

技 術 報 告

UDC 621.69 : 538.4 : 621.646.3

電磁ポンプによる溶融金属の流量制御に関する研究*

千々岩健児**・伊藤 光男***・野呂 克彦****

A Study of Flow Rate Control of Molten Metals by Electromagnetic Pump

Kenji CHIJIWA, Mitsuo ITO, and Katsuhiko NORO

Synopsis:

The flow rate control of molten metal was investigated by means of a pair of 3 phase 200 V flat type linear induction electromagnetic pumps.

Two pumps of each capacity 11.5 KVA were placed at both sides of the vertical nozzle and were operated to induce the force in the direction opposite to the free falling of the metal.

The molten metals used were Al alloy and cast iron.

For Al alloy, the flow rate decreased from 1.20 Kg/sec to 0.83 Kg/sec by increasing the input voltage from 0 to 200 V, resulting in the maximum control of the molten metal flow rate of 30%.

For cast iron, the power output of the pumps was not sufficient to control the flow rate, because of the lower electrical-conductivity of cast iron as compared with Al alloy.

These results were confirmed theoretically, and the data necessary for design of electromagnetic pump were obtained.

(Received July 17, 1971)

1. 緒 言

一般の鑄造工程において、省力化および品質管理などの面から、鑄造作業全体の自動化および連続化への要求が急速に高まっている。これを注湯工程について見ると、溶湯の輸送、適正分配および注湯の自動化、さらには溶湯の流量および鑄込量の適確な制御が不可欠のものとなつている。従来でも遠心ポンプのごとき機械的ポンプ、またはガス圧による圧送を利用した溶湯輸送の試みはあるが、高融点の金属に対しては、構造の複雑さ、装置の耐久性の問題、および流量制御の不安定性などの面からいまだ実用化されていない。そこで無接触の状態ですら溶湯に力を作用させることができ、構造および保守も簡単で、かつ制御を電氣的に行なえる電磁式流量制御方式がにわかに注目され、最近これに関する研究がソ連などを中心に進められている^{1)~7)}。しかし電磁式流量制御方式の中心ともなるべき電磁ポンプの動作特性、流量制御特性などについては、従来の内外の研究報告をみてもいまだ満足なものが得られていない。そこで本研究では平面型直線誘導電磁ポンプを試作し、溶融金属としてラウタル (1.40%Cu, 6.99%Si-Al 合金) を用いて流量制御

特性を求め、あわせて電磁ポンプの冷却方法、据付環境への適応性などについて研究した。この結果をもとにして電磁式流量制御方式のたて型連続鑄造機への応用の可能性を検討した。

本論文ではまず試作した電磁ポンプの構造について述べ、ついで本ポンプの強さを示す磁束密度の測定結果、ならびにこの磁束内に固体金属をおいた場合のポンプ特性試験結果を述べ、最後にこのポンプを用いて溶融金属の流量制御を行なつた試験について報告する。

2. 試作した電磁ポンプの構造

Photo. 1 および Fig. 1 は試作した電磁ポンプの構造を示す。高さ 120 mm × 幅 550 mm × 厚さ 0.35 mm の珪素鋼板に、深さ 70 mm × 幅 14 mm の溝を切り、これを 300 板重ね合わせて厚さ約 100 mm とした櫛形のブロックを作り、この溝に 2 mm φ の銅線を 1 相につき

* 昭和45年10月本会講演大会にて発表

昭和46年7月17日受付

** 東京大学工学部 工博

*** 東京大学工学部

**** 新日本製鉄(株)名古屋製鉄所

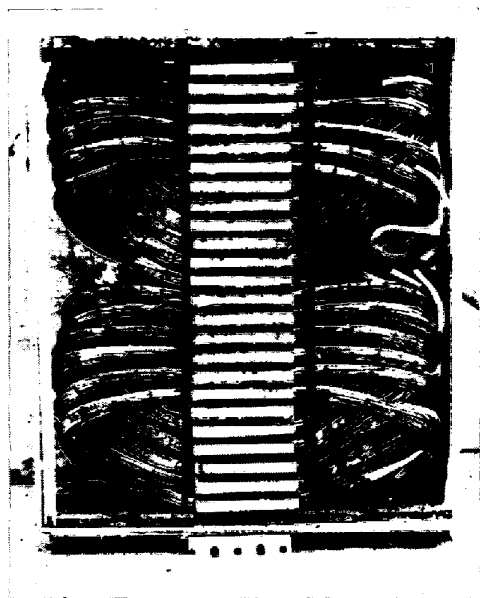


Photo. 1. Test electromagnetic pump.

