交流ファラデー形電磁ポンプ

AC-Faraday Type Electromagnetic Pumps

博* 堀 西 Hiroshi Nishibori

片木剣三郎** Kenzaburo Katagi

男** 小野邦 Kunio Ono

概 内 梗 容

原子炉冷却用液体金属の研究に役だてることを主目標とし、昭和32年度原子力平和利用補助金をうけ て行った交流ファラデー形電磁ポンプの試作研究の結果を略述する。この試作研究を通じて首記電磁ポ ンプの諸特性が解明され,製品化の態勢が確立された。

1. 緒

言

ここでいう電磁ポンプは,電磁気的原理を応用した液 体金属用ポンプであって, 今世紀初頭よりすでに考えら れていたものであるが,これが注目され始めたのは原子 力発電が具体化してからのことである。すなわち,高能 率でしかも容積当りの出力が大きい液体金属冷却形原子 炉において,液体金属を循環するためのポンプが必要で, この液体金属としては Na, NaK などの化学反応のきわ めて大きい危険な金属を使用する関係から,漏洩の心配 なくかつ耐蝕, 耐熱性の強い電磁ポンプが適している。 かかる理由から,米国などではこれら液体金属の研究と 並行して電磁ポンプの開発研究が促進されてきた。



日立製作所においても,この点に注目し,液体金属の 研究を進める一方, 電磁ポンプの開発に着手し, 一昨年 10月に原子力平和利用政府補助金の交付をうけて、これ を促進してきた。かくて,まず液体金属の研究に役だて ることを主目標として,小容量で取り扱いの便利な交流 ファラデー形電磁ポンプの試作を完成した。

本報はその概略を記述したものである。

論(1)~(4) 2. 理

本電磁ポンプの基本原理は, 名称からも明らかなとお りファラデーの法則によるものであって、第1図のごと く管路中に液体金属を入れ,その一方の側面より電流を ≻→の方向に貫通し,磁東を上面より≫→の方向に貫通 させれば, 内部の液体金属はその両者に直角な方向の力 をうけ, ≫→の方向に流される。

ここで, 電流および磁束は交流であるが, その両者の 位相はまったく同相であるとして以下検討を行う。

まず電流回路に着目すれば,第2図(A)のごとく電 極からの電流 I は液体金属を通過する成分 I'er と管壁を 流れる成分 Iw にわかれる。さらに液体金属中を流れる 電流 I'efは, 第2図(B)のごとく分布するからこれは

- 日立製作所日立研究所 工博 *
- 日立製作所日立研究所 **



第2図 電極部電流回路

磁束と鎖交する成分 Ier と鎖交しない成分 Ib とに分けら れる。

一方,流動する液体金属に磁界が加わると,第2図に 示したごとき電流と逆方向の内部誘起電圧 Ei が生じ, これは Ier を妨げる作用をする。

以上を総合すると電流回路は第3図のごとき等価回路 で表わされる。 Ref は液体金属中を流れる電流のうち磁 東と鎖交する有効分電流 Ief の通路の等価抵抗, Rb は上



記のうち磁束と鎖交しない無効分電流 I_b の通路の等価 抵抗, R_W は管壁を通る電流 I_W の通路の等価抵抗であ る。

この回路より次の関係式が求められる。

 $E_i = IR_B - (R_{ef} + R_B)I_{ef}...(V).....(1)$ すなわち,

$$I_{ef} = \frac{R_B}{R_{ef} + R_B} I - \frac{E_i}{R_{ef} + R_B} \dots (A) \dots (2)$$

液体金属中を通る磁束密度を B_G(r.m.s. G), 磁束と電

$$W_{I} = I \cdot (E_{i} + I_{ef}R_{ef})$$

= $I \left(\frac{B_{G}Q}{10^{8}b} + \frac{9.8 \times 10^{3}b}{B_{G}}R_{ef}P_{0} \right)$
...(W)(9)

We は交流磁界が電極部導体を通過することによって生 ずる渦電流損失, W_{Fe} は鉄損, W_{eu} は巻線その他の銅 損である。

以上より効率りは次のごとくなる。

$$N = \frac{9.8 \times 10^{-5} PQ}{W_I + W_e + W_{Fe} + W_{cu}} \times 100 \dots (\%) \dots (10)$$

