

特 別 講 演

ステンレス鋼高合金の真空溶解と冶金学的効果*

川 畑 正 夫**

Studies on Metallurgical Merits of Vacuum Melting of Stainless Steels and High Alloy.

Masao KAWAHATA

I. 結 言

鉄鋼をより広い分野に使用するためその性能を向上せんとする研究は鉄鋼の工業的な規模の生産が開始された18世紀から不断にわたって行なわれてきた。ステンレス鋼の場合においても古く1920年 M. FARADY による Fe-Cr 低合金鋼の研究に端を発し、R. A. HADFIELD, M. L. GUILLET 等の長年にわたる Fe-Cr, Fe-Ni-Cr 系の基礎的研究を基盤として低炭素フェクロムの開発と共に1920年頃より工業的規模において、クロム系、オーステナイト系ステンレス鋼の生産が開始された。その後鉄鋼材料としてのステンレス鋼の基本的な性能として、耐蝕性、耐熱性、溶接性、材料強度特性、加工性などの実用面からの基礎研究、あるいは開発研究の進歩とあいまって種々の改良が加へられ、あらゆる工業分野における性能要求に適合すべく実用鋼として進歩、改良が行はれてきた。

ステンレス鋼の工業生産方式においても前述の低炭素フェクロムの開発を契機とし、特に戦後の酸素製鋼法の開発は大型電気炉によるスクラップの大量使用を可能にし現在の大量生産方式の基盤をつくつたといつても過言ではないであろう。加工部門においても広幅帯鋼の熱間冷間連続圧延機、これにともなう各種連続式処理設備の発達、光輝焼鈍設備の発達など各分野における進歩とともに現在の量産化体制を確立したといえよう。

このような製造冶金部門における進歩は従来わが国のステンレス鋼の生長が化学工業の進展とともに生産資材として需要にささえられてきたものが、耐久消費材として大量消費の時代に転換しつつあるともいえる。しかしながら最近の工業界各分野における進歩発展はまことにめざましく、石油化学工業、原子力工業、重電機工業、航空機、ロケット材料の進歩開発は金属材料に極めて苛酷な性能を要求しつつある。したがってこのような情勢に

対処するため製造冶金学的な分野においても、材料冶金学的な分野においても不断の研究が要求される。真空溶解法もこのような情勢に適合すべく開発された一つの製造手段といふことができよう。

真空溶解法の起源は古く、当初は単に溶鋼を大気からの汚染を防止し溶解、造塊せんとする比較的単純な目標で着想されたが、真空機器の性能が充分でなかつたことが工業的な適用を阻害していたといえよう。その後真空ポンプなどの発達により1950年頃から真空鑄造法、誘導式真空溶解法、真空アーク溶解法など各種の真空精錬手段の工業的規模の開発を促し、1962年末現在わが国における設置稼働基数は、真空鑄造18基、誘導炉17基、アーク炉13基を数へり工業界各分野における貢献はいちぢるしいものがある。

弊社川崎製造所においても、昭和30年以来実験室的規模の真空アーク溶解炉、真空誘導炉を設置し主としてステンレス鋼、鉄基あるいはニッケル基各種耐蝕耐熱合金を対象として精錬冶金学的問題、あるいは真空冶金の金属材料学的な効果に対し系統的な研究を実施してきた。そして昭和37年1号真空誘導炉および3号真空アーク炉を設置稼働せしめ工業的規模の生産に移行した。

本稿ではステンレス鋼、高合金の真空溶解手段として用いられる誘導式真空溶解法および真空アーク溶解法について実施した精錬冶金学的研究および金属材料学的観点からみた両溶解法の特質について研究結果を概括的にとりまとめたものである。

II. 真空溶解法の精錬条件に関する 基礎的研究

* 昭和38年4月本会第48回通常総会における
渡辺三郎賞受賞記念特別講演

昭和38年11月26日受付

** 日本冶金工業株式会社川崎製造所副所長 工博

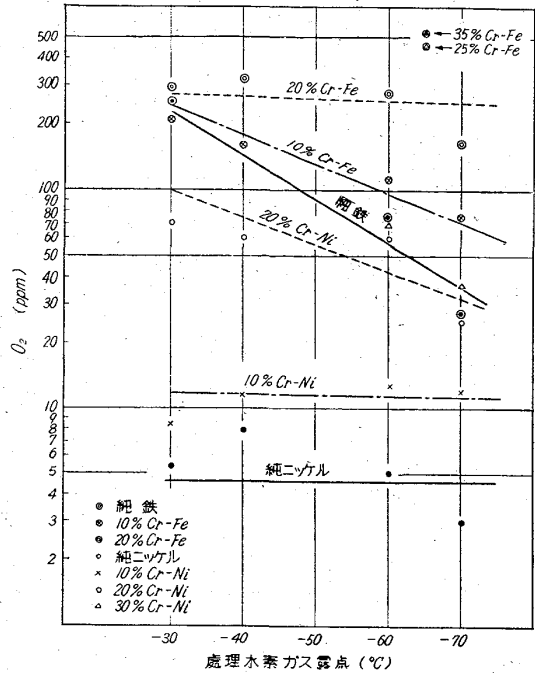
1. 誘導式真空溶解法の精練反応

誘導式真空溶解の精練条件の特質は脱酸、脱ガス反応などの平衡論的な反応ポテンシャルの増加、高真空下における不純元素の蒸発除去、あるいはこれらが **negative** に作用した条件としてルツボ反応などが基盤をなしている。さらにこれらの諸条件に速度論的な要因が入りその反応機構は極めて複雑なものである。筆者はまづ実験室的規模においてステンレス鋼、高合金の基本成分である鉄基、ニッケル基に Cr を含有する組成についてその精練機構について系統的な研究を実施した。

