

## 技 術 資 料

### 鋼の真空脱ガス法について

中 司 正 夫\*

#### DEGASSING OF STEEL IN VACUUM — A REVIEW —

Masao Nakatsukasa

#### I. 緒 言

金属材料はその精錬が空気中で行われる限り多かれ少かれ酸素、窒素、水素などのガスによる汚染をうけ、このためその性能を少からず低下せしめられることが多い。従つて金属の品質向上の有力な手段としてこれらのガス量を低めるため、今世紀初頭以来真空溶解法の抬頭を見るに至つたことは周知の通りである。この方法は金属の溶解、精錬、および鑄造等をすべて真空中で行うのでガスの除去には最も有効で現在 Ti, Zr, Mo, U など大気中のガスと反応性の高い金属の生産に不可欠な手段として用いられているほか、鋼の中でも耐熱鋼、弾性鋼および軸受鋼など比較的少量ですむ高級材料の製造に独自の分野を開拓して来た。またその容量も真空技術の進歩と共に当初の実験室的規模のものから脱皮して逐次大型化し<sup>1)</sup>近い将来には数t程度のもので出現が予想されているがその規模には自ら限度があり、また操業費等の点からも大量の金属の熔製には適用し難い憾みがある。

しかも最近鋼の分野では機械設備の高性能化にともなつて発電機およびタービンのローター、ディーゼルのクランクなどの重要素材に対する要求はますます苛酷となりこれらの製品が数10tまたは100t以上にもおよぶ巨大な鋼塊から作られるにもかかわらず、製品の全断面にわたる徹底的な健全性が要求されるようになった。このため従来の製鋼法では完璧な製品を得ることが相当困難となりこの種素材の品質向上および不良率の減少は最も重要な問題となつてきたが、このような大量の鋼に対しては真空溶解の可能性はほとんどないといつてよい。

これに対し従来のようにして大気中で熔製された大量の熔鋼を真空中で処理することによつて脱ガスおよび精錬の目的を達成しようとするのがそれぞれ真空脱塊法、真空鑄造法、流滴脱ガス法、吸入脱ガス法あるいは排気鑄造法など種々の名前でよばれている脱ガス法である。

ここにはこれらを総括して上述の真空溶解法に対比して真空脱ガス法とよぶこととするが、このような着想はかなり古くからあつたもので、諸外国はもとよりわが国でも実に今をさる50年前明治38年(1905年)すでに林田氏による低圧鑄造法の特許<sup>2)</sup>がありまたその後海老原氏の提案などもあつたが、真空技術の発達がこれにともわず遂に近年にいたるまでいずれの国においても大量の熔鋼に応用されたことはなかつたのである。

しかるに独乙 Bochumer Verein A. G. の W. Couppette 氏は1950年以来真空設備メーカーの協力の下に研究を進めついに工業的規模における熔鋼の脱ガスに成功し<sup>3)</sup>、ここにはじめて大量の高級鋼の製造法に一新紀元を画するにいたつた。これ以来世界各国ともに競つて鋼の真空脱ガス法の研究を開始し特に高級鋼の製造分野における最近の発達は実にめざましいものがある。

このように鋼の真空脱ガス法は最近発達した真空溶解法、連続鑄造法などの新技術にくらべその歴史がきわめて浅く、いまなお革命的発展の段階にあるのでその資料も少く実体もなかなか把握し難いがあえて本法に関する展望的記述を試みることにした。

#### II. 鋼の真空脱ガス法の概要

現在工業的規模で行われている鋼の脱ガス法に対しては前にものべたようにわが国はもとより外国においても数多くのよび方が行われているが、脱ガスの機構からこれをつぎの3種類に分つこととする。

- 1) 流滴脱ガス法 (Stream droplet degassing)
- 2) 吸入脱ガス法 (Siphon degassing)
- 3) 取鍋脱ガス法 (Static ladle degassing)

このうち現在最も多く用いられているのは第1の方法

\* 三菱製鋼株式会社長崎製鋼所製鋼部長

で各国ともにほとんどこの方法に従っているといつてもよい。

1. 流滴脱ガス法

(1) 脱ガスの機構

Bochumer Verein (以下単に B. V. と略す) A. G. で工業化された脱ガス法で図1 aおよびbのように2通

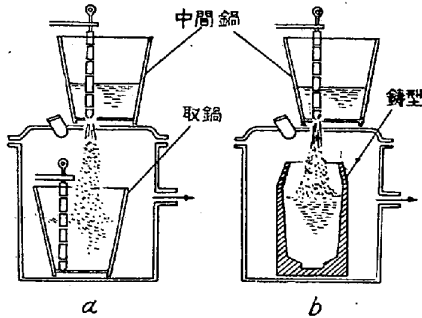


図1 流滴脱ガス法

りの用い方がある。B.V. では a を Durchlaufentgasung, b を Vakuumblockguß と区別している<sup>3)</sup>が脱ガス機構は同じである。すなわち図にみるように熔鋼を満たした取鍋を真空タンクの上に気密におき、真空に保たれたタンク内の取鍋または鋼塊に Al の隔板を貫通して流下せしめる方式である。一般に空気中においてもノズルから出る熔鋼流は機械的に乱流または多少流滴化されるが、この場合は真空中に入ると同時に圧力の急降下によるガス反応のためシャワー状に分裂し熔鋼の表面積は急増しきわめて短時間で脱ガスが進行する。図2の a および b はそれぞれ同一ノズルによる空気中および真空中の鑄流を比較したもので真空注入の場合鑄流がシャワー化される状況がはっきりとされているが、さらに映画<sup>4)</sup>では分裂した熔鋼滴からのガスの逸出が明瞭に観察できる。この場合脱ガスは熔鋼の静圧の影響を全く受けることのない自由な真空の空間で行われしかも熔鋼は急速なガスの逸出により膨脹し分裂した多数の小鋼滴となりきわめて大きな接触界面を以て高真空にさらされることとなるので、脱ガス反応は急速かつ徹底的に行われる特徴があり本法を成功せしめた最大の要因も実にこの点にあつたのである。

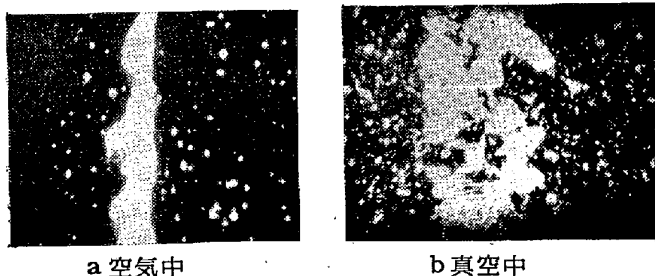
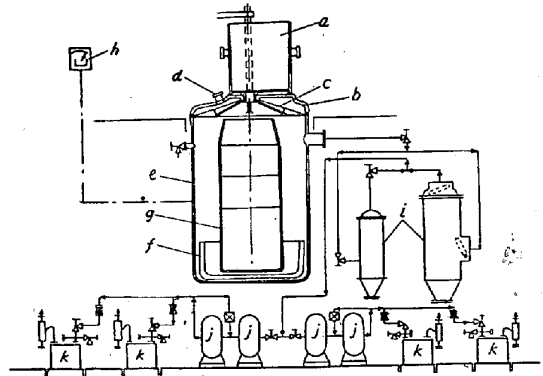


