

JAERI-M  
91-067

環境放射線線量率の高精度測定用14(球形電離箱)

1991年5月

長岡 鏡・斎藤 公明・森内 茂

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

入手の間合わせは、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）にて、お申しこみください。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）で複写による実費領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 Division Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokaimura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1991

編集兼発行 日本原子力研究所  
印刷 ニッセイエプロ株式会社

環境放射線線量率の高精度測定用14ℓ球形電離箱

日本原子力研究所東海研究所環境安全研究部

長岡 鋭・齋藤 公明・森内 茂

(1991年4月1日受理)

環境 $\gamma$ 線及び宇宙線による線量率の高精度測定を目的として、1気圧球形14ℓ電離箱(窒素ガス封入)を整備した。電離箱壁による減衰、 $\alpha$ 汚染による電離寄与分等を詳細に考慮して電流-線量率換算係数を導出した。一方、既知の放射線場において校正実験を行なうとともに、NaI(Tl)シンチレーション検出器を用いた同時比較測定を行ない、導出した電流-線量率換算係数を用いて数%以内の精度での線量率測定ができることを確認した。今後は環境 $\gamma$ 線及び宇宙線の高精度測定用としてこの電離箱を用いていく。

Spherical Ionization Chamber of 14 Liter  
for Precise Measurement of Environmental Radiation Dose Rate

Toshi NAGAOKA, Kimiaki SAITO and Shigeru MORIUCHI

Department of Environmental Safety Research  
Tokai Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received April 1, 1991)

A spherical ionization chamber of 14 liter filled with 1 atm. nitrogen gas was arranged aiming at precise measurement of dose rate due to environmental gamma rays and cosmic rays. Ionization current-dose rate conversion factor for this ionization chamber was derived from careful consideration taking into account the attenuation by chamber wall, ionization current due to alpha particles and so on. Experiments at calibrated gamma ray fields and intercomparison with NaI(Tl) scintillation detector were also performed, which confirmed this ionization chamber using the conversion factor can measure the dose rate with an error of only a few percent. This ionization chamber will be used for measurement of environmental gamma ray and cosmic ray dose rate.

Keywords: Environmental Radiation, Dose Rate, Precise Measurement,  
Ionization Chamber, Gamma Radiation, Cosmic Radiation

## 目 次

1. 序 .....	1
2. 14 ℓ球形電離箱の概要 .....	1
3. 線量測定法及び線量(率)換算係数 .....	2
3.1 測定系 .....	2
3.2 電流法による測定 .....	3
3.3 電荷蓄積法による測定 .....	3
3.4 α汚染分の評価 .....	3
3.5 エレクトロメータの校正 .....	4
3.5.1 電流測定値の校正 .....	4
3.5.2 電荷蓄積量測定値の校正 .....	5
3.6 線量(率)換算係数 .....	6
3.6.1 γ線に対する線量率換算係数 .....	6
3.6.2 宇宙線に対する線量率換算 .....	10
3.7 線量(率)換算の手順 .....	10
3.8 電離箱特性の簡易チェック .....	11
4. 既知放射線場での校正実験 .....	12
4.1 研究3棟047室における校正実験の概要 .....	12
4.2 放射線標準施設棟における校正実験の概要 .....	12
4.3 校正結果及び考察 .....	12
5. 結 語 .....	13
謝 辞 .....	13
参考文献 .....	13

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Outline of the spherical ionization chamber of 14 liter .....	1
3. Measurement method of dose rate and current-dose rate conversion factor .....	2
3.1 Instrument .....	2
3.2 Measurement by current method .....	3
3.3 Measurement by charge method .....	3
3.4 Evaluation of alpha contamination current .....	3
3.5 Calibration of the electrometer used .....	4
3.5.1 Calibration for current mode .....	4
3.5.2 Calibration for charge mode .....	5
3.6 Dose rate conversion factor .....	6
3.6.1 Dose rate conversion factor for $\gamma$ ray .....	6
3.6.2 Dose rate conversion for cosmic ray .....	10
3.7 Procedure of dose rate conversion .....	10
3.8 Quick check of the chamber's characteristics .....	11
4. Experiments at calibrated $\gamma$ ray fields .....	12
4.1 Outline of the calibration experiment at the Research Building No.3-047 .....	12
4.2 Outline of the calibration experiment at the Facility of Radiation Standard .....	12
4.3 Results and discussion .....	12
5. Conclusion .....	13
Acknowledgement .....	13
References .....	13

## 1. 序

電離箱は、放射線が気体中を通過する際に引き起こす効果（電離、励起）を利用した検出器で、放射線検出器としては最も古い部類のものである。しかしながら、空気の電離量を基準とした放射線量単位である「照射線量」の定義に最も忠実な測定原理であることから電離箱は現在でも広く用いられており、これに関する教科書的文献も数多くある<sup>(1-5)</sup>。

一方、電離箱は気体検出器であるため、一般環境中における放射線を測定対象とした場合には感度が不十分なこともあり、その点を解決するために、充填ガスを加圧した高圧電離箱<sup>(6-8)</sup>の開発、NaI(Tl)シンチレーション検出器やGe半導体検出器など固体検出器を用いた線量測定法の開発が行なわれてきた<sup>(9-15)</sup>。

とは言え、電離箱が放射線量測定に有用な検出器であることに変わりはない。現在われわれは、種々の環境 $\gamma$ 線測定器・測定法を用いた同時測定を行ない、その精度や特性の比較評価によって標準的測定手法を確立するための研究を進めている。また、電離箱が $\gamma$ 線のみならず宇宙線に対しても感度を有することを利用して、宇宙線線量率の高精度評価を試みている。それらの目的に利用できる高精度線量測定器として14ℓ球形電離箱を整備した。本報告はその電離箱の概要と線量換算法について述べる。

## 2. 14ℓ球形電離箱の概要

今回整備した14ℓ球形電離箱の概観をFig.1に、電離箱支持部分の詳細をFig.2に示す。また、寸法、材質等をTable1に示す。

本電離箱の形状は、放射線の入射角度による感度変化を抑えるため球形とした。材質は、極力天然放射性物質（とくに $\alpha$ 線放出核種）を含まず、元素組成が空気に近い高絶縁体とするなどの観点からSTYCAST 1264（Table 1参照）を選んだ。壁厚は、荷電粒子平衡が成り立ち、強度が十分で、かつ入射 $\gamma$ 線の大きな減衰がないことなどを考慮して5mmとした。壁の内側面は、中心電極と逆極性の電極とするため、アルミ蒸着を行なって導電性とした。この際に、蒸着用のアルミニウム材は天然放射性物質を含まない純度の高いものを用いた。壁材の支持部分はステンレスで作成した。壁材と支持部分との間は気体のリークが生じないようにニトリルゴム製のOリングを用いた。また、充填ガスの入れ替えのためのバルブ（ステンレス製ベローズシールバルブ；NUPURO SS-4BMG及びSS-4BKT）を設けた。電離電流の漏洩を防ぐための保護環（ガードリング）は円筒形ステンレスで作成し、中心電極との間は高抵抗の石英ガラスで絶縁した。

電離箱の作成にあたっては、絶縁低下を防ぐため絶縁体表面の高精度仕上げを行なうとともに、組み立て前に全部品を洗浄し、空気に触れぬよう（ラドンガスが混入せぬよう）窒素雰囲気中で組み立てを行なった。

充填ガスは、自由電子が中性ガス分子に付着して陰イオンを形成するのを抑えるため、空気の組成に近く、電子付着係数の小さい窒素を選んだ。ガス圧は、リークによる外気の混入を防ぐた

め1気圧より少し高めの766mmHg(17.5℃)とした。ガスの封入は、電離箱内部を低圧(約0.5気圧)に下げ、窒素ボンベに接続されたバルブを開いて電離箱内へ窒素ガスを吸い込ませることを数十回繰り返して行なった。また、1気圧に調整する前に、内圧を約650mmHgにして約2週間放置してその間の内圧変化を観察したが、リークの徴候を示す現象は全く見られなかった。

### 3. 線量測定法及び線量(率)換算係数

#### 3.1 測定系

本電離箱を用いた測定系をFig. 3に示す。原則として電離箱の中心電極に正電圧、壁面内側に負電圧を印加し、中心電極は振動容量型電位計のヘッド(増幅器)に接続される。この条件では、中心電極に自由電子が、壁面内側に正イオンが収集される。自由電子の移動度は正イオンより大きい。電離によって生じた自由電子と正イオンとの再結合や中心電極へのイオンの集中による電場の低下を避け、できるだけ早く電荷を電極に収集するため、移動度の大きい自由電子を中心電極に集めるような極性を選んだ。バックグラウンド程度の低線量率を測定対象とする場合には、この極性を逆にしても事実上全ての発生イオンを収集でき、印加電圧の極性により読み値が異なることはない。しかし、電離箱に物理的な力が加わった場合などに、電離に基づかないストレス電流が発生し、印加電圧極性によって読み値が異なることがある。このような場合、読み値の絶対値の差が小さければ、両者の相加平均をとることによりストレス電流分を相殺できる。しかし、差が大きい場合には、読み値が安定するまで、即ち、ストレス電流が十分小さくなるまで待ってから測定を行なうべきである。

ヘッドの後段には電位計が接続され、電流または蓄積電荷の測定を行なう。測定値は電位計の前面パネルに表示されるとともに、チャートレコーダ及びデジタルレコーダに記録される。

印加電圧は、充填ガスの電離により生じた自由電子と正イオンとが再結合しない程度に高くする必要はあるが、不必要に高すぎても放電の発生など問題が起きる。適切な印加電圧を決めるため、通常行なわれているように印加電圧と電離電流との関係を示す「飽和特性」を見た。 $r$ 線源を電離箱外壁に固定して、出力電流を測定した際の飽和特性をFig. 4に示す。この時の電離電流は実験室内におけるバックグラウンドの30倍(約2500nGy/h, 290 $\mu$ R/h)に相当する。この図から、印加電圧を約450Vとすれば十分であると考えられ、以後印加電圧は450Vとした。