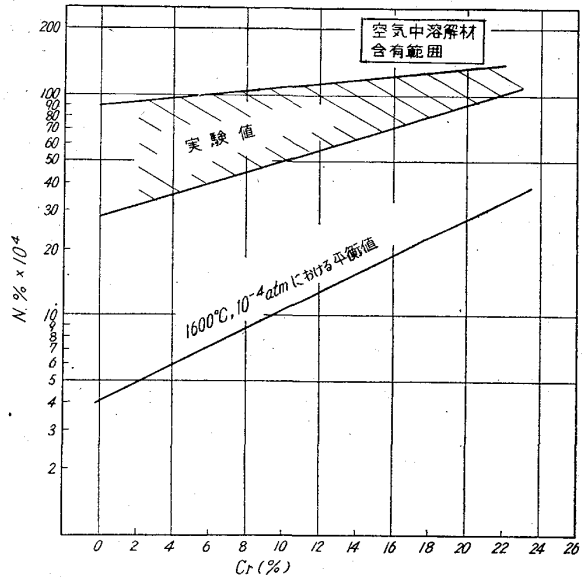
(i) 脱酸、脱ガス反応

通常の空气中精練溶解において脱酸、脱ガスの目的は Si, Mn, Al, Ti などの酸素あるいは窒素などと親力の強い元素を鋼浴中に添加し精練目的を達する。この場合溶鋼の凝固にあたって反応生成物を析出する。誘導式真空溶解の場合は反応生成物がガス体となる反応系を利用することにより反応ポテンシャルを増大し非金属介在物の少い清浄鋼の溶製が可能である。第1, 2図は鉄およびニッケル基に Cr を 0~20% 含有した実験組成合金に炭素および乾燥水素ガスで約一時間脱酸処理した後に鋼浴中に残留した酸素量を示したものである²⁾。

減圧下における $C + O = CO(g)$ 反応は 10mm Hg 程度の圧力範囲においては P_{CO} , 1atm 以上で求められた平衡恒数をそのまま延長適用して実測値と大きな差がないことを藤井³⁾, 前川⁴⁾ らの研究からあきらかにされている。本研究の場合、ニッケルあるいは鉄の基本組成

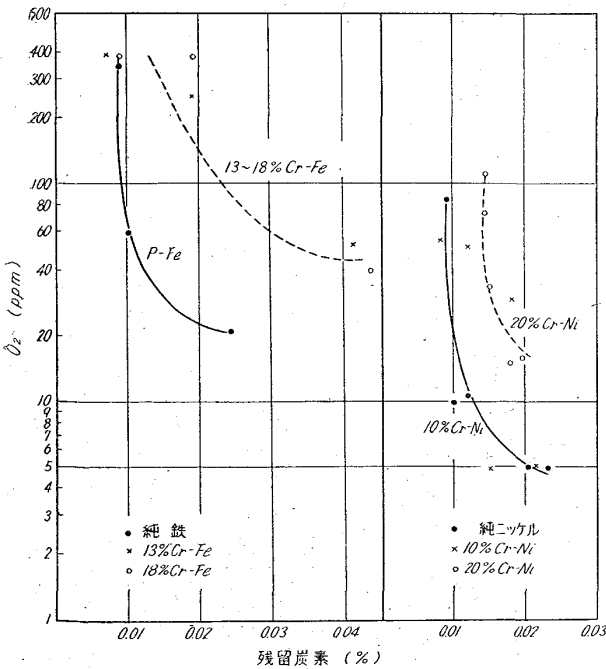


第2図 鉄-クロム, 鉄ニッケル合金の乾燥水素ガスによる脱炭効果

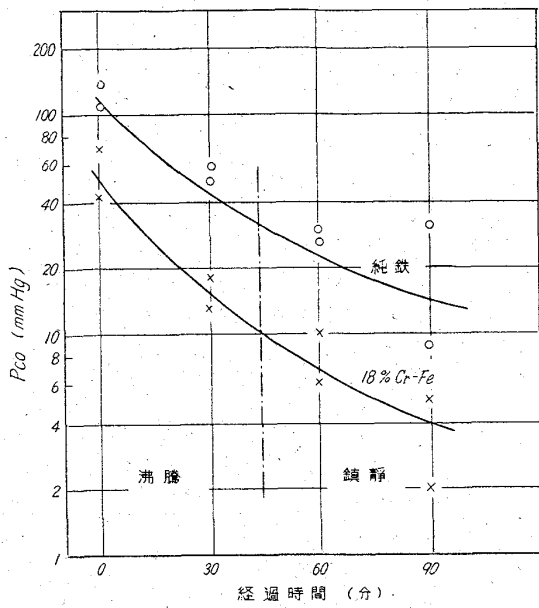


第3図 Fe-Cr 系合金の誘導式真空溶解による脱窒限の相違, Cr の溶鋼中の酸素の活量におよぼす影響などは平衡論的な諸条件に定性的には一致するが実測値は一気圧の平衡恒数から求められる値を著しく逸脱する。乾燥水素ガスによる脱炭の場合も H_2-H_2O 反応系から算出される酸素値より著しく高い値となる。脱窒作用も第3図に示すごとく最終到達値は溶解真空度を平衡圧として算出される理論値より著しく高いことが示される。

