

JAERI-M

84-090

溶融塩磁場化学効果 (II)

(磁場中の溶融塩流における電位分布  
および分極特性)

1984年6月

加藤 義夫・古川 和男\*・大野 英雄  
勝田 博司・恒川 紘吉\*\*

JAERI-M レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の問合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村 日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Section, Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, -Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1984

---

編集兼発行 日本原子力研究所  
印 刷 日立高速印刷株式会社

溶融塩磁場化学効果(II)  
(磁場中の溶融塩流における電位分布および分極特性)

日本原子力研究所東海研究所燃料工学部

加藤 義夫・古川 和男\*・大野 英雄

勝田 博司・恒川 紘吉\*\*

(1984年4月18日受理)

核融合炉ブランケット冷却材として溶融塩を用いた場合、磁場と溶融塩流との相互作用によって誘起する金属配管内の電位 (EMF) の腐食におよぼす影響が問題となる。

本報は、磁場化学効果試験ループを用いて測定した管内電位分布とその解析、誘起電位におよぼす磁束密度と平均塩流速の影響、Ni 電極の磁場中での分極特性等の結果を示すものであり、これらは磁場中での腐食挙動を解明する基礎データとなる。

---

\* 現東海大学開発技術研究所

\*\* 東京工業大学原子炉工学研究所

Magneto-Chemical Effects of Molten Salt (II)

(Potential distributions and polarization characteristics  
in a molten salt flow - magnetic field systems)

Yoshio KATO, Kazuo FURUKAWA\*, Hideo OHNO, Hiroji KATSUTA  
and Kokichi TSUNEKAWA\*\*

Department of fuels and Materials Research, Tokai Research  
Establishment, JAERI.

( Received April 18, 1984 )

Molten salt is one of candidate materials for blanket coolant of plasma-confinement type fusion reactors. However it has not been studied that the effect of a magnetic field on the corrosion behavior of metallic surface in contact with a flowing molten salt. Following basic experiments are reported in this paper: (1) potential distribution in the molten salt flow, (2) effects of magnetic flux density and of average flow rate on the potential, (3) effects of magnetic field on the electro-chemical polarization behavior of a Ni electrode. These experiments were made by using a forced convection molten salt loop. The molten salt in the loop was HTS( $\text{NaNO}_3\text{-KNO}_3\text{-NaNO}_2$ :7-44-49 mole %).

Keywords; Molten Salt, Blanket Coolant, EMF effect, Fusion  
Reactor, Corrosion, Compatibility, Magnetic Field.

---

\* Institute of Research & Development, Tokai University.

\*\* Research Laboratory for Nuclear Reactors, Tokyo Institute  
of Technology.

## 目 次

1. 緒 言 .....	1
2. 基礎理論 .....	1
2.1 基礎方程式 .....	1
2.2 境界条件の検討 .....	2
2.3 基礎方程式の解 .....	4
3. 実験装置 .....	7
3.1 界面分極抵抗の測定 .....	7
3.2 金属円管内電位分布測定部 .....	10
3.3 分極特性測定部 .....	14
4. 流量計の較正 .....	17
5. 実験結果 .....	21
5.1 熔融塩流内部の電位分布 .....	21
5.2 誘起電位におよぼす磁束密度と平均流速の影響 .....	24
5.3 ニッケル電極の分極特性におよぼす磁場の効果 .....	27
6. 結 論 .....	32
謝 辞 .....	32
参考文献 .....	33

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Theory .....	1
2.1 Basic equation .....	1
2.2 Evaluation of the boundary conditions .....	2
2.3 Solutions of the basic equation .....	4
3. Experimental .....	7
3.1 Measurement of the electrochemical polarization resistance ...	7
3.2 Internal potential measuring cell segment of metallic circuler tube .....	10
3.3 Electrochemical polarization measuring cell segment .....	14
4. Calibration of the molten salt flow meter .....	17
5. Results .....	21
5.1 Potential distribution in the molten salt flow .....	21
5.2 Effects of magnetic flux dencity and of average flow rate on the induced potential .....	24
5.3 Effects of magnetic field on the electrochemical polarization behavior of a Ni electrode .....	27
6. Conclusion .....	32
Acknowledgment .....	32
REFERENCES .....	33

## 1. 緒 言

プラズマ閉じ込め型核融合炉のブランケット冷却材に  $\text{Li}_2\text{BeF}_4$  などの熔融塩を用いた場合、強力なプラズマ閉じ込め磁場と、熔融塩流との相互作用によって誘起する電位が、構造材の腐食挙動にどのような影響を及ぼすであろうか。我々はこの問題に対する基礎的知見を得るため熔融塩強制循環ループ（磁場化学効果試験ループ）を設計製作し、実験を進めて来た。本報は現在までに得られた基礎データを整理し検討した結果をまとめたものである。ループ本体の構造および特性については熔融塩磁場化学効果(I)にまとめているので、詳細は略すが実験に使用した塩はHTS ( $\text{NaNO}_3 - \text{KNO}_3 - \text{NaNO}_2 : 7-44-49 \text{ mole } \%$ ) であり、ループ構造材は一部を除いてSUS316である。本報の実験は試験部を含む熔融塩循環部温度を均一化して行った。したがって実際の核融合炉ブランケット冷却材に熔融塩を用いた場合を想定して、熔融塩、構造材、温度分布等をシミュレートしたものではなく、これらに対しても演繹可能な磁場の効果による腐食現象の基礎を理解することを目的としている。本報では実際のループ配管壁（又は腐食試験片）の磁場中での長時間連続腐食試験結果にはふれていない。これは現在実験中であり、その結果は続報で述べる。

## 2. 基礎理論

### 2.1 基礎方程式

我々が今対象としている電磁流体力学の場合の基本方程式系はMaxwellの方程式から導かれる次の方程式系

$$\text{rot } \mathbf{E} = 0 \quad (2.1)$$

$$\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{i} \quad (2.2)$$

$$\text{div } \mathbf{B} = 0 \quad (2.3)$$

および

$$\mathbf{i} = \sigma (\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (2.4)$$

で与えられる。ここに  $\mathbf{E}$  : 電場の強さ,  $\mathbf{H}$  : 磁場の強さ,  $\mathbf{B}$  : 磁束密度,  $\mathbf{i}$  : 電流密度,  $\mathbf{v}$  : 流体の速度,  $\sigma$  : 導電度である。また  $\mathbf{B}$  と  $\mathbf{H}$  のあいだには

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (2.5)$$

の関係がある。ここに  $\mu$  : 透磁率である。式(2.1)～式(2.4)においては  $\mathbf{E}$ ,  $\mathbf{H}$ ,  $\mathbf{B}$  は時間的に一定(定常)であり、流体の中で、変位電流 ( $\partial \mathbf{D} / \partial t$ ) は伝導電流  $\mathbf{i}$  に比較して無視出来ること、流体中での電荷分布も無視出来ること等を前提としている。さらに電流分布を持つ流体に働く Lorentz 力 ( $\mathbf{F} = \mathbf{i} \times \mathbf{B}$ ) の影響も今後無視することとする。

## 1. 緒 言

プラズマ閉じ込め型核融合炉のブランケット冷却材に  $\text{Li}_2\text{BeF}_4$  などの熔融塩を用いた場合、強力なプラズマ閉じ込め磁場と、熔融塩流との相互作用によって誘起する電位が、構造材の腐食挙動にどのような影響を及ぼすであろうか。我々はこの問題に対する基礎的知見を得るため熔融塩強制循環ループ（磁場化学効果試験ループ）を設計製作し、実験を進めて来た。本報は現在までに得られた基礎データを整理し検討した結果をまとめたものである。ループ本体の構造および特性については熔融塩磁場化学効果(I)にまとめているので、詳細は略すが実験に使用した塩はHTS ( $\text{NaNO}_3 - \text{KNO}_3 - \text{NaNO}_2 : 7-44-49 \text{ mole } \%$ ) であり、ループ構造材は一部を除いてSUS316である。本報の実験は試験部を含む熔融塩循環部温度を均一化して行った。したがって実際の核融合炉ブランケット冷却材に熔融塩を用いた場合を想定して、熔融塩、構造材、温度分布等をシミュレートしたものではなく、これらに対しても演繹可能な磁場の効果による腐食現象の基礎を理解することを目的としている。本報では実際のループ配管壁（又は腐食試験片）の磁場中での長時間連続腐食試験結果にはふれていない。これは現在実験中であり、その結果は続報で述べる。

## 2. 基礎理論

### 2.1 基礎方程式

我々が今対象としている電磁流体力学の場合の基本方程式系はMaxwellの方程式から導かれる次の方程式系

$$\text{rot } \mathbf{E} = 0 \quad (2.1)$$

$$\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{i} \quad (2.2)$$

$$\text{div } \mathbf{B} = 0 \quad (2.3)$$

および

$$\mathbf{i} = \sigma (\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (2.4)$$

で与えられる。ここに  $\mathbf{E}$  : 電場の強さ,  $\mathbf{H}$  : 磁場の強さ,  $\mathbf{B}$  : 磁束密度,  $\mathbf{i}$  : 電流密度,  $\mathbf{v}$  : 流体の速度,  $\sigma$  : 導電度である。また  $\mathbf{B}$  と  $\mathbf{H}$  のあいだには

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (2.5)$$

の関係がある。ここに  $\mu$  : 透磁率である。式(2.1)～式(2.4)においては  $\mathbf{E}$ ,  $\mathbf{H}$ ,  $\mathbf{B}$  は時間的に一定(定常)であり、流体の中で、変位電流 ( $\partial \mathbf{D} / \partial t$ ) は伝導電流  $\mathbf{i}$  に比較して無視出来ること、流体中での電荷分布も無視出来ること等を前提としている。さらに電流分布を持つ流体に働く Lorentz 力 ( $\mathbf{F} = \mathbf{i} \times \mathbf{B}$ ) の影響も今後無視することとする。



まず式 (2.1) からスカラーポテンシャル  $\phi$  (電位) をつぎのように定義する。

$$\mathbf{E} = -\text{grad } \phi \quad (2.6)$$

式 (2.2) の発散をとると  $\text{div}(\text{rot } \mathbf{H}) \equiv 0$  であるから

$$\text{div } \mathbf{i} = 0 \quad (2.7)$$

を得る。式 (2.6) を式 (2.4) に代入し、式 (2.7) を適用すると

$$\text{div}[\sigma \text{grad } \phi] = \text{div}[\sigma \mathbf{v} \times \mathbf{B}] \quad (2.8)$$

となる。今  $\sigma$  を場所によらない定数とすれば上式は

$$\begin{aligned} \Delta \phi &= \text{div}(\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \\ &= \mathbf{B} \cdot (\text{rot } \mathbf{v}) - \mathbf{v} \cdot (\text{rot } \mathbf{B}) \end{aligned} \quad (2.9)$$

となるが、流体中に誘起する電流の磁場におよぼす影響は無視出来るものとすれば、式 (2.9) の右辺第 2 項は第 1 項に較べて無視出来、結局流体中のポテンシャルを  $\phi_{ms}$  として

$$\Delta \phi_{ms} = \mathbf{B} \cdot (\text{rot } \mathbf{v}) \quad (2.10)$$

を得る。次に流体を囲む配管壁は静止している、すなわち  $\mathbf{v} = 0$  であるから配管中のポテンシャルを  $\phi_w$  と表すと

$$\Delta \phi_w = 0 \quad (2.11)$$

となる。式 (2.10), (2.11) が系内のポテンシャル即ち電位および電流分布を求めるための基礎方程式である。

## 2.2 境界条件の検討

(2.10) および (2.11) を解き、管内および管壁境界面における電位分布または電流分布を求めるための境界条件について検討する。

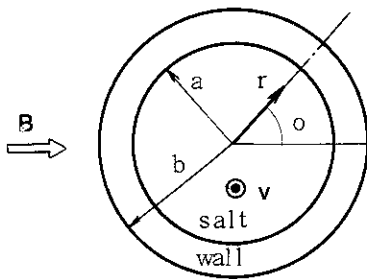


図 2.1 配管断面と座標系

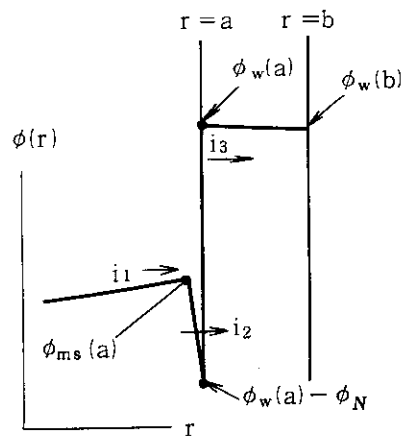


図 2.2 境界面における電位モデル

$$(i_1 = i_2 = i_3)$$

我々が考えている系は図 2.1 に示すように、内径  $a$ 、外径  $b$  の金属配管内を、紙面に垂直な方向に溶融塩が流速  $v$  で流れているものとする。この流れに直交するように空間的に無限に一様

