

富士ナトリウム電磁流量計

Fuji Electromagnetic Flowmeters for Liquid Sodium

矢 田 悠*
Hisashi Yada

I. ま え が き

原子力発電の経済性の向上と核燃料物質の有効利用を図るためにナショナルプロジェクトの一つとして動力炉・核燃料開発事業団を中心として、高速増殖炉の開発が推進されている。この高速増殖炉には冷却材に金属ナトリウムが使用されることになっている。ナトリウム流量計としては種々の測定方式があるが、ここに当社におけるナトリウム電磁流量計の概要を紹介する。

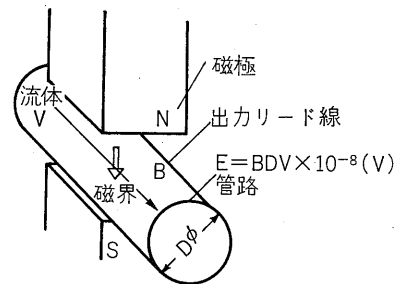
ナトリウム電磁流量計には 1) その原理が明確であり出力電圧が流量に対してほぼ直線であること、2) 構造がきわめて簡単で流路になんらの障害物・可動部がなく、液体ナトリウム計測のポイントである管路の閉塞が起り難い構造であること、3) 高温用が比較的容易に実現できることなどの特長があり、高速炉の主流量計、ナトリウム技術開発を目的とした試験ループ流量計として賞用されており、高速炉の高エネルギー安全運転・設計計算の確認などの観点からきわめて重要視される炉内計装流量計の開発研究が試みられている⁽¹⁾。

当社は 43 年度原子力平和利用研究費補助金の交付を得て、ナトリウム計測器開発研究の一環として、炉内計装流量計の試験研究を実施し、ひきつづいて 43 年度動力炉・核燃料開発事業団より委託研究を受託し、炉内計装流量計用永久磁石の高温下における特性の調査を目的とし、劣化試験を行ない検出器の一次試作をした。現在この炉内計装流量計の開発研究を継続中である。

また別記の電磁ポンプと同じく動力炉・核燃料事業団大洗事業所に設置される定格流量 2.5 l/min から 100 l/min の各種ナトリウムループ流量計をわが国最初の製品として合計 13 台製作納入した。

II. 電磁流量計の原理

この流量計の原理はファラディの誘導則に基づいている。すなわち磁界中を運動する物体には、磁界の方向と運動方向のいずれにも垂直な方向へ誘起電圧が生じる。第 1 図において磁束密度 B (ガウス) のある内径 D (cm) の管路にナトリウムが平均流速 V (cm/sec) が流れると誘起電圧 E は



第 1 図 測 定 原 理

Fig. 1. Principle of magnetic flowmeter

$$E = KBDV \times 10^5 (\text{mV}) \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここに K は理想的出力に対するずれを表わす補正係数であり、管壁効果補正 (K_1), 磁場の端部効果補正 (K_2), マグネット温度特性と放射線の影響補正 (K_3), 管路の熱膨張補正 (K_4) などが含まれる。

$$K = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \quad \dots\dots\dots(2)$$

式 (1) から出力電圧 E を測定すれば B が既知であれば流速 V すなわち流量 Q が得られる。

K_1 は管壁の導電度がナトリウムのそれに較べて無視できず、出力が管壁によって短絡され低下する効果を表わすもので次の計算式がある。

$$K_1 = \frac{2 \left(\frac{D}{D_0} \right)}{1 + \left(\frac{D}{D_0} \right)^2 + \frac{\rho_f}{\rho_m} \left\{ 1 - \left(\frac{D}{D_0} \right)^2 \right\}} \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここで D_0 は管外径, ρ_f , ρ_m はそれぞれ流体と管壁の固有抵抗 ($\Omega \text{ cm}$) である。 K_2 は磁界が軸方向において有限であることに基づく補正であり、Michael の補正曲線などが知られている。

