UDC 538.12.082.75

電解液そう法による磁束線分布の決定

川崎工場設計部原子力課　穴原良司
同上　菊池豊彦

Determination of Magnetic Flux Distribution by Field Mapping Method

Ryōji Anahara, Toyohiko Kikuchi
(Atomic Energy Sect., Design Dep't., Kawasaki Works)

Synopsis

Recently, we have manufactured the electro-magnet with wide gap for the Institute of Solid State Physics, Tokyo University.

When we perform the calculation for the magnet design, it is necessary to estimate the correct figure of the leakage factor, because otherwise we are not able to know how many ampere turns are appropriate to produce the given flux density between two pole-pieces of the magnet. But it is extremely difficult, say impossible, to estimate the exact figure of leakage factor under the conditions which havethe complicated figure composed by air gap and yoke or pole-pieces of saturable material. So, we have applied the electrolytic flux mapping method to estimate the correct figure of the leakage-factor. And comparing the results obtained from the flux mapping method with the test data of the real wide gap magnet, we could get quite accurate and coincident results.

Accordingly, it will be able to conclude that the applications of the flux mapping method are very useful for the determination of the general magnetic flux distribution.

This article describes the outline of the method and the results of our flux mapping experiments.

I. まえがき

昨年当社は東京大学・物性研究所からの注文により，サイクロトロン形強磁界電磁石を製作した。

この電磁石は極間隔 100 mm に 22,000 エルステッドに及ぶ均一な強磁界を発生させることを目的としているが，励磁コイルは導体内部を中空とし，そこに冷却水を流す直接冷却方式を採用し重量低減を図っている点に，この電磁石構造上の著しい特長がある．その結果，いままでに製作された同形式の電磁石とくらべてその重量を約半分に低下させることができた。

ところで，このようなひろいギャップを有する電磁石の設計にあたって仕様に定められた磁界を発生させるのに必要な全励磁アンペアターンをいかにして決定するか，すなわち磁束漏れ係数をいかにして正確に決定するかということが重要な問題点となってくる．しかし現在の段階では，計算により漏れ磁束分布を求め，漏れ係数を決定することは，電磁石のポールピースおよびポールチップの形状の複雑さのためにほとんど不可能である。

そこで，当社では電磁石内および電磁石近くの磁束線分布を電解液そう法を用いて追跡し，その磁束線分布から漏れ係数を求める方法を試み，実物における実測値とよく一致する結果を得ることに成功した。

従来，電解液そう法の応用分野は変圧器ブッシングの電圧分布，シンクロトロンの極面形状の設計などに応用され，二次元の場を扱う問題にひろく適用されているが，このような磁界の追跡に電解液そう法を用いた例はわれわれの知るかぎりこれが初めてである．このため当方法の実行にあたっては境界板の設置，多数の電極の設置など幾多の新しい方法が開発された。

これらのことから，この方法は今後同種問題の追跡にひろく応用され得るもので，特に従来なかなか計算の対象にならなかった変圧器の漏れ磁束の決定，回転器の磁束分布の決定などにも応用して合理的な結果があげられると思われ，利用価値がひろいものと考えられる。

II. 実験理論

良く知られているように，電解液そう法による field mapping は，問題としているポテンシャル分布を求めるために，誘電率 ε に対応して導電度 σ なる電解液中に模擬電極を置き，それらの電極間に比較的低周波の交流電流（一般には 60～1,000%）を流し，その電流界による定在的電位分布から問題とする field を知る方法である．このような定常電流界におけるポテンシャル分布と静電

界におけるポテンシャル分布の対応は1,800年代の前半，キルヒホッフにより考えられていたが，同年代の後半に，アダムスが実用化した．それ以来，多くの人達が種々の解析に電解液そう法を用い有益な成果を得てきた。

ところで当社において対応させようとしているのは，定常電流界におけるポテンシャル分布と定常電流によって生じる磁界における磁束線分布である．この対応の原理は，理論的にはマックスエルの方程式より得ることができる．すなわち定常電流界のポテンシャル(V)，と磁界における磁束(ϕ)は次の関係を満足する。

(1) 定常電流界

$$\sigma \cdot \nabla^2 V = -i$$

σ＝導電度

i＝電極内の電流密度

(2) 磁界

$$\frac{1}{\mu} \cdot \nabla^2 \phi = -\rho$$

μ＝透磁率

ρ＝コイル内の電流密度

これより，定常電流界のポテンシャル V と磁界における磁束 ϕ とを対応させる，すなわち $V \propto \phi$ にするためにはつぎの関係を満足しなければならないことがわかる。

