

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 13 日現在

機関番号：32689

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26600136

研究課題名(和文)新しい電極構造を有する希ガス電離箱の開発と環境計測への応用

研究課題名(英文)Development of gas ionization chamber with new electrode and application for environmental measurement

研究代表者

長谷部 信行 (Hasebe, Nobuyuki)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：10127904

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：Coplanar電極と呼ばれる新しい電極構造を用いた希ガス電離箱の開発を行い、その基礎特性の研究を行った。まず、形状の異なる数種のCoplanar電極を用いたエネルギー分解能による希ガス電離箱の性能評価を行った。またCoplanar電極を有する希ガス電離箱本体の静電容量を模した等価回路を用いた電子ノイズの測定を行った。今度はさらにエネルギー分解能を向上させるべく研究を行い、環境モニターなどとして応用していく。

研究成果の概要(英文)：Gas ionization chamber with new electrode (coplanar electrode) was constructed and basic properties of the chamber was studied. Performance evaluation of energy resolution of the chamber as a function of shape of electrodes was studied. And the dependence of electronic noise on the detector capacitance was studied using an equivalent circuit. The experimental results show that the gas ionization chamber with coplanar electrode is appropriate to access low level environmental pollution.

研究分野：放射線物理

キーワード：放射線検出器 気体電離箱 希ガス Coplanar電極 線スペクトロメトリー

1. 研究開始当初の背景

(1) 自然界には、Th-232, U-238, U-235 からの娘核などが数多くの天然線放射物体が存在するが、福島のような原子力発電所での事故が起こると核反応の核種によって作られた線放射物質が外部環境へと飛散し得る。放射性物質による環境汚染のモニタリングは非常に重要であるが、線は飛程が短く測定が難しい。それゆえ環境試料中の微弱な線測定には、大きな検出体積を持つ検出器の開発が必要である。現在、線検出器としてはシリコン半導体検出器やフレッシュグリッド電離箱が広く用いられている。しかしながら半導体検出器は通常検出体積が小さく、低レベル線検出には向かない。また、フレッシュグリッド電離箱は分解能が良く低レベルの線測定も可能だが、ワイヤグリッドが衝撃や振動に弱く、マイクロフォニック雑音を生じる欠点がある。それに対し、コプラナー電極を有する希ガス電離箱は機械的強度や利便性、検出体積を大きくしやすい点で大きな特徴を持つ。そこで我々はコプラナー電極を有する希ガス電離箱を開発し、その基礎特性(電極構造による分解能の違い、アノード-カソード電極間やコプラナー電極間の静電容量による分解能の違いなど)を研究することで、分解能の向上を目指す。

(2) コプラナー電極を有する希ガス電離箱の原理を説明する。コプラナー電極の原理は SSD に対して P. N. Luke によって考案された。コプラナー電極は元来半導体検出器のための理論であったが、我々は希ガス電離箱へと応用した。図 1 はコプラナー電極を有する希ガス電離箱の図であり、アノード電極が、電子のみを収集する電極(以下 CA)と陽イオンの影響のみを受ける電極(以下 NCA)に分かれている。CA と NCA 間にバイアス電圧を印加することにより、チェンバー内で線の電離作用によって生じた全ての電子は CA に吸収される。一方チェンバー内に残る陽イオンによる誘導電荷は CA、NCA とともに生じる。CA の信号から NCA の信号を減算することで陽イオンの影響を除去でき、電子からの信号のみを得ることが出来る。

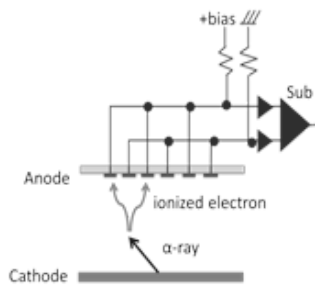


図 1. コプラナー電極を有する希ガス電離箱

2. 研究の目的

(1) コプラナー電極を用いた希ガス電離箱で、電極構造や電極間の距離など測定条件を

最適化することでフレッシュグリッド電離箱と同等のエネルギー分解能の性能を得ることを最終目的としている。

(2) まず、コプラナー電極を用いた小型の電離箱を作製した。この電離箱を用いての実験は、電極構造の変更による分解能の変化を測定することで、電離箱のコプラナー電極の最適な形状を決定することを目的としている。