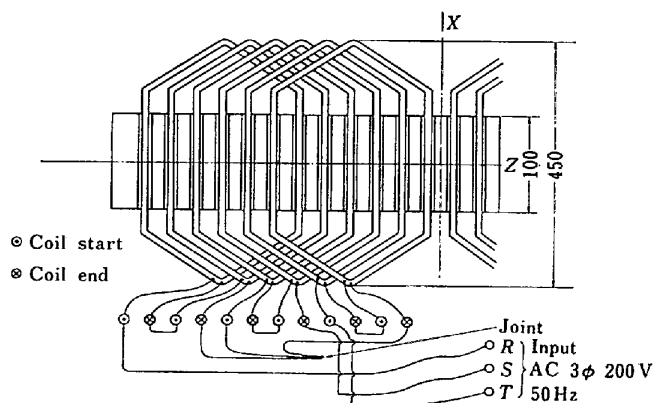


Fig. 1. Schematic drawing of test-fabricated electromagnetic pump.

180 回埋め込み Y 結線とした。なお全長 550 mm を 2 分し、おのおのが 2 極となるように捲線を行なった。

Table 1 はこの誘導電磁ポンプの明細を示す。定格は 3 相 200V 50Hz で、3 相スライダックトランスにより 0~200V に可変できるようにした。電磁ポンプ本体は断熱材によるカバーで覆い周囲の熱を遮断できる構造をとった。またカバー内部へブローで送風し強制冷却を行なうようにした。Fig. 1 に示した電磁ポンプ 2 基を平行にならべて 1 ユニットとし、これら 2 基のコア両面間は一定の間隔をあけた。そしてその間に、溶湯を流すノズルまたは試験用の板を設置できるようにした。また平面型直線誘導電磁ポンプ特有の力率低下を防ぐために、進相コンデンサによつて力率改善をはかった。

Table 1. Specification of electromagnetic pump.

Type	Flat-type linear induction pump
Input	3 phase, 200 V, 50 Hz
Capacity	11.5 KVA × 2
Total weight (per pump)	77.0 kg
Weight of copper coil	32.4 kg
Breadth of core	100 mm
Length of core	550 mm
Thickness of core plate	0.35 mm
Material of coil	2mm φ copper wire insulated up to 220°C
Pole No	4
Pole pitch	132 mm
Turn No (per phase, per pole)	180
Connection	Star

3. 磁束密度測定試験

3.1 試験方法

Fig. 2 に示すように 2 基の電磁ポンプを対面配置し、ガウスメータを用いて両ポンプ間隙中央部 (軸方向、図中の Z 軸方向)、および各ポンプのコア表面について各点の磁束密度を測定した。両ポンプ間隙は 80 mm とし、入力電圧は 50, 100, 150, 200V とした。

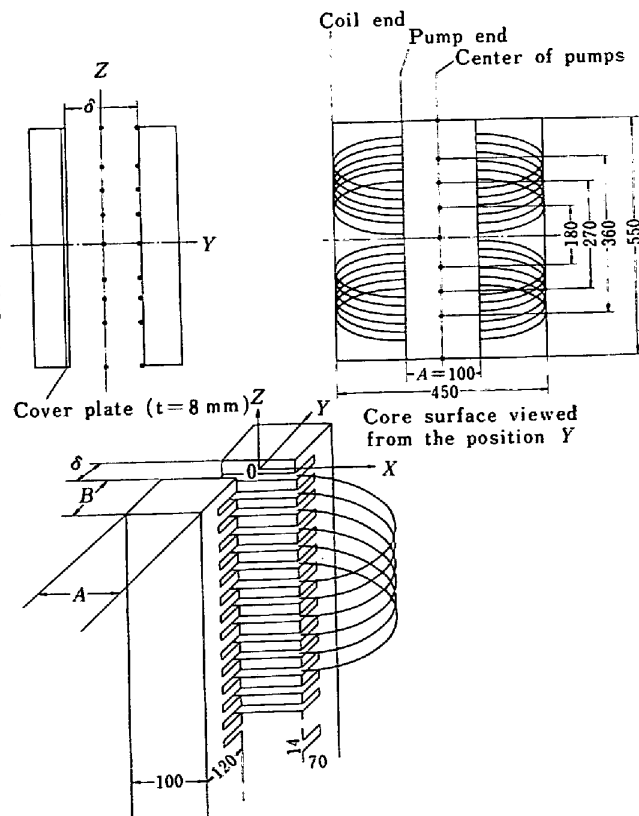


Fig. 2. Positions measured magnetic flux density.

