

## 磁束収束型電磁ポンプの液体ナトリウムでの 動作特性と大容量化への構成

In-Sodium Characteristics of a Flux-Concentration-Type Electromagnetic Pump and Configuration for High Capacity

南園崇善・山田外史・岩原正吉・軍司 稔\*・児玉徹彦\*・仲井 悟\*

金沢大学工学部電磁場制御実験施設, 金沢市小立野 2-40-20 (〒920)

\*動燃・核燃料開発事業団・大洗工学センター, 茨城県東茨城郡大洗町成田町 4002 (〒311-13)

T. Minamizono, S. Yamada, M. Iwahara, S. Gunji,\* T. Kodama,\* and S. Nakai\*

Laboratory of Magnetic Field Control and Applications, Faculty of Engineering,  
Kanazawa University, 2-40-20 Kodatsuno, Kanazawa 920

\*Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation, 4002 Narita-cho, O-araimachi, Higashi Ibaraki, Ibaraki 311-13

The electromagnetic pump (EMP) was developed to overcome the capacity and efficiency limitations of previous machines. This paper proposes a flux-concentration-type electromagnetic pump using that the flux-concentration effect, which depends on eddy currents, and discusses the calculated and experimental dynamic characteristics of an in-sodium tests system. According to the experimental results, the maximum flow rate was 520 l/m and the efficiency was over 10%. The calculated results estimate that the pressure of the new EMP is 1.7 times more than that of a conventional one. A new configuration of the EMP is proposed to increase the capacity of the flow rate, and its dynamic characteristics are discussed.

**Key words:** electromagnetic pump, flux concentration, eddy current, sodium, fast breeder reactor

### 1. ま え が き

高速増殖炉 (FBR: Fast Breeder Reactor) の冷却系における冷却材には液体ナトリウムが使用されているが, この主循環ポンプには機械式ポンプが用いられ, 補助系小容量ポンプは電磁ポンプとなっている<sup>1)</sup>. 液体ナトリウムは化学的に非常に活性であるために, 高い信頼性が要求される. その点において, 電磁ポンプは可動部がなく密閉状態で液体金属を輸送できるため極めて信頼性が高く, 有効である. しかしながら機械式ポンプと比べた場合に, 電磁ポンプは大容量の実績がないことから, 補助系における使用のみにとどまっている<sup>2)</sup>.

電磁ポンプの主循環大容量ポンプへの適用を目的とし, 筆者らはこれまでに, 従来のアニュラリニア型誘導電磁ポンプ (ALIP: Annular-Linear Type Induction Electromagnetic Pump) のスロットの間に導体板を挿入した磁束収束型電磁ポンプを製作し, その研究を行ってきた<sup>3)</sup>. 電磁ポンプの動作は磁界中におかれた導体に電流を通電させることにより発生する電磁力を用いているので, 液体金属の性質によりその特性が大きく影響されると考えられる. そのため実際にナトリウムを流すことにより, これまでの検討結果との比較を行った. また, 本電磁ポンプの大容量化を目指し提案した二重励磁構造磁束収束型電磁ポンプの実験結果について検討した.

### 2. 磁束収束型電磁ポンプの構成

Fig. 1 に磁束収束型電磁ポンプの概観図を示す. ALIP との構造的な違いは, スロットの間に銅製の導体板を挿入した点のみである. Fig. 2 に示すようにコイルに励磁電流  $i$  を印加するとそのループ内に交流磁束  $\phi$  が発生する. この時, 導体板中には渦電流  $i_e$  が誘導され, この磁束  $\phi$  を打ち消そうとする磁束  $\phi_e$  が発生する. この現象を磁束遮蔽効果という. また導体板にはホール中心部から半径方向にスリットが設けられているため, 渦電流はコイルの励磁電流と同方向に流れ, ホール中心部の磁束を高めることができる. この現象を磁束収束作用と呼ぶ. このように磁束収束型電磁ポンプは, この二つの現象により ALIP と比べその特性を大幅に向上させることができる.

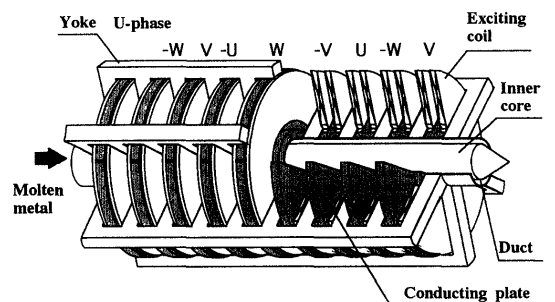


Fig. 1 Flux-concentration-type electromagnetic pump.