正負両電極間の電流漏洩はガードリングで防がれており問題ないが、ガードリングと中心電極・振動容量型電位計入力端間の絶縁不良による電流のリークがないことを確認するためテストを行なった。このテストは、電位計を電荷蓄積モード(後述)にして、強度一定の放射線場中で電離箱に電荷を長時間蓄積していく。電流のリークがなければ蓄積電荷量は蓄積時間に比例して直線的に増加していく。しかし、もし電流のリークがあると、直線的な増加傾向を示さない。即ち、電離箱を振動容量型電位計に接続した状態をCR回路として見れば、振動容量型電位計の静電容量Cに電荷を蓄積する一方で、 $e^{-t/CR}$ (C:振動容量型電位計の入力静電容量, R:絶縁体(石英)の抵抗, t:電荷蓄積時間)の関数に従って蓄積電荷量が減少する。絶縁が良好であれば、 $R \rightarrow \infty$ で減



衰はなく時間に比例して電荷が蓄積されるが、絶縁不良の場合にはRは有限であり、電荷の蓄積量は直線的に増加しない。このテストの際には、 $dQ/dt$ （電荷蓄積の時間率）が大きすぎると減衰分を観測できないことがあるため、電離箱を線量率の低い鉄遮蔽室の中に入れ約72時間電荷蓄積を行なったが、電流のリークと考えられる現象は観測されず、良好な絶縁状態であることが確認できた。

### 3.2 電流法による測定

電流法は、電離箱を用いた測定法の中で最も一般的なもので、電離箱内で発生した電荷を集電極に集め、これを高抵抗器（ここでは約 $10^{12}\Omega$ ）に通し、その高抵抗器両端で生ずる電圧降下から電流値即ち発生した電荷量の時間微分値を測定するものである。この方法では線量率単位での時系列出力を得ることができるが、電流値（即ち線量率）が低い場合には出力の統計的変動が大きくなる。電流法によるチャートレコーダ出力例をFig. 5に示す。

原理的には上述のように電離電流を測定するのであるが、実際には極めて微弱な電流を測定することになり、通常の検流計では測定できないため何らかの方法で電流を増幅する必要がある。ここでは、微弱電流の測定に広く用いられている振動容量型電位計による増幅を行なった。

### 3.3 電荷蓄積法による測定

3.2に述べた電流法が電離によって生じた電荷の時間微分値を測定するのに対して、電荷蓄積法は一定時間内での発生電荷の積分値を測定するものである。即ち、電流法で用いた高抵抗を開放して抵抗値を無限大にすれば、電離箱からの電離電流は電荷の形で電離箱自身の静電容量に蓄積され、静電容量にかかる電圧変化から電荷の蓄積量を求める方法である。この方法は、測定時間内の平均電流を求めるので、電流値の統計的変動を平均化できる利点がある。また、電荷蓄積に用いるコンデンサ、とくに空気コンデンサは、電流法に用いる高抵抗器に比べて経年変化が小さいので測定値の長期間再現性の面で優れている。電荷蓄積法によるチャートレコーダ出力例をFig. 6に示す。

### 3.4 $\alpha$ 汚染分の評価

電離箱による線量測定を行なう場合、測定対象としている放射線（この場合は電離箱外部からの $\gamma$ 線及び宇宙線）以外の成分（妨害成分）による電離量を評価し、測定値から差し引かねばならない。このような妨害成分の主なもの、電離箱内壁表面に存在している天然 $\alpha$ 線放射核種（ $\alpha$ 汚染）からの $\alpha$ 線による電離成分である。充填ガスとして空気を用いる場合には、空気中天然放射性核種からの $\alpha$ 線も妨害要因となるが、本電離箱では充填ガスとして高純度窒素を用いているので $\alpha$ 線は主に電離箱内壁から放出されると考えられる。

$\alpha$ 線が電離箱充填ガス中を通過すると、 $\alpha$ 線は $\gamma$ 線や宇宙線よりもはるかに電離能力が高いため、ガス中に高密度のイオン対が発生する。その結果、電流測定の場合にはFig. 5に示すような大きなパルスが、電荷蓄積法の場合にはFig. 6に示すような積分直線のシフトが観測される。このよ

うな $\alpha$ 汚染成分による線量率寄与分は、予め評価しておかねばならない。そのため、 $\alpha$ 汚染成分を観測しやすいよう電離箱を線量率の低い鉄室内に入れ、長時間の観測を行なった。これによると、 $\alpha$ 汚染成分は $7.77 \times 10^{-15}$  Coulomb/分、0.46パルス/分で、 $\alpha$ 線パルス1個当りの電荷は $1.7 \times 10^{-14}$  Coulombであった。このレベルは、本電離箱では約0.1  $\mu$ R/h(約1 nGy/h)に相当する。

### 3.5 エレクトロメータの校正

#### 3.5.1 電流測定値の校正

エレクトロメータによる出力電流値の表示値  $I_{out/EI}$  には、内部抵抗値の見積もり誤差などに起因する誤差が含まれているため、表示値を補正する必要がある。今、入力電圧を  $V_{in}$  (V)、増幅器の入力抵抗を  $R_o$  ( $\Omega$ )、内部抵抗を  $R'$  ( $\Omega$ ) とすると、電流測定モードは Fig.7 のように表わされ、次式の関係がある。

$$\frac{V_{in}}{R_o} = \frac{V_{out}}{R'} \quad (1)$$

この関係を用いて  $R'$  を求め、出力電流値  $I_{out}$  とその表示値  $I_{out/EI}$  との関係を把握することによりエレクトロメータを校正した。手順は以下のとおりである。

#### ステップ(1)

まず、 $10^{-12}$  Aレンジについて、エレクトロメータの表示値  $I_{out/EI}$  と出力電圧  $V_{out}$  (フィードバック端子とGND端子との電位差) との関係を求める。

Fig.7の  $R_o$  の部分に標準抵抗 ( $1.004 \times 10^{12} \Omega$ ) を入れ、 $V_{in}$  を0～1500 mVの間で変化させたときの  $I_{out/EI}$  と  $V_{out}$  の値から

$$V_{out} = 1.0006 \times 10^{12} \cdot I_{out/EI} \quad (2)$$

を得た。ここで、 $V_{out}$  は校正済みのデジタルマルチメータ FLUKE 8505 Aを用いて測定し、 $V_{in}$  は FLUKE 8505 Aを用いて比較校正したデジタルボルトメータ TAKEDA TR-6863を用いて測定した。なお、FLUKE 8505 Aの指示値  $V^F$  と TAKEDA TR-6863の指示値  $V^T$  との関係は

$$V^T = 1.0006 \cdot V^F \quad (3)$$

であった。

#### ステップ(2)

入力電圧  $V_{in}$  と出力電圧  $V_{out}$  との関係を求める。

$$V_{out} = 0.96682 \cdot V_{in} \quad (4)$$

であった。

#### ステップ(3)

$R'$  を求める。

式(1)より,

$$R' = \frac{V_{out} \cdot R_o}{V_{in}}$$

一方, 式(4)より  $V_{out}/V_{in} = 0.96682$ 。また  $R_o = 1.004 \times 10^{12} \Omega$  であるのでこれを上式に代入して

$$\begin{aligned} R' &= 0.96682 \times 1.004 \times 10^{12} \\ &= 0.9707 \times 10^{12} \quad \Omega \end{aligned} \quad (5)$$

となる。

#### ステップ(4)

出力電流値  $I_{out}$  と表示電流値  $I_{out/EI}$  との関係を求める。

$$\begin{aligned} I_{out} &= V_{out}/R' \\ &= V_{out}/0.9707 \times 10^{12} \end{aligned}$$

であった。これに式(2)を代入して

$$\begin{aligned} I_{out} &= 1.006 \times 10^{12} \cdot I_{out/EI}/0.9707 \times 10^{12} \\ &= 1.031 \cdot I_{out/EI} \end{aligned}$$

即ち,  $10^{-12}$  A レンジの場合, 出力電流値は表示値の 1.031 倍であった。

#### ステップ(5)

$10^{-10}$  A レンジについても同様に  $R'$  及び  $I_{out}$  と  $I_{out/EI}$  との関係を求める。

$$\begin{aligned} R' &= 0.999 \times 10^{10} \Omega \\ I_{out} &= 1.00 \cdot I_{out/EI} \end{aligned}$$

であった。

### 3.5.2 電荷蓄積量測定値の校正

電荷蓄積法においても, 電流法と同様に表示値に含まれる誤差を評価し補正する必要がある。電荷測定モードは Fig. 8 のように表わされる。ここで, 内部抵抗  $R'$  は測定系から切り離されている。入力電圧  $V_{in}$  (一定), 入力電流  $I_{in}$  及び入力抵抗  $R_o$  の間には次式の関係がある。

$$I_{in} = V_{in} / R_o \quad (6)$$

一方, 測定系に  $V_{in}$  を印加してから  $T$  秒後における静電容量  $C$  の蓄積電荷量  $Q_T$  は, 次式で表わされる。

$$Q_T = \int_0^T I_{in} dt \quad (7-1)$$

$$= I_{in} \cdot T \quad (7-2)$$

$$= C \cdot V_C \quad (7-3)$$

ここで、Cは約10 pFである。Vcを直接測定することはできないが、(6)、(7-2)より、

$$Q_T = I_{in} \cdot T = (V_{in} \cdot R_o) \cdot T \quad (8)$$

従って、R<sub>o</sub>に標準抵抗(1.004 × 10<sup>12</sup> Ω)を入れ、V<sub>in</sub>及びTからQ<sub>T</sub>が求まる。Q<sub>T</sub>とこのときのエレクトロメータの表示値Q<sub>T/EI</sub>とを比較することにより表示値の校正定数を得ることが出来る。この方法によると、

$$\begin{aligned} 10^{-9} \text{ Coulomb レンジでは、} & Q_T = Q_{T/EI} \times 1.01, \\ 10^{-12} \text{ Coulomb レンジでは、} & Q_T = Q_{T/EI} \times 1.00 \end{aligned} \quad (9)$$