この原理を実現する主要部は 1) 励磁部, 2) 管路, 3) 出力リード線で構成される。管路には非磁性で、前述の K_1 を小さくしないために固有抵抗が大きく、かつ耐食性に富んだオーステナイト鋼を用い、内面にはナトリウムと濡れのよい表面処理を施す。リード線は熱起電力をできるだけ回避する目的で管路と同材を使用し、管路に溶接付けする。ナトリウム電磁流量計は直流励磁を行なう。励磁部としては炉内に設置される計装燃料流量計

* 東京工場設計部

ではスペース上の制約のため、円筒状配置の永久磁石が採用されるのに対して、ループ用にはこの制約がなく電磁石あるいは永久磁石によって、最良の磁気配置をとることが可能である。

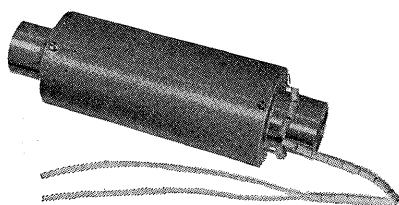
出力は直流低電圧であり使用温度が最高 600℃ と高いので熱起電力などに対して十分な配慮を要するが、出力インピーダンスが低いので計測は比較的容易である。

なおナトリウム中のうず電流のため、実効磁束密度が低下し、口径が大きいつきは出力特性が非直線となる。磁束密度による口径 25cm 以下ではこの効果は無視でき、大口徑でも磁界の中心に対して電極の位置をずらし、校正によって出力特性を確立すればよい。

III. 炉内計装流量計

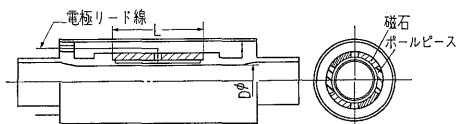
1. モデル試験

43年度原子力平和利用研究費補助金の交付を得て炉内計装流量計開発研究の第一段階として、概要掌握を目的としてモデル流量計を製作し、日本原子力研究所の流量計校正セクションで液体ナトリウムにより校正後、当社ナトリウム試験装置で流量計テストとともに、短期間の連続試験を実施した。



第2図 炉内流量計

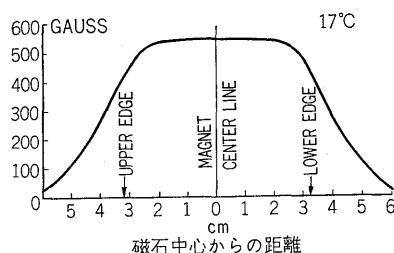
Fig. 2. In-core flowmeter



第3図 主要構造図

Fig. 3. Construction of magnetic flowmeter

流量計の外観写真を第2図、主要構造を第3図に示す。外形寸法は $60\phi\text{mm} \times 200\text{mm}$ 、口径 $D=25\text{mm}$ 、 $L/D=2.6$ である。励磁部は 650℃ 時効処理後 3 回の高温サイクルで安定化処理したアルニコ V 異方性鋳造磁

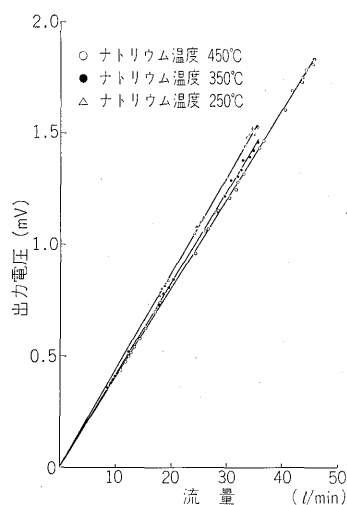


第4図 中心軸上磁束密度分布

Fig. 4. Measured center line air gap flux density

石と酸化防止のためクロームメッキを施した純鉄ポールピースからなる。磁気回路を形成後、磁束密度の温度変化にもとづく非可逆的变化を低減するためにさらに 3 回の熱処理をした。管路は前述の K_1 を低くしないため薄肉 (1mm) SUS27 鋼である。空隙中心部の管軸方向磁束密度分布の室温における測定値例を第4図に示す。電極を含んだ径方向分布についても $\pm 2.5\%$ の均一性が得られる。

