

工業的高真空熔解装置について

近藤 彌太郎* 須藤 卓郎** 土井 俊雄***

High Vacuum Furnace for Industrial Use

By Yatarō Kondō, Takurō Sudō and Toshio Doi

Central Research Laboratory, Hitachi, Ltd.

Abstract

The writers, staff researchers at the Hitachi's Central Research Laboratory, introduce herein a vacuum furnace which they completed recently for the production of metals and alloys with high purity.

The furnace has a capacity of 30 kg, and its vacuum pumping system consists of a 14-inch oil diffusion, a 6-inch oil ejector and three mechanical rotary pumps. Heat is generated by means of a 1,000 cycle, 400 V induction coil or resistance heat coil made of 2 mm molybdenum wire. For the power supply for induction heating is used a 60 kW motor generator. The mold and the crucible are designed to tilt in casting, operated by pressure of 10^{-4} mmHg range.

In the end of the article, the writers describe various properties of vacuum melted copper and give some of typical operational diagrams.

〔I〕 緒 言

Gaede が 1910 年ごろ油回転ポンプを作つたのを契機に、それ以来真空技術は急速に進歩し、第 2 次大戦当時には欧米では大規模な真空装置が完成していた。

真空技術はサイクロトロンをはじめ、科学の広い実験研究分野で利用されるのみならず、真空技術と不可分の関係にある電子管工業を筆頭に工業的にもますますその応用範囲をひろめつゝある。

特に真空熔解、真空焼鈍、真空焼結などは金属工業への応用として注目すべき応用分野である。

筆者らは数年来真空熔解に関し種々調査研究を行つて来たが、真空管金属材料など高純度金属材料の工業的熔解を目的として 10^{-4} mmHg 程度の高真空下で一回に 30 kg 熔解できる真空熔解装置を完成、1 年有余順調に稼働しており着々その成果を取めつゝあるので、これらについてこゝに報告する。

〔II〕 真空熔解の目的および応用

(1) 真空熔解の目的

* ** *** 日立製作所中央研究所

金属または合金を真空のもとで熔解鑄造する目的は高純度の金属および組成の確実な合金を作り、熔解された材料の物理的、化学的、機械的、電氣的諸特性の向上を計ることであろう。

しかして真空中での金属の熔解に対してつぎのごとき効果が挙げられる。

(a) 空気との反応防止

金属の熔解過程において空気中の酸素、窒素などとの反応を防止できる。すなわち最近工業化が進歩しつゝある Ti, Zr などのごとくガスとの親和力の非常に強い金属の精錬には真空が応用される。この他高融点金属、高純度の半導体もこの一例である。

(b) 不純物の除去

真空熔解を行えば金属中に不純物として含まれている蒸気圧の高い金属および化合物は蒸発昇華して除去される。

(c) ガスの放出

金属中に熔解または吸着しているガスは真空中で金属が熔解されると急速に放出される。

(b)(c)の例として Cu の真空熔解においては従来の無酸素銅 (OFHC) よりもさらにガス含有量や硫黄などの

少ないものがえられ、密度が増し、電気伝導度、熱伝導度が増大する。

(d) 酸化物の熱分解

金属中の酸化物の解離圧が真空熔解中の真空度より高いものは熱分解されると考えられ、たとえば特殊鋼や鉄合金で非金属介在物の量が非常に減少して疲労、衝撃、展性、延性などの機械的性質が改善される。

(2) 真空熔解の応用

以上のごとく真空熔解はかずかずの特長があるので Cu, Ni, Fe などの真空管金属材料、パーマロイ、純鉄などの磁性材料の熔解にはひろく利用されている。また靱性の増大を計る Cr 基耐熱合金、疲労抵抗が改善される特殊鋼、W, Mo, Ta, Ti などの難融金属の真空熔解なども着々研究成果を挙げている。

これらの他原子力に関係ある Be の真空熔解、Ge, Si などの半導体の真空熔解など今後大いに発展を期待される工業の一つであろう。

なおドイツの Heraeus Vakuumschmelze⁽¹⁾ で報告されている例としては Be—Cu 合金、Be—Ni 合金、Be—Ti—Ni 合金などの製作に応用し、熱電対材料、電熱線の真空熔解も古くから実施されているものである。

〔III〕 最近の真空熔解装置について

真空熔解の実験室的規模の研究は Yensen⁽²⁾ によつて行なわれ、その重要性が認められた。工業的規模としてはドイツの Heraeus Vakuumschmelze が歴史的にも古くまたかずかずの記録的装置を完成している。しかし操作真空度は約 5 mmHg~50 mmHg 程度であつた。

近年真空技術が長足に進歩し、油拡散ポンプとしては口径 32 吋、その排気速度 1 万数千 l/s、機械的真空ポンプとしては約 2 万 l/mn におよぶ大容量のものが製作され、さらに 10⁻¹~10⁻³ mmHg の範囲で特に排気速度の最大値をもつ油エゼクターポンプが使用され始めた。また漏洩試験器としても 10⁻⁹ mmHg l/s 程度の漏洩も検知できる質量分析計型リークデテクタが応用されている。この他かずかずの研究技術が完成し、真空時代を出現するに至つた。この発展を背景に真空熔解装置も操作真空度は 10⁻²~10⁻³ mmHg 程度と格段と向上し、各国で工業的熔解炉も製作され、各種の金属合金を真空熔解し、その成果を取めている現状である。

真空熔解装置の主要部は、真空排気系、加熱方式およ

第 1 表 最近報告された真空炉の諸項目
Table 1. The Specification of the Vacuum Furnace Published in Recent Years

