

技術資料

コンセルアーク熔解法について

高尾善一郎*・草道英武**・八木芳郎***

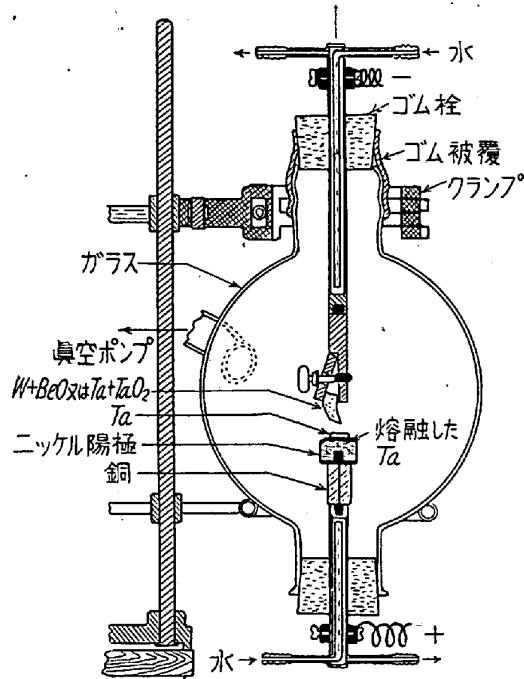
ON A METHOD OF "CONS-EL ARC" MELTING USING A CONSUMABLE ELECTRODE IN VACUUM —Review—

Zenichiro Takao, Hidetake Kusamichi and Yoshiro Yagi

I. 緒 言

冷鋳型を用いた消耗電極式真空アーク再熔解铸造法（真空アーク法と略称する人もあるが筆者は以下コンセル法と記す）が最近の鉄鋼業界の話題となつてきた。コンセル法というは Consumable electrode (消耗電極) の頭文字をとつて名づけたものであるがその特長は(1) 消耗電極式アーク熔解法 (2) 連続熔解铸造法 (水冷銅るっぽは同時に鋳型ともなつてゐる)(3) 霧囲気調節熔解法 (もちろん真空熔解が可能)(4) 浮揚精錬作用がある。の4点に帰することができる。以上の結果としてコンセル材にはつぎの特長が認められる。(1) 高純度金属および合金となつてゐる。(2) 熱間加工性が良い。(3) 高温クリープ性質が良い。(4) 偏析が僅少。一般的にいって、熔鋼の真空処理法としてはコンセル法は真空铸造法とともに重要視されてきた新しい真空技術といえるが前者は後者ほど大量安価には処理できない欠点はあるがその製品ははるかに品質が優秀で、真空高周波熔解製品の品質と同程度と認められつつある。しかも従来の真空高周波熔解炉と比較すればはるかに多量処理が可能であるからとくに注目されはじめたわけである。

コンセル法はもともとチタンの熔解法として 1953 年以降米国で大発展したものであり、特殊鋼(以下ニッケル基クロム基などの耐熱合金をふくむものとする)の熔製法として利用されはじめたのは 1955 年以降のことである。現在米国では鋳塊単重最大 8 t 余のものが生産加能となつており本法を採用する会社は 10 社におよび 1958 年には 38,000 t のコンセル鋳塊の生産が予想されている¹⁾。わが国ではこの種技術の一部は米国の発表より早く筆者などによつて特許申請されている²⁾が未だ実験段階を出ておらず国家的見地からの早期実用化が望ましいと考える次第である。以下コンセル法発展の歴史をひもといてその技術を紹介し、将来についての私見も述べ



第1図 A. O. Simpon-W. V. Bolton のアーク炉

させていただきたい。

II. コンセル法の歴史と将来

1839 年 Robert Hare³⁾ は霧囲気調整アーク炉を作つて白金を熔解したのがこの種アーク炉の最初のものといわれている。1903 年 Von Bolton はタンタルの熔解に第 1 図に示す消耗電極式真空アーク炉を使用したが、Otto Archibald Simpson はさらにこの炉を改善し電球フィラメントや医療用のタンタルを約 1 t 熔解した。この炉はかなり今日の消耗電極式真空アーク炉に近いも

* 神戸製鋼所、神戸研究部長 工博

** // 神戸研究部 理博

*** // 神戸研究部

のでつぎの3点は今日のものとことなつたところがない。(1) 消耗電極を使用している。(2) 水冷銅るつぼを使用している。(3) 電弧中で真空精製することによりタンタル中の酸素を除いている。

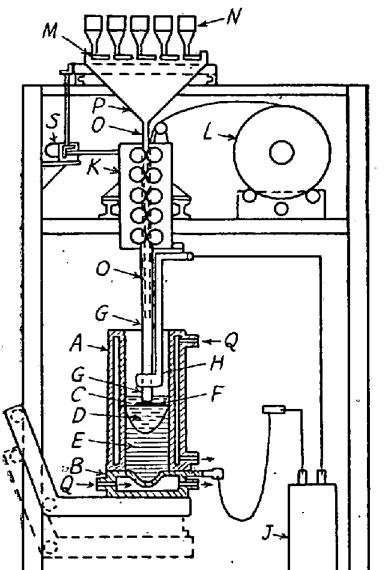
1937年までは Hare と Von Bolton の着想は実験室で利用された程度に過ぎなかつたが同年 M.W. Kellogg Co. は(1)と(2)の着想を活用しさらに工業的に発展させて偏析の少いかつ延性のすぐれた強力特殊鋼の連続熔解および鋳造に成功した。これを“Hopkins”法あるいは“Electric Ingots”法と称している⁴⁾が第2図にその説明図をかゝげた。ストリップ状になつた粗材

国鉱山局 Wartman などの協力を得てクロール法によるチタンおよび原子炉用ジルコニウムの製造法の基礎を確立した。これらスパンデ状の原料チタンやジルコニウムの熔製法としては非消耗電極式アーカー熔製法が発展させられていたが種々の欠点があつたので、米国鉱山局 Gilbert などはこれを改善し 1949 年ついにコンセル法によるジルコニウムの熔製に成功し、ついで 1953 年にはチタンの熔製に成功した。第3図にこの説明図を示す。1958 年現在のチタン熔解炉の年間能力は米国が約 30,000 t, 英国約 2,000 t, 日本約 150 t といつたところが判明している。チタン鋳塊の単重は最大 4 t であるがわが国では当社の最大チタン鋳塊 1 t となつていて。