以上のことは脱酸、脱ガス精練効果はルツボ耐火材と溶鋼間の反応, CO 気泡の生成条件などの反応速度論的な条件を含めて解析されねばならないものと考えられる。

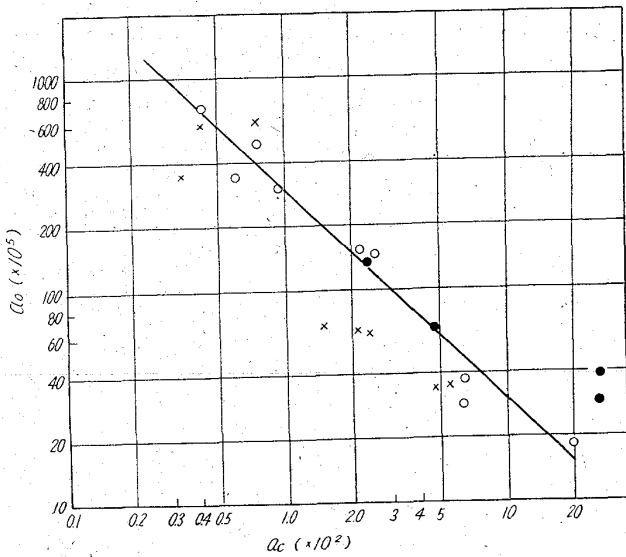


第1図 鉄-クロム, 鉄ニッケル合金の炭素添加による脱炭効果



○: 18% Cr-Fe, ×: 純鉄

第4図 純鉄および18%Cr-Feの誘導式真空溶解における炭素による脱酸過程の変化



○: 18-8 ステンレス(マグネシアルツボ)
 ×: 18-8 ステンレス(アルミナルツボ)
 ●: 純鉄

第5図 誘導式真空溶解におけるステンレス鋼, および純鉄の炭素酸素の活量の関係

(ii) 減圧下におけるC-O反応の速度論的考察

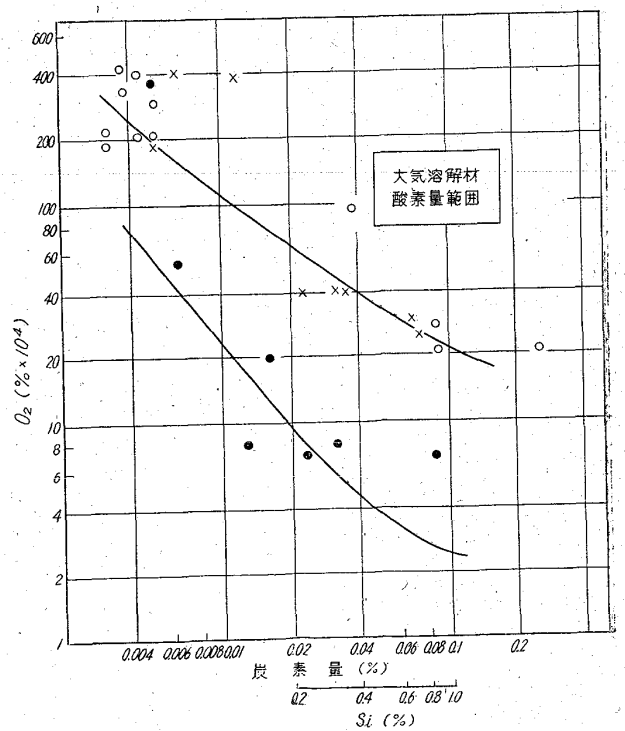
第4図は純鉄および18% Cr-Fe 組成について行つた精錬過程のC, Oの濃度変化および各精錬過程におけるC, Oの実測値からC, Oの活量を求めCO平衡圧の推移を示したものである。これからあきらかなように溶鉄中に酸素を多量に含有する溶解初期においてはCO圧の値は70mmHg程度を示し, CO Boilingにより酸素は急速に低下しCO圧も低下する。沸騰現象が終了した時期においては約10mmHg程度である。第5図はSi,

Mnなどを含有しない18Cr-12Niステンレス鋼および純鉄の炭素処理後のC, Oの活量の関係を示したもので, CO平衡圧は約10mmHg程度であることが確認される⁵⁾。

C, Oの減少比率は化学量論的な関係を著しく逸脱する。これはルツボ材からの解離酸素が酸素の大きな供給源となり炭素を消費し溶鋼中の酸素が定常状態を示す時期においてはルツボからの酸素の供給と脱酸速度がつり合った状態でほぼ一定の酸素量を示すものと断定され, この反応は誘導式真空溶解法の特質であるといえる。

CO平衡圧がこのような溶解質空度を逸脱する理由は丹羽⁶⁾, 藤井⁷⁾らのCO気泡核生成理論を導入することにより説明される。すなわちCO気泡核の発生および生成がルツボのrough surfaceにおいて行はれるものとすれば, 鋼浴上の圧力を真空状態に維持したとしても, ルツボの凹凸径に一致するCO気泡圧に対応する平衡圧が脱酸限度であるといえる。誘導式真空溶解におけるこのような反応機構はBENNETT⁸⁾等によつても支持され, 含Cr合金の場合も活量の概念を導入して従来の研究者と一致した見解がえられたことが確認された。

このように誘導式真空溶解法の精錬機構の特質は減圧下における平衡関係の移動を利用し, 十分な精錬時間を



○: 18-8ステンレス(マグネシアルツボ)
 ×: 18-8ステンレス(アルミナルツボ)
 ●: 純鉄(マグネシアルツボ)

