

# 鉄鋼技術共同研究会報告

## 新技術開発部会・真空冶金分科会報告

Report of Vacuum Metallurgy Subcommittee.

—New Technique Development Division—

- I. 緒言
- II. 鉄鋼の真空冶金の概要
- III. わが国の鉄鋼真空冶金工業の現況
- IV. 特殊材料（電磁気材料その他）の真空誘導熔解による諸性質の改善
- V. 鋼の真空熔解鑄造に関する研究（基礎実験結果）
- VI. コンセルアーク熔解法の動向と将来性
- VII. 真空鑄造による大型鋼塊の製造\*
- VIII. 分科会経過報告

### I. 緒言

遠藤勝治郎\*\*, 長谷川正義\*\*\*

真空処理によつて鉄鋼の性質を改善しようとする着想はすでに今世紀初頭に芽生えているが、真空機器の未発達のため長い間実用化されるにはいたらなかつた。工業的規模での生産に移されたのは1950年代に入つてからであるが、その後の進歩はまことにめざましく、現在先進諸国では耐熱鋼、電磁気材料、軸受鋼その他の高級鋼の相当量が真空熔解、あるいは真空鑄造によつてつくられている。

このような情勢に刺激されて、近年わが国でも鉄鋼の真空熔解、鑄造への関心が急速に高まり、1958年に「鉄鋼技術共同研究会・新技術開発部会」の中に新たに「真空冶金分科会」が設置され、技術的経験の公開、各種の討議、研究発表等を通じて工業化への道を切拓している。

本報告では同分科会の過去1カ年にわたる活動を基にして、内外における鉄鋼の真空技術の現況を述べ、会員諸氏に報告する。

因みにわが国でも真空冶金に関する研究会、シンポジウムなどは以前から各方面に設けられているし、基礎的研究もようやく活発になつている。しかし鉄鋼真空冶金工業の発展には技術的経済的に多くの問題が残されているので、本分科会はわが国の鉄鋼工業における真空技術

\* このほか川崎製鉄の真空脱ガス鑄造法の報告が予定されていたが、原稿締切に間に合わなかつた。

の発展をはかるため、関係各工場の技術の交流、情報の交換を促し、無秩序な外国技術の導入をおさえて急速な国内技術の向上と、設備の開発を強力に推進することを目的として設置された。

新技術の開発には各工場の利害関係、技術水準の差、秘密保持など協力研究の円満な推進には多くの障害が予想されたが、現在まで各社は共同研究会の主旨を十分に認識して、所期の目的の達成に努力している。

### II. 鉄鋼の真空冶金の概要

藤永昭三\*\*\*\*

#### 1. 沿革

真空冶金の原理的な問題についてはすでに多くの解説があるので省略し、ここでは鉄鋼における真空冶金の沿革を概観してみよう。

今日実用化されている方法を応用面から分類すると、真空熔解、真空脱ガス鑄造、真空熱処理の3つになるがこのうち真空熱処理の工業化はあまり活発でないので、ここではとりあげない。

##### (1) 真空熔解

真空熔解法をさらに細く別けると、

- 1 高周波炉による真空誘導熔解
- 2 消耗電極アーク炉による真空再熔解

の2つになる。このほか最近注目されてきたものに、ス

\*\* 新技術開発部会長，金属材料技術研究所，理博

\*\*\* 真空冶金分科会主査，早大教授，工博

\*\*\*\* 早稲田大学理工学部金属工学科

カール熔解 (skull melting), 電子衝撃熔解 (electron bombardment melting) などがあるが, いずれもまだ実験室的段階にあり, 工業化へは多少の時日を要すると思われる。

(2) 真空脱ガス鑄造法

平炉また電気炉で気中熔解した熔鋼を真空槽中に注湯して脱ガスするもので, 真空熔解にくらべて脱ガス効果は劣るが生産費が安く一度に多量の熔湯を処理できることから主として大型鍛造用鋼塊の製造に利用されている。