番号	発表者	真空排気系		加熱電源			熔解量	熔解金属	真空タンク
		真空ポンプ	真空度 (mmHg)	電力 (kW)	電圧 (V)	周波数 (kc)			
(1)	Stauffer 等 (米 国)	油拡散ポンプ 6吋1台 油回転ポンプ 25 ft ³ /mn 1台 100 ft ³ /mn 1台	5×10 ⁻³	50	200	10	400 lb	銅	材質 軟鋼製 容積 約1,000 l
(2)	J. H. Moore (米 国)	三段の排気系	1×10 ⁻³		400	3	半連続	各種	
(3)	Geraetebau Anstalt Balzers (スイス)	油拡散ポンプ 500 l/s 1台 油回転ポンプ 100 ft ³ /h 2台		40	300	10	20 lb	特殊鋼 その他	材質 ステンレス製 直径 2 ft
(4)	Malcolm (英 国)	油拡散ポンプ プースター付 6吋2台 油回転ポンプ 100 ft ³ /mn 2台		50	400	2	50~ 100 lb	鉄	材質 ステンレス製 容積 1,400 l
(5)	Leybold Degussa (ドイツ)		10 ⁻³	50	220	2	50 kg	各種	直径 約 1 m 高さ 約 1 m
(6)	山口 博 (日 本)	油拡散ポンプ 240 l/s 2台 油エゼクターポンプ 220 l/s 2台 油回転ポンプ 1,500 l/mn	10 ⁻²	150	200	1	50 kg	銅 ニッケル 鉄	
(7)	長島富雄他 (日 本)	油拡散ポンプ 200 l/s 1台 油回転ポンプ 400 l/mn 1台	10 ⁻⁵	5		3,000	1 kg	磁性 材料他	
(8)	N. R. C. (米 国)	油拡散ポンプ 4吋1台 油回転ポンプ 12.5 ft ³ /mn 1台	10 ⁻⁵	抵抗加熱方式 発熱体 タングステン				各種	直径 18 吋, 高さ 12吋のパイレックス スガラス

び電源、鑄造装置、炉体および鑄型などで、最近数年間に発表された数種の真空熔解装置について以上の主項目をとりまとめたものが第1表である。

(1) 真空排気系について

熔解容量によつて真空ポンプの容量も変つてくるが、大型装置で高真空度を目標とするものは油拡散ポンプ、油エゼクターポンプ、油回転ポンプの3種のポンプを直列に稼働させているものが多い。排気回路はもちろん始動時の油回転ポンプによる予備排気を考慮し、バイパス回路を有している。操作真空度は前述のごとく大体 10^{-2} ~ 10^{-3} mmHg 範囲のものが大部分となつて来ており、中には第1表(5)の Leybold-Degussa⁽³⁾のものは 10^{-3} ~ 10^{-4} mmHg の範囲にも保持できると示されている。

(2) 加熱方式

加熱方式は抵抗加熱式、誘導加熱式、電弧加熱式の3方式に大別できる。

(a) 抵抗加熱式

抵抗加熱のものは発熱体として Mo や W が用いられ比較的熔解量の小さいものに適用されている。温度調整などは容易であるが、熔湯の攪拌作用が乏しいこと、熔解に比較的長時間を要することなどが欠点といえる。第1表中(8)の N.R.C.⁽⁴⁾から発売されているものの発熱体は W で最高 2,000°C まで精密に温度調整が可能である。

(b) 誘導加熱式

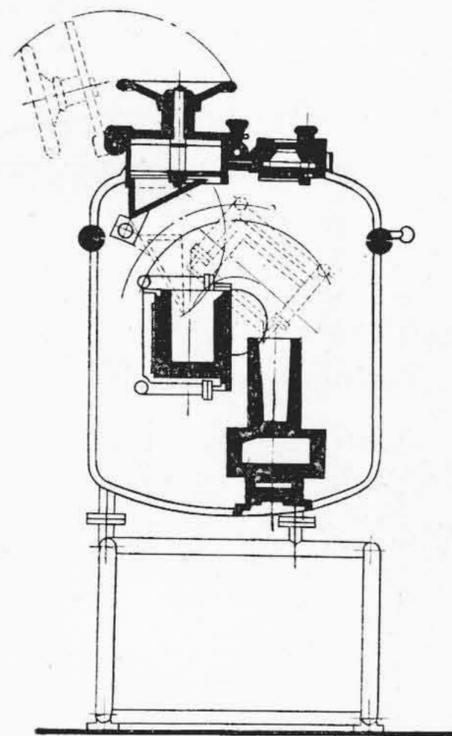
つぎに誘導加熱式は多くの装置に広く利用されているが、この方式は熔湯の攪拌作用がよいこと、短時間に熔解できるなどの利点があるが、設備費などは抵抗加熱式より費用がかさむ欠点がある。なおこの方式をさらに細別すると加熱コイルを真空タンク内に取める方法と外側にコイルを巻く方法とがある。後者の例が第1表中の(7)⁽⁵⁾でガス放出を防ぎ高真空度に保持できる特長があるが、石英管などの機械的強度に限度があり、大容量のものは不可能である。したがつて表中多くのものは内部加熱コイル型であるが、この場合技術的に問題となることは放電現象である。これは操作真空度にも関連することであるが、大体電圧 200~400 V、使用周波数は 1~10 kc 程度である。

(c) 電弧加熱式

最後に電弧加熱式は Ti, Zr, Ta, Mo, W などの高融点でかつガスとの親和力の強い金属を水冷銅モールド中で、または融かす金属自身を坩堝のようにして電弧で熔解する方式で Ti などに応用されている例が多い。

