設備が複雑である。	電極調整費がかさむ。 電極成分の調整が必要である。 設備費が高い。

表 2 真空アーク溶解の主要な改善

設計の改良  
 2 戻り型式炉  
 戻り冷却系  
 電源の改善  
 電極駆動機構  
 パルス制御法  
 コンピューターによる調整, 制御  
 圧力調整溶解法  
 高電流電磁搅拌

1. 緒 言

真空アーク溶解 (VAR) の発展の歴史をふり返つて見ると金属材料のほんの一部を提供したにすぎないかもしれないがそこに演じられた役割は大きく、航空機、原子力工業、宇宙計画の発達などに欠かせぬものであった。

VAR が高級鋼、高級合金を作る上に有力な手段の一つとしての地歩を築き始めてからまだ 15 年あまりしか経過していないが機械の高性能化に伴う品質向上の要求によつてこの新しいインゴット製造法は今日のような分野すなわちステンレス、耐熱鋼、工具鋼、高張力鋼、タービンブレード材、ジェットエンジン用材料、原子力用材料などに確定的なシェアを占めるに至つた。エレクトロスラグ溶解 (ESR) が世界的に次第に拡大している中であつて今日でもなほ VAR 材が賞用されている。簡単に VAR 開発発展の跡を辿つてみると米国における発展は 4 つに分けられる。まず新しい材料すなわち耐熱 Ni, Co, Fe 基合金, Ti, Zr, Hf, Cb, Mo その他の合金を作る手段として実験研究室の壁を破つた<sup>1)2)</sup>。次いでパイロット・プラントが出現し、金属工業界に輝かしい光を放ち<sup>3)4)</sup>、比較的ゆるやかに成長した。その後の 10 年を第 3 段階として spec が完成され、めざましい発展をとげ、そして現在に至つている<sup>5)</sup>。ヨーロッパにおいては英国で 1956 年に Imperial Chemical Industry および Jessop-Saville Ltd. の両社が米国の設計に基づいて自家製の VAR 炉を建設し、その後 Heraeus 製の炉にリプレイスした。翌年ドイツにも最初の工業炉が建設された<sup>6)</sup>。わが国においても 1953 年に神戸製鋼で Ti の溶解法として研究開発され、特殊鋼溶解に応用することに先鞭をつけ、1958年に第 1 号炉が設置されて以来急速な普及を示した。VAR は工業的に用いられて以来今日に至るまで絶えず材質の向上と価格への苦情がつきまとい、品質、量、価格が VAR に課された問題であつた。本稿ではここ数年における材質、プロセス、設備、経済性などについて VAR の進歩と将来の展望を概説するものである。

### 2. VAR の特徴と最近の諸発展

真空溶解の急速な成長の原因は周知のとおりでその推

進力は主として航空機工業、宇宙計画の要求を満たすために高水準の品質を作ることにあつた。信頼性の高い、再現性のある品質要求がそれほど厳しくなつていふことにほかならない。表 1<sup>7)</sup> は VAR の一般的特徴をあげており、かなりの欠点もある。その欠点を補い、長所をのばす開発が 1960 年代の半ば以後に急速に具体化され近代 VAR 炉は設計、設備、技術およびその作り出す品質に昔の面影をとどめぬばかりに進歩している。プロセス、設備の主要改善を表 2<sup>8)9)</sup> にリストしている。

#### (1) 設備の改良と 2 戻り型式炉

炉のメーカーは炉設計の単純化を行なつた結果、建設費が減少し、工期が短縮され、ユーザーは効率よく、信

\* 昭和47年 8 月10日 (依頼技術資料)

\*\* 関東特殊製鋼(株)九州工場

頼性の高い操業ができるようになった。床面上で炉の本体を移動し、床下にはるつぼを調節する2つの固定ウォータージャケットがあつてこの2るつぼ型式炉は現在のほとんどすべての炉に共通している。約6tまでの中型炉は油圧昇降装置のついた片持梁の旋回式であり、大型炉では2つの油圧昇降装置およびコンベアのついた本体を1つのるつぼからもう1つのるつぼへ移すガントリー型になつている。同時に電源、排気系の切換を迅速に行なつて炉の休止時間を短縮し、最大限に利用するように設計の変更が行なわれている<sup>9)</sup>。

#### (2) 炉構成機構の改善

おもなものは次のようである

ストリンガー (Stringer) シールの改善。

機械的または空圧式スタブ自動締付。

監視装置——閉回路式 TV を備えた。

真空バルブの改善

るつぼ冷却系——溶解中終始一定、均一の冷却状態を維持するようになつている。

#### (3) 電源の改善

Ge および Se 整流器は Si 整流器に代わり、現在も広く用いられているが今日の新しい設備には固体素子整流器が用いられている。また SCR 制御により可飽和リアクタの応答速度は更に迅速となり 1% 以内の電流制御ができるようになった<sup>10)</sup>。

#### (4) 電極位置の調整機構

再現性のすぐれた、高品質のインゴットを作るには溶解中正確な制御によつて溶解状態を一定に維持することが肝要である<sup>10)</sup>。これには電極駆動機構および電極先端とプール間の距離を精密に制御することが最も重要な要素である。二重差動ギヤーとボールねじの組合せは電極駆動機構に課される要素をほぼ完全に解決することになつた<sup>11)</sup>。次にアーク長制御について古くから用いられていた方法はアーク電圧降下を既知の電圧と比較するアーク電圧制御である。この制御法は簡単でかなり信頼性はあるが制限も多い。アーク電圧はアーク長だけでなく、圧力の変化、金属蒸気の密度、グロー放電、磁場のような因子に影響される。電圧制御法ではこれらの干渉を打消すために手動また自動で補正を行なうが高水準の宇宙計画用材料の溶解を完全に行なうことができなくなつた。新たに幽霊短路制御 (Phantom short circuit control) とかアーク・プラズマ制御あるいは hash control に基づくプラズマ制御法が開発された<sup>9)11)12)</sup>。これによつて圧力変化、磁場の影響を受けず、グロー放電をごく短時間に検知し、自動的に修正するとメーカーは主張している。

#### (5) 操作の自動化

操作を単純化し、操業の部分的または全自動化がかなり進んでいる。リークの自動点検、アークの自動着火系および自動排気系などが最初に導入され、次いで冷却水

システムの自動化、電流プログラム調節が行なわれ、溶解工程は時間と電極消耗を函数としてプログラムコントロールされる。しかしこの電極消耗は電極重量ではなく電極の降下距離または速度に基いているので全溶解工程の完全自動化を行なうには信頼すべきロードセル秤量系の開発が必要である。ホットトッピングの開始および溶解の終了は今でも手動で行なわれる。すべての主要な炉操作を制御し、溶解中の電流、アーク長基準値の設定、圧力の変化に必ずずるパンチ・カード・コンピュータ・システムは多年の夢である<sup>9)</sup>。最近では部分的にコンピュータシステムが採り入れられている。

#### (6) 磁場の適用

攪拌コイルがプールの回転を防止し、凝固パターンの調整に使用されている。攪拌コイルは最初活性金属の溶解に用いられた。一次溶解インゴットの成分を均一にするためプールを攪拌し、アークを集中するためであつた。その後耐熱鋼その他のインゴットの鑄造組織を調整する目的で同様の装置が用いられた。しかし一方向磁場はしばしば年輪状偏析などの冶金学的欠陥を発生させた。ために鋼溶解には攪拌コイルは無用の長物化していたが磁場の方向を周期的に逆転させることによつてプールの回転を除くことが発見された<sup>13)</sup>。るつぼの軸に平行に磁場を正逆交互に作用させるとプールが浅く、フラットになり、一般にインゴットの肌がきれいになる<sup>11)14)16)</sup>。磁場の強さ及び回転数を正しく選択することによつてアークは安定し、鑄造組織の結晶粒調整が行なわれる。また鋼るつぼは不規則な外部からの磁場を遮蔽し、プールの回転を緩和し同様の効果をあげた<sup>17)</sup>。プールの回転防止のもう一つの方式は正反対に向き合つた2つのコイルから同時に磁場を作ることによるものである (Consarc 社開発)。この方法は遠心分離力が発生しないで攪拌と混合が行なわれ、溶解電流によつて生ずる磁場を打消すというものであるが実際の効果については発表されていない<sup>8)</sup>。最近行なわれた改善、開発の主なものとはざつと以上のようなものであるがそれらが材質の面に、プロセスに、経済性に顕著に現われ VAR 技術がほぼ完成の域に達している。

### 3. 材質の改善と問題点

真空溶解材の大量消費時代を迎えたのは真空溶解炉でしか得られないメリットがあるためで多くの国々で15年前頃から VAR 法を積極的に採用されるようになった。真空溶解した材料は当初は単に O, H, N などの材料に有害なガスを除去したものと考えられていたが有害ガスを単に少なくするというだけでなく次第に材質面の要求 (たとえば化学組成、清浄性、熱処理加工など) が厳しくなつてきた。VAR はこれらの要求に答え靱性、疲労、衝撃値のような機械的性質を改善した。たとえば Waspaloy の 100 hr テストのストレス・ラプチャーで初

表3 AISI52100の疲労強度

プロセス	研究者	疲労強度, $\pm t/in^2$	
		$2 \times 10^6$ 繰返数	$100 \times 10^6$ 繰返数
塩基性電気炉	Moore	43	39
	Frith(1)*	40.5	38
	Child(8)	46	38.5
酸性平炉	Frith(2)	51	44.5
	Child(2)	54.5	—
中性平炉	Frith(1)	58	51
酸性高周波	Frith(2)	46.5	41
VIM	Moore	63	58
	Child(1)	59	53
VAR(塩基性電気炉電極)	Child(3)	52	48
VAR(酸性平炉電極)	Child(2)	62	58

\* 括弧内は溶解数

期のものを50%向上するといったように耐熱鋼の進歩、軸受鋼の寿命改善その他に貢献している。これらの品質の改善は最近ではインゴット組織の改善によるところが大きいとされ、その方面の研究が多く見られるようになった。しかしそれらの理論はまだ完全とは言えず問題点の解明が望まれる。

同時に最近ではエレクトロンビーム溶解法(E・B法)、ESR法との競合が問題になりつつあり追究が急がれる。

### 3.1 耐熱材料の進歩

耐熱材の最近の進歩はめざましく蒸気タービン、化学工業の高温高压装置、1000°Cを越えるジェット・エンジン、3000°C以上のロケット・エンジンの燃焼室などは長時間に亘って高応力に耐える材料を要求する。宇宙開発の分野では少なくとも1300°C以上の超高温で、ある程度の強度を維持する構造材料が必要である。VARは元来高融点金属の溶解法として発達してきた。溶製法はすべての材料に対してその生れを決定する最も重要な問題である。材料の強度だけでなく成形加工性にも大きく影響し、ひいては信頼性をも左右しその意味でVARは高級材に最も適した方法と言えよう。米国ではNi基耐熱合金がVARによつて多量に作られている。その発展は主要強化元素であるAlとTiの多量添加を可能にした真空溶解の進歩に基づくものであるが成分の調整、品質改善のため初期にはシングル・メルトであつたが次第にダブル・メルトがスタンダードとなつてきた。ダブル・メルトはコストはかかるが清浄度、成分偏析、機械的性質を調整するために真空誘導溶解(VIM)、次いでVARを行なう方法がとられている。近年VARのため

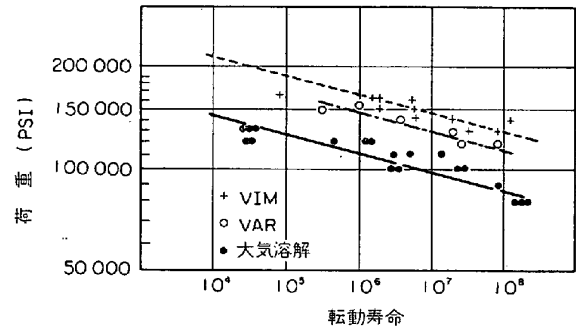


図1 SAE 52100鋼の転動寿命試験結果比較

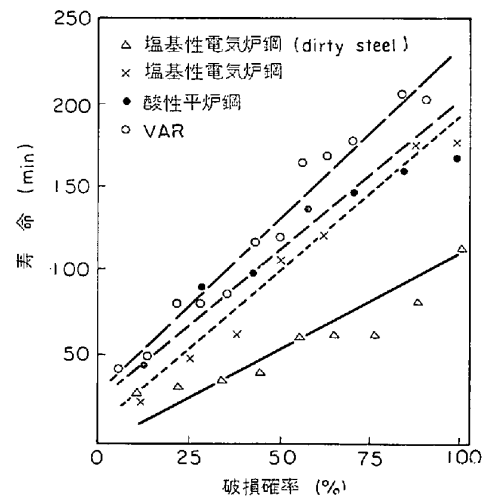


図2 AISI 52100の疲労試験

に精密な成分および純度のすぐれた電極を作るよう15t以上の大型VIM炉が多数建設された<sup>9)</sup>。

### 3.2 疲労強度の改善

厳しい用途にVARが信頼されている根拠の一つは疲労強度と清浄度のすぐれていることである。その代表的な用途は軸受であるが初期にはVARによつて寿命が2倍以上になると言われていた<sup>18)19)</sup>。その一例を図1に示している。また図2<sup>20)</sup>、表3<sup>21)</sup>に見られるように軸受鋼の疲労試験におけるVARの改善はさほど顕著なものではないという報告がかなりあつた<sup>18)~20)</sup>、<sup>22)~25)</sup>。しかし現在では脱ガス処理をした軸受鋼(AISI 52100)は10%破損寿命( $B_{10}$  life)が大気溶解材の2~3倍長<sup>26)~33)</sup>(図3)、50%破損寿命( $B_{50}$  life)で2倍になっている<sup>28)29)31)34)</sup>。 $B_{10}$  lifeは実用上重要視されるもので最近のVAR材では $B_{10}$  lifeは6倍になり<sup>26)</sup>、中には大気溶解材の10~15倍にするという報告もある<sup>27)</sup>高温用軸受鋼M50についても同様の改善が示されている。General Electric社のFlight Propulsion Div.においてM50の転動疲労寿命試験が行なわれ、表4は大気溶解6、VIM10、VAR14ヒートの159サンプルの結果である。またFafnir Bearing社は転動疲労試験によつて真空脱ガスAISI M50とVAR M50を比較し、VARは前者

表 4 M50 軸受鋼の転動疲労試験

寿命 (Weibullplot)	大気溶解 6 ヒート	VIM 10 ヒート	VAR 14 ヒート
B <sub>50</sub> (50%破損率) 改善率	6 400 000	7 300 000 14%	10 500 000 64%
B <sub>10</sub> (10%破損率) 改善率	1 600 000	2 050 000 28%	3 000 000 94%

M50—0.80C, 0.30Mn, 0.20Si, 4.00Cr, 4.25Mo, 1.00V.