チタン、ジルコニウムとは別に米国にはコンセル法の発展の足跡がある。これは Parke と Ham のもので彼等はモリブデンの熔解法として 1947 年すでにコンセル法に成功したと認められる⁵⁾。しかしこの方法でモリブデンを工業的に生産するためには多くの問題が存在していたようで今日にいたるもモリブデン鋳塊単重 0.5 t 以上のものには発展していないようである。

以上の歴史が示しているとおり、コンセル法はスパンデチタンとジルコニウムの工業的熔製法として発展したものであつて、酸素、窒素、水素などの化学親和力が大きく、空气中で熔解すればもちろんのこと高周波真空炉を用いるもその耐火物と反応して脆化したものしか得られない。チタンやジルコニウムの工業的生産法としてはコンセル法をおいては今日他にないと断言できる。しかしこのコンセル法も最近はむしろ特殊鋼の新しい熔製法として大いに注目されてきた。

わが国においてはすでに 1953 年(昭和 28 年)通産省のあつせんによつてチタン業界ならびに古河電工、住友金属、神戸製鋼の 3 社はクロール博士、ついで前述の Gilbert を招待し、チタンの精錬と加工技術の新しい方向について多くの指示を仰いだ。かくして 1954 年初頭(昭和 29 年)には上記加工 3 社はチタンのコンセル熔解に成功している。筆者等はチタンのコンセル熔解法の研究にあたつて、高価なチタンを用いるかわりと当社第 2 線材圧延工場の廃材を消耗電極として利用することにした。この研究はチタンと特殊鋼のそれぞれの分野で発展しチタンは昭和 32 年、開発銀行融資による新技術の工業化にはじめて成功したが、一方特殊鋼のコンセル法は適當条件を撰択すれば熔製操業中に精錬作用をおこなわせることができることを見出で、昭和 29 年來その実用性を検討してきた。その結果にもとづき現在はすでに高級不銹鋼熔接棒や特殊鋼鍛圧製品の実用試験にコンセ



A: 水冷ルツボ
B: 水冷炉底
C: 熔解フラックス
D: 熔融金属
E: 凝固インゴット
F: 電流放電
G: チューブ状電極
H: 電気接触部
I: 電源
J: 電源
K: チューブ成形機
L: ストリップコイル
M: 合金秤量装置
N: 合金ホッパー
O: 合金導入孔
P: 混合用ホッパー
Q: 水導入孔
R: モーター駆動
S: モーター駆動

第2図 Hopkins 法説明図

Hopkins 法は今日の進歩した真空技術をもとにして発展しているコンセル法の出現の前には過去の技術となつたように考えられるが、熔解技術者が現在もなお研究しなければならないことが Hopkins 法から示されている。即ち 100~250 mm 直径の高速度鋼カッター類が鍛造工程を経ずに鋳塊から直接生産され、それが可能な理由は鋳塊の偏析が少くカーバイトが均一に分布しているためであろうという事実である。ある程度の例外はあつても経済的な理由からこの炉で生産可能な鋼種は高級品のみで、不銹鋼、高速度鋼、耐熱合金などに限られると思う。

1939 年クロール法の発明者であるクロール博士は Von Bolton の炉を改良してチタンを熔解した。その後クロール博士はドイツを離れて米国にうつり、1943 年末、米

第1表 米国における真空熔解と脱ガスの現況 (C. T. Evans⁵⁾)

真空処理法	会社数		最大鋼塊トン数		年間鋼塊生産能力 トン数	
	1957年末	58年予想	57年末	58年予想	57年末	58年予想
真空铸造法	3	6	160	190	22,000	90,000
真空高周波熔解法	14	15	1.4	2.3	8,600	11,000
コンセル法 (チタンを除く)	4	10	5.5	8.2	22,000	39,000

ル材を使用している。

米国における特殊鋼のコンセル法に関する研究はわが国と相前後して進められたものと考えられ、現在にいたるもなほ多くの研究発表は見られない。これは非消耗電極式アーク熔製法が最初チタンの熔解法として発展させられたため、チタン加工業者が前述の Gilbert などの研究結果をとり入れてコンセル法にきりかえるまでに長期間を要したためと考えられる。しかし 1957 年末には米国においては Allegheny Ludlum Steel 社をはじめとして Universal Cyclops, Republic Steel, U.S. 社などがすでに特殊鋼専用のコンセル炉を稼動させており他、チタン熔解炉を特殊鋼用に転用しているチタン工場もあるものと予想されている。

第1表には米国における鋼の真空熔解と真空铸造の現状を示しているがコンセル法より 10 年も早くスタートした真空高周波熔解法の発展速度が頭打ちになりつつあるにくらべてコンセル法のめざましい発展ぶりが注目に値しよう。

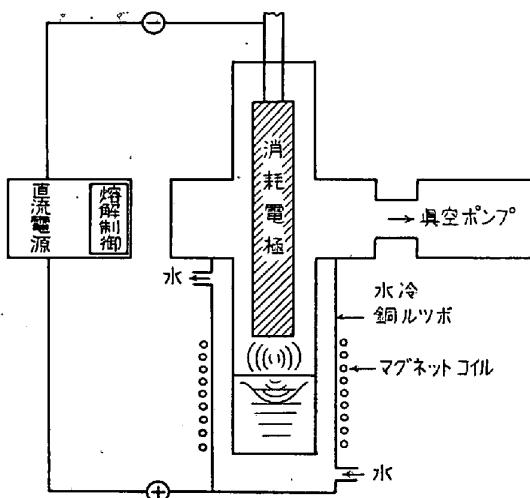
また英国では 1957 年末、William Jessop and Son 社⁶⁾がコンセル炉を稼動開始している。Gruber によれば将来は単重 25 t までの铸塊がコンセル法によって熔製可能でそのときの再熔解経費は歩留が良いため空气中熔解経費にかなり近いものになることが予想されるという。しかもその品質が大気中熔解のものに比して格段にすぐれていることは当然である。

現在コンセル法はほとんど直流アークによつているが将来は交流アークを使用する可能性が充分ある。核融合反応の研究がすすむにしたがつて従来不明の点が多かつたアーク現象も漸次解明されるものと思うがこれの応用は真空技術就中真空ポンプのめざましい発展と相俟つて化学工業などにますます広くなるであろう。このことは同時にコンセル法の発展をも意味している。現在のコンセル法は、将来、既存の連続铸造真空铸造などの技術と結びついてますます発展することが予想されるところである。

