

# 磁気流体力学の冶金への応用(特に鉄冶金)

出 崎 友 也

われわれの研究室で、高温度の溶銑または溶鋼の冶金的処理のため、それを回転または攪拌させる必要にせまられた。そこで現在までのそれらの方法を検討し、整理してみた。まず今回は今まで行なわれた方法の概略をのべた。

## 序 論

冶金工場では種々の工程があるが、そのうちの相当の部分が金属を液相で取り扱う。この場合温度は鉄冶金の工程が最も高く 1600°C~1700°C にも達するが、他の金属では一般にそれ以下である。この大量な高温の液体金属を移動、攪拌および回転する必要がしばしばある。しかもその量が最近の高炉や電気炉においては一回の処理量は数十トンから数百トンに及んでいる。

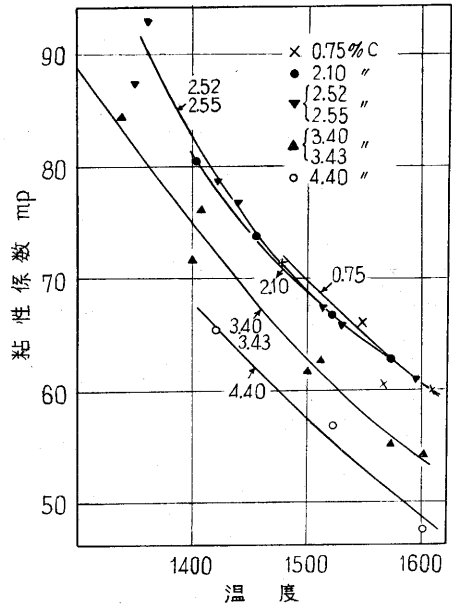
一般に液体を移動させるには種々の型式のポンプとパイプが用いられている。しかし冶金工場の場合は高温度であることが普通の型式のポンプとパイプの利用を拒否している。したがって現在まで取鍋で運びデレッキで攪拌する以外に方法がなかった。しかしながら液体金属の移動、攪拌および回転が冶金工程の量的なそして一方では質的な発展につれてもっと合理的な解決をせまられてきたのである。その一つとしては電気炉における移動磁場による攪拌がまず実用化された。しかしまた液体金属の移動は全く別の方面から問題になってきた。それは原子炉において発生する核エネルギーを熱エネルギーに転換して外部に取り出す時に液体金属(主として金属 Na)を用いることが提起されたのである。この方面の研究は原子力の平和利用がさげばれて以来相当盛んになった。そして前述の冶金的な問題と合流して相当の技術的段階に達し回転部分あるいは往復運動部分、軸受弁、パッキング、タンクをもたないポンプが開発された。またそれより以前この導電性のキュリーポイント以上の流体の物理学的な電磁学的な性質は全く別の分野、すなわち天体物理学のアルバーンによって明らかにされた。そしてまた電磁ポンプの理論的問題、実際的問題は、科学技術上、応用磁気流体力学と名付けられる特別の分野を形成するのであるが、これは電磁力学や工機学とも深い関係をもっている。

### 1. 冶金工場における液体金属

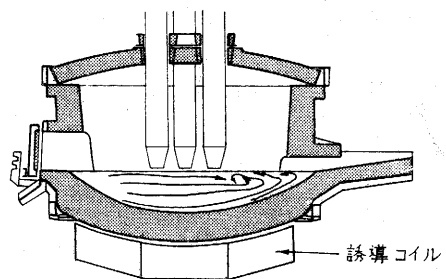
最もきびしい条件にあると思われる製鋼工場で取り扱っている液体金属(溶鋼)の性質をあげておく。

第 1 表

	1 回処理量 t	1 回の処理量 に要す時間	最終温度	C の量	
				処理前	処理後
平 炉	30~500	3~10	1600~1650		
転 炉	5~50	0.5~1	1600~1650	4%前後	0.1%以下
電気炉	5~200	3~10	1600~1650		