図2 熔鋼流の比較

なお a の方法は鑄込は空気中で行うもので鑄鋼または多数の小鋼塊を鑄込む場合に用いられ、b は真空中で脱ガスと同時に鑄込をも併せ行ういわゆる真空造塊であり事実上現在行われている脱ガス法の主体をなし特に高級鋼の大型鍛造鋼塊の鑄込に最も多く用いられている。

(2) 脱ガス設備

流滴脱ガス方式による真空造塊設備は図3の一例に示されるように真空タンク、吸塵装置および真空ポンプ系などによつて構成される。



a: 中間鍋, b: タンク蓋, c: 保護板, d: 覗き孔, e: タンク本体, f: 底板, g: 鑄型, h: 真空計, i: 吸塵装置, j: ルーツ・ポンプ, k: ガス・バラスト・ポンプ

図3 流滴脱ガス法設備の一例

中間鍋:

普通の取鍋とほぼ同じ構造であるが下部はタンク本体の中心にノズルが来るようにカバーに対し偏心的に置かれこれと気密に接合するようになつている。ノズル、ストッパーの材質は、普通のものが用いられているが、只ノズルの形状は流滴の散乱及温度の調節のため変型が用いられる場合もある。なお鑄込開始後取鍋の耐火物の層を通じて空気が侵入することを防ぎ気密を確保するため、たとえば図4のようにノズルの杵煉瓦の周辺を鉄板の箱で囲み下部を底板に熔接し上部は熔鋼に接続させる方法なども考えられている<sup>5)6)</sup>。

真空タンク:

鑄型または取鍋を入れるに十分な内容積をもつ頑丈な円筒形の鋼製タンクで本体およびカバーにわかれてい

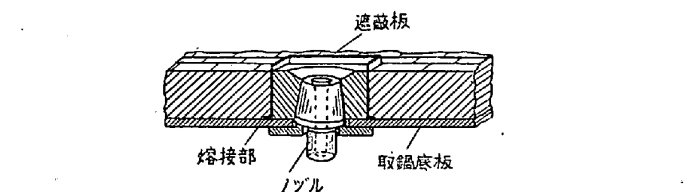


図4 ノズル周辺の空気もれ予防法 (B.V.社)

がついており、上面および下面においてそれぞれ中間鍋およびタンク本体と気密に接続する。嵌合部のパッキングにはゴムのような弾性体がいられ多くの場合単に自重によつて気密がたもたれる。

#### 吸塵装置:

タンク内の排気および脱ガス中に発生する塵埃からポンプ系を保護するために普通タンクとポンプの中間に乾式の吸塵装置が設けられる。図3のiはその一例で大小の2室を脱ガスの作業過程で使い分けるようになっている。

#### 真空ポンプ系:

鋼の真空脱ガスの場合、脱ガスの効果を充分發揮せしめるためには少くとも10mmHg内外の真空度が必要で米国では2mmHg以下の真空度が多く用いられておりしかも注入開始と同時に多量のガスが一時に発生するから使用される真空ポンプは排気能力がきわめて大きくかつ機械的にきわめて堅牢なものが要求される。

独乙では高真空大容量のルーツ・ポンプの発達によりこれとガスバラスト・ポンプを組合せて優秀な成果を収めており、一般に到達真空度 $10^{-1}$ mmHg、排気能力6000~20000m<sup>3</sup>/h程度のもがいられ、かつ二つのポンプ系を並列に並べて万一の故障発生にそなえるなど細心の注意が払われている。

米国では多少行き方を異にしもつばら多段スチーム・ジェット・ポンプがいられ、到達真空度 $10^{-2}$ mmHg程度で独乙よりもさらに低い1mmHg以下の真空度で脱ガスが行われているようである。

#### (3) 操業法

通常の製鋼法によつて熔製された熔鋼は取鍋から中間鍋を経て真空タンク中の鑄型または取鍋の中に鑄込まれる。場合によつては中間鍋を省略し出鋼鍋をそのままカバーの上に載せて鑄込むこともできるがセットに要する時間はわずかに1mn内外ですむので時間的には問題とならない。鑄込開始と同時にタンク内の真空度は少時上昇するがまもなく復元し押湯にかかるとふたび若干の山を生ずるのが普通である。図5は米国の操業の一例<sup>7)</sup>で保持真空度は0.6mmHg内外、第一段の山は注入開始時ノズルおよび鑄型からのガスによるもの、第二段目は押湯の水分によるものである。鑄込中カバーの覗穴を通じまたはT.V.装置などによつて内部の状況を観察しながら鋼種、熔鋼の量および温度、ノズル径、鋼塊寸法などに応じ真空度、鑄込速度、鑄流の分散などが調節される。この場合鑄流のシャワー化による酸化や鑄型内周の酸化被膜の発生等が全くないから理論的には鋼塊

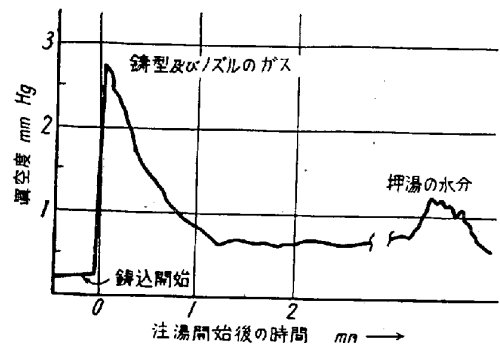


図5 流滴脱ガス法における真空度の変化

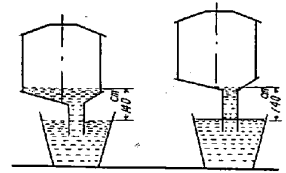
の健全性と脱ガス徹底のためには低速鑄込が最も有利と考えられる。しかし実際には接触界面の拡大と高真空により脱ガスに要する時間はきわめて少なくてすみかつ普通法に比し高速鑄込の鋼塊欠陥におよぼす悪影響ははるかに少いので3t/mnから10t/mn程度のかかなり高速鑄込まで常用されている<sup>8)</sup>。なお鑄込が終ればただちに常圧に復し大気圧の下で凝固せしめられる。

#### 2. 吸入脱ガス法

同じく独乙のDortmund-Hörder Hüttenunion (以下D.H.とする) A.G.ではB.V.社と全く異なる着想で真空脱ガス法の研究が進められその工業化に関する第一報がすでに発表されており<sup>9)</sup>、同法の内容はこの文献にかなりくわしく報告されているのでここには単に概略を記すに止める。