III. コンセル熔解炉の構造と その操業法の特長

コンセル炉の説明図を第3図に示した。

大気中熔解あるいは真空中熔解した消耗電極を水冷銅るっぽ中に熔解させ、熔湯は下部から順次凝固して铸塊となる。通常は消耗電極を陰極、熔湯を陽極として、その間に直流アークを飛ばして熔解する。



第3図 コンセル炉の説明図

アーケの安定と熔湯の攪拌を目的として磁場をアーケと熔湯に作用させることも可能であるが、まだ熔解操業性や铸塊に与える影響については定説がないようである。铸塊直径と熔解電流との間には大体直線関係が認められ当社の 2 t 铸塊までの実験結果では铸塊直径 10 mm について約 330~350 A の直流電流を要すると考えれば大きな間違いは生じない。铸塊直径、直流電流および铸塊单重を当社の経験からわり出せば第2表のとおりである。

直流電源としてはセレンおよびゲルマニウム整流器が使用される。

第2表 コンセル铸塊直径、所要電流および铸塊单重

铸塊直径 (mm)	直流電流 (Amp)	铸塊单重 (t)
300	10,000~11,000	0.5
500	16,000~17,500	2
800	26,000~27,000	6
1000	33,000~35,000	12

真空ポンプは油拡散、エジェクターポンプ、ルーツ型

メカニカルブースターポンプ、キニー型ロータリーポンプなどが組合わされて使用される。

熔解中の真空度は通常 1~100 マイクロ (1 マイクロは $1/1000 \text{ mmHg}$) であるが漸次高真空アーク熔解に移行しつつある。

熔解中の電圧は通常熔湯と消耗電極との間のアーク間隔に関係があつて、この距離の大きいほど電圧は大きくなるが真空度によつて単位アーク間距離当りのアーク電圧降下の程度はことなり、高真空熔解になるにしたがいこの値は小さくなり、また操業中の熔湯と消耗電極間の距離が近づく傾向があつて制御は困難となる。

一方真空度がわるくなるにしたがつて単位アーク間距離当りのアーク電圧降下が大きくなり操業中の熔湯と消耗電極間の距離が大きくなる傾向がある反面、アーク電流電圧の変動が大きくなるためにかえつて自動制御が困難となる。

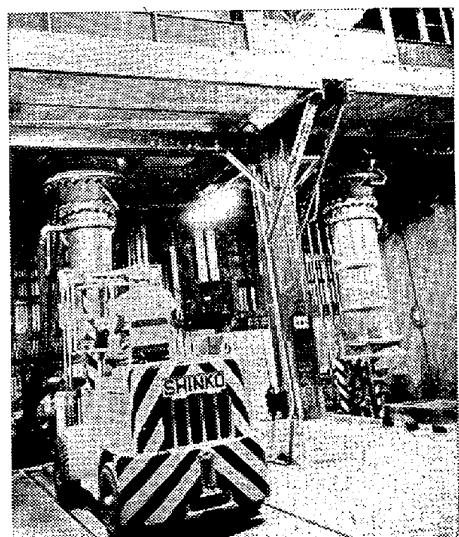
通常の熔解操業の自動制御は電流、電圧変化によつておこなうが (アンプリダイン、ロートトロールなど) 高真空の場合には Co^{60} などの放射線を利用して、アーク間距離を正確に検出して、これを制御することも考えられている。

コンセル炉にとつては自動制御は非常に重要な問題となつてゐる。それは電力費や熔解時間の短縮のみを意味するものではなく、安全操業のためである。

すなわち、チタンの熔解では熔解中に大爆発事故が再三経験され、根本的にはまだその原因がつかめないまゝに対策が種々考慮されて來た。

融点のひくい銅るつぼ中で融点の高い反応性金属であるチタンを熔解し、しかも消耗電極と銅るつぼの間隔は

通常 100 mm 以下であるから、
アーク電流が消耗電極と熔湯間に飛ばずるつぼとの間に飛び銅るつぼを損傷して冷却水が熔湯中に侵入することは考えられることであるが
かくのごとく
アークによる銅るつぼの損傷はきわめて危険で



第4図 コンセル熔解工場 (神戸製鋼)

あるため、これを防ぐ方法として、アーク間距離を常に制御して電極とるつぼ間にサイドアークが発生しないよう、あるいは電極と熔湯が短絡しないように適正に保持しなければならない。さらなるつぼの周辺は防爆壁をもうけ運転は安全位置から遠隔操作される。(第4図参照)

チタンのように高反応性金属でない鋼のコンセル熔解ではまだ爆発の経験もなく、チタンほど危険視しなくてもよいという考え方から比較的簡単な工場建物でよいとするむきもある。たとえばコンセル炉の製造業者として有名な Heraeus 社では簡単な熔解炉配置を考えている。

以上コンセル炉とその操業法の特長について簡単に記したが本熔解法の特長を列記するとつぎのごとくである。

(1) 消耗電極式アーク熔解法であるから電極から熔湯中へ異種金属が混入する心配が全然ない。しかも熱源をアークに求めているので高熱が得られる。

(2) るつぼは水冷銅を使用するので、るつぼ材料から不純分が熔湯中に混入することなく、純度の高い金属や合金を熔製するのに適する。しかもるつぼは同時に鋳型と成つていて連続鋳造と同様組織の健全なインゴットが得られ熔解操業の最終段階で Hot Topping をおこなうことにより収縮孔を最も少くすることができる。

(3) 真空または不活性ガス中で熔解鋳造するので不純物が雰囲気から混入する懼れも、活性合金元素を不純化する懼れもないばかりでなく、原料中や熔湯中にふくまれている不純物を除去するに好都合な条件を備えている。また高周波真空熔解で認められる各種の効果たとへば解離反応、真空分溜、還元反応等々が有利な条件下に実施される。

消耗電極から湯滴状に落下する状態では表面積がきわめて大きくなるのでとくに上述の精錬作用のおこなわれる機会は多い。

(4) 浮揚精錬：消耗電極から湯滴状に熔湯上に落下し熔湯は順次凝固する。このとき比重のかかる酸化物や窒化物などの非金属介在物は熔湯上に浮遊分離されいちじるしく純度は向上する。真空熔解では熔湯中の非金属介在物などが気泡となつて除去される場合が多くますます浮揚精錬作用を促進することになる。