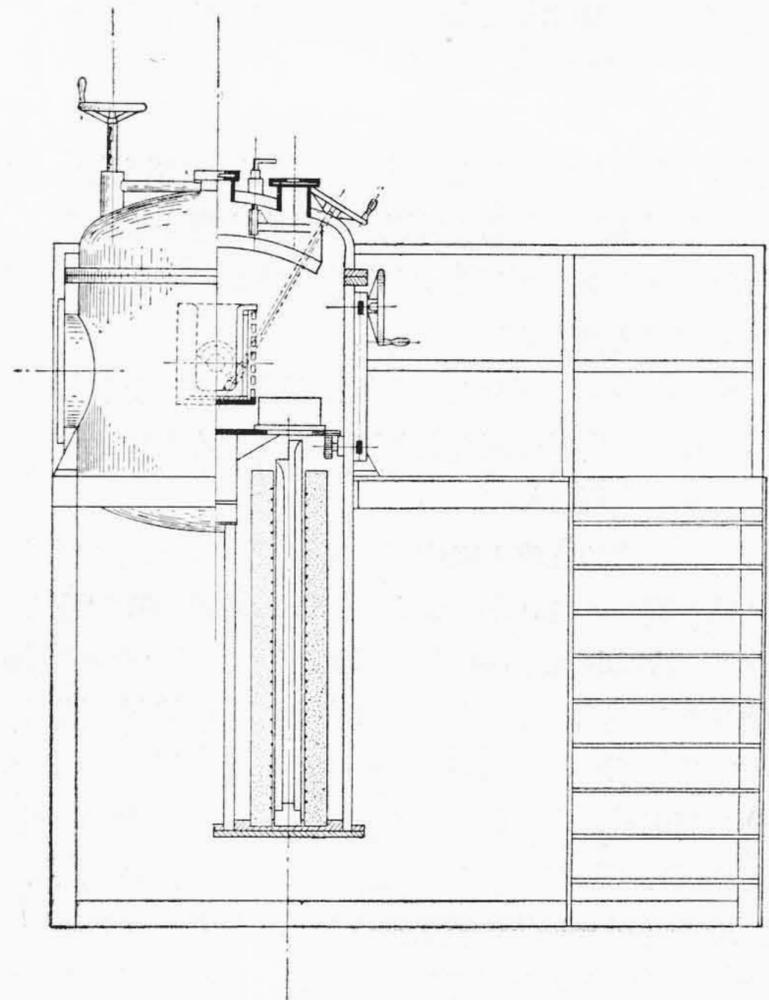
(3) 鑄造装置

真空熔解装置においては熔解作業のみならず、鑄造も真空中で操作しなければ、その目的は果されない。しか



第1図 誘導加熱真空熔解炉の断面略図
(Geraetebau Anstalt Balzers)

Fig.1. Schematic Diagram of Induction Heating Vacuum Furnace
(Geraetebau Anstalt Balzers)

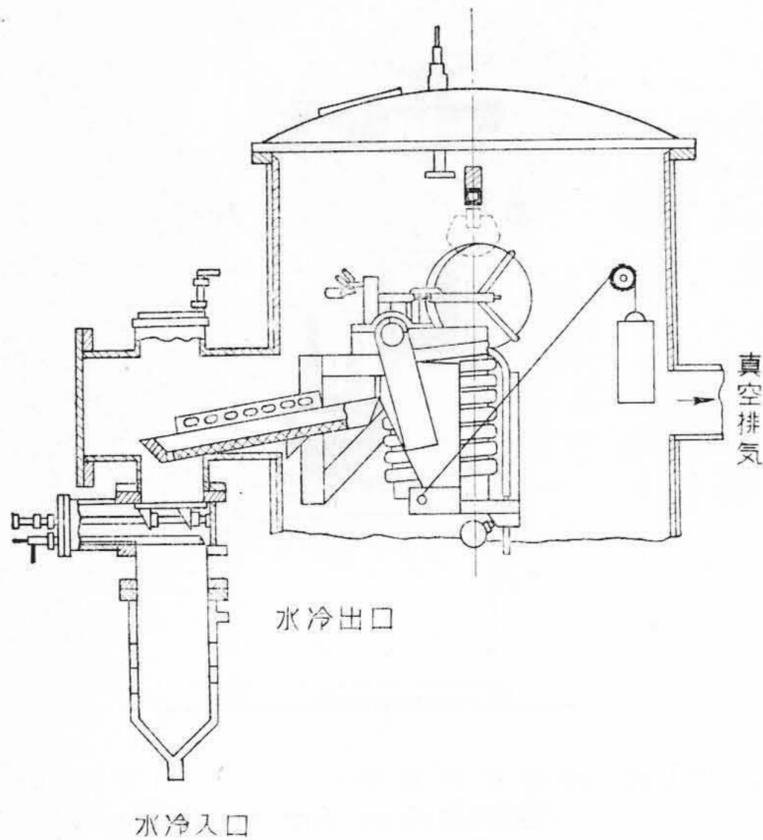


第2図 50 kg 真空熔解炉の断面略図
(Leybold-Degussa)

Fig.2. Schematic Diagram of Vacuum Furnace (Capacity 50 kg)
(Leybold-Degussa)

してこの鑄造法には

- (i) 真空タンクを固定し内部高周波コイルとともに坩堝を傾け、注湯する方法



第 3 図 N.R.C. 製半連続真空熔解の断面略図
 Fig.3. Schematic Diagram of Vacuum Furnace (Type of Semi-Continuous Melting in Vacuum, National Research Corp.)

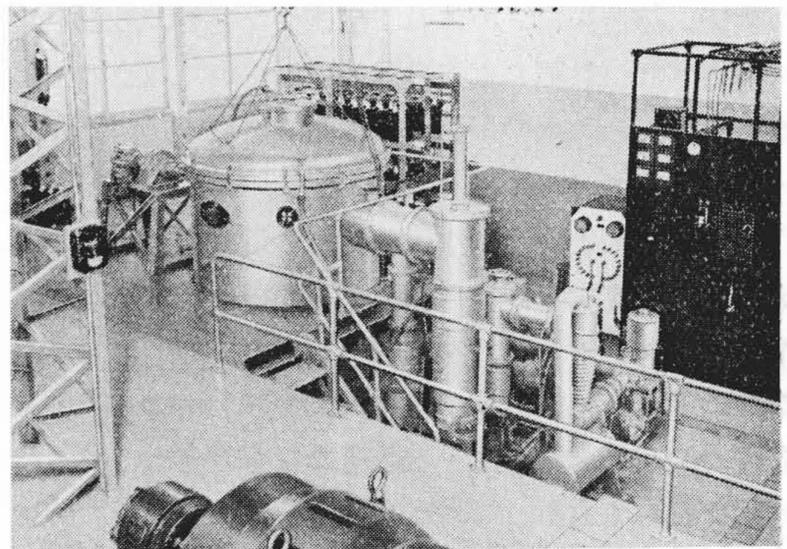
- (ii) 真空タンクおよび外部に巻かれた高周波コイルを固定し、内部の坩堝のみ移動注湯する方法
- (iii) 真空タンクおよび内部高周波コイルをともに傾けて注湯する方法
- (iv) 真空タンクおよび内部高周波コイルをともに固定し、坩堝の底孔をあけて注湯する方法などが一般に利用されている