##### (1) 脱ガスの機構

この方法は図6に概念的に示されるように、熔鋼を取鍋内に挿入された吸引パイプを通じ真空タンク内に吸い上げて脱ガス処理を行い真空タンクの上下をくり返すことによつて処理熔鋼の交代を行うもので真空サイフォン法ともよぶべき方法である。この場合取鍋から吸い上げられる熔鋼の高さは約140cmあまりではぼ一定であるが、図にみられるように、吸引パイプが深く挿入されると真空室内にあらたに熔鋼が吸入されると同時に表面積がひろがり比較的短時間に脱ガスが達成される。



なお真空室の上下動による熔鋼の交代および混合の状態は図7のようにして熔鋼と同じ粘性をもつグリセリン一水の混合液による模型実験により検討された。図中aは容器を静に一回引き上げた場合、bは上下を3回くり返した場合でいずれも底部に成層が見られるが、急速に上下を行うとc、d、eのように噴流は底部から側方に

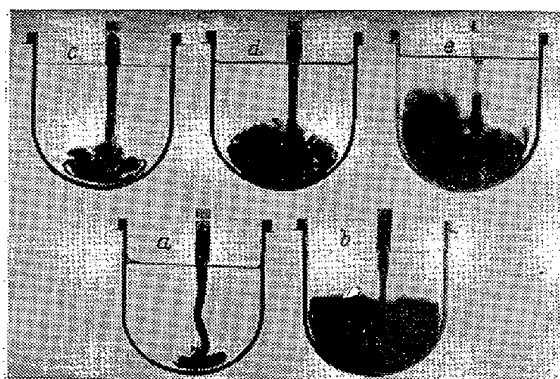


図7 グリセリン・水混合液による模型試験

強い渦流となつてひろがり混合がよく行われる。この模型実験により脱ガス処理を受けた熔鋼は取鍋の底部に排出され、つぎつぎに上層のあたらしい熔鋼が吸引されて熔鋼の交代が合理的に行われることが推察されるがこのことはまた実地試験によつても確認された。

(2) 設備および操業法

図8ははじめ D. H. 社で用いられた脱ガスの工業試験設備を示すもので、真空室は他の附属設備と一緒に同じ作業台の上に設置され運搬および上下運動は全部クレーンによつて操作される。処理中熔鋼の熱損失を補うた

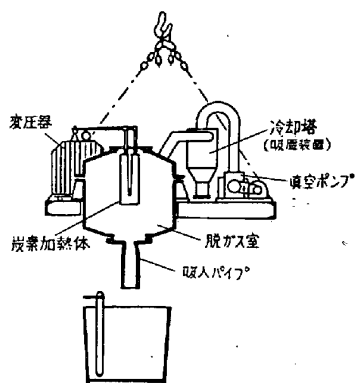


図8 吸入脱ガス法の試験装置

め炭素抵抗加熱装置が用いられ真空設備は3台のプランジャー・ポンプおよびルーツ・ブローヤよりなり真空室とポンプの間には除塵装置を付した冷却塔が配置された。この設備による試験によつて充分工業化の見透しが得られたのでさらに平炉および転炉工場用として大規模の脱ガス設備が建設された。図9は平炉工場用の設備を示すもので、真空室の上下はこの場合スプロケット・チェーン駆動により、ポンプの排気能力は6000m<sup>3</sup>/h、熔鋼の加熱には400kwの炭素加熱装置が用いられた。

操業時脱ガス室は約60cm程上下され毎回約4tの熔鋼が吸入され処理時間は一回当たり約30s、80tの平炉鋼処理に約30mnを必要とする。図10は0.20%炭素鋼42tの熔鋼の脱ガス処理中の真空室内の圧力の変動経過を示すもので Fe-Si の添加は脱ガスがほぼ完了するのをまつて真空室内で添加される。このように合金鉄の添加が脱ガス後真空室内で行われることは本法の大きな特長である。

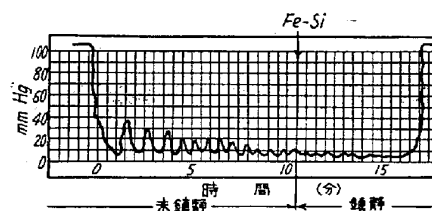


図10 吸入脱ガス法における真空度の変化

なお転炉工場に設けられたものはこれと反対に脱ガス設備を固定し取鍋を鑄込台車でその下にはこんで上下させる方法が取られ、処理時間約10mn、ポンプの排気能力15000m<sup>3</sup>/h、加熱電源3000kwのものが用いられ、30tの熔鋼はその間に約30°C加熱された。

3. 取鍋脱ガス法

図11に示すように熔鋼および熔滓を満した取鍋を真空タンク内に静置しこれに蓋をして真空ポンプを働かせ一定時間真空に置く方法で、熔鋼中のガスが烈しい沸騰によつて抽出された後普通のようにして空気中で鋼塊または鑄鋼に鑄込まれる。この方法は比較的簡単に行われる利点はあるが、脱ガ

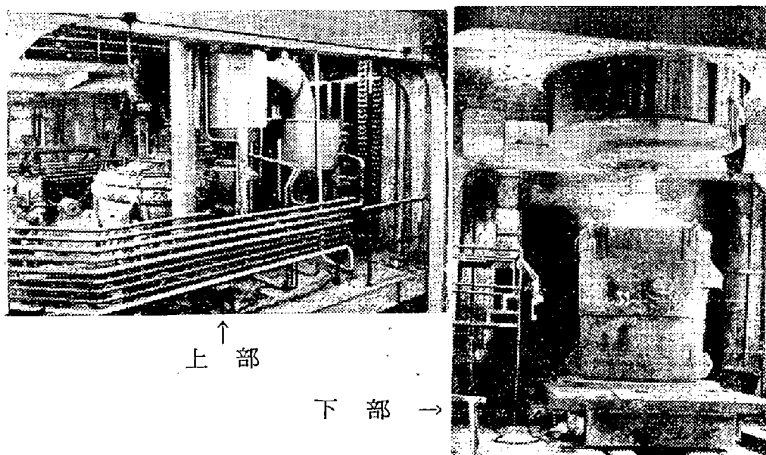


図9 平炉鋼用吸入脱ガス設備 (D. H. 社)

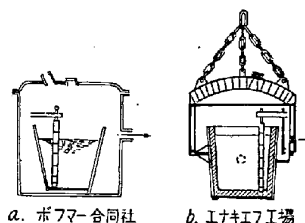


図11 取鍋脱ガス法

ス反応が活発に行われるのは鋼塊の表面近くに限られ熔鋼の静圧の影響をうけて反応は深部にまではおおよび難くその効果を減殺される不利がある。鋼の真空脱ガス法の発達の初期にまず工業化された方法であるが上のような欠点があるので B. V. 社でもいまはほとんど省みられなくなつた<sup>3)</sup>。しかし後で述べるようにソ連では Enakiev および Dneprospetstal などの工場で 1952 年頃からとくに電気鉄板の生産に大規模に用いられたことが報告されている。図 11 の b は Enakiev で初期に用いられた方法を示す<sup>3)</sup>。

