

富士ナトリウム電磁ポンプ

Fuji Electromagnetic Pumps for Liquid Sodium

秋 山 茂*
Shigeru Akiyama

小野寺 慶一*
Keiichi Onodera

新 藤 義 彦*
Yoshihiko Shindo

I. ま え が き

将来の動力炉といわれ現在国家的規模で開発研究が進められている高速増殖炉は、冷却材として溶融ナトリウムが使用される。ナトリウムは原子炉の冷却材としてすぐれた特長を有しているが、化学的にきわめて活性で、特に水とは激しく反応するのでナトリウム用機器には特別な技術を必要とする。

当社ではナトリウム冷却形高速炉の開発研究の一環として、ナトリウムを移送するファラデー形ナトリウム電磁ポンプのシリーズの開発を行ない製品を川崎重工業に納入した。

これらは動力炉・核燃料開発事業団大洗事業所に設置されるもので、

- (1) ナトリウム技術開発ループ主循環用ポンプ 200 l/min・2 kg/cm²,
 - (2) 同ループ精製用ポンプ 40 l/min・1.5 kg/cm²,
 - (3) 材料試験ループマザループ用ポンプ 50 l/min・2 kg/cm²,
 - (4) 同ループ質量移行ループ用ポンプ 10 l/min・3 kg/cm²,
 - (5) ホットスチールテストループ用ポンプ 6 l/min・2.5 kg/cm²,
- 合計5台である。

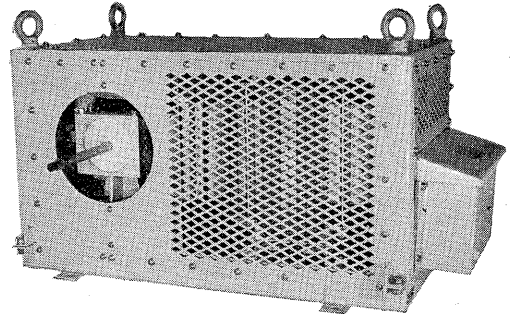
本電磁ポンプは、特に電極部の構造に特長がある。ポンプの最主要部である電極部は、特殊加工によりナトリウムダクトと電極を一体構造にすることによって、従来諸外国の製品などで問題となっていた電極部の電気接触不良の点を完全に除去してあり、耐久信頼性がきわめて高い特長がある（特許出願中）。

川崎重工業納入の前記製品のほか、動力炉・核燃料開発事業団、日本原子力研究所、大学、ならびに製造工業より多数の引合いがあり、この機会に富士ナトリウム電磁ポンプの概要について紹介する。

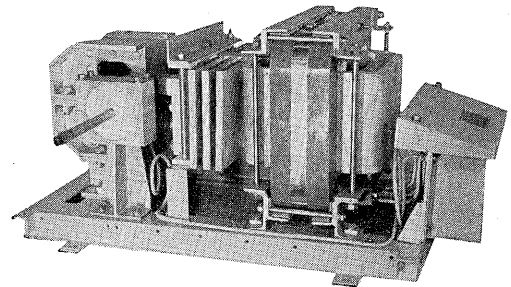
II. 電磁ポンプの原理

1. 動作原理

ファラデー形電磁ポンプの原理図を第2図に示す。非



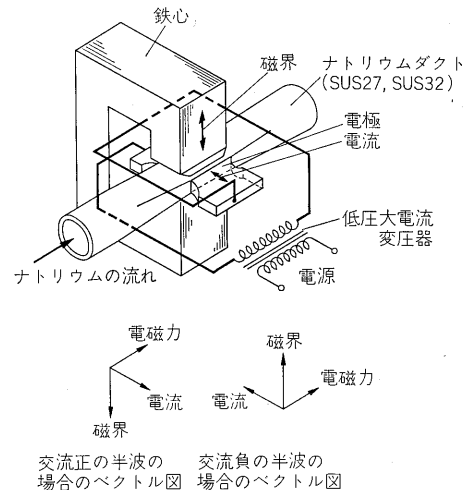
(a) 外 観



(b) 保護フレームを取りはずした内部

第1図 富士ナトリウム電磁ポンプ (50 l/min)

Fig. 1. Fuji electromagnetic pump for liquid sodium (50 l/min)