なお、以上の各要素のうち、 R_{ef} , R_B , P_i , W_e などは、 理論的にかなり複雑な内容をもっており、筆者らは、実 験に基いてこれらの数値を求めた。

以上の検討は電機子反作用すなわち電極電流によって 生ずる磁界のひずみの影響は無視したが,流速が大にな るとこの影響は無視できなくなる。ここでは詳細な検討 は省略するが,液体金属中を流れる電流のみを考えた場 合の検討結果を記すと以下のごとくなる。

電機子反作用による圧力降下分;

$$\frac{B'}{\beta c B_G} \cdot \left\{ \frac{\beta c}{2} \frac{(\varepsilon^{\beta c} + 1)}{(\varepsilon^{\beta c} - 1)} - 1 \right\} \times 100$$

$$(%) \qquad (11)$$

流より生ずる流体圧力を $P_0(g/cm^2)$ とすれば、次の関係 式が成りたつ。

$$I_{ef} = 9.8 \times 10^3 \frac{b}{B_G} P_0...(A) \dots (3)$$

また流量を $Q(cm^3/s)$ とすれば、磁束と流量より生ず る内部誘起電圧 E_i は次のごとくなる。

$$E_i = \frac{B_G Q}{10^8 b} \dots (V) \dots (4)$$

(3)および(4)式を(2)式に代入すれば次の関係式が えられる。

$$P_0 = \frac{B_G}{9.8 \times 10^3 b \left(R_{ef} + R_B\right)} \left(R_B I - \frac{B_G Q}{10^8 b}\right)$$

 $...(g/cm^2)$ (5)

これは流体通路の圧力損失がない場合の式であるが、 この圧力損失 $Pi(g/cm^2)$ を考慮すれば、実際の圧力Pは 次のようになる。

$$P = rac{B_G}{9.8 imes 10^3 b \, (R_{ef} + R_B)} \left(R_B I - rac{B_G Q}{10^8 b}
ight)$$

 $-P_{i...}(g/cm^2)$ (6)

このポンプの機械的出力は

 $W_M = 9.8 \times 10^{-5} PQ...(W)$ (7) 電気的入力は

 $W_E = W_I + W_e + W_{Fe} + W_{cu}...(W).....(8)$ このうち W_I は電流回路の入力であって ····(/0)······...(11

tatil
$$B' = \frac{4\pi I_{ef}}{10l}$$

*l=B'*の通る空隙長

$$\beta = \frac{4\pi Q}{10^9 blc R_{ef}}$$

電機子反作用による電極電流損失の増加分;

$$\left\{\frac{\beta c(\varepsilon^{\beta c}+1)}{2(\varepsilon^{\beta c}-1)}-1\right\}\times 100\dots(\%)\dots(12)$$

3. 試作電磁ポンプの概要

第4図は試作した交流ファラデー形電磁ポンプの外観 を示す。磁束は上下に配置された磁極より供給され,電 流は横方向に配置された電極導体より供給され,磁束お よび電流は2箇所において相会し,ここで液体金属に圧 力を生ずる。液体金属の通るパイプは,電極および磁極 のある部分においては短形状に変形されている。電極導 体はこのパイプに両側面より熔接され,電極用変流器の 二次回路をなし,ここに大電流を通ずることができるよ うになっている。磁極および変流器巻線は,直列に接続 され,磁束と電流の位相が一致するごとくした。大体の 大きさは,高さ,幅,長さともに 50cm である 本電磁ポンプの概略仕様は下記のごとくである。 使用液体金属 NaK(Na: 56%, K: 44%)

---- 44 ------





第4図 試作電磁ポンプ

使	用	温	度	250°C
使	用	導	簹	材質 SUS-7
				外径 2.5cm
				肉厚 0.2cm
定	格	流	量:	25 G.P.M. (1,580cm ³ /s)
定	格	圧	カ	$30 \text{ P.S.I.}(2.12 \text{ kg/cm}^2)$
入力	力定	格電	王王	単相 220V 50~
使	用	条	件	入力電圧は0~230Vまで可変
				とし,流量,圧力の調整が可