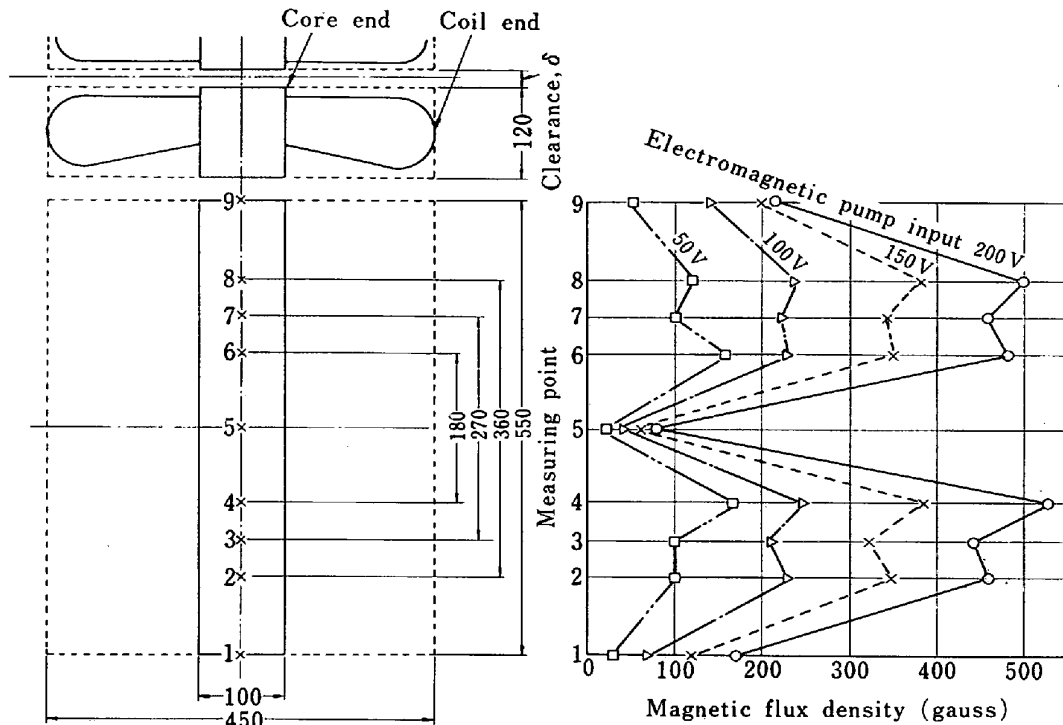


Fig. 3. Relation between measuring point and magnetic flux density.

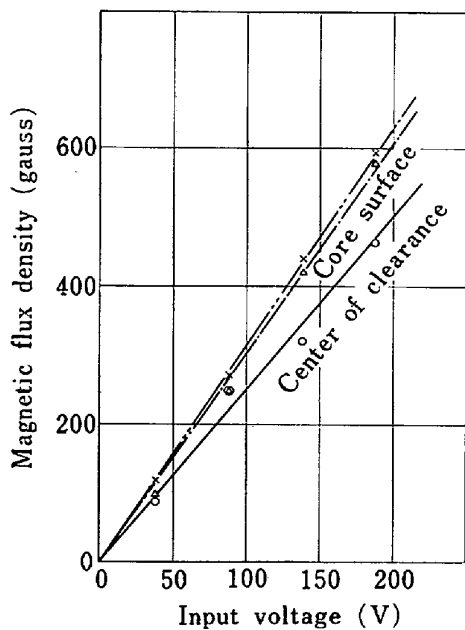


Fig. 4. Magnetic flux density at the center of the clearance and at the core surface.