### III. 真空脱ガス法の効果

以上述べたように工業的規模で行われている脱ガス法には 3 種類あるが、これらはおのおの脱ガスの機構を異にし、また適用真空度や鑄込が空気中で行われるか、真空中で行われるか等によつても脱ガス効果に差違を生ずることは当然である。すなわちおなじ流滴脱ガスの場合でも真空造塊に比し空中鑄込の場合は事実上空気による再汚染があり、また吸入脱ガス法の場合は脱ガス機構もことなり、また熔鋼面は数十分におよぶ処理時間中大気と接触を余儀なくされ鑄込も空気中で行われるなどの点に問題がある。

表 1 はこれまで発表されている抽出ガスの組成の一例を示すもので、とくに流滴脱ガス法と吸入脱ガス法の相違が注目される。したがつて脱ガスの効果も自ら差を生ずることは当然考えられるが、その傾向にはほぼ共通したものが多いためここにはこれを一括してのべることにする。

#### 1. 脱ガス効果

##### (1) 脱酸

熔鋼中酸素の脱ガス反応はつぎの平衡式によつて規定される。

$$K_{CO} = \frac{[C][O]}{P_{CO}} \dots \dots \dots (1)$$

図 12 は低圧域におけるこの関係を示すもので  $P_{CO}$  が低くなれば低炭素の場合も C のみによつて充分脱酸が

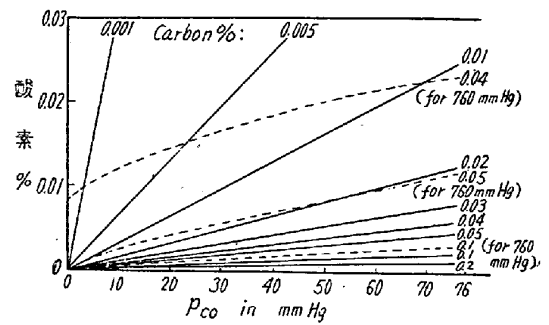


図 12 熔鋼の炭素量および酸素量

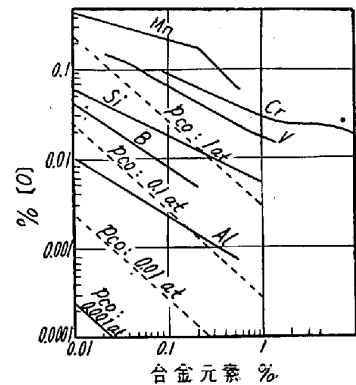


図 13 1600°C における鉄中の各合金元素と酸素との平衡

行われうることを示し、脱酸に対して真空脱ガス法が有利なる所以が了解される。図 13 は [O] におよぼす各元素の脱酸力を示すもので  $P_{CO}$  が 0.01 atm 程度ですでに大気における通常の脱酸剤を以てしては到底得られぬほどの低い [O] が得られることがわかる。実際の熔鋼の真空処理の場合は低圧域における [O] の活量に対する C 以外の合金元素およびその相互作用の影響があり、加うるに処理時間が短いので C-O 反応の速度が問題となつてくる。これらに関しては未だ詳細な研究があまり見られぬが、D. H. 社における炭素鋼の実験結果によれば C-O 反応は僅々数 s 程度で平衡に達することがほぼ確実であり<sup>3)</sup>、かつ脱酸剤なしで低炭素鋼をキルド状態で鑄込むことを得、かつ処理前の [O] の約 1/3 に減少したことが報告されており、この反応が真空域で相当迅速かつ完全に進行することがわかる。また B. V. 社の A. Tix<sup>3)</sup> によれば表 2 に見られるように多量の Al

表 1 真空脱ガス法における抽出ガスの組成

脱ガス法	実 施 工 場	鋼 種	ガ ス 成 分 %						註
			C O	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	
流 滴 脱ガス法	B. V. Pilsen Bethlehem	Ni-Cr-Mo 鋼	40	3.8	23	33	—	—	平 均 注 入 後 5 秒 代 表 例
		Ni-Cr-Mo 鋼	43.3	1.3	23.4	26	3.6	2.4	
		合 金 鋼	40	—	30	30	—	—	
吸入脱ガス法	D. H.	炭 素 鋼	80	1~	5	5	—	—	平 均

表2 空中鑄込および真空造塊における鋼中全酸素および全窒素量

No.	鋼種	化学成分 %									鋼塊重量	鑄造法**	平均 %O	平均 %N
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	その他				
1 a 1 b	CK 8	0.04	0.08	0.21	0.010	0.009	—	—	—	0.14 Al	8 t 8 t	A V	0.005 0.005	0.010 0.009
2 a 2 b	CK 35	0.35	0.38	0.63	0.030	0.023	—	—	—	0.004 Al	21 t 21 t	A V	0.007 0.002	0.006 0.004
3 a 3 b	CK 45	0.44	0.29	0.77	0.027	0.022	—	—	—	0.005 Al	21 t 21 t	A V	0.004 0.002	0.007 0.006
4 a 4 b 4 c	~75M 3	0.60	0.34	0.91	0.026	0.022	—	—	—	0.004 Al	25 t 25 t 25 t	A A→A V	0.003 0.004 0.001	0.0065 0.0065 0.004
5 a 5 b	46MnSi4	0.44	0.86	1.05	0.021	0.018	—	—	—	0.004 Al	25 t 25 t	A V	0.004 0.001	0.007 0.005
6 a 6 b	×10CrNi Ti 189	0.06	0.60	1.03	0.028	0.011	17.5	0.33	9.50	0.50 Ti	10 t 10 t	A V	0.0019 0.0016	0.008 0.008
7 a 7 b	×8CrNi MoNb1616	0.07	0.76	1.12	0.023	0.009	16.9	1.85	16.30	0.93Nb/Ta	10 t 10 t	A V	0.003 0.0025	0.041 0.038

\* a, b および c は同熔解

\*\* A: 空中鑄込, A→A: 空気中にて二次取鍋に注入  
V: 真空造塊鋼: 4c のみは真空中で取鍋に注入.

で鎮静した低炭素鋼および高合金鋼を除き [O] はおおむね 1/3 以下に減少しており, また炭素鋼における非金属介在物の残渣分析によれば真空造塊の場合空中鑄込の約 1/4 以下に過ぎなかつた. しかしここに注意すべきことは流滴脱ガス法の場合は空気中において脱酸精錬完了後脱ガス処理が行われるに反し, 吸入脱ガス法では純炭素鋼の状態 C-O 反応による脱ガスが行われ従つて清浄な状態で合金鉄の添加が行われることである. この点に関しては後者の方が有利と考えられるがその反面空中で鑄込が行われるため, このための汚染もありその優劣は一律には論じ難いものと思われる.