な磁束密度  $B$  が印加されているとする。すなわち磁場の端部効果はないものとする。さらにまた溶融塩流の流速分布は管軸中心に軸対称であると仮定する。従って座標系として円柱座標を用いて解析する。

式 (2.7) により電流  $i$  は  $r = a$  における境界面においても連続でなければならない。ところで金属電極が溶融塩に対してもつ内部電位差 (電極電位) は一般に Nernst の式で表わされ、界面における酸化還元反応に関与する物質の活量に依存する。この Nernst 電位を  $\phi_N$  で表わし、電流  $i$  が流れている状態の、 $r = a$  および  $r = b$  における電位分布を図 2.2 のようにモデル化して考えることにする。

$r = a$  において ( $\mathbf{v} \times \mathbf{B} = 0$ )

$$i_1 = \sigma_m [-\text{grad } \phi_{ms}(r)]_{r=a} \quad (2.12)$$

$$i_2 = \frac{1}{\tau} (\phi_{ms}(a) - \phi_w(a) + \phi_N) \quad (2.13)$$

$$i_3 = \sigma_w [-\text{grad } \phi_w(r)]_{r=a} \quad (2.14)$$

$$i_1 = i_2 = i_3 \quad (2.15)$$

$r = b$  において、管壁外へ流れる電流はないから

$$\sigma_w [-\text{grad } \phi_w(r)]_{r=b} = 0 \quad (2.16)$$

を得る。そこで式 (2.12) ~ 式 (2.16) を境界条件として解を求めることとする。こゝに添字  $ms$  は溶融塩 (molten-salt)、 $w$  は金属壁 (Wall) を表すものとし、また  $\tau$  は界面分極抵抗を表すものとする。ところで境界面を流れる電流と電位の関係を式 (2.13) のような一次の関係で表すことについては電気化学的な検討が必要である。今金属壁を電極とみなすと、式 (2.13) の  $\phi_{ms} - (\phi_w(a) - \phi_N)$  は、電極に電流  $i_2$  が流れることによって、平衡電位  $\phi_w(a) - \phi_N$  からどれだけ分極されたかを示す値でありこれを過電圧 (overpotential) と呼び  $\eta$  で表すこととする。電極界面における電荷移動過程において、今簡単のため次の反応のみが起っているとする。



$R$ 、 $O^{n+}$ 、 $e^-$  はそれぞれ還元体、酸化体、電子である。

この場合の電流密度  $i$  と過電圧  $\eta$  との関係は、バルター・ボルマーの関係式 (Butler-Volmer's equation) と呼ばれる次の式で示される。

$$i = i_0 [\exp(\alpha n F \eta / RT) - \exp\{- (1 - \alpha) n F \eta / RT\}] \quad (2.18)$$

ここに、 $i_0$  : 交換電流密度、 $\alpha$  : 電荷移動係数、 $F$  : ファラデー定数、 $R$  : 気体定数である。式 (2.18) において  $\eta$  の符号はアノード方向の分極、すなわち電極から電解質側へ電流が流れる場合を正とする。式 (2.18) において  $\eta$  が小さい場合には、 $\exp(\pm k \eta) \doteq 1 \pm k \eta$  と近似出来るから

$$i \doteq i_0 (n F / RT) \eta \quad (2.19)$$

となる。式 (2.13) と式 (2.19) を比較すると  $\tau = (i_0 n F / RT)^{-1}$  として一致する。したがって式 (2.13) が成立するのは電気化学的にみると過電圧の小さな場合であることに注意する

必要がある。

### 2.3 基礎方程式の解

基礎方程式式 (2.10) および式 (2.11) を境界条件の式 (2.12) ~ (2.16) のもとに解き、管壁近傍における電位と電流を評価する。(2.10) および (2.11) の一般解は次の形で与えられる。

$$\phi_{ms}(r, \theta) = \Psi(r) \sin \theta + \phi_{ms}^{\circ}, \quad 0 \leq r \leq a \quad (2.20)$$

$$\phi_w(r, \theta) = (c_1 r + c_2 / r) \sin \theta + \phi_w^{\circ}, \quad 0 \leq r \leq b \quad (2.21)$$

式 (2.20) を式 (2.10) に代入すると  $\Psi(r) \rightarrow \Psi$ ,  $v(r) \rightarrow v$  と略記して

$$\frac{1}{r} \frac{\partial \Psi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial r^2} - \frac{\Psi}{r^2} = B \frac{\partial v}{\partial r} \quad (2.22)$$

$$\frac{\partial}{\partial r} (r^2 \frac{\partial \Psi}{\partial r} - r \Psi) = B r^2 \frac{\partial v}{\partial r} \quad (2.23)$$

を得る。すなわち  $\Psi$  は式 (2.23) を満足する関数でなければならない。式 (2.23) を 0 から  $a$  迄積分すると、 $v(a) = 0$  に注意して次式を得る。

$$a^2 \Psi'(a) - a \Psi(a) = -a^2 \bar{v}_a B \quad (2.24)$$

但し、 $\bar{v}_a$  は、 $\bar{v}_a = \int_0^a 2\pi r v(r) dr / \pi a^2$  であり、管内溶融塩流の平均流速を表わす。次に式 (2.12) と式 (2.13) を等しいとおき式 (2.20), 式 (2.21) を代入すると

$$[\Psi(a) + \tau \sigma_{ms} \Psi'(a) - (c_1 a + c_2 / a)] \sin \theta = \phi_w^{\circ} - \phi_{ms}^{\circ} - \phi_N \quad (2.25)$$

となる。式 (2.25) は  $\theta$  の値にかかわらず成立たなければならないから、

$$\phi_w^{\circ} = \phi_{ms}^{\circ} + \phi_N \quad (2.26)$$

および

$$\Psi(a) + \tau \sigma_{ms} \Psi'(a) = c_1 a + c_2 / a \quad (2.27)$$

を得る。次に式 (2.12) と (2.14) を等しいとおいて同様に

$$\sigma_{ms} \Psi'(a) = \sigma_w (c_1 - c_2 / a^2) \quad (2.28)$$

を得る。さらに式 (2.16) から

$$c_1 = c_2 / b^2 \quad (2.29)$$

を得る。式 (2.24), (2.27), (2.28), (2.29) を用いて  $\Psi(a)$ ,  $\Psi'(a)$ ,  $c_1$ ,  $c_2$  を決

定することが出来る。

計算の結果  $\phi_{ms}(a)$ ,  $\phi_w(a)$  および  $\phi_w(b)$  は次のように求まる。

$$\phi_{ms}(a) = a \bar{v}_a B (1+z)^{-1} \sin \theta + \phi_{ms}^0 \quad (2.30)$$

$$\begin{aligned} \phi_w(a) = a \bar{v}_a B (\sigma_{ms}/\sigma_w) [ (b^2 + a^2)/(b^2 - a^2) ] \\ \times [ Z/(1+Z) ] \sin \theta + \phi_{ms}^0 + \phi_N \end{aligned} \quad (2.31)$$

$$\begin{aligned} \phi_w(b) = 2 \bar{v}_a B (\sigma_{ms}/\sigma_w) [ a^2 b^2/(b^2 - a^2) ] \\ \times [ Z/(1+Z) ] \sin \theta + \phi_{ms}^0 + \phi_N \end{aligned} \quad (2.32)$$

ただし、 $Z$  は

$$Z = [ (\tau \sigma_{ms}/a) + (\sigma_{ms} + \sigma_w) (b^2 + a^2)/(b^2 - a^2) ]^{-1} \quad (2.33)$$

であり、 $(1+Z)^{-1}$  は配管による短絡効果を表わしている。

我々の系における具体的数値(概略値)を用いて  $(1+Z)^{-1}$  を求めてみよう。 $a = (5.35/2) \times 10^{-3} \text{ m}$ ,  $b = (6.05/2) \times 10^{-3} \text{ m}$ ,  $\sigma_{ms} \approx 50 \Omega^{-1} \text{ m}^{-1}$ ,  $\sigma_w \approx 2.0 \times 10^6 \Omega^{-1} \text{ m}^{-1}$ ,  $\tau \approx 0.5 \Omega \text{ m}^2$  とすると、 $\tau \sigma_{ms}/a \approx 10^3$ ,  $(\sigma_{ms}/\sigma_w) (b^2 + a^2)/(b^2 - a^2) \approx 2 \times 10^{-4}$  となり  $Z \approx 10^{-3}$  の程度であるから金属配管の  $\phi_{ms}(a)$  におよぼす効果は無視出来ることになる。これは  $\tau \sigma_{ms} \gg a$  であることによる。

次に  $\Psi(r)$  を決定し流体中のポテンシャル  $\phi_{ms}(r, \theta)$  を求めておく。まず式(2.23)を不定積分し、積分定数を  $K_1$  とおくと、

$$r^2 \Psi' - r \Psi = B \int r^2 (\partial v / \partial r) dr + K_1 \quad (2.34)$$

こゝで計算の便宜上  $r \neq 0$  として両辺に  $r^{-3}$  をかけると

$$\{ r^{-1} \cdot \Psi \}' = B r^{-3} \int r^2 (\partial v / \partial r) dr + K_1 / r^3 \quad (2.35)$$

となる。式(2.35)をさらに不定積分し、積分定数を  $K_2$  とすると

$$\Psi(r) = (B r \bar{v}_r / 2) - (K_1 / 2r) + K_2 r \quad (2.36)$$

を得る。 $\Psi(r)$  は  $r=0$  でも有限な値を持つから  $K_1=0$  である。故に

$$\Psi(r) = (B r \bar{v}_r / 2) + K_2 r \quad (2.37)$$

を得る。ここに  $\bar{v}_r = \int 2 \pi r v(r) dr / \pi r^2$  であり管軸中心から  $r$  までの平均流速を表わす。 $K_2$  は  $\Psi(a)$  が決定されているから直ちに

$$K_2 = (\bar{v}_a B / 2) \cdot (1-Z) / (1+Z) \quad (2.38)$$

として求まる。したがって

$$\phi_{ms}(r, \theta) = (Br/2) [\bar{v}_r + \bar{v}_a (1-Z)/(1+Z)] \times \sin \theta + \phi_{ms}^{\circ \circ} \quad (2.39)$$

を得る。

さて次に熔融塩と配管壁の境界面を流れる電流密度  $i$  を求めてみよう。すでに  $\Psi'(a) = -\bar{v}_a BZ/(1+Z)$  が求まっているから式 (2.12) から次式を得る。

$$i = -\sigma_{ms} \phi'_{ms}(a) = \sigma_{ms} \cdot \bar{v}_a \cdot B \cdot [z/(1+Z)] \sin \theta \quad (2.40)$$

式 (2.40) の符号は、図 2.2 から明らかなように cathodic の向きを正にとっているから、anodic の向きを正にとる方法で表示する場合には式 (2.40) の右辺に (-) 符号をつければよい。

ここで注意すべき点は式 (2.40) の  $i$  は界面を流れる正味の電流密度、すなわち

$$-i = i_{anodic} - i_{cathodic} \quad (2.41)$$

であり、 $-i > 0$  の場合必ずしも  $-i$  が配管壁からの金属イオンの溶解速度に直接対応するものではないことである。すなわち配管壁界面における腐食速度を厳密に評価するためには式

(2.40) で求められた電流密度について、界面で起り得る酸化還元反応の全ての素過程について吟味しなければならない。

### 3. 実験装置

#### 3.1 界面分極抵抗の測定

溶融塩流中の二点の間の電位差の測定にはパイレックスガラス管で被覆した2本の白金電極を用いた。そしてそれらの電極間の電位差の測定値をもってその二点間の電位差とした。このような測定が可能であるためには、使用する電極の分極抵抗が外部に接続される電位差測定回路の入力抵抗に比べて十分小さくしなければならない。このセルを微小電位差の範囲で線型素子による等価回路で表わせば図3.1のようになる。図3.1の中で $\Phi_1$ と $\Phi_2$ はそれぞれ電極1お