表 5 AISI52100 インナー・レースの疲労寿命におよぼす多段真空アーク溶解の影響

プロセス	B <sub>10</sub> life(10%破損率)	B <sub>50</sub> life(50%破損率)
大気溶解	21.7 × 10 <sup>6</sup>	128 × 10 <sup>6</sup>
1 次溶解	38.0 × 10 <sup>6</sup>	208 × 10 <sup>6</sup>
2 次溶解	60.0 × 10 <sup>6</sup>	230 × 10 <sup>6</sup>
5 次溶解	77.0 × 10 <sup>6</sup>	310 × 10 <sup>6</sup>

の B<sub>10</sub> life を 3 倍増加することを示した<sup>35)</sup>。疲労性質を改善するには再溶解を繰返すことおよび溶解法を組合せて清浄鋼を作る方法があり、現在広く行なわれている。表 5 は AISI 52100 の多段真空アーク溶解の疲労寿命におよぼす効果を示す<sup>35)</sup>。B<sub>10</sub> life は一次再溶解により大気溶解材は 1.7 倍に、2 次再溶解によつて一次再溶解材は 1.6 倍、大気溶解材の 2.3 倍になり、5 次再溶解により大気溶解材の 3.6 倍、一次再溶解の 2 倍に改善される。なおこの大気溶解材に対する B<sub>10</sub> life 21.7 × 10<sup>6</sup> cycle は AISI 52100 の標準 B<sub>10</sub> life の 2 倍以上であった。

3.3 インゴット組織の改善

開発の初期からかなり長い間 VAR による品質の改善は主としてガスおよび蒸発金属の除去、るつぼとの反応がない非金属介在物が少ないなどのためであると信ぜられていた。しかし最近ではむしろ VAR によつて凝固組織が改善されるからとされ<sup>36)</sup>、VAR 凝固に関する理論が盛んになつてきた。同時に凝固組織を改善するプロセス、設計、設備に種々の新しいアイデアが生れ宇宙開発材料その他に大きく貢献している。

3.3.1 プール・サイズの研究<sup>37)~42)</sup>

VAR の溶解プロセスを解明し、制御するために 1960 年代の初め頃からプールサイズの研究が行なわれ、これを基に凝固制御の parameter が追究されている。プール・サイズ、形状はインゴットの肌、健全性、成分の均一性のようなインゴットの性質に影響し<sup>10)</sup>、場合によつては結晶粒、熱間加工性にも影響する、プール深さに及ぼす因子は主として次のようである。

- (1)溶解電流——溶湯プールの深さは溶解電流に比例する。
- (2)電極の直径——小径電極は大径電極より深いプールを作る。
- (3)磁場——溶解速度を減少し、プールの深さを浅くする。

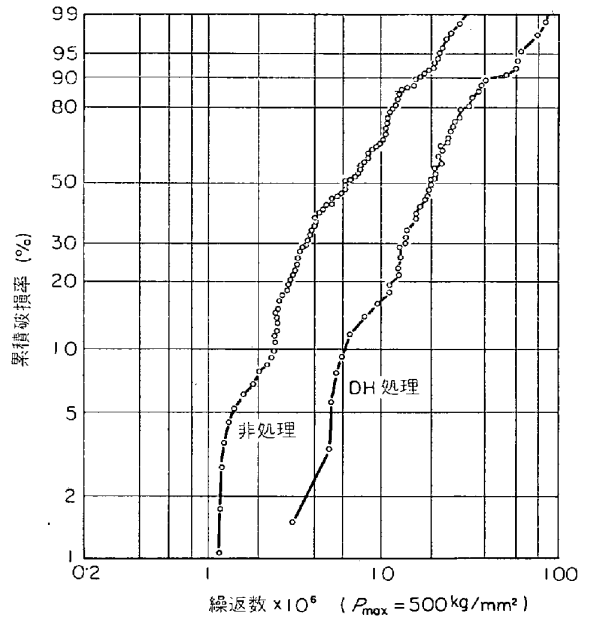


図 3 SAE 52100 の DH 処理による疲労寿命の改善

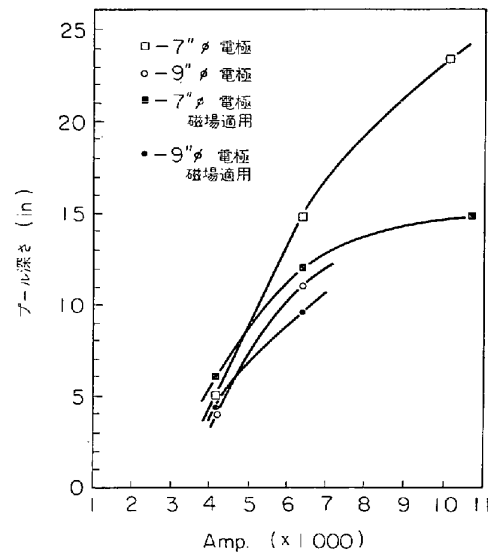


図 4 溶解電流とプール深さの関係

図 4 にこれらの状況を示している。また凝固速度は溶解電流が大きいほど速く、プールの凝固に要する時間は鋼塊の径の大きいほど大きい。このようにしてプール・サイズ、形状はアーク条件によつて変化するのでアーク長を御制するのが高品質の材質を作る重大な要因であることが明らかにされた<sup>11)36)</sup>。

3.3.2 Freckle

VAR には普通鑄造法によるインゴットに生ずるパイプ、収縮孔、地きずなどの欠陥はないが VAR 特有の新しい欠陥を生ずる。第 1 は非金属介在物で汚染された異常な表面層であるが、これは歩留を犠牲にすれば表面旋削によつて解決できる。第 2 は層状凝固組織の生成で年

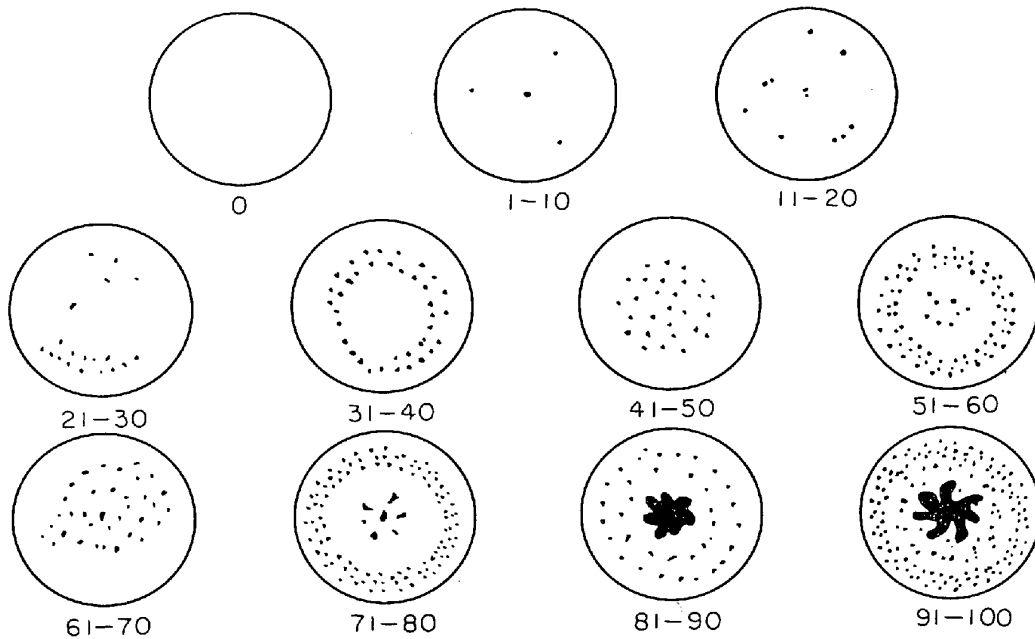


図 5 Freckle 標準図 (数字は強さを表わす)

輪状偏析 (tree-ring, ring-segregation), 斑点状偏析 (freckle, spot, spotty segregation) と呼ばれるものである。freckle について最近ではかなり解明され、同定、原因、発生機構、対策などについて論議されている。しかしまだ不明の部分が多い。

#### (1) 性状

freckle は VAR インゴットに見られる不連続、棒状の偏析で VAR 大型鋼塊断面の中間帯にしばしば見られる<sup>4)16)43)</sup>。直径を増すにつれて freckle の傾向は強くなるが 250 mm  $\phi$  程度の比較的小さい鋼塊にも見られる<sup>44)</sup>。オーステナイト系合金、A-286, 718 などの Ni 基合金、高炭素工具鋼は特に敏感である。C, Si, Mn, O, S その他鋼の合金成分が局部的に富化され、マクロ腐食により空孔を形成する点状偏析であり<sup>45)</sup>、大型ビレットでは不明瞭であるが小型ビレットに加工が進むにつれて明らかになる<sup>17)</sup>。横断面のマクロ腐食で指先位の大きさ、縦断面では縞状に現われ、6~8 in 程度の長さになることもある。freckling と帯状組織 (banding) の間に関連性があるかという疑問が持たれるが必ずしも関連はなく banding には濃度勾配が比較的小さく、freckle にはきわめてはつきりした成分の違いがある。freckle は一般に VAR インゴットの中間帯に見られ、banding は freckle に比べて大きいなど banding とは異なるものである。

#### (2) 同定

freckle については一定の標示法がなく研究者によって独自の測定が行なわれている。図 5 はその一例である<sup>4)</sup>。PRESTON<sup>4)</sup>、GOULD<sup>43)</sup>、SMELTZER<sup>46)</sup>、COOPER<sup>47)</sup> は A-286 の freckle について合金元素が富化された低融点成分のポケットであることを認め、SPITZER<sup>ら</sup><sup>48)</sup> は H-

11, M-2 について同様の観察を行なっている。Crucible Steel 社<sup>17)</sup>で低合金鋼、軸受鋼、高 Ni オーステナイト系 Fe 基超合金などについて行なつた観察では成分の相違を認めず、マイクロ硬度も変化はなかつたというやや異なつた報告もある。

#### (3) 原因、発生機構、対策

freckling は溶湯プールの回転、攪拌がその原因であることは古くから認められ<sup>4)6)11)13)16)17)20)43)45)49)50)55)</sup>、磁場を適用すると溶融プールの回転運動が激しくなる。それは垂直磁力線が融解材料を流れる電流線に作用して材料を動かすような運動力を生ずるからである<sup>41)</sup>。ESR においても磁場を適用すると VAR 同様 freckle を生ずる<sup>45)48)56)</sup>。しかし VAR においては攪拌コイルを適用しない場合でも 3~1/2 rpm 程度の回転を生ずる<sup>4)51)</sup>。これは溶融電流の導入による磁界の影響と見られ、またアークが溶融プールとなす角が直角でないこと (打撃効果) によるとされている<sup>11)50)</sup>。溶湯の回転、アーク電流の変動 (グロー放電も含まれる)、熱的不安定などによつて凝固状態が変わるために偏析を生ずる<sup>6)13)45)49)</sup>。中でもアーク電流にきわめて敏感で<sup>17)21)</sup>、電流が高くなればプールは深くなり freckle の傾向は強くなる。対策として ①溶湯の運動を制御すること<sup>43)50)</sup>、②溶解電流が非対称に導入されると回転の原因となることが指摘され<sup>45)57)</sup> プスパーを対称にして送電すれば防止できる<sup>11)</sup>。③プールを均一に加熱すること<sup>11)36)</sup>、④るつば周囲の方向可変磁界によつて解決される<sup>4)11)14)15)16)50)</sup>。磁界の方向転換は毎秒 1/10~5 回が最適である<sup>11)50)</sup>。また 1 サイクル 2 min、磁場の強さは合金により 0.5~5 gauss/amp がよいとも言われる<sup>16)51)</sup>。⑤ 3 極炉の使用<sup>47)58)</sup>、表 6 は 3 極炉で溶解

表 6 D-6 円盤の Freckle 等級

溶解番号	ホット・トップ	中央部	底 部
3E26	A, A, A	A, A, A	A, A, A
3E28	—	1.5, 1.5, A	1, A, A
3E33	A, A, A	A, A, A	A, A, A
3E35	—	A, 2, A	A, 2, A
3E38	A, 2, A	—	A, 3, 1

一枚の円盤について3箇所測定, 中心, 中央, 端の順に表示.  
A, 1, 2, 3, 4, 5, 6の順に強さを増し, 4~6は級外.

したD-6インゴットについての freckle 状況を示している。12の円盤の中で6は freckle がなく、残りには多少 freckle があつたが大抵の用途には差支えない程度の軽微であつた。3極炉では単極炉の安全圏を越えた溶解速度でも(2350 lb/br) freckle を発生し難い。3極炉では熱分布が均一になるためである。なお種々のつぼサイズにおける最大溶解速度は表7に示される<sup>10)</sup>。偏析、組織不均質、収縮孔はここに示した溶解速度を越えると発生しやすくなることが経験的に見い出されている。⑥鋼つぼの使用<sup>9)17)</sup>—U.S. Patent 3, 213, 495. 銅つぼの場合より20%程度電流を増加しても freckle を発生しない。不規則な外部からの電磁力を遮蔽し、プールの運動を少なくするためと言われている。など種々の対策が考えられているがまだこの問題は完全に解決されたとは言えない。

3.3.3 結晶粒調整

電磁攪拌, 超音波振動, 一方向凝固のように外部からの手段によつて可能なはずである。興味深いのは超音波振動を与える方式で鋼, Fe, Ni 基超合金のように低融点材はある程度成功した<sup>36)99)60)</sup>。しかし大型鋼塊に必要な大きなエネルギーが得られないため商業的には用いられない。また耐熱金属には適切な方法が開発されていない<sup>10)</sup>。

3.4 VAR における反応の不特定因子

VAR における高温, 低圧は種々の反応を促進する。しかし系内に圧力, 温度の変化があり, 動的な系を形成し VAR に関する溶解および凝固理論を複雑にし, 解明は十分とは言えない。溶鋼からのサンプリング, 溶湯プールの测温, プール直上の圧力測定などがむずかしいことに原因している。

3.4.1 圧力

VAR の操業圧力は一般に  $10^{-2} \sim 10^{-3}$  Torr というこ

とになっている<sup>10)</sup>。しかしアーク・ゾーンはかなり圧力が高いはずでアーク・ゾーンは  $10^{-1} \sim 10^{-2}$  Torr より低圧は存在しない<sup>62)63)</sup>。るつぼ上で  $8 \times 10^{-4}$  Torr のときアーク中心では 3 Torr である<sup>64)65)</sup>。真空タンク内の圧力が  $10^{-2}$  Torr であるとしてもアーク・ゾーンは約10倍である<sup>66)</sup>などの測定がある。また GRUBER<sup>62)</sup> は Ti スポンジ溶解中真空タンク上部で  $10^{-2}$  Torr のときアーク・ゾーンは 0.5 Torr であることを見出し, JOHNSON ら<sup>67)</sup>は鍛鋼およびアームコ鉄を溶解中真空タンク内の圧力が  $10^{-2}$  Torr, アークゾーンの圧力は 5~10 Torr と測定した。このようにして溶解中発生するガスの変化によつてアークゾーンの圧力が変化し, さらにるつぼの長さ, 電極とるつぼとの間隙などによつて真空タンク内の圧力が変化する。従来, 分圧の代わりに全圧を用いて論じられていたが零囲気中のガス分析ができるオメガトロン質量分析計が開発され<sup>68)</sup>かくして VAR 中の反応を動力学的に考察するのに役立つ, ガス相を追跡することによつてプロセスの制御に寄与するであろう。

3.4.2 温度

VAR 中溶湯の温度を測定するのは非常にむずかしい。アークを通して溶湯プールに適用できる熱電対がないからである。初期にはアークプラズマは約 5000°K, アーク直下の鋼浴温度は 2700~4700°C と言われ<sup>69)</sup> 鋼浴の平均温度は溶融点より 200~300°C 高いと考えられていた<sup>70)</sup>。しかし VAR では最大 50°C の過熱であることが明らかにされた<sup>71)</sup> (図6)。

3.4.3 消耗電極

前述の表3に見られるように電極の製鋼法によりVAR鋼塊の性質に大きな相違を生ずる。塩基性電気炉鋼では  $10^6$  サイクルの疲労強度が  $\pm 38$  t/in<sup>2</sup>, 平炉鋼では  $\pm 44$  t