(2) 脱水素

熔鋼の脱水素反応は A. Sievert<sup>10)</sup> の平衡式に従うものと考えられる.

$$K_H = \frac{[H]}{\sqrt{P_{H_2}}} \dots \dots \dots (2)$$

しかし実際の商用鋼では製鋼法, 製鋼条件などにより多少の差はあるが [H] は [O] と異り平衡値に達することはなく正常の精錬が行われる限り平衡値の数分の 1 の値を示すことが常であるから, 真空処理の場合図 14 でわかるように 10mmHg 内外の低圧ではじめて脱水素の効果があらわれることとなる.

なお水素は窒素に比して熔鉄中における拡散速度がき

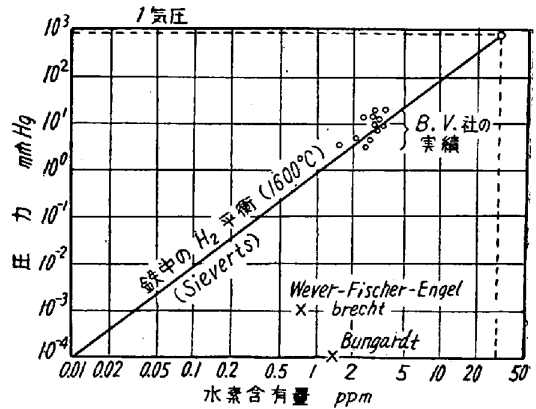


図14 真空処理後の水素量

わめて大きいので, 流滴脱ガス法の場合に熔鋼の静圧からの解放とシャワー化による熔鋼の表面積の急増によつて反応がほとんど瞬間的に平衡値に達することは当然として, これよりはるかに不利な条件で若干の静圧と制御された熔鋼面を以て真空に接する吸入脱ガス法の場合においてすら脱水素はきわめてよく進行することが立証されている. すなわち後者の場合でも 10~1 mmHg の真空で [H] は平均 8cc/100 g から 2.5cc/100 g まで下り場合によつては 1.5cc/100 g まで可能といわれている<sup>9)</sup>. 流滴脱ガス法の場合はさらに有利なことはもちろんで現在 B. V. 社では 10 mmHg 程度で常時操業され約 2cc/100 g 台の [H] が保証されており, ま

た最近米国の操業では前にものべたように 0.6 mmHg 位で [H] は 1.5 cc/100 g 以下を確保していると伝えられる。

(3) 脱窒素

窒素もまた水素同様 Sievert によれば原子状で鉄中に溶けているものと考えられ、したがってその平衡式は同じように

$$K_N = \frac{[N]}{\sqrt{P_{N_2}}} \dots\dots\dots (3)$$

が成立する。[N] もまた一般には商用鋼では平衡値に達していないが低圧になると平衡に達して N<sub>2</sub> を放出するに至る。しかし水素とことなつて熔鉄中における拡散速度が小さいので、熔鋼が一定の深さを有する場合は脱窒反応は熔鋼面の近くのみで止り鋼浴の深部では [N] は静圧に相応する平衡値を保つこととなり、鋼浴面に対して窒素は緩慢な拡散のみによつて補給されることとなる。

したがって脱窒に対しては吸入脱ガス法および取鍋脱ガス法は流滴脱ガス法に比してきわめて不利で、事実吸入脱ガス法の場合分析に示される程度の脱窒効果は認められておらず<sup>9)</sup>、このことは前の表 1 の抽出ガスの組成からも容易に推察される。この点流滴脱ガス法の場合は遙かに有利で事実表 2 に見られるように相当の効果が認められるが<sup>10)</sup>、水素および酸素程の大巾な脱ガス効果が得られていないのは、窒素が熔鋼中の合金元素と強固に結合していることによるものと考えられ、このことはとくに Al 脱酸の低炭素鋼および高合金のオーステナイト鋼ではほとんど処理の前後の窒素量に変化が認められないことから了解される。

(4) 金属および酸化物の蒸発

以上のような脱ガス作用とともに熔鋼中の蒸気圧の高い金属および酸化物の蒸発が当然考えられる。B. V. 社の集塵装置に集められたダストの成分の一例を示せば<sup>11)</sup>

FeO	MnO	CaO	SiO <sub>2</sub>	Zn	Cu	Sn	Pb
%	%	%	%	%	%	%	%
17.9	47.0	0.5	1.1	1.4	2.6	0.2	1.0

これからもわかるように真空処理により Mn, Cu, Sn, Pb など蒸気圧の高い金属の蒸発が相当行われることは明かで、とくに一たん熔鋼中に入れば大気中における従来の精錬技術ではほとんど除去困難であつた Cu, Sn などの有害元素が相当に除かれる点に注目する必要がある。

2. 鋼質におよぼす効果

(1) 鋼塊構造および成分偏析

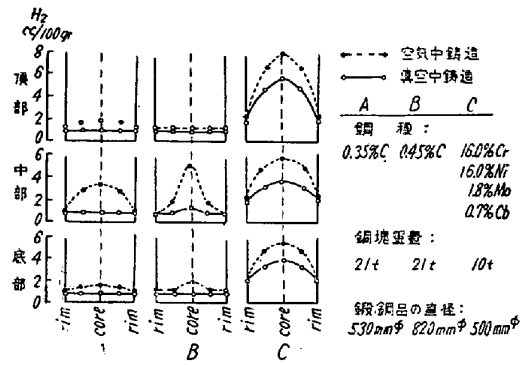
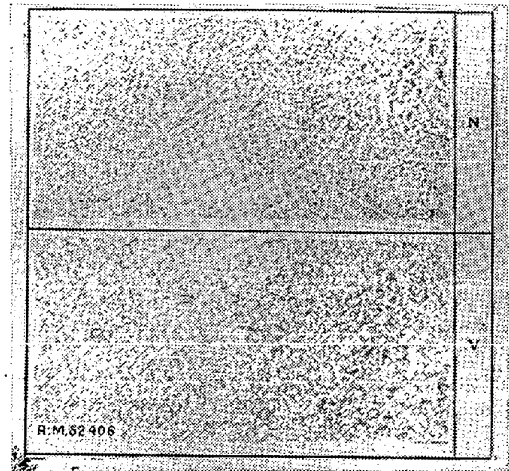


図15 鍛鋼品中の水素の濃度分布



N: 空中鑄込の鋼塊 V: 真空鑄造の鋼塊  
図16 デンドライト組織の比較

A. Tix<sup>12)</sup> は水素偏析に関しては図 15 に見られるように真空鋼は水素量の絶対値が低いことのほかに素材内部の濃度勾配が緩やかなことを報告しているが、鋼塊構造および成分偏析に関しては明確な効果を確認するまでに至っていない。これに反し Z. Eminger<sup>11)</sup>などは 4.7 t までの小鋼塊においてすでに図 16 に見られるようにデンドライトの発達が少く一次晶も微細化することを認めており、また F. Harders<sup>13)</sup>なども偏析が減少し硫黄写真が均一化することを報じ、また K. C. Taylor およびその他の報告<sup>12)</sup>も鋼塊偏析の減少および結晶粒の微細化を挙げている。したがって成分偏析は別としても少くとも鋼塊偏析に関しては水素そのものに直結する偏析線の減少は必然と考えられ、また脱ガスによつて A および V 偏析帯の欠陥の拡大が防止されかつ結晶粒が微細化するなど相当顕著な改善効果があるものと評価するのが妥当であろう。

