

放射線検出器の製作

○福井 宥平, 古川 和弥, 榊原 昇一
大阪大学 産業科学研究所 技術室
y-fukui@sanken.osaka-u.ac.jp

1. はじめに

放射線検出器は、気体や固体(半導体)の電離作用を利用するものと化学作用を利用するものがある。今回は気体の電離作用を利用する検出器に着目し、その基本原理の理解や測定技術の習得を目指すことにした。

気体の電離作用を利用する放射線検出器は印加電圧により特性が変わる。電離箱は低電圧で動作し、放射線によって発生した電荷がそのまま陽極に収集されるため、信号レベルが小さいもののエネルギー特性に優れている。比例計数管は電子雪崩による電離電子の増幅により、エネルギー分解能を持つ測定が可能である。高電圧を使用するGM管は出力信号が大きいので、放射線の検出が容易であるが、エネルギー分解はできない。

本研究では、電離電流の検出器を自作し、高圧電源とピコアンメータを組み合わせた測定系を構築し、印加電圧の変化に伴う電離電流の変化の特性を測定する。さらにオペアンプを用いた増幅回路を試作し、比例計数管領域での微小電流パルスの観測実験を試みる。

2. 電離電流の特性調査

2.1 測定系の構築

気体の電離作用を用いた放射線検出器の中で基本となる電離箱の測定原理を図1に示す。電圧の印加された平行平板の間に荷電粒子が通過すると、気体分子が電離される。発生した電子とイオンの対はそれぞれ正・負の電極に引き寄せられる。その際に生じる微小電流を電流計で測定することで、電離現象を観測する仕組みである。

この原理を基に、検出器を自作し、高圧電源、ピコアンメータと組み合わせて、印加電圧と電離電流の関係性を測定することにした。検出器は平行平板ではなく40 mm×60 mmのアルミ角パイプの中心に金蒸着した直径60 μm のタングステン線を張り、内部にガスを投入できるように2か所のチューブ接手を持つ構造とした(図2)。全体のセットアップを図3に示す。ノイズ低減のため、検出器はアルミホイルでシールドをした樹脂ケースの中に格納している。高圧電

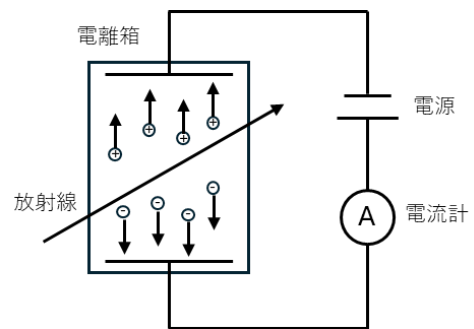


図1. 電離箱の基本原理

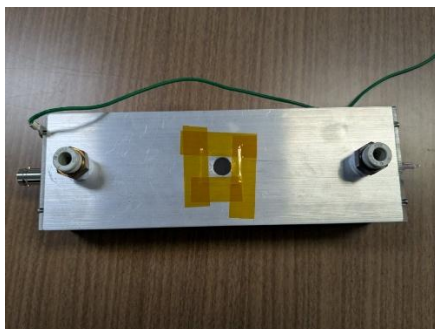


図2. 自作した検出器の筐体

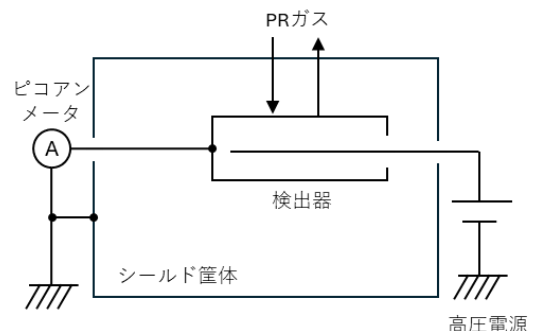


図3. 電離電流の測定体系

源の出力を検出器の陽極に接続し、検出器の筐体とグラウンドの間にピコアンメータを入れることで微小電流を測定できるようにした。

2.2 電離電流の測定

図3のセットアップを用いて、検出器に0～1.99 kVまで電圧を印加し、ピコアンメータによって計測された電離電流の値を放射線源の有無に分けて図4に示す。線源はBi-207の密封小線源(228 kBq)を使用し、検出器を格納する樹脂ケースの蓋の上(検出器表面との距離約120 mm)に置いた。また、測定中は検出器内にPRガス(Ar 90%+CH₄ 10%)を流し続けた。図4のグラフの通り、印加電圧が1.5 kV未満の領域では線源の有無による差異は見られない。今回は線源が微弱であることや、ノイズレベルを1 pA未満に抑えることが難しかったことから、印加電圧の小さい電離箱領域の微弱な電流を観測することはできなかった。