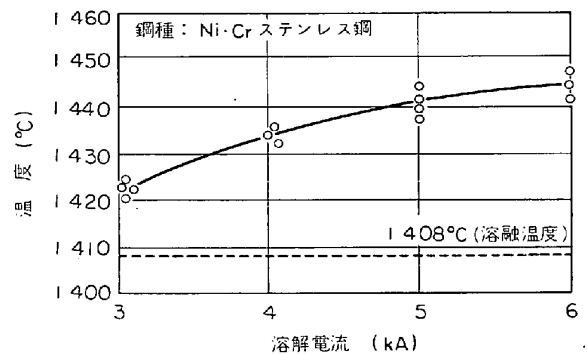


図 6 溶鋼温度と溶解電流の関係

表 7 最大溶解速度

材 質	最大溶解速度 (16/hr)			
	るつぼ直径14''	16''	20''	30''
超合金 (Fe, Ni 基)	300—400	350—500	400—600	1 000 以下 2 000—3 000
高張力鋼	400—500	450—600	600—750	
Ti 合金			1200—1500	

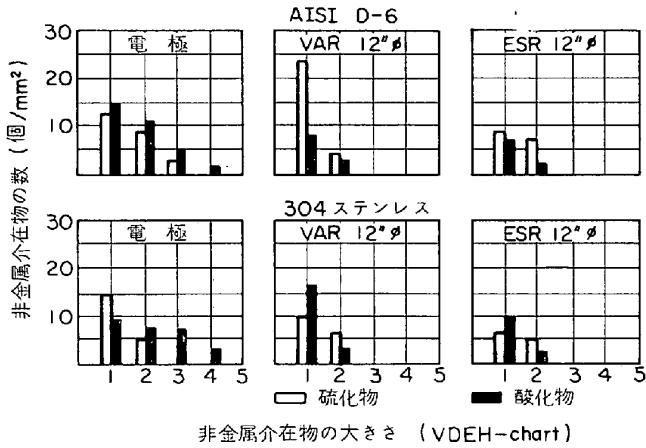


図7 VAR と ESR の非金属介在物の比較

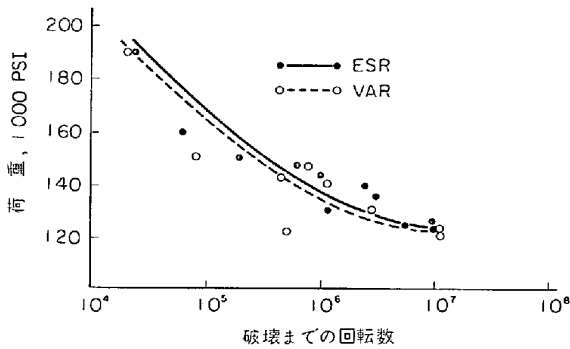


図8 VAR および ESR H-11 の疲労強度

/in<sup>2</sup> である。塩基性電気炉鋼を電極とした VAR では ±48 t/in<sup>2</sup> で中性平炉鋼, VIM より低く, 酸性電気炉鋼を電極としたとき ±58 t/in<sup>2</sup> となっている。また高炭素鋼溶解の際しばしば遭遇されるブローホールの問題は電極の脱酸法によつて防止される<sup>6)72)</sup>, 電極の製鋼法, 脱酸法, 非金属介在物が VAR 後といえどもインゴットの性質に影響を与え, VAR の初期から電極品質の重要であることに変わりはない<sup>6)50)73)</sup>。

3.5 ESR との比較評価

初期には当然のことながら大気溶解材に対する VAR 材の機械的性質をはじめ品質, 諸試験結果が多く発表され VAR 材の優秀性が確認された。現在 ESR はかつての VAR のように急速に発達してきた。1958 年からソ連で高級鋼の工業生産が始められたと言われるが米国ではすでに 1937 年に Kellogg 社において工業化されており, Hopkins 法, あるいは Kellogg 法と呼ばれ Firth Sterling 社が独占的に研究開発を進めていた。しかし米国では本法の発展は VAR 法の著しい進歩のために影のうすい存在であった。米国で ESR 法があまり発展しなかつたのはフラックスを単に電極の汚染を防ぐものとしか考えなかつたためである。あるいは不純物が多かつたとも言われる<sup>74)</sup>。ここ数年 ESR は急速な発展をとげつつあり, 両プロセスのポテンシャルを論議する比較評価が盛んになつてきた。介在物に関して図 7<sup>42)</sup> の例に示す

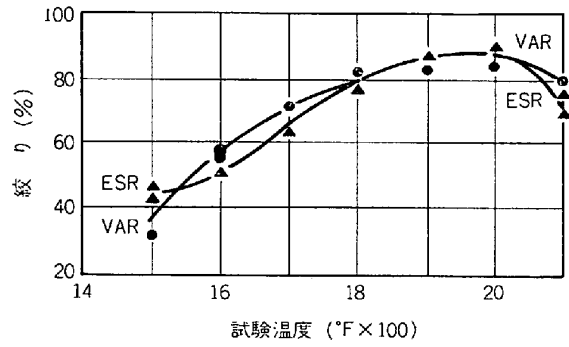


図9 U-700 の熱間靱性, strain rate 1 in/in/sec

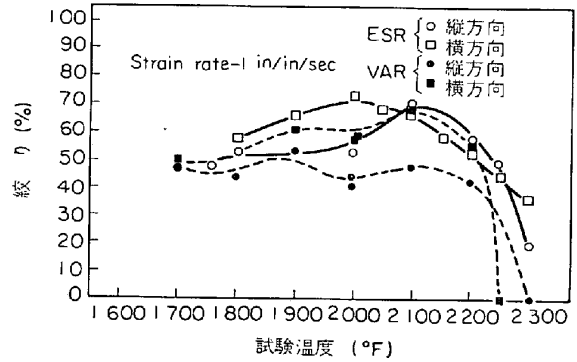


図10 Hastelloy の熱間靱性

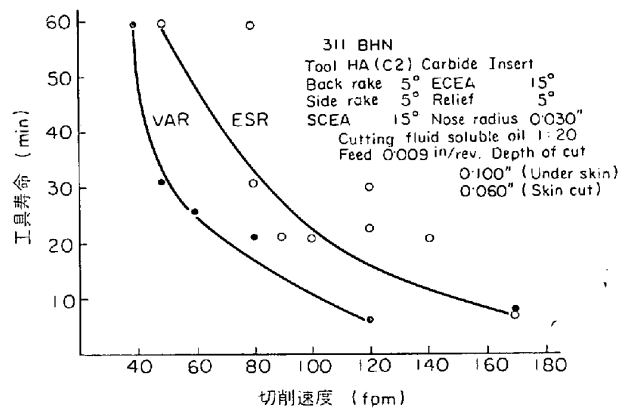


図11 VAR および ESR Waspaloy の被削性

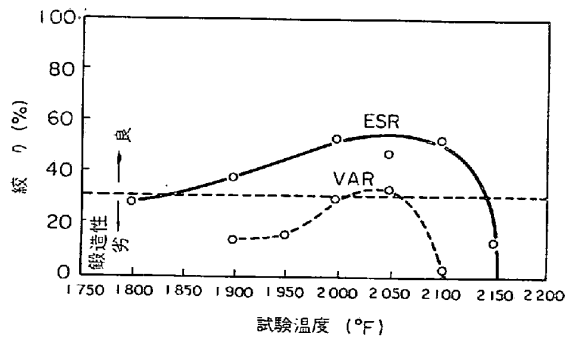


図12 U-700 の Gleeble 熱間靱性

ように ESR のほうが概して良好である<sup>56)75)</sup>が ASTM E-45-61 のように 厳格な規格を満足しえないと言われ

表 8 AISI H-11 の機械的性質の比較

再溶解	S %	引張強さ (kg/mm <sup>2</sup> )		衝撃値 (kgm/cm <sup>2</sup> )		伸び (%)		絞り (%)	
		中心	端	中心	端	中心	端	中心	端
VAR	0.009	142	143	28	30	10.3	9.6	32.5	31.4
ESR-DC	0.009	140	141	34	38	9.1	9.5	29.0	29.5
ESR-AC	0.003	143	146	42	40	9.0	9.0	29.0	31.9
ESR-AC 3相	0.003	143	146	43	41	8.8	9.5	30.7	32.5

650φ→200□に加工後に測定

表 9 溶接試験結果 (Waspaloy)

材 料	マイクロクラックの数	マイクロクラックの全長 (in.)	マイクロクラックの最大長さ (in.)
ESR VAR	0 0	0 0	0 0
ESR VAR	3 6	0.165 0.300	0.065 0.130
ESR VAR	2 6	0.210 0.515	0.110 0.136
ESR VAR	7 10	0.565 0.825	0.145 0.170

原表面下 0.010 in. を腐食研磨.

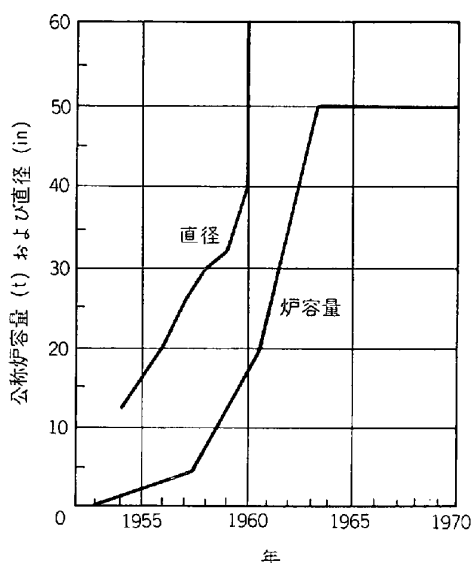


図13 米国における VAR 炉容量および直径の変遷

る<sup>76)</sup>。機械的性質はほとんど差は認められない(表8)<sup>42)</sup><sup>56)77)78)</sup>疲労強度は大体拮抗している(図8)<sup>76)79)</sup>。破壊靱性は両者はほぼ等しい<sup>80)81)</sup>。熱間加工性については大きな相違はないとするものもある(図9)<sup>82)</sup>。がESRによる改善を認めるものが多く、とくに高温においてすぐれている<sup>42)75)83)</sup><sup>88)</sup>(図10)。また図11~12, 表9に示すように被削性<sup>74)76)</sup>、溶接性<sup>74)76)79)</sup>、鍛造性<sup>75)81)</sup>はESRがすぐれている。などの研究発表があり総合してVAR材より品質はいく分劣るとするものもある<sup>89)</sup>が品質水準

は大体同じ<sup>42)90)</sup>と見て差支えないようである。

#### 4. プロセスの技術革新

従来の操業法に種々の改良が加えられた。最近現われたプロセスの革新をのち述べる。

##### 4.1 炉容量の増大

1950年代の初期には超合金、耐熱鋼は主としてVIMによつて供給されていたが普通鋼塊鑄型を用いていたため偏析の問題が残り、高級鋼の大量生産をはばんだ。そしてこれはVARに幸いた。VARは元来活性金属および耐熱金属の生産に始められたプロセスであつたが鋼品質を改善し、信頼性の高い鋼材を与える溶解法として1957年頃から急速な発展をとげた。図13はVARの米国における成長を示すものである<sup>5)7)21)91)</sup><sup>94)</sup>。特筆すべきことは1960年頃ミサイル計画が進められるやそれまで30inφ, 10tくらいの鋼塊が最大のものと考えられていたがAllegheny Ludlum, Universal Cyclops, Crucible Steel, Latrobe Steel社など12社が40inφ, 25t級の炉を建設し始め1962年にはMidvale-Heppenstall社に世界最大の60inφ, 50t炉が出現した。図14は設置台数の変遷を示すもので<sup>5)12)27)95)</sup>この15年間に平均年10基以上増設したことになり現在170基前後となっている。(実験研究用の炉は含まれていない)。表10は生産能力を示すものである<sup>5)6)10)27)94)</sup><sup>103)</sup>。生産量ないし能力は正確に把握されていないが市況の危険性、販売問題があつたにもかかわらず生産能力を増加して行なつた。しかし需要は1/2以下であると言われる。英国においてはVAR材は米国同様主として航空機エンジン工業ではあつたが成長のパターンは米国がNi基合金であ

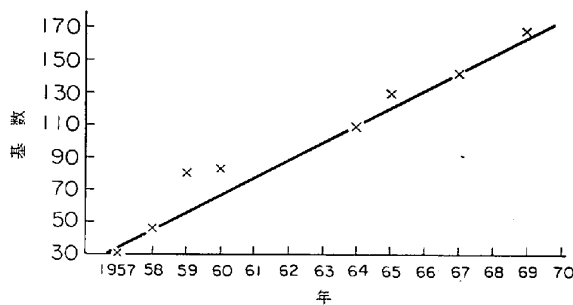


図14 米国における VAR 炉稼動の変遷



表 10 米国における VAR 生産量 (t)

	1955	1957	1958	1959	1960	1964	1964	1969
能力		22 500 11 800	38 600	45 000	57 000 65 000	146 700	200 000	220 000
生産量	5 000						50 000	135 000

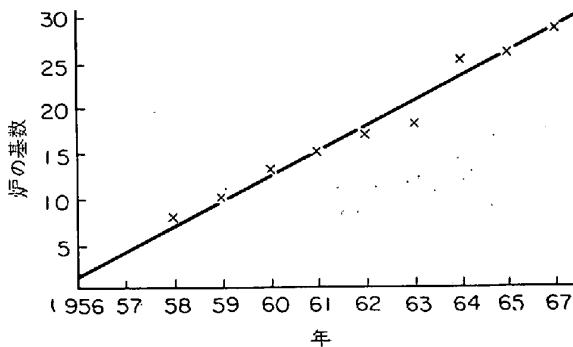


図 15 西欧における VAR 炉の変遷

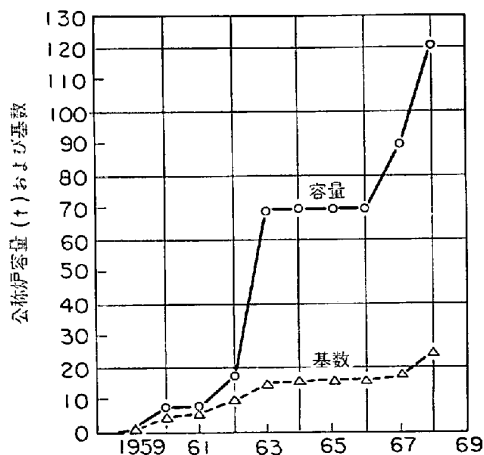


図 16 国内 VAR 稼動の変遷

つたのと異なり 11% Cr マルテンサイト系の分野に始まった。最近では英国においても VAR 用電極を作るために大型 VIM 炉を建設し米国のパターンになっている。

図 15 は西欧における VAR の進歩の過程が図解され、年平均 3 基 (約 10 000 t) が増加している<sup>6)</sup>。1957 年には能力 3 500 t であったが<sup>104)</sup>1967 年には 90 000 t となっている<sup>6)</sup>。日本における VAR の発展は図 16<sup>105)</sup>に示すように 1962 年から 1963 年にかけて著しく増加し、その後 3~4 年間停滞を見せたが 1967 年に至つて再び伸張が始まり現在は伸び悩みの状態である。