であった。

なお、Cを求める場合には次の手順で行なう。

先ず電流測定モードにする。これはCに並列に内部抵抗R' (10<sup>-12</sup>レンジでは0.9707 × 10<sup>12</sup> Ω, 10<sup>-10</sup>レンジでは0.9999 × 10<sup>10</sup> Ω; 3.5.1参照)を入れることに相当する(Fig.8参照)。次に、この状態で一定時間測定した後、V<sub>in</sub>を外す。これにより、Cに蓄積された電荷はe<sup>-t/CR'</sup>に従って減衰する。この減衰曲線からCを求める。これによると、C = 9.86 pFであった。

### 3.6 線量(率)換算係数

電離箱の出力の線量率への換算係数について述べる。ここで、「線量率」は「照射線量率(単位: μR/h)」または「空気吸収線量率(単位: nGy/h)」を示す。照射線量率は、最近までγ線線量率を表わす最も代表的な単位であったが、近年SI単位系への統一が進められており、今後は原則として空気吸収線量率を用いることとなろう。照射線量率X(μR/h)と空気吸収線量率D(nGy/h)との間には、次の関係がある。

$$D = 8.7 \cdot X \quad (10)$$

ここでは、先ず電流法により測定する場合についての線量率換算係数を求める。電荷蓄積法については、電流と電荷蓄積時間との積が蓄積電荷量であることから線量率換算係数を求める。

#### 3.6.1 γ線に対する線量率換算係数

電離箱からの出力電流を照射線量率(または空気吸収線量率)に換算する場合には、Bragg-Grayの空洞原理を基本として導出した換算係数に補正を施して用いる。その手順は多くの教科書に述べられている。ここでは、文献(10)に沿って以下にその要点を述べる。

照射線量Xは、光子との相互作用で質量dm(g)の空気から放出された2次電子が空気中で生成する電荷をdQ(esu)とすると、

$$X = dQ/dm [\text{esu/g}] \quad (11)$$

である。また、荷電粒子平衡下では空気の単位質量当りの吸収エネルギーD<sub>air</sub>は

$$D_{\text{air}} = X \cdot W_{\text{air}}/e \quad [\text{eV/g}] \quad (12)$$

である。ここで  $W_{\text{air}}$  は空気中で1個のイオン対を作るのに要する平均エネルギー (W値; eV),  $e$  は素電荷 ( $4.8 \times 10^{-10}$  esu) である。すなわち, 荷電粒子平衡状態の下では, 空気の吸収線量は照射線量に  $W_{\text{air}}/e$  を乗じたものとなる。その空気中に空気以外の物質  $z$  を置いた場合, その物質の単位質量当りの吸収エネルギー  $D_z$  はその物質の質量エネルギー吸収係数 ( $\mu_{\text{en}}/\rho$ ) に比例するから,

$$D_z = X \cdot \frac{W_{\text{air}}}{e} \cdot \frac{(\mu_{\text{en}}/\rho)_z}{(\mu_{\text{en}}/\rho)_{\text{air}}} \quad [\text{eV/g}] \quad (13)$$

一方, Bragg-Gray の空洞原理によると,

- (a) 空洞がない場合は荷電粒子平衡が成立している。
- (b) 空洞は, 荷電粒子のフルエンスまたはそのエネルギーと方向の分布に影響せず, その結果として, 空洞中で生成される荷電粒子は無視できるか, または空洞の気体と質量が等しい周囲の媒質中で生成される量と差がない。
- (c) 質量阻止能比  $S_{z,g}$  は, エネルギーによって変化しない。
- (d) 2次荷電粒子は連続減速過程, 即ち非常に小さなエネルギー損失事象を多数回行なうことによってエネルギーを失う。

の条件を満たすと, 気体  $g$  とその中の媒質  $z$  の単位質量当りに吸収されるエネルギーの比は, 質量阻止能比  $S_{z,g}$  (電離電子が気体及び媒質中で単位質量当りに失うエネルギー < 質量阻止能: Stopping Power > の比 ( $mS_z/mS_g$ ) に等しい。即ち,

$$D_z = S_{z,g} \cdot J \cdot W_g/e \quad [\text{eV/g}] \quad (14)$$

ここで,  $J$  は単位質量当りに電子が生成する電離イオンの電荷 [esu/g],  $W_g$  はその気体のW値 [eV] である。(13), (14)より,

$$X = J \cdot S_{z,g} \frac{W_g}{W_{\text{air}}} \cdot \frac{(\mu_{\text{en}}/\rho)_{\text{air}}}{(\mu_{\text{en}}/\rho)_z} \quad [\text{esu/g}] \quad (15)$$

今, 空気中に物質  $z$  でできた内圧  $p'$  [mmHg], 封入ガス  $g$ , 有効体積  $v$  [cm<sup>3</sup>] の電離箱を置いたとすると,  $J$  は次の式で表わされる。

$$J = \frac{3 \times 10^9 [\text{esu/Coulomb}] \cdot Q}{v \cdot \rho_{g,0} \cdot \frac{273}{273+T} \cdot \frac{p'}{760}} \quad (16)$$

ここで,  $Q$  は発生電荷 =  $C \cdot V$  [Coulomb];  $C$  は静電容量 [Farad],  $V$  は生成イオン対の収集により測定電極に誘起された電位変化 [Volt],  $\rho_{g,0}$  は気体  $g$  の 0°C における密度 [g/cm<sup>3</sup>],  $T$  は気体の温度 [°C] である。X の単位を [esu/g] から [R] にするため X を  $\rho_{\text{air},0}$  (0°C での空気の密度 = 0.001293 [g/cm<sup>3</sup>]) 倍し, (16) を (15) へ代入して次式を得る。

$$X = \frac{3 \times 10^9 \cdot Q}{v} \cdot \frac{\rho_{\text{air},0}}{\rho_{\text{g},0}} \cdot \frac{273+T}{273} \cdot \frac{760}{p'} \cdot S_{z,g} \cdot \frac{W_g}{W_{\text{air}}} \cdot \frac{(\mu_{\text{en}}/\rho)_{\text{air}}}{(\mu_{\text{en}}/\rho)_z} \quad (17)$$

さらに(17)の右辺で [R] を [ $\mu\text{R}/\text{h}$ ] とするため  $Q = i \times 3600 \times 10^6$  ( $i$  は電離電流 [A]) を乗ずるとともに、以下の補正項を乗ずる。

- イオン対再結合によるイオン収集係数  $f_r$  ( $\cong 1$ ) の逆数,  $1/f_r$
- 電離箱壁による  $r$  線の減衰補正項  $\exp(\bar{\mu} \cdot \delta)$   
 $\bar{\mu}$ : 壁材に対する平均  $r$  線線減衰係数 [1/cm]  
 $\delta$ : 壁の  $r$  線入射方向厚さ [cm]
- 荷電粒子平衡係数  $\epsilon_q$  ( $\cong 1$ ) の逆数,  $1/\epsilon_q$

以上から次式を得る。

$$X = \frac{1.08 \times 10^{19}}{v} \cdot \frac{\rho_{\text{air},0}}{\rho_{\text{g},0}} \cdot \frac{273+T}{273} \cdot \frac{760}{p'} \cdot S_{z,g} \cdot \frac{1}{f_r} \cdot \frac{W_g}{W_{\text{air}}} \cdot \frac{(\mu_{\text{en}}/\rho)_{\text{air}}}{(\mu_{\text{en}}/\rho)_z} \cdot \exp(\bar{\mu} \cdot \delta) \cdot \frac{1}{\epsilon_q} \cdot i \quad [\mu\text{R}/\text{h}] \quad (18)$$

(18)式右辺の  $i$  を除く各項の積が線量率換算係数である。ここで各項について適用する値を次のように与えた。

- (1) 有効体積  $v$  [ $\text{cm}^3$ ]

電離箱を組み立てる前に電離ガス充填部分に注水して体積を測定したところ  $14130\text{cm}^3$  であった。一方、電極部分が  $7.6\text{cm}^3$  あり、これを差し引いて  $14122\text{cm}^3$  を得た。

- (2) 空気及び充填ガス(窒素)の密度  $\rho_{\text{air}}, \rho_{\text{gas}}$  [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]<sup>(17)</sup>

$$\rho_{\text{air}} = 0.001293 \quad [\text{g}/\text{cm}^3]$$

$$\rho_{\text{gas}} = 0.001250 \quad [\text{g}/\text{cm}^3]$$

(何れも  $0^\circ\text{C}$  時)

- (3) 空気及び窒素の  $W$  値  $W_{\text{air}}, W_g$  [ $\text{eV}$ ]<sup>(18)</sup>

$$W_{\text{air}} (\text{dry}) = 33.85 \pm 0.15 \quad [\text{eV}]$$

$$W_g = 34.8 \pm 0.2 \quad [\text{eV}]$$

- (4) イオン対再結合によるイオン収集係数  $f_r$

3.1 で述べたように、印加電圧は十分飽和電流の得られる  $450\text{V}$  とした。従って、通常のバックグラウンド線量率下ではイオン収集係数 = 1 とした。

