

送油式変圧器における流動帯電現象

Flow Electrification in Forced Oil Cooled Transformers

送油式変圧器で、油を流動させることにより油及び絶縁物が帯電(以下、流動帯電現象と略す。)し、外部から電圧を与えなくても局所的な高電界部位を生じて油中放電を起こすことがある。

製品の信頼性向上を目的として、要素モデル、実規模試作変圧器により各種実験を実施し、流動帯電現象の基礎特性、変圧器内の電荷分布、油中放電限界とその発生部位などを確認した。実規模試作変圧器では、送油量を定格送油量の4倍にしたとき、油中放電が発生した。

更に、流動帯電現象に対する直流電位分布を解析するプログラムを開発し、製品について設計段階での油中放電に対する裕度の確認と適切な対策を可能とした。

平石清登* Kiyoto Hiraishi

桧垣 勝** Masaru Higaki

大谷弘容* Hiroyasu Ootani

川田陽亮* Yōichi Kawada

1 緒 言

油が固体と接触するときその界面で電荷分離が生ずる。この油が流動するとき一方の電荷が持ち去られ、他方の電荷は固体側に残される。これは、いわゆる流動帯電現象として石油産業の分野でよく知られている。^{1)~3)}

近年、変圧器の大容量化、超々高圧化が進められてきた。大容量化に伴い循環油量が増大し、超々高圧化に対処するため絶縁物が多量に使用される。流動帯電現象の面からみると電荷の発生を促し、かつ発生した電荷が逃げにくい傾向になってきていることを意味する。変圧器内部に多量の電荷が蓄積されると直流電位が高くなり、油中放電を起こすことがある。しかし、変圧器に関してこれらの定量的な解析や油中放電の可能性まで検討した例はない。

日立製作所では、製品について流動帯電現象に起因するトラブルはないが、特に信頼性の確保とその向上を目的として、要素モデル、実規模試作変圧器を用い現象解明と放電防止の研究を進めてきた。^{4),5)}

以下、その要点について紹介する。なお日立製作所では内鉄形変圧器が代表的であり、これらの研究は内鉄形を対象として行なったものである。

2 流動帯電現象の基礎特性

変圧器内部での流動帯電現象をより正確に把握するためには、その現象の基礎特性を確認しておかなければならない。電荷の発生に影響を与える要素、例えば油の流れの状態、油道の材質や大きさ、形状、交流課電の有無、油の種類などをパラメータにして、要素モデルにより各種の実験を実施した。それらの結果の一部について述べる。

2.1 流れの状態と電荷発生量

図1に最も基礎的な特性である流れの状態と電荷発生量との関係を、図2に実験に使用されたモデルの構造を示す。モデルはプレスボードにより油道を構成している。

図1の横軸は流れの状態を示す指標としてレイノルズ数、縦軸は油道の外側に取り付けられた電極からの対地漏れ電流である。対地漏れ電流は負極性であり、これから油側に正電荷が分離されていることが分かる。電荷は層流域ではレイノルズ数に比例して、乱流域ではその約二乗に比例して増加する。

電荷の発生を抑制するために、流れをできるだけ滑らかにすることが望ましい。例えば、油道入口部の角をとって油道入口部での局所的な渦の発生を防ぐことにより、電荷の発生量は数分の一に低減する。

2.2 交流電界と電荷発生量

変圧器運転時、巻線には常時交流電界がかかっている。したがって、交流電界の流動帯電現象に及ぼす影響を確認する必要がある。図3は図2と同種の要素モデルを用いて、交流電界による電荷発生量の増加の割合を調査したものである。

