

論文の内容の要旨

Study on high-sensitivity radioactivity measurement with position-sensitive gaseous detector

(気体を用いた位置検出器による高感度放射能計測に関する研究)

氏 名 王 秋 薇

高感度の気体放射能計測技術は廃棄物、考古学、微量元素分析などに幅広く応用されている。内部に線源を設置するガス比例計数管は低エネルギーの線に対して高い検出効率を有し、低レベルの放射能計測に用いられている。一方、大型かつ複雑な固体廃棄物に対しては、内部に設置して電場を与えることは困難であり、空気流を用いて、イオン検出器へ電荷を導く手法が検討されている。低レベル放射能計測において、高感度を実現するには二つの要素が必要である。一つは高検出効率であり、もう一つは低バックグラウンドである。検出効率を失わずにバックグラウンド放射線を低減させるためには、何らかの情報を利用することが有効となると考えられる。本研究では、放射線の局在に関する情報に注目し、それを利用した高感度放射能計測を実現することを目標として研究を行った。

気体位置敏感検出器を用いた高感度放射能計測の代表例として、マルチエレメント型比例計数管(MEPC)を用いた放射性炭素年代測定システムを考える。これは、中央に置かれた線検出用比例計数管(センターカウンタ)とそれを取り囲むように配置された複数の比例計数管(ガードカウンタ)からなるものであり、あらかじめ考古試料をアセチレンガス化・充填し、ガス中に含まれる¹⁴Cが崩壊する際に生じる線をセンターカウンタにより検出するものである。外部から入射する飛程の長いバックグラウンド放射線、あるいはカウンタの壁に含まれる放射能から放出される放射線はガードカウンタによっても検出されるため、両方のカウンタが動作した場合には、真の計数値から差し引くことでバックグラウンド放射線を低減させることができる。MEPCの欠点は外部のカウンタによるガス損失であり、検出効率を損なうこととなる。本研究では、比例計数管の壁を半導体検出器として用いることで利用可能なガス体積の増加、すなわち放射能測定の高感度化を図り、化合物半導体であるCdTe検出器を比例計数管の壁面にタイル状に配置した、50mm × 50mm × 50mmの有感体積をもつハイブリッド型ガス検出器を構成した(図1)。

なお、カウンタ壁面のうち約22%の面積はCdTe検出器によって覆うことができず、反同時計数効率の低減を起こす一方、CdTe検出器信号には、電子とホール移動度の差に起因する信号波形変化があり、同時の判定を厳しくすると反同時計数効率の悪化を招く。逆に、同時の判定を緩く

すると、偶発同時計数の効果が生じ、検出効率が落ちる。そこで本研究では、タイミングの判定に波形情報を加味したデジタル信号処理技術を用い、 C_2H_2 ガスをを用いて 122keVから 1.3MeVまでのバックグラウンド線に対して約 80%と高い線の除去効率を得た。CdTe検出器信号では異なる信号波形が存在し、波形間に μs オーダの時間差が生じるため、同時計数の時間窓として数 μs の範囲が必要であるが、波形間の相似を示す距離空間を用いてクラスタリングを行い信号に含まれるノイズ成分を低減する手法の適用により約 $0.1\mu s$ のタイミング分解能まで改善できた。

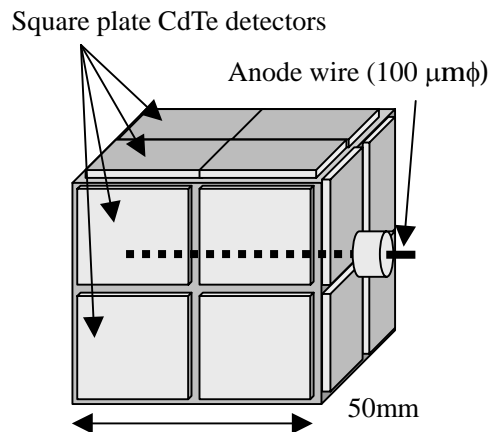


図1 放射性炭素検出用ハイブリッド型ガス検出器

本手法を用いて測定した計数管のバックグラウンドは $0.10 \pm 0.02 \text{cpm}$ であった。MEPC を同サイズにした場合のバックグラウンドの推定値は 0.2cpm となり、これと比較して約半分まで低減させることができることが分かった。この結果、本検出システムは、約 25000 年前までの年代測定に適用できるものであることが分かった。

