

# 国際原子力人材育成イニシアティブ事業成果報告書

## <課題名>

原子力立地環境を生かした原子力人材育成ネットワークの強化

## <実施機関>

国立大学法人福井大学

## <連携機関>

福井工業高等専門学校、舞鶴工業高等専門学校、岐阜工業高等専門学校

## <実施期間・交付額>

平成30年度 13,092千円、平成31年度（令和元年度） 10,609千円、  
令和2年度 6,518千円

## <当初計画>

### 1. 目的・背景

日本有数の原子力発電所立地である福井県において、原子力専攻を持つ大学が中核となり、大学および工業高等専門学校等（以下「高専」）の若手人材育成機関が密接に連携する体制を強化し、前事業で構築した高専－大学－大学院における習熟度別原子力人材育成のしくみを近隣教育機関に拡大するとともに、原子力分野への理解促進と定着を図る。

### 2. 実施計画

学生のレベルに応じて、導入・理解促進・原子力への興味醸成の3つの取り組みを計画した、

#### (1) 原子力分野導入カリキュラム（主として高専生および他分野の大学生等）

##### a. 原子力分野理解プログラム（学部生等）

テーマ：原子力発電の原理、放射線や材料など様々な分野が原子力と関わっていることを示し、工学・地域学における原子力・放射線分野の重要性を理解する。

##### b. 原子力導入教育プログラム（高専生、高専専攻科学生）

テーマ：高専における専門教育科目（電気・電子・情報・環境・建築・土木、機械、材料・生物）と原子力発電・放射線との関わりについて学び、原子力技術（安全・防災・危機管理・放射線）に対する視野を広める。

##### c. 原子力入門サマースクール（全国の高専生、学部生対象）

テーマ：原子力発電の原理と放射線や材料に関する様々な知見を通して原子力で活躍できる場の広さやおもしろさを体感する。

#### (2) 原子力安全中核カリキュラム（原子力を指向する大学生、大学院生、高専専攻科学生）

##### a. 原子力安全・危機管理スクール

テーマ：原子力安全・危機管理に重要である炉物理・熱流動現象、原子力防災における原子力人材の役割と連携の重要性、放射線の影響等について、東京電力福島第一原子力発電所の事故事例を踏まえながら理解を深める。

##### b. 高度プラントシミュレータ実習

テーマ：教育用シミュレーターを用いて、原子力発電所における事故進展を把握し、事故進展の抑制手法について考察し、原子力安全を先導する技術者・研究者を育成する。

c. 確率論的リスク評価（PRA）実習

テーマ：PRAを通じてシステム安全の考え方を理解する。原子力安全の重要な基盤を身につけた技術者・研究者を育成する。

(3) 先端原子力実感カリキュラム（高専生、高校生、大学生、大学院生等）

a. 現場・現物実感コース

テーマ：原子力関連施設を見学し、最新の安全対策、機器のスケール感、様々な現場とそこで働く方々との交流を通じて、原子力産業の間口の広さと奥深さを実感させ、学生の目的意識を醸成する。

b. 原子力先端セミナー

テーマ：国内外の原子力安全・防災に関する知見を深め、進路決定の一助とする。

(4) 事業運営委員会（事業実施連携機関）

より良いカリキュラムを開発するため、事業実施時に参加学生、講師、TA等にアンケートやインタビューを実施し、改廃を含めた内容の検討を実施する。

## <実施状況>

実施計画に基づき、レベルに応じた内容で3年間の事業を実施した。なお、令和2年度については、予算削減のための効率化やコロナ感染拡大の影響で実施内容の見直しを行った。実施期間については表1に示す。

(1) 原子力分野導入カリキュラム

a. 原子力分野理解プログラム

福井大学において主に工学部学生を対象とし、他学部学生や一般市民にも開放した「原子力副専攻」科目として原子力発電の原理、放射線や材料など様々な分野が原子力と関わっていることを示し、工学・地域学における原子力・放射線分野の重要性を理解するための講義を実施した。