第2図 原 理 図

Fig. 2. Principle diagram

磁性で電気抵抗率が高く、かつ高温のナトリウム(500～600℃)に対して耐腐食性の強い材料、たとえばステンレス鋼(SUS27・SUS32)などによって作られたナ

* 開発部

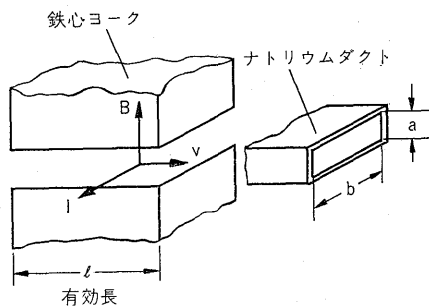
トリウムダクトに電極を設け、電極を通じて溶融ナトリウムに電流を流す。また電流と直角方向に鉄心を置き、電流と直角方向の磁界が加えられる。ナトリウムには電流と磁界の作用により、いわゆるファラデーの法則に従う電磁力が図の矢印方向に発生する。

ナトリウムに流す電流として直流と交流の 2 方式がある。この種の電磁ポンプでは、電流の大きさとして数千～1 万アンペア程度の大電流が必要とされるので、直流方式では大電流の直流電源装置を要し、小容量のポンプ以外は一般に不経済である。これに反して交流方式では低電圧大電流の変圧器を置くことで簡単に大電流が得られるので現在では主に交流方式が実用化されている。

交流方式の場合は電流の極性が半サイクルごとに反転するため、一定の電磁力を得るためには電流の極性に応じて磁界の極性も反転させる必要がある。このために本電磁ポンプでは第 2 図に示すように電極電流を直接鉄心に巻きこむ直巻方式をとっている。このようにすれば磁界は電流の変化に応じ、同位相で変化するので一定方向の電磁力、すなわち一定方向のポンプ圧力が得られる。

2. ポンプ特性と電流・磁界・ダクト寸法の関係

ダクト部の基本寸法を第 3 図に示すとおりとし、電極よりナトリウム中に流れる電流を I (実効値)、電流と直交する磁界を B (最大値) とすると、ナトリウムに作用する電磁力 F は次式で表わされる。



第 3 図 ダクト部基本寸法
Fig. 3. Basic dimensions of duct part

$$F = \frac{1}{\sqrt{2}} I \cdot B \cdot b \quad \dots\dots\dots(1)$$

$\sqrt{2}$: 電流および磁界が正弦波のための係数

b : ダクトの幅, ナトリウム中の電流通路の長さに相当する

ポンプの圧力は上記の電磁力 F がダクトの断面にわり生ずるのでポンプ圧力 P は次式になる。

$$P = \frac{F}{a \cdot b} = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{I \cdot B}{a} \quad \dots\dots\dots(2)$$

a : ダクトの高さ

$a \cdot b$: ダクトの断面積

ダクトの内部のナトリウムの流速を v とすれば、ポ

ンプの流量 Q は、

$$Q = a \cdot b \cdot v \quad \dots\dots\dots(3)$$

ポンプの出力は (圧力) $\times$ (流量) で表わされるので

$$\begin{aligned} P \cdot Q &= \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \frac{I \cdot B}{a} \right) (a \cdot b \cdot v) \\ &= I \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \cdot B \cdot b \cdot v \right) \\ &= I \cdot V \quad \dots\dots\dots(4) \end{aligned}$$

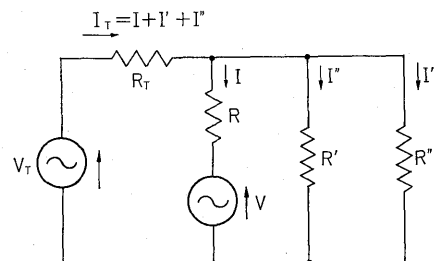
$(1/\sqrt{2}) \cdot B \cdot b \cdot v$ はナトリウム中に誘起される電圧 V (実効値) に相当し、 IV は電気的入力を表わす。電気入力と機械出力の関係が理解できよう (電気抵抗損失などを無視した理論値である)。