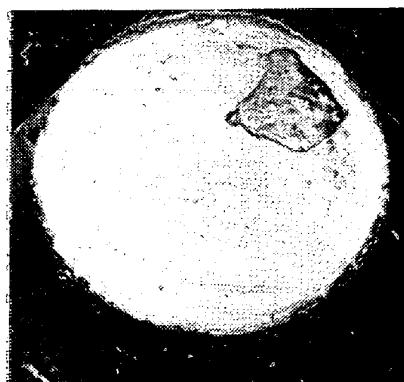
これら特長のうち精錬作用については次節において詳述することとした。

IV. 熔製材の品質

(1) 浮揚分離精錬 当社ではチタン铸塊単位 1 t (鉄鋼換算 2 t) まで熔製可能なコンセル熔解炉をすでに 1 年以上稼動させているが工業用純チタンやジルコニア

ムをアルゴン中あるいは真空中でコンセル熔解しても非金属状物質が熔湯上に浮上分離される状態はみられない。しかし鉄鋼材料をコンセル熔解すると事情はこれととなる。筆者らは前述せるようにはじめ高価なチタンを用いてコンセル熔解現象の研究をすすめるかわりに砂疵発生のため廃材となつた炭素鋼圧延材 (SS-41) を利用した。すなわちこの表面を清浄にしたものを消耗電極としコンセル熔解したところ電極材の外観上は不純分が見られなかつたにもかかわらず、熔湯表面には非金属状物質(ノロ状物質)が浮上分離し、熔解のすすむにつれて多くなることを発見した。

雰囲気による酸化、窒化などは考えられず、炉床材からの不純物の混入もなく、しかも使用する消耗電極の表面はサンドブラストおよび酸洗により完全に清浄な表面を呈している以上、これらの不純分は消耗電極内部に分散してふくまれていたのが熔湯表面に浮揚分離されたものと考えざるを得ない。この不純分の浮揚分離は 780 mmHg アルゴン圧下の熔解でも真空中での熔解においても認められた。炭素鋼において認められた浮揚分離現象は特殊鋼、特に鉄およびニッケル基合金においてこれより酸化や窒化しやすいチタン、ジルコニウム、モリブデン、アルミニウム、クロム、タンクステン、バナジウムなどを多くふくんだ合金のコンセル熔解にも予想どおり確認された。



第5図 Cr-Mo 低合金鋼のインゴット表面に絞り出された不純分

研究がすんでいることが、W. W. Dyrkaczなどの研究結果により明らかにされた。

A-286 (0.05 C, 1.3 Mn, 0.50 Si, 15 Cr, 26 Ni, 1.3 Mo, 2.0 Ti, 0.2 Al, 0.3 V, Balance Fe) を用いその消耗電極中に 0.25% の窒素を添加してコンセル熔解したところチタンの窒化物が熔湯の上に浮揚分離されることをマクロ組織と化学分析結果をもつて、W. W.

Dyrkacz 等は昭和 31 年米国電気化学学会で証明している。

熔湯よりかるい非金属介在物が浮揚分離されるためには非金属介在物の浮揚速度 V は熔解铸造速度 V' より大きいことが必要である。しかして V は Stokes の式からつぎのとおり示される。

$$V' \leq V = \frac{2}{9} g \cdot r^2 \cdot \frac{D_M - D_s}{\eta}$$

V' : 熔解铸造速度 (cm/sec)

V : 非金属介在物の浮上速度 (cm/sec)

g : 重力による加速度 (980 cm/sec²)

η : 熔湯の粘性係数 (dyne/cm/sec)

D_M : 熔湯密度 (g/cm³)

D_s : 非金属介在物密度 (g/cm³)

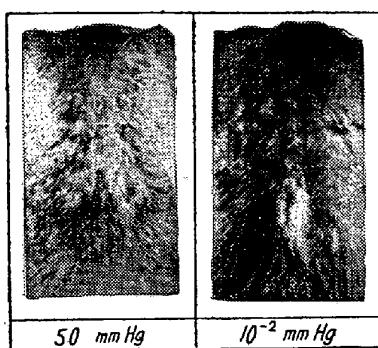
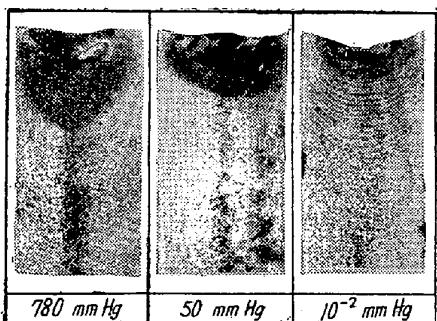
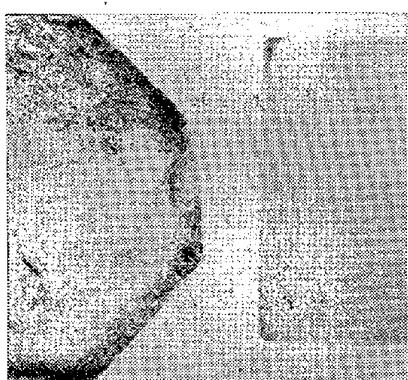
r : 非金属介在物の半径 (cm)

したがつて非金属介在物をできるだけ多く浮上分離させるためには溶湯中に浮上分離できない非金属介在物の臨界半径をできるだけ小さくすることが必要であり、そのためには V' と η を小とし、 D_M を大きく D_s を小さくすることが必要である。これからコンセル熔解法における熔解操業法や消耗電極の製造法に関する基本的な指針が得られる。また真空熔解ではアルゴン圧中熔解などに比してよく熔湯からの気泡の発生が熔解中に認められるがこれは脱ガスなどの精錬作用がよくおこなわれることを意味していると同時に浮揚分離をも促進することになると考えられる。

(2) 真空精錬: 熔湯の真空処理による精錬作用については本熔製法に限つたものではなく高周波真空熔解によつても、真空铸造によつてもおこなわれる可能性のあるものである。前者については日本金属学会誌に井街博士等の紹介¹⁾があり後者については本誌に中司氏がすでに紹介²⁾されたところであるからこゝではとくに記述をさけることとする。

(3) 鑄塊の特徴

(a) コンセル鑄塊のマクロ組織は連鉄組織と同様である。すなわち、空气中で熔湯を鉄型に注入して鑄塊を作る通常の造塊法では鑄塊の周辺部から中心部に向つてほとんど水平に発達した柱状晶部が認められるが本熔製法による鑄塊は上記部分はほとんど認められず水冷鉄型を使用するため柱状晶が側面からただちに斜上方またはほとんど垂直上方に発達しているのが認められる。これは炉内圧に關係ないようである。第6図に 18-8 不锈鋼の 50 mmHg アルゴン中および 10⁻² mmHg 真空中コンセル熔解材のマクロ組織を示した。