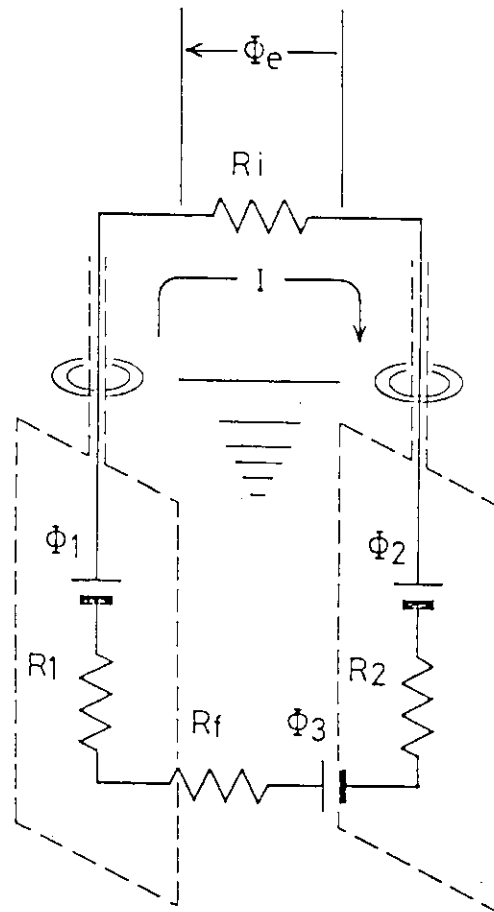


図 3.1 セルおよび外部回路の等価回路

よび2のGalvani電位差、 $\Phi_3$ は溶融塩中に生ずる電位差、 $R_1$ と $R_2$ は電極1および2の分極抵抗、 $R_f$ は溶融塩の溶液抵抗、そして $R_i$ と $\Phi_e$ は外部測定回路の入力抵抗と電流Iによって抵抗 $R_i$ の両端に生ずる電位差を表わす。この閉回路にKirchhoffの第二法則を適用すると、式(3.1)を得る。

$$R_i I - \Phi_1 + R_1 I + R_f I - \Phi_3 + R_2 I + \Phi_2 = 0 \quad (3.1)$$

この式から測定時の端子間電圧 $\Phi_e$ を次のように表わすことができる。

$$\Phi_e = (\Phi_1 - \Phi_2 + \Phi_3) \frac{1}{1 + \frac{R_1 + R_2 + R_f}{R_i}} \quad (3.2)$$

式(3.2)で両電極の熔融塩との間のGalvani 電位差 $\Phi_1$ と $\Phi_2$ が互いに等しく、同時に分極抵抗と溶液抵抗の和 $R_1 + R_2 + R_f$ が外部回路の抵抗 $R_i$ に比べて十分に小さい場合に限り、端子電圧 $\Phi_e$ が熔融塩内の電位差 $\Phi_3$ を表わすことになる。しかし、一般に $\Phi_1$ と $\Phi_2$ の間にはどのように条件を揃えてセルを製作しても数mVの電位差が生じてしまう。本研究の場合のように $\Phi_3$ を外部から制御できる系では、 $\Phi_3$ の生じているときと、 $\Phi_3$ の生じていないときの $\Phi_e$ の差から $\Phi_3$ が求められる。一方、抵抗の和 $(R_1 + R_2 + R_f)$ については、電位差 $(\Phi_1 - \Phi_2 + \Phi_3)$ が有限の値をとるとき、外部抵抗 $R_i$ として相異なる値の $R_i(1)$ と $R_i(2)$ を接続した際の端子電圧をそれぞれ $\Phi_e(1)$ と $\Phi_e(2)$ とすれば、

$$R_1 + R_2 + R_f = \frac{R_i(1)R_i(2) \{ \Phi_e(2) - \Phi_e(1) \}}{\Phi_e(1)R_i(2) - \Phi_e(2)R_i(1)} \quad (3.3)$$

のように表わすことができる。本研究では電位測定プローブをループに装着する前に予備実験としてプローブと似た電極寸法を持つ図3.2のような電極を用い、ループ内と同じ熔融塩HTS中に漬せきし、端子電圧を測定して式(3.3)によって白金電極の $(R_1 + R_2)$ の値を評価した。その際、 $R_f$ の値は公表されたHTSの電気伝導度<sup>(1)</sup>から考えて無視できると思われるので除外した。

表3.1に分極抵抗の和 $(R_1 + R_2)$ を示す。この結果と本研究で使用したエレクトロメータの入力抵抗値 $1 \times 10^{11} \Omega$ とからこの外部の測定回路を接続したことによる電位差測定値の誤差は $10^{-3}\%$ 以下であることがわかる。従って熔融塩の中の電位差測定にこのような電極対を用いることが可能であることが明らかとなると同時に、白金の分極抵抗の値 $1/\kappa$ が $10 \Omega \text{m}^2$ 程度であることがわかった。

表 3.1 分極抵抗測定結果

T / K	$R_i(1) / M\Omega$	$R_i(2) / M\Omega$	$R_1 + R_2 / M\Omega$	$k^*$ $/\Omega^{-1} m^{-2}$
	$\Phi_e(1) / mV$	$\Phi_e(2) / mV$		
481	2.63 mV	1.607 mV	2.63	$2.31 \times 10^{-2}$
	1.432 mV	0.859 mV	3.01	$2.01 \times 10^{-2}$
486	-3.67 mV	-2.52 mV	1.259	$4.82 \times 10^{-2}$
	1.301 mV	0.836 mV	1.880	$3.23 \times 10^{-2}$
503	4.99 mV	3.60 mV	0.943	$6.43 \times 10^{-2}$
	-1.527 mV	-1.142 mV	0.763	$7.95 \times 10^{-2}$

\* 図 3.2 の各々の電極が等しく寄与しているとし、さらに、電極の先端が半球状であるとして計算した。

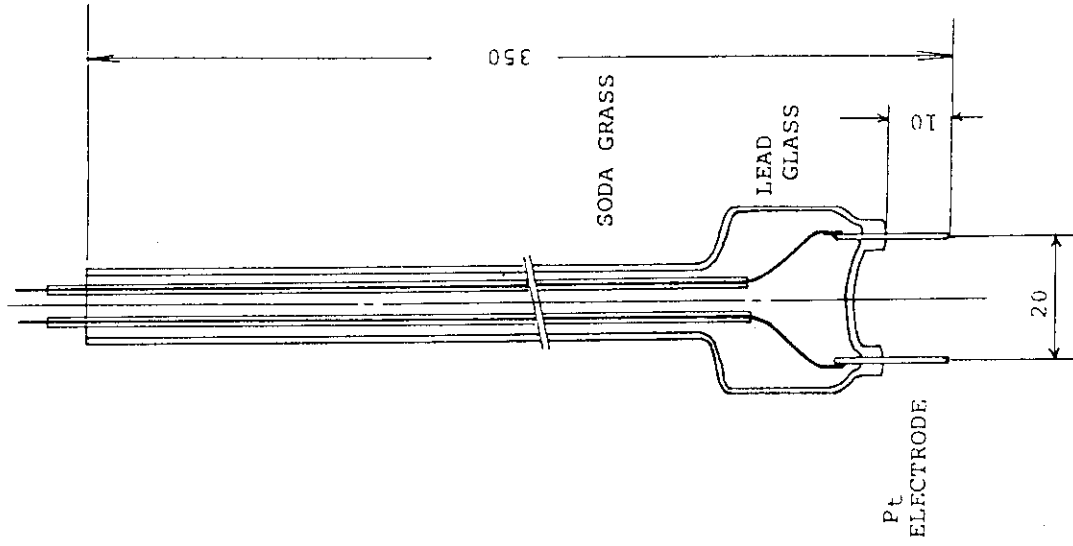


図 3.2 分極抵抗測定用 Pt プロローブ



### 3.2 金属円管内電位分布測定部

電位分布測定部は既存の強制循環ループ<sup>(2)</sup>の試験区間に取付けて使用するよう設計され、試験区間の前後と同径のSUS 316製の円管、白金電極付きのピアレックスガラス製の2本のプローブおよびそれらのプローブを円管の直径に沿って移動させるための駆動装置からできている。2本のプローブは上流側のプローブの後流が下流側のプローブの付近の流れの場を大きく乱さぬよう300mmの距離を隔てて配置され、試験区間それ自身もループの中で流量計や熱電対ウエルの後流と曲管部に発生する二次流の影響を避けるため、ポンプ送出口から最下流の直管部の下流端近くに設けられている。測定部の構造としては図3.3に断面を、また図3.4にプローブ配置を示す。円管の上下に矩形断面を持つ立ち管を設け、さらにその立ち管の端部にフランジ継手によってプローブ駆動装置および盲ぶたを取付けた形になっている。円管と立ち管には常に内部を溶融塩の融点以上の温度に保つためのシース線ヒータが巻きつけられ、さらにその上に約50mmの厚さのロックウールが断熱材として被せられている。プローブの駆動装置は手動で、移動が滑らかに行われるようボールナットスクリウを用いている。ボールナットスクリウのピッチは6.1mmであり、主尺と角度による副尺を設け、円管中の電極の位置を読取った。プローブはボールナットスクリウの雄ネジに玉軸受を介してネオプレン製Oリングで固定されており、操作時にプローブにトルクが加わらないようになっている。プローブはこのほか上側のフランジとの間のP6相当の四フッ化エチレン製Oリングによって支持され、塩による固着防止のためOリング付近は運転中HTSの融点以上の温度に保たれており、上下方向に滑ると同時にこの部分での気密が保たれている。さらにプローブは下側の立ち管内でSUS 304製の板バネによって挟むように軽く支持され、運転中の振動と、流れの中で完全な片持ばりとなるのを防ぐと同時に、電極が常に正しく上流に向かって方向が保たれている。ループ運転時には下と上の立ち管内はそれぞれ溶融塩とカバーガスである窒素で満たされるが、下の立ち管内の溶融塩はループから溶融塩を排出する際に残り、そのまま冷却すると塩の凝固時の体積変化によりプローブが破損する恐れがあるので盲ぶた中央に設けられた排出栓から残った溶融塩を排出することとした。また、上の立ち管内の窒素は運転開始後補給されることはないのでもし、立ち管部に漏れが生ずると内部に溶融塩が侵入し、四フッ化エチレン製のOリングに付着してOリングを破損したりプローブ固着の原因となる恐れがある。この立ち管部の気密はフランジ内のSUS 304製の中空Oリングと四フッ化エチレン製Oリングそれ自身によって保たれ、運転中特に不具合を生ずることはなかった。電位分布測定部と強制循環ループとの接続はGrayloc継手により行われた。この継手は昇温後一度の増し締めが必要であったが、室温と500K付近の昇温降温のくり返しにも漏れを生ずることはなかった。電位分布の測定には2本のプローブのうち上流側のものを用い、下流側のプローブは参照電極として用いた。上流側のプローブの周囲の円管の内壁面は既知の分極抵抗<sup>(3)</sup>を持つ白金板で覆われた。プローブの形状および構造は図3.5に示すように上部の断面は円形でP6のOリングに適合するようになっており、下部は溶融塩の流れを乱さぬような断面形状とした。測定すべき起電力の分布は流速の直径上の積分値として与えられるので、このプローブの心棒前縁に沿って存在するよどみ点付近ではこの起電力分布は周辺と大きく異なるものと思われる。このよう