この方式としては, トリベ脱ガス法, 流滴脱ガス法, 吸引脱ガス法, 循環脱ガス法など諸種の鑄造法が行われているが, いずれも一長一短があり早急な優劣の判定を下し難い状態にある。

(3) 排気系

真空熔解で要求される真空度は  $10^{-3} \sim 10^{-1}$  mmHg, また脱ガス鑄造では  $10^{-1} \sim 30$  mmHg, 範囲である。いま 100 t の熔鋼を 5t/mn の速度で流下脱ガス処理を行ないその間の真空度を 2mmHg に保つとすれば 380,000 l/mn という大きな排気速度を必要とすることが経験的に知られている。また熔解, 鑄造時に発生する多量のダストに対する防御措置を考える必要がある。

このような条件に合致したものとして現在メカニカルブースター(主としてドイツ), とスチーム・エジェクター(真空脱ガス鑄造のみ, 主として米国) が使われている。両者の優劣はにわかに決め難いがダスト, および保守の両面ではスチーム・エジェクターが, また運転経費床面積の点ではメカニカル・ブースターが有利と思われる。

2. 海外の現況

(1) 米国

真空熔解のアイデアはすでに 1867 年の US 特許にみえていたが<sup>2)</sup>, 真空ポンプの未発達のため長い間実用化されるにいたらなかつた。第二次大戦中原子力工業, ペニシリン, 血漿製造などの必要から大容量の回転ポンプ, 拡散ポンプが出現するにおよびはじめて工業化への道が開かれたのである。

Utica Drop Forging & Tool Corp. ではジェット・エンジン用 Ni 基超合金の製造に当り, 品質のバラッキに悩まされていたが, 種々に検討の結果, それが析出硬化剤として添加した Al, Ti の歩留りの不同に帰因することをつきとめ, これの解決策として真空熔解法をとりあげた。1952 年, 61b の真空誘導熔解炉を設け実験に着手したが, 所期の結果を取めたのでただちに工業生産

に移り, 1953 年には 50 kg および 150 kg 炉が完成した。その後各社で高周波誘導炉による真空熔解が手がけられ, 生産品目も超合金のみに止まらず, 耐熱鋼, 工具鋼, 磁性材料, 超強靱鋼にまで拡張されている。現在公表されている最大規模の炉は前記 Utica 社の 2.5 t (500 lb) 熔解炉であるが, 1100kW, 900 e/s の高周波電流に 800kVA,

30 c/s の低周波電流を重ねることにより攪拌を助けている。この炉は Sweden ASEA 製であるが, 米国内の真空誘導炉メーカーとしては N・R・C, Stockes の 2 社が著名である。図 1 に N・R・C 製 1.5 t (3000 lb) 熔解炉の概略を示した<sup>3)</sup>。装置は上部の原料装入