ダクトの有効長 l (ダクト長さのうち磁界と交差している部分) は上記の計算式には直接入ってこないが、電極の電流密度の関係から次のように定められる。電極の電流密度は温度上昇の点からある許容値 i_0 以下に押える必要があるため、これよりダクトの有効長 l は次式で定められる。

$$l = \frac{I}{a \cdot i_0} \quad \dots\dots\dots(5)$$

3. ポンプの圧力—流量特性

式(2)によればポンプ圧力 P はナトリウム中に流れる電流に比例する。電流はナトリウム中を流れかつ磁界と交差してポンプ作用にあずかる電流 I のほかに、磁界に交差せずにポンプ作用部の周辺を流れる無効の電流 I' と、ステンレスダクトを通じて流れる電流 I'' が存在する。したがって I' および I'' はなるべく少なくすることが望ましい。ダクト部のほか、接続導体などの抵抗とナトリウム中に誘起される電圧 $V \left(\frac{1}{\sqrt{2}} B \cdot b \cdot v \right)$ を考慮に入れてポンプの等価回路をかくと第 4 図のようになる。



R : ポンプ作用部のナトリウムの抵抗
 R' : ポンプ周辺部のナトリウムの抵抗
 R'' : ダクト部の抵抗
 I_T : ポンプ入力全電流
 V_T : ポンプ入力電圧

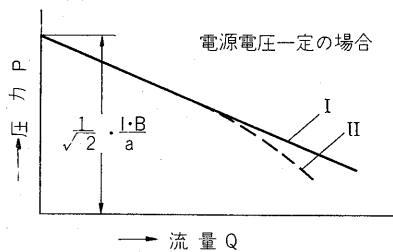
第 4 図 電磁ポンプ等価回路

Fig. 4. Equivalent circuit of electromagnetic pumps

ポンプの電源電圧を一定として、ナトリウム中に流れる有効電流 I はポンプの流量 Q の増加にしたがって、すなわちナトリウムの流速 v の増加にしたがって減少

する。これは等価回路から明らかなように、流速 v が増加するとナトリウム中に誘起される電圧 $V\left(\frac{1}{\sqrt{2}} B \cdot b \cdot v\right)$ が高くなり、このために電極からナトリウム中へ流れポンプ作用にあずかる有効電流 I とポンプ作用にあずからない無効電流 $I' + I''$ との分流比 $\frac{I}{I' + I''}$ が変化し、圧力発生に有効な電流 I が減少するのが主な原因である。

したがって第5図実線Ⅰに示すような流量に応じ圧力が低下するカーブとなる。また流量が増加するに従ってポンプのダクトおよび管部の流体圧力損が流量のほぼ2乗に比例して増加するので、点線Ⅱに示すように流量の大きな所で急速に圧力が下がる傾向を示す。



第5図 ポンプの原理的圧力-流量特性

Fig.5. Typical characteristics of pressure and flow

III. ナトリウムの物性およびステンレス鋼の高温特性

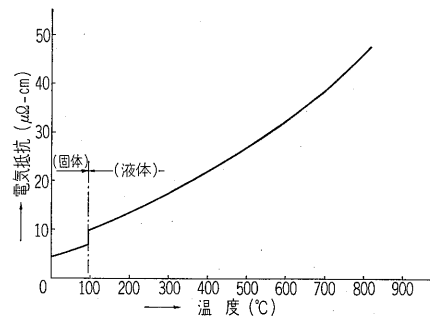
次項で富士電磁ポンプの構造、系列について述べるがその前に高温ナトリウムを取扱う上で必要なナトリウムの物性およびステンレス鋼の高温特性について簡単に述べる。

1. ナトリウムの物性

第1表にナトリウムの物性値を、第6図にナトリウムの温度に対する電気抵抗率を示す。第1表から明らかなように 1) 液体領域の温度が 98~883℃ (常圧) で原子炉の冷却材として適当な領域にある。 2) 熱伝導率が非常に高く常温の水の約 100 倍に達する。また比熱も 0.3 cal/g·deg で比較的大きな値である (水は 1 cal/g·deg)。 3) 比重は 0.83 で水より多少軽い。 4) 粘性係数も小さ

第1表 ナトリウムの物性値
Table 1. Property of sodium

原 子 番 号		11
原 子 量		22.99
融 点 ℃		97.8
沸 点 ℃		882.9
比 重	20℃ 500℃	0.97 0.83
比熱 cal/g·deg℃	500℃	0.30
粘性係数センチポイズ	500℃	0.24
熱伝導率 cal/cm·sec·deg℃	500℃	0.16