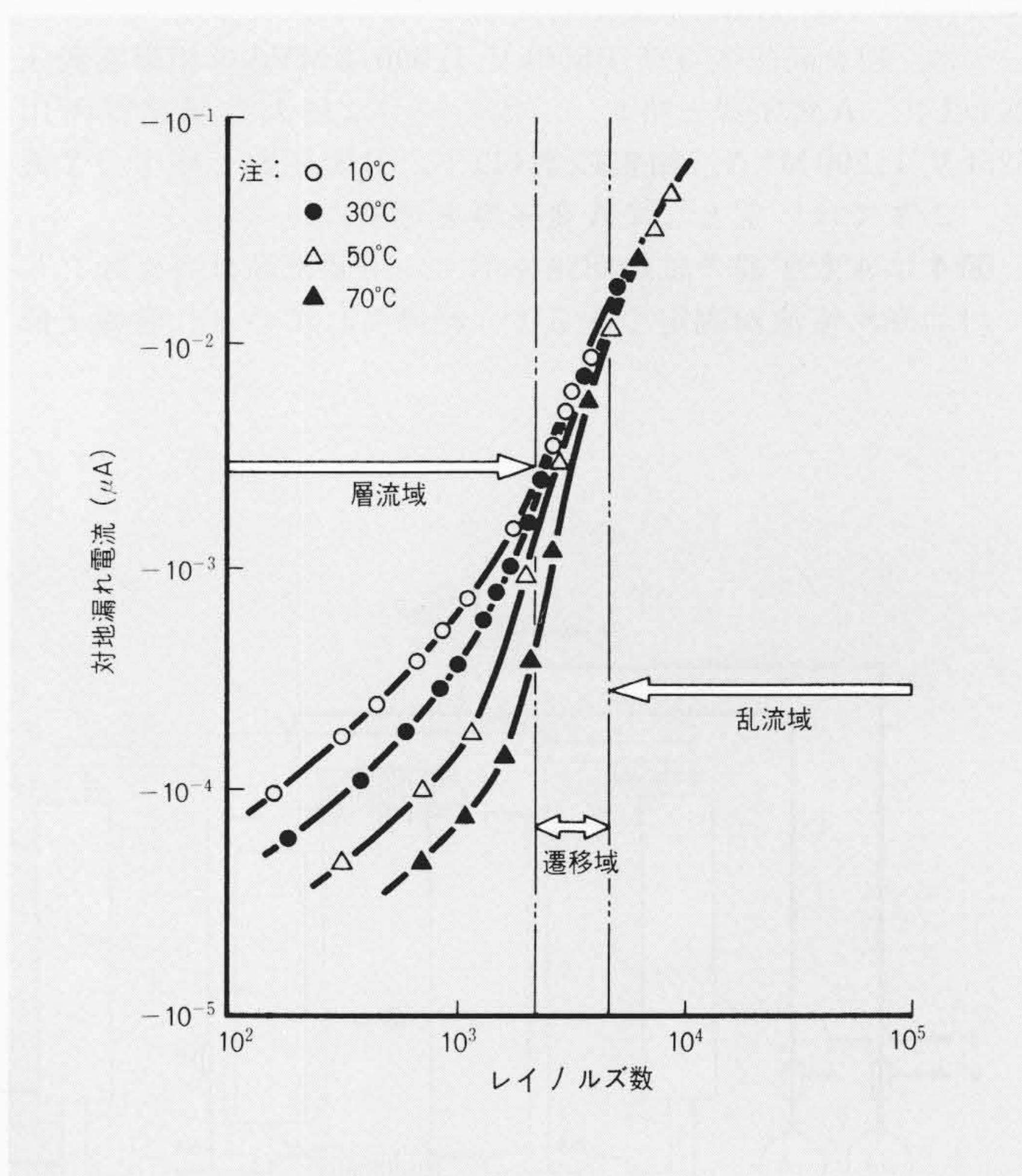


図1 流れの状態と電荷発生量 電荷は層流域ではレイノルズ数に比例して、乱流域では約二乗に比例してそれぞれ発生する。

* 日立製作所国分工場 ** 日立製作所日立研究所

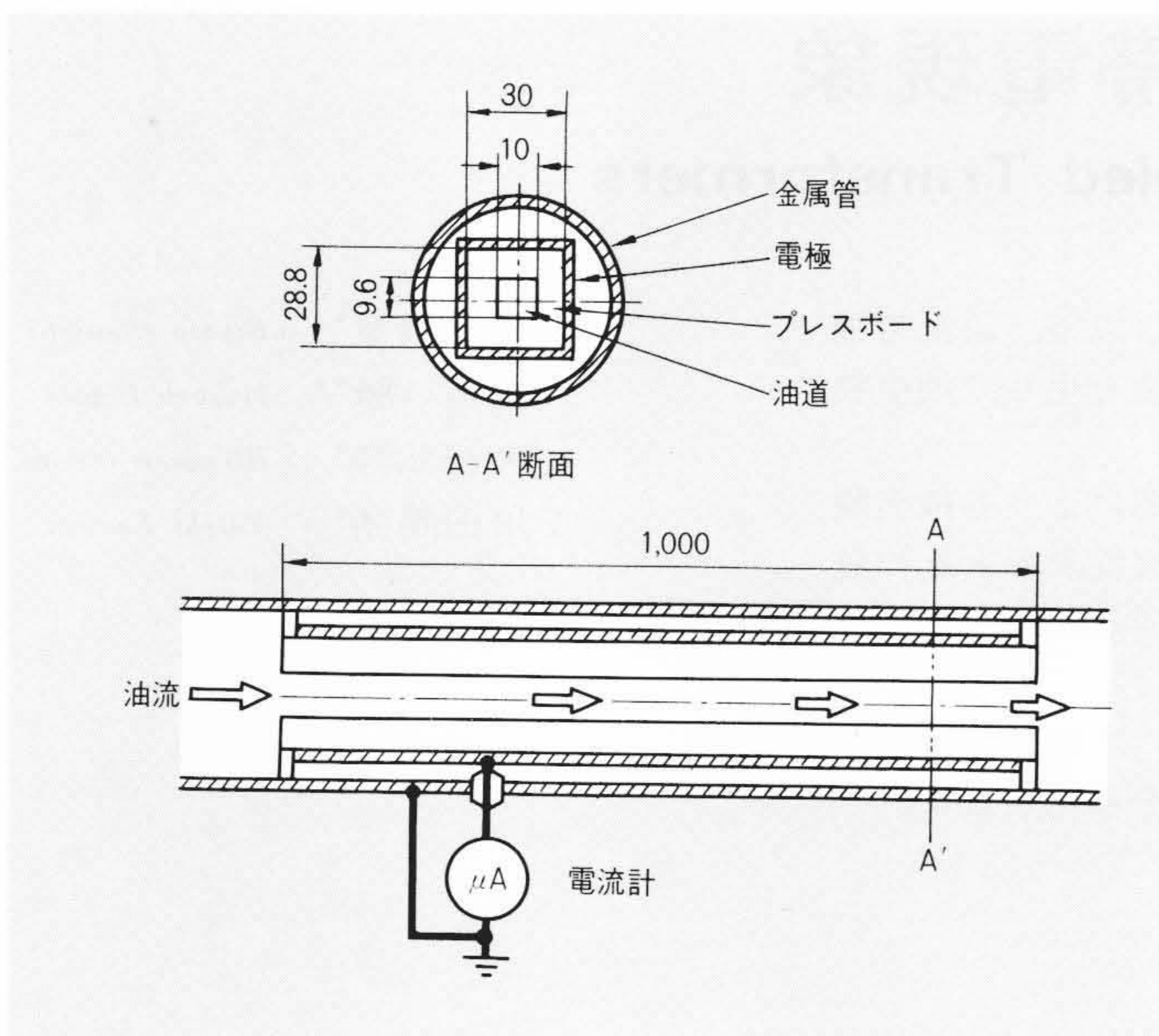


図2 プレスボードパイプモデルの構造 流れの状態と電荷発生量の関係調べるために、プレスボードで油道を構成したモデルを用いた。

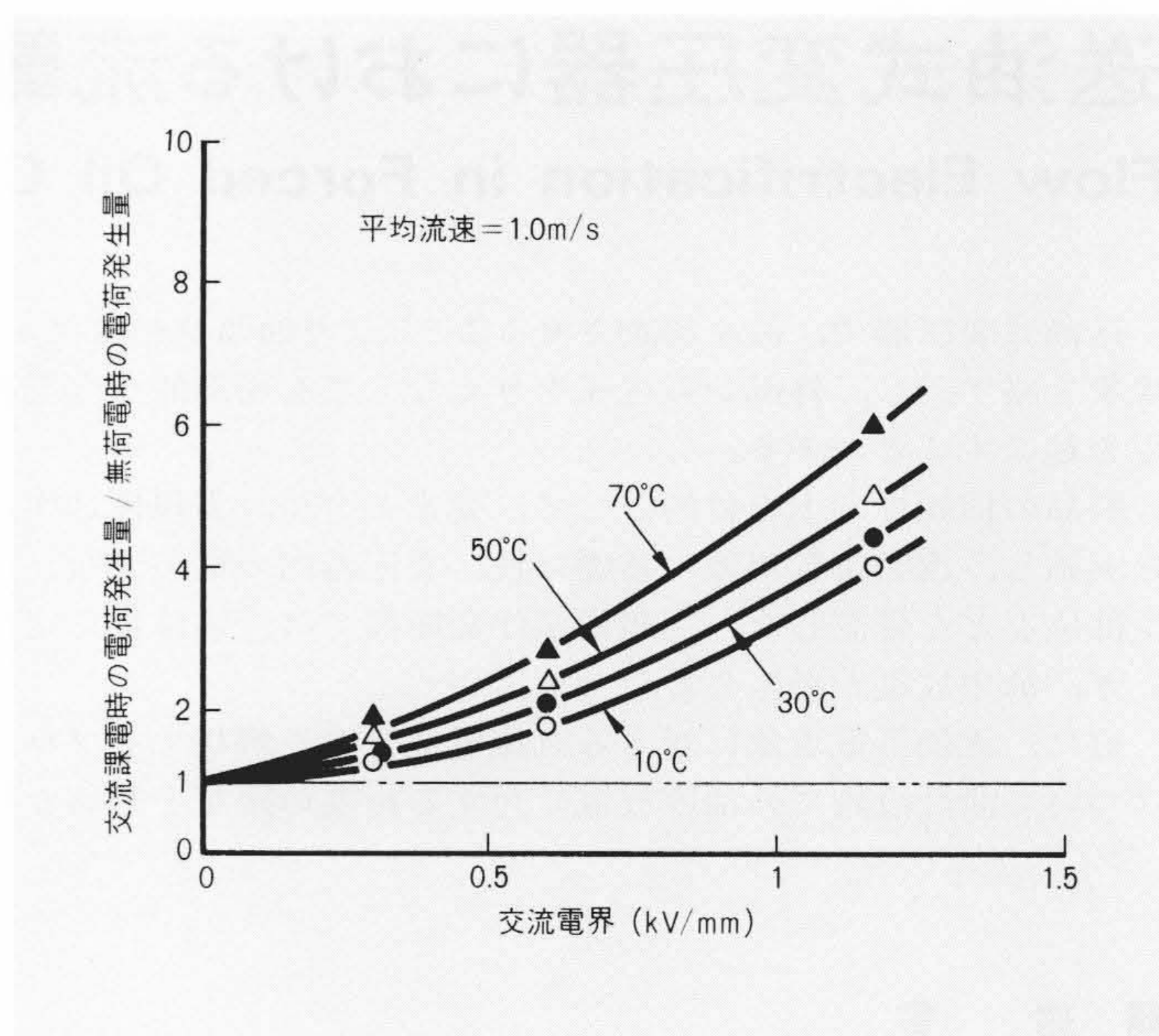


図3 交流電界と電荷発生量 交流電界が高くなると、電荷発生量も増加する。

交流電界が高くなると電荷発生量も増加し、油温が高いほどその傾向が大きい。製品では交流電界の高い部分の流速は十分制御しなければならない。

3 変圧器における流動帯電現象

変圧器内部の電荷分布やそれに及ぼす交流課電、冷却器の影響、更に油中放電限界とその発生部位などを確認するために、二つの実規模試作変圧器を用いて実験を行なった。その一つは、超々高圧変電所用500kV 1,000/3MVA単相単巻変圧器（以下、A変圧器と略す。）、他の一つは超大容量発電所用525kV 1,200MVA三相変圧器（以下、B変圧器と略す。）である。ここでは、主としてA変圧器を対象に述べる。

図4にA変圧器の試験回路を示す。主要部品は各々独立して対地漏れ電流が測定できるよう絶縁されている。巻線下部

絶縁物油道近辺には多数のセンサを取り付け、電荷発生状況がミクロに観測できるようにした。各部の油中電荷密度は球電極を用いて測定した。特に、油中放電発生限界確認のため、定格送油量の4倍まで送油量を増やせる装置とした。

3.1 電荷分布

図5はA変圧器の各部の電流の温度特性を示す。冷却器出口での流動電流（油中電荷密度と送油量の積）は、他の部位の電流に比べて大きい。冷却器出口及び送油ポンプ出口の各流動電流並びに鉄心及び鉄心締付金具の対地漏れ電流は、高温領域での特性は少し異なるが全体的にはほぼ同じ温度特性を示す。巻線の対地漏れ電流は少なく、高温領域で若干プラス側に増える傾向を示す。