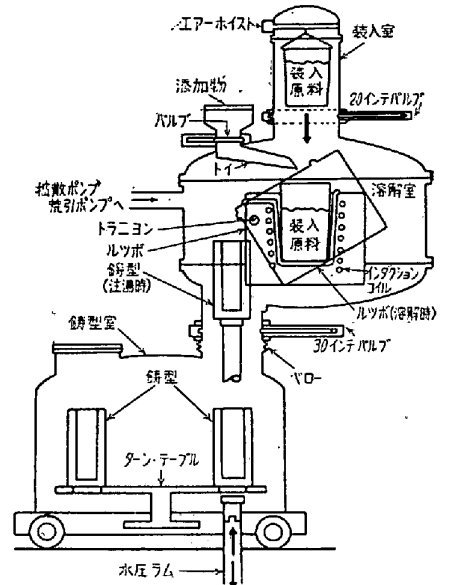


図 1 NRC の真空誘導熔解装置

室, 熔解炉室, 鑄込室の三部よりなり, 各室はバルブを閉じることによつて熔解作業を中断することなしに原料の追加装入, 鑄型の交換などが可能な構造になっている。

消耗電極法ははじめ Ti, Zr の成型法として発達したものであるが, 1950 年代になつてから Allegheny, Ludlum Steel Corp. などで鉄鋼, 超合金などへの応用が考えられ 1955 年初の鉄鋼用消耗アーク炉が上記 Waterliet 工場に建設された。1956, 1957 年には月 10 t (2000 lb) におよぶ超合金, 鉄鋼が生産されている<sup>4)</sup>。その後 Timken, Mrdvale-Heppenstall Co. Mallbry-shallon なども生産に移り, 1958 年にはその数 30 社に達し, 生産品目もはじめはジェットエンジン用超合金が主であつたが, 最近ではステンレス鋼, 耐熱鋼, 工具鋼, 軸受鋼などにおよび, 1958 年末には 50,000 t の生産能力をもつにいたつている<sup>5)</sup>。同年末の真空誘導熔解炉の生産能力は 13,000 t 程度といわれ, 後から発展した消耗アーク熔解法の方が圧倒している。表 1 に米国における真空熔解炉の数と生産量の推移を示した。

このような発達をみた理由は詳らかではないが, 誘導熔解にくらべコストが安く, 大型鋼塊がつくられる利点が目目をひいたものと推測される。因みに現在米国で最

表 1. 米国における真空熔解炉発達の推移

炉の種類	炉の数		生産量 (t)	
	1957	1958	1957	1958
真空誘導熔解炉	64	75	9,500	12,000
消耗電極炉*	31	44	50,000	70,000
消耗電極炉**	4	10	22,000	39,000

\* チタン熔解用の炉で現在は鉄鋼材料、高合金の熔解にも使用される炉を含む。

\*\* チタン業務を行わない鉄鋼会社によって運転されている炉、これは\* 項の計算に入れられる。

大のインゴットは直径 30 インチ、重量 6~8 トンに達するという。製作費は Timken 社、6,000 lb 熔解炉を例にとれば 500,000 ドルであり、かなり高価格である。

誘導炉、アーク炉とも初期のものは排気系にオイル・ブラスターと回転ポンプとを組合せ用いていたが、最近ではオイル・ブラスター、メカニカル・ブラスター、水封ポンプ water ring pump の組合せに変わりつつある。

なおこの他特殊な例として、Westing House 電機会社では Udimet 500\* をスカル熔解によつてつくつて

いる。表 2 は各種熔解法によつてつくつた SAE 52,100 と A-286 の分析例である。いずれも真空熔解によつてガス含量は低下するが、真空誘導熔解鋼を原料としてアーク再熔解をおこなつてもガス含量の低下はあまり期待できない。

米国における真空脱ガス鑄造の歴史は比較的新らしく工業的規模における生産がはじめられたのは 1957 年以降のことである。技術的な遅れをカバーするため西独より技術導入をした関係上、Bochumer Verein 社の流滴脱ガス方式をそのまま踏襲しているが、強力なスチーム・エジェクターポンプを使用し、真空度を 0.5~0.6 mmHg まで高めている点に特色がある。現在脱ガス鑄造法を行なっている主要メーカーは Bethlehem 製鋼、

表 2. 諸種の熔解によつてつくつた SAE 52,100 および A-286 鋼のガス含有量

熔 解 法	A-286			52,100		
	O (ppm)	N	H	O	N	H
大 気 中 熔 解	14	300	10	30	100	<1
真空アーク再熔解 (気中熔解鋼電極)	5	50	3	7	70	<1
高周波真空熔解	3	50	<1	5	3	<1
真空アーク再熔解 (高周波真空熔解鋼電極)	3	20	<1	3	3	<1

\* ニッケル基超合金 C 0.10, Cr 19.0, Mo 4.0, Ti 3.0, Al 3.0, Co 19.0, Ni bal.