第6図 ナトリウムの電気抵抗

Fig.6. Electrical resistivity of sodium

く 0.24 センチポイズ (常温水は 1.0) である。電気抵抗は温度によって変わるが 9.7~46 μΩ-cm (液体) で銅、アルミニウムに次ぐ良好な電気導体である。

化学的には一価元素で、ハロゲン、酸素と激しく作用する。また水素とも化合する。水とは激しく作用して水素を発生し、か性ソーダとなる。

液体ナトリウムを使用するには、配管、ダクトなどの直接ナトリウムと接触する部分の材料の選定が重要であるが、構造材料の面でナトリウムは有利な点が多い。もちろん安易な考え方で使用することはできないが、しかしナトリウムは一般の構造用諸金属元素に比べて原子半径が大きく、電気的陰性度も低いのでこれらとの相互溶解度はきわめて小さく、Fe, Cr, Ni, Co, Mo などと共存できる。また原子炉で必要となる 600℃ 程度の温度には、ステンレス鋼が使用できるので既存技術からの便宜が大きい。

2. ステンレス鋼の高温特性

ナトリウムに対しステンレス鋼は使用に耐えることは 1 項のとおりであるが、適用に当たっては次の因子を充分考慮することが重要である。考慮する因子としては、高温クリープ、高温疲労、熱衝撃、高温腐食などがある。

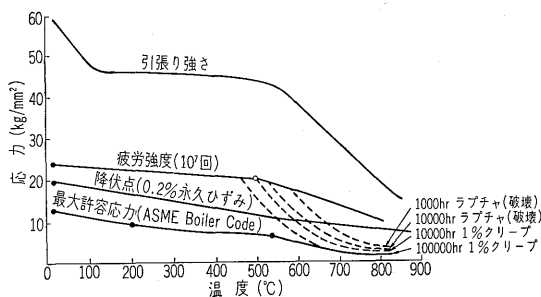
ステンレス鋼には使用目的に応じて多くの種類がある。これを組織上区別すれば、マルテンサイト系、フェライト系、およびオーステナイト系の 3 種類に大別される。非磁性、耐熱性、耐食性および溶接性などの点でオーステナイト鋼がすぐれている。オーステナイト鋼の代表的なものとして、SUS 27, SUS 32 がありポンプダクト部にはこれらを使用している。第2表に SUS 27, SUS 32 の化学成分を示す。第7図は代表的な SUS 27 の温度-強度線図で、機械的応力のほか時間に対する破壊応力 (ラプチャ)、1% のクリープを生ずる応力 (1%クリープ) および ASME Boiler Code の最大許容応力を示してある。

設計に際してはこれらの応力を考慮し、十分な安全率をとって設計することが重要である。熱衝撃に対しては急激な温度こう配が生じた場合、内部応力をにがす構造とする。腐食に対しては金属組織が問題となるので、加

第 2 表 ステンレス鋼の化学成分

Table 2. Chemical composition of stainless steel

鋼種組成	鋼 種		化 学 成 分 %								
	J I S	A I S I	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	
18 Cr-8 Ni	S U S 27	304	0.08 以下	1.00 以下	2.00 以下	0.045 以下	0.030 以下	8.00 ~ 11.00	18.00 ~ 20.00		
18 Cr-12 Ni-Mo	S U S 32	316	0.08 以下	1.00 以下	2.00 以下	0.040 以下	0.030 以下	10.00 ~ 14.00	16.00 ~ 18.00	2.00 ~ 3.00	



第 7 図 SUS 27 の機械的強度と温度の関係

Fig. 7. Relation of mechanical strength and temperature for stainless steel (SUS 27)

工に際して組織の変化を生じないような加工法を採用することが必要である。

IV. 富士電磁ポンプの構造・系列

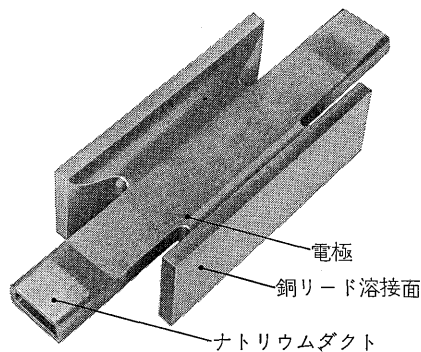
1. 構 造

第 1 図(a)は富士電磁ポンプの外観を、第 1 図(b)は保護フレームを取りはずした状態を示す。本ポンプはループ取付け後においても端子接続その他ポンプの機能に関係なく保護フレームを取りはずせる構造となっている。端子充電部は上部および側面カバーにより特に安全な構造となっている。