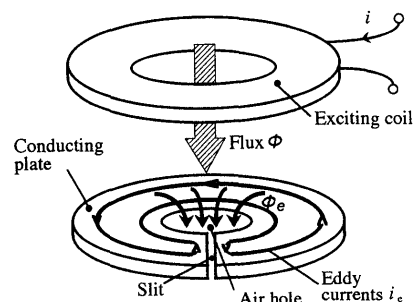
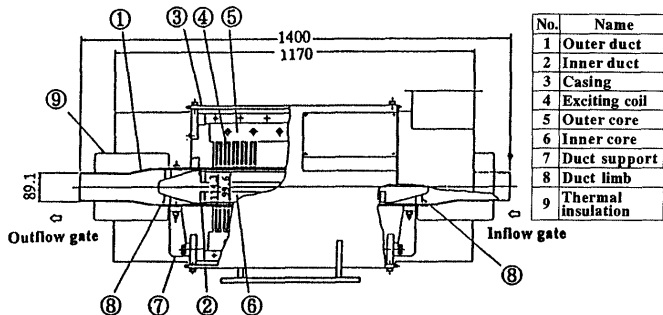


Fig. 2 Flux-concentration and flux-shielding effects.

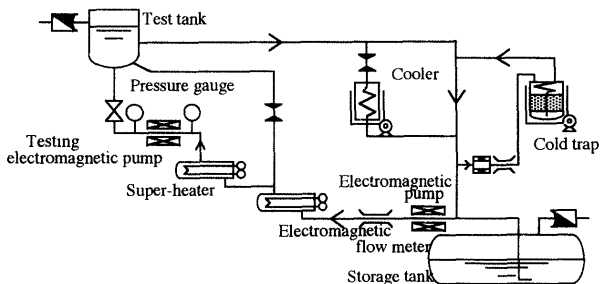
**Table 1** Physical properties of U-alloy 47, sodium, and water

	U-alloy 47	Sodium	Water
Melting point [°C]	46.7	97.82	0
Boiling point [°C]	.....	881.4	100
Density [g/cm <sup>3</sup> ]	8.8 (25°C)	0.927(M-p)	0.998 (20°C)
Viscosity [mPa·s]	2.74 (60°C)	0.68 (100°C)	1.002 (20°C)
Conductivity [S/m]	$2.31 \times 10^6$ (200°C)	$7.4 \times 10^6$ (200°C)	.....
Specific heat [Ca/g·°C]	0.035 (60°C)	0.331(M-p)	1.003 (25°C)