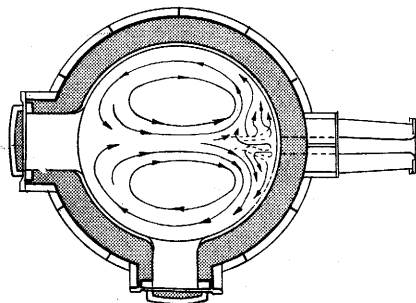


第 1 図 Fe~C 合金



第 2 図 電 気 炉

電気伝導率は室温で測定した値を液化する場合と温度上昇による体積膨張による分だけ低下するが、この変化

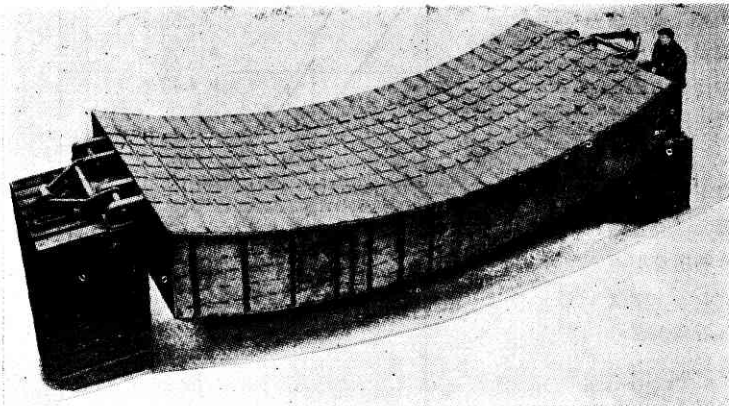


第 3 図 誘 導 コ イ ル

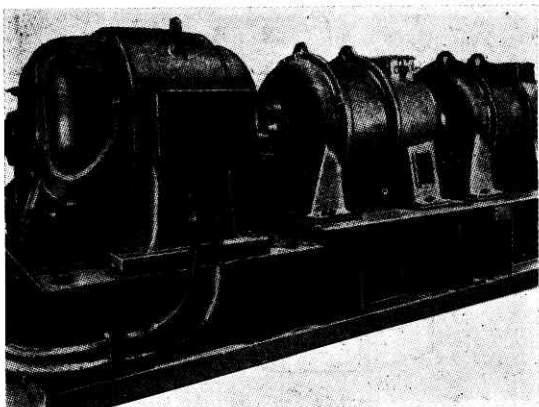
量は数十%に及ぶ。導磁率はもちろん1である。特に注目しなければならないのは、これらの溶鋼が鉍滓と、より高温の雰囲気とに接していることである。それがあらゆるものを溶かし、変化させる原因となる。また粘性係数は最近測定され、発表されたものによれば第1図のようなものである(測定値)。

## 2. 誘導攪拌の装置

鉄冶金で特に成功している実例として電気炉の誘導攪拌を現在最も多く用いられているスウェーデンの ASEA 社の報告をもとにして説明する。



第4図



第5図 極低周波数交流発電機

第2図と第3図は電気炉と誘導コイルとの相対的關係と溶鋼の運動を示す。第3図は大きさがわかるように示した。これは150トン電気炉用である。第5図は誘導コイルの電源である。

第5図に示した電源については、あまり詳しいデータがないが一般的に周波数は非常に低い(恐らく0.5~2 cycle/sec)。出力は他の実例であるが20トン電気炉用で100kVA程度のものである。ここで100kVAといっても極低周波数のため、しかも後でのべる理由で力率が非常に悪いので、これらの出力についてはあまり信用できるデータはない。ただこの電動発電機を駆動するに必

要な電力についてのべていると考えられる。極低周波が用いられる理由はシールド効果の問題と、初期においては「滑り」の問題からであろう。発電機の詳しい説明ははぶくが互いに独立した単相交流発電機2台を相をずらして用いると移動磁界をつくる様式や誘導

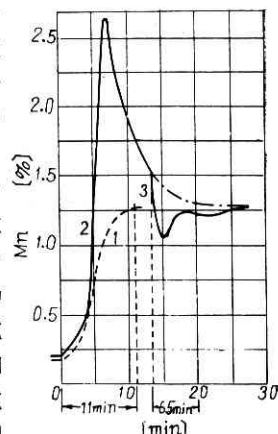
電動機の2相の回転子電流が「滑り」のために固定子電流のサイクルと差を生ずる。この差は極低周波数(0.5~2)のものを実現できるからこれを増幅して用いる方法等があることだけを報告しておく。