(i) の方法は第 1 表中(2)(3)(4)⁽⁶⁾(5)などに利用され、第 1 図スイス Geraetebau Anstalt⁽⁷⁾ 第 2 図はドイツ Leybold-Degussa⁽³⁾ (50 kg 炉) の熔解炉の断面略図である。(ii) の例としては表中(7)の装置に適用されている。(iii)の例は表中(6)⁽⁸⁾の装置に用いられ、タンクの回転軸に真空排気口を共用している。(iv)の例としては Stauffer⁽⁹⁾ などの発表したものが代表的なもので、黒鉛坩堝の底部に黒鉛製栓をしており、注湯に当つては真空外でカムを回転し栓を抜き、孔の下部に設けられた鑄型に注湯する構造である。

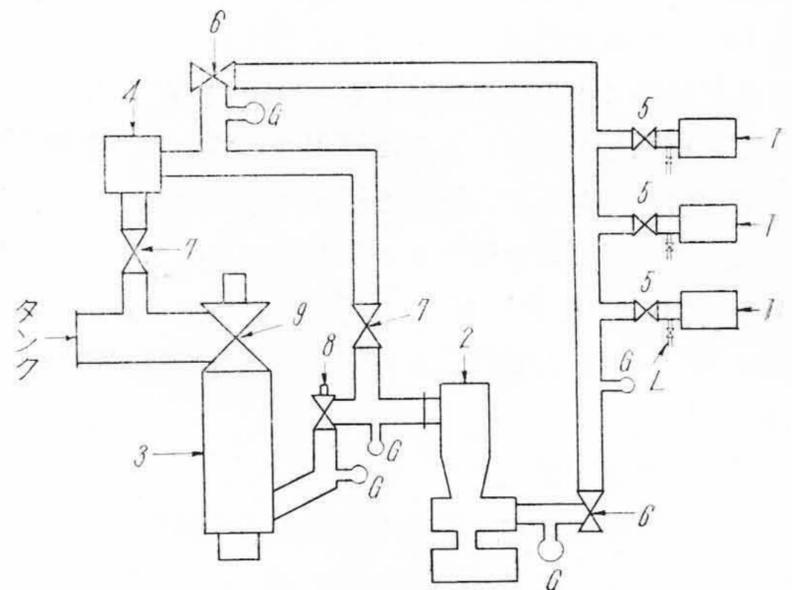
(4) 鑄 型

高度の真空度を保持するためにガス放出の多い材料は不適當で金型が一般に用いられている。Stauffer などの装置では銅製水冷鑄型が使用されている。

第 3 図は鑄型の前備排気をそなえ、連続操業を可能にした N. R. C. 製⁽¹⁰⁾ のもので、これと同原理のものが Leybold-Degussa でも製作されているようである。



第 4 図 工業的高真空熔解炉の外観
 (日立製作所中央研究所)
 Fig.4. General View of High Vacuum Furnace for Industrial Use
 (Central Research Lab. Hitachi Ltd.)



- | | |
|------------------|-------------------|
| 1. キニー型油回転ポンプ | 7. 6" 180° 型真空バルブ |
| 2. 6"油エゼクターポンプ | 8. 6" 90° 型真空バルブ |
| 3. 14" 油 拡 散 ポンプ | 9. 14" 90° 型真空バルブ |
| 4. ト ラ ツ プ | L. リークコック |
| 5. 2" 90° 型真空バルブ | G. 真 空 計 |
| 6. 3" 90° 型真空バルブ | |

第 5 図 真 空 排 気 系 統 図
 Fig.5. Diagram of Pumping System

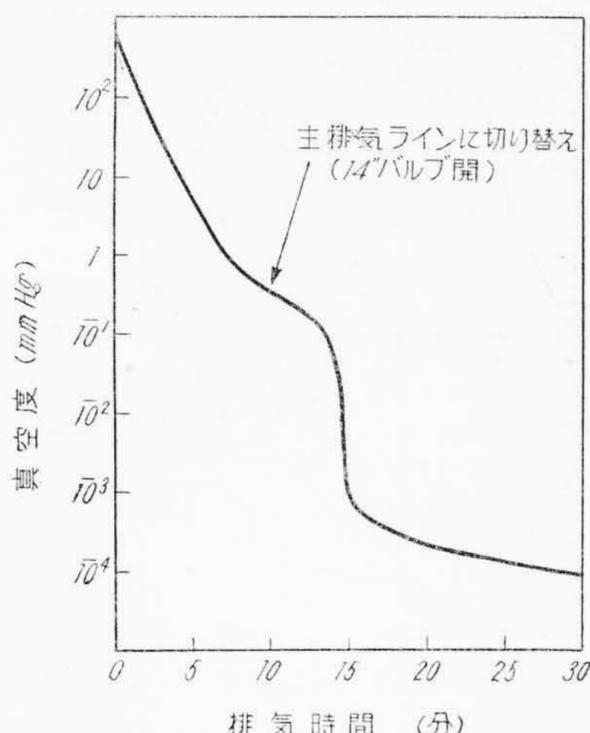
[IV] 30 kg 真 空 熔 解 装 置

つぎに筆者らが製作した熔解量 30 kg の真空熔解装置について述べる。装置外観を示すものが第 4 図である。

(1) 真 空 排 気 系

真空排気系は 14 吋油拡散ポンプ、6 吋油エゼクターポンプ、キニー型油回転ポンプを直列し、油エゼクターポンプ、油回転ポンプからはそれぞれ真空タンクへ予備排気ラインを附備させた。これら排気系統を示すものが第 5 図である。

配管はすべて円管であり、Knudsen⁽¹¹⁾ の式により、そのコンダクタンスを算出した。すなわちコンダクタンスを C とすれば



第6図 真空炉排気特性
Fig.6. Evacuation Curve of Vacuum Furnace

$$C = \frac{\pi}{8} \cdot \frac{a^4}{\eta l \bar{p}} + \frac{4}{3} \cdot \frac{a^3}{l} \sqrt{\frac{2\pi RT}{\mu}} \cdot \frac{1 + \frac{2.00}{\eta} \sqrt{\frac{\mu}{RT}} a \bar{p}}{1 + \frac{2.47}{\eta} \sqrt{\frac{\mu}{RT}} a \bar{p}} \dots\dots (1)$$