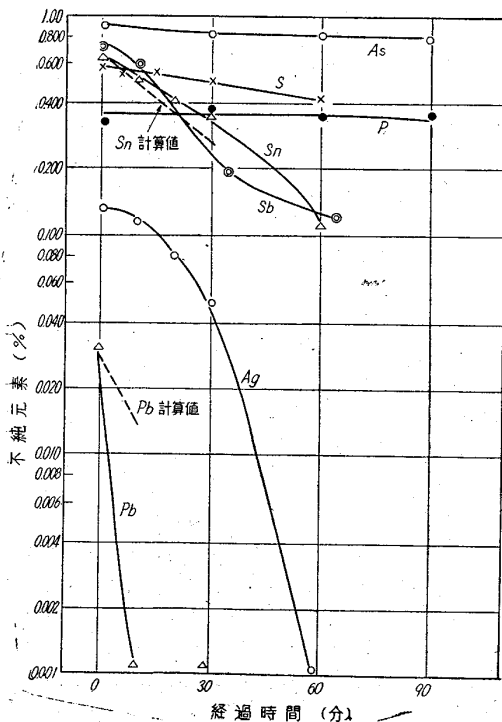
第6図 誘導式真空溶解におけるステンレス鋼, 純鉄の炭素による脱酸平衡

あたえて空气中溶解では到達しえない低ガス含有量，清浄鋼の溶解を可能にするものである。第6図はオーステナイト系ステンレス鋼について空气中溶解の場合と誘導式真空溶解法による材料を比較したもので空气中溶解材はSi量で整理し，真空溶解材は炭素量により整理し示したものである。着空溶解材で最も脱酸条件良好な場合において酸素は20ppm以下でSi, Mnなどを使用することなく空气中溶解材の1/10程度まで酸素を低下することができる。

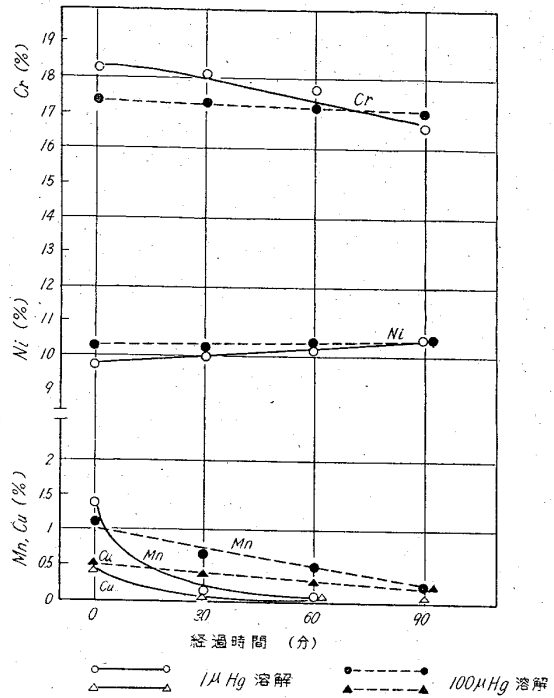
大容量の工業炉の場合の炭素による脱酸過程においても本質的な機構は本研究で得られた結果と一致するが，脱炭量と脱酸量の量比的関係は必ずしも実験炉の場合と一致しない。これは溶鋼量に対するルツボ表面積比の相違に起因するものであろう。

(iii) 溶解中における成分変動

誘導式真空溶解の精錬目標の一つは熱間加工性あるいは鋼塊の健全性を阻害する微量不純物の除去である。これは長時間高真空中に溶鋼をさらすことにより達せられる。第7図は鉄基に各種不純成分を添加し約1μHgの真空中で保持した場合のこれら元素の挙動を示した。第8図は市販オーステナイト・ステンレス鋼を1μHg, 100μHgの真空度で溶解した場合の組成変化を示した。すなわちS, Asなどは純粋系における蒸気圧は極めて高いにもかかわらず鉄溶液中からの蒸発除去はあまり行はれない。Cr, Mo, Cu, Ag, Pb, Sb, Snなどの諸元素は



第7図 誘導式真空溶解における溶解過程の鋼浴中の各種不純成分の推移



第8図 オーステナイト・ステンレス鋼の1μHgおよび100μHgの誘導式真空溶解における組成変化

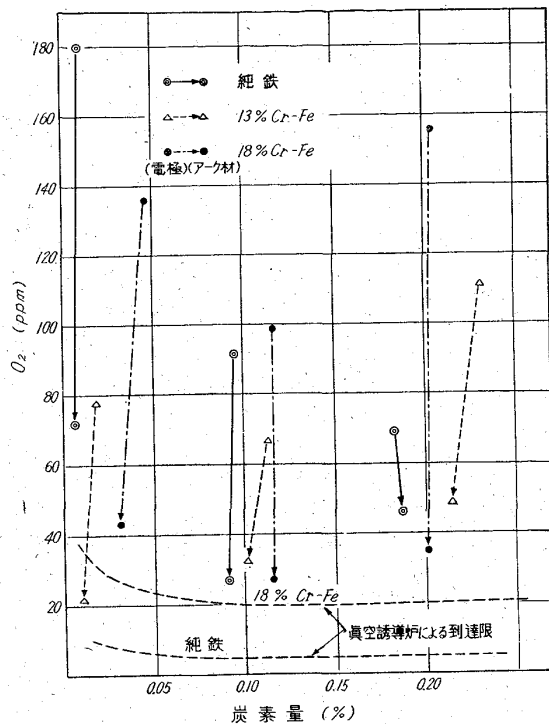
純粋系の蒸気圧あるいは活量係数から推定される蒸発傾向に概ね一致する。純粋系での蒸気圧の極めて低いNi, Co, Moなどは蒸発することなく鉄の蒸発損失により逆に富化する。すなわち誘導式真空溶解における各種元素の動向は一部の溶液中の熱力学的な性質の不明の元素を除いてはRaoultの法則を基盤としてその動向を考察しても大きなあやまりはないものと考えられる。

したがって誘導式真空溶解によりその蒸発反応から純化得去可能な元素はCu, Pb, Mn, AgなどでS, P, Sn, Asなどはある程度の蒸発純化は可能であるが極めて微量に含有された場合は徹底的な純化作用を期待することは困難であろう。また100μHg程度の真空下では十分な純化作用の目的は達せられないものと断定され誘導式真空溶解法の純化作用の限界ともいうことができる。