しかしこれらの発電機からみた負荷は誘導性のものであるから力率はきわめて悪い。これらを製作している重電機メーカーが定量的なデータを発表していないが、恐らく30%~50%のものと推定できる。「これが60%の力率を示すならば、ただちに各電気炉にこの種の攪拌装置をつけるのだが」というある冶金工場の技師の話からもこの点はおかえり。とにかく、現在この種の攪拌装置で攪拌されている電気炉は年々ふえている。その効果は効率が低いにもかかわらず、冶金的効果は次にのべるように注目すべきものがある。

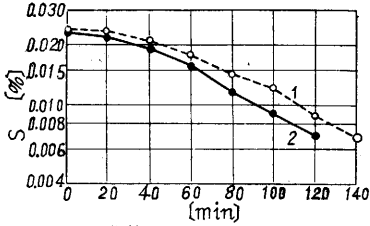
第一は製品の均質化である。最近ではNi-Cr-Fe系の鉄合金の需要が増加し特に質的にもきびしい要求が出されている。1500°C以上の液体金属をデレッキと称する長い鉄の棒でかきまぜる作業がいかに困難なものであるかは、想像に難くない。誘導攪拌による効果は同じくASEA社の報告であるが、例をマンガンの量にとって第6図のような結果が報告されている。

この場合は時間的な問題を示しているが、場所的にも同様な性質を示すことは当然である。このことはまた試料の分析値が最終製品の成分と非常に正確な一致が期待できる。次に重要なことは冶金的な反応が早くなることと、それを制御できることである。このことは表面に浮かぶ鉍滓との接触反応および鉍滓が溶鋼の運動によって一定の場所に集まるので、自由に排滓できる事実が影響するのであるが、このことは冶金学的に種々論議のあるところであるから、実例をあげるだけにとどめる。

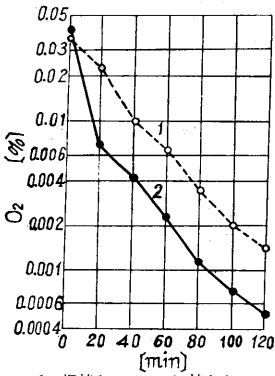
第7図は脱硫の速度の比較である。



1. 3回溶解の平均値 2. 攪拌なし 3. 攪拌開始点  
第6図 均一化とマンガン分配



1. 攪拌なし 2. 攪拌あり  
第 7 図 精錬期間中の脱硫



1. 攪拌なし 2. 攪拌あり  
第 8 図 精錬期間中の脱酸

第 8 図は脱酸速度の比較である。

以上で報告されている、電気炉用誘導攪拌装置の概略とその冶金上の効果の

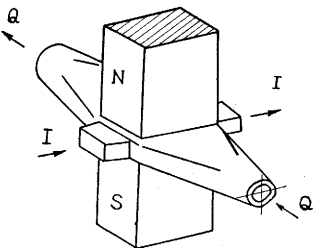
注目すべきものだけをのべたが極低周波の電流が用いられるための障害、すなわち発電コストが高いということ、また極低周波であるために効率改善ができないということを乗り越えても、冶金的な効果が目まじしいために実用されているのである。この点について近年

ソヴェトでは 50~60 サイクルによる誘導攪拌の問題を提起し「根本的にこれらの問題を物理学的に電磁気学的に研究しなおさねばならぬ」と主張している。それは極低周波でなければ電導性流体の中に磁束が貫入しないということに対する徹底的な反省を要求するものである。このことについては後に詳しくのべるつもりである。

### 3. 電磁ポンプについて

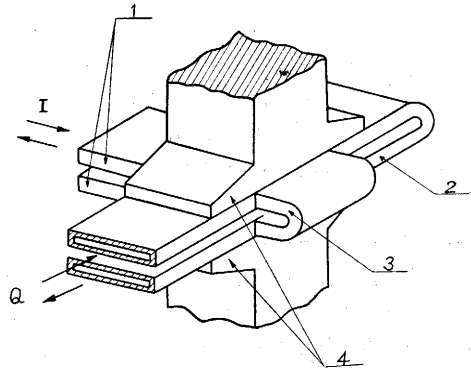
電磁ポンプについては、原子力関係の方で相当多数の報告がみられる。しかし冶金への応用は前述のように温度が比較的高いこと、液体金属の活性がはなはだしいこと、および運動中に冶金的反応が行なわれねばならぬことで原子力関係とは相当に事情が異なる。したがって利用できる型式が限定されてくるのである。考えられている型式は、次の三つある。