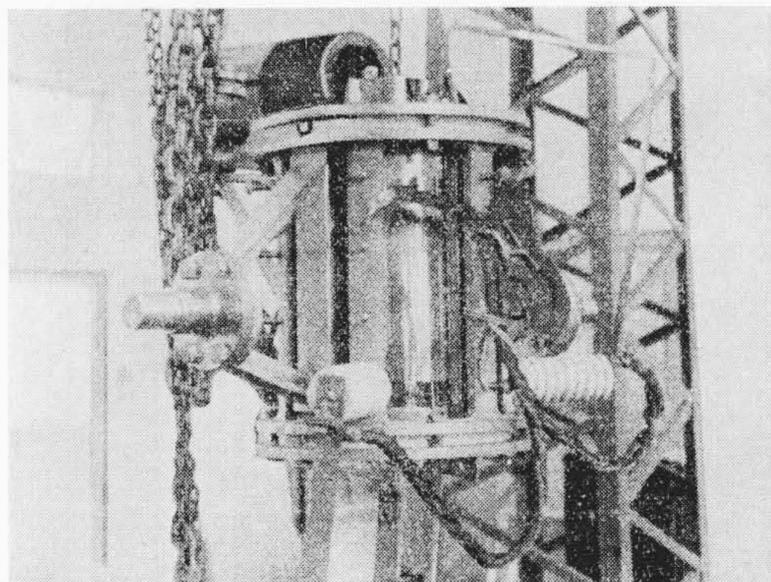
- ここに a: 配管の半径
 l: 配管の長さ
 η: 気体の粘性係数
 R: 気体定数
 μ: 気体の分子量
 T: 絶対温度
 \bar{p} : 平均圧力

(1)式より算出したコンダクタンスCとポンプを単独試験して実測した排気速度 Sp より、次式によつて有効排気速度 S を求めた。

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{Sp} + \frac{1}{C} \dots\dots (2)$$

配管の設計に当つては S と Sp の比が 0.8 程度の値をうるごとく極力排気抵抗の小さい配管を選んだ。このために適所に設けられた真空バルブも大型で大コンダクタンスのバルブを特に設計製作し、操作能率の点も考慮し、圧縮空気を応用した真空バルブを用いている。なお小型バルブも圧縮空気が作動するごとく改造して真空計と連動させて自動的に予備排気ラインと主排気のラインの切り替えも可能であるが、これらについては稿を改めて報告したい。

第6図は1気圧の真空タンクを排気した場合の排気特性である。排気開始後30分で約 1×10^{-4} mmHg に達し、なお排気を続行すれば大体 1×10^{-5} mmHg 程度までは確実に到達できる。



第7図 10 kg 抵抗加熱炉の外観
Fig.7. View of Resistance Heat Furnace (Capacity 10 kg)