#### 4.2 生産性向上<sup>106)</sup>

初期において炉の操業率は 40~50% できわめて生産性の乏しいものであった。1960 年代に入り生産量の増大、溶解休止時間の低減、整備を迅速容易にする方向に

進んだ。そのおもなものは

(1) 炉体回転式——代表的なものは Universal Cyclops 社。

電極の取付、取外しの際炉体を回転し迅速に行なうもの。

(2) 炉体切換式——代表的なものは Carpenter Steel 社。

2 つの炉体に対し共通の電源、排気系を使用し炉の溶解が終わり次第切換を行なつて、もう 1 つの炉の溶解を始める。

(3) 炉体移動式——代表的なものは Latrobe Steel 社。

溶解が終わると起重機によつて電極駆動装置のついた上部本体をもう一つの溶解場所に移して溶解を始める。

(4) るつぼ回転式——Heraeus 社の設計

溶解の終わつたるつぼを降下旋回して取外しインゴットは上部に零空気保持のバルブのついたキャップによつて完全に冷却し酸化されない健全なインゴットを作る。その間もう一つのるつぼを取付け溶解を行なう。

(5) 大型化

生産性の向上とコストの低減を計るため各社が競つて大型炉を作る方向に向つた。しかし VAR は長い溶解時間を要する。安全最大溶解速度は 1 t/hr と言われ、1 t 鋼塊の全溶解工程はおおよそ 4 hr、15 t 鋼塊になると 20 hr、60 in  $\phi$   $\times$  50 t では溶解に 38 hr、溶解終了後 5 hr 真空を維持し、35 hr 後に鋼塊を引抜くと言われる<sup>107)</sup>。したがつて生産性は普通電気炉のように炉容量に比例して増加しない。これは再溶解炉に固有な特徴である。以上のように多くのアイデアが現われたが生産性向上に決定的な効果は現われなかつた。

(6) 2 るつぼ型式炉と自動化

60 年代の後半になり建設費の低減 (20~30%)<sup>12)</sup>、建設期間の短縮 (1/2)<sup>12)</sup>、を計るため設備の設計をスマートにし、自動化、省力化を取入れて 2 るつぼ型式の炉が多くなつた。——Consarc, Lectromelt, Heraeus 社が製造している。これにより溶解時間 4 hr 程度の小型炉では炉の操業率は 70~90% に上り、30 hr 程度の溶解時間を必要とする大型炉では 94~98% の操業率となり、1 炉の操業に数人の作業員を要していたものが 1 人で 4 炉を管理し、操業を制御し、一方数人の作業員が専門に電極、鋼塊、るつぼの準備をし生産性が飛躍的に向上し



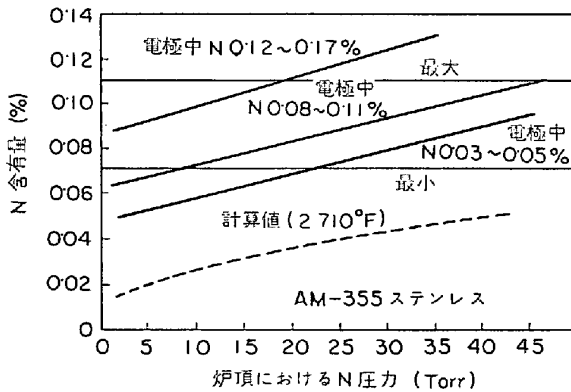


図18 電極中N量および炉頂圧力と鋼塊N量の関係

圧力ではないので次式のような修正が必要である<sup>114)</sup>。

$$\log_{10} MZP = 1.04 + 0.56[\log_{10}(HP+1)] + 3.9[N]$$

MZP: メルト・ゾーン圧力 (Torr)

HP: 炉頂圧力 (Torr)

N: 電極のN含有量 (重量%)

ただし個々の炉については経験的にさらに若干の modify を必要とする。図18はAM-355 (C 0.130, Mn 1.00, Si 0.35, Cr 15.50, Ni 4.25, Mo 2.75, P 0.02, N 0.07~0.11) のVARを行なう際の圧力、電極N含有量、VARのN規格の関係を示したものである。

#### 4.7 電算機による計画と制御<sup>117)119)</sup>

溶解に必要な操業条件およびその変化を電算機プログラムに割当てることによつて10炉までを1人で操業できるようになった。電極および鋼塊処理、るつぼの清掃などの作業は他の作業員が行なう。油圧または機械的クランプ装置によつて電極の着脱は数秒間で行なわれ、漏洩自動探知、アーク自動着火を経て自動溶解操業に入る。圧力、電流、電圧、パルス速度、攪拌コイル電流のような変数はパンチカードによつて溶解工程中自動的に制御される。アークのスタートは電算機に計画された電圧制御方式に従つて行なわれ、プールができると自動的にアーク・パルス制御方式に切換えられる。現在ホット・トッピングのスタートは電極の位置を定めておいて行なうがロード・セルがあまり正確ではなく手動に依存し、全工程の電算機化は研究段階である。

#### 4.8 水冷鑄型の発展

水冷銅るつぼが冶金学的進歩に果たした役割は大きい。この水冷銅るつぼの歴史は古く1940年にKellogg社が初めて用いたと言われる<sup>115)</sup>。水冷銅るつぼをVAR法に結び付けたのはClimax Molybdenum社が初めて以来VAR法の発達によつて多くの経験を積んだ。将来特殊溶解法の容器として水冷銅るつぼは種々の熱源を利用していろいろな方面に普及していくであろう。数例をあげると次のようである。

##### (1) オープン・アーク法<sup>116)</sup>

VARは通常操業圧力は $10^{-3}$  Torr前後と表現されて

いるが前述のように実際のアーク・ゾーンにおいてはかなり圧力が高い。VAR炉に固定式るつぼの代わりに昇降できる短いるつぼを用いて実験を行なわれたことがあり、溶融プールが常にるつぼの頭部にあるようにしてメルト上の真空度を維持し、均一な成分と純度の高いインゴットを得たという報告<sup>10)57)</sup>があるが今後の一つの方向であろう。ESR法にもこの方式が採入れられ効果をあげている<sup>117)121)</sup>。

##### (2) エレクトロン・ビーム溶解法 (E・B・M)

VARの適用はTi, Zrでは成功し、鋼では精錬効果は少ないがlayer by layerに凝固するので健全な組織を作る点で大きなメリットがあつた。しかしW, Ta, Nb, Hfなどの高融点金属には温度が不足でこれらの金属にE・Bの適用が増加するであろう。現在ではこのほかに耐熱鋼および合金鋼の溶製にも利用されている。米国では1000kW出力の巨大なE・B炉が稼動しており、操業中のものは20基以上である。欧州では7~500kWのE・B炉が50台以上稼動している<sup>27)</sup>。Airco-Temescal Div.の誘導炉とE・Bを組合せたプロセスが話題を呼んだ<sup>27)122)</sup>。これらの溶解はいずれも水冷銅るつぼを利用している。

##### (3) プラズマ・アーク、プラズマ・ジェット溶解法

プラズマ・ジェットは高温熱源として急速な発展をあげている。プラズマ・ジェットは一口に言えば冷却したアーク室内において電極間にアークを発生させその中を気体または液体の媒体を通過させてアークを安定化したものである。プラズマ・ジェットの性質の中で最も重要なものの一つはその到達温度があげられ、イオン化エネルギーを利用して10000°C以上にも到達することができる。いろいろの用途があるが金属溶解の熱源として注目される。

4~5tの鍛造用および板用インゴットを製造する大型プラズマ炉がソ連において開発された。欧米および日本においてもセラミック製るつぼを持つプラズマ炉は開発されているが銅製水冷るつぼを用いたものとしては最初のものである<sup>123)</sup>。ほぼ期を同じくしてわが国でもTi溶解用の炉が出現した。

##### (4) Durarc および回転アーク

DurarcはWestinghouse Electric's Power Circuit Breaker Div.が1965年にアーク溶解用の非消耗電極として開発したものである。Durarcおよび後述の回転電極と水冷銅るつぼを組合せた非消耗電極アーク溶解はその用途を広めていくことであろう。図19にこれら各種加熱法と水冷鑄型の組合せの原型図を示した。

## 5. 設備の革新

溶解プロセスの革新と平行して炉設備は大型化、生産性向上、自動化の面で大きく変わってきた。

### 5.1 生産性向上のため2炉方式が開発された<sup>6)108)</sup>

この方式は電極保持機構を含む真空室を2つの水冷る

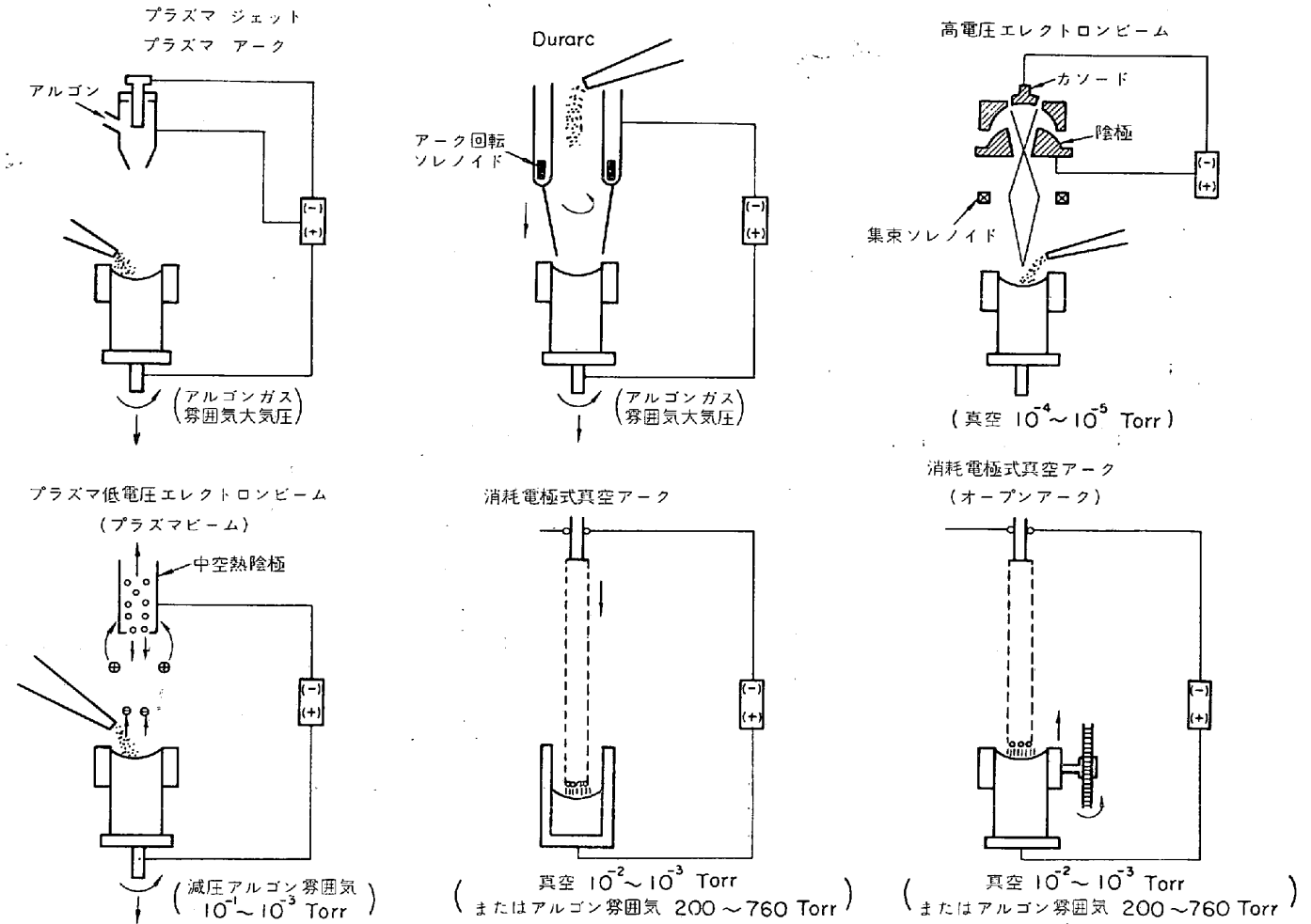


図19 各種加熱法と水冷鑄型の組合せ

表 11 3極炉の電極降下距離

鋼塊直径 in	鋼塊長さ in	単極長さ in	円形3極		扇形3極	
			長さin	3極/単極	長さin	3極/単極
12	36	45	192	4.27	119	2.65
20	60	34	130	3.83	63	1.85
28	64	30	111	3.70	52	1.74
40	120	29	104	3.59	46	1.59

つば上で交互に使用し、炉交替時間を極端に短縮した。これによつて非生産時間平均 1~2 hr が 10 数分に短縮された。炉の利用率は向上し、20 in φ インゴットの Ti の溶解コストを 30% 低下することに成功した。最近の設備は古い設備に対し 15~20% 増産が可能と言われる。

5.2 3極 VAR 炉<sup>(47)(58)(112)</sup>

単極の代わりに3極を用いる場合、前にもふれたが次のような問題点があつたが、解決法が見い出され単極にない特徴を發揮している。

- (1) 円形電極では表 11 に示すように単極よりも大きな昇降距離が必要になるので電極を扇形にした。
- (2) 電極駆動機構、各電極が独立して作動する必要が

ある。

(3) アークの安定性. アークを安定させるために KCl ペレットが用いられる。KCl ペレットをプールに投下すると溶解し、表面に浮遊する。次第に蒸発して適当にイオン化してアークを安定させる。

(4) 操作. 溶解速度は 36 lb/min 以上 42 lb/min 程度に上げることができ、これは単極 DC 炉の3倍以上である。アークが3つになるのでクローバー型のプールができてインゴットの組織を害するのではないかと考えられたが杞憂であることがわかつた。

(5) 品質 A-286, D-6 のような freckle に敏感な鋼種に対しても効果があつた。前述のように DC 炉では電流通路の周囲に強い磁場を生じ、攪拌作用を誘発するが3極 AC 炉ではこの磁場を打消す。熱分布が均一でインゴットの肌がきれいである。機械的性質、熱間加工性、清浄度もすぐれていることが観察された。

5.3 補助設備の改善

5.3.1 電極位置の調整

これは電極を正確に駆動する電極駆動機構とこれに指令を与える系統の2つに分けられる。

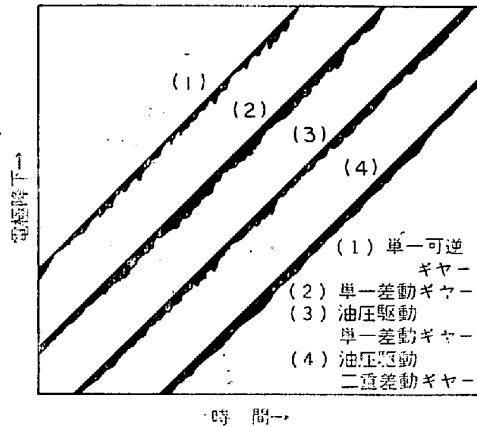


図20 電極降下曲線

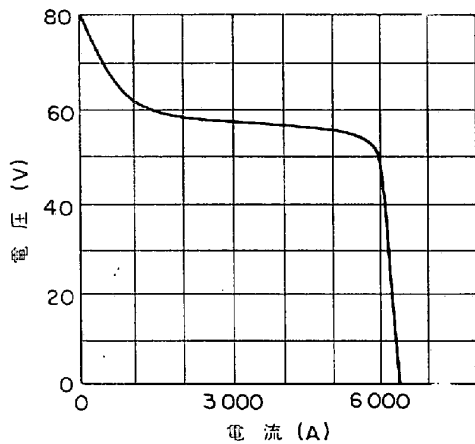


図21 直流整流器の電圧—電流特性

(1) 電極駆動機構

VAR 材の品質を改善する鍵は溶解 parameter を正確に制御し一定の溶解状態を保証することである<sup>11)41)124)</sup>。最も重要な parameter は電極と溶融プールとの距離を常に一定に保つことである。Ti ではさほど問題ではないが鋼の溶解とくに Ni 基合金はデリケートである<sup>11)</sup>。大型 VAR では溶解開始から終了まで長時間 (数 10 hr を要する場合もある) を要するので電極送りの自動制御を行なわねばならない。それには種々の方法がある。