(3) 次に、同環境下で分解能比較を行うためにフレッシュグリッド電離箱を作製し、カソード-グリッド間とグリッド-アノード間の電場比、波形整形時定数、グリッド-アノード間隔、以上の変化に対してのフレッシュグリッド電離箱のエネルギー分解能の変化を測定した。この実験は同環境下でのフレッシュグリッドの分解能の値、すなわち我々の開発しているコプラナー電極を用いた希ガス電離箱の目標分解能を測定することを目的としている。

(4) 最後に、より大型のコプラナー電極を用いた電離箱を作製し、その分解能を測定してゆく中で、分解能は主に CA - NCA 間の静電容量 (Cc) やアノード-カソード間の静電容量 (Cd) から生じる電子ノイズによって決定されることが分かったため、Cc 及び Cd の静電容量の大きさとエネルギー分解能の関係性を求めた。この実験は、コプラナー電極を有する希ガス電離箱の分解能向上可能性を定量的に示すことを目的としている。

3. 研究の方法

(1) 図 2 に示す設計のコプラナー電極を用いた小型希ガス電離箱を作製し、 5×10^{-4} Pa まで真空引きし、PR ガス (Ar:90%, CH4:10%) を 4.5 気圧まで充填した。線源として 3 種の混合線源 (Np-237, Am-241, Cm-244) をカソード電極中央にセットした。使用したコプラナー電極の構造は形状において 3 パターン(平行型、サークル型、スパイラル型)、また平行型においては電極間隔を変更した 2 パターン(電極間隔 0.5mm、電極間隔 1.0mm) の計 4 パターンあり、それぞれ図 3 に示す。実際の実験手順は以下のものであった。

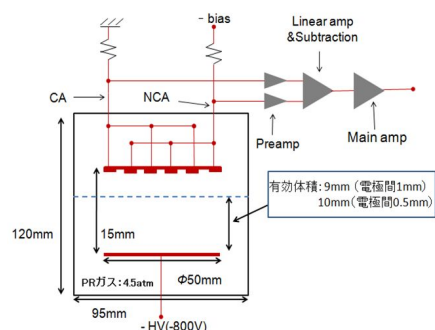
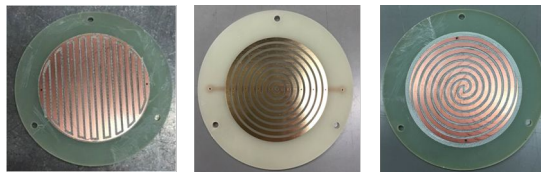
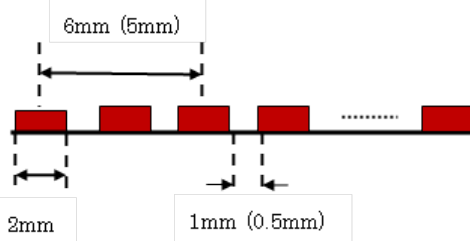


図 2. 実験で使用したコプラナー電極を用いた小型電離箱の構造



パラレル型 サークル型 スパイラル型



各電極構造の横から見た形状(サークル型とスパイラル型は電極間隔が 1mm。パラレル型においては電極間隔が 0.5mm のものと 1.0mm のものを用意した)

図 3. 実験で使用したコプラナー電極

アノード-カソード間電圧の決定
アノード-カソード間の電場を決定するために、アノード電圧をグラウンドに固定し、カソード側に負の高電圧をかけ、平行平板電離箱として CA からの信号の波高値の飽和を確認する。