(2) 各種の素材疵

内部亀裂:

真空脱ガスの最大の効果は内部亀裂すなわち白点状欠陥が除去されることにあるといつても過言ではない。大型鋼塊または鑄鋼の内部に不可避免的に発生する微小な収

縮孔または結晶空隙が含有ガス就中水素の析出および変態応力によつて内部亀裂すなわち白点状欠陥を形成する素因をなすことはほとんど定説化<sup>13)14)</sup>されているが、脱水素の徹底によつて白点感受性はほとんど完全に消滅せしめられる。すなわち A. Tix<sup>3)</sup> は高炭素鋼および合金鋼の大型鍛鋼品を空中放冷した場合、従来法によるものは例外なく白点を生じているが真空鋼は皆無であり、同様に K. C. Taylor<sup>12)</sup>, Z. Eminger<sup>11)</sup>なども例外なく真空脱ガス鋼の白点の消失を認めている。また F. Harders<sup>9)</sup> は吸入脱ガス法の場合でも脱ガス鋼は荒打ち鋼片の段階では超音波試験でなお底面波の 80% におよぶ欠陥波形を検出したにもかかわらずこれをクランク軸に打ち上げた後は欠陥波はほとんど全く消失し、従来の場合に比し鋼塊内質の分離個所がきわめて鍛接し易い特長があり、また偏析および介在物の個所に従来認められていた白点状の欠陥が全く消失したことを報告している。

気泡:

脱ガスにより凝固時に発生する気泡はできにくくなりしたがつて鋼塊内部のブローホール、ピンホールなども減少し鋼塊の健全性は大いに向上される。とくに従来ブローホールを生じ易かつた 13 Cr 鋼製薄肉大型鋳鋼品の場合、3~4 cc/100 g 程度の水素の除去によつて鋳型通過時の水素の再吸収によつても、もはや気泡発生の危険がなくなつたこと<sup>3)</sup>からもその効果はいまさら論ずる必要もないこととおもわれる。

非金属介在物, 砂疵, 肌荒れ:

酸素の除去により鋼塊脱酸による非金属介在物の成生が減少するので普通法に比し鋼質が清浄となることは当然であり、流滴脱ガス法の場合真空鋼はほぼ 1/4 以下に減少しており<sup>3)</sup>、また吸入脱ガス法の場合においてすら脱酸成生物の激減が報告されている<sup>8)</sup>。

また真空造塊の場合は酸化被膜を生ずることがないので肌荒れ、砂疵などの表面疵の発生が防止されることは当然であるが、空中鋳込の場合においてすら脱ガス鋼は表面疵を発生し難いことが報告されている<sup>8)</sup>のは注目に値する。

(3) 機械的ならびに磁氣的性質

脱ガス鋼は内部欠陥の減少、清浄度の向上、および結晶粒の微細化などにより機械的性質就中強靱性の増加が期待される。A. Tix<sup>3)</sup> は図 17 に見られるように Ni-Cr-Mo 鋼製発電機軸の径方向の引張りおよび衝撃試験の結果を統計的に比較し真空鋼は伸び、絞りが高く衝撃値はあまり変化が多くないことを報告している。この強

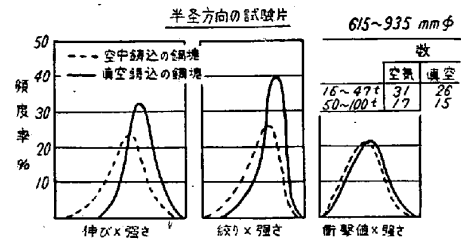


図17 Ni-Cr-Mo 鋼誘導機軸の機械的性質の比較

靱性の増加に加えて前にのべたような健全性の向上によつて材質的に信頼度がきわめて高くなるので、同一鋼種においても真空鋼に対しては安全係数を相当低くとり機械の性能を高めうることも重要な利点である。

つぎに真空脱ガス鋼の重要な長所として磁氣的性質の改善がある。回転子および変圧器用の電気鉄板のヒステリシスロスを減らすためにはとくに極低炭のものが必要とされるがこのようなものは真空脱ガス法以外では製造がかなり困難で M. Samarin<sup>9)</sup> などによれば Dneprospetstal 工場 (U.S.S.R.) では 1955 年以來すべての変圧器用鋼が 30~35 mmHg 程度の真空による取鍋脱ガス法によつて生産され、きわめて優秀な成果を得ているとつたえられる。

3. 操業上におよぼす効果

(1) 溶解精錬および造塊

鋼の真空脱ガス法の場合熔鋼は今までのところ従来通りの精錬法で熔製されている場合が多いが、将来脱ガス技術の普遍化にともない製鋼法そのものにも相当の変化を生じ、熔鋼の精錬は必要にして充分なる程度に簡素化するものと期待される。ことに前述のように脱水素およびCによる脱酸反応は真空中ではきわめて短時間に平衡の移動が行われるので、従来の空気中におけるような精錬手段の省略または短縮が可能となり、ことに電気炉操業においては操業法の根本的改変も予想されその効果はきわめて大きいものと考えられる。

つぎに造塊作業では空中鋳込の場合は従来と変らぬが真空造塊の場合は鋳型に対する精鋼剤の塗布は不要となりかつ鋳込速度の制約が少くなる利点がある。また鋼塊本体の健全性の増大により押湯重量は空中鋳込に比し相当節約が可能で、B. V. 社の実績では現在鋼塊重量に対し最高 20% 切捨 17% 程度で充分といわれている。

(2) 鍛錬圧延および熱処理

鋼塊の健全性の増大と表面疵の減少により鍛錬および圧延歩留りの向上が可能となり、かつ鍛錬比および圧延比を従来に比して小さくすることができる。とくに鍛錬では従来よりもさらに大きい鋼塊を同一の鍛錬機を以て鍛造することが可能となることも大きい利点である。



つぎに従来高級鋼の大型鍛鋼品の場合、鍛造後の空中放冷は白点発生の危険があり必ず赤材のまま熱処理炉に装入し長時間の脱水素処理を必要としたが、真空鋼の場合はこの必要がなくなり、鍛造後の冷却は応力割れを警戒するのみにて足り脱水素のための熱処理過程は省略することができるので少くとも熱処理工程の1/3を節約することが可能となる。