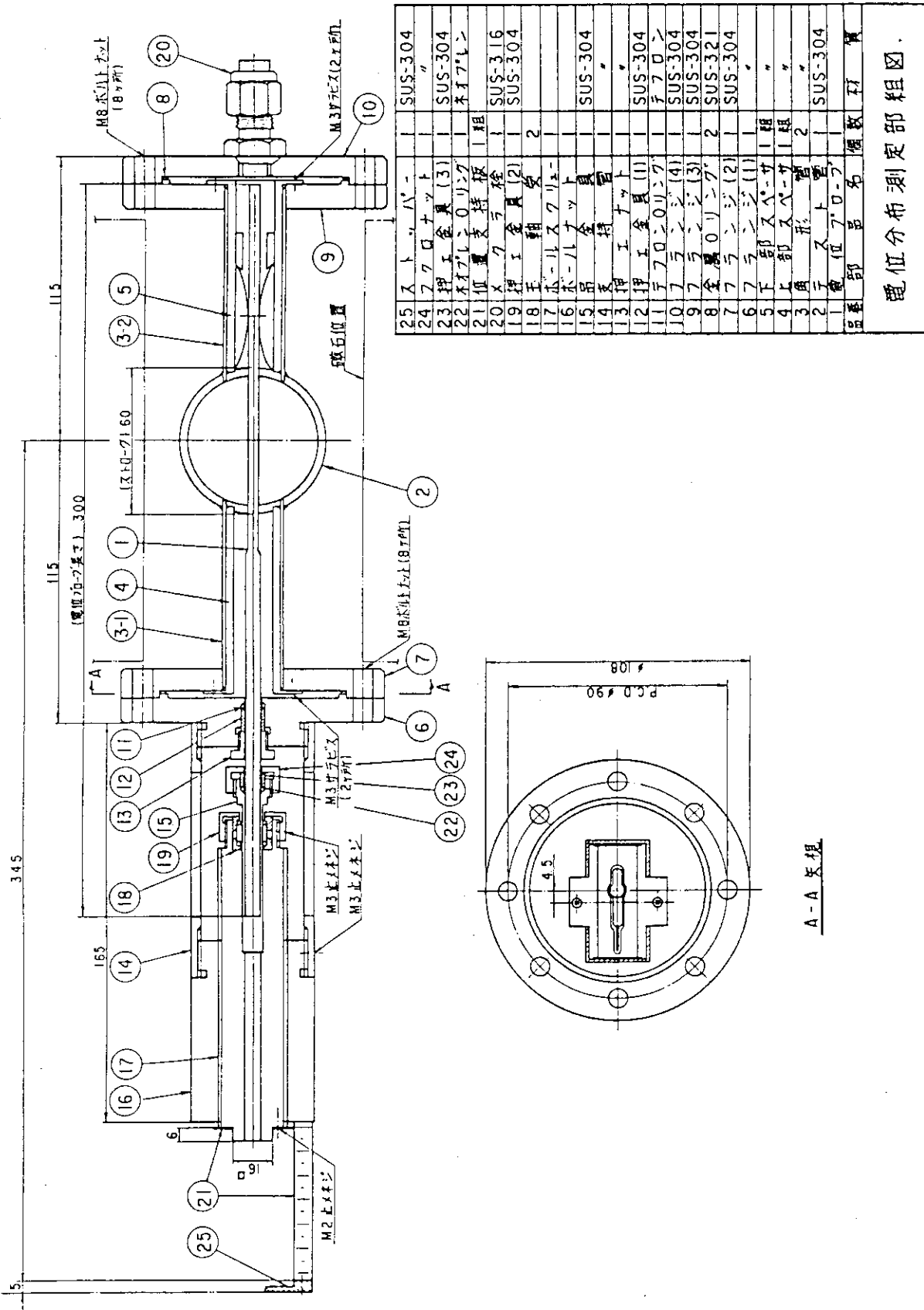


図 3.3 電位分布測定部・プローブ駆動部断面

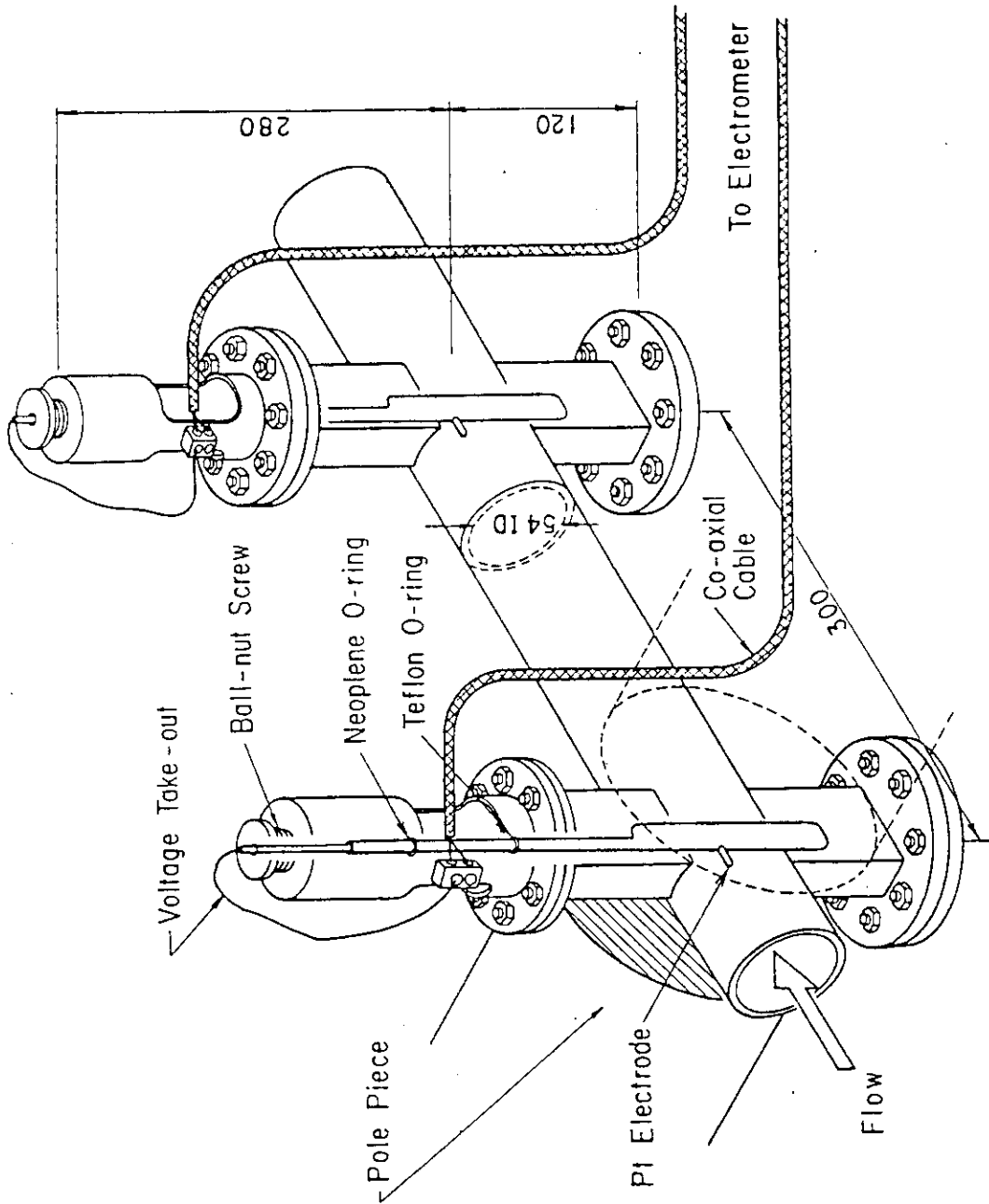


図 3.4 電位分布測定部・プローブ配置図

な速度場の乱れの影響についてはCoulson 等<sup>(4)</sup>によってピトー管による流速分布の測定に関して研究されており、N. P. L. (National Physical Laboratory, Teddington, Middlesex, England) ではピトー管外径の14倍の長さを与えることを推奨している。本研究で使用したプローブではガラス被覆部分の外径の14倍とすべであるが、構造上の制約から電極外径の約14倍とした。白金電極のピアレックスガラスによる溶封には線膨張係数の差に起因する破損を防ぐ対策を施さねばならない。ピアレックスガラスと白金の線膨張係数はそれぞれ  $28 \times 10^{-7} \text{ K}^{-1}$ <sup>(5)</sup> および  $9.5 \times 10^{-7} \text{ K}^{-1}$ <sup>(6)</sup> であり0.1mm以上の外径の白金線をピアレックスガラスに封入するのは危険とされている。そこで図3.5のプローブではまず外径1.5mm、肉厚0.1mmの白金管をピアレックスガラスに封入し、続いて外径1.2mmの白金線をこの管に通して先端を溶封した。このような構造にすることにより白金とピアレックスガラスとの間に生ずる熱応力は薄肉の白金管の歪みとして吸収される。その結果、線膨張係数を合わせるため他の金属を封入する必要が無く、従って混成電位などにより測定値が不安定になる恐れのないプローブを作ることができた。白金管に溶接した外径1.2mmの白金線にはさらに図3.5の上方から差込んだ外径0.3mmの白金線とガラス管内部でスポット溶接器の電源を利用して電気溶接し、この細白金線を電極端子として使用した。このように室温と温度差のある部分を総て白金とすることにより接合部の熱起電力による測定値の変動を防ぐことができた。上流側の指示電極端子および下流側の参照電極端子はそれぞれ同軸ケーブルによってエレクトロメータとして使われるポテンシオスタットの作用電極用端子および参照電極用端子に接続され、さらに同軸ケーブルの外部導体をループ本体を通じて接地することにより静電誘導による雑音の混入を防止した。また、測定値は電位差 $\Phi$ のほか、溶融塩の温度、流量および電磁石の励磁電流を記録計により同時に記録した。

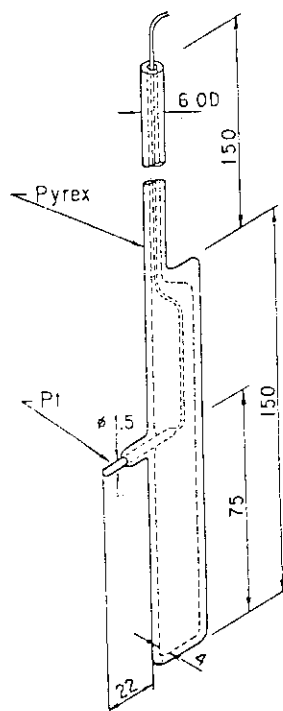


図 3.5 管内電位分布測定用プローブ

### 3.3 分極特性測定部

分極特性測定部は磁場中の熔融塩流内部に生ずる起電力によって円管壁に流れる電流を測定することを目的とし、電位分布測定部と同様に強制循環ループの試験区間に装着して磁場中に置かれており、図 3.6 に示すように中肉パイレックスガラス管が SUS 304 製の矩形管に収められ、両端をシリコンゴム製の O リングで矩形管に固定した構造になっている。この測定部では、円管がニッケル製であることを想定しており、電流測定用のニッケル電極対と参照電極として銀電極をガラス管内部に設置した。ニッケル管を想定した理由は、硝酸ナトリウムと硝酸カリウムの混合熔融塩中におけるニッケルの分極抵抗<sup>(3)</sup>ならびにポーラログラム<sup>(7)</sup>がすでに得られていて、その電気化学的挙動がある程度事前に明らかになっていたことと、合金の場合問題となりがちな混成電位や局部電池の存在を考慮する必要が無かったからである。また、ニッケル管をパイレックスガラス管で置き換えた理由は、ニッケルの分極抵抗が十分に大きく、熔融塩流中の誘起起電力の分布が絶縁管中のそれとほとんど変わらないため<sup>(8)</sup> 周囲から絶縁して内部に電極を取付け易かったことによる。ニッケル電極はタングステン棒の先に酸水素炎中で溶接され、タングステン棒と溶接部はウランガラスで覆われた。タングステンとウランガラスの線膨張係数は、 $5.5 \times 10^{-7} \text{ K}^{-1}$ <sup>(9)</sup> および  $4.0 \times 10^{-7} \text{ K}^{-1}$ <sup>(10)</sup> と比較的良く合っており、熱応力による破損の危険は少ない。また、ニッケル電極の形状は熔融塩の流れの場を乱さず、電極面積を大きく取るよう外径 0.125 mm のニッケル細線をニッケルステム間に壁面に沿わせて張ることにした。このステム間距離は電磁石の磁極の寸法によって決まる磁場の平坦な部分に収まるよう決められた。ニッケル電極と同様、銀電極の取付けに際してもタングステン棒を使って線膨張係数の違いに対する配慮がなされた。電極の取付けられたパイレックスガラス管は両端の端部附近でシリコンゴム製の O リングを介して矩形管に固定された。この固定方法は矩形管とパイレックスガラス管の線膨張係数の違いによる熱応力の除去と気密を保つのに有効であったが、シリコンゴムの耐熱性により熔融塩の温度は 500 K に制限された。シリコンゴムはこの上限温度付近では HTS と接触することによる著しい劣化を起こすことは無かった。矩形管は試験区間にループ側から加わる応力を受け、パイレックスガラス管に直接応力が加わらないようにすると同時に、矩形管内でパイレックスガラス管や O リングが破損して熔融塩が漏洩したとき、それが直接外部に漏れ出すのを防いでいる。さらに、矩形管全体がシース線ヒータによって加熱保温されており、パイレックスガラス管内で熔融塩が凝固するのを防ぐ役割も果たしている。そのほか、矩形管にはパイレックスガラス管を透視できるよう一組の気密窓がついており、熔融塩流中の気泡の有無などを直接観察することができる。電位測定は図 3.7 に示されている測定系によって行われた。電極からタングステン製のステムによってパイレックスガラス管の外へ引出された電極端子にはガラスファイバー被覆の銅線が圧着端子により接続され、さらにこの銅線はフランジ部分に取付けてある密封端子に接続されて外部に引出されている。誘起起電力および電流は、それぞれ熔融塩流を挟んで取付けられている一対のニッケル電極の開放端子間電圧と、ニッケル電極の分極抵抗に比べて十分小さい抵抗 R を両電極間に接続してこの抵抗を流れる電流に相当するものとして測定を行った。測定は磁場を印加して誘起した起電力によるもののほか、磁場を使わず、ポテンショスタットによりニッケル電極対に定電圧を