①油圧調整方式<sup>125)</sup>

簡単で頑丈ではあるが正確度、感度に制限があり最大偏差が約 20 hr の操業で 1 mm 以下という要求を満たすことができない。

②機械的駆動方式

初期の古い炉はケーブルまたはチェーンを用いる方式であったが電極の重量を増すとともにボールねじとなり単一可逆ギヤ制御で駆動していた。次いで二重調整モーターをもつた差動ギヤに移った。さらに進んで二重差動ギヤとボールねじの組合せによつて操業中 ±1 mmの精度を維持するようになった。図 20 に各種駆動方式による電極降下の応答状況を図解している。初期の

方式は円滑な駆動を行わず応答が不足していた。現在の電磁機械式の二重差動ギヤおよび回転油圧系によつて駆動されるボールねじは最も正確な電極駆動系であることを示している。そして電極を制御するために正しい指令信号を与えるアーク間隙制御が必要になつてくる。アーク長を制御するのに次のような方法が考えられた。

①溶解電流を用いる方法

しかし直流整流器は急勾配の電圧/電流特性をもつからアーク電圧またはアーク長の変化はアーク電流に変化を与えない (図 21)。したがつて電流による制御は適用できない。

②γ線を利用する方法

アーク間隙の絶対値測定にγ線を利用するものであるが操作が困難で不鮮明であり、かつ非常に高価である。

③電極降下速度調整<sup>9)</sup>

電極降下速度をインゴット形成速度より小さくすることによつて均一なアーク間隙が得られる。この方法は圧力変化、磁場、電流による影響はないが実際には全溶解期間中一定の溶解速度を与えるような均一な電極を作ることはできない。したがつてこの制御方式による場合は周期的に電極降下速度を調節する必要がある。図 22 に当方式、図 23 に比較のため後述の電圧制御方式による電極降下状況を示している。

④ロードセル方式<sup>9)</sup>

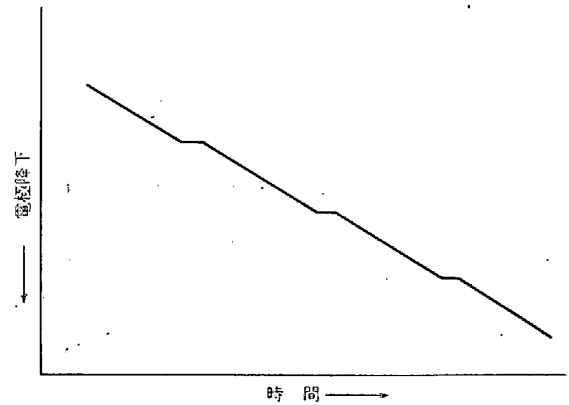


図22 電極降下速度調整方式

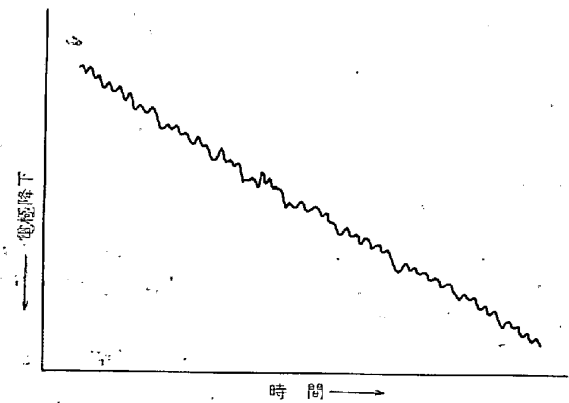


図23 電圧制御方式

ロードセルによつて電極消耗速度を一定にするものであるが信頼性が乏しく、不連続である。

⑤アーク電圧を利用する方法

アーク電圧を測定してアーク間隙を知りあらかじめ定められた基準電圧との偏差を0にするような電極駆動の自動制御方式すなわち電圧制御方式でVAR開発当初から最近に至るまで広く採用されていた。しかし電極とプール間の間隙が変化しなくてもアーク電圧が変化するという欠点がある。これには次のような原因がある<sup>9)</sup>。

(i)アーク・ゾーン内で正常のアーク電圧——アーク間隙の関係を保つためには金属蒸気が密でなければならない。溶解電流が低すぎる時は密な金属蒸気ゾーンができず少なくとも5000A以上が必要である。したがつて溶解の初めおよびホットトッピングには自動制御ができない。

(ii)溶解ゾーンにおける圧力の変化

アーク・ゾーンにおける圧力変化は電圧降下の原因になる。アーク間隙を一定に保つためには圧力変化を生じたときには基準電圧を再設定する手段を与えねばならない。

(iii)グロー放電は溶解中電極、溶湯からガスが多量に放出される際に発生し、グロー放電を発生すると電圧はかなり降下し、アーク電圧制御は電極の下降を停止するか、または電極の距離を増加させるように働く(図24)。

(iv) 正常な圧力状態でもアークが磁場の影響を受けて偏向し伸ばされるので電圧信号が不正確になる。とくに攪拌コイルを適用した場合磁場が一方方向であればアーク偏向効果は正常の基準電圧設定を変えて相殺できるが磁場が逆転するときには電極降下を停止し、電極をプールから遠ざけることになるのでこれを修正するには電極降下速度を一定にする方式に依存し、磁場をもとの方向に切換えるときには再び電圧制御法に切換えねばならぬという繁雑さがある。

(v)溶解電流の影響

電流が変化すると電圧も変化する。この変化は基準電

圧設定点を再設定することによつて補償できる。これらの制限の中で最も大事なのはグロー放電を最短時間で正常に戻さねばならないことである。従来とられていた方法は

(i) Dipping 操作系

自動、手動いずれの操作も可能であるが自動の場合、dipping 周期をタイマーで定め、dipping 電圧設定を希望値に選んでおくとアーク設定電圧は周期的に dipping 電圧まで下降し、したがつて電極は周期的に一定割合だけ下降し、また元の位置に戻る。材質によつて異なるが通常周期は1~5分程度である。とくに dipping の必要な材質ほど周期を短くする。一般の材質では周期的に行なう必要はないが適宜任意の時間に dipping させ電極位置の誤差を修正することができる。

(ii)ガス信号装置 (Heraeus 方式)

異常な低電圧またはグロー放電中電圧が降下するとスイッチオンして電極を降下し、短絡する前にグロー放電は消滅するのでオフとなる。しかしガス信号のスイッチオンまたはオフに対する基準が必ずしも明確ではなく頻繁にオン、オフを行なうのは好ましくない。ガス発生が多い場合にはあまり役立たないなどの欠点があつた。そこで新たに登場したのがアーク・パルス制御である。

5.3.2 アーク・パルス制御法

従来のアーク電圧ではなくアーク自体のプラズマをとらえてアーク長を制御するアーク・パルス制御法が開発された。これは著名なメーカーではそれぞれ次のように称している。

Heraeus 社<sup>11)</sup>——Super Heratron Control

Consarc 社<sup>12)</sup>——Phantom Short Circuit Control

Allegheny-Loctromelt 社<sup>125)</sup>——Hash Control

オープン・アークの観察はかなり行なわれたが<sup>126)~131)</sup> VAR 操作中のアークの挙動については不明の部分が多かつた。Oscillation 技術によつてアーク現象が解明された<sup>132)</sup>。アークの全電位降下は陰極電位降下、陽極電位降下、プラズマ降下からなり(図25)<sup>11)125)</sup>、従来の制御系はこのプラズマに依存していたがアーク電圧対アーク長の関係が不鮮明で前述のような種々制限があつた。Oscil-

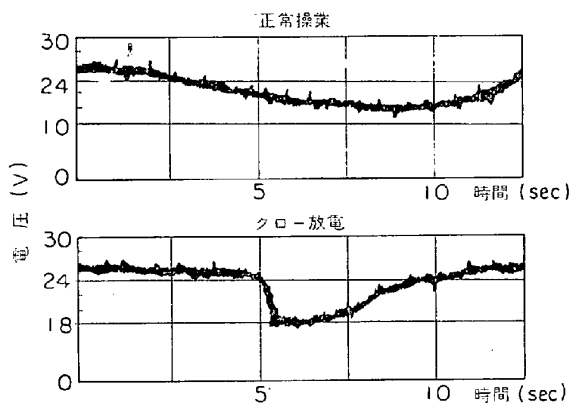


図24 正常操業およびグロー放電における電圧—時間曲線

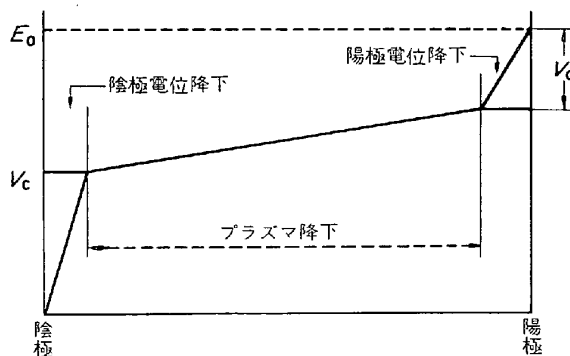


図25 アークのポテンシャル分布

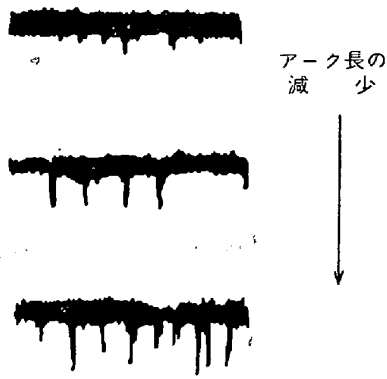


図26 アーク長とプラズマパルスの関係

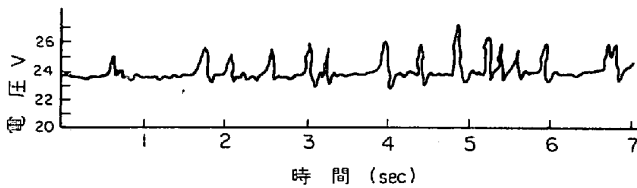


図27 基底アーク電圧に重畳せる hash pattern

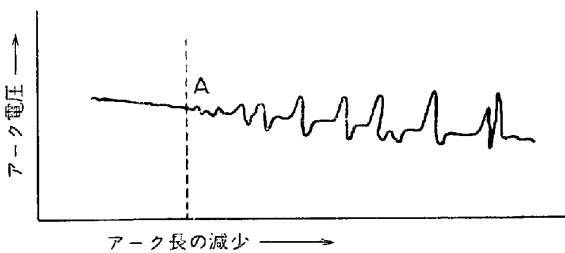


図28 アーク長とアーク電圧および hash pattern の関係

lation 分析によつてアーク現象の解明が進むにつれて溶解中アークのポテンシャル分布は次の parameter からなることが明らかにされた。すなわち (i) 前述の基底アーク電位, (ii) hash でアーク長が減少するにつれて基底アーク電圧が減少すると同時にパルスの形の電圧不連続が重畳されるようになる (図26)<sup>125)</sup> ことが見いだされた<sup>133)</sup>。この電圧不連続はアーク長の変化に関係あることが示され、このパルスは hash と名付けられた<sup>134)</sup>。アーク電圧に含まれるパルスの発生頻度はアーク長に左右される。すなわち短アークは回数が多く振幅が大きい。これに反して長アークは回数が少なく振幅も小さい。非常に長いアークではパルスの消滅期がなく非常に低い振幅の一定 oscillation になる (図27, 28)。図28に示すように直線 A より間隔が長くなるとパルスを発生しない。そこで単位時間当たり発生するパルスを一定回数に保持することによりアーク長を一定にしようとするものである。とくに重要なのは異常アークまたはグロー放電が発生すると電極を降下するよう作動することでこの制御法は次のような利点がある。

(i) 非常に低溶解電流にも感度がよくスタートおよび

ホットトッピング時にも利用できる。

(ii) 不活性ガス溶解にも用いられる。

(iii) 電圧、電流や真空度と無関係に制御できる<sup>9)11)12)</sup>。

(iv) グロー放電が減少するというより最短時間で回復する<sup>9)</sup>。

(v) アーク・ゾーン の熱分布が均一になり、溶解を自動化しやすいなどの特徴を持ち均質なインゴットを作る上に効果がある。

### 5.3.3 るつぼ冷却系<sup>7)9)108)</sup>

活性金属の溶解には爆発事故を防止するため水以外の冷却剤を用いることが検討され、ガス冷却るつぼが用いられたことがある<sup>10)</sup>。また熔融 Na, K 冷却が論議された<sup>6)10)</sup> が実際には適用されていない。現在でも水が唯一の冷却剤と言つてよく単にライナーとジャケット間を強制冷却していたものをさらに効果的となるよう種々考慮が払われている。混合バルブまた熱交換器で処理する閉式ループ冷却系によつて再循環し入水温度は  $\pm 5^\circ\text{F}$  の精度に維持され、溶解中終始一定の均一の冷却状態を維持するよう設計されている。溶解を終わった後は温度調節を行ない冷却中クラックに敏感な大型鋼塊を徐冷し、炉を開放したとき温水によつて水滴が凝縮するのを防止し、排気時間を短縮するなどの利点がある。現在冷却水を間歇的に噴射し水の蒸発熱を利用する試験または自動調節冷却系を開発中である<sup>108)</sup>。

### 5.3.4 電源の改善<sup>7)135)</sup>

VAR 炉のアーク制御としては普通の抵抗負荷と異なり電流と電圧について別々に行なう必要がある。可飽和リアクターにより垂下特性を持たせた電源が使用され、たとえ短絡しても電流が増加しないような性質を持っている。また可飽和リアクターはすぐれた応答性を持っているが最近では SCR 制御によつて短絡のような極端な負荷の変化にも迅速に回答し 1% 以下の電流制御が行なわれる。

### 5.3.5 高電流攪拌コイル<sup>8)9)</sup>

かつて攪拌作用は偏析が起こるので有害とする説<sup>61)62)136)</sup>、正しい攪拌作用はアークの安定、鋼塊肌の状態、鋼塊内部の健全性に効果があるという意見に分かれていた<sup>36)40)60)137)</sup>。攪拌作用は耐熱金属には必要である。攪拌を行なわないとあるいは弱いと側面からメルトが収縮しるつぼ壁に溶湯が行渡らないことがある<sup>11)</sup>。最近の新しい合金には電磁攪拌が必要となり高電流電磁攪拌コイルが開発された。正逆磁場によつて生ずるプール運動はプールサイズを減少し結晶粒を調整するのに用いられる。しかし初期には磁場を逆転する際電極尖端がアークを冷却する結果となつたが図29<sup>9)</sup>に示すように電流を漸次増加または減少させるような制御回路の開発によつて解決されすぐれた鋼塊肌、均質な鋼塊を作るようになった。

### 5.3.6 電極の連続計量<sup>9)108)</sup>

従来溶解速度を電極の降下速度またはストリンガー降

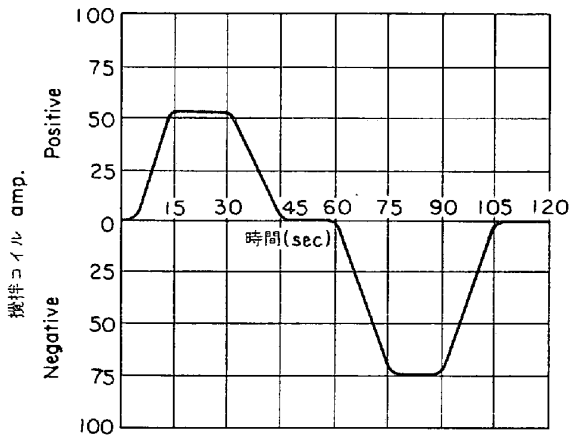


図29 高電流搅拌コイルの電流制御

下距離で表わしていた (in/hr または mm/hr). しかし電極の形状, 密度の相違が当然あるから正確には lb/hr, kg/hr で測定すべきである. 電極の残留重量に応じて溶解電流を調節する電子ロード・セルを備えた炉が出現した. 現在のロード・セル系の正確度は 25 lb 以上とされているがホット・トッピング開始時点を確認に示さない.