3.2 測定結果

Fig. 3 は間隙中央 Z 軸上の磁束密度分布の測定結果を示す。本試作の電磁ポンプは 4 極のため、磁束密度は 2 つの波が生じ中央部 (Z = 0 点) で磁束密度が急激に減少し、節の部分であらわれた。また磁束密度振幅値と入

力電圧はほぼ比例する傾向を示した。ポンプの間隙中央部とポンプコア表面の磁束密度を比較すると Fig. 4 に示すように中央部はコア表面より約 20% 程度磁束密度が小さくなっていた。またポンプ幅方向の磁束密度は Fig. 5 に示すように中心付近は大きく、両側へ遠ざかるにしたがい小さく、捲線末端で 10~20 ガウス程度であった。波形自体に大きな不均一性の存在する理由は、この種の電磁ポンプ特有の縦端効果、横端効果などの諸効果の影響ならびに多数のスロットの存在などによる構造上の問題が考えられる。

4. 固体金属による電磁ポンプ特性試験

4.1 試験方法

電磁ポンプを溶湯に適用する前に電磁力作用体として厚さ 15 mm および 10 mm のアルミニウム板 (幅 100 mm × 長さ 1000 mm) を用いて発生力の特性試験を行なった。Fig. 6 に実験装置の概要を示す。電磁ポンプを対面配置し、両コア間、間隙中心にアルミニウム板を配置した。上端にはばね秤を取り付け、位置設定と回転を防ぐため側面を上下各 4 個のガイドローラで支持した。両ポンプの間隙を 15, 42, 80 mm と 3 種類に、また電磁ポンプの入力電圧を 50, 100, 150, 175, 200V にかえ、ポンプの間隙と入力電圧の変化に対する発生力の特性をばね秤によって検出した。

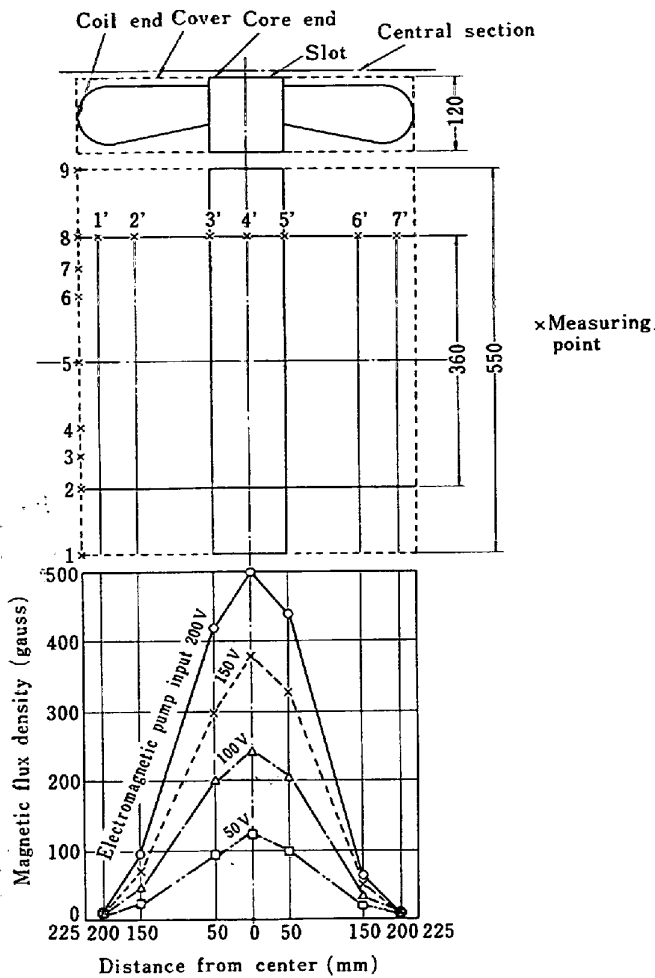


Fig. 5. Relation between magnetic flux density and distance from center.