真空度測定はタンクおよび油拡散ポンプ間のみならず、タンクの周辺3箇所で同時測定も可能で、真空計としては電離真空計およびサーミスタ真空計を用いている。

(2) 真空炉

真空タンクは直径 1.5m 二重水冷式で電源導入口、真空排気口、傾注軸などの孔がある。

タンク蓋には添加剤など挿入室6室および蒸着防止を備えた二重式覗き窓⁽¹²⁾、蒸着防止用のシャッターなどが設けられている。

鑄造方式は傾注式により、傾注軸は回転速度が大幅に変化される変速機に直結されており、適当な注湯速度で鑄込むことができる。

なお傾注に当つては所定の回転を行い注湯が完了の位置に達すると傾注停止装置が作動する自動装置が附属している。

以上のほか熱電対型温度計、真空計などを取りつけるための側管が適所に設けられている。

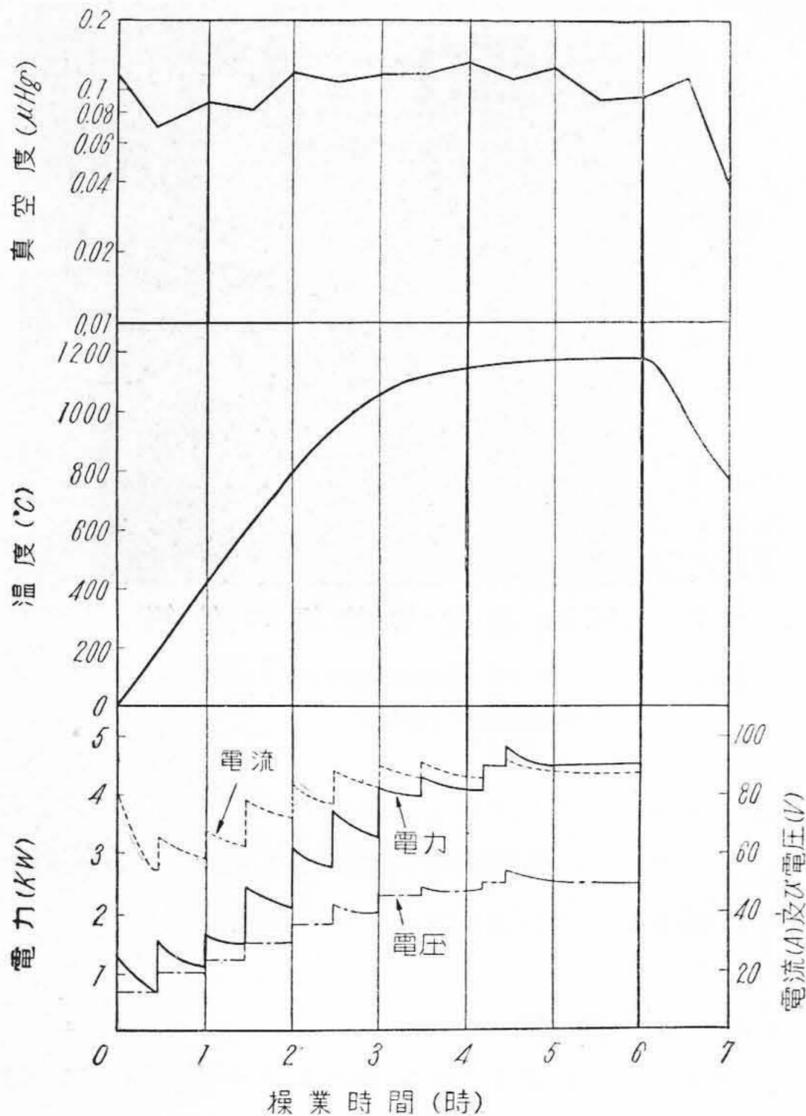
(3) 加熱方式

加熱方式としては誘導加熱と抵抗加熱が両用できるごとく設計されている。

(a) 誘導加熱

高周波誘導加熱電源は 60 kW、電圧 400 V、周波数 1 kc の電動発電機によつた。

電源電圧の決定に当つては加熱コイルを真空タンク中に収容するために放電について考慮した。充電部分に鋭い電界集中がないとすれば、空気最低放電電圧 330 V 以下に、すなわち交流の実効値では 230 V 以下にしておけば大体安全と考えられる。しかし電圧を低くすればコイルの電流が増加し、線輪損失が増加し、また蓄電器の静電容量も電圧の2乗に逆比例して増加し、結局電源設備費がかさむことになる。放電の生起は真空度にも関連



第 8 図 抵抗加熱炉 (10 kg) の操業図
Fig. 8. Operation Diagram by Resistance Heating (10 kg)

することで、電源設備費と排気系設備費とを勘案して電圧は 400 V とした。

実際に稼動してみて後述の操業図でもあきらかなごとく、操業中の真空度は 10^{-4} mmHg 範囲で高真空に常時保持できるのでコイルの放電現象は皆無である。

(b) 抵抗加熱

抵抗加熱炉は発熱体として M_0 線を使用した。炉体の構造はガス放出の多い耐火物の熱絶縁体を極度に節減したもので、機械的強度などを考慮して鉄製枠内に組立てられてある。

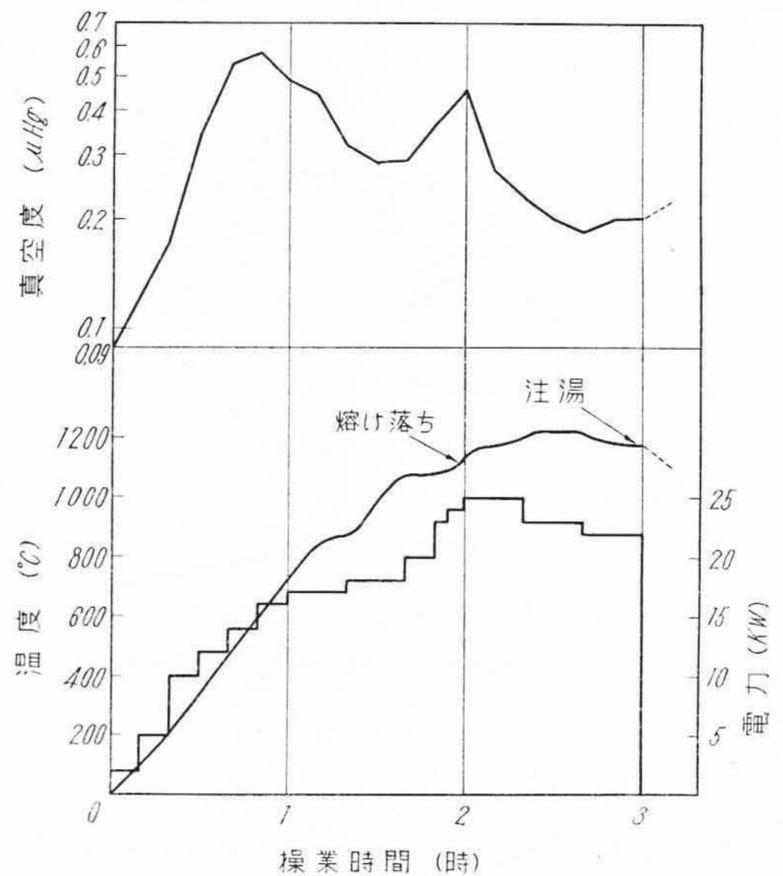
第 7 図は溶解量 10 kg の抵抗加熱炉の外観である。この抵抗炉で 10 数回連続稼働したが、常時操作真空度は 1×10^{-4} mmHg 前後でガス放出の少ない特長がある。

[V] 溶 解 成 績

(1) 操 業 例

以上の装置が順調に組立てられて 1 年有余故障なく稼働して来たが、その操業例が第 8 図および第 9 図である。

第 8 図は電解銅 10 kg を抵抗加熱炉で真空溶解した例にして最大入力約 5 kW 弱であるが、熔け落ちまでに約 4 時間を要している。操業例は熔融状態に約 2 時間保持しているが、真空度は常に $1 \sim 2 \times 10^{-4}$ mm Hg 程度

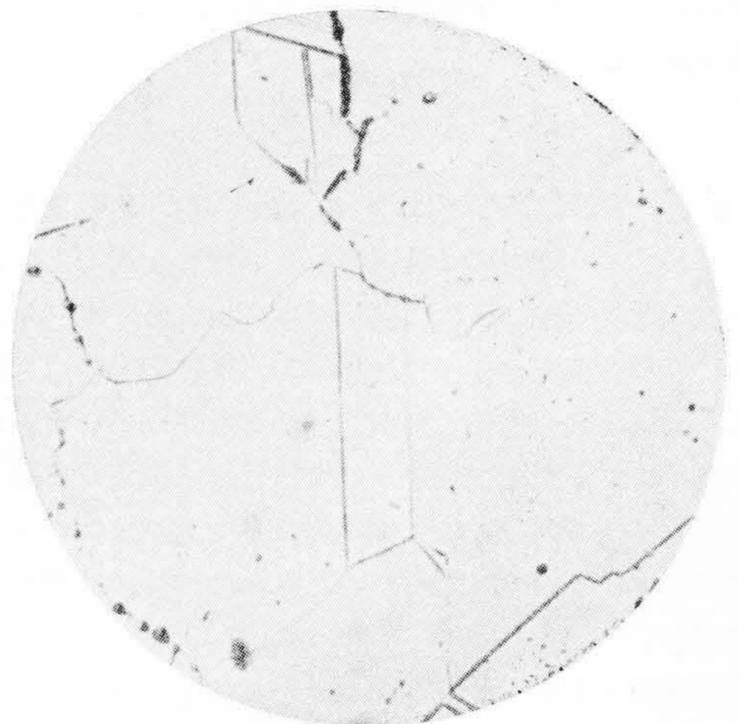


第 9 図 高周波加熱炉 (30 kg) の操業図
Fig. 9. Operation Diagram by Induction Heating (30 kg)