2. 真空アーク溶解法の精錬反応

真空アーク溶解法の精錬作用は一般に

- (イ) 金属ルツボ中で溶解が行われるため誘導式真空溶解の場合のような耐火材料による汚染のないこと。
- (ロ) 酸化物，窒化物などの電極材中に含有される介在物のアーク・プラズマ中における熱解離あるいはこれらの浮揚精錬による除去。
- (ハ) 浴融プール中におけるO-C反応による脱酸反応。
- (ニ) 水冷された銅ルツボ中の漸進的な凝固による鋼塊マクロ組織の健全化



第9図 小型真空アーク炉による脱炭効果

(ii) 微量不純物の蒸発による除去

などがあげられている。本研究は 2000 Amp の実験室規模の溶解装置および 8000 Amp の半工業的規模の溶解装置を用いステンレス鋼、高合金を対象として本溶解法の基本的な条件につき検討を行った^{10)~12)}。

(i) 脱炭脱ガス反応

まず 2000 Amp の実験炉を用い炭素量、クロム量を任意に変化させた電極を空气中で溶製して真空アーク溶解を行い、真空アーク溶解に際しての C-O 反応、あるいは基質組成の脱炭効果におよぼす影響などにつき検討した。第9図に純鉄、13% Cr, 18% Cr の各組成の電極材と真空アーク材の炭素および酸素の濃度変化を示した。この場合酸素量は各組成とも炭素量に関係なく 20~70 ppm の範囲の到達値を示す。炭素分析値の分析精度を考慮すれば、ほぼ C-O 脱炭反応の化学量化を満足しているといえよう。溶解中の溶解真空度の観察結果および低炭素組成の材料でも脱炭効果がえられたことは本溶解法の脱炭機構はプール中における C-O の平衡反応と介在物の浮揚効果両者の綜合作用と考えられよう。脱炭作用についてはオーステナイト系ステンレス鋼について N 0.010~0.15% の範囲に含有した電極材を再溶解しその効果を検討したが、窒素は酸素より除去され難く、電極中の窒素含有量に左右されることが確認された。このように真空アーク溶解法の脱炭反応が溶融プール中における減圧下の平衡反応が主体となるものであるとすれば

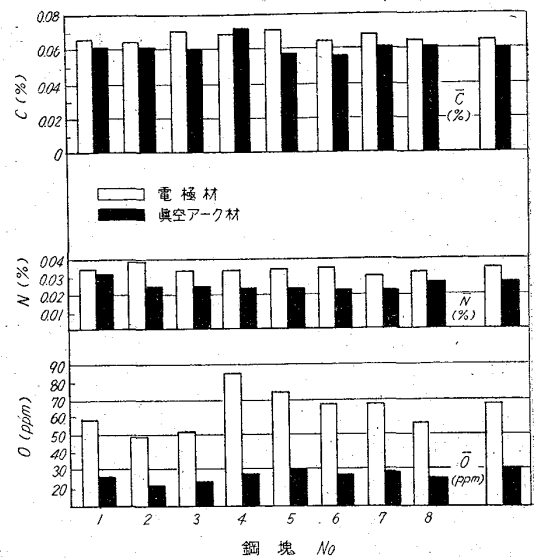


図10第 8000 Amp 真空アーク溶解による AISI-304 の脱ガス効果

溶解炉により炉の容量が変れば鋼が溶融状態でプールに保持される時間がことなるわけであり、以上の結果も定性的な見解であることを附云する必要がある。

次に 8000 Amp 半工業的規模の試験結果を述べる。10 坩堝塩基性電気炉にて 1 坩堝鋼塊 8 本に分注造塊し熱間鍛造、皮削りをへて 170mm ϕ の電極に加工し、250mm ϕ のモールドにアーク溶解を行った。第10図に C, O, N の電極材と真空アーク材の含有量変化を示した。これからあきらかなごとく大気溶解材の場合同一チャージから造塊した鋼塊にもかかわらず酸素量のバラツキは大きいこれを真空アーク溶解すると極めて効果的に除去される。また炭素量の減少はプール中における C-O の平衡反応の存在を示唆する。窒素は減少するが真空誘導炉のように効果的な脱窒効果は期待されず前述の実験炉による試験結果と一致した傾向がえられた。

以上真空アーク溶解法の脱炭反応の基本的な条件について考察したが本溶解法の特徴としては溶解過程が装置上の機能に依存することが多く、人為的な条件の介入する余地が少いことであり、良好な精錬効果をうるためには清浄な電極材を使用することが極めて重要であることが強調される。

(ii) 電極材中の不純物、合金成分の変動

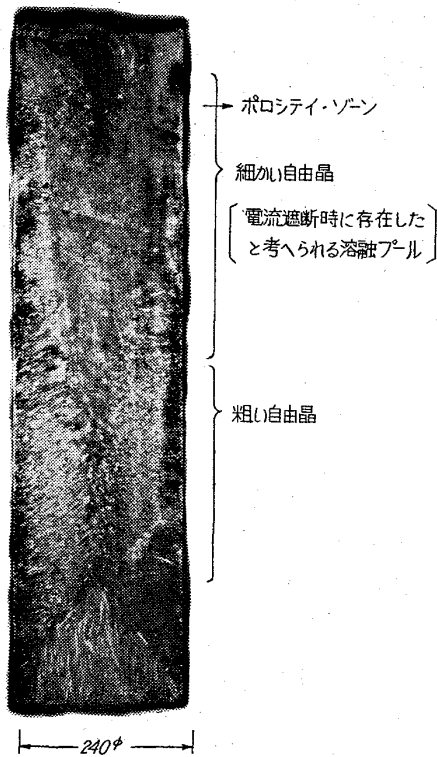
2000 Amp 実験炉により鉄基に Mn, Cu, Cr, Sn, Pb, As などを添加した電極材を再溶解し、これら元素の変動、蒸発除去の可能性を検討した。その結果 Mn, Sn はやや減少がみとめられ、Cr, Cu, As はあまり組成変化がみとめられなかつた。この蒸発傾向は誘導式真空溶解の場合ほどいぢぢるしいものではない。勿論ルツ