- 1. 直流ポンプ (ファラデー型) 第 9 図
- 2. 単相交流ポンプ 第 10 図
- 3. 三相誘導ポンプ 第 11 図



Q: 液体金属の流れ; I: 電流  
第 9 図 直流ポンプの構造

直流ポンプの動作原理は第 9 図に示されている。ポンプは直流の流れるコイルをもつ電磁石と極の間におかれた断面矩形の非磁性鋼肉薄の頸管からなっている。この電磁石のコイルと液体金属中を流れる電流は直列に結ばれるか、または別個の電源に連結される。液体金属中の電流と電磁石によってつくられる磁場の相互作用は力を生じ液体金



1: 導線; 2: U字型の管; 3: 短絡導線; 4: 電磁石  
第 10 図 交流二段階型ポンプ

属を、よく知られた左手の法則によって一定の運動させるものである。この型のポンプは液体金属に外部から電流を流すためになんらかの電極を直接液体金属に接触せしめねばならない。特に鉄冶金においては、実現不可能である。理由は前述の高温および化学的な活性によることはもちろんである。ただしアルミニウム工場では直流電源がすでにあるということ、比較的溫度が低いということと炭素電極が使用できるということで実現の可能性が期待できる。

単相交流ポンプの動作原理は第 10 図に示す。図から明らかなように直流のファラデー型ポンプが交流によって働くことは明らかである。このようなポンプを効率よく働かせるためには液体金属を貫流する電流の位相と磁場の位相を一致させねばならぬ。それには励磁コイルと液体金属中の電流が流れる領域とを直列に結んでやればよい。したがって交流ポンプは変圧機さえあれば特別の電源なしに任意の交流回路に入れることができる。しかしながらこの型のポンプもまた前述の直流ポンプと同じ理由で鉄冶金には利用しにくいものである。

誘導ポンプの動作原理は非同期電動機の場合と同様である。平面状あるいは円筒状の固定子上の三相コイルは液体金属中に電流を誘導する移動磁場をつくる。誘導された電流は磁場との相互作用によって力学的な力が生じそれに対応してポンプの入口と出口で圧力差を生ずる。この原理を利用するポンプには種々の型がある。スパイラル型、線状平面型、線状円筒型等である。そのおのおのは各種の端効果によって電磁的、磁気流体学的特徴を持っている。特にわれわれが興味を感じるのは、液体金属の電流は外部から誘導されるということである。この特徴は前述の誘導攪拌装置にも見られたように鉄冶金においても実現できるものである。いささか詳しくこの型について説明したいと思う。

a) スパイラル型誘導ポンプ このポンプは動作の原理、構造、特性において、他のポンプ以上に非同期電動機に似ている。第 11 図はこのポンプを示す。

この種のポンプは金属ナトリウムの場合最高7 kg/cmの圧力が得られたという報告がある。その場の効率は最高でも20%以下である。しかしある種の鉄冶金の過程中に使用することができる可能性がある。

**b) 線状平面型誘導ポンプ** 第12図に示したものである。

普通の非同期電動機の固定子を取りそれを円筒の母線にそって切り、平面に展開したものである。このポンプは圧力があまり大きくなく吐出量が大きくなければならぬ時には特に有効で効率が25%~45%の間にある。実際につくられたものの報告に基づくと450°Cの液体ナトリウムに対して圧力2.75 kg/cm<sup>2</sup>で吐出量272 m/hourであり重量は約3トンである。

**c) 線状シリンダー型誘導ポンプ** この型の一般的な型式は第13図に示した。

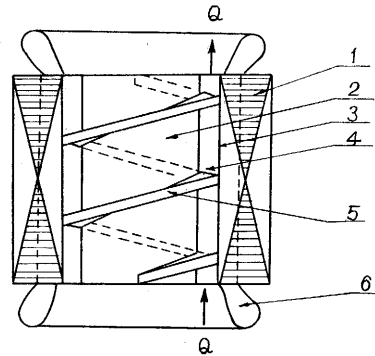
図からすぐわかるように液体金属にはさまれた鉄芯がある。このことは高温金属を対象とする鉄冶金には利用できないものであろう。