U. S. Steel の 2 社であるが最近 Boldrin, Lima, Hamilton Corp.<sup>10)</sup> などでも生産を開始している。いずれも装置は Stockes 社の製作になる。

Bethlehem 製鋼

では 1956 年 8 月<sup>11)</sup>

容量 7 t. の実験炉を設置し基礎的実験をおこなつた結果 (1) 水素量は平均 60% 減少、(2) 毛割れに対する感受性はいちじるしく減少、(3) 真空度を 1.2 mmHg 以上に高めれば水素量は 1~1.5 ppm に保つことができることなどを確認し、またノズルの形状、鑄型の距離、熔湯の

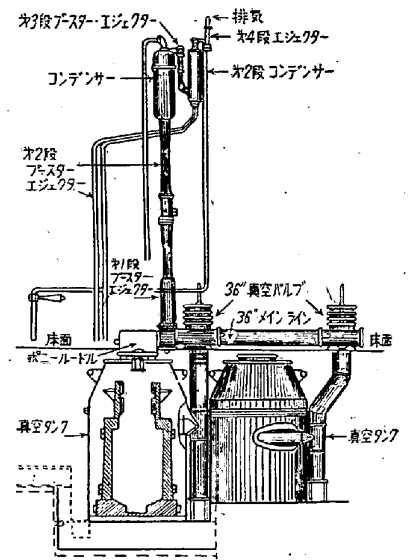


図 2. Bethlehem 250 t 社脱ガス鑄造炉

噴出状況などについても貴重な基礎的資料を得た。これらのデータを基にして図 2 に示すような 250 t 炉が建設され 1957 年 7 月より稼働している。熔湯は一旦脱ガス槽の上部に据えられた中間トリベ (ポニー・レードルと名付けている) に移されて後注湯される。排気は 4 段スチーム・エジェクターによつておこなわれ、操業真空度は 1 mmHg に保っている。現在稼働中のものは 2 基でインゴット数にして平均月 26~27 本である。

U. S. Steel 社のものも Bethlehem 製鋼と大同小異であるが、容量は 80~160 t で若干小さい<sup>12)</sup>。0.3~0.6 mmHg の真空度にて 10t/mn の速度で注型している。脱ガス処理後のガス含量を比較すると水素は 75~90%、酸素は 35% 程度除去され、窒素量にはほとんど変化がみられない。

米国における真空鑄造鋼の用途は主としてタービン・ローターなどの大型鍛造用鋼塊に向けられている。コス

トは償却費をも含み、鋼 1t 当り 6~9 ドルであり、真空鑄造法を採入れることによつて原価に影響する割合は、アーク炉で 1lb 当り 20 ドルといわれている。1957 年の米国における生産量は 36,000 t であつた<sup>13)</sup>。

(2) 西欧諸国

西欧圏の諸国では、西独一カ国のみが活発な工業的生産をおこなつており、他の諸国はようやく工業化に踏切つたという段階にすぎない。したがつてここでは西独を中心として記述を進めていきたい。

1920年代、W. E. Rohn が白金に代わるべき熱電対用合金を見い出すべくニッケルクロム合金の研究に着手したが、このさい彼は真空中での試料の熔製を試みた。彼のアイディアは Hanau の Heraeus Vacuum Schmelz AG の採用するところとなり、以来 Rohn などの精力的な活動によつて久しい間 Hanau は真空熔解のメッカたる観を呈した<sup>14)</sup>。しかし戦後は真空熔解に関するかぎり、米国に一步を譲つている。このことはチタン工業の立遅れ、航空機産業の閉鎖などの問題と関連しているように思われる。他の西欧諸国についても事情は同様であり生産規模はいずれも小さい。真空誘導熔解炉設備のあるメーカーには Gerätebau-Anstalt-Balzers (リヒテンシュタイン)、Edward Efco (英)、Jessop & Sons Ltd (英) などがあるが、英 Sheffield の G. L. William 社が 週 45 t 程度の生産実績をもつている<sup>15)</sup>。