4.2 試験結果

Fig. 7 に間隙を 15, 42, 80 mm にしたとき, Fig. 8 に板厚を 10, 15 mm に変えたときの電磁ポンプ入力電圧と発生力の特性曲線を示す。いずれも発生力は電磁ポンプ入力電圧のほぼ 2 乗に比例して増加している。これは

- (1) 発生力は磁束密度の 2 乗に比例する。
- (2) 磁束密度は電磁ポンプ入力電圧に比例する。

ことからおこるものと考えられる。この結果から、本タイプのような電磁ポンプについては、出力制御を電圧制御で行なう際、入力電圧の低い所で使用するのはあまり有効でないと推定される。また、本実験では電磁ポンプの間隙を 3 種類変化させて測定を行なっているが、Fig. 7 に明らかなように、ポンプの間隙の大小によつて発生力が大きく変わることがわかる。磁束密度分布と動力測定では電磁ポンプの冷却は行なわなかつたが、捲線部に多少の温度上昇が認められただけで問題にならなかつた。

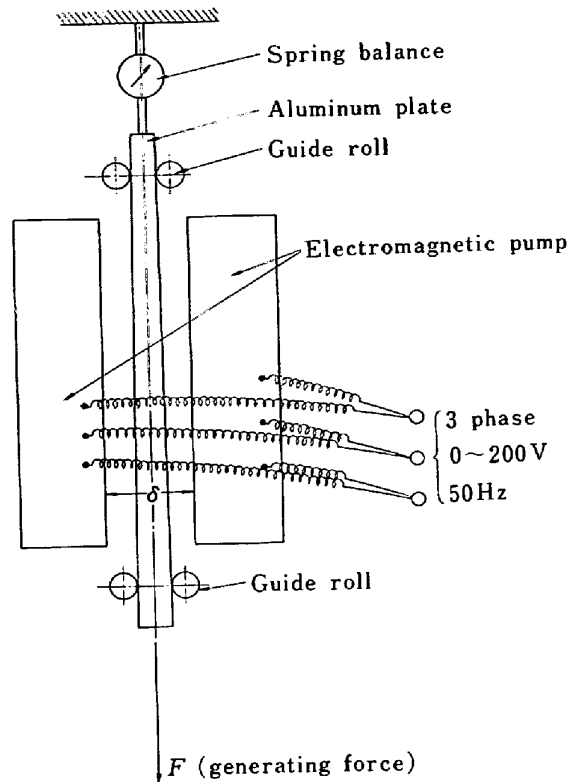


Fig. 6. Schematic drawing of equipment for examination of properties of electromagnetic pump.

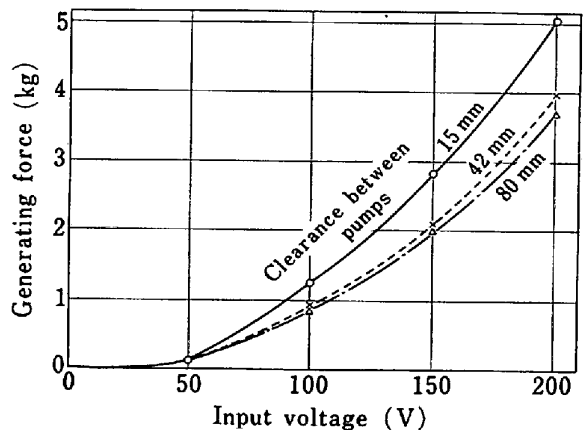


Fig. 7. Relationship between input voltage and generating force for varying clearance (aluminum sheet, 10 mm).

5. 流量制御特性試験

5.1 試験方法

以上の基礎的な諸特性試験終了後、熔融金属としてラウタル(化学成分を Table 2 に、物性値を Table 3 に示す)を用い、電磁ポンプの流量制御特性試験を行なつた。Fig. 9 に実験装置概要を示す。ノズルは断面が内り 15 mm × 100 mm の長方形の筒で、先端部は 15 mm × 10 mm に絞つてある。長さは 650 mm で下端は電磁ポ

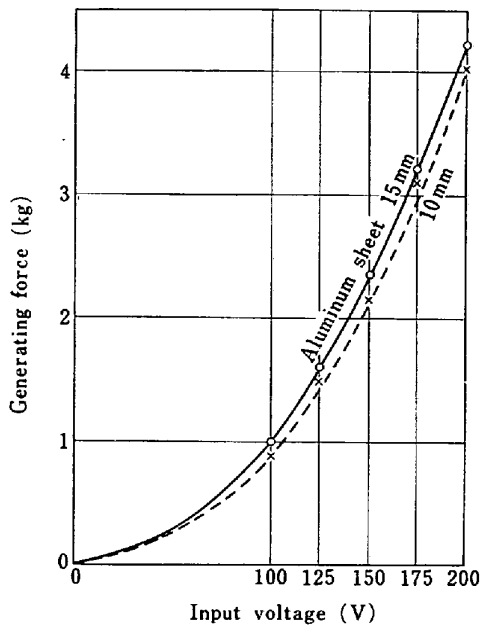


Fig. 8. Effect on generating force of thickness of metal sheet (clearance 42 mm).