1) $\sigma \propto 1/\mu$，すなわち，使用電解液の導電度は電磁石の対応している部分の透磁率と反比例の関係がなければならない。

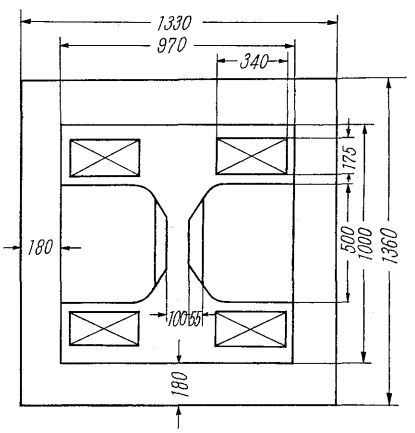
なおここで注意すべきことは，静電界において誘電率 ε の絶縁物による相異は数倍程度のものであるが，磁界においては透磁率 μ の各物質間の相異が100～20,000倍もあることである(たとえば空気と鉄など)．これにより静電界における誘電率 ε の異なりを電解液そう内に表現する方法（たとえばそうの深さを変えるといった方法）と磁界における透磁率 μ の異なりを電解液そう内に表現する方法とは必然的に異なってくる。

このため，後述するように，当実験では大きな透磁率の相異を濃度の異なる電解液であらわすようにしたが，その濃度の異なった電解液の混合を防ぐために，新しく境界板をくふうした。

2) $i \propto \rho$，すなわち電磁石のコイル内の電流密度と電極内の電流密度とは比例関係がなければならない．したがって電磁石のコイル内の電流密度は，その場所に関係なく同一であるから，対応する定常電流界にある電極の電流密度も同一でなければならない．すなわち，コイルを模擬したところのすべての電極に流入しまた流出する電流が同一であるような定常電流界を作り，その場におけるポテンシャル分布を測定すればそれが電磁石内およびその近くの磁束線分布に対応させ得ることになる．この点が電解液そう法による磁界追跡の他と相違する大きな点である。

III. 実験装置

今回製作した電磁石は，第1図に示す大いさを持つサイクロトロン形電磁石である．また電磁石の構成材料はヨークおよびポールピースは低炭素鋼，ポールチップは35％ Co—Fe 合金で，コイルは前述したように中空銅材である。



第1図 電磁石外形図（単位 mm）

Fig. 1. Dimension of magnet

第1図から知れるように，この電磁石はギャップの中心に対し左右対称であるから，液そう内にはその半分を模擬した．さらに，対象としている物体の形状をできるだけ正確に液そう内模擬しなければならないから，同一の大いさを持った模型を電解液そう内に製作した。

そしてこのサイクロトロン形電磁石の各構成要素に関する電解液そう内の置換は次のようにして行なった。

1) 大　い　さ

実物と同一寸法とした。

液そうは木製で，その外形の大いさは 155 cm × 78.5 cm である。

2) コ　イ　ル

多数（実験では 72 本）の電極でおきかえ，その各電極の流入，流出電流を等しくする。

電極材料　ステンレス

大いさ　$6\phi \times 80$ mm

電極間隔　30 mm

3) ヨーク，ポールピース，ポールチップ

おのおの透磁率が異なるからそれを導電度の異なる電解液でおきかえた．ただしこの際に電解液の導電度σと透磁率μの間に，$\sigma \propto 1/\mu$の関係がなりたつように電解液の濃度を調整した。

なお実験に使用した電解液の種類は，NaOH 水溶液，NaCl 水溶液で，他に水道水，蒸溜水を用いた。

4) 境　界　板

おのおの透磁率の異なっている電磁石の各部分を濃度の異なった電解液で置換する時問題となった点は，この異なった電解液の混合を防ぐためにどのような処置をとったらよいかということであった．かりにこのしきり板を境界板とよぶことにすると，この境界板は次の性質をもっていなければならない。