消耗型アーク炉はチタンの生産部門をもつ ICI(英)が 1957 年までに年産 2000 t (チタン換算) の熔解能力を備えたほか、表 3 に掲げのようなメーカーがある。これらのメーカーの 70% 近くは Heraeus 社 (独) 製のアーク炉を使用している。Jessop & Sons Ltd. (英)

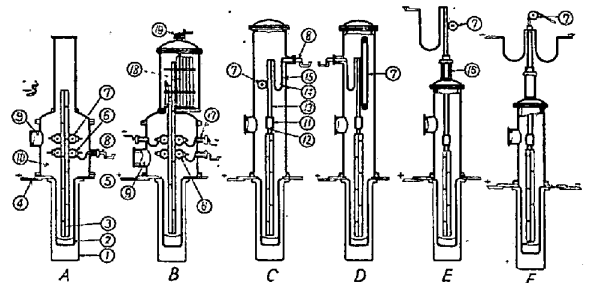
表 3. 西欧諸国の消耗型アーク熔解炉設置メーカー (1957 年中期)

メーカ	国名	生産能力 (チタン換算: t/年)
Imperial Chem. Industry	英	2000以上
William Jessop & Sons	英	560
Pechiney	仏	300
Ugine	仏	200
H. C. Heraeus	独	200
Friedrich Krupp	独	200
Metallwerk Plansee	オーストリア	推定10~100
Degussa	独	
Deutsche Edelstahlwerk	独	
Vereinigte Deutsche metallwerk	独	
Montecatini	伊	不明
A. B. Nynäs Petroleum	スウェーデン	
英, 原子力公社 原子核中央研究所	英 仏	

では同社製アーク炉にて 2 t の鋼塊をつくつているが、表 4 にインゴット径と熔解炉の仕様を掲げた。その他の社についてはどの程度鉄鋼熔解に転換しているが不明である。ただ Heraeus 社のアーク炉が幾多のすぐれた制御機構をもつており、広く世界各国で用いられている。

表 4. 消耗電極アーク熔解炉のサイズの一例 (At. Wm Jessop & Sons Ltd)

インゴット径 (in)	インゴット重量 (lb)	電極径 (in)	ブースター・ポンプの排気速度 (l/s)	所要電力 (A)
6	70	3	850	3000
9	500	6	1300	10000
12	1000	9	1300	10000
20	6720	16	4500	20000
24	6720	20	4500	20000



1. ルツボ冷却用水槽
2. ルツボ
3. 消耗電極
4. ターミナル(陽極)
5. 絶縁リング
6. ターミナル(陰極)と電極駆動部
7. 電極駆動部
8. ターミナル(陰極)
9. 真空ポンプフラジ
10. 炉室
11. 電極保護装置
12. 消耗電極値
13. 電気供給部
14. 可撓電線(陰極)
15. 水冷式送電管
16. 送電部と真空シール
17. 電極熔接電源
18. 電極室
19. 電極室用送電ギア

図 3. 種々の消耗電極制御装置

図 3 に種々の型のアーク熔解炉の概念図を示した。真空熔解の発展は今後にもたねばならぬが、真空脱ガス、鑄造技術では西独が断然他をリードしている。図 4 に現在おこなわれている鑄造装置の概略を示した<sup>16)</sup>、A は初期のトリベ脱ガス装置であるが、熔湯の底の方は静水圧の影響を受け脱ガス効果が上らないため次第に癢れる傾向にある。B, C, D は A の改良として産れたもので、B は熔湯を細流にして滴下、C はサイフォンによる吸上げ、D はアルゴンガスの吹込などの諸方法で反応面積の増大をはかっている。