図6に、実験結果をもとに変圧器内の電荷分布を求めて示した。冷却器で油中に正電荷が発生し、この正電荷は送油ポ

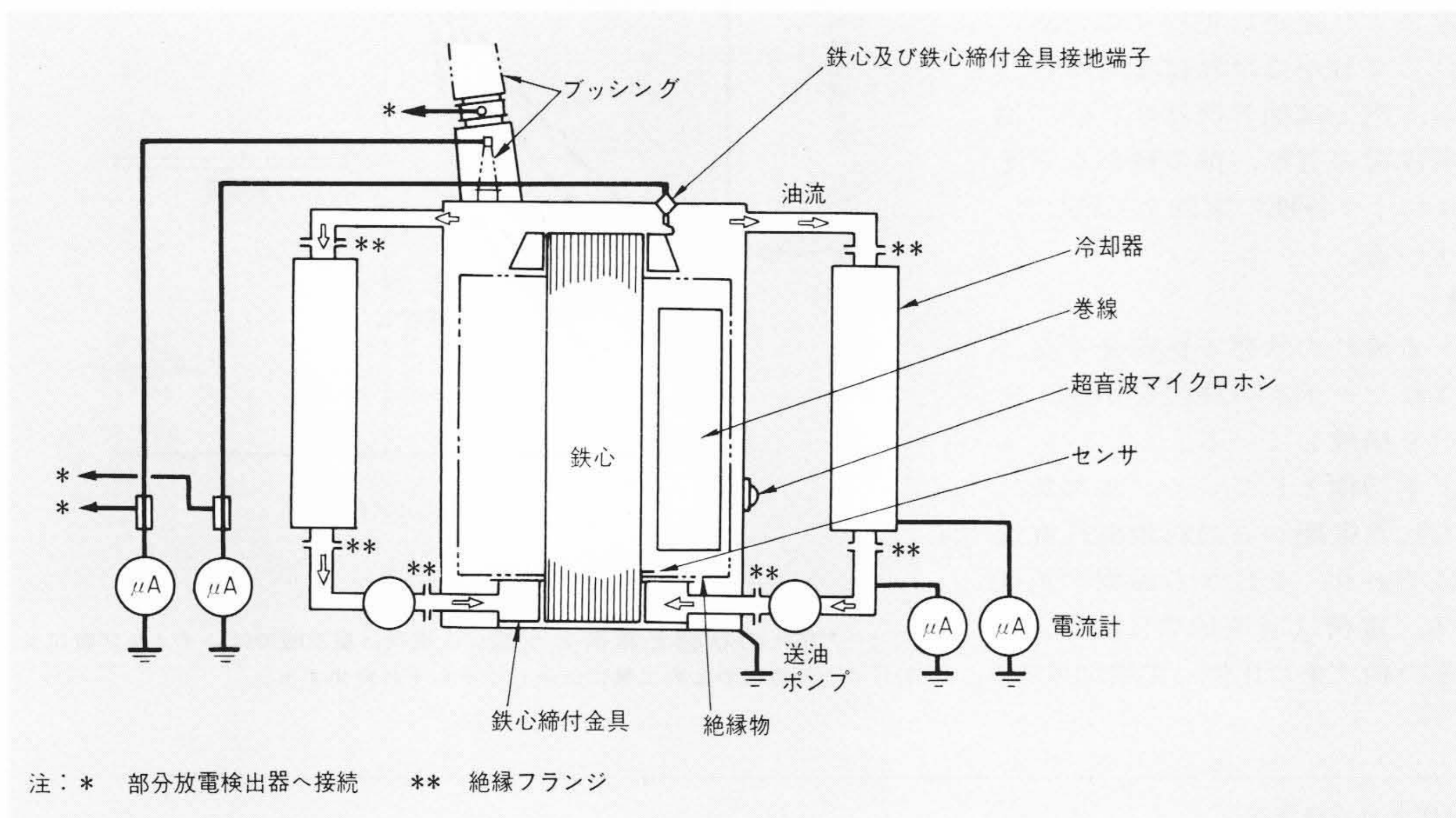


図4 A変圧器の試験回路 巻線、鉄心及び鉄心締付金具、冷却器、送油ポンプなどは、各々独立して対地漏れ電流が測定できるよう絶縁した。

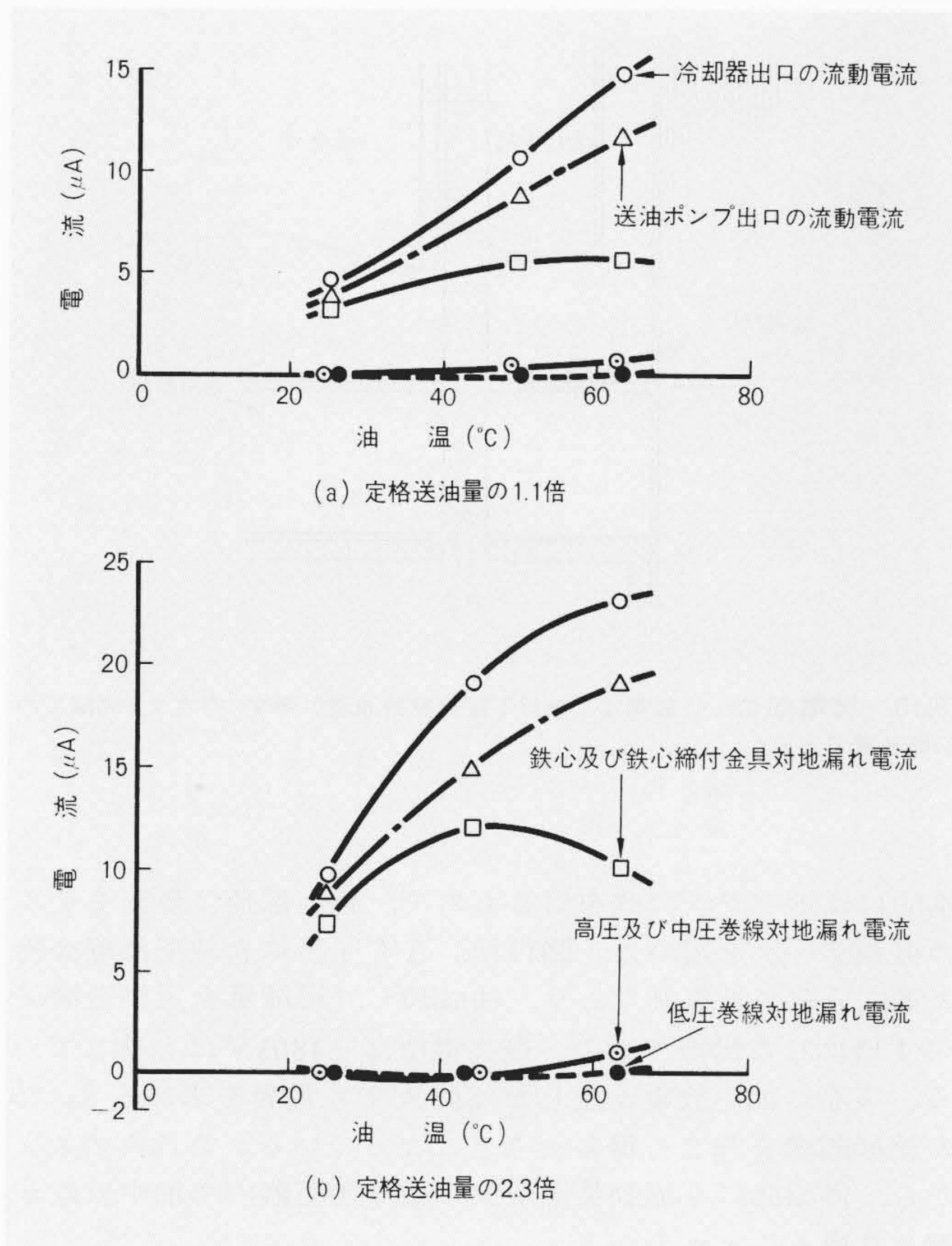


図5 A変圧器の各部電流の温度特性 冷却器出口及び送油ポンプ出口の各流動電流、並びに鉄心及び鉄心締付金具の対地漏れ電流に比べ、巻線の対地漏れ電流は少ない。

ンプ、配管内で一部緩和した後、鉄心締付金具に入る。鉄心締付金具内の流速は遅いので大部分はここで緩和し、一部が絶縁物油道を通して巻線に流入する。絶縁物油道でも電荷分離が起き、油中に発生した正電荷は油とともに巻線へ流入し、絶縁物表面には負電荷が残る。巻線内でも電荷分離が生ずるが、巻線に入ってくる油中正電荷が緩和し、重畳され巻線対地漏れ電流となる。巻線上部から出た油中正電荷は、流速が遅いためタンクやカバーに緩和し、ほとんど帯電していない油が冷却器にもどり循環を繰り返す。

別の実験結果によれば、電荷発生量の異なる冷却器を取り付けた場合でも巻線の対地漏れ電流は冷却器での発生量に比べて小さく、その差異は顕著ではない。冷却器で発生した電荷の大部分は、巻線に入る前に鉄心締付金具で緩和されるからである。

図7に巻線対地漏れ電流の一般的な傾向を示す。後述するが、絶縁物油道での電荷発生量は油温が高くなるほど多い。このため、巻線に流れ込む電荷分 I_1 も高温側にピークがあり、巻線対地漏れ電流 I は高温側でプラス側に増加する。しかし、各変圧器の仕様、構造によって各部分での電荷発生量の大きさが相違するため、巻線対地漏れ電流 I の絶対値、ピークとなる油温、あるいはマイナスからプラスに変化する油温などは各変圧器特有の値となる。