Table 2. Chemical composition of lautal (%).

Al	Cu	Si	Mg	Zn	Fe	Mn	Ti
88.7	1.40	6.99	0.53	1.11	1.05	0.14	0.09

Table 3. Physical properties of lautal.

Density (at 20°C)	2.68 g/cm ³
Specific heat (at 100°C)	0.23 cal/g°C
Thermal conductivity (at 25°C)	0.36 cal/cm, sec°C
Electric conductivity (at 20°C)	(4.4 × 10 ⁻⁶) ⁻¹ (Ω cm) ⁻¹
Latent heat of fusion	93 cal/g
Melting point	Liquidus temperature 610°C
	Solidus temperature 579°C

ンプ最下端と一致するようにした。タンディッシュは直径 200 mm 高さ 350 mm の筒で底に長方形の穴があげてあり、ストッパーで閉められている。ここに高周波電気炉によつて溶融したラウタルを上部の湯溜をとおして入れる。タンディッシュはあらかじめ 400°C に加熱しておいた。タンディッシュ内のラウタル温度が 700°C になったときストッパーを開き、ノズルをとおして流し出し下のるつぼでうけた。ノズル両面に配置した電磁ポンプにあらかじめ電力を供給しておき、ラウタルの自由落下をおさえるむきに力を働かせ、流量を制御した。制御電圧は 50, 100, 150, 200V を用いた。流量制御特性はタンディッシュおよびるつぼに取りつけたロードセルの出力によつて算出した。ノズルを通過する際、溶湯に

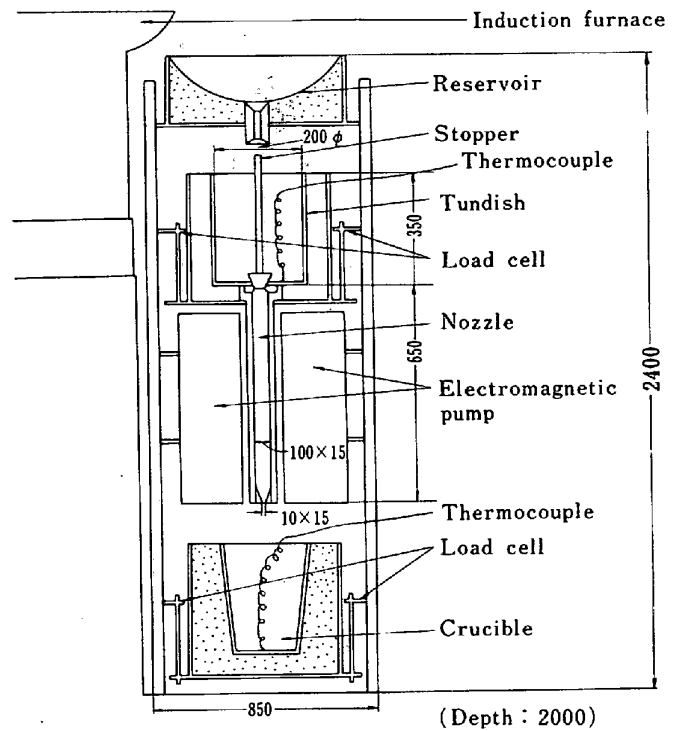


Fig. 9. Schematic drawing of equipment for experiment on flow rate control molten lautal.

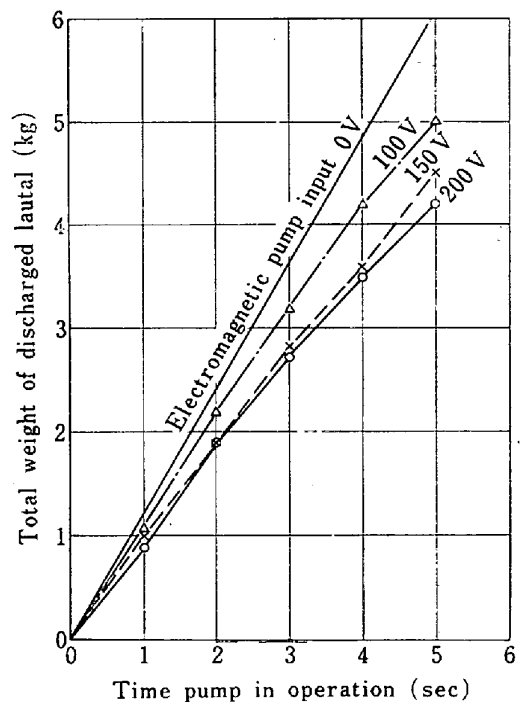


Fig. 10. Relationship between amount accumulated and time.