開講講義：原子力システム入門Ⅰ（プラント）、原子力システム入門Ⅱ（炉物理・熱流動）、原子力の燃料・材料、核燃料サイクル入門、資源エネルギー論、放射線の生物影響と防護、原子力安全規制と国際的枠組み、原子力・災害関連法令と国際的關係、放射線の化学、放射化学・放射線化学、原子炉構造工学入門、原子炉構造工学概論、放射線安全工学、原子力安全工学入門、地域の防災・危機管理、原子力の安全性（災害と廃炉と放射性廃棄物）、ニュートリノと放射線、地震と災害、等。

b. 原子力導入教育プログラム

高専における専門教育科目（電気・電子・情報、環境・建築・土木、機械、材料・生物）の内容の一部（15回の講義の中で1回程度）に、原子力発電・放射線との関わりについて学び、原子力技術（安全・防災・危機管理・放射線）に対する視野を広めるための内容を加えて講義・実験・卒業研究などを実施した。

開講講義等：物理、材料学Ⅱ、メカトロニクス演習、電子創造工学、電力エネルギー工学、計測工学、電気電子工学実験Ⅲ、知能機械演習、電気情報工学実験Ⅲ、材料科学、機械工学実験Ⅱ、自動制御Ⅱ、電力系統工学、海岸工学、生産材料工学、動的構造デザイン、都市防

災システム、生産システム工学実験Ⅰ、量子力学、量子エネルギー工学、防災リテラシー、電子デバイス工学Ⅱ、物理ⅢC、送配電工学、電気法規、環境材料学、等。

#### c. 原子力入門サマースクール

原子力発電の原理と放射線や材料に関する様々な知見を通して原子力で活躍できる場の広さやおもしろさを体感するサマースクール（原子力体感スクール）を毎年度3日の日程で実施した。最初に基礎的な講義を実施し、電力会社の研修施設にある原子炉シミュレーターを用いた実習や熱流動に関する実験により理解を深め、発電所や災害時支援センターなどの見学により興味を持ってもらう内容で実施した。



高専における放射線検出器回路作成実験の様子



敦賀原子力体感スクール実験の様子

### (2) 原子力安全中核カリキュラム

#### a. 原子力安全・危機管理スクール

東京電力福島第一原子力発電所の事故事例を踏まえながら原子力安全・危機管理に重要である炉物理・熱流動現象、原子力防災における原子力人材の役割と連携の重要性、放射線の影響等について理解を深める、「原子力安全スクール」として3日程度のサマースクールを毎年度実施した。関連する講義を実施した後、一人一人が自分のペースで理解できるよう、パソコンシミュレーターを用いて過渡時の炉心・燃料の挙動や熱流動に関する計算と3次元表示による観察等を行い、福島第一原子力発電所の事故進展過程に関する内容も追加して行った。

#### b. 高度プラントシミュレータ実習

原子力発電所における事故進展を把握し、事故進展の抑制手法について考察し、原子力安全を先導する技術者・研究者を育成するため、電力会社の教育用シミュレーターを用いて、福島第一原子力発電所の事故の再現や応答挙動について理解を深める実習を3日間の日程で平成30年度及び令和元年度に実施した。（なお、最終年度は費用に対して参加人数が少ないためとりやめ、上記「原子力安全スクール」の内容充実によって代替とした。）

#### c. 確率論的リスク評価（PRA）実習

規制上重要なPRAについて、毎年度2日間の集中実習として、考え方や実際の評価手法について、電力エンジニアリング会社の担当者から講義及び演習の手ほどきを受けた。実習中の議論を通じて安全評価に対する考え方を深める内容で実施した。

(3) 先端原子力実感カリキュラム

a. 現場・現物実感コース

原子力産業の間口の広さと奥深さを実感させ、学生の目的意識を醸成するため、

①原子力関連施設見学（浜岡原子力発電所、敦賀原子力発電所、旧ふげん、志賀原子力発電所、瑞浪超深地層研究センター、美浜原子力発電所等）を年数箇所実施し、最新の安全対策、機器のスケール感、様々な現場とそこで働く方々との交流を行った。ただし令和3年度はコロナ禍により発電所見学は実施できなかった。