3.2 交流電界の影響

要素モデルによれば、交流課電により電荷発生量は増加する。図8は、B変圧器で交流課電の巻線対地漏れ電流に与える影響を調査したものである。対地漏れ電流のうち、交流成

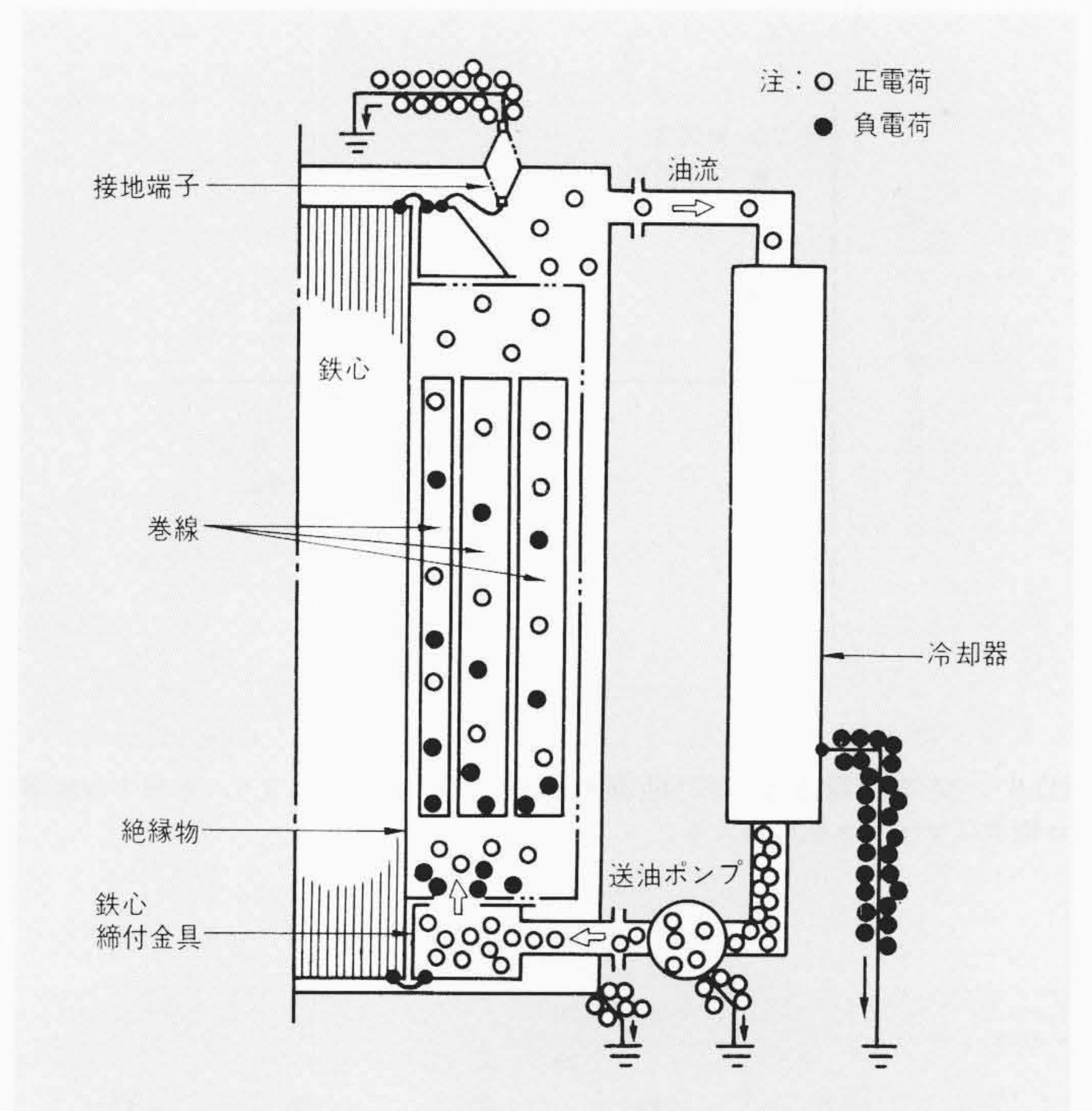


図6 変圧器の電荷分布 冷却器から鉄心締付金具に入った正電荷は、大部分はここで緩和し、一部が絶縁物油道を通して巻線に入る。

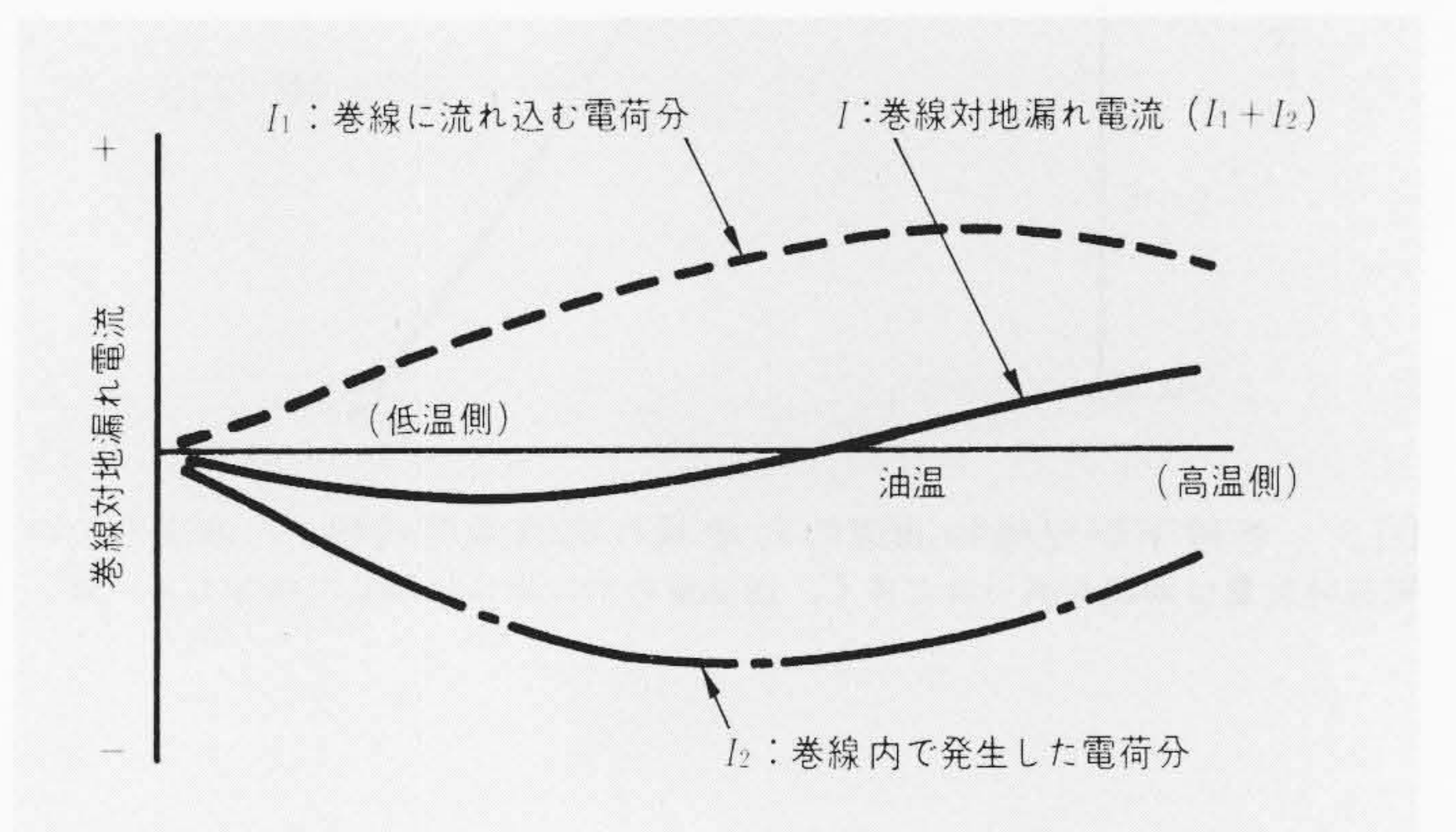


図7 巻線対地漏れ電流の一般的な傾向 変圧器の仕様、構造によって各部分での電荷発生量の大きさが相違するため、ピークとなる油温やマイナスからプラスに変化する油温などは、各変圧器特有の値となる。

分はフィルタによりカットされている。交流課電することにより、巻線の対地漏れ電流はマイナス側に増えている。すなわち、交流電界が高い巻線での電荷の発生量が増えたためである。

一方、巻線下部絶縁物油道は接地された金属物に近く、電界は巻線の数分の一である。実験結果も、この部分は巻線に比べ交流課電の影響が少ないことを裏付けており、後述する電位分布の計算によっても、このことは確認されている。