与える電磁ポンプの熱出力をもとめるためにノズル通過の際の温度降下の測定も同時に行なつた。

5.2 試験結果

Fig. 10 は電磁ポンプの入力電圧が、0, 50, 100, 150,

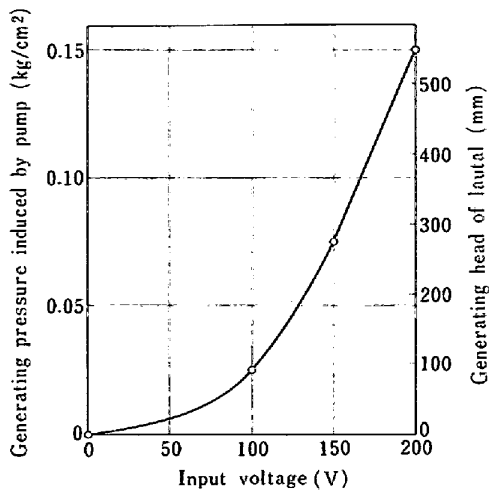


Fig. 11. Relationship between input and generating head of lautal or pressure.

200V の場合の流入時間と流量との関係である。本実験では、熔融金属の自由落下と逆の向きに力を作用させていたので、電磁ポンプ作動区間では電圧の高いほど熔融金属は流れにくくなって流量が少なくなった。Fig. 11は各電圧における発生圧力を示したものである。このグラフから、固体アルミニウム板を使用して行なった電磁ポンプ特性試験の結果と同様に、発生力は入力電圧の2乗に比例して大きくなり、その最高値はラウタルのヘッドで 550 mm、圧力に直せば 0.15 kg/cm² に達した。

ここで発生圧力 P (kg/cm²)

ポンプの入力電圧 V (volt)

との間に

$$P = aV^2$$

a : 定数

の関係が成立するとして、 a の値を求めると

$$a = 3.75 \times 10^{-6} \text{ kg/cm}^2 \text{ volt}^2$$

となる。

Fig. 12 はポンプの入力と流量との関係を示す。流量は入力電圧が 0 から 200V に上がると 1.20 kg/sec から 0.83 kg/sec に減っている。すなわち熔融金属の流量制御量は最大

$$\frac{1.20 - 0.83}{1.20} \times 100 = 30\%$$

行なわれたことを示している。

またノズルを通過した際の溶湯の温度低下量は電圧 0 のとき 70°C であつたが、200V では 20°C になつた。

このことは電磁ポンプの熱出力が温度降下を下げたためと思われる。このときのポンプ内部（捲線部）の温度は最高 50°C 程度であつた。なおこのポンプの捲線に用いた絶縁銅線は 220°C までのものであり問題はなかつ

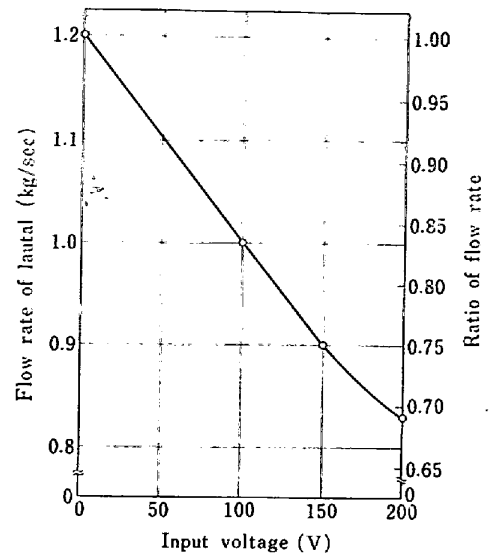


Fig. 12. Relationship between input and flow rate (Generating force induced by pump was applied to reduce the flow rate of free falling molten lautal).