- (5) 壁材  $z$  と充填ガス  $g$  の質量阻止能比  $S_{z,g}$  空気と壁材の質量エネルギー吸収係数比  $(\mu_{\text{en}}/\rho)_{\text{air}} / (\mu_{\text{en}}/\rho)_z$ 、及び電離箱壁による  $r$  線の減衰補正項  $\exp(\bar{\mu} \cdot \delta)$

これらは何れも  $r$  線エネルギー依存性のある量なので、

$$VE = S_{z,g} \cdot \frac{(\mu_{\text{en}}/\rho)_{\text{air}}}{(\mu_{\text{en}}/\rho)_z} \cdot \exp(\bar{\mu} \cdot \delta) \quad (19)$$

と定義して一括して扱う。先ずVEの値を50 keVから3 MeVまで50 keV間隔で計算した。ここで、壁材zはTable 1に示したようにC, H, N, Oの化合物なので、質量阻止能、質量エネルギー吸収係数、及び線減衰係数ともに分子量比で合成した。また、充填ガスは窒素である。質量阻止能は文献(19)より、質量エネルギー吸収係数及び線減衰係数は文献(20)より引用した。

電離箱壁によるr線の減衰補正項 $\exp(-\bar{\mu} \cdot \delta)$ については、r線が電離箱に対して平行入射する場合と半径方向入射する場合の2通りについて計算した。壁材及び壁厚についてはTable 1を参照のこと。

計算結果をTable 2に示す。壁での減衰のr線入射方向による差は小さい。またVE値も低エネルギー部でやや高い値を示すが、150 keV以上では大きな差はない。

Table 2に示した値は単色r線入射の場合に適用される。通常のr線場では種々のエネルギーのr線が入射するので、そのスペクトルを考慮する必要がある。NaI(Tl)シンチレーション検出器で実測された波高分布をスペクトル解析して得たエネルギースペクトルを用いて、その場に対する平均的なVE値を求めたところ、 $^{137}\text{Cs}$ 照射時(平行入射、約930 nGy/h)で1.048、 $^{60}\text{Co}$ 照射時(平行入射、約960 nGy/h)で1.022、 $^{226}\text{Ra}$ 照射時(平行入射、約970 nGy/h)で1.03、コンクリート室内バックグラウンド(約90 nGy/h)で1.03、木造屋内及び屋外で1.03～1.04であった。以上より、特定の線源を照射したような場合を除いて、通常の実環境下でのVE値として1.03～1.04を用いることが適当であろう。

#### (6) 荷電粒子平衡係数 $\epsilon_q$

荷電粒子平衡係数 $\epsilon_q$ は、荷電粒子平衡の成立の度合いを示すもので、文献(16)では着目する物質中の点を囲む微小領域中に沈積されるエネルギーDと、その領域から発生する荷電粒子の初期エネルギーKとの比D/Kとしている。即ち荷電粒子平衡が成立していれば、着目点に沈積されるエネルギーと、そこから発生されるエネルギーとが等しく、 $\epsilon_q = 1.0$ となる。

前述のように、空洞原理が成立する電離箱においては、空洞気体gと壁zの単位質量あたり吸収されるエネルギーの比は質量阻止能比 $S_{z,g} = (S/\rho)_z / (S/\rho)_g$ に等しい。この関係の適用にあたっては、①空洞気体中での電子の吸収は無視できる、②空洞中での電子の発生がない、という2つの仮定が必要で、これらは空洞が大きくなると何れも成り立たなくなる。

空洞中での2次電子の減衰、及び入射光子による空洞中での2次電子の発生について、秋山ら<sup>(20)</sup>はBurlin<sup>(22)</sup>の考え方を応用した次式を提案している。

$$f_0 = \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} m S_g(E) / m S_z(E) dE \quad (20)$$

$$f = \frac{d}{T_0} \int_0^{T_0} m S_g(E) / m S_z(E) dE + \frac{(\mu_{en}/\rho)_g}{(\mu_{en}/\rho)_z} \cdot (1-d) \quad (21)$$

ここで、

$f_0$  : 空洞原理が成立する電離箱における、気体と壁の単位質量あたり吸収された2次電子のエネルギーの比

$f$  : 有意の大きさをもった電離箱における、気体と壁の単位質量あたり吸収された2次電子のエネルギーの比

$T_0$  : 電子の初期運動エネルギー

d : 壁で発生した2次電子フラックスの空洞中での平均減衰<sup>(21)</sup>

$$= (1 - e^{-B \cdot L}) / B \cdot L$$

B : 電子の質量吸収係数 (cm<sup>2</sup>/g)

L : 空洞の長さ (g/cm<sup>2</sup>)

荷電粒子平衡係数  $\epsilon_q$  は、 $f$  と  $f_0$  との比  $f/f_0$  に相当する。この式を用いて、大きさをもつ電離箱についての荷電粒子平衡係数  $\epsilon_q$  を計算した。ここで空洞の大きさは、本電離箱へ  $r$  線が平行入射する際の平均通過距離 (20 cm;  $4\pi r^3 / 3 / \pi r^2$ ,  $r = 15$  cm) とした。計算の結果、電子の初期運動エネルギーが 200 keV 以下の低エネルギー領域を除いて  $\epsilon_q$  は 1.00 ~ 1.02 であり、電離箱 (空洞) が大きくなることにより荷電粒子平衡が成り立たなくなる影響はほとんど無視できることが分かった。従ってここでは  $\epsilon_q = 1.0$  とした。

(7) 充填ガス圧  $p'$  (mmHg) 及び温度  $T$  (°C)

$p'$  は、窒素ガス封入時の内圧 = 766 mmHg とする。充填ガスは、電離箱に封入する前の数時間ガスバッグに入れて放置し、室温と等温にしたので、 $T$  はその時の室温 = 17°C とする。

以上をまとめると、

$$\begin{aligned} X &= 8.828 \times 10^{14} \cdot i \text{ (VE = 1.03 のとき)}, 8.914 \times 10^{14} \cdot i \text{ (VE = 1.04 のとき)} \text{ [}\mu\text{R/h]} \\ &= 7.690 \times 10^{15} \cdot i \text{ (VE = 1.03 のとき)}, 7.755 \times 10^{15} \cdot i \text{ (VE = 1.04 のとき)} \text{ [nGy/h]} \text{ (22)} \end{aligned}$$

となる。電荷蓄積法の場合については、

$$i \text{ (A)} = \text{電荷蓄積量 } Q \text{ (Coulomb)} / \text{測定時間 } T \text{ (秒)}$$

の関係を用いる。即ち、 $1 \text{ A} = 1 \text{ Coulomb/秒}$  であるから、 $i = Q/T$  を (22) に代入して、

$$\begin{aligned} X &= 8.828 \times 10^{14} \cdot Q/T \text{ (VE = 1.03 のとき)}, 8.914 \times 10^{14} \cdot Q/T \text{ (VE = 1.04 のとき)} \text{ [}\mu\text{R/h]} \\ &= 7.690 \times 10^{15} \cdot Q/T \text{ (VE = 1.03 のとき)}, 7.755 \times 10^{15} \cdot Q/T \text{ (VE = 1.04 のとき)} \text{ [nGy/h]} \text{ (23)} \end{aligned}$$

となる。

### 3.6.2 宇宙線に対する線量率換算

電離箱は  $r$  線と宇宙線に対してそれぞれ異なる感度特性を有する。とくに、ステンレス壁を用いた高圧電離箱の場合には、壁での宇宙線二次粒子のビルドアップを考慮する必要があるが、本電離箱では空気等価壁を用いているのでその必要はない。

本電離箱による測定では、得られた電離電流値と 3.6.1 で求めた換算係数を用いて線量率を求める。 $r$  線線量率と宇宙線線量率とを別々に評価する場合には、電離箱とともに NaI (T1) シンチレーション検出器での測定も行ない、別途  $r$  線線量率を評価し、電離箱から得た線量率 ( $r$  線 + 宇宙線線量率) との差をとることによって宇宙線線量率を求める。

## 3.7 線量 (率) 換算の手順

3.6 までの検討から、出力電流または蓄積電荷量を線量 (率) に換算できる。電流法による測



定結果の線量率換算の具体的な手順は以下のとおりである。電荷蓄積法についてもこれに準じて線量率換算できる。

(1) 出力電流  $I_{out/EI}$  を読み取る。

チャートレコーダから出力電流の平均値を読み取る方法と、デジタルプリンタから平均値を求める方法がある。前者は読み取り誤差を含みやすいが $\alpha$ 線パルスを目視で除去できる。後者は読み取り誤差を含まないが、 $\alpha$ 線パルスによる変動を含むため、その差し引きに留意する必要がある。

(2)  $I_{out/EI}$  を補正する。

3.5 参照。

(3)  $\alpha$ 汚染分の除去

出力電流をチャートレコーダから読み取る場合には、その段階で目視により除去する。デジタルプリンタから求める場合には、3.4より  $7.77 \times 10^{-15}$  Coulomb/分 =  $1.3 \times 10^{-16}$  A を差し引く。

(4)  $r$ 線成分と宇宙線成分とを分離する。

$r$ 線成分を別途 NaI (T 1) シンチレーション検出器により測定する、或いは屋外宇宙線成分を  $3.4 \mu R/h$  相当<sup>(23)</sup> =  $30 \text{ nGy/h}$  とするなどの情報を用いて、 $r$ 線成分と宇宙線成分とを分離する。その際、電離箱出力からの線量率換算係数は3.6に示した値を用いる。

### 3.8 電離箱特性の簡易チェック

上に示した電離箱の特性(線量率換算係数)は、充填ガスの漏洩、気温・湿度変化に伴う回路素子特性の変化、回路素子の経年劣化などにより徐々に変化していくものと考えられる。このような特性変化は非常に緩やかに進むため、定期的に特性チェックを行なうことが望ましい。ここでは、次に示す手順にそって適宜特性チェックを行なった。