3.3 巻線下部絶縁物油道の発生電荷

巻線下部絶縁物油道部の流速は、巻線内や巻線上部に比べて速い。絶縁物の使用量も多いことから、この部分の特性は特に詳細に確認しなければならない。

図9に、A変圧器の巻線下部絶縁物油道近辺に挿入されたセンサの対地漏れ電流の温度特性を示す。この電流は、油道

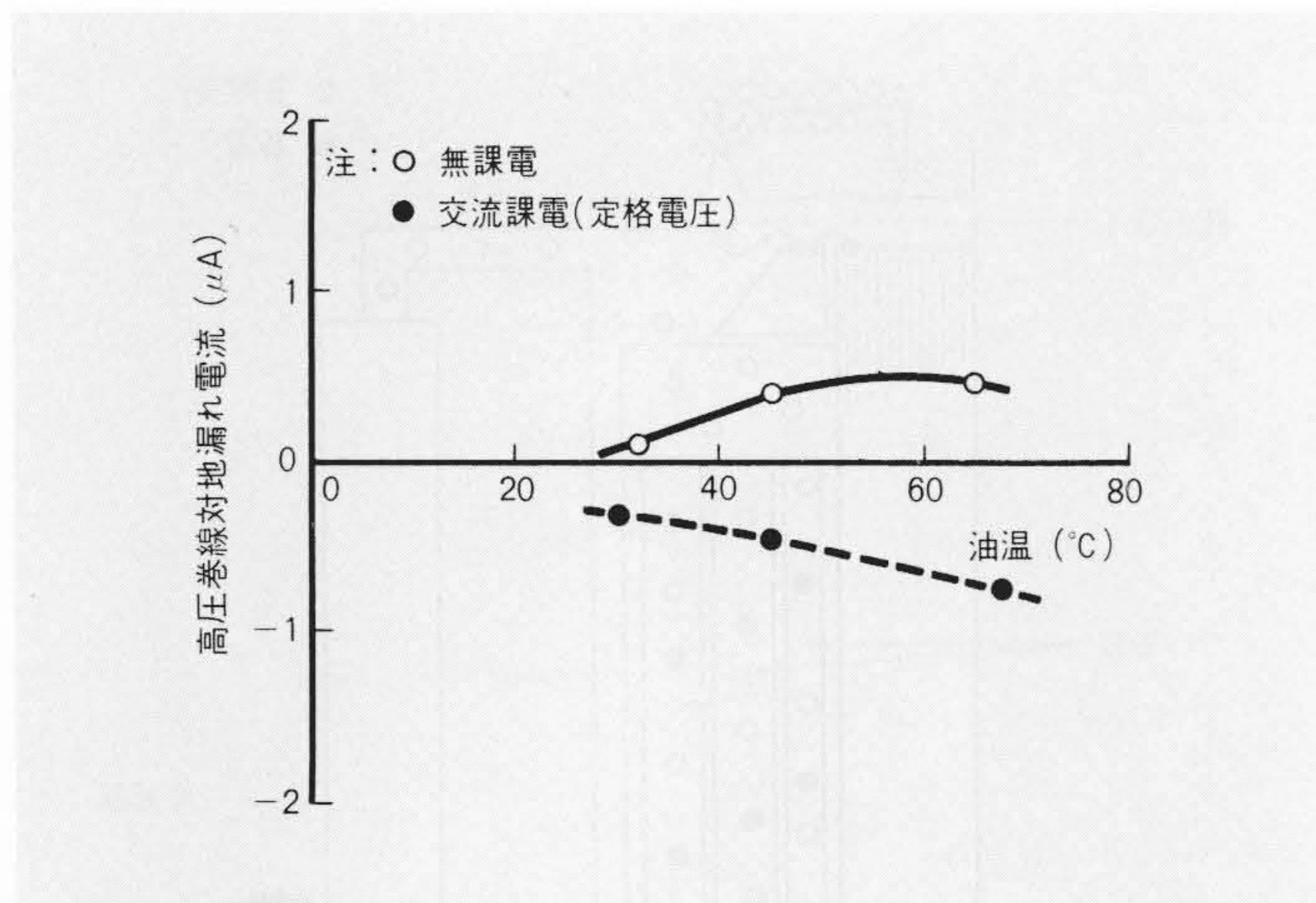


図8 交流課電と巻線対地漏れ電流 交流課電により、巻線の対地漏れ電流はマイナス側に増える。

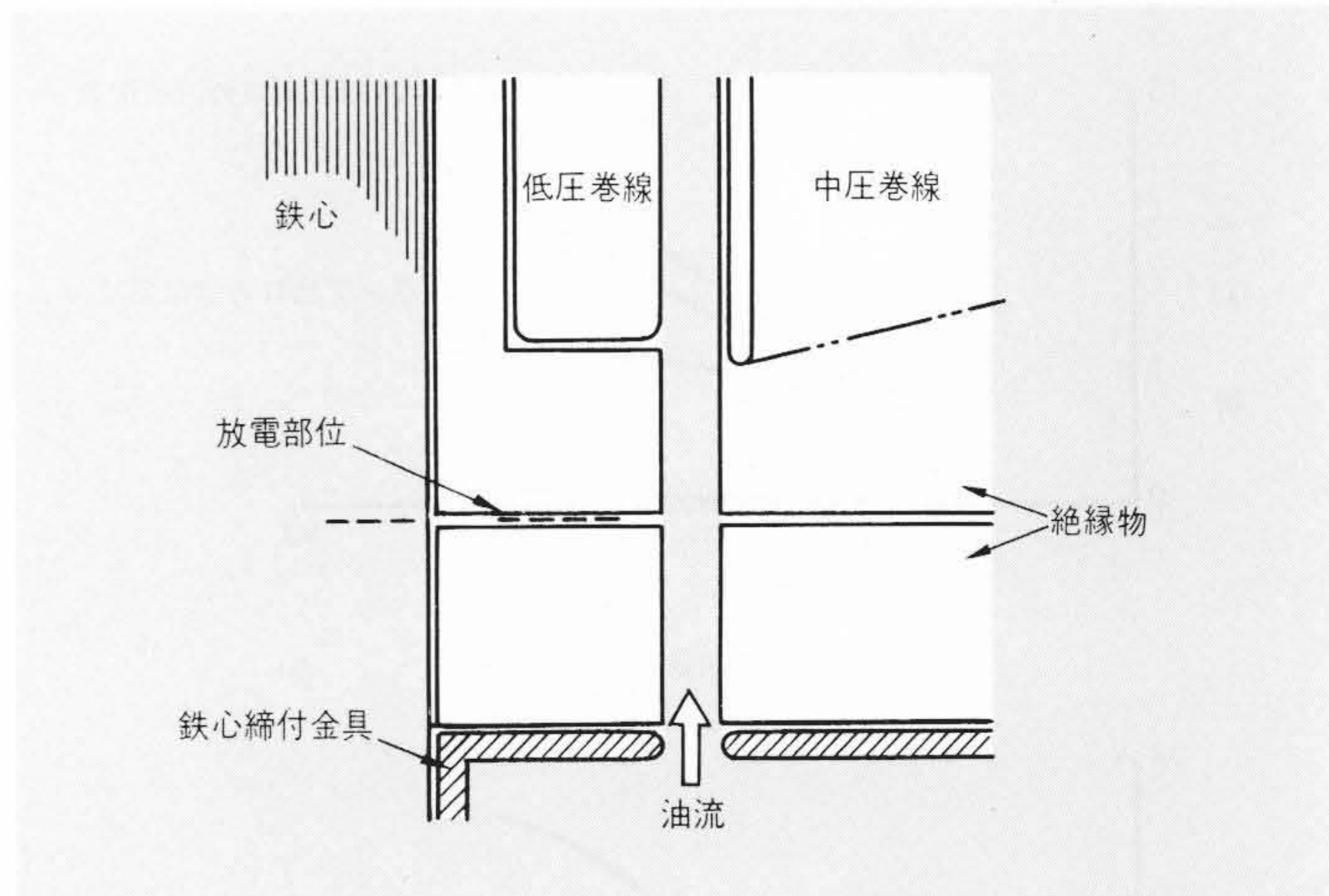


図10 放電部位 放電は、巻線下部絶縁物油道の層間に存在する油隙での沿面放電であった。

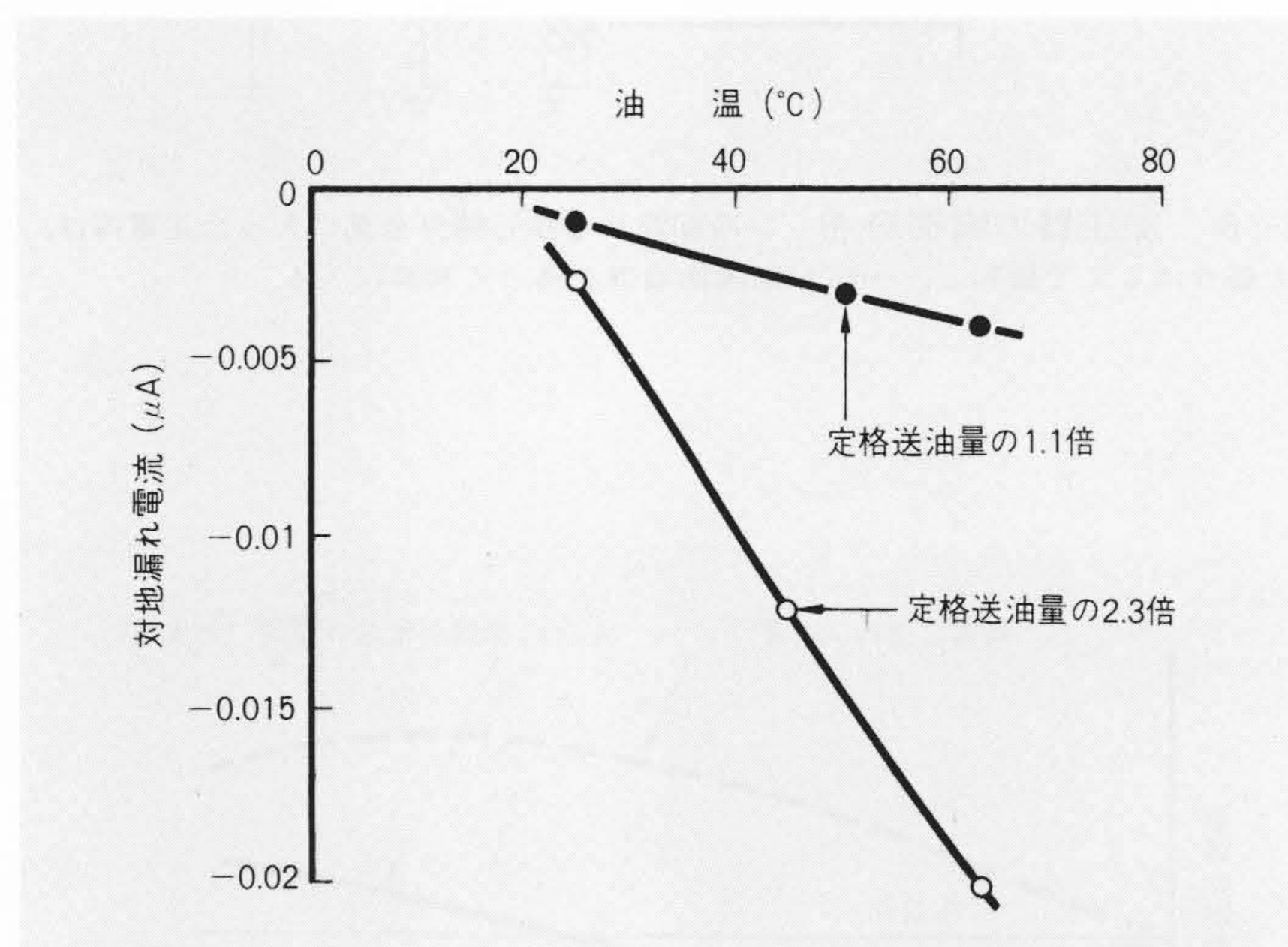


図9 巻線下部絶縁物油道の対地漏れ電流温度特性 油道内での電荷発生量は油温が高いほど多く、送油量の約二乗に比例して増加している。

壁に残った負電荷が大地に対して漏れる電流の一部である。油道内での電荷発生量は油温が高いほど多く、送油量の約二乗に比例して増加している。この部分で送油量が更に増えると油道壁での帯電電荷量が急増し、高い直流電位による油中放電の可能性が考えられる。