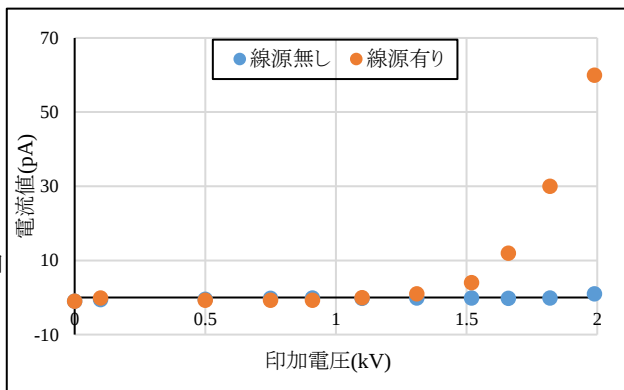


図4. 線源の有無による電離電流値の比較

それに対し印加電圧が1.5 kVを超えると、線源がある時に電流値の明らかな増大が見られた。これは線源により電離された一次電子が電場により再加速されて、電子雪崩による連鎖的な電離が観測されていることを示唆している。

次に入射線量を最大化するために検出器と線源を接触させて3.0 kVまで電圧を印加したときの測定結果を図5に示す。図4の測定時よりも線量が高いと想定されるにも関わらず、印加電圧が1.5～2.0 kVの範囲では電離電流の値に有意な差は見られなかった。さらに2.6 kVまでは一貫した指数関数的挙動が認められたが、それを超える電圧領域では急峻な電離電流の増加が観測された。

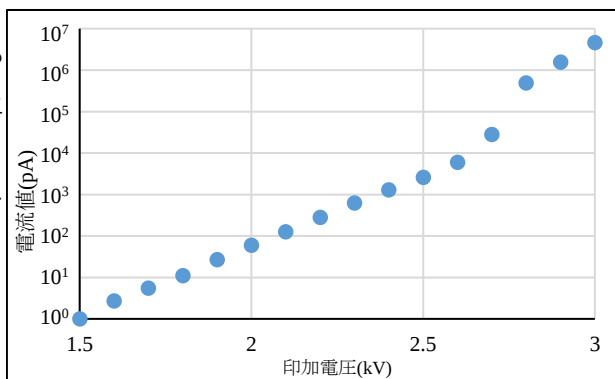


図5. 線源距離最小時の電離電流値測定結果

線源距離を近づけても電離電流が上がらなかった原因は、現時点では明確ではない。検出器の横幅60 mmに対し、線源距離は120 mm未満の範囲内でのみ変化させたため、入射線量の変化は小さいと考えられる。今後は、線源距離ごとの試行数を増やして検証を行いたい。

また2.6 kV以上では制限比例領域やGM管領域に到達している可能性がある。手持ちの高圧電源では3.0 kV以上の電圧が印加できないため、今後は検出器の筐体をコンパクト化し、電場勾配を上げることでこれらの領域の特性評価を行うことを検討している。

3. 比例計数管の特性調査

3.1 比例計数管回路用プリアンプの製作

電離電流の測定時はピコアンメータによって流れた電流の平均的な値を読み取っていたが、比例計数管で放射線 1 本ごとのエネルギー分解測定を行うためには、パルス毎の波高を測定する必要がある。比例計数管の微小な出力電流を測定するために、プリアンプ回路を自作することにした。製作した回路の概略を図 6 に、写真を図 7 に示す。1 段目のオペアンプで微小電流を増幅した後、2 段目のオペアンプで測定機に必要な波高・パルス幅にまで増幅する構成となっている。また製作した基板ではオペアンプ、フィードバック抵抗、コンデンサをソケットに差し込むようにしており、素子を変えながら実験ができるようにしている。

この微小電流の増幅を行う 1 段目は働き方によってトランスインピーダンスアンプ又はチャージセンシティブアンプと呼ばれる増幅形式を用いる。これは微小電流の測定に使用され、入力バイアス電流の小さい JFET タイプのオペアンプの反転入力と出力端子の間にフィードバック抵抗とコンデンサを挿入した回路となっている。トランスインピーダンスアンプは微小電流を電圧に変換するために用いられ、出力電圧はフィードバック抵抗と入力電流の積で表される。一方チャージセンシティブアンプは微小なパルス電荷のコンデンサへの充電値を計測するため、ピーク出力電圧は入力電荷をコンデンサの容量で除した値で表される。

増幅回路の特性を調べるために回路シミュレーター

LTSpice を用いて一段目アンプの動作解析を行った。図 8(a) の回路をシミュレーションに用い、比例計数管を模した電流源にピーク電流 100 pA でパルス幅 10 μ s ~ 1000 μ s の信号が流れた際の 1 段目のオペアンプの出力として得られた波形を図 8(b)に示す。出力電圧のピーク値はパルス幅の伸長に従い、最大 10 mV まで増幅されることが確認された。トランスインピーダンスアンプではパルス幅に寄らず出力電流のみ考慮するため計算上の出力電圧は 10 mV となる。一方、チャージセンシティブアンプではパルス内の総電荷量で考えるため、計算上はパルス幅に比例して出力は 1 mV ~ 100 mV まで変化する。この結果からパルス幅がフィードバック抵抗と並列コンデンサの積の時定数 (100 μ s) を超えるほどの長さならばトランスインピーダンスアンプ、それ未満であればチャージセンシティブアンプ的な動作をすることが分かった。