CA-NCA 間バイアス電圧の決定
NCA に負のバイアス電圧をかけて CA の信号を測定し、波高値の飽和を確認する(各電極構造において測定)。

電極間隔、電極形状を変化させた各電極構造におけるエネルギー分解能の比較
CA の信号から NCA の信号を減算し、多チャンネル波高分析器(以下 MCA)上のスペクトルを得る。そのスペクトルからエネルギー分解能を半値幅で求め、電極構造を変化させることでどのような違いがあるのか議論する。

(2)図 4 に示すフレッシュグリッド電離箱を作製し、カソード-グリッド間とグリッド-アノード間の電場比、波形整形時定数、グリッド-アノード間隔、以上の変化に対してのフレッシュグリッド電離箱のエネルギー分解能の変化を測定した。

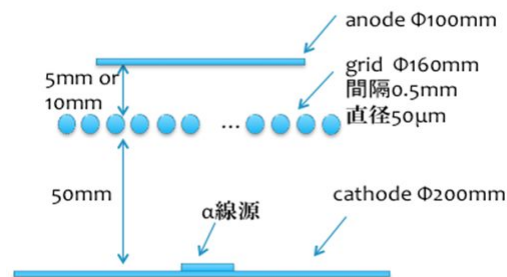


図 4. 実験で使用したフレッシュグリッド電離箱の構造

(3)図 5 に使用した大型の希ガス電離箱の幾何学的構造及びその寸法を示す。チェンバーは 1×10^{-4} Pa まで真空引きをした後、PR ガス (Ar:90%, CH₄:10%) を 2 気圧まで充填した。この実験ではスパイラル型の電極構造を用いた。図 6(a)に横から見た形状を、また図 6(b)に上から見た写真を示す。線源は 3 種の混合線源 (Np-237, Am-241, Cm-244) をカソード電極中央にセットした。実験は以下の手順で行われた。

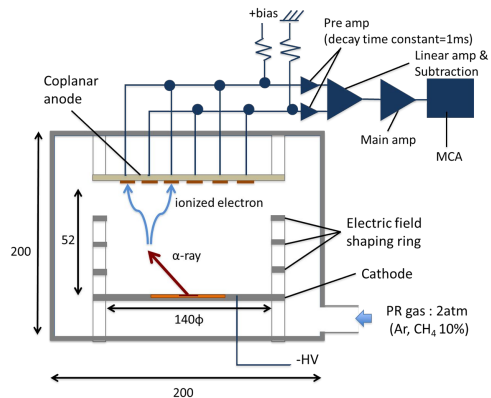


図 5. 実験で用いたコプラナー電極を用いた大型電離箱の構造

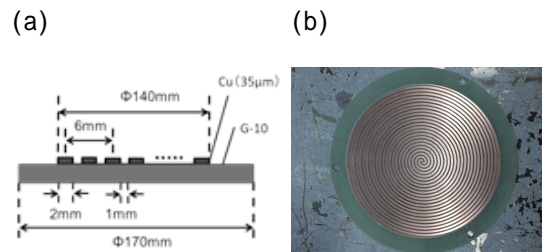


図 6. コプラナー電極(スパイラル型)の構造

アノード-カソード電圧の決定
CA 及び NCA を 0V に固定し、カソード電圧のみを変化させ、CA からの信号の波高値を測定し、飽和した時のカソード電圧を求めた。

CA-NCA 間バイアス電圧の決定
カソード電圧を印加した状態で、NCA を 0V に固定し、CA の電圧を変化させ、CA からの信号の波高値を測定し、波高値が飽和した時の CA 電圧を求めた。

コプラナー電極を有する希ガス電離箱のエネルギー分解能の測定
カソード電圧とバイアス電圧を印加した状態で、MCA を用いてスペクトルを得て、その半値幅を計算することで、本検出器のエネルギー分解能を求めた。

検出器本体の等価回路を用いての Cc や Cd などの静電容量による電子ノイズの測定
コプラナー電極の CA - NCA 間の静電容量を Cc、電離箱のアノードカソード間の静電容量を