3.4 油中放電

A変圧器で、送油量を定格送油量の4倍にしたとき初めて油中放電が検出された。放電の大きさは $10^4 \sim 10^6$ pcと非常に大きく鋭い可聴音で、一度発生するとその頻度は増加する。

図10は放電の発生位置を示したもので、巻線下部絶縁物油道の層間に存在する油隙での沿面放電であった。なお、その他の部分での油中放電は検出されなかった。

4 油中放電の予測

油中放電は、油にかかる電界が油の絶縁破壊強度を超えたときに起こる。したがって、油中放電の発生を予測するには、直流電位の分布を知る必要がある。

今回、日立製作所は流動帯電現象により発生した電荷が蓄積したときの電位分布を解析するプログラムを開発した⁵⁾。基

本的にはポアソンの式を解くもので、発生電荷は要素モデルの実測データを用いた。図11は、A変圧器の巻線下部絶縁物の電位分布の計算例であり、油温30°C、送油量を定格送油量の4倍にした場合である。最高電位は-480kVにも達している。実際に油中放電が生じた部位Aでの電界を求めると、油が絶縁破壊を起こし得る大きさになっている。これらのことから、理論的にも流動帯電現象により変圧器内で油中放電が起こり得ることが分かる。

図12に、A変圧器で検証した油中放電の発生条件、及び油の絶縁破壊強度を 10kV/mm^6 として本解析プログラムで求めた放電限界を示す。実測結果と計算結果とは比較的よく一致している。これらの結果から、油中放電を起こすのに要する送油量の値が油温によって異なり、ある油温で最少値を示す特性となることが分かる。

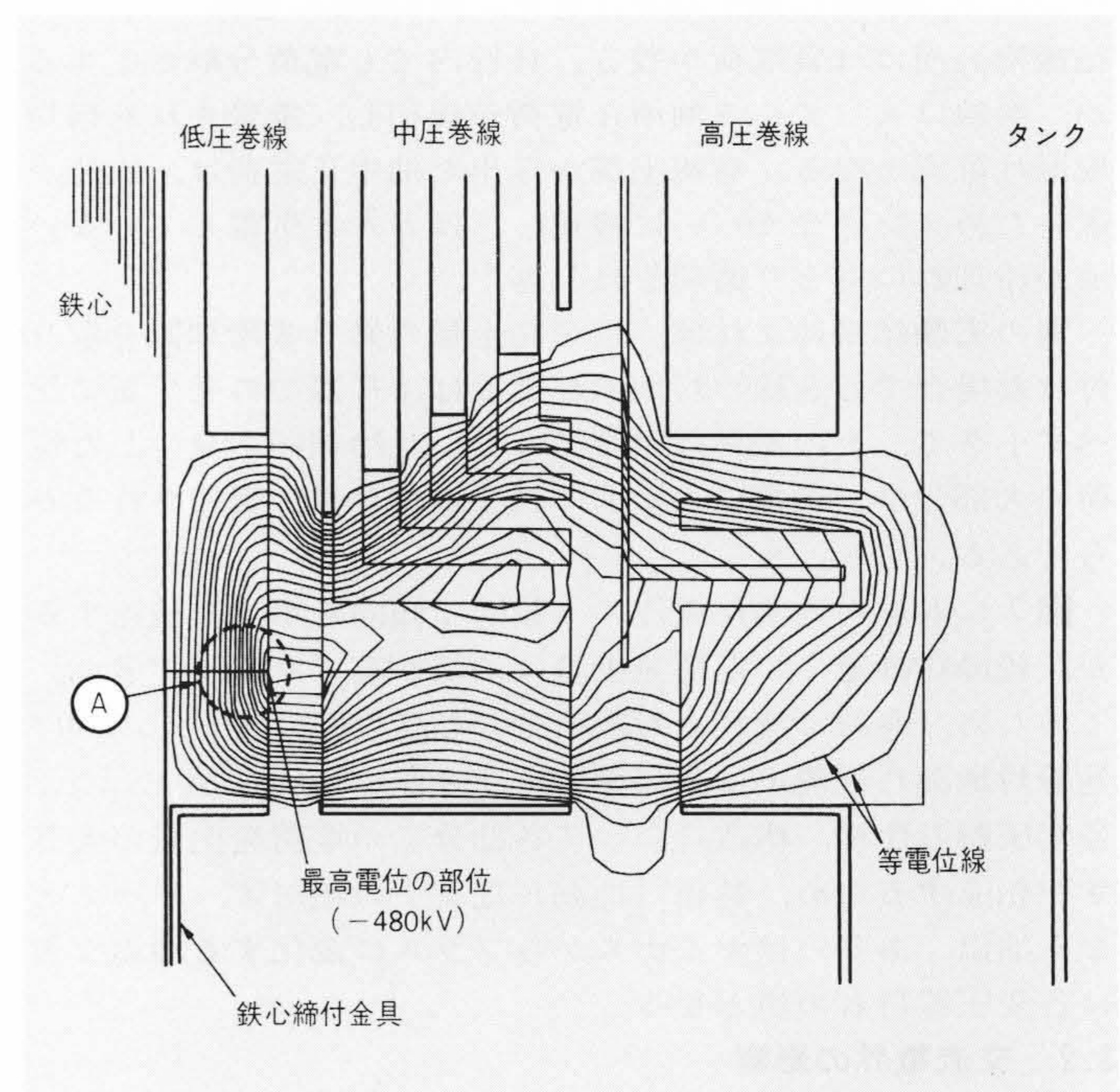


図11 巻線下部絶縁物の電位分布 電荷が蓄積したときの電位分布を解析するプログラムを開発した。放電した部位での電界を求めると、油が絶縁破壊を起こし得る大きさになっている。

