

浮揚溶解 (Levitation Melting) と その応用について

大阪大学工学部冶金学科 教授 足 立 彰

I. はじめに

金属を溶解する場合一般に種々の耐火物容器が用いられている。この際耐火物としては、 SiO_2 , MgO , Al_2O_3 などの酸化物が主体となっていて溶解金属と耐火物との間の反応は高温になるほど烈しくなり、金属の組成は雰囲気ガスとの反応も加わり変化する。高真空雰囲気中で溶解した場合も溶解金属中の元素の揮発するとともに高温で耐火物の解離した元素が溶け込み汚染される。このような耐火物からの汚染を避けるためには熔融金属が耐火物と出来るだけ接触しない方法によらねばならない。その例として消耗電極アーク溶解法、電子ビーム溶解法などがあるが夫々利点と欠点がある。浮揚溶解法 (Levitation Melting Process) は耐火物容器を用いない極めて優れた手段である。この方法は交番電磁力により金属を真空または各種ガス雰囲気中の空間に浮上させて溶解する方法である。1回の溶解量は普通10g以下で少ないが熔融金属が全く汚染されることのないため種々の基礎研究や工業的応用に活用されている。この方法の考案は1923年 Muck¹⁾ によって特許が出されて以来種々の改良考案が出され特に1952年米国 Westinghouse 社の研究陣²⁾ によりその発展の基礎が確立されたものである。筆者の研究室には鉄鋼基礎共同研究の一部として、日本鉄鋼協会ならびに東北大学選鉱精錬研究所斎藤恒三教授の援助で熔融純鉄ならびに鉄合金の密度を測定するため特別に設計、試作した装置を国際電機(株)より科学技術庁の資金援助により納入されたものがある。本装置の機能は極めて良好で種々熔融金属の高温での密度の測定の他

に精錬反応の基礎となる高温熔融金属と雰囲気ガスとの反応、あるいはスラグとの反応、急冷過冷金属の物性の研究等に活用している。

II. 原理²⁾³⁾

第1図(A)に示す交番円電流 I_1 が流れているループBの上部に導体球をおくと、導体球中に電流 I_2 と逆方向の過電流 I_2' が誘起されて、 I_1 と I_2' とは互に反撓して導球体に浮揚力が働らく、このときの磁力線分布は大体図示の通り

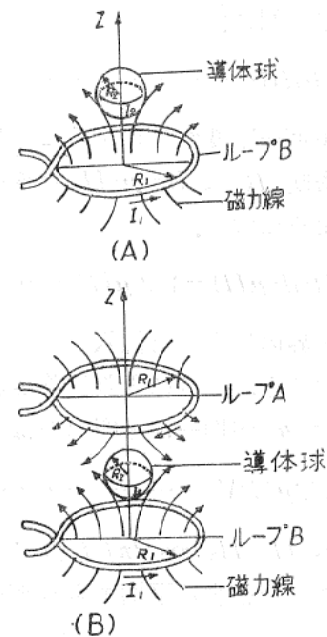


図1 原理図

であると考えられる。すなわち電流密度 J と磁束密度 B のベクトル積 $J \times B$ で表わされる磁場により電流に働らくマクスウェル応力が作用する。交番磁界により導体球中に誘起される電流が非常に速く変化する場合には導体内部の磁場も変化し、誘導起電力が導体内部にある循環電

流として生じる。このため導体内の電流分布は
 一様ではなく、表面の電流は大きく、中心部に
 向って指数関数的に減少する。これが表皮効果
 で、これにより表面電流の $1/e$ (e :自然対数
 の底) になる点の深さを等価電流深度 (単に電
 流深度ともいう) と呼び d で表わすと、

$$d = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{10^9 \rho}{\mu f} \right)^{1/2} \dots\dots\dots(1)$$

ここで ρ は導体の比抵抗, μ は透磁率, f
 は交番磁界の周波数で, C. G. S 電磁単位で示
 した, これを M. K. S 単位で表わすと比抵抗
 ρ ($\Omega\text{-m}$), 透磁率 μ (H/m) の導体に周波数
 f (Cycle/sec) の交番磁界により生じる電流深
 度 d (m) は

$$d = \left(\frac{\rho}{\pi \cdot \mu \cdot f} \right)^{1/2} \dots\dots\dots(2)$$

となる。また磁場の強さ H の空間 V に分布
 するエネルギー U は

$$U = \iiint \{H \cdot dB\} dV \dots\dots\dots(3)$$

したがって空間には

$$u = \int H \cdot dB \dots\dots\dots(4)$$

なるエネルギー密度が分布することになる。こ
 こで磁束密度 B は $B = \mu \cdot H$ であるから(4)式
 は次式のようになる。

$$u = \int H \cdot d(\mu H) = 1/2 \mu H^2 \dots\dots\dots(5)$$

導体中に磁界のほとんど侵入しない空間の体積
 を V とすると, これにより排除されるエネル
 ギー U' は u が均一な範囲内では

$$U' = 1/2 \mu H^2 V \dots\dots\dots(6)$$

交番磁界 $H = H_0 \cos 2\pi f t$ (t :時間) 内の
 単位体積当り分布する平均エネルギーは

$$\begin{aligned} \bar{u} &= \frac{1}{1/f} \int_0^{1/f} \frac{1}{2} \mu (H_0 \cos 2\pi f t)^2 dt \\ &= \frac{\mu}{16\pi} H_0^2 \dots\dots\dots(7) \end{aligned}$$