第 1 図(b)に示すように本ポンプはポンプ圧力を発生するダクト・鉄心部とこれに低圧大電流を供給するための変圧器部を対向して配置し、その間に高温ダクト部からの熱をしゃ断する冷却フィンをもうける合理的配置によりコンパクトな形にまとめている。

本電磁ポンプの特長を列記すれば次のとおりである。

- 1) 前述したが、ポンプの最主要部である電極部は特殊加工によりナトリウムダクトと電極部は一体構造としたので、従来諸外国の製品などで問題となっていた電極部の電気接触不良の点を完全に除去している。第 8 図はこの一体構造の電極部の写真を示している。ダクトと電極はステンレス鋼の一体ブロックから作られている。銅のリードを溶接する面は、温度および電流の集中する電極の応力を逃げるように充分の距離と広がりをもたせ、しかも電子ビーム溶接による完全溶接を行なっているので、充分安全である。これにより長期



第 8 図 電極部写真

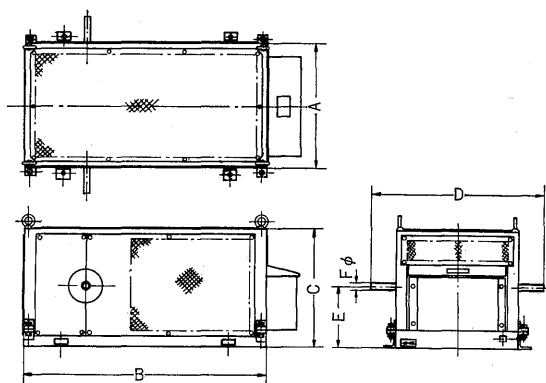
Fig. 8. Outer view of electrode part

の連続運転に対する耐久信頼性がきわめて高い。

- 2) 変圧器の一次コイルには許容温度の高い F 種あるいは H 種の絶縁物を使用しているが、本質的にコイルの温度を下げるために前述したように高温のナトリウムダクト部と変圧器の間に冷却フィンを設けるとともに、変圧器二次コイル（銅板コイル）と一次コイルの間にアルミニウムの薄板製のしゃ熱板を設けることにより、絶縁が問題となる一次コイルの温度を低い値に押えており、絶縁は充分安全である。
- 3) 変圧器は一次コイルと二次コイルを同一鉄心脚に同心巻の配置とし漏れリアクタンスを減少する構造とし

第 3 表 富士電磁ポンプ系列

Table 3. Fuji electromagnetic pumps series



形 式	A C ファラデー		
流 量 (l/min)	200	50(40)	10(6)
揚 程 (kg/cm²)	2	2	3
使 用 流 体	溶融ナトリウム		
許容流体温度 (°C)	600		
許容圧力 (kg/cm²)	5		
電 源	1φ, 200V, 50/60Hz		
入 力 (kVA)	30	5	4
寸 法 (約mm)	A	740	380
	B	1,160	740
	C	640	410
	D	1,040	680
	E	360	240
	Fφ	42.7(1 1/4")	21.7(1 1/2")

たので、低圧大電流を使用するにかかわらず効率のよい電磁ポンプとなっている。

2. 系 列

第3表は開発した富士電磁ポンプの系列および寸法表を示す。

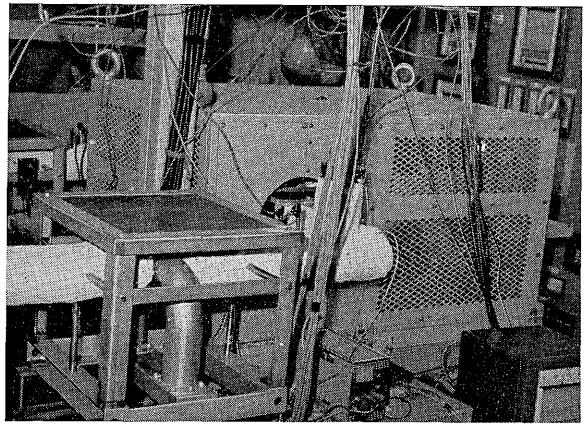
V. 試 験 結 果

各ポンプの試験結果を第9図に示す。試験は当社ナトリウム実験ループならびに日本原子力研究所ナトリウム実験ループにより行なったものである。

第10図は当社ナトリウム試験装置フローシートを示す。電磁ポンプは図に示すように専用のショートループを作り、吸入側および吐出側にナトリウム圧力計を、吐出側に流量計をそなえている。流量設定には吐出側の調整バルブを操作することにより行なう。