#### ステップ 1

チェック用の線源を決める。半減期の長い  $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{226}\text{Ra}$  が望ましい。

#### ステップ 2

電離箱外壁に線源の固定場所を決め、そこに線源をテープなどで固定する。固定する場所が常に同一であるよう印をつけておく。

#### ステップ 3

この状態で測定する。

#### ステップ 4

チェック用線源を外しバックグラウンドを測定する。

#### ステップ 5

線源付きでの測定値とバックグラウンドとの差をとり、線源による正味の値を求める。この値が経年的に変化しているか否かをチェックする。

本電離箱を現在の状態に組み立て・整備してから約1年半経過したが、今のところ、顕著な特性変化は観測されていない。大きな変化を示した場合には、測定系の特性に何等かの変化があっ

たことを示しており、再度線量率換算係数を求め直す必要がある。

## 4. 既知放射線場での校正実験

本電離箱の性能、線量率換算係数の妥当性を総合的に確認するため、研究3棟-047室及び放射線標準施設の2ヶ所の既知放射線場における校正実験を行なった。

### 4.1 研究3棟047室における校正実験の概要

3種類の点線源 ( $^{60}\text{Co}$ ;  $98.5 \mu\text{Ci}$ 、3% at 1970年11月1日,  $^{137}\text{Cs}$ ;  $118.6 \mu\text{Ci}$ 、4% at 1970年11月1日,  $^{226}\text{Ra}$ ;  $551 \mu\text{g}$ 、1.5% at 1966年3月15日) からの直接線線量率を、本電離箱を用いてシャドウシールド法により測定し、各点線源強度と線源-電離箱間距離とから計算して求めた線量率とを比較した。シャドウシールド用の鉛ブロック (厚さ10cm) は線源と検出器の間にできるだけ近く、線源側から見て検出器が十分隠れるよう設置した。

### 4.2 放射線標準施設棟における校正実験の概要

シャドウシールド法を用いて、3種類の点線源 ( $^{60}\text{Co}$ ; 約1mCi,  $^{137}\text{Cs}$ ; 約3mCi,  $^{226}\text{Ra}$ ; 約0.6mg) からの直接線線量率を、本電離箱により測定した値と、3"  $\phi$  NaI (T1) シンチレーション検出器を用いてG(E)関数法<sup>(9)-(14)</sup>により測定した値とを比較するとともに、通産省電子技術総合研究所で校正された基準測定器 (Victoreen Electrometer 500) により検定された線量率値 (直接線+散乱線; 測定精度 $\pm 3 \sim 5\%$ )<sup>(24)</sup>と比較した。この測定は、線源の位置を固定して、両検出器の中心を交互に同一場所に設定して行なった。また、シャドウシールド用の鉛ブロック (厚さ10cm) は線源と検出器の間にできるだけ近く、線源側から見て検出器が十分隠れるよう設置した。

### 4.3 校正結果及び考察

電離箱による測定は、電流法及び電荷蓄積法について行なった。測定結果は本質的に差はないが、測定値の読み取りや $\alpha$ 線パルスの差し引き時に誤差の生じにくい電荷蓄積法での結果について述べる。

研究3棟-347室における測定結果 (シャドウシールド法による直接線線量率の比較) をTable 3に示す。測定値と計算値 (直接線のみ) とは、 $^{60}\text{Co}$ 及び $^{137}\text{Cs}$ については1%、 $^{226}\text{Ra}$ については3%以内で一致した。線源強度の精度が $\pm 3 \sim 4\%$ であることを考えれば十分良い一致と言える。

放射線標準施設棟における校正実験の内、本電離箱とNaI (T1) シンチレーション検出器の測定結果の比較をTable 4に示す。電離箱による値の方がNaI (T1) シンチレーション検出器

による値より 2～4% 低めであった。差異の原因としては、検出器の大きさが異なるために（電離箱は直径 30 cm, NaI (Tl) シンチレーション検出器は直径 7.6 cm）シャドウシールドの条件が異なり、シャドウシールドを施した場合に、電離箱の方が直接線の小角散乱線成分を多めに測定している可能性も考えられるが、G (E) 関数法の評価誤差が 2～3% であることを考えれば十分よい一致と言える。

放射線標準施設棟における校正実験の内、本電離箱による測定結果と検定値との比較を Table 5 に示す。検定値の精度は ± 3～5% であるが、3 種類の線源全てについて両者はよく一致した。

以上の結果より、3.6.3 で求めた電流（電荷）-線量（率）換算係数、エレクトロメータの校正方法、 $\alpha$ 線汚染分の評価等、電離箱の出力から線量（率）換算する手順、係数は総合的に妥当なものと考えられる。

## 5. 結 語

環境  $\gamma$  線及び宇宙線を対象とした高精度線量測定器として 14  $\ell$  球形電離箱を整備した。電離箱壁による減衰、壁材等の天然  $\alpha$  線放出核種による電離寄与成分等を考慮した詳細な検討の下で電流（電荷）-線量（率）換算係数を求めるとともに、既知の放射線場において校正実験を行ない、放射線場強度の数%以内の誤差で測定できることを確認した。今後は、環境  $\gamma$  線及び宇宙線の高精度測定用基準測定器として本電離箱を用いていく。

## 謝 辞

放射線標準施設棟における校正実験の際には、保健物理部線量計測課南賢太郎課長及び清水滋氏に、実験時間の割り当て、線源の設置、検定値情報の提供など多くの面で便宜を図っていただいた。ここに謝意を表する。

## 参 考 文 献

- 1) G.F.Knoll; Radiation Detection and Measurement, John Wiley & Sons, Inc., New York (1979) (邦訳: 木村逸郎, 阪井英次; 放射線計測ハンドブック, 日刊工業新聞社, 東京 (1982))
- 2) 石森富太郎編; 原子が工学講座 1 原子核工学基礎, 培風館, 東京 (1972)
- 3) W.J.Price; Nuclear Radiation Detection, McGraw-Hill Book Co. Inc., New York (1958) (邦訳: 西野治監修, 関口晃訳; 放射線計測, コロナ社, 東京 (1966))
- 4) 三浦功, 菅浩一, 俣野恒夫; 放射線計測学, 裳華房, 東京 (1960)
- 5) 河田燕; 放射線計測技術, 東京大学出版会, 東京 (1978)

- 6) J.A.DeCampo, H.L.Beck and P.D. Raft ; High-Pressure Argon Ionization Chamber System for Measurement of Environmental Exposure Rates, USAEC Report HASL - 260 (1972)
- 7) H.L.Beck, J.A.DeCampo, C.Gogolak, W.Lowder, J.E.McLaughlin and P.D. Raft ; New Perspectives of Low Level Environmental Radiation Monitoring around Nuclear Facilities, Nucl. Tech., 14, 232 (1972)
- 8) N.Latner, K.Miller, S.Watnick and R.Graveson ; SPICER : A Sensitive Radiation Survey Instrument, Health Phys., 44, 379-386 (1983)
- 9) S.Moriuchi and I.Miyanaga ; A Spectrometric Method for Measurement of Low-Level Gamma Dose., Health Phys., Health Phys., 12, 541-551 (1966)
- 10) S.Moriuchi and I.Miyanaga ; A Method of Pulse Height Weighting Using the Discrimination Bias Modulation., Health Phys., 12, 1481-1487 (1966)
- 11) 宮永一郎, 森内茂 ; スペクトルー線量変換演算子とその応用, (I) 原理, 日本原子力学会誌, 9, 440-446 (1967)
- 12) 森内茂, 宮永一郎 ; スペクトルー線量変換演算子とその応用, (II) スペクトルー線量変換演算の自動化, 日本原子力学会誌, 9, 518-523 (1967)
- 13) 森内茂 ; スペクトルー線量変換演算子による線量評価とその演算子の決定, JAERI 1209 (1971)
- 14) 森内茂 ; スペクトル荷重関数方式による環境 $\gamma$ 線線量測定器に関する研究, JAERI M 7066 (1977)
- 15) K.M.Miller and H.L.Beck ; Indoor Gamma and Cosmic Ray Exposure Rate Measurements Using a Ge Spectrometer and Pressurized Ionization Chamber, Radiat. Prot. Dosim., 7 (1-4), 185-189 (1984)
- 16) J.R.Greening ; Fundamentals of Radiation Dosimetry, Adam Hilger Ltd., Accord, MA, U.S.A (1985) (邦訳: 森内和之, 高田信久訳; 放射線量計測の基礎, 地人書館, 東京 (1988))
- 17) 国立天文台編 ; 理科年表第 63 冊, 丸善, 東京 (1989)
- 18) ICRU ; Average Energy Required to Produce an Ion Pair, ICRU Report 31, ICRU, Washington, D.C. (1979)
- 19) L.Pages E.Bertel, H. Joffre and L. Sklavenitis ; Energy Loss, Range and Bremsstrahlung Yield for 10 keV to 100 MeV electrons in Various Elements and Chemical Compounds, Atomic Data, 4, 1-127 (1972)
- 20) E.Storm and H. Israel ; Photon Cross Sections from 1 keV to 100 keV for Elements Z=1 to Z=100, Nuclear Data Tables, A7, 565-681 (1970)
- 21) 秋山延江, 宮崎信之, 道川太一 ; 各種形状および材質の電離箱の光子エネルギー依存性, 保健物理, 22, 153-157 (1987)
- 22) T.E.Burlin ; A general Theory of Cavity Ionisation Chamber, Br. J. Radiol., 39, 727-734 (1966)

- 23) K.Yamasaki, I.Urabe, T.Yoshimoto, K.Okamoto, T.Tsujimoto and K.Katsurayma ;  
Sea Level Cosmic Ray Ionization Intensity at Middle Geomagnetic Latitude (25°N)  
in Japan, Proc.VIth Int. Congr. of the IRPA, vol.3,1038-1041 (1984)
- 24) 清水滋；私信

Table 1 Brief specification of the 14ℓ spherical ionization chamber.

size	inside diameter : 300 mm wall thickness : 5mm volume : 14122 cm <sup>3</sup>
shape	spherical
wall material	STYCAST (mixture of material-A and material-B) material-A : C <sub>21</sub> H <sub>24</sub> O <sub>4</sub> (epoxy resin) material-B : C <sub>15</sub> H <sub>34</sub> N <sub>2</sub> (denatured aliphatic amine) ( A:B = 100 : 45 ) specific gravity = 1.10 volume resistance = 1 × 10 <sup>15</sup> Ω · cm
electrode	6φ aluminum pole with a 20φ aluminum sphere
filled gas gas pressure	N <sub>2</sub> ( >99.999% ) 766mmHg at 17.5°C
electrode	6mm dia. × 150mm pole with a 20 mm dia. sphere on its end. Both are made of aluminum.