となるので, この場合排除されるエネルギーは

$$U' = \frac{\mu}{16\pi} H_0^2 V \dots\dots\dots(8)$$

となる。したがってもし磁界が不均一で第1図

(A)のような勾配があれば, 磁力線に垂直に, そ
 して磁力線密度の減少する方向 i に F_i なる
 力が働く。

$$F_i = \frac{\partial \bar{u}}{\partial i} = \frac{\partial}{\partial i} \left(\frac{\mu \cdot H_0^2}{16\pi} \right) \dots\dots\dots(9)$$

第1図(A)に示すような場合には浮揚力, すなわ
 ち垂直方向の力は作用するが, 水平方向の安定
 性はなく, 一般に導体は磁界の拘束範囲より飛
 び出す。これを防止するため第1図(B)に示すよ
 うに 180° 位相の異なる安定化コイル B を設け
 ると浮揚コイル A の電流 I_1 と安定化コイル B
 の電流 I_2 とは逆方向であるが導体球中の誘導
 過電流 I_2 との間には吸引力が働らき導体球は
 単一ループの場合に比べて一層安定に浮揚され
 る。つまり磁力線密度極小の位置の近傍に導体
 の自重と浮揚力とが釣り合って安定に浮揚す
 る。溶体の浮揚については適当な理論的解析は
 十分完成されていない。これは溶体では一般に
 下部がたれ下がり, その形状とコイルとの相対
 位置が不規則になり, 表面張力と重力との関係,
 表面に生成する被膜などについて考慮せねばな
 らないので複雑な条件となるためである。固体
 の浮揚力については試料が完全な球形であり,
 均一であり, 非磁性体であり, コイルにより生
 ずる磁界の均一な範囲で考えられる程度の試料
 の大きさが十分小さいという条件で単一ループ
 の場合の浮揚力 F (dyne) は Mason²⁾ により
 近似式(10)が与えられている。

$$F = (3/50)\pi^2 I_1^2 G(x) A(y) (R_2/R_1)^3 \dots\dots(10)$$

ここに, x は導体の半径 R_2 と電流深度 d と
 の比であって,

$$\begin{aligned} x &= 2\pi R_2 (f/\rho \times 1000)^{1/2} \\ G(x) &= 1 - \frac{3}{4x} \frac{\sin h 2x - \sin 2x}{\sin h^2 x + \sin^2 x} \\ y &= Z/R_1, \quad A(y) = y/(1+y^2)^4 \end{aligned}$$

また, 二つのループ A, B の場合の浮揚力
 F (dyne) については Castleman²⁾ により(10)式
 を拡張して(11)式が与えられている。

$$F = (3/50)\pi^2 I_1^2 G(x) B(y) (R_2/R_1)^3 \dots\dots(11)$$

ここで、

$$B(y) = \left\{ \frac{1}{(1+y^2)^{3/2}} \pm \frac{1}{(1+y_1^2)^{3/2}} \right\} \left\{ \frac{y}{(1+y^2)^{5/2}} \pm \frac{y_1}{(1+y_1^2)^{5/2}} \right\}$$

$y-y_1=S/R_1$, S は二つのループの面間距離 (cm), $B(y)$ 式中の負の記号はループ A, B の電流方向が逆の場合, 正記号は同一方向の場合に相応する. (10)(11) 式中の $G(x)$ は第 2 図, 第 3 図から求められる. すなわち周波数 f (cycle/sec) の高周波電流による交番磁界中に半径 R_2 なる金属球 (比抵抗 ρ) を置いた場合, その f, ρ に対して第 2 図から x が求まり, その x に対して関数 $G(x)$ は第 3 図から求まる.

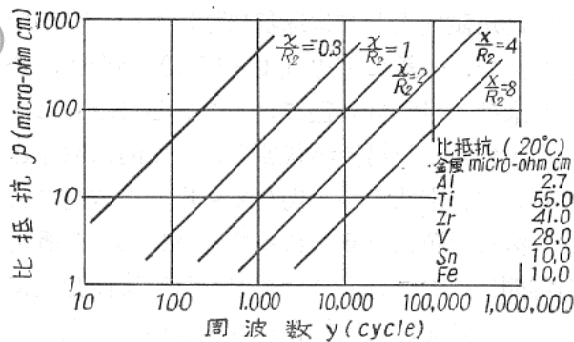


図 2 (10), (11) 式中の x と f および ρ の関係

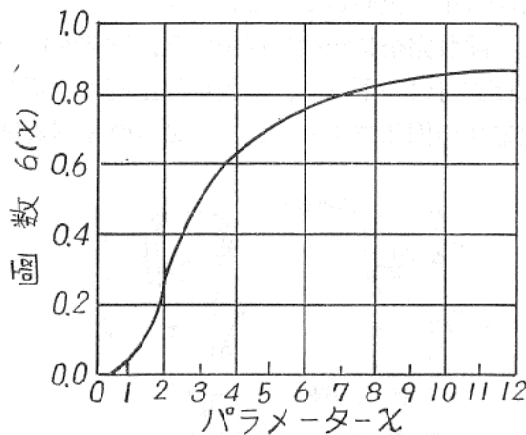


図 3 (10), (11) 式中の関数 $G(x)$

交番磁界は導体中に侵入し, 過電電流を誘導して, 導体を加熱する, 半径 R_2 (cm) の導体中に発生する熱量 L (erg/sec) は

$$L = \frac{3\pi H_0^2 R_2^2}{\sqrt{2}} \sqrt{\omega\rho} \quad \dots\dots\dots(12)$$