第11図はループにおける試験の状況を示す。

なお現在動力炉・核燃料開発事業団より、チャンネル



第11図 実験ループにおける試験状況 (200 l/min)

Fig.11. Test situation on sodium loop (200 l/min)

閉鎖検出系試験装置を受注し製作中であるが、本装置は当社内に設置されこの装置によって1,000 l/min 級の電磁ポンプの試験が可能となる。

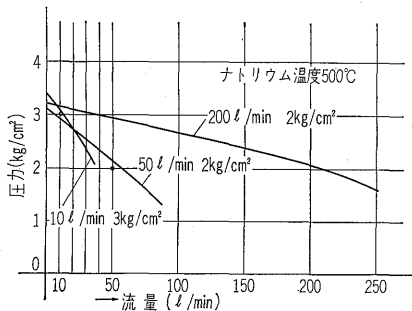
VI. む す び

以上で新しく開発したファラデー形電磁ポンプの説明を終るが、本電磁ポンプは特に耐久信頼性が高い点に特長があり、ご需要各位のご期待にそえるものと考えます。また1,000 l/min 級のリエインダクション形ポンプの開発も進めており、10 l/min から1,000 l/min 級の全シリーズを系列化する計画である。

本開発に当たり動力炉・核燃料開発事業団、実際の使用経験を含めて各種ご教示いただいた日本原子力研究所、ならびに川崎重工業に本誌をかりて厚く謝意を表する次第である。

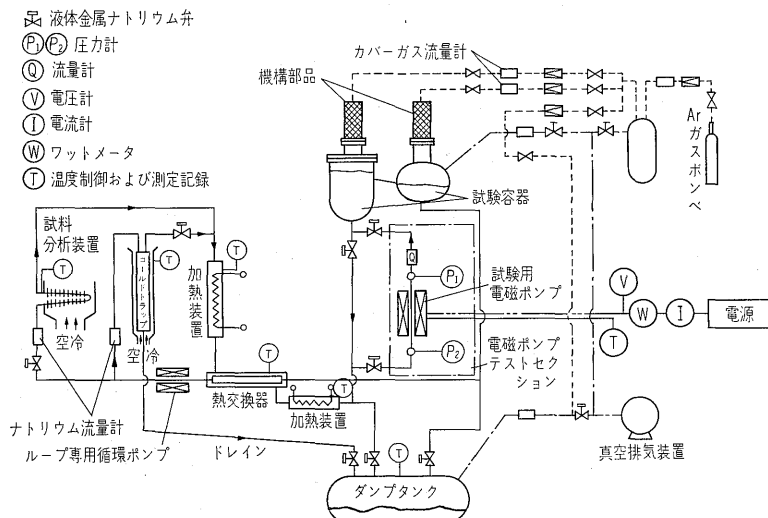
参 考 文 献

- (1) Conduction and Induction Pumps for Liquid Metals, Proceedings I.E.E., Paper No. 2111 U July, 1956 (104 A, p. 49)
- (2) Direct Current Electromagnetic Pumps, Nucleonics, January, 1953.
- (3) 液体ナトリウム技術と高速増殖炉開発新金属 No.48 古川和男
- (4) 高速炉用液体 Na 工学の現況と問題点 日本原子力研究所 古川和男
- (5) 熔融金属の電磁移送 日ソ通信社, エリアヴェルテ
- (6) ステンレス鋼の種類・特性と被削性 応用機械工学 1967 年 1 月号 吉武進也



第9図 圧力-流量特性

Fig.9. Characteristics of Fuji electromagnetic pumps



第10図 ナトリウム試験装置フローシート

Fig.10. Flow sheet of test rig for liquid sodium technology



＊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。