Table 2 VE values (see eq.(19)) for the 142 spherical ionization chamber from 50 keV up to 3 MeV.

Energy (keV)	$\mu_{en}$ ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )		Stopping Power ( $\text{MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{g}$ )		Atten. by wall		VE	VE
	air	wall	gas	wall	P <sup>*</sup>	R <sup>*</sup>	P	R
50.	.039930	.026566	5.8334	6.6282	.93221	.94592	1.8320	1.8055
100.	.022900	.023214	3.6441	4.1232	.94528	.95648	1.1808	1.1670
150.	.024740	.026527	2.8711	3.2399	.95078	.96090	1.1069	1.0953
200.	.026550	.028738	2.4795	2.7909	.95486	.96417	1.0891	1.0785
250.	.027697	.030053	2.2465	2.5227	.95809	.96676	1.0802	1.0705
300.	.028670	.031171	2.0944	2.3464	.96057	.96873	1.0727	1.0637
350.	.029085	.031667	1.9892	2.2235	.96276	.97048	1.0664	1.0579
400.	.029450	.032104	1.9134	2.1342	.96457	.97192	1.0608	1.0527
450.	.029618	.032229	1.8572	2.0671	.96624	.97325	1.0586	1.0510
500.	.029770	.032341	1.8146	2.0157	.96767	.97439	1.0567	1.0494
550.	.029613	.032179	1.7819	1.9756	.96893	.97540	1.0530	1.0460
600.	.029470	.032031	1.7566	1.9438	.97005	.97629	1.0495	1.0428
650.	.029240	.031817	1.7367	1.9183	.97108	.97710	1.0453	1.0389
700.	.029028	.031619	1.7212	1.8979	.97199	.97783	1.0415	1.0353
750.	.028832	.031436	1.7090	1.8813	.97283	.97849	1.0378	1.0318
800.	.028650	.031266	1.6996	1.8679	.97358	.97909	1.0344	1.0286
850.	.028425	.031002	1.6923	1.8570	.97431	.97967	1.0326	1.0270
900.	.028214	.030754	1.6868	1.8481	.97498	.98021	1.0309	1.0254
950.	.028016	.030523	1.6828	1.8409	.97561	.98070	1.0292	1.0239
1000.	.027830	.030305	1.6799	1.8352	.97619	.98116	1.0277	1.0225
1050.	.027523	.029978	1.6825	1.8353	.97676	.98162	1.0253	1.0202
1100.	.027234	.029670	1.6851	1.8354	.97730	.98204	1.0230	1.0181
1150.	.026960	.029379	1.6875	1.8355	.97780	.98244	1.0208	1.0160
1200.	.026700	.029102	1.6898	1.8356	.97826	.98281	1.0188	1.0141
1250.	.026454	.028840	1.6920	1.8356	.97871	.98316	1.0168	1.0122
1300.	.026219	.028590	1.6941	1.8357	.97912	.98349	1.0149	1.0104
1350.	.025995	.028351	1.6962	1.8358	.97952	.98380	1.0131	1.0087
1400.	.025781	.028124	1.6982	1.8359	.97989	.98409	1.0114	1.0070
1450.	.025576	.027905	1.7001	1.8359	.98024	.98437	1.0097	1.0055
1500.	.025380	.027696	1.7020	1.8360	.98057	.98464	1.0081	1.0039
1550.	.025140	.027430	1.7038	1.8361	.98090	.98490	1.0069	1.0028
1600.	.024910	.027174	1.7055	1.8362	.98121	.98514	1.0058	1.0018
1650.	.024689	.026929	1.7072	1.8362	.98151	.98538	1.0047	1.0007
1700.	.024476	.026693	1.7088	1.8363	.98179	.98560	1.0036	.9998
1750.	.024271	.026466	1.7104	1.8363	.98206	.98582	1.0026	.9987
1800.	.024074	.026248	1.7120	1.8364	.98232	.98602	1.0015	.9978
1850.	.023884	.026037	1.7135	1.8365	.98257	.98622	1.0006	.9969
1900.	.023700	.025833	1.7150	1.8366	.98280	.98640	.9997	.9960
1950.	.023522	.025636	1.7164	1.8366	.98304	.98659	.9987	.9951
2000.	.023350	.025445	1.7178	1.8367	.98326	.98676	.9979	.9943
2050.	.023166	.025229	1.7219	1.8395	.98346	.98693	.9974	.9939
2100.	.022988	.025020	1.7259	1.8423	.98366	.98708	.9970	.9936
2150.	.022816	.024817	1.7299	1.8450	.98385	.98724	.9966	.9932
2200.	.022649	.024621	1.7337	1.8477	.98404	.98739	.9963	.9929
2250.	.022487	.024431	1.7375	1.8503	.98422	.98752	.9959	.9926
2300.	.022329	.024246	1.7412	1.8529	.98440	.98766	.9955	.9923
2350.	.022176	.024066	1.7448	1.8554	.98456	.98780	.9952	.9920
2400.	.022027	.023892	1.7484	1.8578	.98473	.98792	.9948	.9916
2450.	.021883	.023723	1.7518	1.8603	.98488	.98805	.9946	.9914
2500.	.021742	.023557	1.7553	1.8627	.98504	.98817	.9943	.9911
2550.	.021604	.023397	1.7586	1.8650	.98519	.98829	.9940	.9908
2600.	.021471	.023240	1.7619	1.8673	.98533	.98840	.9937	.9906
2650.	.021340	.023088	1.7652	1.8695	.98547	.98852	.9933	.9903
2700.	.021213	.022939	1.7684	1.8717	.98561	.98862	.9931	.9900
2750.	.021089	.022795	1.7715	1.8739	.98574	.98873	.9928	.9898
2800.	.020968	.022653	1.7746	1.8760	.98587	.98883	.9925	.9896
2850.	.020849	.022515	1.7777	1.8781	.98600	.98893	.9922	.9893
2900.	.020734	.022380	1.7807	1.8801	.98612	.98903	.9919	.9890
2950.	.020621	.022249	1.7836	1.8822	.98624	.98912	.9917	.9888
3000.	.020510	.022120	1.7865	1.8842	.98636	.98921	.9914	.9886

P : parallel incident

R : radial incident

Table 3 Results of the calibration experiment with charge method, at the room 047 of the Laboratory Building No.3: comparison of direct gamma ray exposure (dose) rates between calculated value and the measured value with the ionization chamber. The distance between the gamma ray source and the detector was 136 cm for any case.

D: direct gamma ray component

S: scattered gamma ray component

BG: background value

The upper numbers for each gamma ray source are shown in [Ci- $\mu$ R/h] unit, the lower numbers in [Bq-nGy/h] unit.

source	intensity	m e a s u r e d			calculated	meas./cal.
		D+S+BG	S+BG	D	D	D
(VE)	upper: $\mu$ Ci	( $\mu$ R/h)	( $\mu$ R/h)	( $\mu$ R/h)	( $\mu$ R/h)	
	lower: Bq	(nGy/h)	(nGy/h)	(nGy/h)	(nGy/h)	
<sup>60</sup> Co	8.4 $\mu$ Ci $\pm$ 3%	15.7	9.84	5.86	5.79	1.012
(1.022)	$3.11 \times 10^5$ Bq	136.6	85.6	51.0	50.4	
<sup>137</sup> Cs	77.1 $\mu$ Ci $\pm$ 4%	23.84	10.81	13.03	13.07	0.997
(1.048)	$2.85 \times 10^6$ Bq	207.4	94.0	113.4	113.7	
<sup>226</sup> Ra	545.5 $\mu$ Ci $\pm$ 3%	262.8	26.62	236.2	242.7	0.973
(1.030)	$2.02 \times 10^7$ Bq	2286.4	231.6	2054.9	2111.5	



Table 4 Results of the calibration experiment with charge method, in the FRS (Facility of Radiation Standard), I: comparison of exposure (dose) rates between the ionization chamber and a 3" dia. spherical NaI(Tl) scintillation detector.

source	intensity	m e a s u r e d							[ratio]
		ionization chamber			NaI(Tl)				chamber
		S-D	D+S+BG	S+BG	D	D+S+BG	S+BG	D	D
(VE)	upper:mCi (cm)		upper:( $\mu$ R/h)			( $\mu$ R/h)			
	lower:Bq		lower:(nGy/h)			(nGy/h)			
$^{60}\text{Co}$	$\sim 1\text{mCi}$	247	110.85	18.3	92.55	110.73	16.07	94.66	0.978
	$3.7 \times 10^7 \text{Bq}$		964.4	159.2	805.2	963.4	139.8	823.5	
$^{137}\text{Cs}$	$\sim 3\text{mCi}$	321	106.72	25.13	81.59	106.07	22.88	83.19	0.981
	$1.1 \times 10^8 \text{Bq}$		928.5	218.6	709.8	922.8	199.1	723.8	
$^{226}\text{Ra}$	$\sim 0.6\text{mCi}$	235	111.29	20.19	91.10	111.28	16.67	94.61	0.963
	$2.2 \times 10^7 \text{Bq}$		968.2	175.7	92.6	968.1	145.0	823.1	