ポの外壁に蒸着した成分が溶融プールの上昇にともなつて再溶解される可能性も考えられるが¹²⁾根本的には真空処理の時間が短かく十分な蒸発時間がえられないことによるものかもしれない。前項 8000 Amp 溶解炉による AISI-304 の溶解に際しルツボに蒸着したものを分析した結果 Mn, Cr を主成分とし微量の C, S, Cu などが検出され実際作業にあつて問題となる成分変動は Mn のみを考慮すればよいであろう。

(iii) 鋼塊組織の健全化効果

真空アーク鋼塊は凝固条件が水冷された鋼ルツボで漸進的に進行するため理想的な凝固組織が得られるとされている。凝固組織に影響をあたえる因子としては、溶解電流、電極とルツボの径比、溶融プールの磁場攪拌の有無などであるといはれる。従つて溶解条件の設定にあつては溶解鋼種、爾後の加工工程、あるいは製品の用途を考慮して決定する必要がある。

写真1はニッケル基合金 500kg 鋼塊の縦断面マクロ組織を示したものである。blow holeなどの欠陥はなく極めて健全な組織で、鋼塊底部およびモールド外壁部は水冷モールドの冷却効果により約 50~60mm の柱状晶が鋼塊中心部に発達し、中央部は溶融プールの漸進的な凝固で自由晶で構成される。従つて真空アーク溶



C	Si	Mn	Ni	Cr	Fe
0.44	0.25	0.40	75	15	7.0

写真1 高 Ni 合金 500kg 真空アーク鋼塊の
マクロ組織

解法は、通常の造塊法では健全な鋼塊の得られ難い、Ti, Al などの活性元素を多量に含有する超耐熱合金に適用した場合、Ti の鋼塊偏析、ルーズ組織の解消に顕著な効果を示し、合金成分を均一化し、ストリンガーの主原因である酸化物、窒化物の偏析を改善する。

III. 真空溶解法の金属材料学的貢献

現在内外各社で真空溶解法により製造市販されている合金は工具鋼、ベアリング鋼、耐熱鋼、高合金耐蝕鋼、ステンレス鋼、磁性合金、電子管材料など極めて広範囲にわたっている。これらの合金を真空溶解の対称として考える場合その目的は次のごとくに分類して考へられる。

まず空气中溶解では合金そのものを製造することが不可能であり、真空溶解によりはじめて工業的生産が可能になったもの。これらの合金は航空機用耐熱鋼を主体としたものでいづれも Ti, Al などの活性元素を多量に含有し、真空溶解によらなければ熱間加工性が悪く製造が不可能な鋼種で Udimet-500, Inco-700, Waspalloy などエンジン用バケット、ディスク材料があげられる。真空溶解の開発により Ti などの強化元素を多量に合金化することが可能になり、耐熱鋼の性能をいちぢるしく向上した。

次に真空溶解の対象となるものは空气中溶解でも充分工業的に生産が可能であるが真空溶解を適用することにより品質が向上し信頼度も高まり、あらたな需要が期待され真空溶解への移行が有利と考えられるもの。例へばマクロ的な欠陥を特に規制した各種構造用材料として、航空機、原子炉用材料、ロール材など空气中溶解鋼から作られる品質では極めて苛酷な条件で、真空溶解の適用により安定した品質を保証できる。

以上の観点から真空誘導、アークの両者について金属材料学的な面からみた性能上の特質について考察する。

1. 高合金・耐熱鋼

誘導式真空溶解の精錬上の特質は前述せるごとく Si, Mn などの金属脱酸剤を使用しないでガス含有量の極めて低い材料がえられ、且つ Ti, Al などの活性元素を空気による酸化、窒化の影響をうけることなく多量適確に添加合金化することができるから、酸化物、窒化物などに起因するストリンガーによる製造上の障害を解消し、成分に影響をうける機械的性質の改善には極めて有効である。

この一例として著者は鉄基耐熱合金 A-286, および Incoloy-T についての真空溶解の高温特性におよぼす影響に関する研究を行い、その研究内容は既に当協会誌

第1表 真空溶解せるマルエージング鋼の諸性質

(1) 化学成分

名 称	化 学 成 分 (%)															溶 解 法
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Co	Mo	Ti	Al	Nb	Zr	B	N		
20%Ni	0.007	0.12	tr	0.009	0.026	20.40	—	—	1.52	0.16	0.40	0.16	0.003	0.008	真空誘導炉	
25%Ni	0.010	0.07	tr	0.002	0.024	25.29	—	—	1.49	0.13	0.39	0.05	0.006	0.006	〃	
18%NiCoMo180	0.015	0.13	0.02	0.010	0.019	19.49	7.75	4.60	0.22	0.06	—	0.06	tr	0.004	真空アーク炉	
18%NiCoMo210	0.016	0.12	0.03	0.008	0.020	18.61	9.28	5.05	0.41	0.06	—	0.06	tr	0.006	〃	