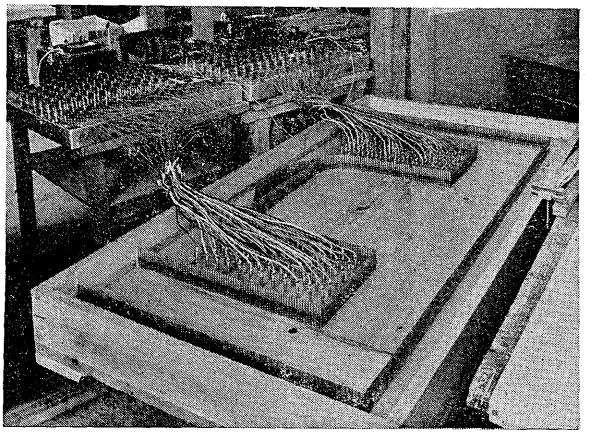
(1) その境界板を通して，電流は一つの電解液より隣の電解液へ自由に流れなければならない．すなわち導電的性質をもっていることが必要である。

(2) その境界板にそって，電位差が生じ得るようになっていなければならない．すなわち絶縁物的性質をもっていなければならない。

そこで当社では，導体と絶縁物の小片を交互に接着した板を作り，その板で電解液の混合を防ぐ手段を考えだし，これを実験にはじめて適用した．当実験では導体として鉄を，絶縁物としてベークライトを用い，これらの小片を交互にアラルダイトで接着してある．この境界板の要素となっている小片の大いさは，3（幅）×80（高さ）×1（厚さ）mmである．なお，この境界板は現在実用新案申請中である。

5) 電　極　部

各電極から電源部にのばしたリード線に100Ωの固定抵抗と，0～5,000Ωの可変抵抗をシリーズにつけた。



第2図 電 解 液 そ う 実 験

Fig. 2. General view of electrolytic field analyser equipment

これは各電極に同量の電流が流入，または流出するよう調整するためである．なお，多数の電極からでているリード線についている可変抵抗を操作しやすいように一つにまとめ，これを調整板と名づけた。

以上述べてきたような方法で電磁石の各部分を置換した実験装置の外形を第2図に示す。

IV. 実 験 方 法

電磁石の各構成物を上述したような方法で液そう内に置換を行ない，液そう内での等電位線分布を測定すれば，それが電磁石内およびその近くでの磁束線分布に対応するのであるが，等電位線分布を求める前につぎの点を考慮しなければならない。

まず電解液が実験中に混合しないか，また混合したとしたらどのくらい導電度が変化したかのチェック，つぎに電極近くでの等電位線分布を知るために，各電極の電位の測定，これより実験項目としては次の項目があげられる。

1) 実験前後の電解液の導電度の変化

2) 各電極の電位の測定

3) 等電位線の測定

1)が実験中の電解液の導電度の変化をしらべるためのもので，実験前後に導電度メータで測定した。

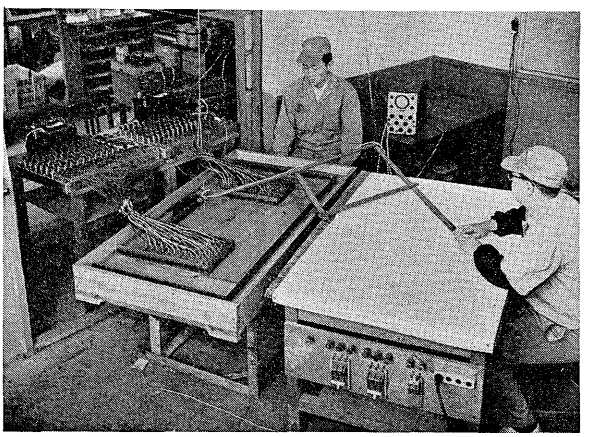
ところで実験理論のところで述べたように，各電極に等量の電流が流入，流出しているような定常電流界における電位分布が，磁界における磁束線分布に対応しているわけであるから，実測にあたっては調整板（第2図の左上部に示されているもの）ですべての電極に流れる電流値が一定になるような調整を行なう必要がある．実際にこのことは5,000Ωの可変抵抗を調整することでなされた．この際，電流測定は100Ωの固定抵抗の両端の電圧を測定して求めた。

なおこの実験において，各電極に流れる電流は10mAとした．このようにして定常電流界をつくったのちに各電極の電位を求めた（実験項目2））。

第2図からわかるように，実験により電極近くの等電位線を求めることは困難である．しかし漏れ係数を正確に求めるためには，そう内での電位が0Vより多数の電極に加えた電圧中の最大電圧の間にわたって存在しているのであるから，等電位線分布もその範囲内の電圧について一様に測定されなければならない。

そのために実験項目2)から求めた各電極の電位より電極近くでの等電位線分布（すなわち磁束線分布）を推定する必要がある。

実験項目3)については第3図に示すように基準電圧を種々変えて，ブラウン管オシロの振幅が最小になるような点を，パンタグラフの先についている探針を動かして追跡し，その得られた点を紙上に書いていけばよい．このようにして得られた点群が等電位線（磁束線）に相当するのである。