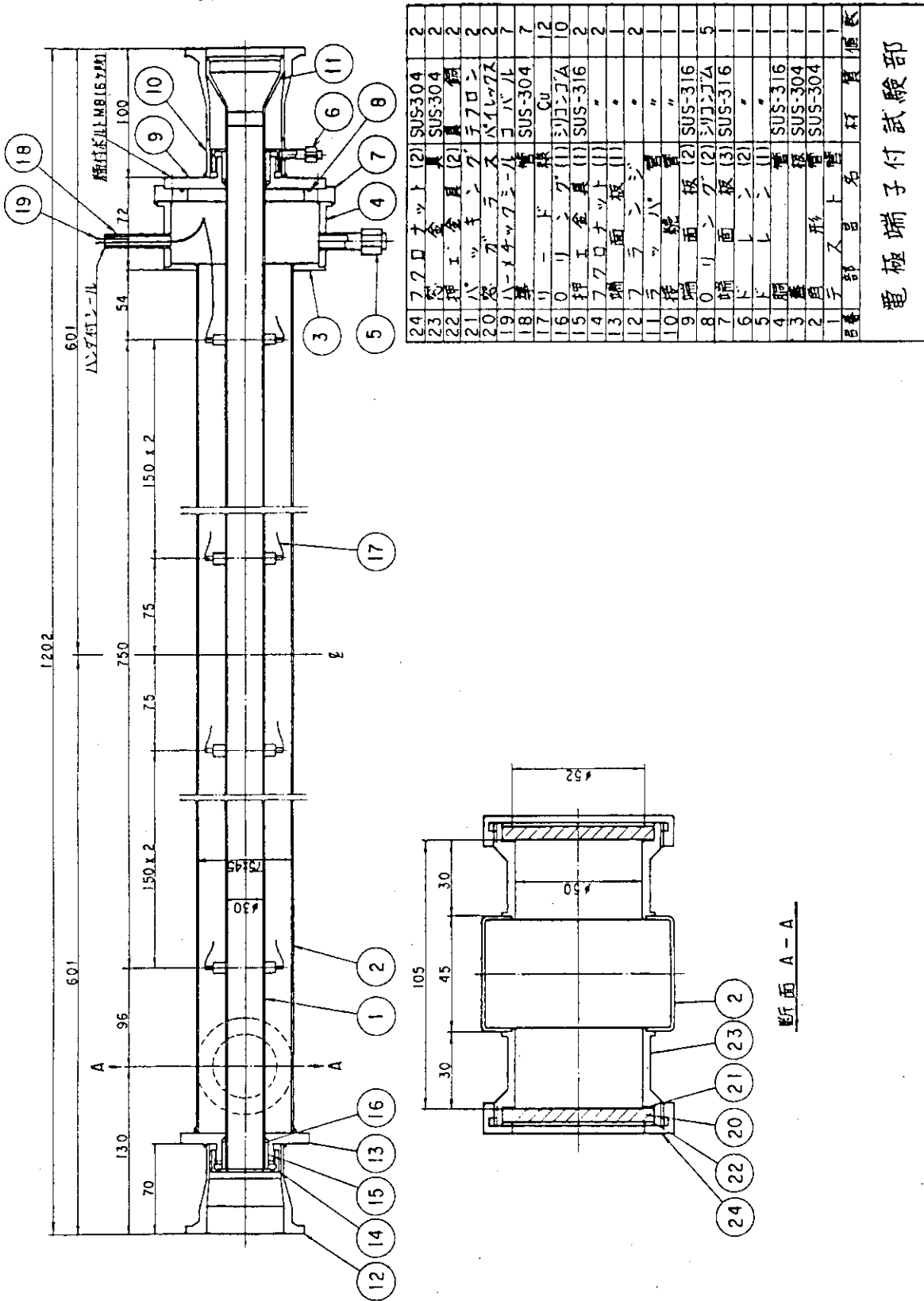


図 3.6 分極特性測定部構造

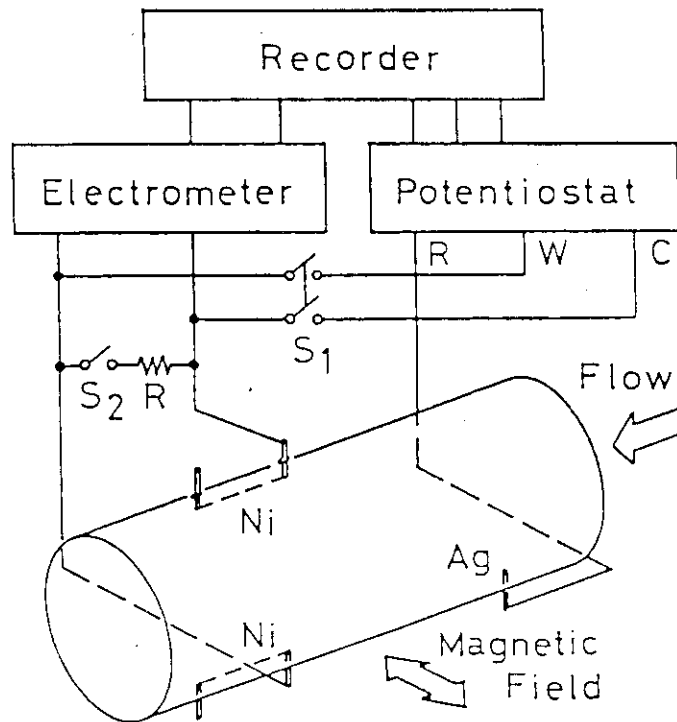


図 3.7 分極特性測定系

印加することによる電流測定も併せて行った。磁場を印加しての誘起起電力測定は、図 3.7 の双投開閉器  $S_1$  と単投開閉器  $S_2$  を共に開き、エレクトロメータとして使用するポテンショスタットによって両ニッケル電極の開放端子間電圧を読取ることによって行ったが、その際、磁場は 3.2 節の測定と同様に間欠的に印加された。また、磁場を印加しての閉回路電流の測定は、開閉器  $S_1$  を開いたままとし、開閉器  $S_2$  を閉じ、負荷抵抗  $R$  を両ニッケル端子間に接続した状態でこの端子間電圧をエレクトロメータにより測定し、測定値と抵抗  $R$  の値から電流値を算出するという方法で行った。抵抗  $R$  には  $330\Omega$  と  $2k\Omega$  の抵抗を電流に応じて使用した。さらに磁場を使用せず、外部から両ニッケル電極間に定電圧を印加する測定では、開閉器  $S_1$  を閉じ、 $S_2$  を開いてポテンショスタットによりニッケル電極 1 に銀電極を基準とした定電圧を印加して両ニッケル電極を通過する電流を測定すると同時に、エレクトロメータによって両ニッケル電極間の電位差を測定した。このようにしてこの分極特性測定部では磁場による誘起起電力と外部定電圧回路によって円管路壁面に流れる電流をそれぞれ測定し、比較した。

#### 4 流量計の較正

溶融塩の流量は本研究においては強制循環ループ内の溶融塩の運動を表わす唯一のパラメータであり、最も重要な測定値のひとつである。誘起電位の計算上必要な円管断面内の平均流速  $\bar{v}$  (a) はこの流量を円管断面積で除して算出されたものである。流量の測定は強制循環ループに縦続接続されたタービン流量計と流体素子型流量計によって行われた。それぞれの流量計は水により絶対較正を行った後にループに取付けられたが、本研究で用いた強制循環ループには計量用のタンクの設備が無いため、図 4.1 の豊橋技術科学大学の溶融塩ループを使って同型のタービン流量計の水と HTS による相対較正を行い、溶融塩の流量を定めた。較正は水頭約 3300mm のタンク内に水または HTS を充填し、流量計を取付けた円管を通して自然落下させてタービンの回転数を測定することにより行った。回転数の測定はタービン付属の発電機の出力の周波数を周波数カウンタにより行った。水と HTS (476 K ~ 493 K) における体積流量と出力パルス計数率との関係を表 4.1 と図 4.2 に示し、また、これらの測定値から、それぞれ水と HTS の場合の流量  $y$  のパルス計数率  $x$  に対する回帰直線を式 (4.1) のように作り、

$$y = a + b x \quad (4.1)$$

係数  $a$ 、 $b$  およびそれらの標準偏差  $\sigma_a$ 、 $\sigma_b$  の値を求めて表 4.1 に表わした。これらの値をもとに水 50 l/min、100 l/min および 150 l/min の流量と同じパルス計数率に対応する HTS の流量を計算によって求めると表 4.2 のようになる。これらの結果から、50 l/min のような低流量の場合を除き ± 2 % 程度の確度で HTS の場合も水による流量較正の結果を適用してもよいものと考えられる。



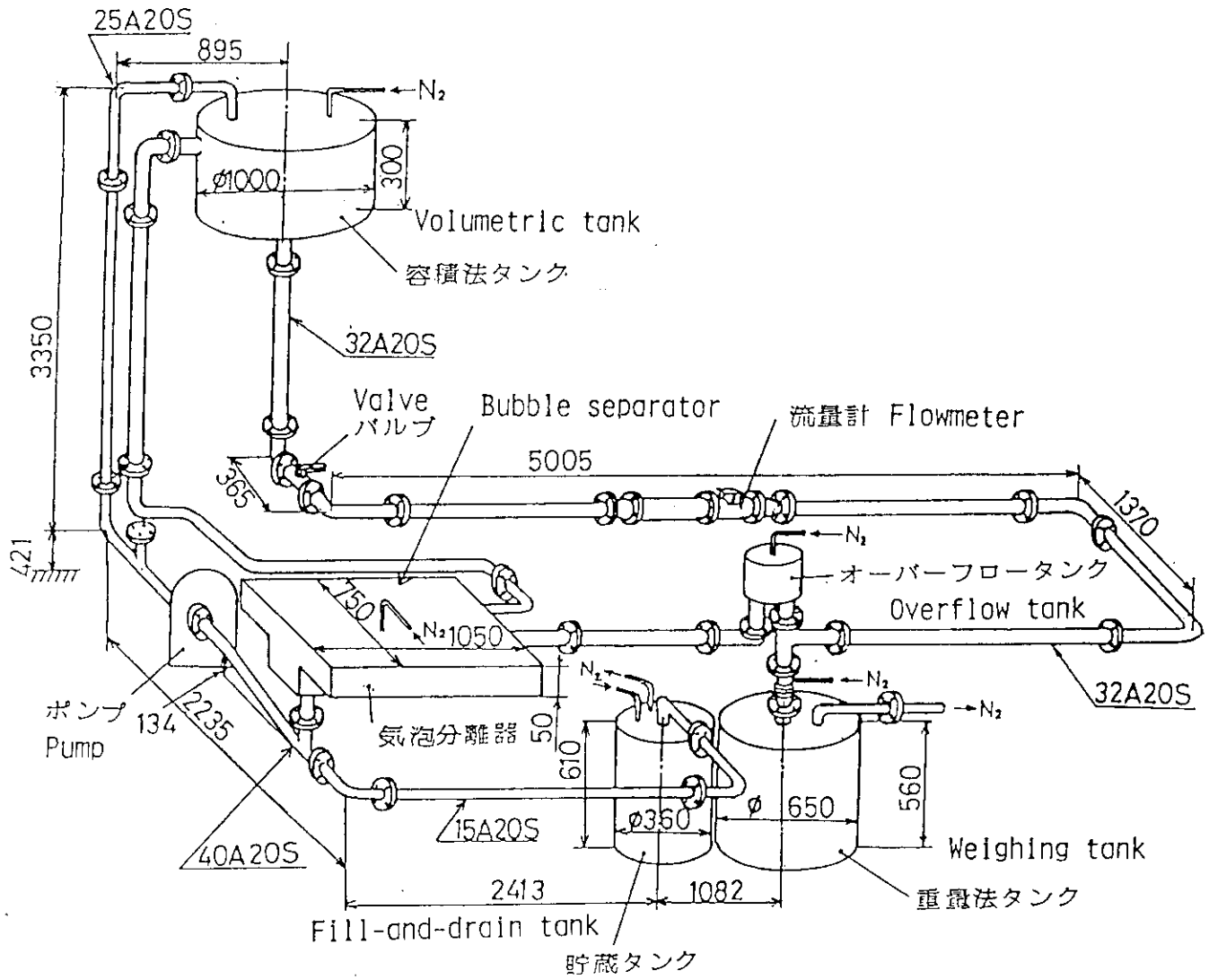


図 4.1 流量校正ループ (豊橋技術科学大学)

表 4.1 流量校正試験結果

	水	HTS
$a / l \text{ min}^{-1}$	4.6345	1.8333
$\sigma_a / l \text{ min}^{-1}$	0.52360	1.1308
$b / l \text{ s min}^{-1}$	1.2514	1.2767
$\sigma_b / l \text{ s min}^{-1}$	$6.9855 \times 10^{-3}$	$1.5901 \times 10^{-2}$

水		HTS	
$x / \text{s}^{-1}$	$y / l \text{ min}^{-1}$	$x / \text{s}^{-1}$	$y / l \text{ min}^{-1}$
26.0	40.20	35.5	46.4
38.3	53.80	47.8	64.5
54.3	72.31	55.9	72.7
63.3	83.74	43.5	57.4
79.8	104.48	60.2	81.7
92.9	120.97	72.2	92.7
119.0	155.10	76.7	99.7
38.4	52.08	81.2	106.1
57.4	75.57	88.6	111.8
79.8	103.80	93.6	122.9
51.4	67.53	109.0	142.5
75.7	98.62	99.4	126.8
44.3	58.91	89.7	117.2
105.3	136.50	67.4	87.5
108.8	140.90	48.6	63.3
101.5	132.20	42.1	55.6
87.3	113.50	31.8	41.9
71.2	93.25		
34.0	47.51		
34.3	46.83		
35.7	50.01		
33.0	45.88		
105.5	135.60		
115.6	150.20		