Table 5 Results of the calibration experiment with charge method, in the FRS (Facility of Radiation Standard), II: comparison of exposure (dose) rates between the examined value and the measured value with the ionization chamber.

source	intensity	ionozation chamber				determined by FRS	[ratio] <u>chamber</u> determined
		S-D	D+S+BG	BG	D+S	D+S	D+S
	upper:mCi lower:Bq	(cm)	upper:( $\mu$ R/h) lower:(nGy/h)				
$^{60}\text{Co}$	~1mCi	247	110.85	11.07	99.78	99.35	1.004
	$3.7 \times 10^7 \text{Bq}$		964.4	96.3	868.1	864.3	
$^{137}\text{Cs}$	~3mCi	321	106.72	11.07	95.65	96.0	0.996
	$1.1 \times 10^8 \text{Bq}$		928.5	96.3	832.2	835.2	
$^{226}\text{Ra}$	~0.6mCi	235	111.29	11.07	100.22	100.0	1.002
	$2.2 \times 10^7 \text{Bq}$		968.2	96.3	87.19	870.0	

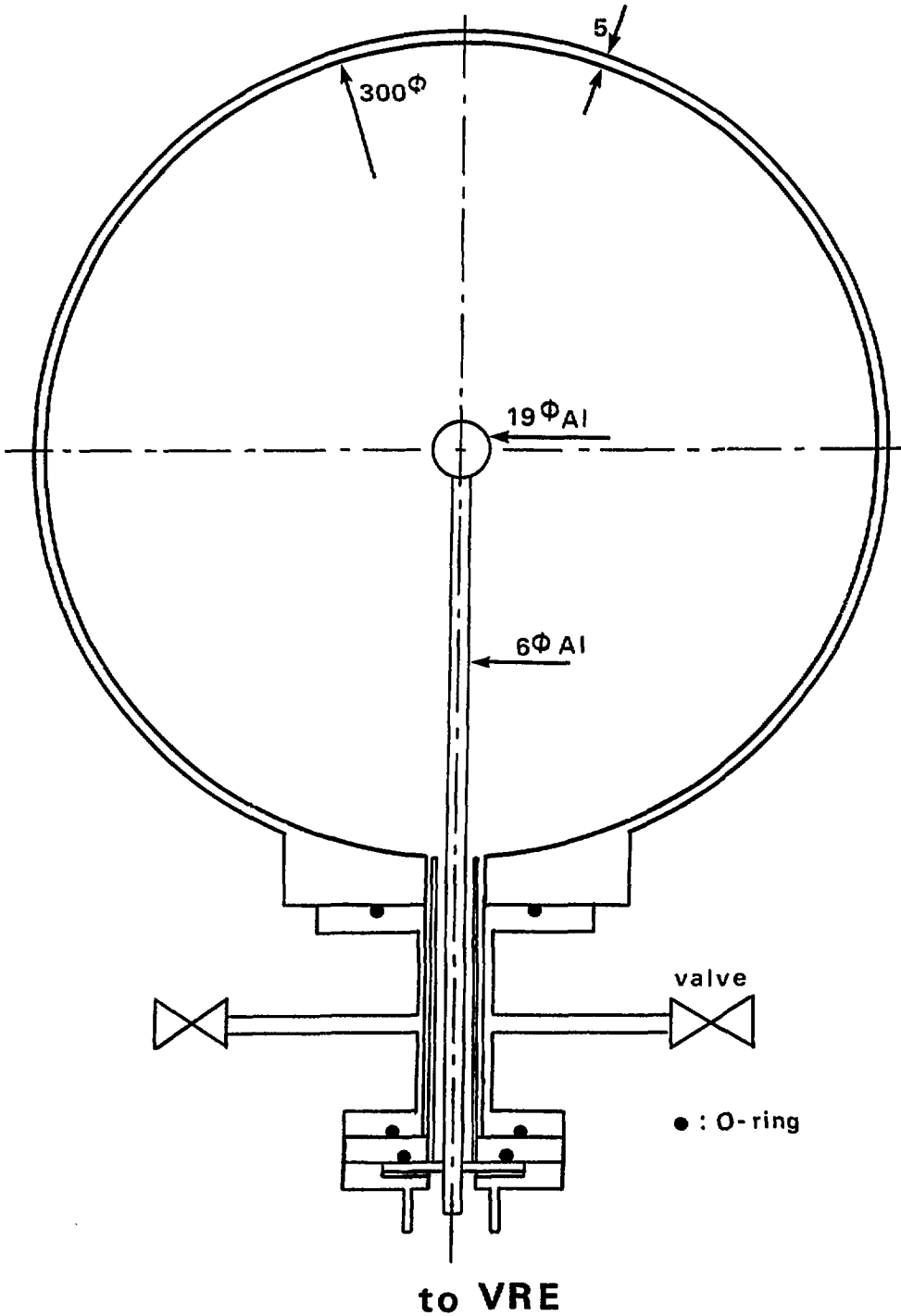


Fig. 1 Outline of the 14ℓ spherical ionization chamber.  
VRE: Vibrating Reed Electrometer.

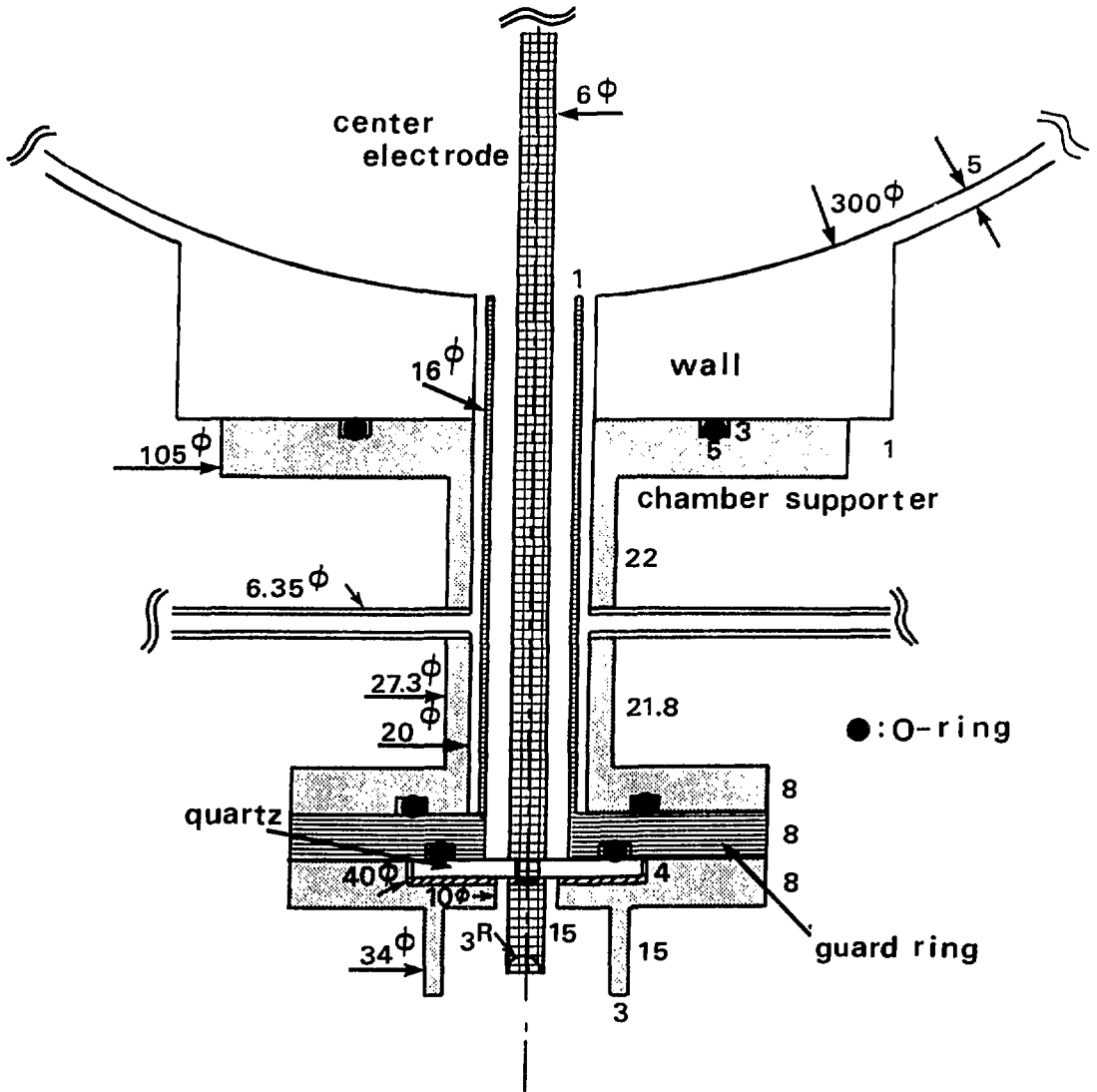


Fig. 2 Detail cross-sectional view of the electrode assembly of the 14l spherical ionization chamber.