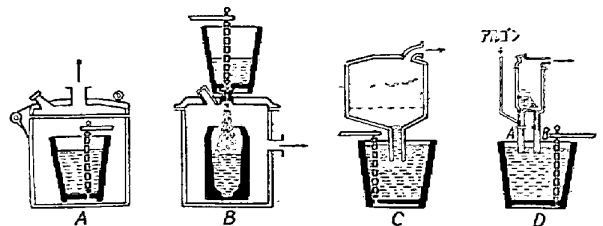


図 4. 現行の脱ガス鑄造装置の概念図

Bochumer Verein 社でははじめAの方法によつていたが、その後図4Bの流滴脱ガス法に切換え現在月3000t程度が生産されている。脱ガス鋼塊は米国と同様主としてクランク・シャフトなどの大型鍛造品に向けられている。なお真空槽中で直接インゴットに鑄込むか、トリベにうけるかによつて真空造塊 Vakuumblockguß と流下脱ガス法 Durchlaufentgassung とに区別される。また同法の欠点である注湯時の温度降下を防ぐため、真空槽を上下2室にわけ一旦熔湯を上部のアーク炉にうけて保熱をおこない、また適当な添加剤を加えることによつて脱硫、脱磷を可能にするような考案もみられる<sup>19)</sup>。これに対し Dortmund Hörder Hüttenunion では図4c、に示すような真空槽中に熔鋼を吸上げて脱ガス処理をおこなう方法を考案、吸引脱ガス法 Vakuumheber-Verfahren と名付けているその後図5に示すように装置に若干の改良が加えられ今日ではⅢのようなものが用いられている。1958年までおおよそ5000tの平炉鋼が同法によつて処理されている<sup>20)</sup>。しかし本法は少量の熔湯には適用できず、脱ガス操作が完了するまで真空槽を10数回上下せねばならぬ、鑄込は大気中でおこなわねばならぬなどの欠点もある。

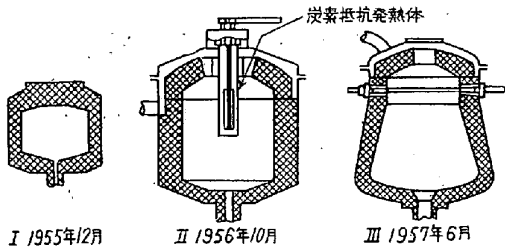


図5. 吸引脱ガス装置の変遷

最近 Heraeus 社は上記の方法を改良し、図4d、図6に示すように、熔湯中に2本のパイプを挿入し、一方にアルゴンガスを吹込むことによつて熔湯の循環を容易にすることを計り、循環脱ガス法 Umlaufentgassung と名付けている<sup>21)</sup>。本法によれば40~120tの熔湯を処理するのに所要時間は10~20分で済むという。図7に上記の処理をおこなつた熔鋼中のガス含量変化の一例を示した。