第6図 電磁ポンプ操作盤

プの周囲には,液体金属を高温に保つ必要上,電熱回路 を設けた。流量は電磁流量計を用いて測定し,圧力は電 子管式自動平衡圧力計を用いて測定した。

第6図は電磁ポンプ操作盤の外観である。本操作盤 は,電磁ポンプの電圧調整器,過電流保護装置,異常高 温に対する保護装置,入力の電圧計,電流計および電力 計,温度指示計などよりなっている。

能なること。

なお、使用導管の材質および寸法は、NaKに対する安 全性から定めたものである。

4. 実験回路

第5図は NaK による実験回路の外観である。NaKの 導入される膨脹タンク,予備タンク,パイプ,バルブな どは、すべて不銹鋼により製作し、組立後は厳密なる気 密試験を行って安全性を確認した。この回路への NaK の出し入れは、すべて不活性ガス He を内部に満たしそ の圧力調整を行って操作した。また、タンクおよびパイ



第5図 NaKによる実験回路

5. 実験結果

第2章にも述べたとおり、電磁ポンプの特性は比較的 簡単な式で表示されるが、その式を構成する諸要素はか なり複雑な内容をもっており、すべてを理論的に解明す ることは困難である。たとえば、*Ref*および *RB*は、液 体金属と電極固体金属との界面の接触抵抗および電極部 の電流分布、磁束分布などの影響を包含しており、流体 圧力損失および過電流損失は、特殊な管路や電極部の形 状に関係している。これらの点に関しては、筆著らは、 電磁ポンプの試作に先だって基礎実験を行い、この結果 を本電磁ポンプの設計に役だてた。

ここでは、本電磁ポンプの総合特性の実験検討結果の 概略を述べることとする。

第7図は、250°CのNaKにおける流量圧力特性を入力 電圧をパラメータとして示したものであり、実線は実測 結果、点線は計算結果を示す。これより電磁ポンプの特 性はかなり正確に算定できることがわかる。流量による 圧力の低下は、主として(6)式のQを含む項すなわち、 磁束と流量より生ずる内部誘起電圧に基くもので、これ に流体圧力損失 P_i によるものおよび電機子反作用によ るものが付加される。いま入力電圧220V、流量25G. P.M.の場合におけるこれらの概略値を求めてみると、内 部誘起電圧に基くもの10 P.S. I., P_i によるもの3.5 P.

45

日



に比してかなり低い値を示す。

論

第8図は, 250°Cの NaK における流量効率特性を入 力電圧をパラメータとして示したものであり,実線は実 測値,点線は計算値を示す。実測による最大効率は7.6% であり,これは,出力に比し入力損失がはるかに大なる ことを示す。かように一般の電気機械に比して効率が低 いのは, 大電流を通ずる液体金属自体がかなり大きい電 気抵抗を有し,かつパイプとして用いうる金属の種類と 肉厚が安全性の面から限定されここにも大電流が流れる ことに主たる原因がある。いま,入力電圧 220V,流量 25 G.P.M.における入力損失の内容を当ってみると、液 体金属内および管壁内で消費される抵抗損 50%, 電極導 体および熔接部で消費される抵抗損 24%, 電極部の過電 流損 11.5%, 巻線の抵抗損 7.5%, 磁極および変流器の鉄 損7%の割合で配分されている。これより、液体金属と して Na などの電気抵抗小なるものを用い,管厚を小と すれば入力損失はかなり減ずることがわかる。さらにこ れらの影響は,出力を増大させるので,飛躍的に効率を 高めることとなる。また, 直流を採用すれば, 前記の電 極過電流損および鉄損がなくなるからこれも効率を高め ることとなる。