Cd とし、図 7 に示す等価回路を作製し、Cc、Cd の値の変化による電子ノイズの変化の相関をテストパルスの半値幅を測定することで求めた。

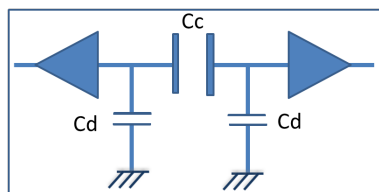


図 7. コプラナー電極を用いた希ガス電離箱の等価回路

4. 研究成果

(1) コプラナー電極を用いた小型希ガス電離箱での実験結果を以下に示す。まず、この電離箱を作動させる最適カソード電圧は、カソードに -800V 印加した際に波高値が飽和していることが確認できたため、カソード-アノード間の電場は約 553V/cm として実験を行った。また、最適バイアス電圧は各電極構造において表 1 のようになった。電極間隔の違いによるエネルギー分解能の違いを表 2 に、電極形状によるエネルギー分解能の違いを表 3 に示す。表 2 より、電極間隔が大きい方が、分解能が良くなることが示せた。これは CA - NCA 間における静電容量が減少するためだと考えられる。表 3 より、パラレル型と比較し、サークル型、スパイラル型の方が良い分解能が得られることが分かった。

表 1. コプラナー電極ごとに決定した NCA バイアス

形状	NCA バイアス [V]
パラレル型 (電極間隔 0.5mm)	-90
パラレル型 (電極間隔 1mm)	-100
サークル型 (電極間隔 1mm)	-80
サークル型 (電極間隔 1mm)	-80

表 2. 電極間隔の違いによるエネルギー分解能の比較

核種	電極間隔 0.5mm	電極間隔 1mm
	分解能 [keV] 分解能 [%]	分解能 [keV] 分解能 [%]
²⁴⁴ Cm	126	104
	2.17	1.79
²⁴¹ Am	121	113
	2.20	2.06
²³⁷ Np	136	138
	2.85	2.88

表 3. 電極構造の違いによるエネルギー分解能の比較

核種	パラレル型	サークル型	スパイラル型
	分解能 [keV] 分解能 [%]	分解能 [keV] 分解能 [%]	分解能 [keV] 分解能 [%]
²⁴⁴ Cm	104	79	83
	1.79	1.37	1.43
²⁴¹ Am	113	86	92
	2.06	1.56	1.68
²³⁷ Np	138	107	110
	2.88	2.24	2.31

(2) 本研究室で作製したフリッシュグリッド電離箱では、エネルギー分解能最良値を与える条件は、1 対 2.5 以上の電場比で、波形整形時定数は 10 μs、グリッド-アノード間距離は 10mm のときであり、エネルギー分解能は約 30keV であった。等価電子数は、約 1140 個であった。Am-241 の 5.49MeV に対する相対的な分解能は約 0.5% となった。

(3) コプラナー電極を用いた大型電離箱での実験結果を以下に示す。まず、この電離箱を作動させるカソード電圧は、カソード電圧に -400V 以上印加した際に波高値が飽和していると考えた。ただ、電子のチェンバー中での移動速度が安定するのに -1200V 印加する必要があるので、本実験においては、-400V, -800V, -1200V をカソード電圧として印加し、各カソード電圧における最適バイアス電圧を測定した。各カソード電圧における最適バイアス電圧はそれぞれ 70V, 80V, 100V となった。CA の信号から NCA の信号を減算することで 3 種の線源によるスペクトルが得られ、エネルギー分解能を計算すると、最高値を与える条件はカソード電圧 -1200V, バイアス電圧 -100V であり、その分解能は半値幅で Np: 129 keV (=2.7%), Am: 120 keV (=2.2%), Cm: 109 keV (=1.9%) となった。