(2) 機械的性質

鋼 種	熱処理条件	耐力 (0.4) (kg/mm ²)	抗張力 (kg/mm ²)	伸 び (%)	絞 り (%)	衝撃値 (ft-lb)	硬 度 (Hb)
20% Ni	焼 鈍 調 質	72.3	106.0	14.6	62.1	61.0	321
		171.5	184.0	11.6	46.4	14.8	514
25% Ni	焼 鈍 調 質	40.2	82.8	28.4	70.2	95.0	201
		170.5	186.0	8.9	37.8	8.7	522
18%NiCoMo180	焼 鈍 調 質	66.5	116.4	12.8	46.2	36.2	354
		157.0	172.0	12.8	49.9	12.7	488
18%NiCoMo210	焼 鈍 調 質	77.9	111.9	13.8	49.7	36.8	341
		186.0	199.8	19.1	42.9	10.5	555

に発表したので詳細は割愛するが¹³⁾、結論としては真空溶解により高度の純化精錬をうけ高温靱性が改善される。この高温靱性の改善あるいは熱間加工性の改善効果を利用し更に強化元素を増加し高度の高温強度を具備する合金の開発が可能になったことである。

また最近開発された超高々張力鋼“マル・エージング鋼”も真空溶解の開発に負ふところが多い。該鋼種は標準熱処理状態において 200 kg/mm² 近い抗張力を有し且つ良好な靱性を保持している。第1表に当社真空誘導炉により試作した該鋼種の代表的な組成および機械的性質を示した¹⁴⁾。この鋼の特性は低炭素で且つ Si, Mnなどの合金成分以外の不純物を規制し、マルテンサイトの靱性改善を企図したもので真空溶解によりのみ得られる合金組成であるといえよう。

真空アーク溶解材のこの種合金に対する効果としては材料の均一性に対する信頼度を著しく向上する。A-286耐熱合金について大気溶解材と真空アーク溶解材400 kg鋼塊を供試材として、鋼塊中心部より素材をきり出し400mm φ × 100mm 厚の円盤に据込鍛造を行い、鍛造方向の交直両方向に外周部および中心部より試料を採取し 650°C において高温抗張試験を行った。その結果大気溶解鋼塊から鍛造したものは試料の採取方向、位置により試験直のバラツキは大きく、抗張力 50 kg/mm²、伸び 3~20% の範囲で、これに反し真空溶解試料は60~80 kg/mm²、8~20% の範囲で特に真空溶解材の伸びが

大きく、且つバラツキの少ないことが判明した。このように断面積の大きい機械的性質の改善、均一性に対しては極めて有効であるといえよう。

2. オーステナイト系ステンレス鋼

工業的な規模でみた場合ステンレス鋼に対し誘導式真空溶解法が充分活用されている段階とはいえない。しかし真空誘導炉の精錬上の特徴を利用して微量元素を制御し、大気溶解材では製造しえない高純度組成にした場合種々の特性が得られ、特殊な性能をあたえた合金が開発される可能性がある。

耐蝕鋼の用途として真空溶解鋼の効用がまだ充分開発されたとはいえないが、例へば真空誘導炉の精錬上の特性を利用し C < 0.01% に制御した場合、粒界腐蝕に対する完全な免疫性が得られる。またオーステナイト・ステンレス鋼は耐蝕用鋼として化学工業、化繊工業、原子力工業など広い分野で大量に使用されているが、応力腐蝕ワレに対しての完全な防止策は確立されていない。応力腐蝕ワレは腐蝕媒質中の塩素イオンが原因であり、且つ塩素イオンは不純物として普遍的なものであるからステンレス鋼を使用する場合の応力腐蝕ワレ防止策は最も厄介な問題である。応力腐蝕ワレ感受性に対し鋼中に微量に含有されている窒素が有害であることは広く認められている。第2表は空气中溶解市販合金と誘導式真空溶解により充分脱窒した材料の 42% 沸騰塩化マグネシウム溶液中において 25 kg/mm² の一定荷重をあたえ、破

第2表 誘導式真空溶解せる高純度 AISI-304 と市販材大気溶解材との耐応力腐蝕性の比較

試料 No.	溶解条件	化 学 成 分 (%)								破断までの時間 (h)
		C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	Cu	N	
A-7	誘導式 真空溶解	0.085	0.41	1.49	20.01	17.87	—	—	0.007	300h 以上で 破断せず
A-9		0.054	0.54	1.48	20.04	17.60	—	—	0.010	
A-10		0.091	0.39	1.56	19.70	17.60	—	—	0.005	
A-15		0.100	0.64	1.52	19.84	18.26	—	—	0.010	
F-1	空气中溶解	0.056	0.54	1.91	22.02	17.72	—	—	0.025	34.5
F-2		0.138	0.71	1.49	20.87	24.97	0.14	0.07	0.025	25.4
F-3		0.052	0.51	1.54	29.42	20.03	2.61	3.31	0.042	72.1
F-4		0.098	0.48	1.99	9.21	19.21	—	—	0.027	2.5
F-5		0.075	0.61	1.66	26.90	15.89	1.28	—	0.018	63.0

断までの時間を測定した結果であるが、真空溶解材は完全な耐応力腐蝕性が示される。ステンレス鋼でN<0.010%に制限することは真空誘導炉によりはじめて到達可能な組成条件であり、今後の耐応力腐蝕鋼として開発が期待される。

原子力工業の分野においても、ステンレス鋼を原子炉

構造用材料あるいは炉心用材料として使用する場合には一般の構造用ステンレス鋼として物理的、化学的ないしは機械的性質の他に原子炉工学的特性、すなわち中性子吸収断面積、照射損傷特性さらに誘導放射能の強さなどを考慮しなければならない。通常の市販ステンレス鋼に含有される Mn, Co, Ta などの元素は中性子吸収断面

第3表 AISI-304, 321 の空气中溶解材, 真空アーク溶解材の諸性質の比較

(1) 地疵試験 (AISI-304)