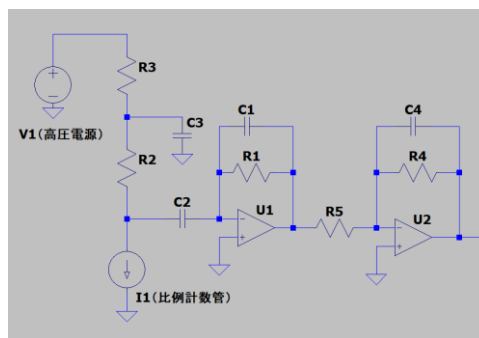


図 6. 比例計数管用アンプ回路図

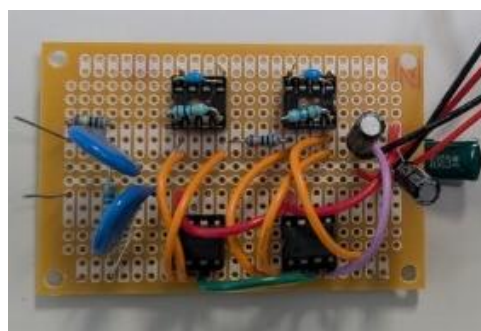


図 7. 比例計数管用アンプ回路

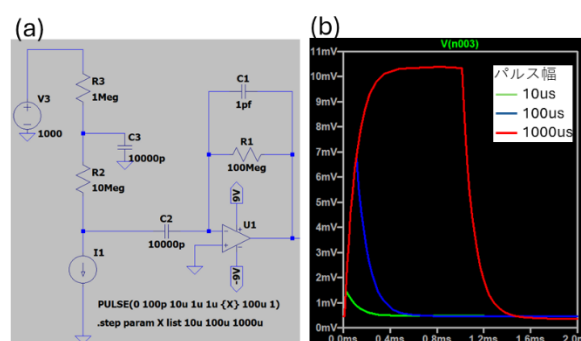


図 8. (a)シミュレーション回路、(b)出力波形のシミュレーション結果

3.2 プリアンプを用いた比例計数管の特性測定

製作したプリアンプを用いて比例計数管の測定試験を実施した。図 9 に測定のセットアップ概略を示す。シールド筐体内に検出器とプリアンプを設置し、外部の高压電源と接続した。検出器には PR ガスを供給し、オシロスコープを用いて出力信号を測定した。この測定では、放射線の入射毎のパルス波形をオシロスコープで観測できることが期待される。オシロスコープの一分あたりのトリガー回数を記録し、線源の有無や印加電圧による差異を評価することにした。

印加電圧が 1 kV の時、線源がないときは 240 カウント/分、線源を検出器から 120 mm の距離に置いたときは 261 カウント/分のトリガーが記録された。試行回数が十分ではないものの、この時点では線源の有無による有意な差は確認されなかった。さらに印加電圧を 1.4 kV に上げると、計測中に放電を起こしプリアンプの動作に異常が見られたため、この印加電圧での計測および再現性の確認は中止した。

製作したプリアンプは増幅率が高く、シールド筐体内とはいえ機器間の配線が露出していたため、線源のない状態でも増幅されたノイズがオシロスコープで観測されている。これらの課題に対応するため、プリアンプを金属製ケースに格納し、各機器間を同軸ケーブルで接続する改良の準備を進めている。

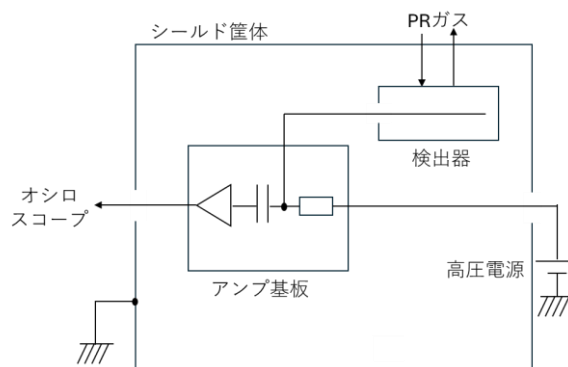


図 9. 比例計数管特性の計測体系概略

4. まとめ

本研究では気体の電離作用を用いた放射線検出器の測定系構築及び測定実験を実施した。構築した測定系による電離電流の測定では、印加電圧が 1.5 kV を超える領域で電子雪崩によるものと推察される指数関数的な電離電流の増大が観測された。今後は電離箱領域における微少電流の測定や、GM 管領域を観測するための測定系の改良を進めたい。また比例計数管領域での放射線パルス測定のためにプリアンプ回路を自作し、特性測定試験を実施した。今回は有意な結果が得られなかったため、ノイズ対策を中心とする改良を進めたい。最後に、本研究にあたり「人と知と物質で未来を創るクロスオーバーアライアンス事業」よりご支援をいただきましたことに、心より感謝申し上げます。