第6図 各種圧力中で熔解せる
18-8ステンレス鋼のマクロ組織第7図 30ガウスの磁場下各種圧力中
でコンセル熔解せる SS-41
のサルファープリント第8図 空気中熔解およびコンセル
熔解 Ni-Mo-V 低合金鋼
のサルファープリント^{⑥)}

(b) サルファープリント: SS-41を用いた筆者らの研究では硫黄偏析は鋸塊頭部を除いては一般に認め難いようである。しかし磁場を作成させて熔解操業をした場合にはことなつた結果が得られているのでまだ充分な結論を述べることは困難な状態にあると思う。参考のため第7図に30ガウスの磁場を作成させた場合のサルファープリント写真の一例を示す。

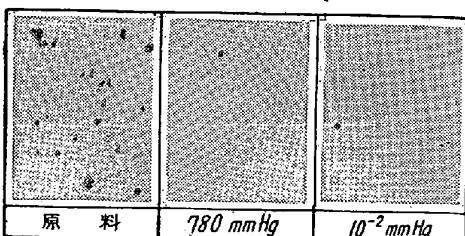
W. W. Dyrkaczなど^⑨は Ni-Mo-V低合金圧延鋼材で試験した結果、空気中熔製材のものに比しコンセル材は第8図に示すごとく硫黄偏析がなく硫化物系不純物が減少するという結果を得ている。

(c): 体積的欠陥

多くの試験結果から、コンセル熔解のものは一般に体積的欠陥の少ないものが得られると結論される。しかしある種の材質については電極製造条件、熔解操業条件によつては体積的な欠陥が鋸塊表面のみならず内部にまでいちじるしく多数発生することが見受けられるのでその対策が必要である。なお Hot topping が容易に実施できるので Shrinkage hole がほとんどないかあつても鋸塊頭部近くの小さいものにすることが可能である。

(d) 非金属介在物の顕微鏡測定

ニモニック 80 について著者の研究結果を示すと第9図のとおりである。W.W. Dyrkacz によつても同様に報告されている。非金属介在物を顕微鏡でしらべると高真空度のものが 780 mmHg アルゴン中溶解したものより多く減少しているのが認められる。

第9図 非金属介在物分布状況 $\times 400$ (2/3)
(ニモニック 80)

(e) 鋸塊の化学分析

コンセル熔製鋸塊には偏析が一般に認められない。化学成分のうち Mn, S およびガス成分の減少が真空熔解したものに認められる。第13表にニモニック 80 インゴット中の酸素、窒素、水素分析値の比較表をかかげた。この傾向は非金属介在物の顕微鏡試験結果からも推定されるところである。

第13表 ニモニック 80 インゴットのガス含有量

	O (p.p.m)	N (p.p.m)	H (p.p.m)
Air melt	76	112	5
780 mmHg Ar 中メルト	45	78	tr.
10^{-2} mmHg メルト	23	41	tr.

Edwad A Lorica^⑩は W. W. Dyrkacz のコンセル熔解実験結果を引用し真空高周波熔解結果とのガス減少程度の比較を試みている。これを整理すると第14表のとおりである。

これによると空気中熔製材を消耗電極としたコンセ

第14表 各種耐熱材料のガス含有量 (p.p.m)

材 質	熔 解 法	O	N	H
A-286	空 気 中 熔 解 電 極	13.0	300.0	13.1
	コンセル 真空 熔 解	5.0	20.0	2.8
	真 空 高 周 波 熔 解	3.0	50.0	2.3
Waspaloy	空 気 中 熔 解 電 極	31.0	420.0	17.2
	コンセル 真空 熔 解	2.0	120.0	2.2
	真 空 高 周 波 熔 解	3.0	120.0	2.3
M-252	空 気 中 熔 解 電 極	15.0	160.0	16.0
	コンセル 真空 熔 解	6.0	40.0	1.7
	真 空 高 周 波 熔 解	5.0	30.0	1.5

第15表 真空熔解、真空脱ガスの種々の方法の比較*

	熔解条件			熱間加工性	ガス含有量 (p.p.m)	製品の特長		
	温度	圧力	熔解時間			清浄度	偏析	物理的性質
空气中熔解	1370°C 1700°C	1気圧	2 h 3 h	僅かに良好 稍々良	H ₂ 4~20 O ₂ 10~150 N ₂ 30~500	稍々良	普通	普通
真空脱ガス	1370°C 1700°C	熔解:1気圧 脱ガス: 0.5~ 10 mm	1/2 h ~ 4 h (40~50 t の鋼で)	稍々良 良	H ₂ 1~4 O ₂ 10~40 N ₂ 40~120	稍々清浄 ~ 清浄	普通	5~50% 改善される
真空高周波熔解	1370°C 1700°C	1~100 μ	1~5 h	良	H ₂ <1 O ₂ 4~10 N ₂ 3~50	非常に清浄	普通	20~200% 改善される
真空アーケ 再熔解	空气中 熔解電極 1370°C		15mn	良	H ₂ 1~2 O ₂ 6~30 N ₂ 40~100	清浄	比較的 に無い	10~100% 改善される
	真空高周 波熔解電 極 4720°C	5~500 μ	30mn	非常に良好	H ₂ <1 O ₂ 1~5 N ₂ 2~20	極めて清浄		30~300% 改善される

* A. M. Askoy, Vacuum Metals Corp. よび H. Gruber の論文より引用, (日本特殊機械 K.K. 堀氏の提供による)

ル熔解材の酸素, 窒素, 水素の減少程度は高周波熔解材のそれと大同小異である。筆者らの研究結果もこの傾向を示しているが Gruber の報告するところによると高周波真空熔解材の方が一般によいようである。また理論的にも当然なことながら真空高周波熔解材を消耗電極とした場合のコンセル熔解材が最もガス減少がいちじるしくなるとしている。第15表に Gruber の結果を示した。