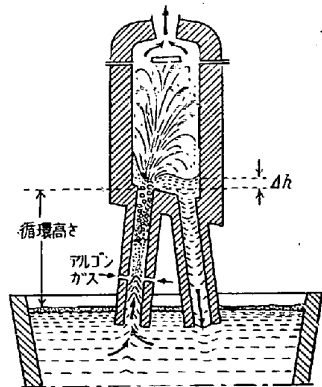


図6. 循環脱ガス法の原理

この他 EFCO Edward (英)、その他で興味ある方式が発表されているが、西独以外の国では Bochumer

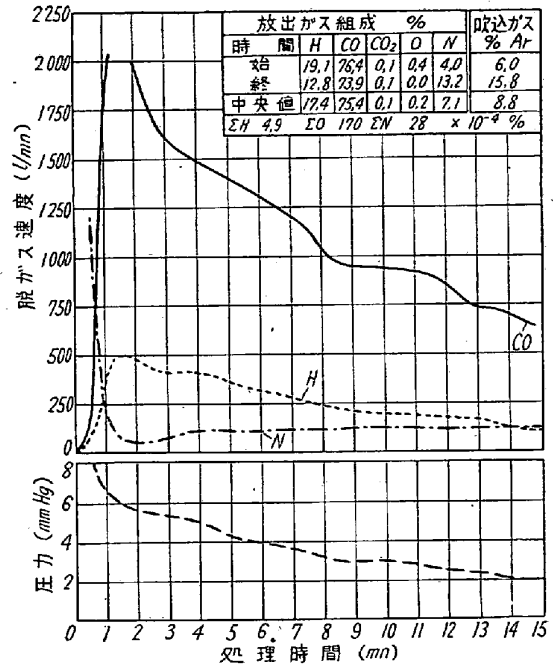


図7. 処理時間の脱ガスにおよぼす影響 (0.19C鋼)

Verein 社などとの技術提携を通じていままでの立遅れをカバーする方向に進んでいるようである。フランスではすでに3つの工場が Bochumer 型の脱ガス鑄造炉をもっている<sup>22)</sup>。

西独では真空脱ガスに用いる真空度はアメリカよりも低く10mmHg前後である。Bochumer Verein 社ではじめ真空脱ガス法が工業化された頃には10<sup>-1</sup>~20mmHg付近で能率よく働くポンプがなかつたため、キニー型ポンプを十数台連ねて使用していたが、その後ルーツ・ブロワーを真空用に改造したメカニカル・ブースター(ドイツではルーツ・ポンプ)が発達するにおよんで現在では回転ポンプのかわりに水封ポンプ Wasser ring pumpe とメカニカル・ブースターの組合せが専ら用いられている。図8に三段メカニカル・ブースターと水封ポンプを組合わせた場合の各段における到達真空度の一例を示した<sup>21)</sup>。

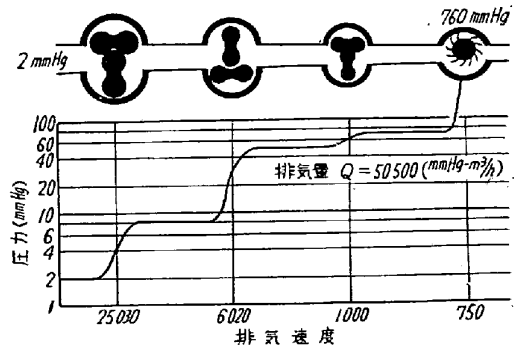


図8. メカニカルブースター各段における真空度の変化

(3) ソビエト連邦

I. M. Norik によれば<sup>24)</sup> 1940年, A. M. Samarin などによりインゴット・ケース中での熔湯の脱ガス処理をおこなわれたが, 戦争のため一時実験は中断され1946~1947年になつて容量50 kgのトリベ脱ガス用実験設備が設けられた。しかし工業化にうつされるまでにはかなりの時を費し, 1952~1953年にはじめてエナキエフスキー工場に同装置が建設された。図9はドニエプロスペスターリ工場の真空脱ガス装置であるが, Bochumer Verein 社のいわゆるトリベ脱ガス法に属する。1958年モスクワで開かれた第2回真空冶金シンポジウムに出席した Aksoy の報告によれば<sup>25)</sup>, 真空脱ガス法はソ連邦では広くおこなわれており同シンポジウムに提出された報告中 10 はトリベ脱ガス法, 4 は流滴脱ガス法に関するものであつた。一回の処理量は最低 15 t から最高 120 t におよぶが, トリベ脱ガス法は 50 t までそれ以上は流滴脱ガス法によつてゐる。