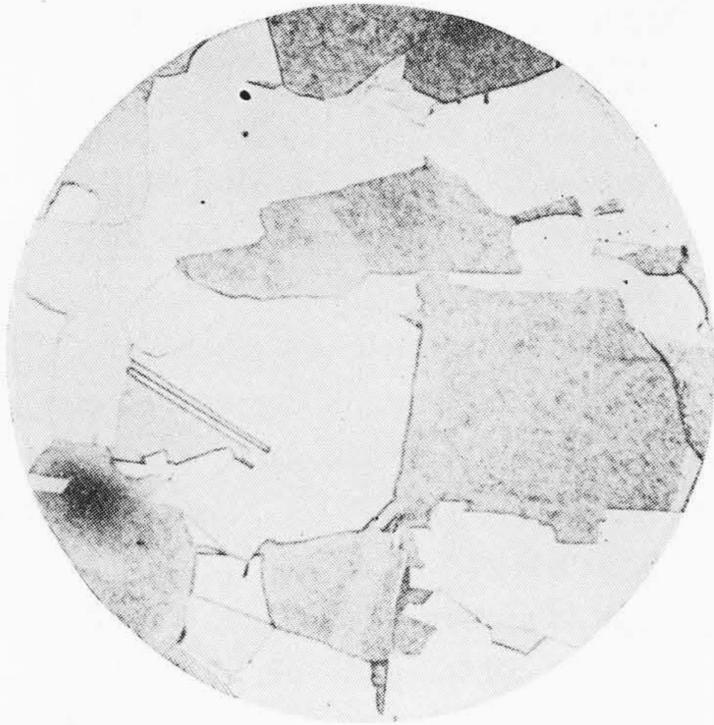
第 2 表 真空溶解銅の分析値

Table 2. Analysis of Vacuum Melted Copper

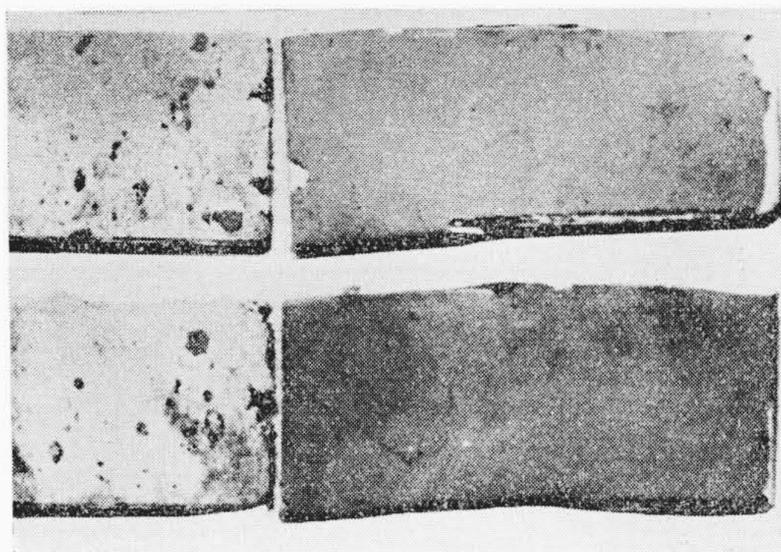
元 素	含 有 量 (%)
Cu	>99.99
Fe	0.0004
S	0.0001
As	0.0001
Sb	0.0001
O ₂	0.0021



第 10 図 電解銅の顕微鏡写真 $\times 400$
Fig. 10. Microstructure of Electrolytic Copper Annealed $\times 400$



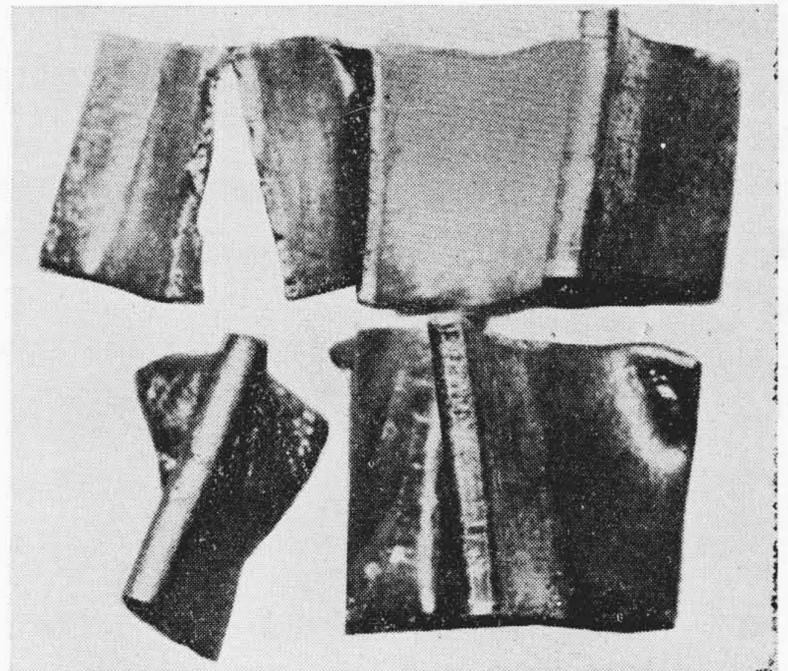
第11図 真空熔解銅の顕微写真 ×400
Fig.11. Microstructure of Vacuum-Melted Copper Annealed ×400