M-p = Melting point



**Fig. 3** Flux-concentration-type EMP (OND-1000 type).

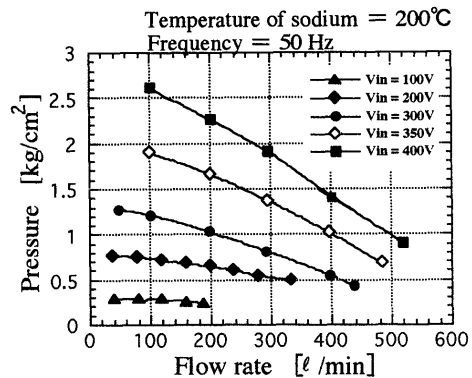


**Fig. 4** System diagram of a sodium-testing loop.

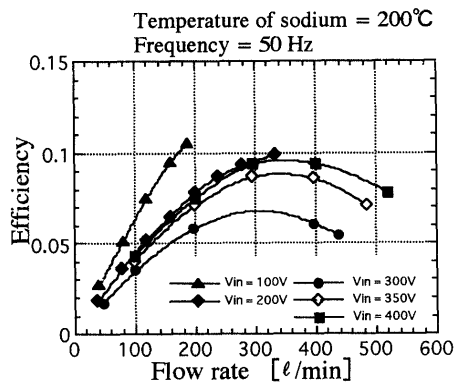
### 3. 磁束収束型電磁ポンプの動作特性

#### 3.1 液体ナトリウムを用いたモデル装置の実験

本研究室では、これまでに取り扱いの容易さから実験室レベルの装置において、低融点液体金属である U アロイ 47 を用いた磁束収束型電磁ポンプの実験、ならびに有限要素法を用いた解析によりその特性検討を行ってきた<sup>4), 5)</sup>。Table 1 に U アロイ 47 と液体ナトリウムと軽水の物理的性質を示す。スズと鉛の合金である U アロイ 47 はナトリウムと比べた場合、比重、粘性度が大きく、導電率も小さな金属であるため、摩擦損失、および電氣的な影響などによりその特性も変わってくるものと考えられる。そこで今回、ナトリウム浸漬用磁束収束型電磁ポンプ (OND-1000 型) を製作し、実験を行った。Fig. 3 はその概観図である。なおスロットは 18 個から構成されており、その間に 2 枚の並列コイルと導体板が挿入されており、励磁方法は三相電源により 6 個のスロット中のコイルで 2 極を構成している。また Fig. 4 に実験に用いたナトリウムの系統図を示す。測定方法は、まずナトリウム温度を所定温度に設定し、電磁ポンプの印加電圧を一定の状況でループのポンプ吐出口のバルブの開度調整により流量を変化させながら吐出圧を測定し



**Fig. 5** Pressure vs. flow rate characteristics.



**Fig. 6** Efficiency vs. flow rate characteristics.

た。圧力計は渦電流式のもの、流量計は永久磁石式電磁流量計を使用している。Fig. 5 は電圧を 50~400 V に変化した時の吐出圧に対する流量特性を示したものである。なお電圧 100 V 以下のデータは圧力計の測定誤差が大きいと考えられるので参考値となっている。この結果より、電圧 400 V 時ににおいて最大流量 519 l/min が得られた。また流量の増加による吐出圧の低下がみられ、電圧が大きくなるに従いその低下が大きくなっているが、これは速度起電力によるものと思われる。ナトリウムは U アロイ と比べた場合比重、粘性度などが小さいことから、摩擦損失などによる吐出圧の低下は小さいと思われる。Fig. 6 はこのポンプの効率特性であるが、実験室レベルにおける効率が 0.25% 程度であるのに比べ最大で 10% 程度となっている。

#### 3.2 有限要素法を用いた解析による特性検討

これまで液体金属がナトリウムの場合には、有限要素法を用いた解析によりその特性を検討してきたが、その有効性を確認するために今回得られた測定値との比較を行った。解析モデルを Fig. 7 に示す。なお解析モデルでは解析の簡素化を図るために周期境界条件を適用し 1 極ピッチ分をモデリングした。Fig. 8 にその結果を示す。この図から解析値が測定値とほぼ同じ特性となっているのがわかる。この結果から、解析によりその特性をある程度検討できることが確認できた。ただ流量の増加による圧力の低下に対する傾きに関して測定値の方が大きくなっているが、これは解析においては摩擦損失などを考慮に入っていないからであり、その分が特性に現れたと考えられる。また、Fig. 9 にこの解析を用いて ALIP との比較を行った結果を示

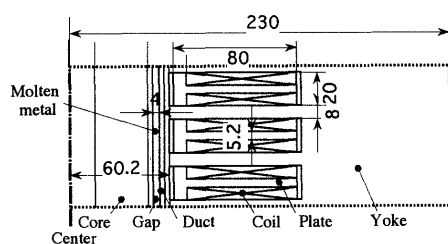


Fig. 7 3D axisymmetric model for calculation.

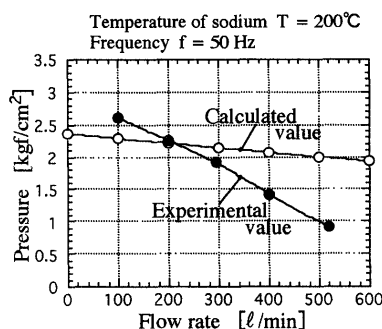


Fig. 8 Pressure vs. flow rate characteristics.

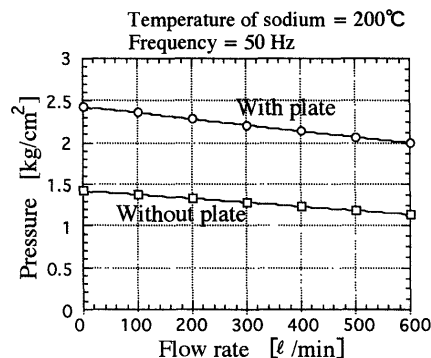


Fig. 9 Pressure vs. flow rate characteristics (calculated values).

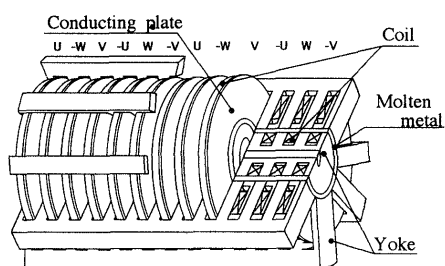


Fig. 10 Flux-concentration-type EMP with double excitation.