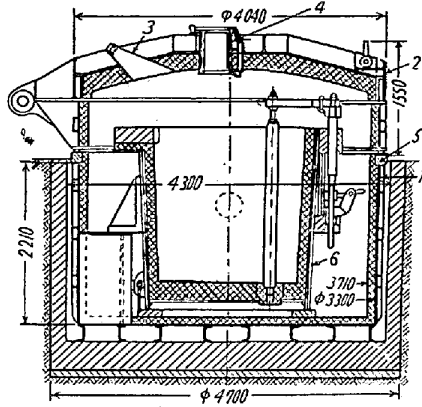


図9. ドニエプロスペスターリ工場のトリベ脱ガス装置

鋼の原料たる低Cフェロクロームの製造, 熔湯の連続脱硫法などがある。

周知のように 18-8 ステンレス鋼の粒界腐食を完全に防止するためにはC量 < 0.02% なることが必要である。このような低Cオーステナイト鋼をつくるためには原料フェロクロームのC量 > 0.03% にせねばならぬ。

A. S. Yakunin は高Cのフェロクローム粉末と酸化剤すなわち鉄およびクロム鉱石, 珪土, 酸化クロームなどを圧縮成型し, 1300°C, 10 mmHg で反応せしめ, 海綿状の低Cフェロクローム (C < 0.03) をつくつてゐる<sup>26)</sup>。

Nova Tula 製鋼所では図 10 に示すような実験炉 (処理量 15 t/h) で熔融鉄の脱硫を試みているといふ<sup>27)</sup>。詳細は不明であるが, 1260~1570°C, 10<sup>-2</sup> mmHg で処理するらしい<sup>25)</sup>。

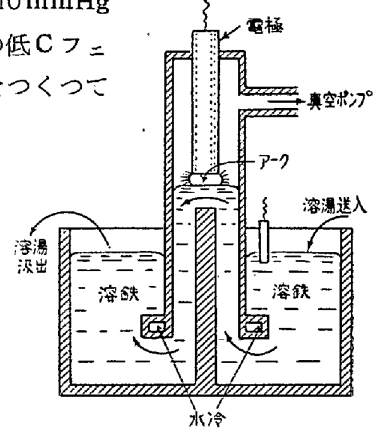


図10. 連続真空脱硫装置の概念図

III. わが国の鉄鋼真空冶金工業の現況

長谷川正義

冒頭にも述べたように 1956 年頃よりわが国でも鉄鋼における真空技術の開発が真剣にとりあげられ, 1958年

表 5. わが国の鉄鋼真空熔解工業設備

業種	型式	容量	基数	電源	真空度 (mmHg)		排気系		附属装置	炉材	主なる生産品目	完成年月	備考
					到達	操作中	ポンプ	排気速度					
東北金属工業	高周波誘導炉	500kg	1	発電機 350kVA 高周波トランス 5000 ~800V	—	10 <sup>-2</sup> ~10 <sup>-3</sup>	RP 3,000l/mn 2 MB 500l/s 2 12'' DP 3,000l/s 2	棚吊落し棒 覗キ窓	マグネシア	珪素鋼, 純鉄, Ni等 磁心材料	1958・1	NRC 製	
住友金属工業	高周波誘導炉	100kg	1	発電機 100kW 高周波トランス 150 ~250V	4×10 <sup>-4</sup>	1~5×10 <sup>-3</sup>	RP 6,000l/mn 1 RP 60l/s 1 14'' BP 400l/s 1		マグネシア	真空管, 磁気材料	1958・10	日本真空製 近く 500~1000kg の炉 の増設を計画 中	
八幡製鉄	高周波誘導炉	100kg	1		—	—	RP 6000 1 DB (NRCB12) 1				1958・12	研究用 NRC 製	
特殊製鋼	高周波誘導炉	100kg	1		—	—					1958・	研究用	
神戸製鋼	消耗型 アーク炉	2t	1							鉄目なし鋼製 水冷ルツボ		自社製	
関東製鋼	消耗型 アーク炉	700kg	1	655kVA 出力電流 8000A	10 <sup>-4</sup>	3~15× 10 <sup>-3</sup>	RP 6500l/mn 1 BP 600l/s 1 DP 4,000l/s 1	遠隔操作 工業テレビ, 水圧, 水温, 真空 変化自動 監視	鉄目なし鋼製 水冷ルツボ		1959・5	日本特殊機 械製	