以上の議論からわれわれが興味のあるものは誘導型のものでしかもa), b)の二つの型であろう。しかしながら今まで報告されたものでは非同期電動機の固定子に相当する部分と回転子に相当する部分(ポンプの場合には液体金属)が相当接近している場合の論議がなされている。特に線状平面型誘導ポンプにおいては第10図のaとbの値が相当異なることが鉄冶金の場合には要求される。つまり、固定子鉄芯の表面から液体金属までの間に相当厚い(ときとしては数10センチに及ぶことがある)耐火物が入るのである。今までの報告では数センチの報告しかない。一般に電動機設計の場合、回転子の中心方向への磁束分布は固定子鉄芯の表面からの距離の3乗に逆比例するといわれている。しかし平面に展開された固定子の場合にはかならずしも逆3乗方式には従わない。われわれの実験でもそのことは確認されている。またこの誘導ポンプは内部に導電性の物質があればすべて渦流を生じ損失となる。以上のように冶金工場においてこれを利用しようとするためには、種々の長所と短所を持っている。以上の考察に基づいて鉄冶金の工程に用いられるポンプの基礎研究が当研究室で行なわれたがある種の成功とある種の失敗を重ねた。それについては近い将来発表する予定である。

—未完— (1960.11.29)

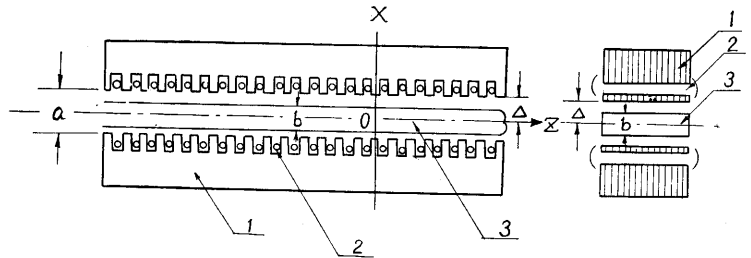
参考文献

1. 応用磁気流体力学, ソ連邦ラトビヤ共和国科学アカデミー編
2. Induktive Umrührung in Lichtbogenöfen Von Bertil Hanas ASE. Neue Hütte Juni 1960, 323
3. 回転磁極による平炉における熔鋼の攪拌 stalj 1958. 11
4. Viscosity of Liquid Iron and Iron-Carbon alloys Journal of the Iron and Steel Institute Vol 180, 1955



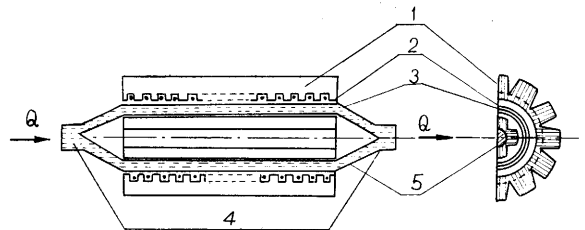
: インダクター 2: 鉄心(磁気回路) 3: 外側のシリンダー 4: 内側のシリンダー 5: スパイラル 6: インダクターのコイル

第11図 スパイラル型誘導ポンプ



1: 固定子 2: コイル 3: 頸管

第12図 誘導ポンプ



1: インダクター 2: インダクターの外側のシリンダー 3: 管の内側のシリンダー 4: ディフューザー 5: 重ね合せ磁気回路

第13図 シリンダー型誘導ポンプ

表紙説明

この写真は、レール鋼(C: 0.68%)の3%食塩水による腐食疲れ破断面付近の様相を示す。(試験片番号 RW 21, 応力 ± 21.0 kg/mm<sup>2</sup>, 破断繰返し数 15408 × 10<sup>3</sup>) このように微少な分布き裂が最大主応力に直角方向に成長するのは腐食疲れにおける一特長で、現在のレール切損事故の過半数はこれと類似条件下に発生するものとして研究が進められている。このような分布き裂の存在のため、図示するような疲れ破断に至らない以前でも材料の衝撃値、疲れ限度等の低下は著しく、その弱化の程度はこのような多数のき裂中の最大のもの最大深さとの対応を示すことについては本文中にもふれた。このようなき裂群を実際の使用条件下でいかにして早期に発見しうるかが重要な課題である。この写真は腐食生成物を除いた後に、ある条件下で拡大されて観察されたもので、このように容易にき裂群の全貌を直視できることはむしろまれである。(本文3ページ参照)