ここに, ρ は比抵抗 (ohm-cm), $\omega = 2\pi f$. で

ある. 試料が溶解した場合, 表面張力を考慮して Fogeli⁴⁾ は(13)式で示すような定数 a を考え, 浮揚溶解の場合, 試料の直径は a に比例すると述べている.

$$a = (2\sigma/\delta \cdot g)^{1/2} \quad \dots\dots\dots(13)$$

ただし, σ は表面張力 (dyne/cm), δ は試料の密度 (g/cm^3), g は重力の加速度で約 980 cm/sec^2 である.

溶解金属の表面に酸化膜が生成すると a の値は変わってくる.

III. 装置

国際電気(株)製 NS-3005A 型 についての概要を述べる. 本装置は主として溶融鉄合金の密度測定を目的として試作したものであるが種々の金属および合金の浮揚溶解並びにそれに関連する実験に使用出来るものである.

電源は 3 相交流, 200V, 50/60 C/S, 入力は最大 60KVA, 出力は最大 30KW, 連続 25KW (陽極出力), 発振周波数: 150 K.C, 使用真空管: 発振用 8 T-74, 1 本, 整流用: 5 H-69 B, 3 本, 5 G-69A (サイラトロン) 3 本, 回路構成(イ)発振回路: 陽極同調型自励発振方式 (ロ)整流回路: 3 相全波整流方式平滑回路付 (ハ)出力回路: 直結合方式 (ニ)出力調整: サイラトロンによる陽極電圧制御方式, 整流回路のサイラトロンにより最大出力より 10% 出力まで連続的に自由に制御することができる, また陽極電圧制御は電源電圧の $\pm 10\%$ の変化に対し自動的に陽極電圧の変動を $\pm 0.1\%$ に抑えてある. 電気回路は第 4 図に示すように目的の金属球の種類に応じ適当なコイルを使用するが使用コイルのインダクタンス L に応じタンク・コンデンサーの容量 C を変え整合 (Matching) させる. 陽極電