(4) 機械的性質

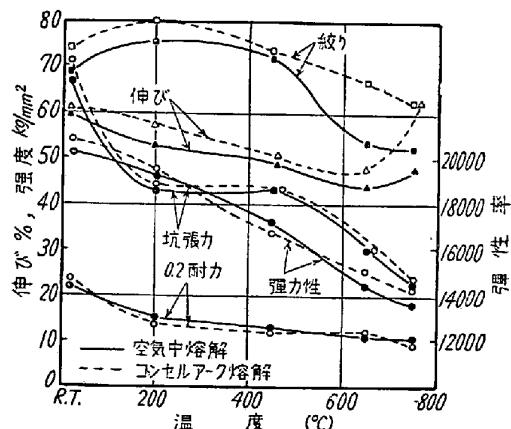
コンセル熔解せる各種金属材料は上述せるごとき特長をそなえるため、その機械的性質、クリープ性質、熱間加工性質その他の諸性質に普通熔解法ではみられない幾多の特長を示す。本項では筆者および外国でおこなわれたコンセル材のこれら諸性質に関する研究結果を述べることとする。

(a) 常高温短時間抗張性質

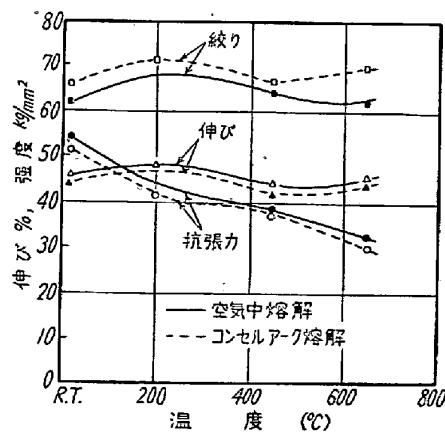
筆者らは各種のステンレス鋼について空气中熔解材とコンセルアーケ材の常温および高温短時間抗張試験をおこなつた。第16表は常温抗張性質を第10, 11図に AISI 304 および 316 L ステンレス鋼の短時間高温抗張試験結果を示す。

これ等の結果、常温試験では強度、伸びについては両者にほとんど差が認められないが絞りについてはコンセルアーケ材の方が少しではあるが常に大きい。

高温においても強度はほとんど変わらないが、韌性はコンセル材の方がやや良好である。第17表に Allegheny



第10図 AISI 304 ステンレス鋼の短時間高温抗張性質



第11図 AISI 316 L ステンレス鋼の短時間高温抗張性質

第 16 表 各種ステンレス鋼の常温抗張性質

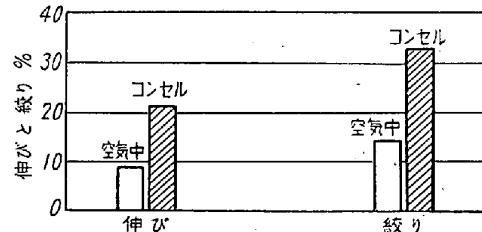
鋼種	種別	抗張力 kg/mm ²	0.2%耐力 kg/mm ²	伸び G. L. 50 mm %	絞り %
AISI 304	空気中熔解材 コンセルアーク材	67.8 70.5	22.0 22.8	60.4 59.3	68.6 73.3
AISI 316L	空気中熔解材 コンセルアーク材	54.5 51.6	21.0 17.8	44.3 45.7	62.0 66.2
AISI 347	空気中熔解材 コンセルアーク材	50.3 50.3	26.7 23.9	64.2 60.0	73.0 76.5
E 312	空気中熔解材 コンセルアーク材	74.7 73.4	58.2 51.0	31.6 37.6	57.5 63.2

第 17 表 SAE 4340 ピレットの常温抗張性質⁶⁾

種別	抗張力 kg/mm ²	0.2%耐力 kg/mm ²	0.02%耐力 kg/mm ²	伸び %	絞り %
空気中熔解 300 mm φ ピレット	108.2 133.1 206.5	101.0 123.6 150.9	96.2 119.0 118.2	11.0 6.7 4.0	33.2 19.0 6.3
コンセルアーク材 265 mm 中 ピレット	109.9 131.6 184.8	98.0 120.1 149.8	95.9 107.8 121.8	12.0 8.0 6.7	43.9 33.8 13.3

Ludlum Corp. でおこなつた普通熔解およびコンセル熔解せる SAE 4340 ピレットの横方向の常温抗張試験結果⁶⁾を示す。試料は各種強度に熱処理をおこなつてゐる。これより横方向の抗張性質において抗張力、耐力は両者ほとんど変りないが靭性、とくに絞りがコンセル材がいちじるしく改善されるのが分る。

耐熱材料のコンセル熔解は米国などで多くおこなわれ今後発展の可能性の大きい分野の一つである。A-286は Ti, Al を含有するためコンセル熔解による材質の改善がとくにいちじるしい鋼種である。A-286 鍛造材の中心部より採取した試料の横方向の抗張試験結果を第 12 図に示すが、靭性の改善が顕著である。また著者らは Timken 16-25-6 をコンセル熔解したがこの材料はいわゆる hot cold work して用いられるのが普通である。800°C で 15% h.c.w. した材料の常温抗張性質を第 18 表に示すが強度、靭性ともにコンセルアーク材の方が大きく、とくに靭性の改善がいちじるしい。



第 12 図 空気中熔解およびコンセル熔解せる A-286 ピレット中心部の横方向靭性
試材は H_{RC} 30 に時効処理⁶⁾

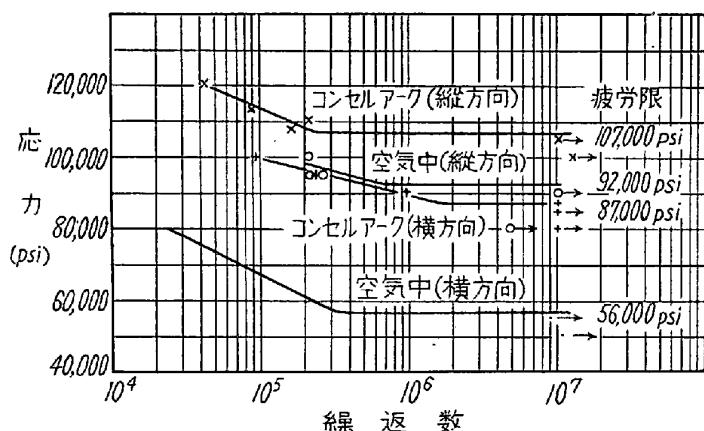
要するに短時間抗張性質においてはコンセル熔解によつて強度はほとんど変らないが靭性の改善される傾向があり、とくに横方向の性質の改善が明かである。