(4) コプラナー電極を用いた大型電離箱のエネルギー分解能はフリッシュグリッド電離箱と比較すると悪く、その主な原因は CA - NCA 間の静電容量 (Cc) やアノード-カソード間の静電容量 (Cd) から生じる電子ノイズによるものであることが判明した。そこで、Cc と Cd の値の変化と測定回路に生じる電子ノイズの関係性を測定した結果を図 7 に示す。結論として、Cc の値が Cd の値より大きく影響しており、CA - NCA 間の静電容量をより減らした電極を用いることで、コプラナー電極を有する希ガス電離箱のエネルギー分解能が大きく向上されることを示した。現在、チェンバーの外部から BNC キャパシタンスを通して測定した実測値は Cc: 125pF, Cd: 25pF であり、Cc を 50pF まで減少させることが出来ればフリッシュグリッド電離箱と同等のエネルギー分解能を持つと推測される。

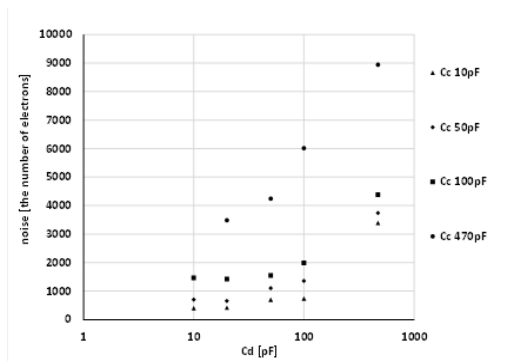


図7. Cc、Cd の変化による電子ノイズ数

(5) コプラナー型希ガス電離箱の応用範囲として以下のことが考えられる。

環境モニター
微量放射線の検出
宇宙への応用
ラドン・地震予知

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

Kenta Iwasaki、Naomichi Tanaka、Kohei Murakami、Hiroki Kusano、Eido Shibamura、Nobuyuki Hasebe、Mitsuhiro Miyajima、Development of Gas Ionization Chambers with Coplanar Electrodes for Alpha-ray Spectrometry、JPS Conference Proceedings、査読有、印刷中

〔学会発表〕(計 3 件)

Kenta Iwasaki、Naomichi Tanaka、Kohei Murakami、Hiroki Kusano、Eido Shibamura、Nobuyuki Hasebe、Mitsuhiro Miyajima、Development of Gas Ionization Chambers with Coplanar Electrodes for Alpha-ray Spectrometry、ISRD 2016、2016 年 1 月 18 日-2016 年 1 月 21 日、「高エネルギー加速器研究機構(茨城県、つくば市)」

草野弘樹、吉村亮、川端修、粟田光紀、岩崎健太、宮島光弘、柴村英道、長谷部信行、Coplanar 電極を用いた希ガス電離箱の開発、第 62 回応用物理学会春期学術講演会、2015 年 3 月 11 日-2015 年 3 月 14 日、「東海大学(神奈川県、平塚市)」

吉村亮、川端修、粟田光紀、岩崎健太、草野弘樹、宮島光弘、柴村英道、長谷部信行、Coplanar 電極を用いた希ガス電離箱の開発、第 75 回応用物理学会秋季学術講演会、2014 年 9 月 17 日-2014 年 9 月 20 日、「北海道大学(北海道、札幌市)」

6. 研究組織

(1) 研究代表者

長谷部 信行 (HASEBE NOBUYUKI)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：10127904

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

宮島 光弘 (MIYAJIMA MITSUHIRO)

早稲田大学・理工学術院総合研究所 理工学研究所・客員研究員

柴村 英道 (SHIBAMURA EIDO)

早稲田大学・理工学術院総合研究所 理工学研究所・客員研究員

草野 広樹 (KUSANO HIROKI)

早稲田大学・大学院先進理工学研究科・研究院助教

吉村 亮 (YOSHIMURA RYO)

早稲田大学・大学院先進理工学研究科・学生

岩崎健太 (IWASAKI KENTA)

早稲田大学・大学院先進理工学研究科・学生

粟田光紀 (AWATA MITSUKI)

早稲田大学・先進理工学部・学生

川端修 (KAWABATA OSAMU)

早稲田大学・先進理工学部・学生

村上航平 (MURAKAMI KOHEI)

早稲田大学・大学院先進理工学研究科・学生

田中直道 (TANAKA NAOMICHI)

早稲田大学・大学院先進理工学研究科・学生