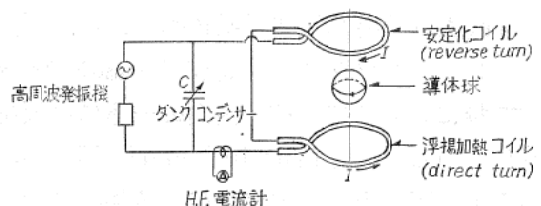


図 4 浮揚溶解炉の電気回路略図

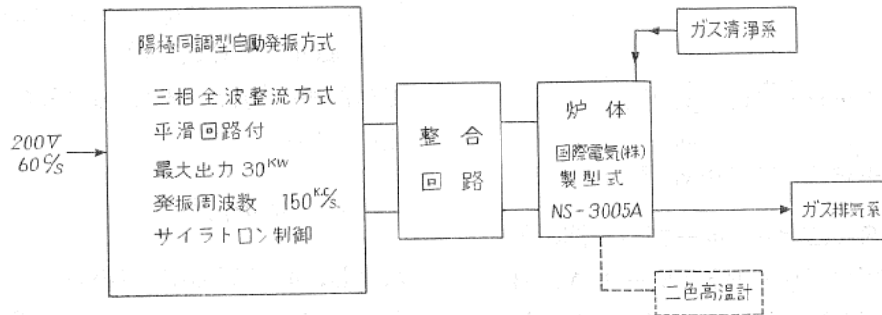


図5A 浮揚溶解装置系統図

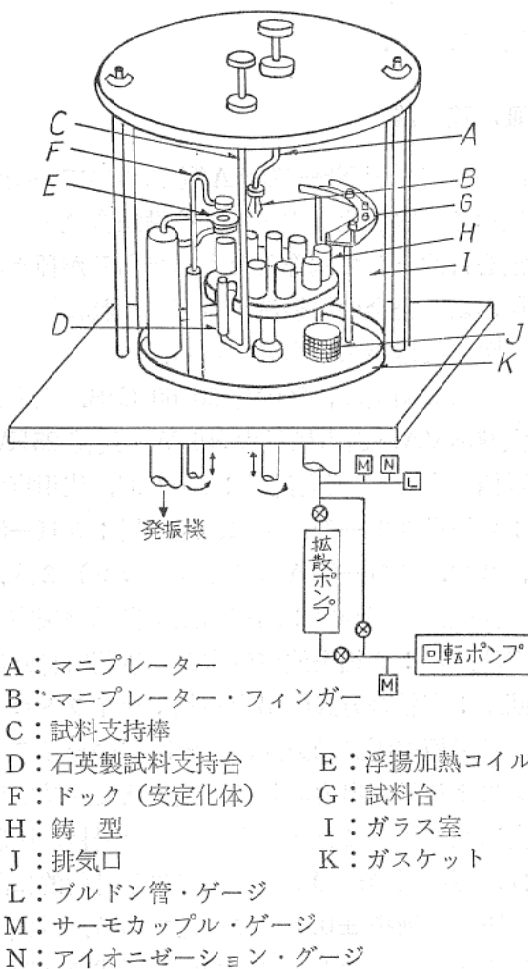


図5B 炉体および真空系統

流を多く流す場合はインダクタンスLを小さくする、しかし余り小さくすると周波数fが大きくなり整合状態がくずれれる。

第5図Aは浮揚溶解装置系統図である。炉体はパイレックスガラス製円筒(約150mmφ×200mmH)で特にカメラでのぞく側面の一部に平板を接着している。円筒内部は 10^{-5} mmHg程度の減圧から1気圧以上の特定ガスによる加圧まで任意の圧力に保てるよう十分気密につくられてい

る。試料の添加から鑄造までの作業はすべてこの中で行なうことができる機構になっている。第5図Bは炉体および真空系統略図を示す。

IV. 溶解方法

溶解用試料としては球状に近いものの方が使用し易い、一般に細片(1~15g)か金属、合金粉末を約10mm径にスタンプして固めたものを用いる。浮揚溶解状態で電磁氣的に攪拌されるので粉末状合金の場合でも均一に溶製される。溶解手順は第6図に示すように器内が所定の雰囲気になれば、あらかじめ試料支持台上に置いた試料を試料支持台をコイル中まで上昇させ、発振器を作動させて、コイルに流れる交番電流を次第に上昇させると、やがて試料は支持台より離れ完全に空間に浮上する。試料が浮上すれば支持台を下げる。試料は浮上直後、不規則な形状の固体であると磁力線の流れの不規則

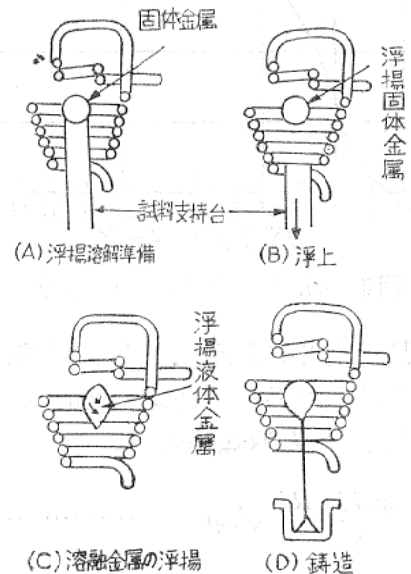


図6 浮揚溶解順序

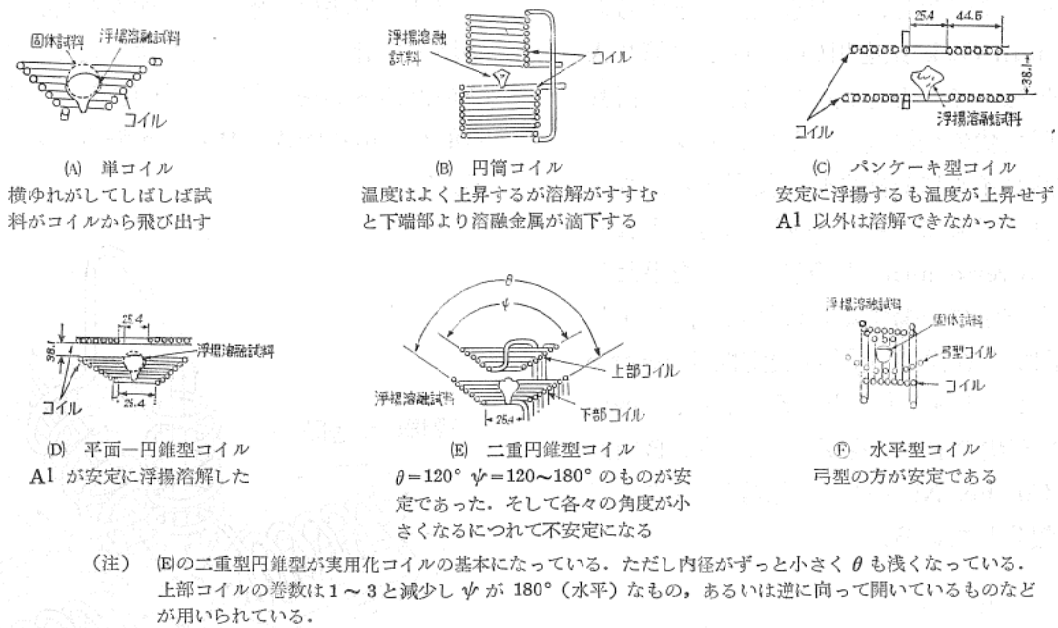


図7 米国型コイル

のため廻転し、反転し、上下に踊りながら激しく運動するが次第に加熱され溶融する。試料は溶融すると急に静かになる。これは溶体試料は磁力線分布に対して最も安定な位置を占めるように試料自身が磁力線の流れに従って自在に変形するからである。