流量校正装置・方法の詳細は既に発表されている論旨⁽²⁾にもとづく容積法である。計量タンクから液体ナトリウムを自由落下あるいはガス圧により強制落下させ基準容積が落下する時間とその間の平均出力との比較から校正する。結果の一例を第5図に示す。出力特性は直線である。静止ナトリウムによる零点出力と管路内をアルゴンガスで充満したときの雑起電力出力の差は $10\mu\text{V}$ 以下でありじゅうぶんに少ない。電極リード線の取付が適切であることを示している。補正係数 K の実測値と計算



第5図 流量計校正曲線
Fig. 5. Calibration characteristics of flowmeter

第1表 出力補正係数の比較

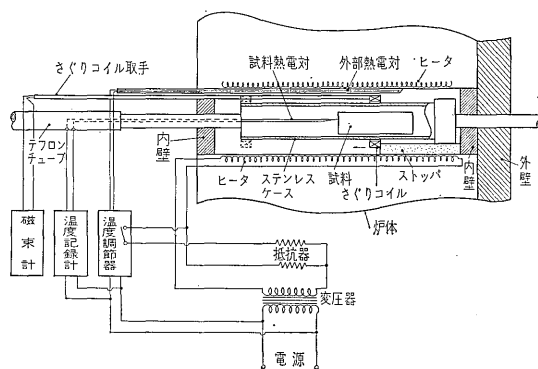
Table 1. Output correction factors

ナトリウム温度 (℃)	実測出力補正係数 K_m			計算出力補正係数 $K_c = K_1 K_2 K_3 K_4$					比率 K_m/K_c
	流量計 I	流量計 II	平均	K_1	K_2	K_3	K_4	K_c	
250	0.912	0.899	0.905	0.984	0.981	0.953	0.996	0.913	0.992
350	0.873	0.875	0.874	0.982	0.981	0.931	0.994	0.891	0.981
450	0.850	0.830	0.840	0.972	0.981	0.896	0.992	0.854	0.984

値の比較を第 1 表に示す。実測値と計算値は約 2% の差で一致している。なお K_2 計算値には棒状磁石の残留磁束密度実測値をあてはめた。また 520℃, 130 時間の連続運転前後の 500℃ における較正では出力変化は認められなかった。

2. 永久磁石熱劣化試験

劣化の低い磁石材質の選定, 処理法の確立のため, 棒状試料により 600℃ における残留磁束密度変化を連続 1,000 時間追求した。アルニコ V, アルニコ VIII の 2 種類, パーマニシス係数 $P=8, 12, 16$ の磁石を時効温度 600℃, 650℃, 700℃ で処理したのち, 約 650℃ から室温へ冷却する熱サイクルで安定化処理したものを加熱劣化させる。試験装置の概要を第 6 図に示す。窒素ガスふんい気炉中に試料と磁束測定さぐりコイルをセットして, 磁束計で鎖交磁束を測る。試験の結果もっとも劣化率が低いのはアルニコ V を 700℃ で時効処理した 3.5% である。つづいて 650℃ 時効アルニコ VIII の劣化率 7% である。アルニコ V は温度の高いとき時効により残留磁束密度が著しく低下し, 700℃ 時効では 650℃ 時効の約半分になるのに対し, アルニコ VIII ではほとんど変化しない。



第 6 図 劣化試験装置

Fig. 6. Testing equipment for magnets

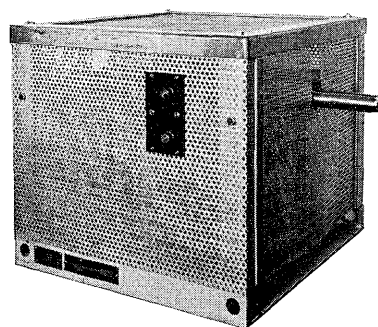
棒状試料とともに I 項でのべた円筒状組立品についても同じ方法により劣化試験をしたが, 継鉄の発錆のため正確なデータが得られていない。