#### 4. 経済上の利益

鋼の真空脱ガスに要する設備は他の新技術による設備とは趣を異にし、従来の製鋼設備の根本的変更をなす必要とせず単に造塊設備の一部に挿入されるに過ぎないから設備費は比較的少くてすむ利点がある。つぎにその操業費に関しては、流滴脱ガス法の場合で運転費、保守費および償却費をあわせておよそ6~9\$(2160~3240円)/t程度と見積られており<sup>12)</sup>、真空溶解費の1/20~1/40に過ぎず、吸入脱ガス法の場合はこれよりかなり嵩むものと考えられるが、なおかつその効果はつぎに示すような諸点において圧倒的なものがあり、とくに高級鋼の分野におけるその優位性についてはいまさら多言を要せぬところである。

なお本法の経済性に関しては脱ガスの方法、設備、および生産内容などによつて条件がことなるので一概にはのべ難くかつ前にのべた諸効果と重複する点もあるので単にその項目を列挙するに止める。

脱ガスによる経済的利益:

##### (1) 製品不良率の減少

白点、ザク、ゴースト、砂疵および非金属介在物、肌荒れ、ブローホール、ピンホール、などの諸欠陥の画期的低減

##### (2) 精錬費の節減

精錬の簡素化による原単位の低減、製鋼時間の短縮など

##### (3) 造塊費の低減(真空造塊) 程 現

精鋼剤不要、鑄型寿命増大

##### (4) 鋼塊歩留りの向上

##### (5) 鍛錬および圧延歩留りの向上

##### (6) 熱処理工程の短縮

### IV. 鋼の真空脱ガス法の現状

#### 1. 西欧諸国

独乙の B. V. 社では 現在 3000 t/月程度の真空脱ガス鋼が生産され、その約 80% は鋼塊重量 150 t までの発電機およびタービン回転軸、クランクシャフトなどの大型高級鍛造品、残り 20% は大型鑄鋼品の製造に向

けられてきわめて優秀な成果をあげ、廢却率は 1% 以下に激減したとつたえられ、3 基の真空脱ガス設備を常時稼動中である。

このほか仏蘭西の Schneider, Neuves Maison (Montluçon 工場)、Saint-Etienne の 3 社、白耳義の Cockerill, 伊太利の S.I.A.C., 独乙 Reisholz など欧州一流の重鍛造メーカーはいずれもすでに B. V. 社と技術提携を決定し一部においてはすでに操業を開始するにいたつている。なお英国の English Steel Corp. および Rolls-Royce の 2 社も近く同法を導入の予定と云われまた瑞西、澳太利、加奈陀の有力会社も採用を考慮中とつたえられる。

つぎに吸入脱ガス法についてもすでに D. H. 社では発表当時の数字からみて少くとも数千 t 以上の実績が得られているものと推察され、特長ある方法として少からぬ興味を持たれているが、操業費の点については若干問題があるように思われる。

#### 2. 米 国

米国においては 1953 年以来 Tanners Creek, Arizona, Cromby および Ridgeland の 4 発電所における 100000 kW 以上の発電機軸およびタービン回転軸が相ついで折損する大事故を生じ、その原因を調査の結果、少くともその中の 2 本は水素に起因する亀裂の潜在によるものと結論された<sup>15)16)</sup>。この結果この種大型鍛鋼品の需要者および製造者の双方によつて俄に真空造塊法が真剣に希求されるに至り、B. V. 社から Couppette, Sickbert 両氏を招請し、また B. V. および D. H. の 2 社の調査見学を行うなど真剣な検討が行われ 1956 年以来脱ガス設備の建設は急速に進められるにいたり米国における重鍛造品の二大メーカーたる U.S. Steel Corp. および Bethlehem Steel Corp. の両社に巨大な設備が完成された。

すなわち U.S. Steel Corp. は Duquesne 工場において 17'φ×31' の真空タンクによりすでに 150 t までの真空造塊を開始したが、真空ポンプにはスチーム・ジェット式が用いられかつ鑄込タンクは水冷、鑄込作業の観察は図 18 に見られるように T. V. カメラによる等の点を除けばほとんど B. V. 社の方法と同様である。

また Bethlehem Steel Corp. は 1956 年 8 月 12 t 容量の試験設備を設置しさらに 1957 年 8 月 250 t 容量の真空タンクを完成したが<sup>17)</sup>、同じくスチーム・ジェットを使用し、鑄込中の真空度は 0.5~0.6 mmHg 位、水素量 1.5cc/100 g といわれている。

なお米国では前述の事故以来むしろ需要者側に真空脱

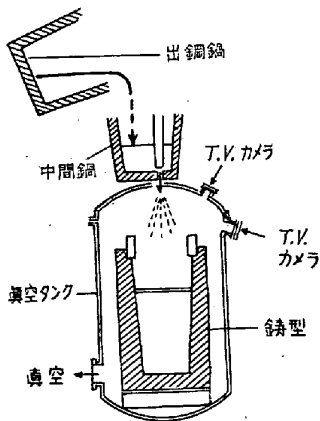


図18 米国の真空脱ガス装置  
(Stokes Corp., U.S.A.)

ガス鋼に対する要求が高まっており、近き将来この国の重鍛造メーカーは各工場とも真空脱ガス設備を建設することが必要になるものと予想されており、最近における発達は注目し得るものがある。

### 3. ソ連圏諸国

鉄のカーテンの彼方ソ連圏の諸国については多くを知る由もないが第20次共産党大会の決議<sup>10)</sup>により真空冶金技術の遅れが指摘され研究促進の急務がとくに強調されていることなどから見ても、その並々ならぬ関心が注目される。限られた文献<sup>9)11)</sup>などから見てまずソ連では取鍋脱ガスによる真空処理が工業化されかなりの成果をあげていたが、他の国同様 B.V. 社の発表以後はじめて流滴脱ガス法が真剣に取り上げられたものとおもわれる。

すなわち 1952 年以降まず Enakiev 工場次で 1956 年 Dneprospetstal 工場において取鍋脱ガス法による真空処理が施行され変圧器用コアシートの生産にはかなり成果をあげたが<sup>9)</sup>、取鍋脱ガス法自体の不利と真空ポンプの進歩がこれにともなわず漸く 30~35 mmHg 程度の低真空が用いられるに過ぎなかつたので、Ni Cr Mo 鋼などに対してはそれほどの効果がなく白点は多少減りはしたが消失せしめるまでにはいたらなかつた。その後 B.V. 社の発表後 Lénine 工場 (U.S.S.R.) などでは流滴脱ガス法の実験がはじめられ Pilsen 工場 (チェコスロバキヤ) でも 4.7 t 程度までの小鋼塊に対する調査<sup>11)</sup>が行われておりまたポーランドでも同様の研究が行われ B.V. の結果と比較した報告なども見られるが<sup>10)</sup>、まだ大鋼塊に対する実施成果は発表されていないようである。