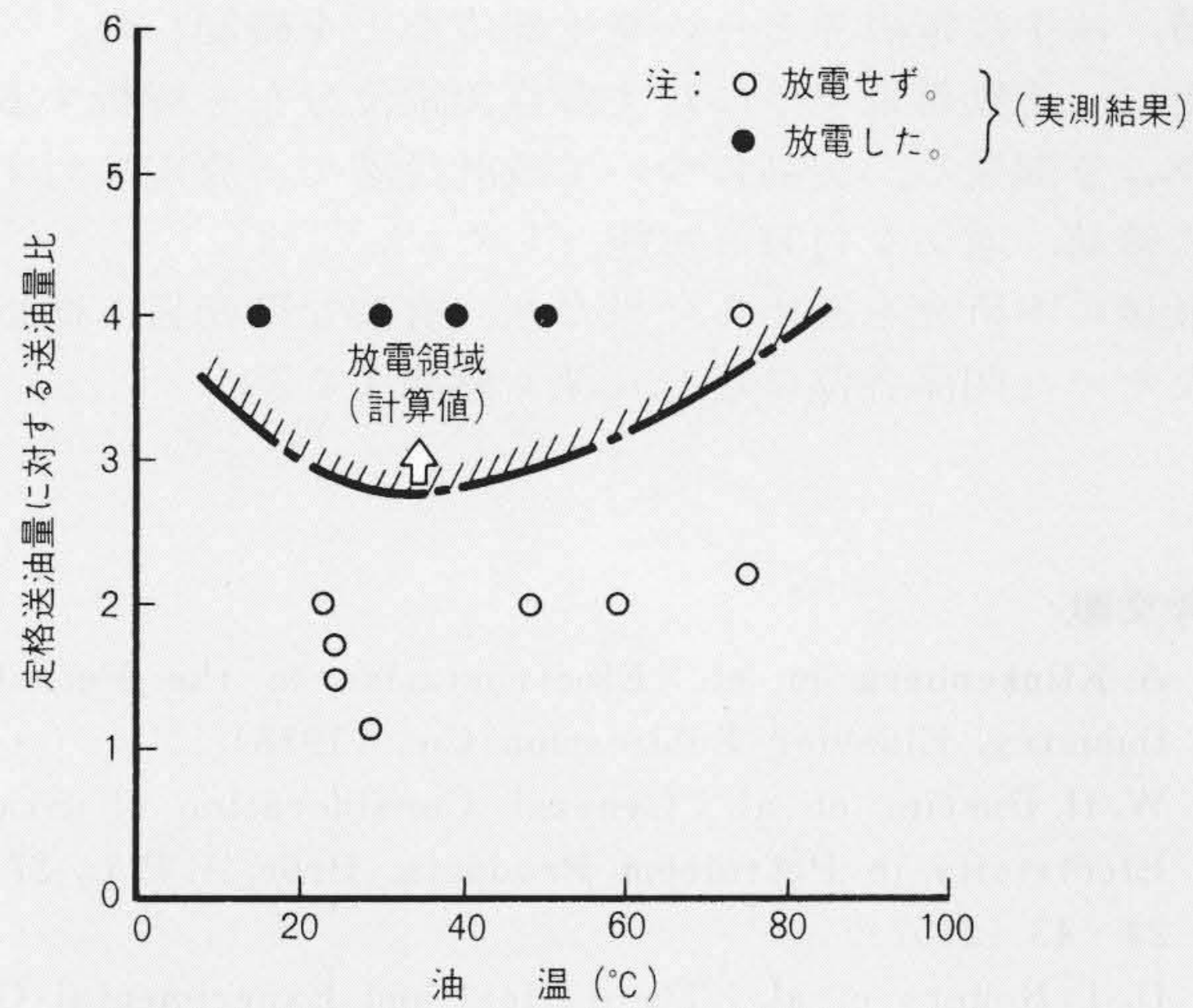


図12 放電限界 A変圧器での油中放電の発生条件(実測結果)と本解析プログラムで求めた放電限界とを示す。

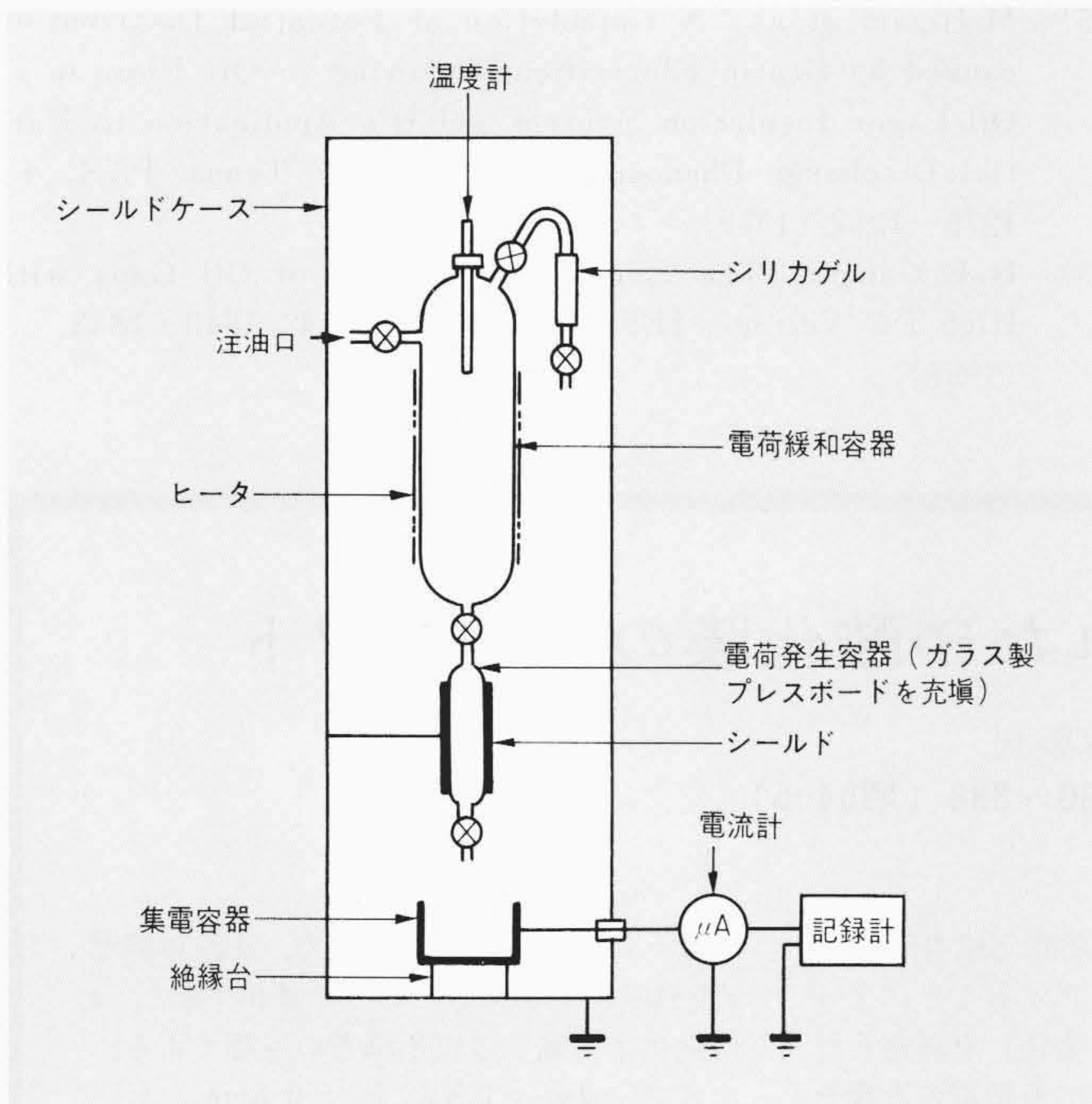


図13 油帯電度測定装置 規定のプレスボードを充填した電荷発生容器を供試油が通過するとき発生する電荷量を測定し、相対比較を行なう。

5 対策

以上述べたように、流動帯電現象に対する電位分布の計算が可能となった。これにより製品に対しても設計段階で放電を起こしやすい部位、あるいは放電に対する裕度を予測し、適切な対策を講ずることができるようになった。

対策としては、油道、絶縁物の構造を適正にして流速を制御すること、流路長を最短とすること、あるいは流れをできるだけ滑らかにして電荷の発生を抑制すること、更に発生した電荷による電界を油隙部に集中させないことなどの工夫が必要である。

油についても電荷の発生のしやすさ、すなわち油帯電度に限界を設けて使用している。図13は日立製作所で開発した油帯電度測定装置で、規定のプレスボードを充填した電荷発生容器を供試油が通過するとき発生する電荷量を測定し、相対比較を行なうものである。

6 検証

以下に述べる方法により、変圧器内部で流動帯電現象による油中放電が生じていないことを検証している。

流動帯電現象により油中放電が生じたとき、放電に伴う電気パルスと音パルスが同時に発生する。電気パルスはブッシングのポテンシャルタップを介してERA部分放電検出器などにより、音パルスはタンク壁に取り付けた超音波マイクロホンにより検出する。試験中に、ノイズすなわち流動帯電現象と関係のない電気パルスや音パルスが独立して検出されることがある。これらとの識別を行なうために、電気パルスと音パルスが同期して検出された場合にだけ警報を発生させる、あるいは記録させるという方法をとっている。

上記のほか、巻線対地漏れ電流を測定し、流動帯電現象による油中放電に対して余裕のあることを確認することもある。

図14に検証試験回路例を示す。

7 予防保全

運転中の製品に対する予防保全法としては下記の方法がある。

- (1) 油の帯電度の測定
- (2) 油中ガス分析
- (3) 部分放電試験

(1)の方法は、製品から油を採油し、帯電度を測定し、経年的に電荷を発生しやすい油に変質していないかを調べるものである。

(2)の方法は、油中放電により油が分解したときに主に発生する水素やアセチレンを検出し、異常の有無を判定するものである。

(3)は、検証試験の場合と同じくERA部分放電検出器や超音波マイクロホンを用いて電気パルス、音パルスを検出するものである。ただし製品が運転中であるため、電気パルスは中性点接地リード線にロゴスキーコイルを巻き付けて、これから検出する方法が適用される。中性点から巻線対地漏れ電流の直流成分をとらえ、その変化を調査する方法もあるが、運