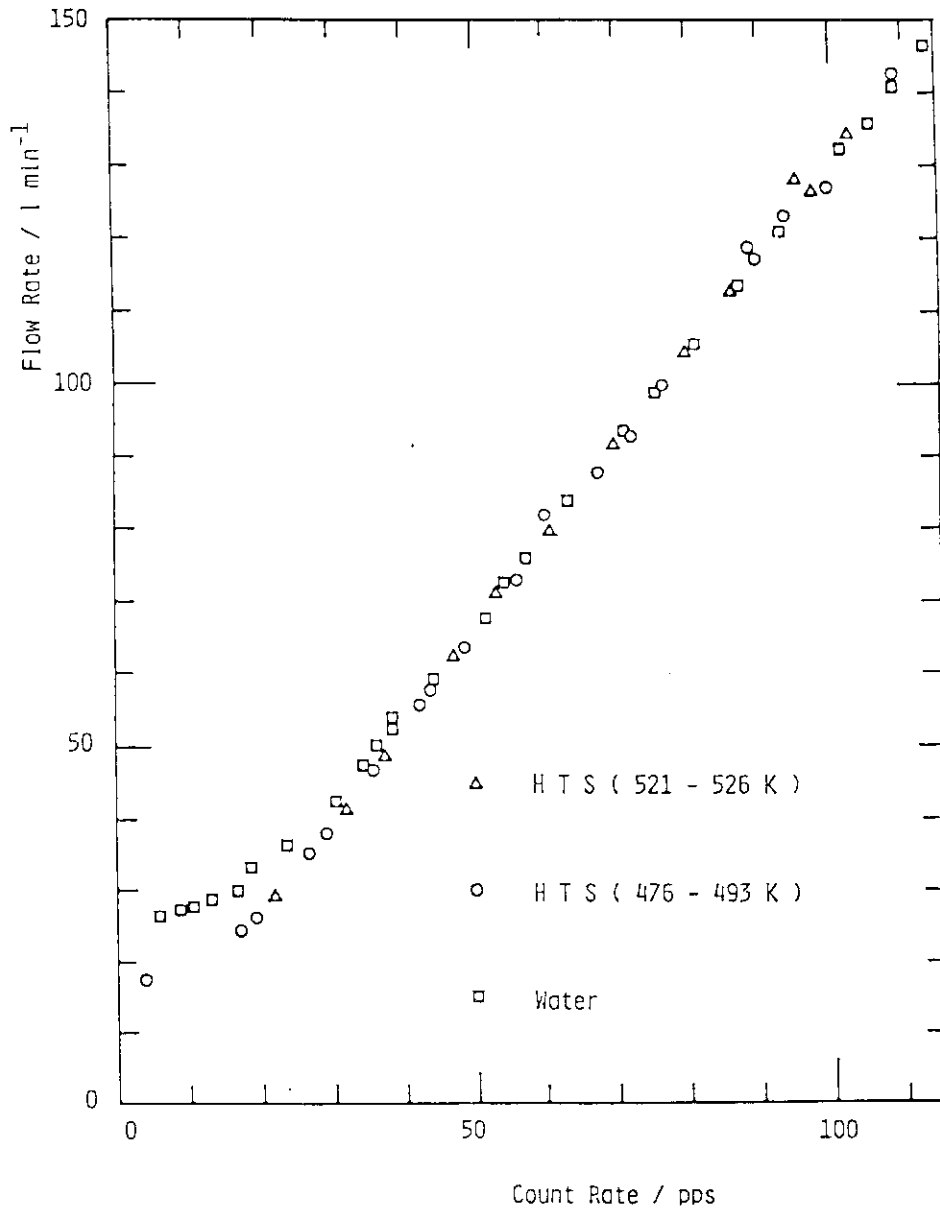


図 4.2 パルス計数率と流量の関係

表 4.2 計数率  $x$  に対する水と HTS の流量

計数率 / $s^{-1}$ $x$	水の流量 / $l \text{ min}^{-1}$		HTS の流量 / $l \text{ min}^{-1}$	
	$y$	$\sigma_y$	$y$	$\sigma_y$
36.25	50.0	0.8	48.1	1.7
76.21	100.0	1.1	99.1	2.3
116.16	150.0	1.3	150.1	3.0

## 5 実験結果

本研究では要約して二種類の測定を行った。ひとつは磁場中を流れる熔融塩の内部に発生する起電力の分布の測定であり、他のひとつはこの起電力により円管内壁面を通して流れる電流の測定である。いずれの測定にも同一の強制循環ループと同一の熔融塩 HTS が用いられた。ループ本体の大部分は HTS に対し耐食性の良い SUS 316 で作られているが、白金で内張りを施した測定部や、モリブデン被覆のガスケットなどもあり、測定前および測定中における塩サンプルの不純物を定量して金属元素の熔融塩への溶出量の確認をした。表 5.1 にその結果を示す。鉄およびニッケルが幾分増加している以外に対象とした元素では著るしい溶出は認められなかった。

表 5.1 HTS 中の不純物元素分析結果

元 素	含量 / p. p. $10^6$		分 析 方 法
	未使用	使 用	
Fe	3	6	オキシシ抽出光度法
Ni	<0.5	0.7	ジメチルグリオキシム抽出光度法
Cr	1	1	2-メチルオキシシ抽出光度法
Mo	3	3	オキシシ抽出光度法
W	<0.3	<0.3	オキシシ抽出光度法
Pt	<5	<5	アイオダイト (Iodide) 法

### 5.1 熔融塩流内部の電位分布

熔融塩流内部の磁場中における電位分布の測定には、3.2 節で述べた金属円管内電位分布測定部が用いられた。測定は熔融塩の流量を一定とし、指示電極として使われたプローブ付近の熔融塩流に直流磁場をステップ関数状に印加して指示電極と参照電極との電位差を各測定位置ごとに記録紙上に記録した。磁場による誘起起電力はこの磁場を印加した場合の電位差  $\Phi$  ( $=\Phi_1 - \Phi_2 + \Phi_3$ ) と印加していないときの電位差  $\Phi_0$  ( $=\Phi_1 - \Phi_2$ ) の差を記録紙上で読取ることによって求めた。この測定において測定値を変動させる主な原因には次のようなものがある。

- 1) 熔融塩の平均流速の変動
  - 2) 磁場の変動
  - 3) 乱流に起因する局部流速の時間的空間的変動
  - 4) 電極の電気二重層容量の充放電の時定数
- 1) と 2) については数時間にわたる測定中最大 4% 程度の変動が観測されたが、得られた

電位差の値に線形の補正を施し、あらかじめ定めた平均流速および磁場での値に換算した。3) については測定系の周波数特性による帯域制限を受け、かなり周期的な振動として記録されているが、その振幅がほぼ一定していることから、中央値を平均値とみなして読取り、Shercliff<sup>(11)</sup>と同じく変動項を無視することにした。最後に4) は約10秒程度なので各測定に1分程度の時間をかければその影響は1%以下となり、特に問題となることはなかった。また、熔融塩の温度は485 Kから490 Kの間に保たれた。このようにして得られた電位分布を図5.1および表5.2に示す。流速分布が軸対称であるときには管内熔融塩流中の電位分布 $\Phi(r)$ と流速分布 $V(r)$ の間には式(2.39)で示した関係がある。

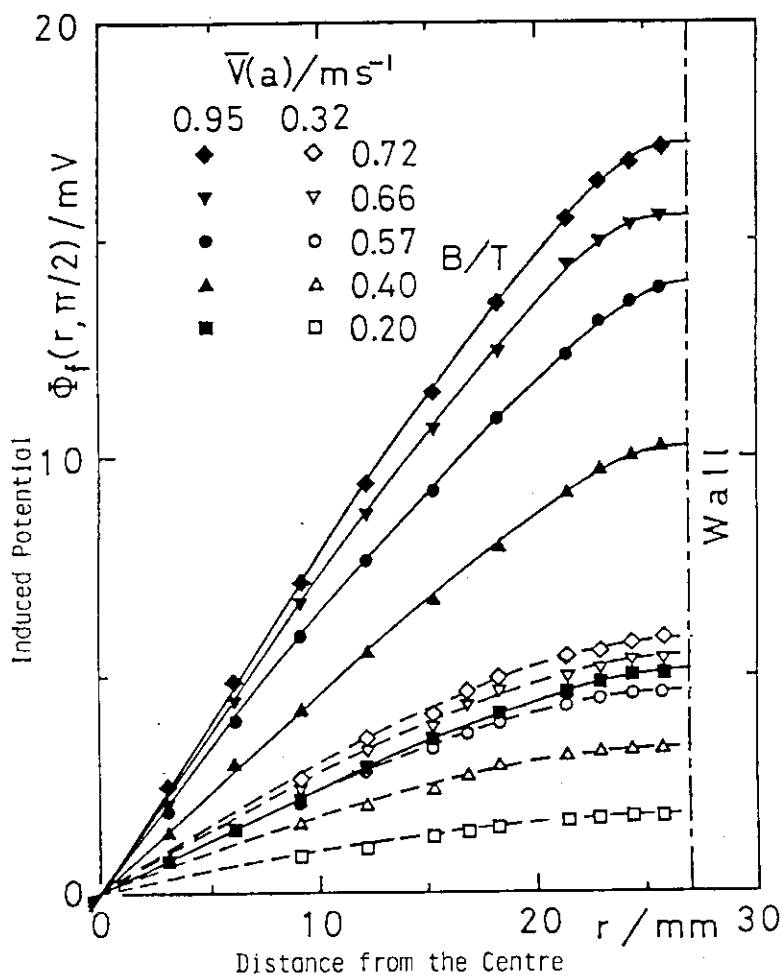


図 5.1 熔融塩流 (HTS) 中の管内電位分布

表 5.2 管内電位分布測定結果 ( $\Phi_f(a)$ は計算値)

表 5.2 a

r /mm	$\bar{v}(a)=0.95\text{ms}^{-1}$				
	$\Phi_f/\text{mV}$				
	B=0.72T	B=0.66T	B=0.57T	B=0.40T	B=0.20T
2.95	2.43	2.27	2.04	1.42	0.73
6.00	4.87	4.44	3.97	3.02	1.44
9.05	7.16	6.73	5.89	4.25	2.11
12.10	9.42	8.73	7.63	5.59	2.81
15.15	11.57	10.65	9.24	6.75	3.55
19.73	14.62	13.34	11.60	8.60	4.38
21.25	15.50	14.46	12.41	9.14	4.64
22.78	16.36	15.01	13.15	9.91	4.82
24.30	16.76	15.40	13.57	9.99	5.03
25.83	17.29	15.84	13.74	10.18	5.09
$\Phi_f(a)$	18.47	16.93	14.62	10.26	5.13

表 5.2 b

r /mm	$\bar{v}(a)=0.32\text{ms}^{-1}$				
	$\Phi_f/\text{mV}$				
	B=0.72T	B=0.66T	B=0.57T	B=0.40T	B=0.20T
9.05	2.42	2.22	1.96	1.46	0.78
12.10	3.11	2.93	2.44	1.81	0.93
15.15	3.79	3.47	3.03	2.37	1.10
18.20	4.50	4.21	3.61	2.66	1.30
19.73	4.82	4.48	3.85	2.98	1.51
21.25	5.20	4.79	4.10	2.98	1.52
22.78	5.44	5.00	4.37	3.12	1.66
24.30	5.50	5.18	4.51	3.27	1.66
25.83	5.66	5.28	4.47	3.49	1.82
$\Phi_f(a)$	6.22	5.70	4.92	3.46	1.72

白金の $\sigma_w^{(13)}$ 、およびHTSの $\sigma_{ms}^{(1)}$ から $(\sigma_w/\sigma_{ms})$ の値は $10^5$ 程度と見積られ、3.1節で述べたHTS中の白金の分極抵抗 $\tau$ と $\sigma_{ms}$ から $\tau\sigma_{ms}/a$ の値は $10^4$ 程度と見積られる。従って円管寸法を含めて考えると式(2.39)は

$$\theta = \pm \frac{\pi}{2}, \phi_{ms}^0 = 0 \text{ のとき}$$

$$\Phi(r) = \frac{Br}{2} \{ \bar{v}(r) + \bar{v}(a) \} \quad (5.1)$$

としても測定誤差1%と考えればなお十分な精度を持つものと考えられる。<sup>(12)</sup>式(5.1)において $\bar{v}(r)$ は本実験においては別途測定することはできなかったが $r \rightarrow a$ の極限において $\Phi(r)$ は $\Phi(a) = Ba\bar{v}(a)$ となり、流量 $Q = 2\pi a^2 \bar{v}(a)$ と関係づけることができる。表5.2で見ると、壁面から約1mmの位置における電位の実測値は、このようにして流量 $Q$ から計算した壁面の電位 $\Phi(a)$ と平均流速 $\bar{v}(a)$ が $0.95\text{ms}^{-1}$ の場合で約6%、 $0.32\text{ms}^{-1}$ の場合で約10%の精度で一致している。低流速の場合に誤差が大きいのは流量計の線形性が失われるのと、電位測定のス/Nが低下することによるものと思われる。なお、熔融塩流の場合には液体金属流の場合に比べてStuart数が小さいので、<sup>(9)</sup>GardnerとLykoudisが水銀流で観測した磁場のMFM(Magneto-Fluid-Mechanic)効果による断面内の流速分布の変化<sup>(14)</sup>は無視し得るものとした。