5.3.7 記録計<sup>10)</sup>

電圧, 電流, 真空度を連続的に記録することが一般に行なわれていたが溶解 parameter をプログラムし, 溶解中の臨界変数, 電流, 電圧, 真空度, 電極位置を図式に記録し製品の一貫性と歩留を向上せしめるよう計画されている.

5.4 炉設計の改良<sup>7)116)</sup>

近年の VAR 炉の設計の進歩はめざましく新式炉の姿

は全く従来の面影を留めないほどにコンパクトで操作の簡便な故障の起り難い装置となつている. 写真 1, 2 は旧設計による炉, 写真 3 は最新設計の炉および最近の溶解工場のレイアウトを示している. また活性金属用と鉄または耐熱金属用には原理に相違はないが初期の炉はしばしば両グループの材料を同じ炉で溶解した. しかし現在は活性金属溶解用の炉と非活性材料用とに明瞭な区別がある. 根本的な相違は炉の形状と安全策である. Ti の溶解に過去 10 回程度の爆発がありそのうち数回は大爆発であり<sup>61)138)</sup>, 保険会社からの要求が強い. 具体的に言えば (i) Ti の一次溶解用に設計された炉はスポンジ電極の長さと同一次インゴットの比を調節するために非常に長いストロークと真空タンクを持つている. (ii) Ti 二次

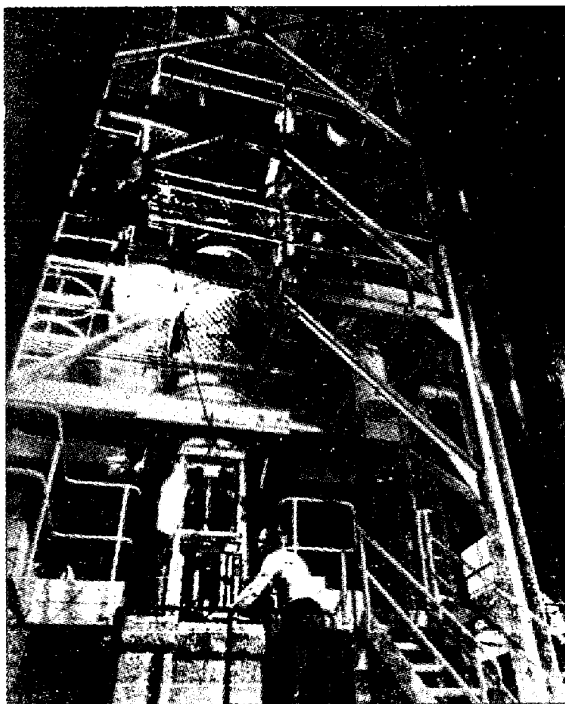


写真 1 旧設計による VAR

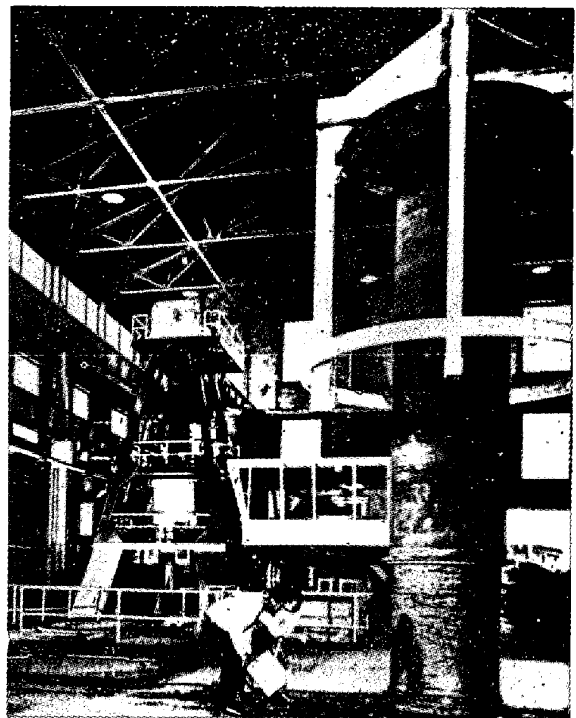


写真 2 世界最大の Midvale Heppenstall 社の VAR 炉 (旧設計)

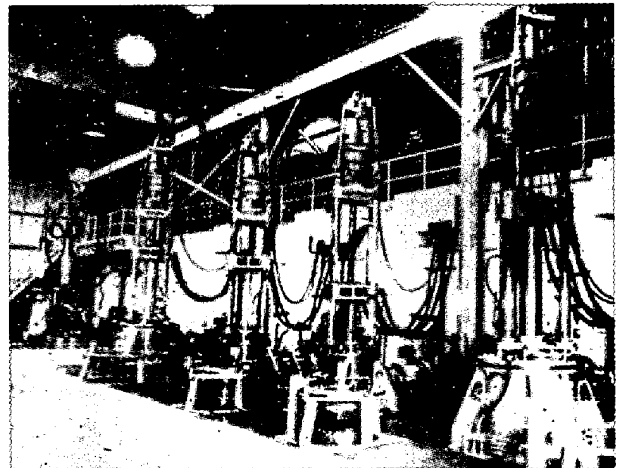


写真 3 最新設計の炉および最近の溶解工場



溶解用は鋼または耐熱金属用と同じプロポーシオンである。(iii) 活性金属を溶解する炉はすべて厚い鉄筋コンクリートの地下室、防爆扉、安全弁によつて保護しなければならぬ。

5.5 スカル炉の進歩

真空アーク溶解炉を構造上から分類すると水冷るつぼ炉とスカル炉となるが活性金属、耐熱金属その他の金属の複雑な形の鋳物を作るにはスカル型の VAR 炉が適している。この炉の進歩によつてタービン・ブレードを初め種々の複雑な形の鋳物が作られるようになった。電極としては非消耗、消耗のいずれを用いることもできる。直流電源を用いて電極を通常マイナスにすることは一般の VAR と同様である。

5.5.1 Durarc (非消耗電極)<sup>139)140)</sup>

非消耗電極として黒鉛または W が用いられていたが Westinghouse によつて新しく設計された Durarc がスポンジの一次溶解とかスポンジの再溶解のような原料の追加をせねばならぬ溶解に用いられるようになった。この電極は冷却水が出入する水路がある同心円の先端が水冷銅チップになつていてその中央には孔があいている。必要に応じてガスを流すことができる。もう一つ大きな特徴は電極表面に大きな磁界を作る装置があつてそれによつてアークを電極表面上で動かすことができる。この開発によつて Ti 溶解コストを大幅に低下することができた。

5.5.2 Northgate 炉 (回転電極炉)<sup>141)</sup>

Schlieger 社では Ti, Zr, 高合金鋼などを回転水冷銅電極を用いて真空アーク溶解造塊を行なう Northgate 炉を開発した。この炉は次のような部分からなつている。図 30 に示すように二重ジャケット式水冷溶解室、イン

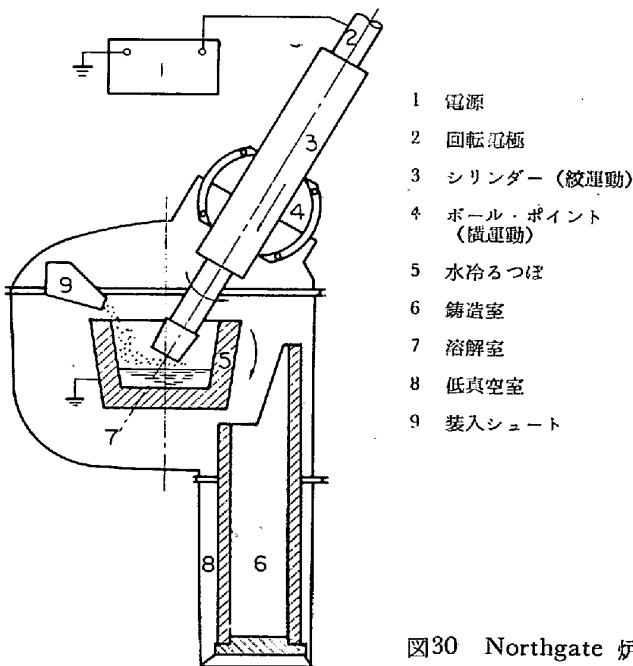


図30 Northgate 炉

ゴットと鋳型を収容する移動二重ジャケット式水冷鋳造室、高速回転電極、原料供給機構、電源、真空ポンプおよび補助装置である。電極の回転は 100~250 rpm で同時に横にも縦にも運動する。通電して回転電極を溶解室に進めてアークを発生させ 1~4 min で熔融プールを生じ、所要量の熔融金属を得るまで原料を供給して注型温度まで昇温後注型する。この回転電極はきわめて多くの方面に適用できる。図 31~34 に代表的な使い方を示すが真空脱ガス法の熱源、普通的大型電気炉の電極が考えられる。この炉の開発によつて得られる大きな利益は

- ① Ti スクラップの再生
- ② Ti または Zr スポンジ電極を一次溶解をする必要がなくなるといふことである。

6. VAR の適用と経済性

6.1 VAR の適用

真空溶解を必要とする材料は 3 項目に大別される。

(1) 真空溶解材とは必ずしも指定されないが購入側の仕様(たとえば米国における Mil-spec)により真空溶解し

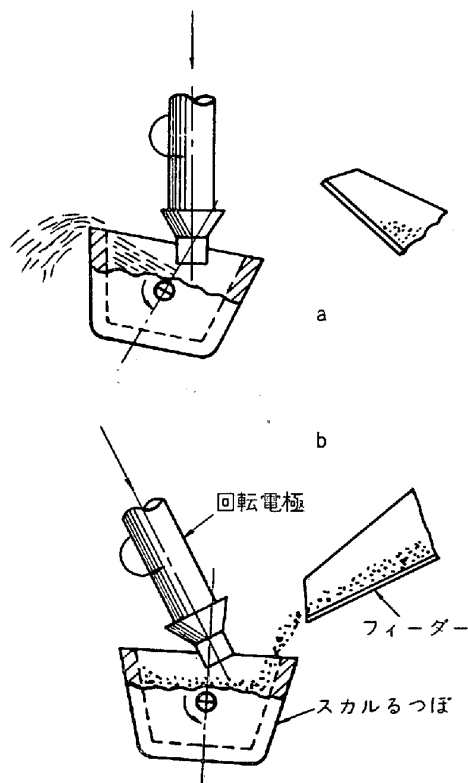


図31 Northgate 炉通常の使用法

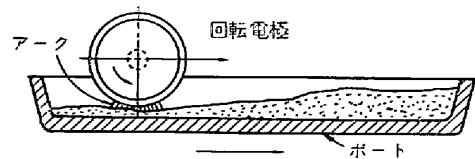


図32 スクラップから合金鋳を作る法

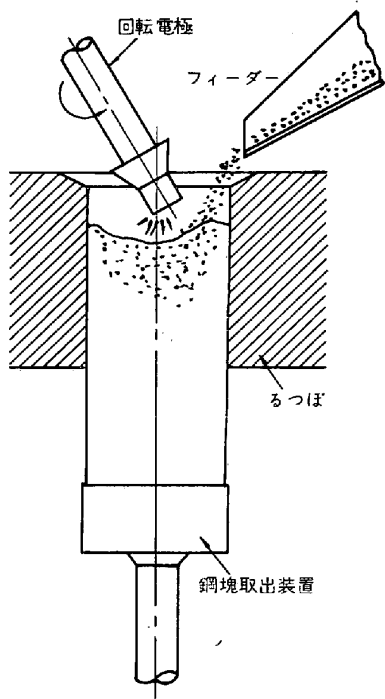


図33 ショート・モールド法

なければならぬ材料または真空溶解した方がコストの低減を計れるもの。従来大気溶解材では限界とされていた特性を真空溶解によりはるかにすぐれた材料にできることから真空溶解が多くの金属材料に適用されている。

(2) 活性合金元素の多い金属の真空溶解

この分野は真空中で金属の溶解を行ない酸化物の発生が少ない雰囲気中で母材に活性合金元素を添加し、歩留の向上を計るもので真空溶解が不可欠の条件となる。

(3) 高融点金属 (Ta, W, Mo, Ti など) の真空溶解

宇宙科学、重化学工業の進展により高融点金属の需要が増加し、特に Ti 合金などは超音速航空機材として大量に消費されるようになった。この種の金属は真空溶解によりインゴットを作るもので真空溶解分野の発展と直接結びつくものである。

さて原子力工業、航空機、宇宙開発計画などにおいては材料の絶対の信頼性が具備すべき第一の条件であるため無条件で VAR に頼らねばならない。とくにディスク、シャフト、軸受などの運動部品は仕様を VAR としたため VAR に多大の資本を投入し、多くの Know-how を築き上げた。同時に数多くの鋼種が生まれた VAR の溶解金属は 1956 年には 53 種で 1958 年には 116 種に増加した<sup>99)</sup>。その後も VAR の特徴を生かして新鋼種が生まれ 1969 年においても 5 つの新鋼種が生まれている<sup>142)</sup>。VAR 適用の著名な数例をあげると

(1) 真空溶解材の生産量は米国では最近 10 年間に年 25~30% の割合で上昇している<sup>8) 143) 144)</sup>。

(2) 航空機の全エンジン重量の約 90% は真空溶解材である<sup>7)</sup>。

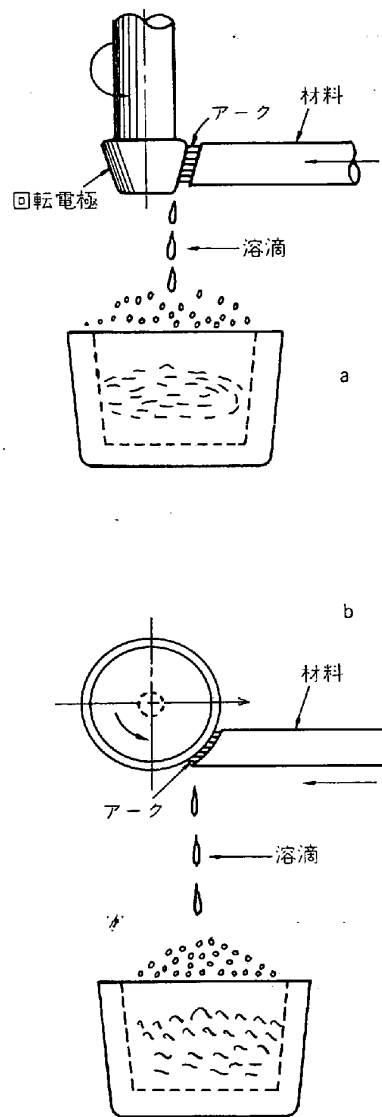


図34 滴下溶解法

(3) C5A 輸送機は着陸装置を作るのにピレットで 300 M 超高張力鋼を 1 機につき約 80 t を必要とする<sup>7)</sup>。

(4) Boeing 社では 1970 年代には年間 10 000 t の真空溶解材が必要になると予想されている<sup>143)</sup>。

このように特殊の分野で販路を拡大し、1970 年代には工具鋼市場にも激しく進出するであろうと予想されたが<sup>26)</sup>依然として VAR 機の 90% は国防軍需目的に買上げられるであろうし、コストが高いために広い工業的用途をはばんでいる。英国においてもプレミアムを払うのを嫌って航空機、原子力工業の分野の他はほとんど用いられず<sup>49)</sup> 26~30 in 以上の炉で水準以上の生産体制に入っているのはほんの数基にすぎない<sup>145)</sup>。ドイツにおいては耐熱鋼および高張力鋼に適用されているが民間消費であり、わが国においても同様の状況である。