第3図 等 電 位 線 測 定

Fig. 3. Measurement of equipotential line

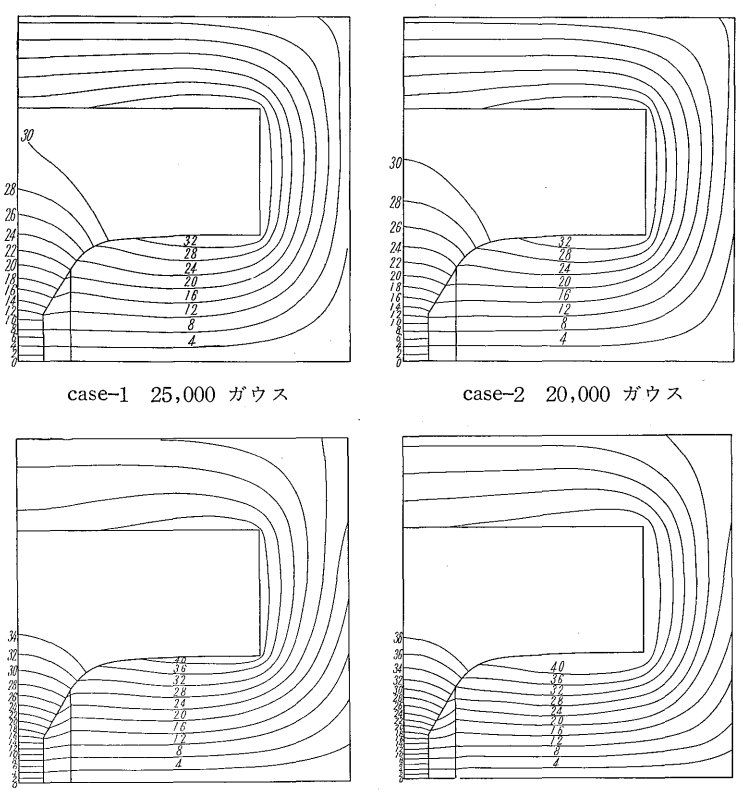
V. 実 験 結 果

ギャップ内磁束密度が 25,000, 20,000, 15,000, 10,000ガウスの場合を仮定し，各場合に応じて電磁石のヨーク，ポールピース，ポールチップの透磁率を計算により求め，その透磁率より使用電解液の種類，および電解液の濃度，すなわち導電度を指定して等電位線分布を測定した。

第4図に，各場合の等電位線分布を示す．なお第4図に示した各等電位線についている数値は各等電位線の基準電圧を示すものである。

第4図から，ギャップ内磁束密度が低くなるにしたがって磁束線がポールピースおよびポールチップ内で収束し，それだけ漏れ磁束が少なくなっていることがわかる。

すなわち計算では解くことができないであろうところの，電磁石の材料の飽和状態に伴う磁束線分布の変化を電解液そう法により見ることができるのである。



case-1 25,000 ガウス　　case-2 20,000 ガウス

case-3 15,000 ガウス　　case-4 10,000 ガウス

第4図 等　電　位　線

Fig. 4. Measured data of equipotential line

VI. 漏れ係数の係算

第4図で示した等電位線分布（すなわち磁束線分布）を用いて，電磁石のポールピースまたはポールチップのどこの部分を横切って各等電位線が電磁石内より空気中にはしっているかを知る事により漏れ係数を計算する事ができる．その計算方法はつぎのとおりである。

一般に漏れ係数はつぎの式で与えられる。

$$\nu=\frac{\phi_E+\phi_L}{\phi_E}$$

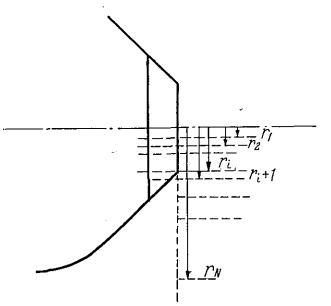
ν：漏れ係数

ϕ_E：有効磁束

ϕ_L：無効磁束（または漏れ磁束）

ここで有効磁束とは与えられた磁束線のうちでポールチップ先端の直径内を横切っている磁束線であり，無効磁束とはそれ以外の部分を横切っている磁束線である。

ところで r_j を第5図に示すようにポールピースの中心線から各等電位線までの長さとすると電解液そう内の一本の磁束線の占める面積と実際の電磁石における面積との補正を