(a) (b)
第12図 電解銅および真空熔解銅の剥離試験
(a) 電解銅 (b) 真空熔解銅
Fig.12. Results of Oxide Film Exfoliation Test
(a) Electrolytic Copper (b) Vacuum-Melted Copper

で、注湯時には若干真空度の悪化を招くが、直ちに回復して 10^{-5} mmHgの範囲に保持されている。なお使用炉体は発熱体としてM₀線を用い坩堝は黒鉛製である。

第9図は電解銅30kgを高周波加熱炉で熔解した作業図の一例である。同図によれば最大入力約25kW、熔け落ちまでに約2時間を要しているが、使用高周波コイルが鉄熔解用コイルを流用しているためやゝ長時間を要しているが、銅熔解専用設計されたコイルを使用すればこの時間は短縮できることは言をまたない。真空度は常に 10^{-4} mmHg範囲で作業されており、熔け始めから全金属が熔け落ちるまで、および注湯時直後にやゝ真空



(a) (b)
第13図 電解銅および真空熔解銅の水素脆化試験
(a) 電解銅 (b) 真空熔解銅
Fig.13. Results of Hydrogen Embrittleness Test
(a) Electrolytic Copper (b) Vacuum-Melted Copper

第3表 真空熔解銅の諸性質
Table 3. Various Properties of Vacuum Melted Copper

密度	8.949 (於 20°C)
電気比抵抗	1.664 $\mu\Omega$ -cm (於 19.5°C)
電気伝導率	103.5%
抗張力	19.8 kg/mm ²
伸び	62%
硬度	35 (ヴィカース)
エリキセン値	13.7 mm

度の低下を来たすことは常に認められる現象である。

(2) 真空熔解銅の試験結果

前節で説明した作業方法で得られた真空熔解銅の試験結果について述べる。

第2表は真空熔解銅の分析結果で熔解前と比較して特にS, O₂については顕著に含有量が減少している。

つぎに顕微鏡試験結果を第10図、第11図に示す。第10図は電解銅の顕微鏡写真にして相当量のCu₂Oが結晶粒界および基地中に認められるが、これに反して第11図の真空熔解銅においては結晶粒界その他に全然Cu₂Oが認められない。

JIS規格の剥離試験、水素脆化試験の結果を示すものがそれぞれ第12図、第13図である。第12図において右側の真空熔解銅はほとんど全面にわたってCuOの被膜で黒色を呈しているのに対し左側の電解銅は一部に黒色のCuOを残すのみで大部分が赤色のCu₂Oである。また第13図の水素脆化試験においては右側の真空熔解銅は左

側の電解銅に比較して折り曲げ部に全然疵を生じておらず、かつ水素中で処理しても脆化せず機械的性質の向上を示している。

以上のほか真空熔解銅の諸性質をとりまとめたものが第 3 表である。表に示していない試験も真空管用無酸素銅板の JIS 規格にはもちろん合格している。

以上の試験結果は真空熔解のすぐれた成果を十分証明するものであるが、他金属その他詳しい試験結果については後日報告したい。

[VI] 結 言

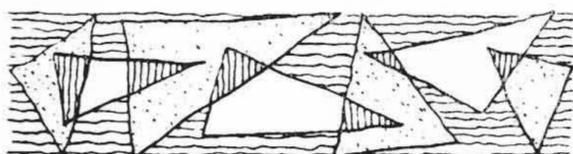
筆者らは熔解中の操作真空度が常に 10^{-4} mmHg 範囲の大容量の真空熔解装置を完成し、1 年有余順調に稼働しており、真空熔解の卓越せる効果を収めている。真空熔解の応用範囲はひろく、今後とも本装置を駆使して今後の発展を期するものである。

短期間に本装置の完成をみたのは日立製作所内の関係各方面からの御援助の賜である。また日立製作所中央研究所長菊田博士、主任研究員浜田、湯本、明山、南波博士、岩田、長崎両研究員および関係各位より詳細なる御

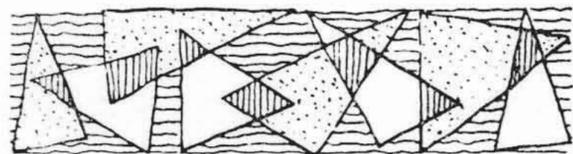
指導御協力を仰いだ。これらの方々に厚く御礼申し上げる。

参 考 文 献

- (1) Motock, T.: Iron Age, 158, 64 (1946)
- (2) Yensen, T.D.: Trans. Am. Inst. Elect. Eng. 34, 2601 (1915)
- (3) Leybold-Degussa のカタログ
- (4) National Research of Corporation のカタログ
- (5) 長島富雄外: 応用物理 22, 293 (1953)
- (6) Malcolm, E.D.: J'l. Sci. Insts. Supplement, 63 (1951)
- (7) Gibbs-Smith: Metallurgia, 44, 163 (1951)
- (8) 山口博: 東芝レビュー 7, 248 (1952)
- (9) Stanffer, R.A. etc.: Ind. Eng. Chem. 40, 820 (1948)
- (10) James H. Moore: Metal Progress, 64, Sept., 161 (1953)
- (11) M. Knudsen: Annd. Physik, 28, 75 (1909)
- (12) Robert V. Gray: Rev. Sci. Insts. 23, 309 (1952)



新 案 の 紹 介



実 用 新 案 第 409618 号

高 橋 春 夫

主 軸 接 手 に お け る ナ ッ ト 締 付 お よ び 緩 め 装 置

この考案は水車発電機主軸の接手におけるフランジ締付ボルトのナットを締緩する装置に係るもので、図面に示すように主軸 1 に設けた段部 A, B により主軸の周りを回転し得るように支持した支持金具 8 に、流体作動原動機 5 を取付け、原動機の回転軸 6 にスパナ 7 を取付け、この原動機を上下方向に移動し得るレバー 9 を設けてなるものである。この装置はスパナ 7 を原動機 5 と共に上方に引上げた状態で、支持金具 8 を主軸 1 の周りに回転しながら、フランジ 2 上に配置された多数のナット 4 に、スパナ 7 を順次係合して、これが締付および緩め作業を安全かつ容易に行うことができる。(滑川)