試料の温度は高周波電流の調節により行われるが、試料の浮揚位置をも考慮に入れて電流の調整を行なわねばならない、すなわち電流を増加すると浮揚力が増し、試料は磁力線密度の低い位置へ押し上げられ、加熱効果は減少して温度が下る。逆に電流を減少させると、試料は磁力線密度の高い位置へ下り、温度が上昇する。このように試料の位置を考えに入れて電流を加減し、温度を調整する。しかしこれも調整に限度がある。試料の重量が小さい程、温度は低くなる。たとえば球形試料で電流深度の小さいものは浮揚が不可能になる。溶解雰囲気を変えると溶体試料の温度が変化する。たとえば熱伝導度の大きな水素やヘリウムガスを導入すると温度は下り、窒素またはアルゴンガスの混合割合が増すと温度は上昇する。電源の周波数を変えると温度が調節される。周波数が低くなると加熱力が下がり、温度は低くなるが、周波数が低くなると電流深度は大きくなるので試料を大きくしないと浮揚しない。一方浮揚溶解試料は主と

して表面張力で形状が維持されているため、試料が大きい場合は均衡が破れ重力によって滴下するので限度がある。浮揚力と加熱力とを周波数の異なる電源で行ない夫々独立に制御する二重電源方式もある。コイルの形状を変えて浮揚力、加熱力を種々工夫されているがこれにも制限がある。第7図は Westinghaus 社で研究された各種コイルを例示する。これらはいずれも満足な結果が得られていない²⁾。Comenetz³⁾らによると第8図に示す 7 direct turns-2 reverse turns, その他のコイルを用い、450K.C, 10KW の高周波発振機を用い、種々の金属で多くの実験を行った報告がある。この方式では真空溶解

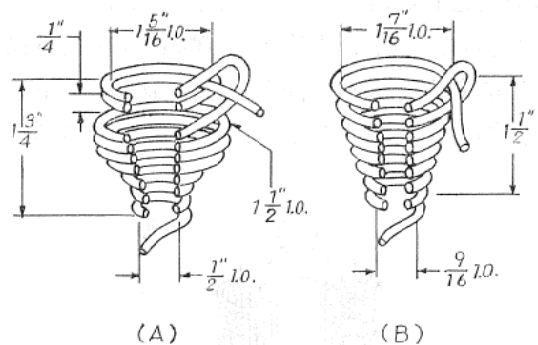


図8 一般に使用されているコイルの例

- (A) 7 direct (浮揚加熱) - 2 reverse (安定化) turn コイル
- (B) 7 direct - 1 turn コイル

中屢々アークを発生し、浮揚金属が落下するので direct turn-dock 系を用いている。(第9A図⁵⁾) dock はコイルと電氣的に絶縁された円盤あるいは円筒状の金属(主として銅)ブロックで浮揚加熱コイルに対向させて使用する。コイル中に流れる電流によって dock に誘導される渦電流が reverse turn と類似の役目を果たし溶解金属を安定に浮揚するのに役立つ。しかし dock 使用による浮揚金属の安定性は reverse turn coil よりは幾分劣ると考えられる。Lewis⁵⁾はリング状のドックを用いて(第9B図) Ag, Au, Cu, Fe, Ni を長時間溶解することが出来たと報告している。

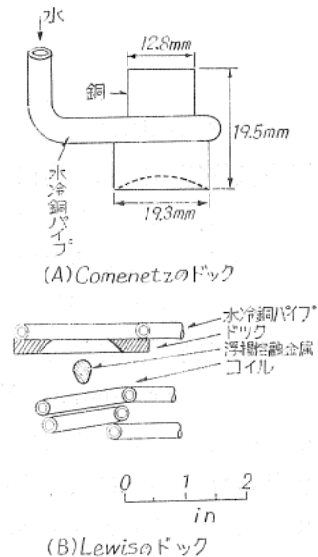


図9 ドック(浮揚試料安定化体)の例

以上の形式ではコイル軸上に浮揚力の全く働かない点があり、熔融金属が滴下する傾向があるのでこれを改良するため二つの方法が提案されている。第1の方法は第10図に示すように磁力線の向きを水平方向とし熔融金属の最下端にも浮揚力が作用するようにしたものである。

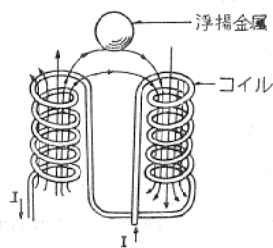


図10 水平磁力線による浮揚

第2の方法は熔融金属に廻転を与え、浮揚力の増加を計り欠点をなくしようとするもので、そのため磁界を電氣的(第11図³⁾)あるいは機械的³⁾(第12図A, B)に廻転させる方法である。