次に位置敏感型気体検出器の高感度放射能計測における利用を考える。日本国内の施設で発生した放射性廃棄物は既に大量に蓄積され、体積が 200 リットルのドラム缶換算で約 22000 本以上になっており、クリアランスレベル検認による合理的分別を早急に行うことが求められている。従来の放射能検査においては線自体を直接検出していたが、線の飛程が短く検出器を密着させる必要があり、多大な時間と人件費がかかっていた。最近、線を直接測定するのではなく、線により空気中に生成したイオンを計測する新しい電離放射線イオン流体移送型計測システムが提案された。しかし、線を間接的に測定するため、湿度や温度の影響、測定対象の帯電など種々の条件下で測定値や測定下限の信頼性を示す必要がある。ここでは、本手法の基礎となるイオンの初期分布を直接測定する手法を開発し、電離放射線イオン流体移送技術の基礎を確立することを目的として研究を進めた。初期イオン空間分布は、線の飛跡に沿って電離量を求めていくことも考えられるが、初期再結合や体積再結合などの効果があるため、実際のイオン空間分布はシミュレーション結果とは異なってくる。再結合係数と拡散係数が温度、気圧と湿度などに依存するため、実際のイオン空間分布も温度、気圧と湿度などに依存する。

平行平板型電離箱ではイオンが電界中でドリフトする際に、水平方向のイオン空間分布を保つ

と考えられる。電極間に線源を挿入し片側の電極を多数のストリップからなる電極に変更し、正または負の電圧を他方の電極に印加すれば、正または負イオンはストリップ収集電極へドリフトし収集され、正または負イオンの一次元空間分布が測定される。通常、線の飛程は空気中で約 50mm 以下であることを考慮して、電離箱の水平面積は 150mm×150mm とし、上面電極とストリップ収集電極の間隔は 60mm とした。電荷積分型 ASIC(Application Specific Integrated Circuit)を用い、64 チャンネルのプリアンプボードを製作し、収集電極は 2mmピッチのものを用いた。測定は、ワイヤメッシュプレートを上部電極として用い線源をその上に載せ、正・負イオンの空間分布を得た。図 2 から分かるようにイオン電流分布はドリフト電圧に応じて変化し、収集効率はドリフト電圧の増加に対して増加し、イオン電流分布が両側から中心まで徐々に飽和に達した。分布の両側のイオン電流はドリフト電圧の増加につれて減少する。この原因は周辺イオンのドリフト速度が減少するからではなく、初期生成位置におけるイオンのドリフト時間がドリフト電圧の増加につれて減少することで、イオン拡散幅が狭くなるためであると考えられる。

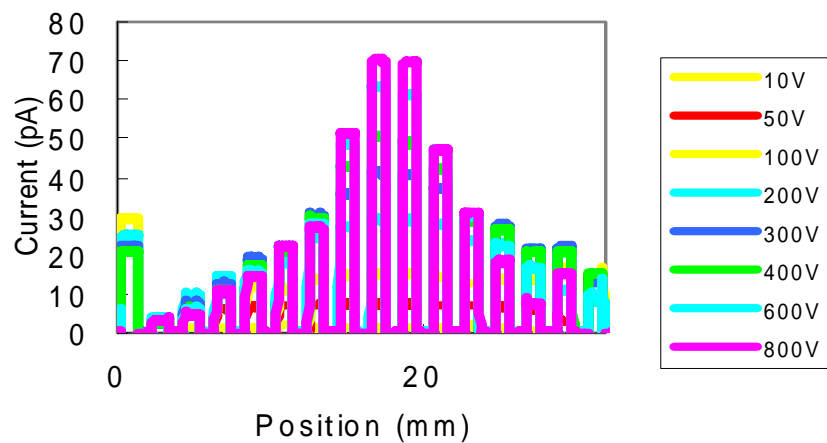


図 2 印加電圧によるイオン分布の変化

そこで、上記を数値計算により定量的に評価することとした。定常電圧の条件で、イオン対を発生する空間でイオン数密度分布は以下の式で表すことができる。

$$\frac{du}{dt} = D \times \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) - \mu \times E \times \frac{\partial u}{\partial z} + n_0 - n_0 \times (1 - f_v f_i)$$