6.2 経済性

大気溶解と VAR 材の公正な値段は溶解費の単純なコスト比較だけでは決定できない。信頼性は材料のコスト

表 12 米国における VAR コストの推移

年 代	価 格
1958年	Waspaloy 4.44 \$/lb — 10 年前の 1/2
	A-286 2.09 — 棒
	3.08 — 板
	1.98 — 鍛造品, ピレット
	M-252 7.77 — 棒
	7.23 — 鍛造品, ピレット
	低合金鋼, 軸受鋼 1.30~1.45
1960年	平均価格が 1\$/lb 下り, 1957 年の 1/2 に低下した.
	低合金鋼 65¢/lb
	大気溶解ピレット 18¢/lb
1967年	二重溶解 Wapaloy 4.44 \$/lb — 10 年前の 1/2
	VAR 特殊鋼のプレミアム 50¢/lb
1968年	VAR 溶解費 3~4.5¢/lb
1969年	VAR 溶解費 3¢/lb
1971年	VAR 工具鋼のプレミアム 30¢/lb

表 13 英国における VAR 材の値段

年 代	価 格
1959年 1960年	VAR 材 2s 6¢/lb~3s 6¢/lb 軸受鋼その他の低合金鋼 (棒材) 大気溶解材の 7 倍 4%Ni-Cr-Mo 鋼 5 倍 高速度鋼, タービン・ディスク材 2~3 倍

表 14 ソ連における VAR 材の値段

年 代	価 格
1967年	DI-1 (耐熱鋼) 823 ループル 23 カペーク/t ~ 1228 ループル 90 カペーク/t
1969年	大気溶解材の 5.7 倍
1970年	VAR 溶解費 80~90 ループル/t

だけでは評価できない。この見解は用途によつてたとえ航空機、宇宙科学界では確認されており、現在 VAR 法を適用している分野では十分なプレミアムに値すると考えられている。VAR は再溶解であるため大気溶解材より溶解費がかさむことは否めない事実でこれが VAR の最大欠点の一つになつている。

表 12 は正確な比較ではないが米国における VAR 材のコストの大略の推移をまとめたものである<sup>5)27)(42)95)99)146)147)</sup>。1958 年には設備拡張と生産量の増加によつて前年の 10~15% コストを低減したがなお大気溶解材の 5~6 倍であつた。1960 年の価格低下は主として競争によるものとされ、生産量の 2%以上は民需には進まないだろうと評価された。Midvale Heppenstall 社は 60 in φ, 50 t VAR 炉を設備し VAR 材に対する過剰価格は鍛造材では明らかにペイしなかつたと言つている。現在 VAR 工具鋼は一般に 30¢/lb のプレミアムが付されている。

表 15 国内 VAR 材の値段

年 代	価 格
1964年	VAR 溶解費 12 600 円/t
	VAR 良塊 74 000 円/t
1965年	大気溶解良塊 61 000 円/t
	原価比率大気溶解材の 1.7 倍
	実際の溶解費 50 000 円/t

表 13, 14 はそれぞれ英国<sup>25)148)</sup> およびソ連<sup>90)149)150)</sup>における VAR 材の値段である。

また表 15 はわが国の値段である<sup>151)152)153)</sup>。理想的な場合溶解費 12 600 円/t と試算されているが実際には炉稼働率はさほど高くないので 50 000 円前後であろうと評価されている。

## 7. 将来の展望

### (1) ESR と VAR の競合の問題

VAR に最近 ESR, E-B 溶解という競合者が現われた。高融点金属には VAR では温度が不足であり、鋼に対しても E-B 溶解が浸透してくるだろう。ESR は良質の鋼を作るのに VAR よりすぐれた点がある。米国においては超合金の成長は 1971 年から 75 年にかけて年平均 12~16% になるだろうと言われ、75 年までに超合

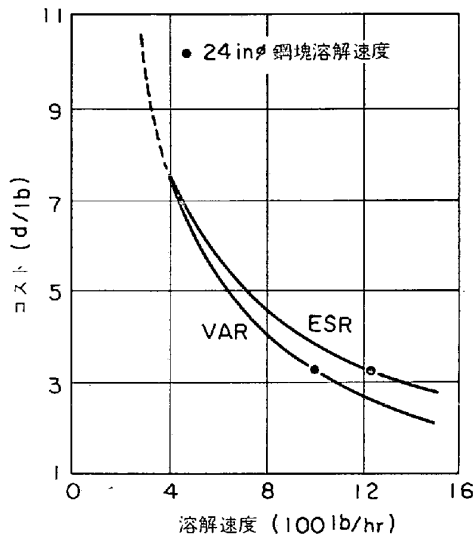


図35 ESR および VAR の溶解費

金の 70% は ESR に転換が可能であるという意見が一部にある<sup>154)</sup>。現実には米国では VAR 設備が過剰であり、VAR 市場は飽和に達したという見解がある<sup>98)155)</sup>が結論から言えば近々 VAR に代わりうる可能性は少ない。その根拠は ESR に熱意を示す諸社から次のような評価がなされているからである。

① WOODING ら<sup>101)</sup>は ESR法は VAR 法と競うよりもその補助装置としてのメリットがあるとしている。超合金、耐熱鋼の仕様が ESR に代わるにはまだ実績を積んでいない<sup>89)101)</sup>。

② WOODING の試算したコストを基にして溶解速度との関係を求めると図 35<sup>82)</sup> のようになり ESR の生産性が高くなれば VAR より有利になる。しかし ESR は経済的利益を提供するとしても技術的および仕様制限によつて超合金には用いられない。

③ Cartech 社は VAR を ESR にリプレースする可能性はあるがそれは合金次第である<sup>156)</sup>、両プロセスには各々個有の適所があるだろう。たとえば Al, Ti 含有量の高い合金には VAR が有利であり<sup>79)145)</sup>、ESR に対する肥沃な分野は仕様によつて VAR を必要としない工具鋼、軸受鋼や潜水艦および高圧容器用の強力鋼板用の大型スラブ鋼塊、鍛鋼ロールおよびタービン・ローター用の大型鍛造用鋼塊、ダイカスト用の大型ダイスなどがあげられている<sup>82)157)</sup>。また VAR 鋼塊にはサイズ、形状の制限があり電極が 760 mm を越えると電流密度に制限がある<sup>78)80)</sup>。そこで特に ESR が異彩を放つと期待されるのは大型鋼塊で 60 in  $\phi$  VAR 鋼塊といえども新しいタービン・シャフトには小さすぎる時代になつてきた<sup>89)</sup>。

④ VASCO では VAR で成功している間は ESR におそらく進出しないだろうとしている<sup>79)</sup>。

⑤ Midvale Heppenstall 社<sup>89)</sup>はプロセス転換は困難でコストのため ESR に対して保守的にならざるを得な

表 16 VAR の将来の開発

複数インゴット溶解  
スラブ型、長方形インゴット溶解  
全工程のコンピュータ化  
ロードセルによる電極連続秤量  
冶金学的融通性の増加  
凝固コントロールの進歩

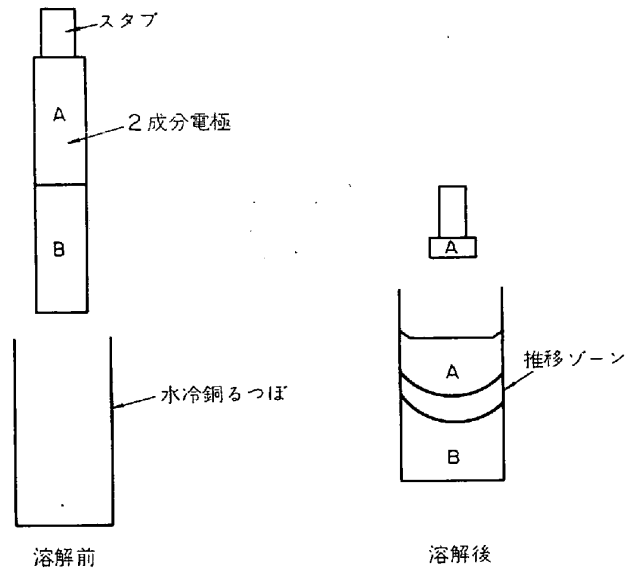


図36 複合電極の VAR

いとしている。一方 ESR 材の最大の生産国であるソ連をはじめとして西欧において急速な発展をとげつつある。日本においても VAR はすでに伸び悩みの状態であり、ESR の普及が進んでいるが ESR といえども再溶解であるためにコストのかさむことは否定できず、このコスト高を吸収しうる用途が定着するか否かはまだ実績が不足であろう。

(2) VAR の将来の開発

表 16<sup>8)</sup>は VAR についての将来の開発を示し、これが実現すれば VAR はさらに融通性に富んだものとなるであろう。操業費を低減せしめる自動化を強く進め、2炉方式はさらに進歩してほぼ連続溶解に近づくであろう。多数の小型鋼塊を同時に作るような設計が行なわれ、分塊せずに直接圧延が可能になるであろう。また VAR の特徴を活かした長方形あるいはスラブ鋼塊も可能となるであろう。VAR による複合インゴットの開発試験が行なわれ<sup>158)159)</sup>、ジョイントのないオーステナイト系フェライト系パイプが製造され実用試験に供されている。清浄度、鍛造性がすぐれ、成分勾配がゆるやかであるなどの利点があげられている。この技術は図 36~38 に示すような応用が考えられる<sup>160)</sup>。プロセス制御のためにコンピュータ化が望まれるがなお幾多の問題が残されている。その一つは溶解中電極を連続的に正確に秤量することである。現在のロードセル系はあまり正確ではない。

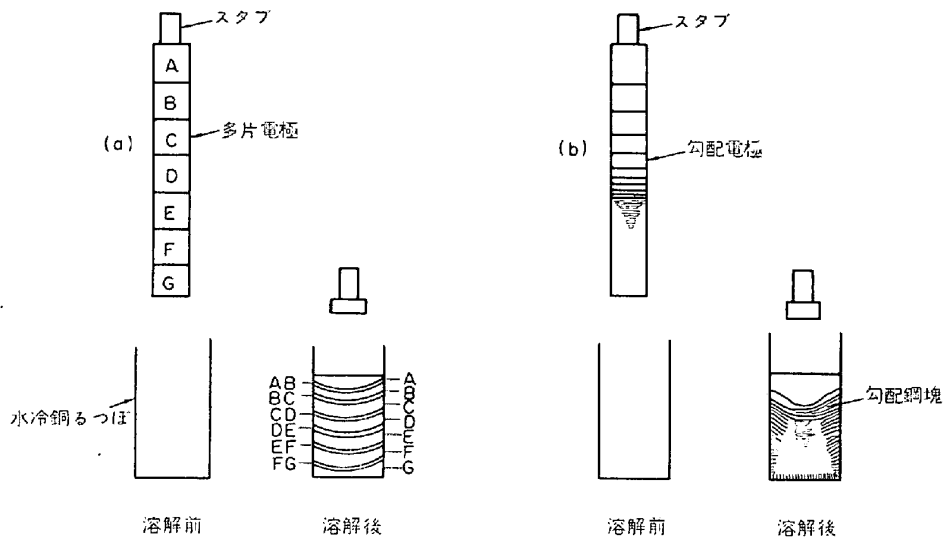


図37 複合電極の VAR (a) 多片電極, (b) 勾配電極

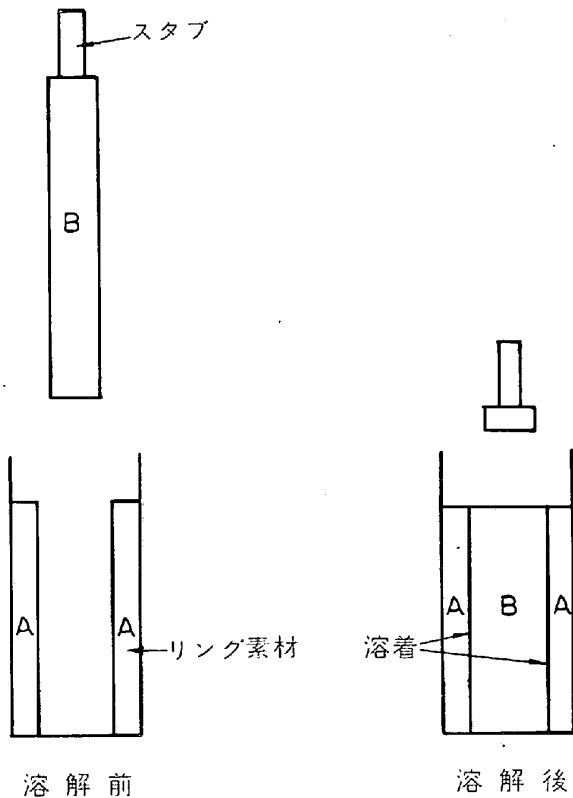


図38 複合円盤用鋼塊の VAR

しかし実験がかなり進んでおり期待されている。今後特に清浄度、衝撃などさらに厳重な VAR 仕様はプロセスに融通性を強要することになるだろう。凝固制御の進歩は厳しさを増す品質上の要求を満たすだろう。これらが実現したあかつきには最高級品質の航空機、宇宙科学用合金の製造に今日以上に優勢な地位を維持することになるだろう。1967年には米国鋼工業の約 0.15% であつた VAR 材は 1970 年代の半ばには約 0.45% になるであ

ろうと予言され<sup>4)</sup> ESR のすぐれた特徴を認めながらも VAR 製品は成長を続けるであろうと見られている<sup>10)</sup>。

### 8. 結 言

航空機、宇宙工業、原子力工業に限らず信頼性と再現性のすぐれた材料への要求はきわめてきびしい。VAR は商業的に最も高級な材料製造法であるが解明の十分でない点や欠点も多く広い工業的用途をはばんでいる。結局はさらに品質を改善すると同時に品質が価格に見合うかどうかであり、この数年の間 VAR 技術は挑戦している。また ESR との競合が論議されている。主としてこれらの点について最近の VAR の改善と将来予想される開発を記述した。大方のご参考になれば幸いである。

#### 文 献

- 1) W. J. KROLL: Trans. Electrochem. Soc., 78 (1940), p. 35
- 2) R. M. PARKE and J. L. HAM: Trans. AIME, 171(1947), p. 416~430
- 3) J. D. NISBET: Vac. Met., The Electrochem. Soc., Oct. 6-7, (1954), p. 1~12
- 4) J. PRESTON: Trans. Vac. Met. Conf., (1967), p. 569~587
- 5) J. D. NISBET: Trans. Vac. Met. Conf., (1967), p. 15~36
- 6) F. SPERNER and H. C. Child: Trans. Vac. Met. Conf., (1967), p. 73~121
- 7) R. SCHLATTER: J. Metals, 22 (1970)4, p. 33~39
- 8) R. SCHLATTER: Blast Furn. Steel Pl., 57(1969) 1, p. 19~28
- 9) R. J. TAYLER and W. J. McELHANEY: Tran. Vac. Met. Conf, (1966), p. 289~303
- 10) S. J. NOESEN: Trans. Vac. Met. Conf., (1967), p. 503~550