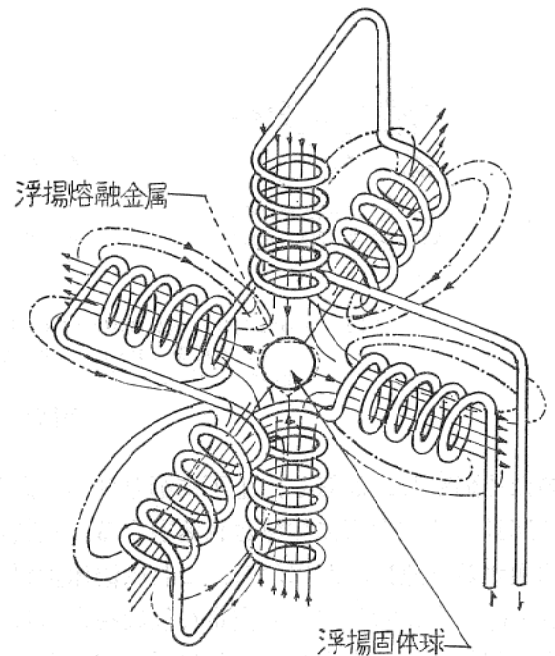


図11 多重コイル

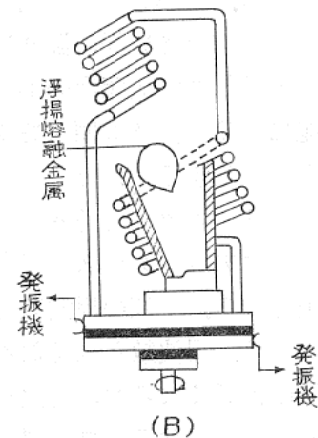
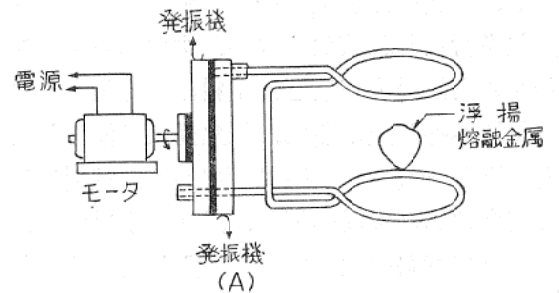


図12 廻転磁界を利用した浮揚溶解

V. 応用例

本装置では熔融金属は耐火材料と直接接触しないため、耐火物より不純物の侵入することがなく、数分間で高融点、金属合金の溶解ができるが試料が少量であり、温度制御が困難であるという欠点がある。色々の応用例が報告されているがその主なるものを挙げると、

(1) 高純金属および合金試料の溶製⁶⁾

真空中あるいは種々のガス雰囲気中で溶融できるので特に活性金属、高融点金属の溶製に適する。熔融金属中より揮発性不純物の除去、ガス還元、スラグ—メタル反応等の金属精錬反応の基礎的研究ができる。また熔融金属中に他元素の添加も容易に行われる。

(2) 熔融金属と気相、液相または固相との反応に関する研究⁷⁾

高温での熔融金属と気相（雰囲気ガス）、熔融金属と熔融スラグ間あるいは熔融金属と固体耐火物間の平衡または動力学的研究では従来適切な耐火材料がなくて厳密な基礎研究に欠け

ていたが近年浮揚溶解装置を利用した研究が進められている。

(3) 金属棒、粉末（あるいは細片）の連続溶解⁸⁾

第13図⁸⁾に示すように融体の最下端を固体として支えることによって多量の金属を連続溶解精錬し、引き続き圧延することができる。また第14図⁸⁾のように金属粉末または細片を連続溶解あるいは焼結することができる。

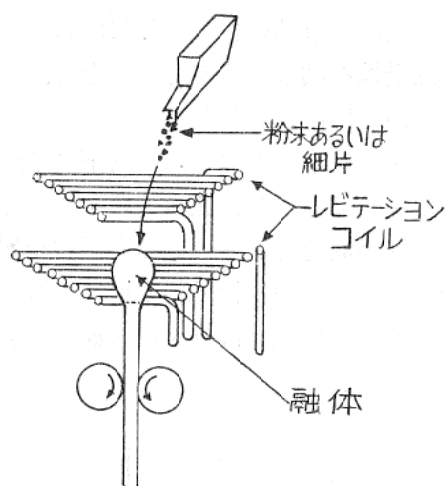


図14 連続溶解（粉末、細片）

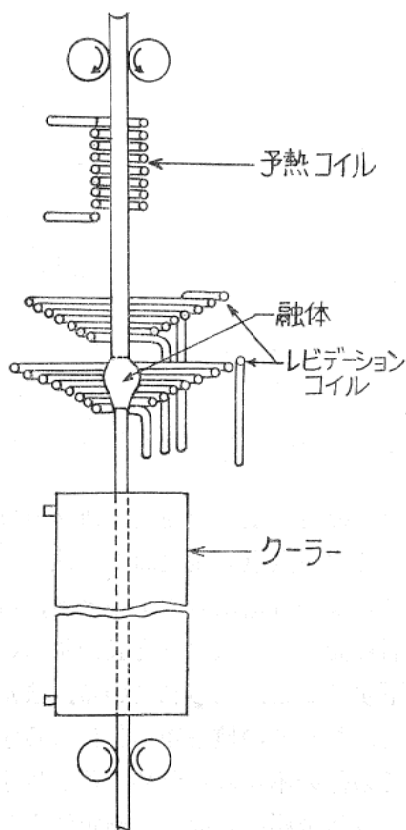


図13 連続溶解（棒）

この他大量に浮揚溶解する方法として Fogeli⁸⁾ は第15図のようなコイルを考案し、一度に数個の試料を浮揚溶解し、一つの鑄型に鑄造すればよいと述べている。また Hull⁹⁾ はコイルを垂直方向に2個以上並らべ、上部で溶解して次々に下のコイルに落していきながら、多量の浮揚溶解鑄造することを提案している。