しかしながら科学技術におけるソ連の実力と重点主義に鑑み真空脱ガス技術においても遠からず飛躍的な前進が見られるであろう。

### 4. 我が国の現状

ひるがえつてわが国においては前にのべたように鋼の真空脱ガス法は林田氏をはじめとする先覚者の着想にもかかわらず、真空技術がこれにともわず近年にいたるまで工業的規模における応用はついに結実を見なかつたが B.V. 社の成功以来これに関する関心は高級鋼メーカーの間に急激に高まるにいたりここ数年を出でずして飛躍的な進歩が予想される。すでに神戸製鋼および関東特殊製鋼などでは 1~2 t までの工業実験が行われたが、なお最近国産設備により油エヂェクター・ポンプに Kinney ポンプを配し真空度 2 mmHg、排気速度 130000 l/mn、10 t 程度まで処理可能なものが完成され、またメカニカル・ブラスターによる高性能のポンプの大型のもの出現も近いとつたえられているのでその成果が期待される。

なお数十 t 以上の大容量の鋼の真空処理に対しては、最近大型鍛鋼品の健全性向上が焦眉の急にせまられているので、1 昨年以來三菱製鋼、日本製鋼、神戸製鋼の 3 社共同で B.V. 社と技術提携の計画が進められておりその実現も間近いことと思われる。また一部には吸入脱ガス法に対しても少からぬ興味がよせられており近き将来わが国の製鋼技術における鋼の脱ガス法の比重はますます増大するものと予想される。

## V. 鋼の真空脱ガス法の応用分野 及びその将来

以上のように鋼の真空脱ガス法は大量の熔鋼処理に適しその品質を画期的に向上しうる特長があるので、ことにつぎのような分野における発展が期待される。

### 1. 高級大型鑄鍛鋼品

現在もそうであるが当面まず第一の応用分野は従来の方法を以てしては優良品の製造に多大の困難を生じている発電機およびタービンの回転軸、クランクシャフト、リム、ロールなどの高級重鍛造品に集中されるものと考えられ、またペルトンおよびフランス水車用薄肉大型鑄鋼品および鑄鋼ロールなどに対しても広範囲な応用が期待される。

### 2. 高合金鋼

耐熱鋼、耐蝕鋼、磁石鋼などの高合金鋼に対しても酸化被膜などによる造塊上の困難が減少し、粒間介在物も少くなるので鍛造性が向上し製品の靱性がよくなり耐蝕性が増すなど多くの利点があるのでとくに相当大型のもの製造に好んで用いられるようになる。

### 3. 電気鉄板

前にものべたように電気鉄板の性能は脱ガス法により

飛躍的に向上することが知られており、しかも変圧器、電動機および発電機などの性能は電気鉄板の品質によって左右されることはきわめて大きいので、将来この種のものの製造に対しても不可欠な生産手段となろう。

#### 4. その他の一般鋼材

その他の一般的な鋼種に対しても真空脱ガス鋼はきわめて低炭素でしかも酸素の低い清浄鋼が得られること、耐蝕性がよいこと、表面処理就中 Cr の拡散に適すること、深絞りに適することなど幾多の長所があるので、将来一般構造用鋼の分野でもますます重視されるようになり、従来の空気鋼に対して各鋼種にあたる真空鋼規格の出現も予想される。

### V. 結 言

最近製鋼法の分野に革命的な影響をもたらしつつある鋼の真空脱ガス法について、その方法、効果、工業化の現状、応用およびその将来などに関して展望し若干の所見を述べた。

わが国は世界の一流に伍する近代工業の確立とこれによる輸出増進のみが唯一の生きる道であり、しかもその根幹をなす鉄鋼業は亜熱帯性の湿潤な気候による悪条件の下におかれ、従来高級鋼の生産には並々ならぬ努力と犠牲が払われてきたことはいまさらいうまでもない。

したがってわが国における真空脱ガス法の重要性はむしろ欧米諸国より以上に強調されるべきであり、今後における同法の飛躍的發展が期待されるゆえんである。

この意味で小文が鋼の真空脱ガス法に関心を寄せられる方々に多少とも御参考になれば甚だ幸である。

(昭和 33 年 2 月寄稿)

#### 文 献

- 1) G. G. Carr: Iron Age 180 (1957) 1, 43
- 2) 林田忍四郎: 日本特許, 第 8709 号, (明 38-4-20)
- 3) A. Tix: St. u. Eisen, 76 (1956) 2, 61
- 4) B. V. 社映画 (独乙科学映画技術協会協力)
- 5) 米国特許 No. 2784961: Iron & Steel Engr. 34 (1957) 8, 26
- 6) 日本特許公告: 昭 32-8256
- 7) Steel (1957) Dec. 23, 71
- 8) F. Harders, H. Knüppel, u. K. Brotzmann: St. u. Eisen, 76 (1956) 26, 1721
- 9) Foundry Trade J. 103 (1957) 2142, 527 (Stal よりの抜萃)
- 10) Z. Phys. Chem., 77 (1911), 591
- 11) Z. Eminger, F. Kinsky: Hutnicke Listy, Csklskv, 11 (1956) 6, 345; R. Mét., 54 (1957) 5 抄録
- 12) K. C. Taylor: Iron & Steel Engr. 34 (1957) 10, 142
- 13) C. R. Garr & A. R. Troiano: J. Metals, 9 (1957) 4, 445
- 14) A. W. Dana Jr., F. Shortsleeve, A. R. Troiano: J. Metals, 7 (1955) 895
- 15) E. E. Thum: Metal Progress, 69 (1956) 2
- 16) A. O. Schaefer: Metal Progr., 69 (1956) 4, 68
- 17) I. E. Madsen: Iron & Steel Engr., 34 (1957) 1, 119
- 18) 工業材料 4 (1956) 10, 25
- 19) H. Zakowa & R. Radzwicki: Hutnik Poland 7 (1956) 11, 41 (H. Brucher, Technical Translations)

## — 特 許 記 事 —

### 最近の製鉄鋼業界における発明

公告番号	発明の名称	(発明者) 出願人
特許出願公告 (昭和 33—5—24)		
昭 33—4053	出銃口開孔機駆動装置 出銃口前にハンガーにより保持された開孔機と該ハンガーに着脱可能に取付けたレバーとをゲージおよびホイールを介してピストンに接続したワイヤーで連繋させて該開孔機を出銃口側面より操作するようにしたもの。	(光井 清) 八幡製鉄 K. K.
昭 33—4058	耐蝕性および耐熱性大なるアルミニウム含有鋳鉄 (略)	(楠瀬四郎外 2) 帝人製機 K. K.
昭 33—4059	マンガンを含む耐熱オーステナイト鋼 (略)	(荒木義郎) 三菱日本重工業 K. K.
特許出願公告 (昭和 33—6—11)		
昭 33—4552	廻転管状炉 ルルギ・ゲゼルシャフト・フユール・ヘミーウントヒユツテン・ヴェーゼン・ミット・ベシユレンテル・ハフツング (独) (略)	(カールハイツ, ヘンネンベルゲル外 1)