す。この結果から、磁束収束型電磁ポンプはALIP に対し全流量において 1.7 倍以上の吐出圧が得られており、その有効性が確認できる。

#### 4. 二重励磁構造磁束収束型電磁ポンプの動作特性

##### 4.1 二重励磁構造磁束収束型電磁ポンプ

これまで電磁ポンプの大容量化を図るために研究を進めてきた磁束収束型電磁ポンプは、さきほどの結果からも ALIP に対し特性の向上が確認できた。今回はこの電磁ポンプの大容量化を目的として二重励磁構造をもつ磁束収束型電磁ポンプを提案しその有効性を検討した。Fig. 10 にその概観図を示す。Fig. 5 から分かるように電磁ポンプは液体金属の流速が増加すると吐出圧は速度起電力、および摩擦損失などにより低下する。そのため低流速、低摩擦損失での運転が必要となってくる。この解決策として液体金属が流れるギャップの長さを広げる方法が考えられるが、この場合、ギャップ中での漏れ磁束が増加してしまい吐出圧が減少することが考えられる。そこで我々はダクトの内径を広げることでギャップの断面積を大きくし、電磁ポンプの流量の増加を試みた。この時、ダクトの内側には空間が生じることになる。そこでこの部分に励磁コイルを配置した。このことで大型化に伴うギャップ中での漏れ磁束の増加が抑えられると考えられる<sup>6)</sup>。

##### 4.2 有限要素法を用いた解析による検討

内側の励磁コイルの有効性を検討するために、有限要素法を用いた解析を行った。なお外側励磁コイルの巻数は 44 turns、内側の励磁コイルの巻数は 21 turns としてある。Fig. 11 は液体金属の導電率  $\sigma = 2.96 \times 10^7$  S/m とした時の磁束分布の変化の様子を示したもののだが、内側に励磁コイルを持たないモデル

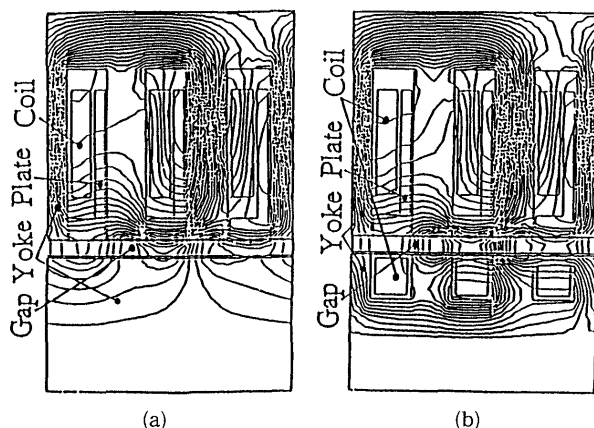


Fig. 11 Flux distribution: (a) with one excitation; (b) with double excitations.

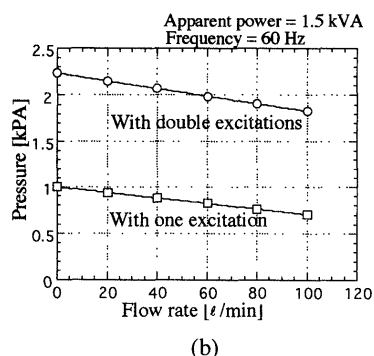
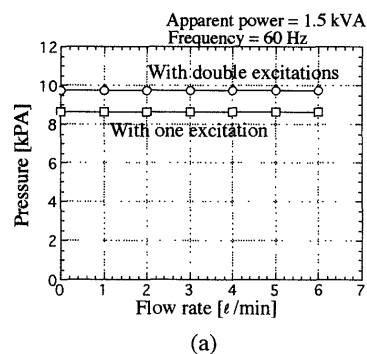


Fig. 12 Pressure vs. flow rate characteristics: (a) conductivity of U-alloy  $= 2.31 \times 10^6$  S/m; (b) conductivity of sodium  $= 2.96 \times 10^7$  S/m.

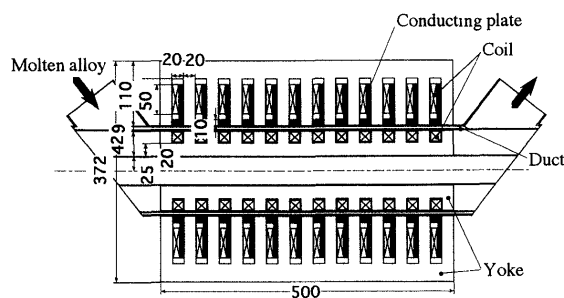


Fig. 13 Test model flux-concentration-type EMP with double excitation.