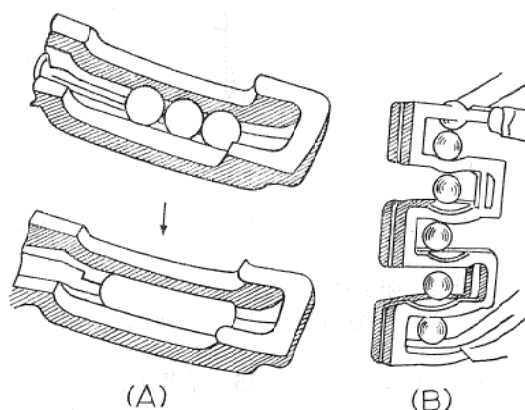


図15 Fogeli の多量溶解用コイル

(4) 太い金属棒などの帯融精製
(Zone melting)

浮揚溶解用コイルを用いて従来他の方法によるよりも太い径の金属棒について浮揚帯域精錬を行ない、純度の極めて高い金属がつくられる。近年電子工業用トランジスタに用いられる高純度の Si 棒もこの方式で精製している。

(5) 急冷亀裂試験⁹⁾

浮揚溶解金属を高温度溶融状態より各種寸法のテーパ付き銅製鋳型に鑄込んで急冷し、亀裂の発生状況より溶接作業の際に問題となる材料の熱感受性を調査することができる。

(6) 溶融金属の急冷装置¹⁰⁾

浮揚溶解金属球を電源を切り落下する途中水冷銅製の金具で槌打し、急冷薄片をつくることにより、近年話題となっている非晶質金属または合金をつくり、強磁性材料がつくられる。またこのような急冷試料はガスその他の溶解元素

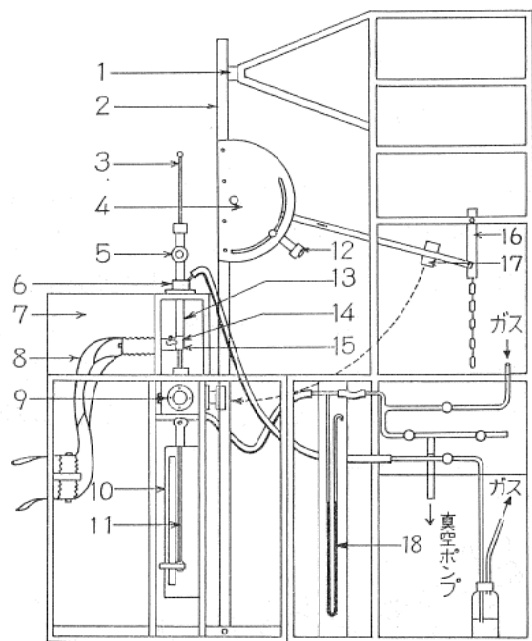


図16 実験装置概略

- | | |
|----------------|--------------|
| 1 緩衝材 | 10 昇降用ロッド固定板 |
| 2 ハンマー支持柱 | 11 昇降用ロッド |
| 3 第二元素添加用ロッド | 12 同調スイッチ |
| 4 同調スイッチ調節板 | 13 反応管 |
| 5 測湯用窓 | 14 試料 |
| 6 水冷ジャケット | 15 浮揚コイル |
| 7 透明プラスチック製カバー | 16 フック |
| 8 電力供給用銅リボン | 17 ハンマー |
| 9 クエンチングボックス | 18 水銀圧力計 |

が凝固時に偏析することなく均等な組成の試片が得られるため種々の冶金反応の基礎研究試料を得る目的で活用されている¹¹⁾。第16図は筆者の研究室で試作した装置の概要を示す。

(7) 溶融金属の密度¹²⁾および表面張力^{13) 14)}の測定

前述のように筆者の研究室では第17図に示す装置により純鉄および鉄合金を浮揚溶解し安定な球体とし、温度、重量を測定するとともに側面、底面の二方向より同時に撮影した像を拡大し補正したものより、体積を求め、密度を測定した。この方法により従来測定困難であった高融点金属および合金の特に高温度での密度が求められる。試料温度は雰囲気として Ar と He の混合ガスを用いた場合、その混合割合を変えることにより調整することができる。浮揚試料の体積は縦軸に直交する円板の積み重ねとみなして、浮揚試料の体積を区分積法によって求めた。この方法では、区分数を 80~100 とした場合、計算による体積算出誤差は 0.01~0.02% となり、きわめて有効であった¹²⁾。