た。電磁ポンプを作動させているときの線電流はほとんど変動がなかつた。力率は電磁ポンプの入力側に 300 μ F のコンデンサを入れて改善した結果、これまで 25% の力率が約 75% に上昇した。

6. 電磁ポンプの出力計算

誘導型電磁ポンプにより作り出される圧力は従来の理論により次式で計算できる。

$$P = 10 \cdot 2 B_m^2 \cdot \sigma \cdot f \cdot s \cdot l \cdot \tau \cdot k \times 10^{-16} \text{ kg/cm}^2$$

ここに

B_m : 磁束密度 Gauss

σ : 電気伝導度 (Ωcm)⁻¹

f : 周波数 Hz

s : すべり

l : ポンプの長さ cm

τ : 磁極の間隔 cm

k : エッジ効果, 回路損失

本実験に用いた電磁ポンプの性能を本式により計算すると次のようになる。なお計算には Table 4 の数値を用いた。この場合は電圧 200V のときの磁束密度を用い、すべり、回路損失などはないものとした。

これによると

$$P = 0.3 \text{ kg/cm}^2$$

となる。

実験結果 Fig. 11 によれば電圧 200V のときラウタルのヘッドとして 550 mm であり、これを kg/cm² に

Table 4. Values and symbols used in calculation of pressure developed by electromagnetic pump.

Factor	Symbol	Value	
Magnetic flux density	Bm	350	Gauss
Electric conductivity	σ	$(15 \times 10^{-6})^{-1}$	$(\Omega \text{ cm})^{-1}$
Frequency	f	50	Hz
Slip	S	1	
Pump length	l	55	cm
Pole pitch	τ	13.2	cm
Coeff. of edge effect	K	1	

直せば 0.15 kg/cm^2 であるので、 $0.15/0.3 \times 100 = 50\%$ となり、理論計算より小さくなった。これは理論計算ではすべりおよび回路損失を無視したことや、実際にはその他の損失があることによるものと考えられる。

7. 総 括

① 3相 200V 平面型直線誘導電磁ポンプを試作し、磁束密度、固体金属への発生力、溶融金属の流量制御試験を行なった。

② Table 1 および Fig. 9 に示す容量のポンプを用い、ラウタルをノズルから垂直に流し出す場合の流量制御を行なった。その結果最大 30% の流量が制御されることがわかった。

③ この結果に対し従来の理論式を用いて計算したが、実験によるポンプ出力は理論の約 50% となった。これは理論式に対する仮定の不備と実験上の諸損失によるものと考えられる。しかし本結果よりも電磁ポンプ設計資料を得ることができた。

④ 鋳鉄についても同装置で実験を行なったが、ポン

プ出力が足りず制御できなかつた。鋳鉄の場合は電気伝導度がラウタルの約 $\frac{1}{20}$ となるため、理論式からもわかるようにポンプ容量を増さないと圧力をだすことはできない。容量を電気伝導度に比例して大きくすればラウタル同様制御が可能であると思われる。

8. あとがき

本研究の実施に当たつて、実験にたずさわられた井原、来村、永島の諸君、製作に協力された会田君を始め機械実験所の諸君に厚く御礼を申し上げる。また本研究に協力をいただいた久保田鉄工株式会社に厚く感謝の意を表する次第である。

文 献

- 1) L. A. BEPTE: Electromagnetic Transport of Liquid Metal. Publisher Metallurgy (1965)
- 2) L. A. BEPTE: Electromagnetic Pouring and Treatment of Liquid Metal. Publisher Metallurgy (1967)
- 3) O. TEDDER: Electromagnetic pumping of molten cast. Iron and Steel, 35 (1962), pp. 317
- 4) Von GERHARD, W. SEULEN und A. von STRACK in Remscheid: Das Electromagnetische Fordern und Dosieren von Flussigen Metallen. Giesserei 56 (1969), 2 Jan, 1
- 5) R. S. BAKER: A new electromagnetic pump for liquid metals. ASME Paper 63-WA-92
- 6) A. YANAGIZAWA: Electromagnetic pump. Kinzoku (1968-10) (in Japanese)
- 7) N. M. OKHREMENKO: Electromagnetic phenomena in flat type induction pumps for molten metal. ARS Journal Supplement 1442-1448 Translated from Electrichestvo (electricity), No 3 48-54 (March 1960). Translated by primary Sources, New York