またこの試験と並行してアルゴンガス充てん形ナトリウム浸漬式燃料チャンネル流量計を試作した。

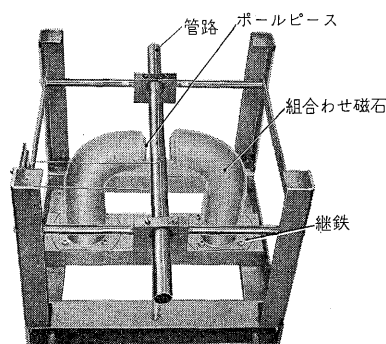
IV. ナトリウムプロセス用流量計

第 7 図 (a) (b) (c) は口径 22.2mm 流量 100 l/min 流量計のそれぞれ, 外観図, 外部保護カバーを取りはずした状態図, 外形寸法図である。異なる定格流量, 7.5, 15, 20, 75, 100 l/min に対しても, これとまったく同一の検出器を用い, 出力側に増幅器あるいは分圧回路を入れて, その定格流量出力を 10mV 統一信号に変換して, 受信計器へ伝送する。本流量計仕様を第 2 表に示す。

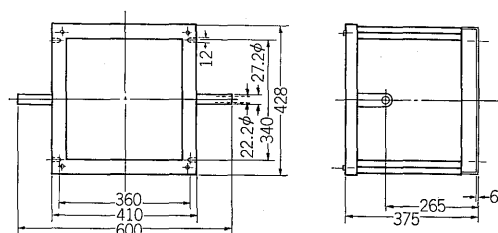
第 7 図 (b) に示すように本流量計は, 高性能永久磁石



(a) 外 観



(b) 保護カバーを取りはずした状態



(c) 外形寸法

第 7 図 ナトリウムプロセス用流量計 (100 l/min)

Fig. 7. 100 l/min flowmeter for liquid sodium loop

第 2 表 口径 22.2mm 流量計仕様

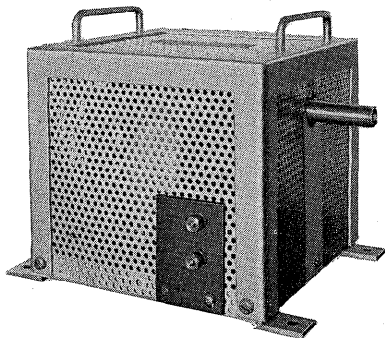
Table 2. Specifications of flowmeter
($I \cdot D = 22.2$ mm)

形 名	FTM-SLA 223	中心磁束密度(ガウス)	3,000
方 式	永久磁石式電磁誘導	エアギャップ (mm)	40
使用流体	溶融ナトリウム	ポールフェース (mm)	40 φ
許容流体温度(℃)	600	出力感度 (mV/l/min)	0.25
許容圧力 (kg/cm ²)	5	外形寸法図	第 7 (c) 図
口 径 (mm)	22.2	重量 (kg)	55

を合理的に配置して堅ろうな構造にまとめ信頼性の高いものとなっている。すなわち可能な限り漏れ磁束を少なくするためエアギャップ部近くに磁石を配置する。磁気性能を有効に発揮させることを目指して 6 分割形にしたアルニコ V 磁石をくの字形のステンレスケース中に納

め、磁石鑄込みボルトで強固に継鉄に固定してある。ボールピースも同じ方法で止める。引抜きステンレス鋼管の管路はナトリウムに接する部分であるから、できるだけ加工を加えないよう配慮してある。管の熱膨張による移動で出力特性変化が起こらないように一方の支持部で固定する。全体、特に磁石部の熱輻射を軽減するため銀色塗装を施す。