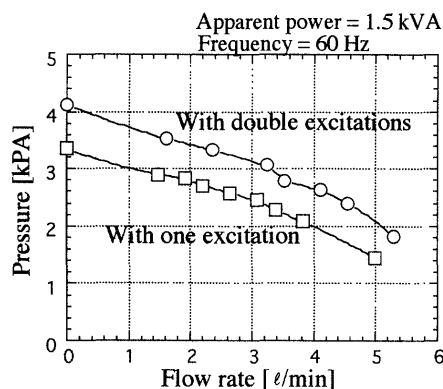


Fig. 14 Pressure vs. flow rate characteristics (experimental values).

において漏れていた磁極歯頭付近の磁束を、二重励磁構造をもつモデルではギャップ中に引き込んでいるのが確認できる。次に液体金属がUアロイ、ナトリウムの場合それぞれにおける吐出圧に対する流量特性の解析結果を Fig. 12 に示す。この結果から、液体金属Uアロイの場合には内側に励磁コイルをもつモデルの吐出圧が1.1倍程度なのに対し導電率の大きなナトリウムを用いた場合には2倍以上の吐出圧が得られることが確認できる。これは低い導電率の場合、液体金属中の誘導電流による磁束遮蔽効果によりギャップを鎖交せずに漏れる磁束の量が、高い導電率の場合に比べ小さいためであると思われる。したがって、内側の励磁コイルによる漏れ磁束の引き込みがそれほどなく、違いが現れなかったと思われる。

この結果から二重励磁構造を持つモデルは、液体金属の導電率が大きな場合ほど、ギャップを磁束が鎖交しにくい場合ほどこれまでのモデルに比べ有効な構造であることが分かる。

#### 4.3 実験結果

今回、実際に Fig. 10 に示した二重励磁構造をもつ磁束収束型電磁ポンプを製作し実験を行った。Fig. 13 は製作した二重

励磁構造磁束収束型電磁ポンプの断面図であり、前記の解析モデルを4個並べた構成になっている。この装置を用いて内側励磁コイルの有無に関する推力特性を求めた。Fig. 14 がその結果であり、皮相電力を1.5 kVA一定とし、周波数が60 Hzとしてある。この結果から内側に励磁コイルを持たないモデルに比べ全流量において1.2倍程度の吐出圧が得られているのが分かる。これは今回の実験では液体金属にUアロイを用いているためであり、さきほどの解析結果からも分かるように液体金属にナトリウムを用いれば、2倍以上の吐出圧が得られるものと思われる。

#### 5. ま と め

今回、実際に液体金属にナトリウムを用いての実験を行った。その結果、磁束収束型電磁ポンプのALIPに対する有効性が確認できた。また、これまで行ってきた有限要素法を用いた解析による検討が有効であることも今回確認できたが、ただ摩擦損失などに関しては考慮に入れておく必要がある。

また、さらなる流量の増加を試み今回、二重励磁構造をもつ磁束収束型電磁ポンプを提案し、その解析ならびに実験を行った結果、内側の励磁コイルは液体金属の大きな、磁束がギャップを鎖交しにくいモデルにおいて、極めて有効な構造であることが確認できた。今後も、液体金属にUアロイを用いて実験を行っていくが、この点に関しては解析とともにを行い、その有効性を検討していく必要がある。

付 記 本研究の一部は平成8年度、文部省科学研究費（基盤研究(B)(2)試験07666089)によるものであることを付記する。

#### 文 献

- 堀 雅夫：基礎高速炉工学，基礎高速炉工学委員会編，p. 224（日刊工業新聞社，東京，1993）。
- 南波正直，向田秀敏，田口淳三，宮原満行，宮城卓穂：東芝レビュー，**32**, 314 (1977)。
- 山田外史，津山和信，白石良一，岩原正吉，別所一夫：日本応用磁気学会誌，**19**, 517 (1995)。
- 山崎 保，間々田 宏，後藤誠司，山田外史，岩原正吉：電気関係学会北陸支部連合大会，**A-52**, 66 (1993)。
- 間々田 宏，津山和信，白石良一，山田外史，岩原正吉：日本AEM学会誌，**B22-3**, 43 (1994)。
- 白石良一，南園崇善，山田外史，岩原正吉：電気学会マグネティックス研究会資料，MAG-96-1 (1996)。

1996年10月14日受理，1996年12月3日採録