- 11) H. SCHEIDIG: Trans. Vac. Met. Conf., (1964), p. 399~411
- 12) 33/The Magazine of The Metals Prod. Ind., 3(1965), 7, p. 71~79
- 13) W. PETER and H. SPITZER: Stahl u. Eisen, 86 (1966) 21, p. 1383~1393
- 14) G. E. OLDFIELD: Strausbourg Vac. Met. Conf., Nov., (1967)
- 15) J. W. TROUTMAN: A Teledyne Company report
- 16) J. W. TROUTMAN: Trans. Vac. Met. Conf., (1967), p. 599~613
- 17) R. C. BUEHL and J. K. McCAULEY: Trans. Vac. Met. Conf., (1967), p. 695~709
- 18) A. M. AKSOY: Met. Soc. Conf., (1958), May 5~6
- 19) E. A. LORIA: Blast Furn. Steel Pl., 47(1959)6, p. 601~607
- 20) K. C. BARRACLOUGH: Iron Steel, 35(1962)11, p. 484~488
- 21) H. C. CHILD and G. T. HARRIS: JISI, 190 (1958) 4, p. 414~431
- 22) L. D. COBB: A Paper Presented at the American National Passenger Car Body and Materials Meeting, March 9, (1957)
- 23) G. SACHS, R. SHELL, and W. F. BROWN: Proc. ASTM (1959), p. 635~657
- 24) D. SCOTT: Wear, 5 (1962), p. 69~71
- 25) JISI, 192 (1959) 1, p. 68~77
- 26) B. T. LENPHIER: Metal Prog., 90 (1966) 2, p. 91~92
- 27) N. B. SCHWARTZ and R. R. IRVING: Iron Age, 204 (1969) 15, p. 67~78
- 28) 結城, 木尾川, 山口: 鉄と鋼, 51 (1965) 11, p. 2071~2073
- 29) T. E. PERRY: Metal Prog., 84 (1963) 8, p. 88
- 30) T. E. PERRY: Blast Furn. Steel Pl., 53 (1963) 11, p. 1017~1026
- 31) Metal Bulletin, (1963) 9, p. 4
- 32) 松田, ほか: 鉄と鋼, 52 (1966) 3, p. 452
- 33) T. KATO and K. MATSUDA: Trans. Vac. Met. Conf., (1967), p. 49~71
- 34) E. R. MANTEL and G. H. ROBINSON: Metal Prog., 92 (1967) 5, p. 65~68
- 35) W. H. WILLS: Metal. Prog., 92 (1967) 5, p. 60~64
- 36) R. S. CREMISIO: Trans. Vac. Met. Conf., (1967), p. 635~674
- 37) F. SPERNER and G. PERSSON: Stahl u. Eisen, 82 (1962) 16, p. 1099~1105
- 38) K. BUNGARDT and H. VOLLMER: Eisenhüttenstag, Dusseldorf (1961)
- 39) K. C. BARRACLOUGH: Steel Times, 188 (1964) 4992, p. 376~385
- 40) D. E. COOPER and R. J. KRIEGER: Ars in Inert Atmospheres and Vacuum, Edited by W. E. Kuhn, Wiley and Sons, (1956), p.57~68
- 41) J. PRESTON: Trans. Vac. Met. Conf., (1964), p. 366~379
- 42) W. HOLTZGRUBER, K. PETERSON, and P. E. SCHNEIDER: Trans. Vac. Met. Conf., (1968), p. 499~523
- 43) G. C. GOULD: Trans. Met. Soc. AIME, 233 (1965) 7, p. 1345~1351
- 44) Trans. Vac. Met. Conf., (1964), p. 412~418
- 45) G. N. OKOROKOV, et al.: Stal in Eng., (1963) Jan., p. 24~27
- 46) C. E. SMELTZER: Iron Age, 184 (1959) 11, p. 188~189
- 47) D. E. COOPER, et al.: J. Metals, 17 (1965) 12, p. 1368~1373
- 48) H. SPITZER and P. W. BARDENHEUER: Trans. Vac. Met. Conf., (1969), p. 381~401
- 49) H. C. CHILD and G. E. OLDFIELD: ISI Spec. Rep., (1963) 77, p. 73
- 50) F. SPERNER: Trans. Vac. Met. Conf., (1964), p. 354~365
- 51) Trans. Vac. Met. Conf., (1967), p. 710~717
- 52) W. W. DYRKACZ, et al.: Arcs in Inert Atmospheres and Vacuum, [John Wiley and Sons] (1956), p. 97~110
- 53) V. G. KAPEL'NITSKII, et al.: Stal, (1963), April p. 280~282
- 54) O. T. GRAVRILOV, et al.: Stal, (1964) Sept, p. 732~735
- 55) F. I. SHVED, et al.: Stal, (1964) Sept., p. 706~709
- 56) H. SPITZER and P. W. BARDENHEUER: 2nd International Symposium on Electroslag Remelting Technology, Sept. 23~25, (1969)
- 57) Trans. Vac. Met. Conf., (1964), p. 412~419
- 58) Iron Age, 196 (1965) 10, p. 56~57
- 59) D. CARNAHAN, et al.: Trans. Vac. Met. Conf., (1959), p. 49~57
- 60) D. H. LANE, et al.: Metal Prog., 76 (1958) 3, p. 108~110
- 61) H. GRUBER: J. Metals, 10 (1958) 3, p. 193~198
- 62) H. GRUBER: Vac. Met., edited by R. F. BUNSHAH, (1957), p. 138~161
- 63) E. S. PERRY, et al.: Symposium on Vac. Metallurgy, (1957), [Pergamon Press]
- 64) S. J. NOESEN: Vac. Symposium Trans., Amer. Vac. Soc., (1958), p. 150, [Pergamon Press]
- 65) S. J. NOESEN: Elect. Furn. Steel Proceedings, AIME, 15(1957), p. 110~132
- 66) E. A. LORIA: Blast Furn. Steel Pl., 46(1958)4, p. 379~388
- 67) E. W. JOHNSON, et al.: Trans. of the 8th Vac. Symposium and Second International Congress, (1962) [Pergamon Press]

- 68) Z. TAKAO, et al.: Trans. Vac. Met. Conf., (1967), p. 615~633
- 69) J. D. COBINE and E. E. BURGER: J. App. Phys., 26 (1955) 7, p. 895~900
- 70) P. C. ROSSIN: Vacuum Metallurgy (1957), p. 79~97
- 71) K. BUNGARDT and H. VOLLMER: Stahl u. Eisen, 80 (1960) 10, p. 659~669
- 72) Y. YAGI, et al.: Trans. Vac. Met. Conf., (1965), p. 326~341
- 73) W. PETER and H. SPITZER: Stahl u. Eisen, 82 (1962), p. 1287~1298
- 74) 33/The Magazine of Metals Producing, 3 (1965) 6, p. 57~63
- 75) J. W. PRIDGEON, et al.: Trans. Vac. Met. Conf., (1968), p. 525~552
- 76) R. P. DEVRIES: Trans. Vac. Met. Conf., (1965), p. 296~311
- 77) A. CHOUDHURY, et al.: 2nd International Symposium on Electroslag Remelting Technology, Sept. 23~25, (1969)
- 78) N. B. SCHWARTZ and R. R. IRVING: Iron Age, 204 (1969) 15, p. 69~74
- 79) C. L. KOBRIN: Iron Age, 201 (1968) 18, p. 85~92
- 80) N. B. SCHWARTZ and R. R. IRVING: Iron Age, International, 9 (1970) 2, p. 25~27
- 81) W. E. DUCKWORTH: Steel Times Annual Review, (1968), p. 183~194
- 82) C. F. ELLIOTT, et al.: Metals Engineering Quarterly, May (1969), p. 46~50, Metals Engineering Congress and Exposition, (1969), Philadelphia
- 83) E. W. KELLEY: Technical Report AFML-TR-69-14, June, (1969)
- 84) G. K. BHAT and J. B. TOBIAS: Air Force Contract, No AF 33 (615)-5430, Feb., (1969)
- 85) B. I. MEDOVAR: Electroslag Remelting, Dept. of Commerce Translation OTS 63-41334, Dec. 10, (1963)
- 86) J. W. PRIDGEON and V. SHARMA: Phase I Engineering Progress Report, IR-9-101, April 1, (1966)
- 87) Iron Steel, 41 (1968) 12, p. 538
- 88) 33/The Magazine of Metals Producing, 7(1969) 8, p. 76~89
- 89) N. B. SCHWARTZ and R. R. IRVING: Iron Age, 204 (1969) 12, p. 67~78
- 90) 33/The Magazine of Metals Producing, 7 (1969) 6, p. 90~94
- 91) Blast Furn. Steel Pl., 45 (1957) 10, p. 1161
- 92) Metal Prog., 74 (1958) 2, p. 94~99
- 93) Iron Age, 185 (1960) 10, p. 87
- 94) W. W. DYRKACZ: ASM Western Metals Congress, March 17, 1959
- 95) C. T. EVANCE: Elect. Furn. Steel Proceedings, AIME, 15 (1957), p. 93~110
- 96) Iron Age, 186 (1960) 16, p. 113~116
- 97) W. W. DYRKACZ: J. Metals, 9 (1957) 12, p. 1513~1516
- 98) G. K. BHAT: 2nd International Symposium on Electroslag Remelting Technology, Sept 23~25, (1969)
- 99) Steel, 143 (1958) 22, p. 103~105
- 100) C. E. SIMS: Elect. Furn. Steel Proceedings, TMS-AIME, 25 (1967), p. 16~22
- 101) W. E. DUCKWORTH and P. J. WOODING: Trans. Vac. Met. Conf., (1968), p. 479~498
- 102) Bus. Week: 80 (1969), p. 82
- 103) C. B. POST: Indust. Heat., 32 (1965) 11, p. 2185~2194
- 104) J. T. PERRYMEN: Vac. Metallurgy Course, New York University, (1958) June
- 105) 日本鉄鋼協会, 特殊鋼部会報告, “鋼の真空溶解および真空脱ガス法の進歩” (1969)
- 106) 真空冶金分科会資料, 真冶-81 (1961)
- 107) P. E. BUSBY: Trans. Vac. Met. Conf., (1964), p. 380~398
- 108) S. C. MYERS: Trans. Vac. Met. Conf., (1969), p. 349~356
- 109) R. A. Beal, et al.: Arcs in Inert Atmospheres and Vacuum, J. Wiley and Sons, (1956)
- 110) R. M. Parke and J. L. HAM: AIME, Sept., (1946)
- 111) J. L. HAM: Climax Molybdenum Company of Michigan, Contract N8 onr-78700, Project NR 031-331, April, (1950), p. 2
- 112) R. W. HORNBAKER and W. Sieckman: Trans. Vac. Met. Conf., (1965), p. 318~325
- 113) Steel Times, June 15 (1966), p. 92~95
- 114) J. W. TOMMANEY and S. RAMACHANDRAN: Elect. Furn. Steel Proceedings, TMS-AIME, 27 (1967), p. 21~24
- 115) H. R. CLAUSER: Materials and Methods, 27 (1948), p. 57
- 116) R. F. BUNSHAH: Trans. Vac. Met. Conf., (1967), p. 1~13
- 117) Iron Steel, 40 (1967) 9, p. 338~339
- 118) The British Steelmaker, (1970), Jan., p. 16~17
- 119) G. HOYLE: The British Steelmaker, (1970)Jan., p. 12~15
- 120) W. HOLTZGRUBER, et al.: 2nd International Symposium on Electroslag Technology, Sept. 23~25
- 121) R. L. HOSFIELD and A. G. ALLEN: 2nd International Symposium on Electroslag Technology, Sept. 23~25, (1969)
- 122) Dr. C. d'A HUNT and C. V. HARRISON: Iron Steel Eng., 48 (1971) 8, p. 85~88
- 123) R. E. PATON, et al.: Stal., (1971) Jun., p. 507

- 124) S. INUYE and G. SAUL: *Trans. Vac. Met. Conf.*, (1966), p. 148~170
- 125) C. F. REBHUN, et al.: *Iron Steel Eng.*, 44 (1967) 12, p. 97~100
- 126) E. W. JOHNSON, et al.: *Arcs in Inert Atmospheres and Vacuum*, Wiley (1956), p. 91
- 127) E. W. JOHNSON and R. ITOH: *Electrochemical Soc. Meeting, Ottawa*, (1958)
- 128) E. W. JOHNSON: *Vac. Metallurgy*, edited by R. F. BUNSHAH, (1957), p. 101~120
- 129) A. R. MOSS: *Inst. Elec. Engrs. Proc.*, A102 (1955) 1, p. 45~55
- 130) J. D. COBINE: *Dover Publication, Inc. New York*, (1958)
- 131) J. M. SOMERVILLE: *Methuen and Co. Ltd., London* (1959)
- 132) T. E. BULTER and R. P. MORGAN: *Proceedings of the Elec. Furn. Conf., AIME, Nov.*, (1959)
- 133) U. S. Patent 3, 186, 043, June (1965)
- 134) R. CRAF: "MODERN Dictionary of Electronics" 2nd edition, *Howard W. Sans and Co., Inc.*
- 135) W. A. FAUST and G. W. LAKE: *Trans. Vac. Met. Conf.*, (1968), p. 403~413
- 136) D. R. DARNAHAN: *Metal Prog.*, 74 (1958) 2, p. 100~102
- 137) D. R. DARNAHAN, et al.: *Trans. Vac. Met. Conf.*, (1959), p. 49
- 138) H. GRUBER: *Elect. Furn. Steel Proceedings, AIME*, 15 (1957), p. 110~132
- 139) *Steel*, 165 (1969) 1, p. 80d~80e
- 140) R. R. AKERS, et al.: *Trans. Vac. Metal Conf.*, (1969), p. 357~379
- 141) M. SCHLIEGER: *33/The Magazine of Metals Producing*, 8 (1970) 11, p. 78~85
- 142) A. M. HALL: *Metal Prog.*, 96 (1969) 2, p. 103~105
- 143) 平林: *特殊鋼*, 20 (1971) 6, p. 21~25
- 144) R. P. SIMMONS and R. K. PITLER: *Blast Furn. Steel Pl.*, 55 (1967) 8, p. 706~712
- 145) K. C. BARRACLOUGH: *JISI*, 205 (1969) 6, p. 826~836
- 146) P. J. WOODING and M. S. CERSTNIK: *International Electro-Heat Conf., Brighton*, (1958)
- 147) G. J. McMANUS: *Iron Age*, 206 (1971), p. 55~56
- 148) *Firth Brown News, Summer* (1962)
- 149) V. A. ROMENETS, et al.: *大学通報, 鉄冶金篇*, (1970), p. 177
- 150) N. T. トリヴァロフ, ほか: *スタリ* (1967年8), p. 610
- 151) 高尾: *金属*, 34 (1964) 3, p. 27~30
- 152) 檜垣: *鉄と鋼*, 52 (1966) 8, p. 1244
- 153) *鉄と鋼*: 51 (1965) 3, p. 411
- 154) *Steel*, 165 (1969) 13, p. 25~26
- 155) 足立, 山口: *電気製鋼*, 42 (1971) 4, p. 328~332
- 156) *Iron Age*, 204 (1969) 15, p. 78
- 157) S. G. FLETCHER: *2nd International Symposium on Electroslag Technology*, Sept. 23~25 (1969)
- 158) U. S. Patent 3, 109, 235
- 159) *British Patent* 955, 074
- 160) H. C. CHILD: *Trans. Vac. Met. Conf.*, (1967), p. 589~598