上記流量計7台のナトリウム温度400℃における流量較正結果から求めた補正係数の平均値は $\bar{K}_m=0.862$ 、標準偏差は $S=0.0216$ 、補正係数の平均値の95%信頼範囲は $\bar{K}_m \pm 0.0216$ である。式(3)からえた K_1 は $K_1=0.942$ 、Michaelの曲線から $K_2=0.925$ 、磁石部の温度上昇は20~30℃程度であるから $K_3=1$ とすると、設計補正係数 $K_c=0.870$ である。設計値は実測値の平均値の95%



第8図 ナトリウム電磁流量計(15 l/min)

Fig.8. Electromagnetic flowmeter for liquid sodium (15 l/min)

信頼区間内にはいっている。しかしながら他口径のものでこの関係が成立するかどうかは速断を許さない。出力特性は直線である。

第8図に小口径流量計の外観を示す(口径15mmおよび13.3mm)。詳細は割愛するが、今までのべたものと同じ考え方に沿ったものである。定格流量は2.5, 3, 15 l/minである。

V. む す び

(1) 炉内流量計については主として当社における成果の概要を報告した。使用条件がきわめて過酷であり、熱安定性のすぐれた磁界形成法の確立をはじめ、性能限界の掌握、放射線照射の影響、取付上の問題など解決すべき点が多い。

(2) 合理的磁気構造で信頼性の高い小口径プロセス用流量計を完成し良好な結果を得た。

最後に、開発に当たり多大のご指導を頂いた動力炉・核燃料事業団、流量計較正の実施を初め貴重な経験を種々ご教示頂いた日本原子力研究所ならびに川崎重工業、磁石の製造などご援助をたまわった三菱製鋼に本誌面をかりて厚く謝意を表する次第である。

参考文献

- (1) Popper et al; The Design and Performance of A 1200 °F Magnetic Flowmeter for In-Core Application in Sodium-Cooled Reactor, IEEE Trans. Feb (1967)
- (2) 古川和男ほか：液体ナトリウム較正ループの製作と実験結果 JAERI-memo-2973 (1968)

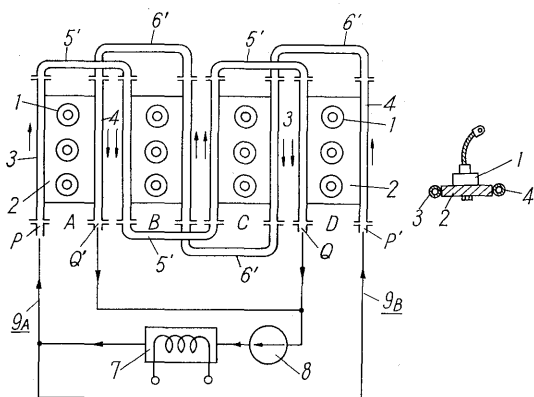
発明の紹介

液冷式半導体整流装置

(実用新案登録第 869894 号)

この考案は複数の半導体整流素子を均一な条件で冷却させ全体の温度分布を平均化するもので、半導体整流素子1と冷却体2とにより一構成単位を形成し、複数単位A~Dが並置されて半導体整流装置を構成している。冷却体2の両側には冷却液パイプ3, 4が設けられ、各単位のパイプ3同志、パイプ4同志を同方向に連結管5', 6'により直列に連結すると共に、パイプ3の群とパイプ4の群はその液体入口、とも出口端P, QおよびP', Q'を各独立的に構成する。すなわちパイプ3の群では単位A側を入口端Pとし、パイプ4の群では単位D側を入口端P'と定め、それぞれが冷却器7、ポンプ8を共通として液体流出側に各入口端P, P'を並列連結し、流入側に各出口端Q~Q'を並列に連結させて並列循環系路9A, 9Bを形成する。

この考案によれば、各単位A~Dにおけるパイプ3, 4の冷却液体の流通方向は逆であり、しかも全体とし



て各単位の冷却の度合は各単位のパイプ3, 4を流れる液体温度の平均値に比例するから、各単位はそれぞれ均一に冷却され、平均した温度分布を示し、利用率のよい液冷式半導体整流装置が得られる。



＊本誌に記載されている会社名および製品名は，それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。