溶解法	試料採取位置	段	砂 疵 長 さ (mm)										判定結果	
			0.1 ~0.4	0.5 ~0.9	1.0 ~1.9	2.0 ~2.9	3.0 ~3.9	4.0 ~4.9	5.0 ~5.9	6.0 ~6.9	7.0 ~7.9	8.0 ~8.9		
大気溶解	鋼塊 中心部	1	174	7	2	0	0	0	0	0	0	0	0	C 8 C 6 C 11
		2	113	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
		3	125	6	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
真空アーク溶解	鋼塊 頂部	1	4	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	D-4 A-0 A-0
		2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
		3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	鋼塊 中心部	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	A-0 A-0 A-0
		2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
		3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

(試験片 100φ billet, 第一段 94φ, 第二段 66φ, 第三段 50φ)

(2) 機械試験

溶解法	鋼種	抗張力 (kg/mm ²)	伸 び (%)	硬 度 (HB)	備 考	
大気溶解	AISI-321	63.0	51.6	157	950°C 1時 水冷	
		62.5	51.8	158		
		62.6	52.2	161		
		62.4	52.0	160		
真空アーク溶解	AISI-321	62.9 63.1	51.8 50.8	156 158		
大気溶解	AISI-344	61.0	63.4	153		1050°C 1時間 水冷
		61.2	64.4	150		
真空アーク溶解	AISI-304	61.2	64.0	145		
		61.1	65.0	148		

(3) 腐蝕試験

鋼種	溶 解 法	Huey test (g/m ² /h)		40% HNO ₃ (g/m ² /h)		Strauß test
		950°C 1時間水冷	950°C 水冷 +650°C 2時間空冷	950°C 1時間水冷	950°C 水冷 +650°C 2時間空冷	950°C 水冷 +650°C 2時間空冷
AISI -321	大 気 溶 解	0.44	1.66	0.16	0.15	180°C 曲げOK
	真空アーク溶解	0.38	1.18	0.16	0.15	180°C 曲げOK
AISI -304	大 気 溶 解	0.22	—	0.17	—	—
	真空アーク溶解	0.19	—	0.17	—	—

積が大きく、半減期の長い同位元素に変るため好ましくない。真空誘導炉により溶解原料を厳選し Mn の高蒸発性を利用して痕跡まで除去純化した材料は原子炉工学上特異な性能を発揮する。

以上は真空誘導炉の精錬反応の特殊性を利用し、組成あるいは純粋度の制御を行い極めて高性能な特性を合金に与えた例であり、誘導式真空溶解の材料学的貢献といえることができる。

真空アーク溶解法によるステンレス鋼の効用は清浄性の改善と材料強度の均一性であろう。通常の構造用材料としての用途に要求される高温クリープ強度、室温における機械的性質などの諸性能は多くの場合空气中溶解材によっても充分その性能は保証される。しかしながら極度に材料の清浄性と信頼性を要求される材料、例へば航空機材料、鏡面研磨板のような場合には真空溶解によらなければ検査歩留をいちぢるしく低下し、事実上空气中溶解では製造不可能である。このようなマクロ的な品質の向上手段としては真空誘導炉より真空アーク材の方が優れている。

第3表は AISI-304 500 kg 鋼塊を2本空气中溶解により造塊し、1本はそのまま 100mm φ ピレットに鍛造し、1本は真空アーク溶解を経て同様の熱間鍛造を行い地疵試験、機械試験、腐蝕試験を行なった。両者で機械的性質、耐蝕性に大きな差は認められないが、地疵は真空アーク溶解により皆無となる。

IV. 結 言

以上、ステンレス鋼、高合金を対象として誘導式真空溶解法、真空アーク溶解法の両者の精錬反応の特質および金属材料学的な効果につき展望した。

両溶解法の特徴を充分認識して適用することが極めて

重要である。真空誘導炉はその精錬条件からあきらかなように、成分ないしは純度に影響をうける金属材料学的な性能の向上に対しては大きな武器となるであろう。真空アーク溶解法は鋼塊組織の均一性、健全性、清浄性が大きな特徴であり且つ容量的な制約をうけないという溶解炉の特質から考へて、偏析または組織に敏感な機械的性質の改善、断面の大きいピレット、構造用材料の信頼度を向上するであろう。

幸協会においても新技術開発部会の一分子会として真空冶金分科会が設置され、参加各社の技術的な利害を超越し、情報、経験を交換しわが国真空冶金技術の進歩発展に貢献していることは同慶の至りである。

金属材料の性能向上が工業界各分野における進歩にいかにか大きな要素をしめるかは論をまたないところであり真空溶解材の特性を充分認識されるとともに今後の研究開発を祈念しつつ拙文を結びたい。

文 献

- 1) 長谷川: 鉄と鋼, 49 (1963) 5, p. 797
- 2) 川畑: 鉄と鋼, 47 (1961) 5, p. 715
- 3) 藤井: 鉄と鋼, 46 (1960) 3, p. 285
- 4) 前川: 鉄と鋼, 48 (1962) 10, p. 1685
- 5) 渡辺: 鉄と鋼, 47 (1961) 12, p. 1670
- 6) 藤井: 鉄と鋼, 46 (1960) 1, p. 12
- 7) 丹羽, 学振19委—4668
- 8) G. H. BENNETT: J. Iron & Steel Inst. (U.K.) 195 (1960), p. 174~180
- 9) 川畑: 鉄と鋼, 46 (1960) 10, p. 1423
- 10) 川畑: 鉄と鋼, 48 (1962) 3, p. 390
- 11) 川畑: 鉄と鋼, 48 (1962) 14, p. 1739
- 12) 川畑: 学振19委—6556
- 13) 川畑: 鉄と鋼, 47 (1961) 4, p. 604
- 14) 川畑: 鉄と鋼, 49 (1963) 3, p. 568
- 15) 川畑: 鉄と鋼, 48 (1962) 6, p. 782