## 5.2 誘起電位に及ぼす磁束密度と平均流速の影響

電位分布測定部の中で指示電極用パイロックスガラスプローブの位置を円管の中心から内半径の90%の位置に止め、その位置における誘起起電力 $\Phi$ の平均流速 $\bar{v}(a)$ と磁束密度 $B$ への依存性を測定によって求めた。図5.2および表5.3は誘起起電力の磁束密度に対する依存性を示す。結果は起電力と磁束密度が線形の関係にあり、強磁場の下でも熔融塩の流れが磁場の影響を受けていないことを示している。さらに図5.3と表5.4には誘起起電力 $\Phi$ と熔融塩の平均流速 $\bar{v}(a)$ との関係を示す。この結果から円管の内半径の90%の位置ではその起電力 $\Phi$ はよく平均流速に比例しており、電磁流量計を構成することも可能であることを示している。

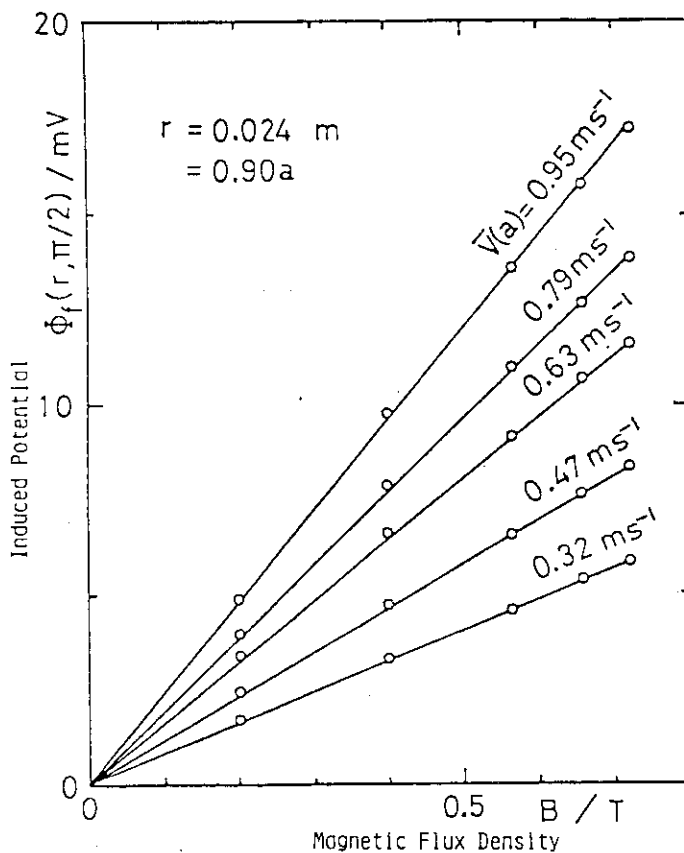


図 5.2 誘起起電力と磁束密度の関係

表 5.3 誘起起電力  $\Phi_f$  と磁束密度  $B$  の関係

$r=0.90(a)$  ( $=24.30\text{mm}$ )

$B / T$	$\Phi_f / \text{mV}$				
	0.72	16.76	13.59	11.15	8.15
0.66	15.40	12.54	10.30	7.54	5.18
0.57	13.57	10.94	8.98	6.49	4.51
0.40	9.99	7.94	6.59	4.69	3.27
0.20	5.03	3.98	3.31	2.41	1.66
$\bar{v}(a) / \text{ms}^{-1}$	0.95	0.79	0.63	0.47	0.32



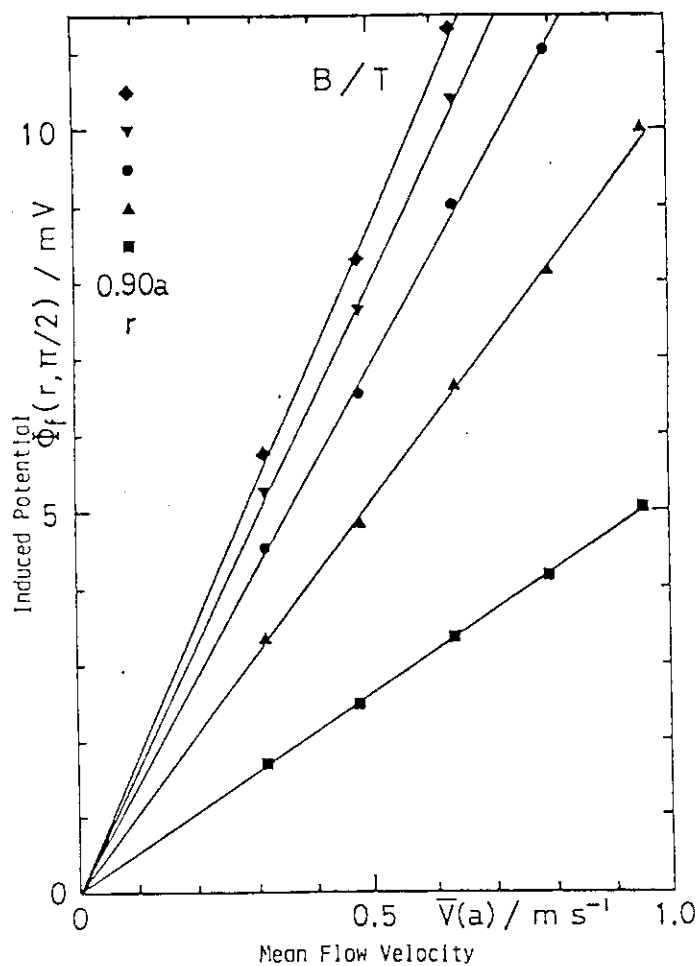


図 5.3 誘起起電力と塩平均流速との関係

表 5.4 誘起起電力  $\Phi_f$  と塩平均流速  $\bar{v}(a)$  の関係

$\bar{v}(a)/\text{ms}^{-1}$	$\Phi_f/\text{mV}$				
	0.95	0.79	0.63	0.47	0.32
0.95	16.76	15.40	13.57	9.99	5.03
0.79	13.59	12.54	10.94	7.94	3.98
0.63	11.15	10.30	8.98	6.59	3.31
0.47	8.15	7.54	6.49	4.69	2.41
0.32	5.50	5.18	4.51	3.27	1.66
B/T	0.72	0.66	0.57	0.40	0.20

5.3 ニッケル電極の分極特性に及ぼす磁場の効果

前節までの測定で明らかにされた磁場中を流れる熔融塩の中に生ずる起電力とその起電力によって熔融塩から円管内壁面を通り、さらに円管壁を通して還流する閉回路電流の関係を明らかにするための測定を行った。測定には 3.3 節に述べた分極特性測定部を用い、磁場による誘起起電力とそれによって流れる電流の関係、および磁場の無い状態で電極端子に外部定電圧源を接続し、その電圧と電流との関係を測定した。その際、各電極における電流の方向を図 5.4 (a)および(b)のように同じ状態で比較せねばならないので、閉回路内で電源の接続位置の異なる図 5.4 (a)と(b)では起電力 $\Phi_{12}$ の方向を図 5.4 (c)と(d)のように逆にとって考えねばならない。

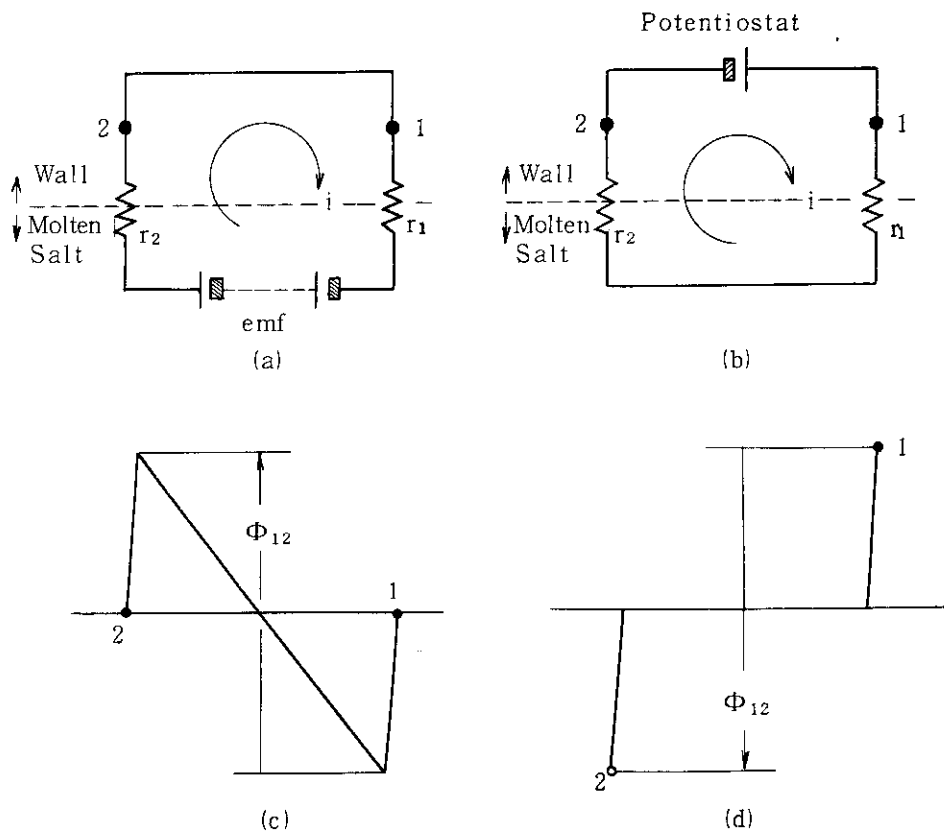


図 5.4 等価回路とその電位分布

(a), (c): 磁場による誘起起電力と電流の関係および電位分布  
 (b), (d): 外部電源による電圧と電流の関係および電位分布

このようにして測定したニッケル電極間電位差 $\Phi_{12}$ と電流 $I_n$ の関係を図 5.5 および表 5.5 に示す。この結果から次のことが明らかとなった。

- 1) 磁場によっても外部定電圧源によってもある起電力に対応して流れるのは同一の電流である。
- 2) 電流は熔融塩の平均流速にあまり依存せず、温度に依存する。

この閉回路を流れた電流の大きさが起電力の原因に依らないのは、電流を支配する分極抵抗

表 5.5 磁場誘起起電力および外部電源による分極特性

5.5 a 磁場誘起起電力 $\phi_f$ と電流 $I_n$ 

I / A	B / T	204 °C						232 °C					
		50 $\mathcal{L}$ /min			70 $\mathcal{L}$ /min			50 $\mathcal{L}$ /min			70 $\mathcal{L}$ /min		
		$\phi_f$ / mV	$I_n$ / $\mu$ A		$\phi_f$ / mV	$I_n$ / $\mu$ A		$\phi_f$ / mV	$I_n$ / $\mu$ A		$\phi_f$ / mV	$I_n$ / $\mu$ A	
-50	0.721	-29.7	-0.234		-39.8	-0.367		-28.8	-1.380		-40.7	-1.502	
-45	0.705	-27.3	-0.218		-38.0	-0.350		-26.2	-1.300		-38.8	-1.450	
-40	0.680	-26.3	-0.190		-34.5	-0.337		-22.8	-1.229		-37.8	-1.437	
-35	0.653	-25.5	-0.188		-32.3	-0.305		-19.4	-0.903		-35.4	-1.329	
-30	0.613	-23.6	-0.183		-28.5	-0.265		-10.5	-0.498		-33.6	-1.233	
-25	0.555	-21.0	-0.158		-25.3	-0.234		-6.0	-0.060		-29.7	-1.220	
-20	0.473	-19.1	-0.139		-18.0	-0.207		-0.093			-25.7	-1.003	
-15	0.371	-14.5	-0.110		-13.2	-0.130					-20.0	-0.805	
-10	0.258	-10.5	-0.088		-6.0	-0.048					-6.9	-0.320	
-5	0.130	-5.5	-0.048		+7.8	+0.093					+5.8	+0.302	
+5		+5.0	+0.030		+13.8	+0.155					+13.3	+0.550	
+10					+20.5	+0.202					+19.5	+0.823	
+15		+13.5	+0.090		+26.6	+0.230					+25.0	+1.009	
+20		+17.4	+0.145		+30.4	+0.262					+30.8	+1.230	
+25		+20.5	+0.156		+33.4	+0.287					+34.5	+1.397	
+30		+23.0	+0.167		+35.7	+0.330					+37.4	+1.511	
+35		+25.3	+0.174		+37.6	+0.344					+37.8	+1.585	
+40		+25.6	+0.185		+39.3	+0.411					+39.2	+1.646	
+45		+26.8	+0.212		+41.0	+0.405					+39.3	+1.668	
+50		+28.5	+0.225										