(b) 疲労性質

一般に金属材料は真空熔解により疲労性質が改善されるといわれている。第 13 図に SAE 4340 ピレットの空気中熔解材とコンセル材の縦方向および横方向に採取

第 18 表 空気中熔解およびコンセル熔解 (100 mmHg Ar 中)
Timken 16-25-6 の常温抗張性質

処理法	種別	抗張力 kg/mm ²	耐力 0.2% kg/mm ²	伸び %	絞り %
h. c. w.	空気中熔解材 コンセルアーク材	92.2 94.3	75.7 77.7	18.6 24.9	29.2 38.9



第13図 空気中熔解およびコンセル熔解 SAE 4340 ビレットの疲労性質⁶⁾

した試料の疲労曲線⁶⁾を示すが疲労限はいずれもコンセル材が改善され、かつ方向による疲労限の差が少くなっている。

(c) クリープ性質

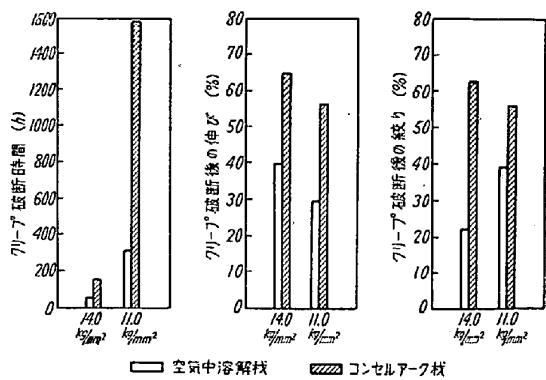
真空熔解材の大きな特長はクリープ性質の改善である。筆者らが熔製したコンセル材についても空気中熔解材に比しいちじるしくクリープ性質が改善されるのがみられた。第19表に AISI 304 と AISI 316 L の 650°C におけるクリープ破断試験結果を示した。

第14、15図は同試験結果の破断時間、破断後の伸び、絞りを図示したもので AISI 304 については応力 14 kg/mm² の場合コンセル材の破断時間、破断後の伸び、絞りは空気中熔解材のそれぞれの 3.5 倍、1.6 倍、2 倍に増大する。応力 11 kg/mm² の場合はそれぞれ 5 倍、1.9 倍、1.5 倍に増大する。また最小クリープ速度もコンセルアーク材は常に空気中熔解材よりも小さい値を示している。

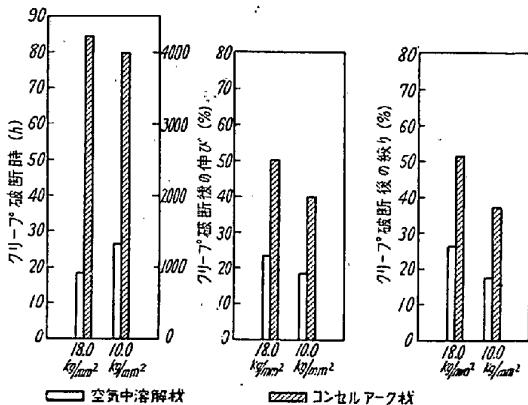
316 L ステンレス鋼についても、応力 18 kg/mm² の

第19表 空気中熔解およびコンセル熔解ステンレス鋼のクリープ破断試験結果

鋼種	種別	応力 kg/mm ²	最小クリープ 速度 %/h	破断時間 h	破断後の伸び %	破断後の絞り %
AISI 304	空気中熔解材	17.0	2.13	9.6	40.0	55.0
		14.0	0.723	45.0	40.0	32.0
		11.0	0.087	317.8	30.0	39.0
		9.6	0.005	3100.0 中止	—	—
	コンセルアーク材	14.0	0.176	154.5	65.0	63.0
		12.5	0.050	513	53.0	36.0
AISI 316 L	空気中熔解材	11.0	0.020	1578.4	57.0	56.0
		22.0	3.23	8.6	51.7	53.4
	コンセルアーク材	18.0	0.725	18.4	23.3	26.3
		10.0	0.0365	1156.3	18.3	17.5
		18.0	0.359	84.8	49.0	40.0
		10.0	0.00495	3977.7	40.7	37.1



第14図 AISI 304 ステンレス鋼の 650°C におけるクリープ破断試験結果



第15図 AISI 316 L ステンレス鋼の 650°C におけるクリープ破断試験結果

場合、コンセル材の破断時間、伸び、絞りはそれぞれ空気中熔解材の 4.5 倍、2.2 倍、2 倍に増大し、応力 10 kg/mm² の場合はそれぞれ 3 倍、2.2 倍、2.1 倍に増大するのがみられた。また Timken 16-25-6 のコンセルアーク材および空気中熔解材の 800°C において 15% の hot cold work せる材料のクリープ破断試験結果を第20表に示すが、破断時間が応力 35 kg/mm²、27

第 20 表 Timken 16-25-6 の 650°C におけるクリープ破断試験結果

処理法	種別	応力 kg/mm ²	破断時間 h. mn	破断後の伸び %	破断後の絞り %
h. c. w	空気中熔解材	35 27	42° 08' 299° 30'	25.7 33.7	42.4 54.8
	コンセルアーク材	35 27	120° 40' 524° 25'	25.0	45.1 56.7

kg/mm², いずれの場合も 2~3 倍に増大しているのが見られる。

かくのごとく二、三の材料について高温クリープ破断試験をおこなつた結果, 常温における短時間引張強度には大差のない材料についても長時間試験をおこなえば顕著にコンセル材の材質の改善が現われる。

(d) 熱間加工性質の改善

これまでにのべたごとく, コンセル熔解によって非金属介在物の少く清浄度の高いインゴットが得られまたその組織は layer by layer に凝固するため, 連続铸造状の組織となる。このためコンセル材の熱間加工性が改善される。



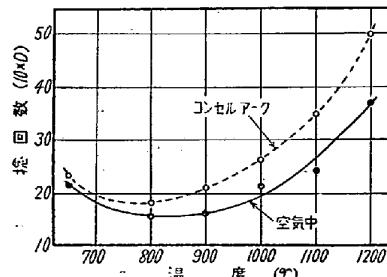
第 16 図 G-157 航空機用バルブの鍛造性比較⁶⁾

左: 空気中熔解材 右: コンセル材

耐熱材料 G-157 の航空機用バルブの鍛造に際して第 16 図に示すとく空気中熔解材は割れを生ずるが, コンセル材は割れを生じないという報告⁶⁾がなされている。また著者らは AISI 316 L の空気中熔解材とコンセル材の熱間加工性を比較するため 650~1200°C において両者の高温捻回試験をおこなつた。捻回速度は 30 rpm と 128 rpm の両者についておこなつたが, その結果は第 17, 18, 19 図のごとく捻回数, トルクともに常にコンセル材の方が大きく, これはコンセル材の熱間加工性の改善を示すものといえよう。