第5図 漏 れ 係 数 の 計 算

Fig. 5. Calculation of leakage factor

行なうことにより，ϕ_E，ϕ_L は次式で与えられる。

$$\phi_E=\frac{\pi r_1^2}{r_1}+\frac{\pi(r_2^2-r_1^2)}{r_2-r_1}+\cdots\cdots+\frac{\pi(r_i^2-r_{i-1}^2)}{r_i-r_{i-1}}$$

$$=[2r_1+2r_2+2r_3+\cdots\cdots+2r_{i-1}+r_i]\,\pi$$

ここで，各 r_j $(j=1,\ 2,\ \cdots\cdots i)$ はポールチップ先端の半径に等しいか，それ以下の長さである。

また，

$$\phi_L=\frac{\pi(r_{i+1}^2-r_i^2)}{(r_{i+1}-r_i)}+\frac{\pi(r_{i+2}^2-r_{i+1}^2)}{(r_{i+2}-r_{i+1})}+\cdots\cdots$$

$$\cdots\cdots+\frac{\pi(r_N^2-r_{N-1}^2)}{r_N-r_{N-1}}$$

$$=[r_i+2r_{i+1}+2r_{i+2}+\cdots\cdots+2r_{N-1}+r_N]\pi$$

ここで，各 r_k $(k=i+1,\ \cdots\cdots,\ N-1,\ N)$ は，すべてポールチップ先端の半径より大きい長さである。

これより漏れ係数は次式で与えられる。

$$\nu=\frac{\phi_E+\phi_L}{\phi_E}=\frac{2(r_1+r_2+r_3+\cdots\cdots+r_{N-1})+r_N}{2(r_1+\cdots\cdots r_{i-1})+r_i}$$

ただし，追跡した等電位線の電圧範囲は，0V より各電極に加えた電圧のうちで最大電圧をとった。

なお最大電圧近くでの基準電圧における等電位線分布は実験項目 (2) で求めた各電極の電位分布より推定したものである。

以上より，与えられたギャップ内磁束密度における漏れ係数を求めると第1表のようになる。

第1表 漏 れ 係 数
Table 1. Leakage factor

磁束密度（ガウス）	漏れ係数
25,000	6.38
20,000	6.15
15,000	5.84
10,000	5.56

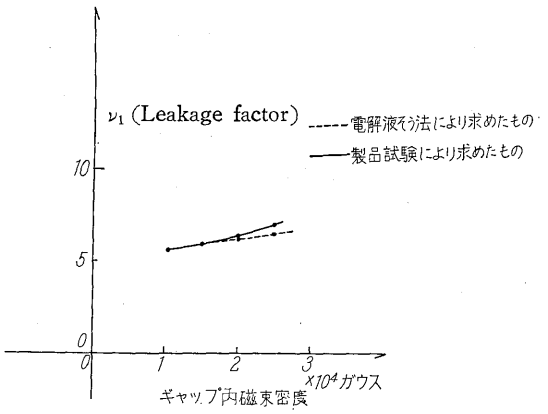
VII. 製品試験結果との比較検討

このサイクロトロン形強磁界電磁石の製品試験として，また電解液そう法で求めた漏れ係数の信頼性を確かめるために，コイルに流す電流値を種々に変え各場合のギャップ内磁束密度を測定した。

そしてこの測定データを用いて実際の電磁石について，ギャップ内磁束密度と漏れ係数の関係を求めた。

この製品試験により求めた漏れ係数—ギャップ内磁束密度と電解そう法により求めた漏れ係数—ギャップ内磁束密度の関係を第6図に示す。

第6図よりわかるように，ギャップ内磁束密度がほぼ

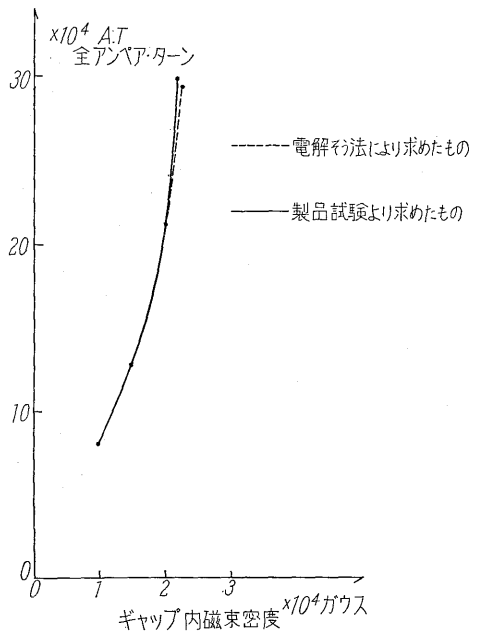


第6図 磁束密度と漏れ係数の関係
Fig. 6. Flux density and leakage factor

20,000ガウスまでは，両方の曲線が一致しているが，さらにギャップ磁束密度が高くなると，製品試験より求めた漏れ係数の値が同じギャップ内磁束密度において電解液そう法により求めた値よりもほんのわずかではあるが大きくなる。