第9図は、入力電圧 220V とし、温度をパラメータと



S.I., 電機子反作用によるもの3P.S.I.の割合となって いる。内部誘起電圧は磁束密度に比例して増大するもの であり,これは圧力降下を促進するから,本電磁ポンプ においては,磁束密度を高めることが必ずしも性能を高 めるゆえんとはならず,最適磁束密度はほかの電気機械 した流量圧力特性の測定結果である。温度を低下すると 液体金属の電気抵抗が小となって、(6)式からもわかる ように,内部誘起電圧の圧力降下に及ぼす影響が増加し, 液体金属の粘性係数が大となるので,流体圧力損失が増



第9図 流量圧力特性の温度による変化



46





加する。よって,低温になると,上述の両者の影響から, 曲線の勾配は大きくなっている。

第10図は,入力電圧 220V とし,温度をパラメータと した流量効率特性の測定結果である。温度が低下すると 各部の電気抵抗が低下し,入力損失は減ずるが,上述し たように圧力降下が大となるので出力が多少減じ,結局 さほど大きな効率の変化は見られない。第10図より認 められる一つの傾向は,温度が低下すると最大効率を示 す点が流量の小なる方向に移動していることである。こ れは,上述したように,温度が低くなるにつれて圧力降 下が大となっているため,流量と圧力との積で示される 出力の最大値が,温度の低下につれて流量小なる方向に 移動するためである。よって逆に,最大効率の点を流量 大なる方向に移動させるには,圧力降下を減ずればよ く,その一つの手段は磁束を減じ電流を増すことであ る。

6. 結 言

以上,今回試作した交流ファラデー形電磁ポンプに関 して略述したが,この試作研究を通じて,その諸特性が 解明され,製品化の態勢が確立された。

本電磁ポンプは, 危険な液体金属に対しても, きわめ て安全かつ便利に操作しうる長所を有するもので, 実験 室的な用途そのほか比較的小量の液体金属を扱う場合に 適したものである。

大容量のファラデー形電磁ポンプとしては,効率のよい直流形が採用されるのが普通であるが,直流形であってもファラデー形電磁ポンプの基本的 問題点は同一のものであり,本試作により得られた結果 は,直流形の設計に対しても役だつものと信ずる。

終りにのぞみ,本研究の促進のため原子力平和利用補 助金を賜わり多大の御後援をいただいた科学技術庁原子 力局の各位に対し深く感謝の意を表する。また本研究に 対し御指導,御鞭撻を賜わった日立製作所日立研究所所 長三浦倫義博士,ならびに実験に協力された石崎,神田 両氏に対し衷心より感謝する。

参考文献

- (1) Liquid Metal Hand Book 288 (1955)
- (2) D.A. Watt: Engineering 27 264 Apr. (1956)
- (3) L. R. Blake: P. I. E. E 104 61(1957)
- (4) A. H. Barnes: Nucleonics 11 16(1953)

4	Vol. 2	1		日		立		1. N. 15		No. 4	5	
					目	次						1.4
◎夫権拡張			······	奥野信	言太郎	◎日	立.ハイ	ライト「	パッケ	・-ジ型=	-7-:	マン
◎日 立.	ギ	ヤモ		٢	N	デ	イショ	ナー」				
◎実 感	を	もる	テ	ν	Ł	◎電	気	釜を	使	った	料	理
◎高 速	竪 形	圧 縮	機の	活	躍	◎砂	利 採	取船 1	こ使う	われる	ポン	プ
◎最 近	の	電 気	機	関	車	<u>۞</u> ٧	ギ	メの	tr tr	いテ	-	プ
◎明日への	道標「1	日に 70	万m ³ を注	送るナ	ゲス	◎鋼	の	真 2	岂 鋇	身 造	設	催
圧送装置	_					◎動	<	無	人	変	電	所
© ⊞	述.	だ	よ		ŋ	◎新	l	<i>ر</i> ۲	照	明	施	設
			誌	代	1 ∰	¥ 60 (*	F 16)					
発 行 所	日 立	評調	侖 社	東	京都千	代田区丸ノ	内1丁	目4番出	也振	替口座東	京 7182	24番
取 次 店	株式会社	仕オーム	社書店	東	京都千	代田区神田	1錦町3	丁目1番5	也 振	替口座東	京 2001	8番

---- 47 ---