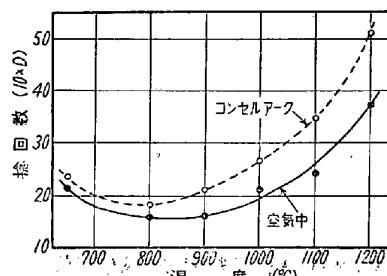
V. 応用例

著者らはコンセルアーク熔解を工業的に応用し, 実際に各種製品をつくりつつあるが, つぎにその二, 三の例をのべる。



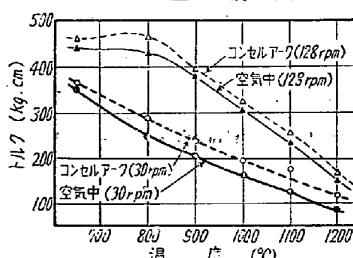
第 17 図

AISI 316 L の捻回数一温度曲線
(30rpm)



第 18 図

AISI 316 L の捻回数一温度曲線
(128rpm)



第 19 図

AISI 316 L のトルク温度曲線
(30, 128rpm)

(a) SAE 4340 によるねじり軸の製造

SAE 4340 は, これまで電気炉により製造し高強度を必要とするクランク軸, ねじり軸などに使用されているが, 使用条件が厳格となるにつれ, 時にはその表面にあらわれる砂疵が問題となることがある。

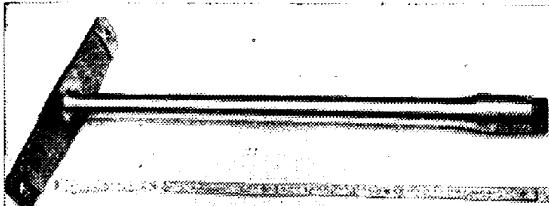
約 300 kg の鋼塊をコンセルアーク熔解し, それより高速車輌用ねじり軸を製造した。その実体より採取せる機械的性質は第 21 表のごとくである。

製品に完成後, 磁気探傷試験をおこなつたが砂疵などの欠陥は全く検出されなかつた。普通熔解法によつても勿論良好な製品は生産されているが砂疵の皆無と云うのは今まで例を見なかつたところであり, コンセルアーク材の清浄度の向上を示すものである。この製品は実地に取付け実用運転されつゝある。製品の外観を第 20 図に示す。

(b) E312 熔接棒の製造

第21表 ねぢり軸実体附属試験片の機械的性質

機械的性質 種別	抗張力 kg/mm ²	耐力 kg/mm ²	伸び G.L. 50 mm %	絞り %	シャルピー値 kg·m/cm ²
規 格	>100	>90	>16	>45	>7
試 験 片	109.1	100.1	20	61	15.3

第20図 コンセル熔解 SAE 4340 にて製作
せるねぢり軸

E312はその標準成分が29%Cr, 9%Niを含有するステンレス鋼でCr含有量が多いため、フェライト量が80%といわれ熱間加工性がきわめてわるい。これは近時タービンブレードとディスクなどの耐熱材料の熔接用として用いられはじめたものである。

著者らは本材料をコンセルアーク熔解して約400kgのインゴットを作成した。その電極材とコンセルアーク材の化学成分は第22表のごとく酸素量が減少し、かつ非金属介在物は第21図のごとくコンセル材が明瞭に少い。本材料を鍛造して圧延用ビレットとし、当社のモルガーシャマー連続圧延機にて7mmφロッドに圧延したが途中割れを発生することなく良好なロッドを製造し得た。

ロッドは、その後伸線し、熔接棒芯線として実用され

空気中熔解材
第21図 E-312ステンレス鋼の非金属介在物

第22表 E312の電極材とコンセル材の化学成分

化学成分 種別	C	Mn	Si	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	N ₂	O ₂
電極材	0.109	1.72	0.29	0.016	0.012	0.06	9.65	30.33	0.04	0.044	0.024
コンセル アーク材	0.106	1.48	0.35	0.022	0.019	0.07	9.73	30.78	0.03	0.044	0.013

ている。

本鋼種のごとき、きわめて加工性の悪い材料もコンセル材と最新の連続圧延機の組合せにより工業的に生産し得る例として記した。

VII. 結 言

金属製造分野における真空の応用は最近急速に進歩しつゝあり、とくに高性能を必要とする分野には真空熔解材が、今後ますます多量に使用される傾向にある。

筆者らはその熔解法の一つたるコンセル熔解について歴史的発展経過、熔解法の特長ならびに熔解材の諸性質について述べたが、本熔解法がきわめて将来性に富むことはこれよりも明かであろう。しかしながら本熔解法が実用されはじめてよりなお口が浅く、まだ幾多の問題をふくんでおり、著者らはその解決に日々努力しているところである。この方面の仕事に従事され、あるいは興味を持たれる方々に本小文がいさかなりとも御参考になれば幸である。

最後に、筆者等が行つたこれらの研究については、東北大学名譽教授岩瀬慶三先生、京都大学名譽教授西村秀雄、沢村宏両先生、京都大学小川和彦、盛利貞両先生および東京大学名譽教授三島徳七先生をはじめ諸先生の御指導を頂いた。ここに厚く感謝の意を表します。

(昭33-10月寄稿)

文 献

- W. W. Dyrkacz: J. of Metals 9, No. 12 (1957) p. 1513
- 高尾、草道: 特許出願、昭30-19500
- W. E. Kuhn: Arcs in Inert Atmospheres and Vacuum, The Electrochemical Society, John Wiley & Sons, N.Y. 1956. p. 1
- C. T. Evans: Utilization of Heat Resistant Alloys, American Society for Metals 1954, p. 148
- Metallurgia: March 1958 p. 139
- W. W. Dyrkacz et alii: Arcs in Inert Atmosphere and Vacuum p. 97
- 井街仁、林主税: 日本国学会誌 20 (1956) No. 5 p. A-115
- 中司正夫: 鉄と鋼, 44 No. 7 (1958) p. 768
- Edward A. Lorica: Blast Furnace & Steel Plant, 46 No. 1 (1958) p. 73