ギャップ内磁束密度が高い場合に製品試験による漏れ係数と電解液そう法による漏れ係数がこのように相違する原因は，電磁石の各部分での透磁率を正確に決定できないことが主因と思われる。

また電磁石の各部分での透磁率も，ヨークを例にとると，実際にはヨーク内でも各場所でその透磁率が異なるから，ヨークをさらに何個所かに境界板で仕切り，電解液の濃度をヨーク内でも変えることをすれば，さらに精



第7図 ギャップ内磁束密度と全ATの関係
Fig. 7. Flux density and total ampere turns

度よく透磁率の変化をあらわすことができるから，この漏れ係数の相異をもっと少なくすることができよう。

次に，全アンペアターンとギャップ内磁束密度の関係を第7図に示す．この第7図に示した2本の曲線は良く一致しているといえる。

これより，透磁率の非常に異なった材料近くでの磁束分布の状態，特別な形状を持った物質近くでの磁束分布の状態などを観察するには，電解液そう法実験があたかもアナログコンピュータのような役割をはたすものと考えられる。

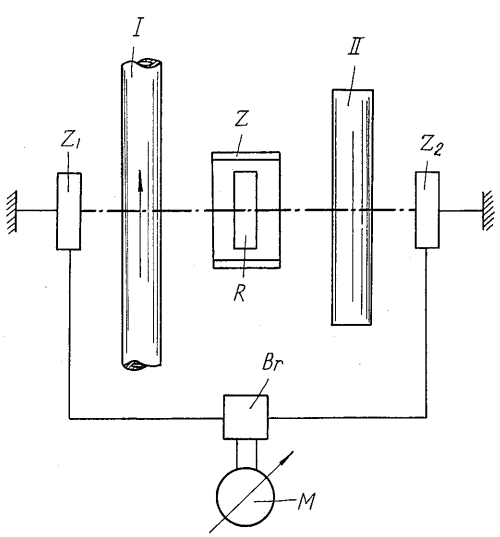
最後に，当実験を行なうにあたり，種々ご援助いただいた当社研究部電機実験課宮森課長，および向笠氏に厚く謝意を表する。

発明の紹介

流体の流速，流量測定装置

（特許第 287139 号）

この発明は放射線を利用して流体の流速，流量を測定する装置に関するもので，放射線源の両側にそれぞれ流速あるいは流量を測定すべき流体物質と，静止した同一物質を置き，さらにその外側に計数管あるいは電離箱を設け，両計数管あるいは電離箱の指示差から流速あるいは流量を決定するものです．流体物質と時静止物質は放射線源により照射され，物質の内部に一的な中間生成物すなわち放射性同位元素ができ，これが二次放射線を放出します．この二次放射線の強度は物質が照射された時間に関係します．すなわち流体物質においては中間生成物すなわち放射性同位元素も一緒に移動し，したがって付属の電離箱は静止物質における場合と比較してより小さな放射線強度により照射され，流体物質の移動速度が速いほど二次放射線強度は小さくなります．それに対し静止した物質では放射性同位元素は同一場所に蓄積し，その二次放射線を連続して送り出しますからここではより高い放射線強度が指示されます．したがって被測定媒体を透過したことによる放射線の減衰に相応した放射線強度と照射によって生じた放射性同位元素による二次放射線が被測定媒体の移動速度に相応して示す放射線強度の2量が測定に関係し，感度ならびに精度は著しく上昇します。



図において，Ⅰは被測定流体用導管，Ⅱはこれに並行に同一に作られた管片で管Ⅰ中を流れるものと同一の流体が満たされます．両管の中間に放射性プレパラート R が容器2の中に設置され，管Ⅰ，Ⅱに対して計数管 Z_1，Z_2 が設けられます．この計数管は差動測定ブリッジ B_r に接続され，計器 M で流速あるいは流量を測定することができます。

（特許課　常盤）

＊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。