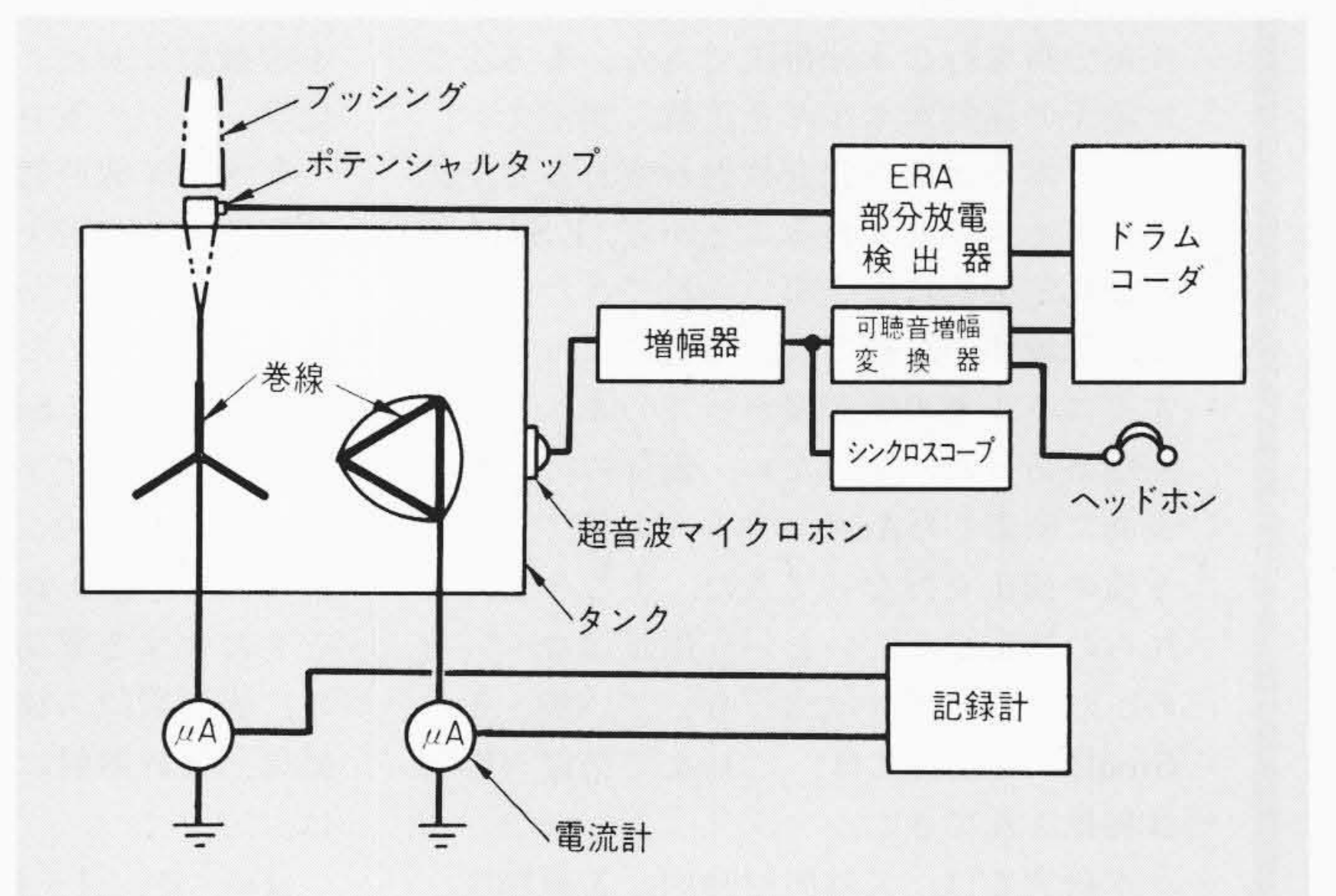


図14 検証試験回路例 放電に伴う電気パルスはERA部分放電検出器により、音パルスは超音波マイクロホンによりそれぞれ検出する。

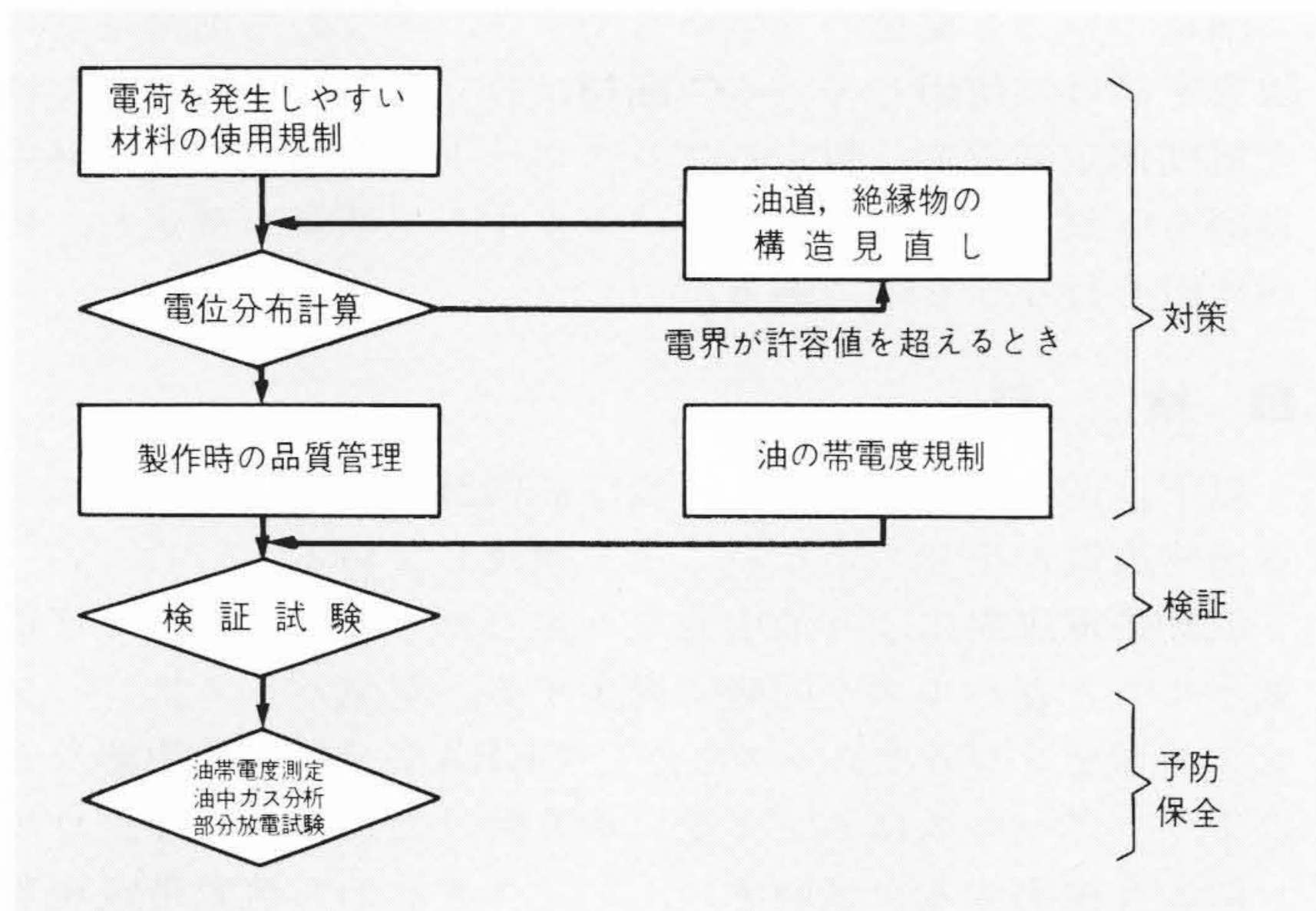


図15 対策、検証、予防保全の流れ図 流動帯電現象に対する信頼性確保のための流れ図を示す。

転状態では一般には適用困難であり、変圧器の運転を停止できる場合とか、ごく限られた条件下の場合だけに適用される。

図15は、これまで述べてきた日立製作所製変圧器での対策、検証及び予防保全の流れ図である。設計段階での油中放電に対する裕度の確保と製作時の品質管理とにより、流動帯電現象に対する信頼性を確保することが重要である。

8 結 言

送油式変圧器の流動帯電現象の解明と信頼性検証を目的として、要素モデル、実規模試作変圧器により各種実験を実施

し変圧器内部の電荷分布、それに及ぼす冷却器、交流課電の影響、油中放電限界とその発生部位などを確認した。

更に、流動帯電現象に対する直流電位分布を解析するプログラムを開発し、製品について設計段階での放電に対する裕度の確認、適切な対策を可能とした。

最後に本研究を進めるに当たり、有益な御助言と御指導をいただいた関係各位に対し、深く感謝する。

参考文献

- 1) A. Klinkenberg et al.: Electrostatics in the Petroleum Industry, Elsevier Publication Co., (1958)
- 2) W. H. Bustin, et al.: General Consideration of Static Electricity in Petroleum Products, Proc. A. P. I., **37**(III), 24~43 (1957)
- 3) D. T. Rogers et al.: Theoretical and Experimental Observations of Static Electricity in Petroleum Products, Proc. A. P. I., **37**(III), 44~64 (1957)
- 4) M. Higaki et al.: Static Electrification and Partial Discharges caused by Oil Flow in Forced Oil Cooled Core Type Transformers, IEEE Trans. PAS, **4**, 1259~1267 (1979)
- 5) M. Higaki et al.: A Calculation of Potential Distribution caused by Static Electrification owing to Oil Flow in a Oil-Paper Insulation System and It's Application to Partial Discharge Phenomena in Oil, IEEE Trans. PAS, **4**, 1275~1282 (1979)
- 6) B. E. Ganger: The Breakdown Voltage of Oil Gaps with High DC Voltage, IEEE Trans. PAS, **4**, 1840~1843 (1968)

論文抄録

ESCAで測定されたSi酸化膜の化学シフト

日立製作所 岩田誠一・石坂彰利

日本金属学会誌 43—5, 380~388 (昭54-5)

本論文は、ESCA (Electron Spectroscopy for Chemical Analysis) によるSi熱酸化膜のSi2p電子の真の化学シフトの測定に関するものである。ESCAとは、試料にX線を照射して、発生する電子のエネルギー分析を行なう分析法である。本方法では電子の運動エネルギーを正確に測定でき、また、ある元素の化合状態が変わると上記運動エネルギーも変わることから、ESCAは表面化学分析に広く用いられてきた。しかし、絶縁体の試料では、帯電によって測定するエネルギーの値が変わってしまうという問題があった。そのため、表面の汚染Cや表面に蒸着したAuのエネルギーの値でエネルギー値の補正を行なってきた。ところが、これらの補正が正しいという保証はなく、そのうえ、ここで用いたような、ごく薄い(1~5nm厚の)試料では、これまで帯電の影響は無視されてきた。

本研究では、X線照射時間、X線強度、

酸化膜厚などを変えてSi熱酸化膜のSi2p電子の化学シフト(Siが酸化することによって生ずる運動エネルギーの変化)を測定した結果、ごく薄い熱酸化膜でも帯電の影響を無視できないことを示してから、この影響を定量的に求め、帯電の影響を除いた真の化学シフトの値を推定した。

まず、X線照射時間あるいはX線強度を変えると、測定する化学シフトの値が変わってしまうことから、帯電の影響がかなりあることを示した。次に、異なる膜厚で組成が同じであるSi熱酸化膜で化学シフトを測定すると、化学シフトの値は3.5から4.8 eVまで変化した。この原因も絶縁薄膜の帯電にあると思われたので、X線を照射したときに生ずる電荷の分布を理論的に計算して、表面電位の膜厚依存性を求めた。その結果、X線照射による表面電位の変化 $\Delta\phi$ は、

$$\Delta\phi = \Delta\phi_0 [1 - kd \cdot \exp(-kd) - \exp(-kd)]$$

のように求められた。ここで、 $\Delta\phi_0$ は膜厚 d を無限に大きくしたときの $\Delta\phi$ の値で、 k は発生する電子の脱出深さの逆数である。上式で、 $\Delta\phi_0 = 1.8\text{V}$ 、 $k^{-1} = 0.5\text{nm}$ とみると、実験値と計算値とはよく合っており、そのときの真の化学シフトの値は $3.0 \pm 0.2\text{V}$ であった。また、化学シフトのX線強度依存性を測定して、その関係で、X線強度0までの外挿により求めた真の化学シフトの値もやはり同じになった。

以上の結果から、従来は帯電の影響はないであろうと考えられていたごく薄い絶縁膜でも、それを無視できないことが明らかになり、帯電の影響を定量的に評価することも可能であることが分かった。したがって、今後、ESCAによる化合状態分析の精度が更に高くなるとともに、ESCAの適用範囲も広がるものと思われる。