5.5b 外部電源電圧  $\phi_0$  と電流  $I_n$

204 °C		205 °C		232 °C			
50 ℓ/min	70 ℓ/min	70 ℓ/min	50 ℓ/min	70 ℓ/min	70 ℓ/min		
-52.1	-0.570	-52.5	-0.436	-43.0	-1.452	-44.2	-1.750
-39.6	-0.412	-33.5	-0.276	-31.8	-1.008	-39.0	-1.503
-27.6	-0.266	-15.0	-0.098	-27.0	-0.895	-27.9	-1.007
-15.1	-0.137	- 4.8	-0.067	- 5.0	-0.202	-23.2	-0.855
- 2.6	-0.025	+ 5.2	+0.064	+ 5.0	+0.200	- 6.0	-0.250
+ 8.5	+0.082	+13.5	+0.102	+16.1	+0.650	+ 4.8	+0.203
+19.4	+0.161	+27.5	+0.268	+27.0	+1.005	+14.8	+0.700
+26.4	+0.271	+48.8	+0.464	+36.2	+1.553	+27.2	+1.201
+53.7	+0.380					+38.2	+1.648

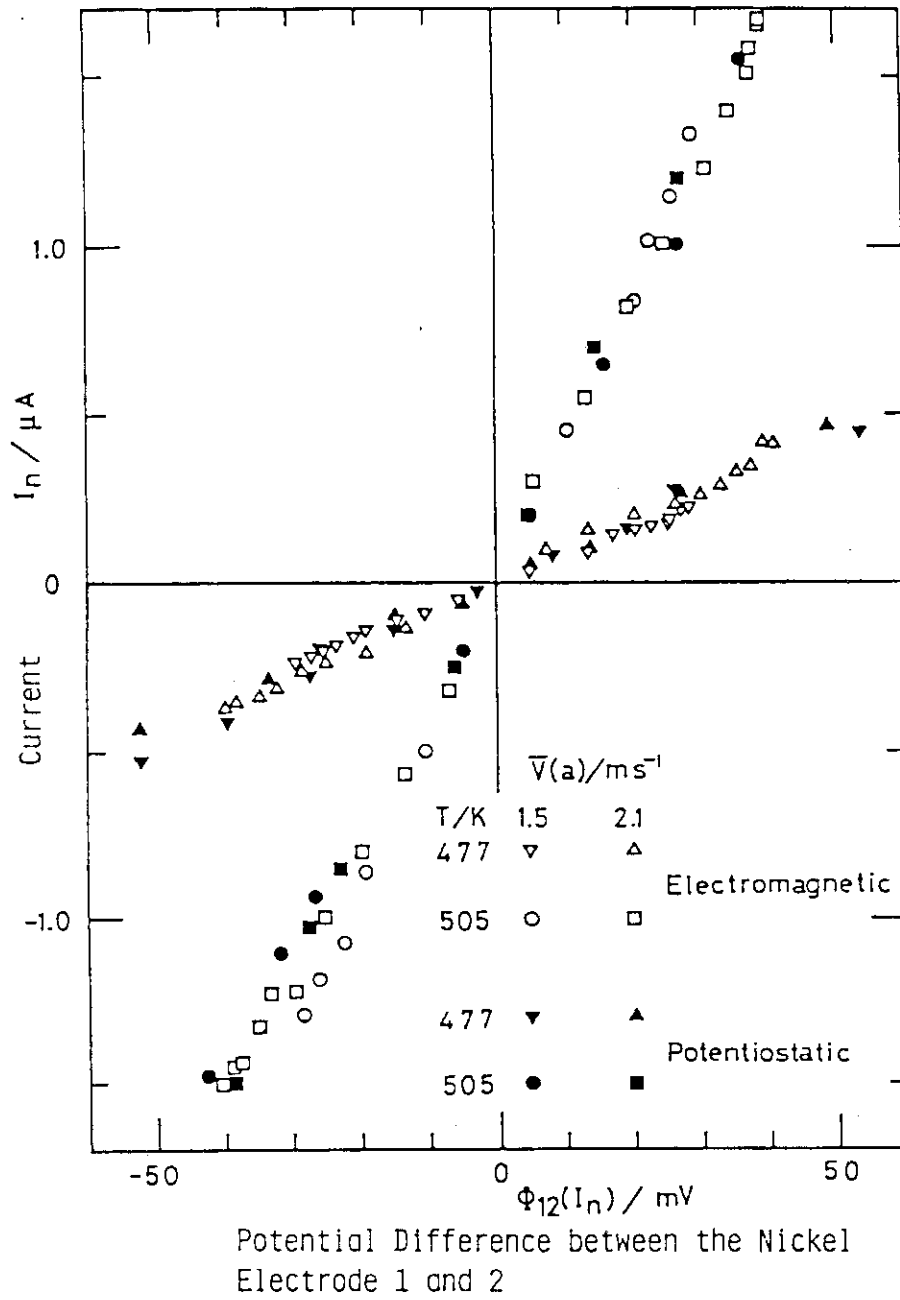


図 5.5 磁場誘起起電力および外部電源による電流-電位特性

の大きさが磁場の影響をほとんど受けないからと思われる。換言すれば、この電流は単に磁場と熔融塩の流れによって生ずる起電力の大きさで決まると言ってもよいであろう。このことから、ニッケル円管中を流れるHTSの磁場による電気化学的腐食の研究は、HTSの流れの中におけるニッケル電極の速度論的研究をその基礎とすればよいことがわかる。そしてこの結果はKelly<sup>(15)</sup>の水溶液を用いた同種の実験の結果とも一致している。次に、電流が平均流速にあまり依存しないことから、この測定領域では拡散などのような流速が反応物質や反応生成物の局所濃度に直接影響を与えるような過程が律速となっていないことが考えられる。アルカリ金属イオン、硝酸イオンおよび亜硝酸イオンの共存する熔融混合物中で白金やニッケルの電極は図5.5のように平衡電位から50mV程度の微小偏移の領域では、ZamboninとJordan<sup>(16)</sup>のポーラログラフ実験やMilesとFletcher<sup>(8)</sup>のサイクリックボルタンメトリから、陽極側では式(5.5)の酸化反応が起き、



熔融塩中での反応平衡、式(5.6)を介して、



陰極側では式(5.7)



で示される還元反応によって電荷移動の大部分が荷われていると考えられる。電極の酸化還元反応がどの程度寄与しているかは今後のループ実験等で明らかにする予定である。

## 6. 結 言

磁場化学効果試験ループによるこれまでの主要な実験結果をまとめると、以下の結論が得られる（以下に示す式中の各物理量の意味や定義はこゝでは既知として省略する。）。

- (1) 白金を内張りしたSUS-316配管と熔融塩HTSの系において、この円管内熔融塩流中に流れに直交する磁場によって誘起する電位 $\phi(r)$ は、管軸中心( $r=0$ )の電位を基準にして、

$$\phi(r) = (Br/2) [\bar{v}_r + \bar{v}_a] \quad (6.1)$$

$0 \leq r \leq a$  (管内径)

で表わされる (§5)。既に電位 $\phi(r)$ に関して金属配管の短絡効果は無視出来、絶縁壁とみなすことが出来る。この結論は

$$\tau \sigma_m \gg a \quad (6.2)$$

の条件を満たす系であれば一般に成立つと考えられる (§2)。

- (2) 絶縁円管内のニッケル電極に流れる電流は、磁場による誘起電位によっても、外部電源によっても過電圧が $\pm 50$  mV以下の範囲では、同一起電力に対して同一電流が流れる。この場合電流は同一起電力に対して熔融塩 (HTS) の温度に依存し、塩流速にはあまり依存しない (§5)。

これらの結果は、磁場による腐食挙動が式 (6.1) で求められる (B に対応する) 電位差を外部電源によって与えても、シミュレート出来ることが示唆されている。

核融合炉ブランケット冷却材として熔融塩を用いる場合、塩としてはFlibe ( $\text{Li}_2\text{BeF}_4$ ) 等の弗化物塩、構造材としてはHastelloy N 等のNi 基合金が使われるものと考えられる。このような系における実用温度領域 (550~700 °C) で、材料共存性におよぼす磁場の効果を解明するため、本報で示したような各種基礎実験を大型ループにより行うことは技術的に大きな困難をともなう。しかし我々のこれ迄行ったHTSによる実験結果から、もはや大型ループによらなくても1/2"管程度の小型ループ、および回転リングディスク電極によるセル実験等を並行して行うことにより充分腐食挙動に関する基礎データは得られるものと考えられる。

## 謝 辞

本研究の実施に当り、熔融塩中の不純物元素の分析を行っていたゞきました日本原子力研究所化学部分析センター 井澤君江氏ならびに電極反応に関する実験を援助され、有益な助言を下された同・分析センター 吉田善幸氏ならびに同燃料工学部プルトニウム燃料研究室 大道敏彦氏に感謝します。最後に流量計の較正に御協力下さいました豊橋科学技術大学 三田地絃史氏に謝意を表します。

## 6 結 言

磁場化学効果試験ループによるこれまでの主要な実験結果をまとめると、以下の結論が得られる（以下に示す式中の各物理量の意味や定義はこゝでは既知として省略する。）。

- (1) 白金を内張りしたSUS-316配管と熔融塩HTSの系において、この円管内熔融塩流中に流れに直交する磁場によって誘起する電位 $\phi(r)$ は、管軸中心( $r=0$ )の電位を基準にして、

$$\phi(r) = (Br/2) [\bar{v}_r + \bar{v}_a] \quad (6.1)$$

$$0 \leq r \leq a \quad (\text{管内径})$$

で表わされる (§5)。既ち電位 $\phi(r)$ に関して金属配管の短絡効果は無視出来、絶縁壁とみなすことが出来る。この結論は

$$\tau \sigma_m \gg a \quad (6.2)$$

の条件を満たす系であれば一般に成立つと考えられる (§2)。

- (2) 絶縁円管内のニッケル電極に流れる電流は、磁場による誘起電位によっても、外部電源によっても過電圧が $\pm 50$  mV以下の範囲では、同一起電力に対して同一電流が流れる。この場合電流は同一起電力に対して熔融塩 (HTS) の温度に依存し、塩流速にはあまり依存しない (§5)。

これらの結果は、磁場による腐食挙動が式 (6.1) で求められる (B に対応する) 電位差を外部電源によって与えても、シミュレート出来ることが示唆されている。

核融合炉ブランケット冷却材として熔融塩を用いる場合、塩としてはFlibe ( $\text{Li}_2\text{BeF}_4$ ) 等の弗化物塩、構造材としてはHastelloy N 等のNi 基合金が使われるものと考えられる。このような系における実用温度領域 (550~700 °C) で、材料共存性におよぼす磁場の効果を解明するため、本報で示したような各種基礎実験を大型ループにより行うことは技術的に大きな困難をともなう。しかし我々のこれ迄行ったHTSによる実験結果から、もはや大型ループによらなくても1/2"管程度の小型ループ、および回転リングディスク電極によるセル実験等を並行して行うことにより充分腐食挙動に関する基礎データは得られるものと考えられる。

## 謝 辞

本研究の実施に当り、熔融塩中の不純物元素の分析を行っていただきました日本原子力研究所化学部分析センター 井澤君江氏ならびに電極反応に関する実験を援助され、有益な助言を下された同・分析センター 吉田善幸氏ならびに同燃料工学部プルトニウム燃料研究室 大道敏彦氏に感謝します。最後に流量計の較正に御協力下さいました豊橋科学技術大学 三田地紘史氏に謝意を表します。



## 参 考 文 献

- (1) Uchiyama, Y. and Kawamura, K., J. Chem. Eng. Data, 26, 407 (1981).
- (2) 加藤義夫, 溶融塩, [1.24] No. 2, (1981).
- (3) 西方 篤, 沼田博雄, 春山志郎, 日本金属学会誌, [6], 610 (1981).
- (4) Coulson, J.M. and Richardson, J.F., "Chemical Engineering", Pergamon Press, London, 79 (1959).
- (5) Samsonov, G. V. (ed.), "Hand book of the Physico-chemical Properties of the Elements", IFI/Plenum, New York, 283 (1968).
- (6) Morey, G. W., "The Properties of Glass", 2nd ed., Reinhold Publishing Corp., New York, 292 (1954).
- (7) Miles, M. H. and Fletcher, A. N., J. Electrochem. Soc. [8] 1761 (1980).
- (8) Tsunekawa, K., Kawamura, K., Kato, Y. and Furukawa, K., Denki Kagaku, [3], 317 (1983).
- (9) Samsonov, G. V. (ed), "Hand book of the Physico-chemical Properties of the Elements", IFI/Plenum, New York 282 (1968).
- (10) Boyd, D. C. and Thompson, D. A., "Glass", Corning Glass Works, New York, 828 (1980).
- (11) Shercliff, J. A. AERE X/R 1052 (1952).
- (12) Tsunekawa, K., Kawamura, K., Kato, Y. and Furukawa, K., Proc. First Int. Symp. Molten Salt Chem. Tech., Kyoto, 107 (1983).
- (13) Kaye, G. W. C. and Laby, T. H. "Physical and Chemical Constants and Some Mathematical Functions", Longmans, Green and Co., London-New York, 90 (1956).
- (14) Gardner, R. A. and Lykoudis, P. S., AIAA Paper No. 69-723. (1969).
- (15) Kelly, E. J., J. Electrochem. Soc., [7] 987 (1977).
- (16) Zambonin, P. G. and Jordan, J., J. Am. Chem. Soc., [9] 2225 (1969).