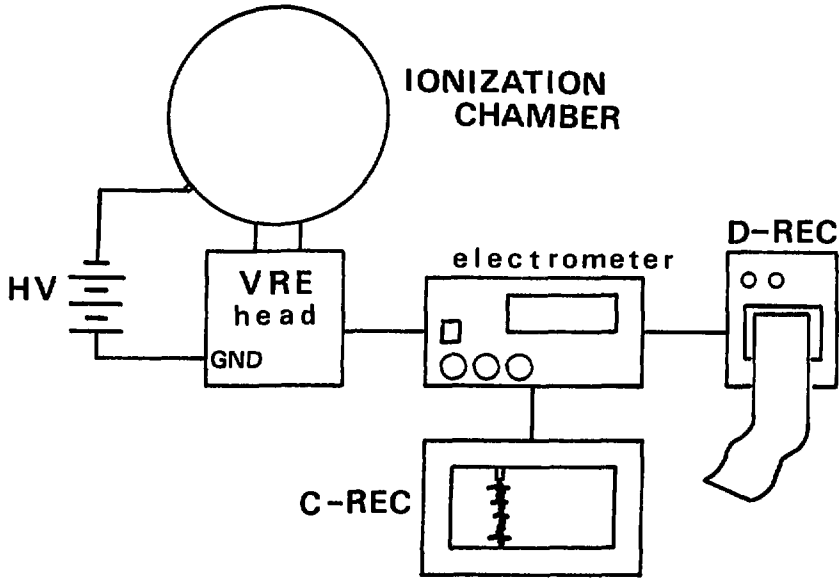


Fig. 3 Experimental arrangement of the ionization chamber.  
 C-REC: Chart Recorder, D-REC: Digital Recorder,  
 VRE: Vibrating Reed Electrometer,  
 HV: High Voltage power supply.

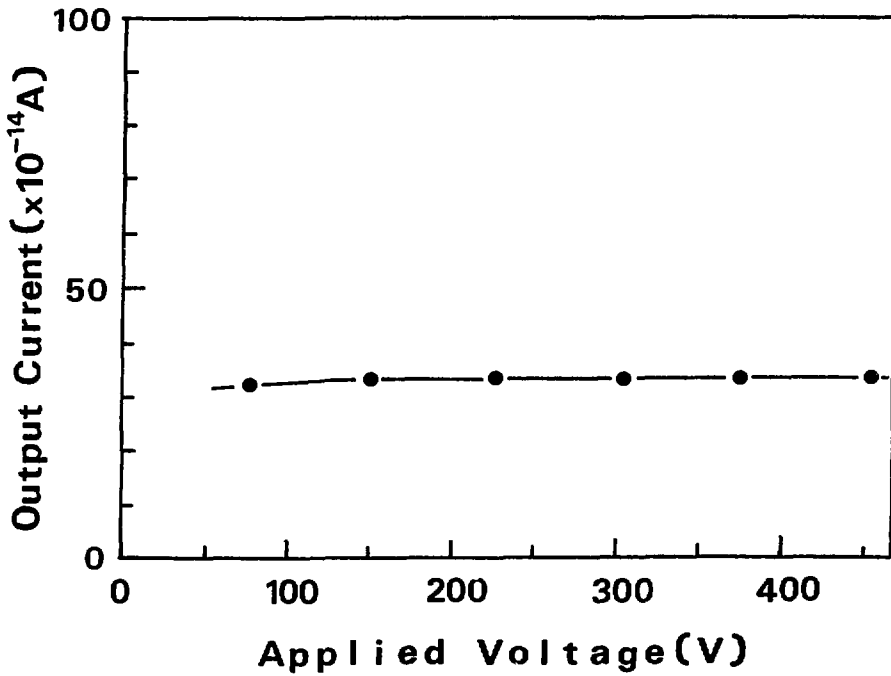


Fig. 4 Saturation characteristics of ionization current  
 at about 2500 nGy/h (290 $\mu$ R/h).

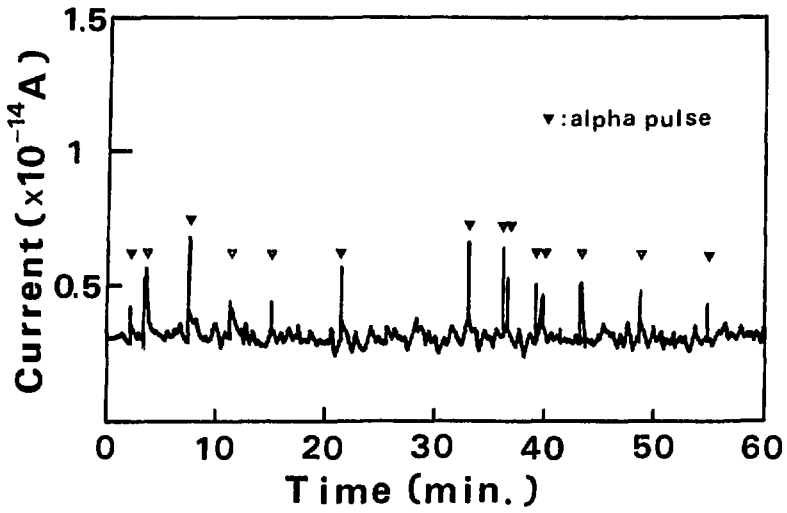


Fig. 5 An example of the chart recorder output for current measurement mode.

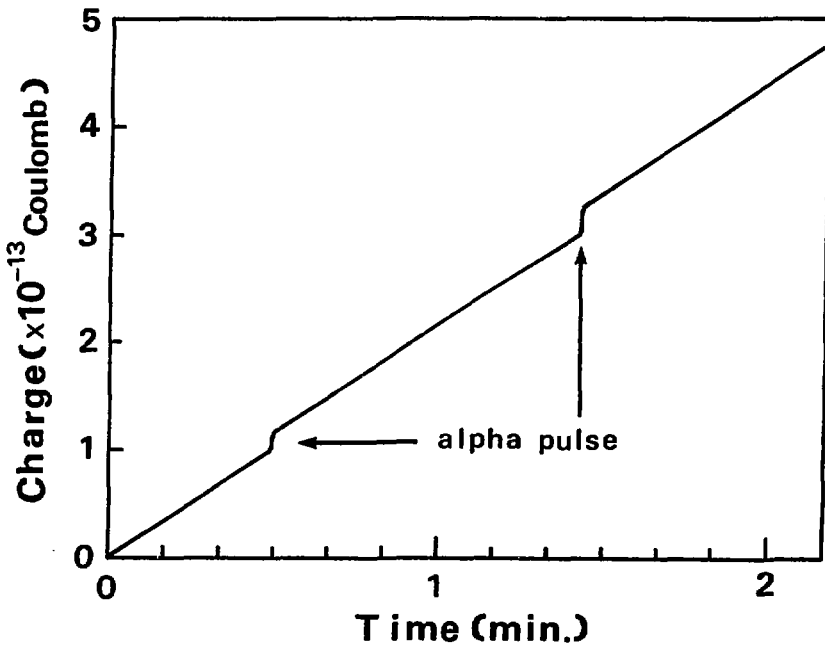


Fig. 6 An example of the chart recorder output for charge measurement mode.

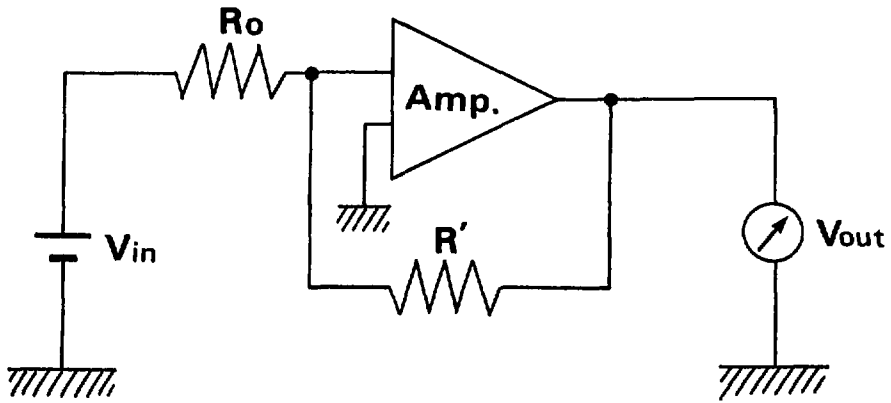


Fig. 7 Measurement circuit for current measurement mode.

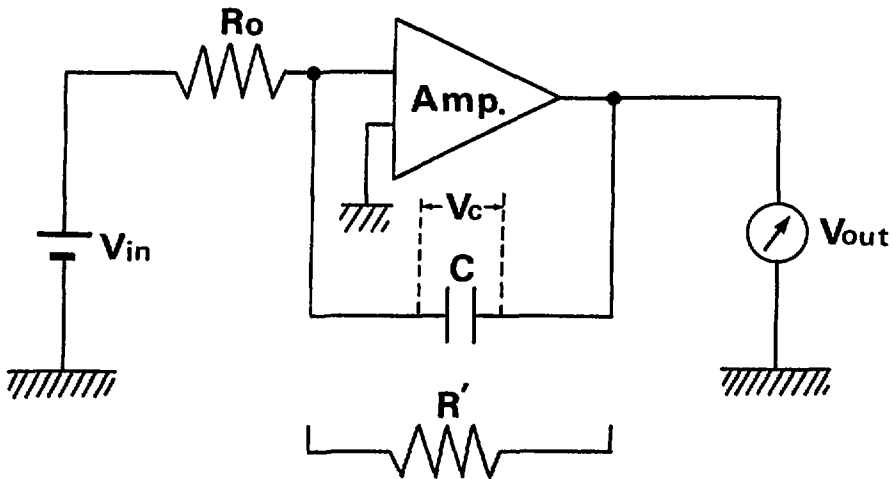


Fig. 8 Measurement circuit for charge measurement mode.