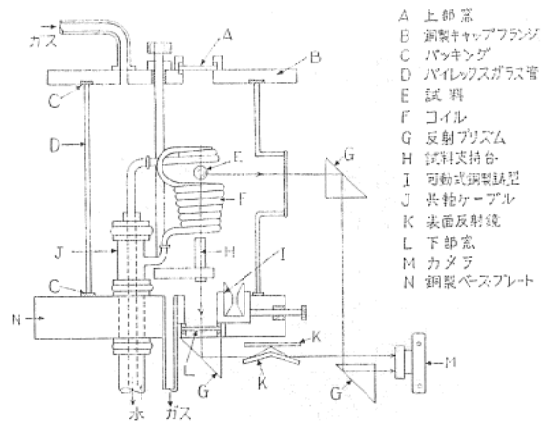


図17 浮揚溶解法による溶融金属の密度測定装置

溶融金属の表面張力の測定は種々の方法で行われているが高融点の純鉄および鉄合金では雰囲気ガスおよび容器より微量の酸素、硫黄、等の表面活性元素が侵入すると表面張力の値が著しく低下することが知られている。また一般に同時に精密な密度の値を知らねばならず、算出過程でその値の不正確なため誤差を生ずる。最近高融点液体金属の表面張力測定法として興味ある方法¹⁴⁾が発表されている。浮揚溶解した純

鉄および純ニッケルの球体が電磁力で振動しているので Rayleigh 式¹⁵⁾を用いて表面張力を算出することができる。すなわち実験式としては

$$\gamma = \frac{3}{8} \pi m \omega^2 \dots \dots \dots (14)$$

上式を用いて整理する。ここで γ は表面張力 (dyne cm⁻¹) m は浮揚溶解せる金属球の重量 (g), ω は振動数である。

VI. むすび

浮揚溶解法は耐火材料と直接接触することなく、強い磁場内で金属片を浮き上がらせた状態で溶解する、この場合熔融金属は烈しい攪拌作用を受けているのでその温度、組成は均等な状態となる。したがって高純度の金属および合金が溶製される。この特長を生かして種々の冶金反応の基礎的研究やその応用が行われている。

文 献

- 1) O. Muck; German Pat., 422004, oct. 30 (1923).
- 2) E. C. Okress et al.; J. Appl. Phys., 23 (1952) 545; J. Electrochem. Soc., 99 (1952) 205
- 3) I. Simon; J. Appl. Phys., 24 (1953) 751; C. Comenetz et al.; J. Electrochem. Soc.; 105 (1958) 673; 齊藤恒三他; 日本金属学会会報 2 (1963) 458; 学振第19委8420 (昭42. 4. 9); 盛利貞他, 溶接界 16 (昭39) 497; 学振第19委 8423 (昭42. 4. 9)
- 4) A. A. Fogeli, ПРИМЕНЕНИЕ ВАБЧУМА В МЕТАЛЛУРГИИ (Издательство Академии Наук СССР Москва) (1960) 279
- 5) G. Comenetz; 日本特許公報 (昭36) 7980
- 6) P. H. Polonis et al.; Trans. AIME 200 (1954) 1148; B. Harris et al.; Symposium on Peaceful Use of Atomic Energy in Australia (1958) 221; J. H. Hulm et al.; Phys. Rev. Letters 7 (1961) 302
- 7) 長谷川守弘; 日ソ物理化学シンポジウム論文集 (1961) 日本鉄鋼協会; 和田春枝他; 日本金属学会誌32 (1968) 831; 新見恭三他; 学振第19委, 9251 (昭46. 1. 26); D. B. Caryll et al.; J. I. S. I. (1967) 28; L. A. Baker et al.; Trans. Met. Soc. AIME 230 (1964) 1228 R. S. Kaplan et al.; Trans. Met. Soc. AIME 245 (1969) 2195
- 8) A. A. Fogeli et al.; ИЗВЕСТИЯ АКАДЕМИИ НАУК СССР, ОТН Металлургия и То пдтво No.5 (1961) 51
- 9) F. C. Hull; The Welding Jr. 38 (1959) 176 S; Proc. ASTM 60 (1960) 167
- 10) 長谷川竜介; 固体物理5 (昭45) 63; 足立彰他; 鉄と鋼 574 No. 4 (1971) S59; O. B. Caryll et al.; J. I. S. I. (1967) 28
- 11) D. W. Gomersall et al.; Trans. Met. Soc. AIME 242 (1968) 1309
- 12) A. Adachi et al.; Tech. Rep. Osaka Univ., Vol. 20No. 914 (1970); T. Saito et al.; J. I. S. I. J. 9 (1969) 118; 学振第19委, 8261 (昭41. 9. 30); A. E. El-Mehairy et al.; Trans. Met. Soc. AIME 227 (1963) 1226; S. Y. Shiraishi et al.; Can. Met. Quart. 3 (1964) 118
- 13) J. C. R. Kelley Jr.; High Temperature Symposium (1956) 187 (Stanford Research Just. California)
- 14) M. E. Fraser; Met. Transaction 2 (1971) 817
- 15) L. Rayleigh; Proc. Roy. Soc. (L). 29 (1879) 71