放射線入射による初期イオン対が生成しない空間におけるイオン数密度分布は以下の式で表すことができる。

$$\frac{du}{dt} = D \times \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) - \mu \times E \times \frac{\partial u}{\partial z} - a \times u \times u$$

これらの式で U は空間中のある点のイオン数密度、 D は拡散係数、 μ は空気中のイオンの移動度、

E は電極間の均一な電場、 α は再結合係数、 n_0 は単位体積と単位時間当たりのイオン発生量、 k は体積再結合収集効率、 f_i は初期再結合収集効率である。差分法により水平方向のイオン数空間分布とドリフト電圧・経過時間の関係を求めた。イオン数分布の形はドリフト電圧によって大きく変化し、両側は徐々に飽和に達する。イオン数分布におけるピーク幅は時間につれて広がり、0.39秒間にイオン数空間分布のピーク幅は48mmから64mmまで増加した。単位体積と単位時間当たりの初期再結合と体積再結合によるイオン損失は下の式で表される。ここで体積再結合収集効率 k 、初期再結合収集効率 f_i とする。

$$n = n_0(1 - f_v \times f_i)$$

ここで f_i は下の式で与えられる。

$$f_i = \frac{1}{1 + (\alpha \times p^2 / 8 \times \sqrt{\pi} \times b_0 \times u \times \sin \theta / E) \times N_0}$$

α は再結合係数、 p はガスの圧力、 b_0 は初期柱状半径、 θ は初期粒子飛跡と電界との間の角度、 μ は空気中イオンの移動度、 N_0 は粒子の飛跡に沿う非制限電離密度である。体積再結合収集効率 k は下の式で表すことができる。

$$f_v = \frac{1}{1 + \frac{\alpha \times d^4 \times n_0}{6 \times U^2 \times \mu^+ \times \mu^-}}$$

d は二つ電極間の距離、 U はドリフト電圧、 μ^+ と μ^- は正イオンと負イオンの空気中での移動度である。初期再結合収集効率と体積再結合収集効率はドリフト電圧の増加に伴い増加するため、イオン損失はドリフト電圧の増加に伴い減少する。一方初期電荷が生成される領域外では、このことはイオン電流がドリフト電圧につれて減少する原因である。 f_i は高い電圧印加時には n_0 に依存せず、300V以上で90%に達する。 k は n_0 に関連し、 n_0 が大きいほど k は小さく、飽和収集に達する必要電圧も大きい。従って測定したイオン空間分布の結果は異なる n_0 の空間分布を示し、両側で n_0 が小さく、両側から中心まで徐々に増加する挙動を示すことが分かる。

以上をとりまとめるに、本研究では、位置敏感型気体検出器を用いて高感度放射能計測を実現することを目的として研究を進め、 ^{14}C 年代測定用反同時計数システムの開発では、検出器壁を反同時計数用検出器で埋めることで従来の約半分の低バックグラウンドが実現できた。また、放射能測定のための電離放射線イオン流体移送に基づく高感度計測手法の確立に向けて、基礎的な検出系の挙動を明らかにするため、線によるイオン空間分布測定用位置敏感型マイクロイオンチェンバーを開発した。正イオンと負イオンの空間分布を詳細に測定した結果、電場を印加した際のイオン分布の変化を初期イオンの生成・拡散モデルにより説明することができ、初期再結合収集効率と体積再結合収集効率がイオン流体移送計測の基本挙動において重要であることが示された。