②原子力産業界で求められる人材や業務について学ぶ機会（原子力業界セミナー）を毎年度実施した。

b. 原子力先端セミナー

国内外の原子力安全・防災に関する知見を深め、進路決定の一助とするため、先端的な研究事例や普段聞くことの少ない内容について第一線の研究者からの講演を聴く機会を年数回実施した。

(4) 事業運営委員会

各種事業実施に対する反響（アンケートや感想など）をもとに、各連携機関の担当者が今後の実施内容等について議論した。

(5) その他

特になし。

表 1. 実施スケジュール（結果）

項目	H30 年度 (四半期毎)				H31 年度 (四半期毎)				R2 年度 (四半期毎)			
(I) 原子力分野導入 カリキュラム	A. 原子力分野理解プログラム											
	B. 原子力導入教育プログラム											
	C. 原子力体感スクール <input type="checkbox"/>				<input type="checkbox"/>				<input type="checkbox"/>			
(I) 原子力分野導入 カリキュラム	A. 原子力安全スクール <input type="checkbox"/>				<input type="checkbox"/>				<input type="checkbox"/>			
	B. 次世代層原子カプラント実習研修 <input type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>			
	C. 確率論的リスク評価(PRA)実習 <input type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>			

(Ⅲ) 先端原子力実感 カリキュラム	A.原子力発電所等見学											
	B.原子力業界探求セミナー											
	C.原子力セミナー											
(Ⅳ) 事業運営委員会												

## <成果と評価>

3年間の実施の成果は以下の通りであり、表2に示すように多くの学生に向けての原子力導入・理解促進活動を達成するとともにそれを実施する高専教員のスキルアップも達成できた。

### (1) 原子力分野導入カリキュラム

#### a. 原子力分野理解プログラム

原子力を専攻する学生以外に向けた講義には期間中延べ1174名の受講があった。一部学生はこの講義をきっかけとして他学科ながら卒業研究を原子力のテーマで実施し、そのまま大学院の原子力コースに進学する学生も毎年数名いる。

以上のことから、他分野学生を原子力分野へ惹きつけ若手人材として社会に送り出すことができていると評価できる。

#### b. 原子力導入教育プログラム

高専における専門教育科目で原子力に触れる学生数が述べ3140人となり、多くの学生に原子力に関する知識を持たせるという目標は達成できている。また添付資料1のような実験テキストについては他高専での活用が可能である。

さらに、高専の若手教員も福井大学の教員と連携することで自ら原子力の内容を教授できる人材に成長しており、今後継続的に原子力に関する教育を実施できる素地ができたと評価できる。

#### c. 原子力入門サマースクール

3年間で43名の参加者となり学生への浸透が図れたと考えられる。参加者の中には大学院で原子力に進んだ者、原子力関連に就職した者もあり原子力導入の目的は果たせたと考えられる。実施内容の一部は別の人材育成事業でも引き続き実施されており継続的な実施が確保された。

### (2) 原子力安全中核カリキュラム

#### a. 原子力安全・危機管理スクール

3年間で17名の参加であったが、ほぼすべての参加者が原子力関連への就職をしており、原子力に関する知識を深めた上で社会に送り出すことができたと考えられる。また、整備したコンテンツの一部は大学院の教育で活用され教育効果の向上に役立てられている。

b. 高度プラントシミュレータ実習

計6名の参加者と少なかったが、参加者からの評価は高かった。ここで実施した内容の要点は大学での原子力教育に取り込み教育内容の向上に役立っている。

c. 確率論的リスク評価（PRA）実習

3年で16名の参加者があり、通常の講義等では触れることの無い分野に学生からの評価も高かった。整備したコンテンツを元に今後大学教育での活用を検討している。

(3) 先端原子力実感カリキュラム

a. 現場・現物実感コース

①見学：109名の参加があり参加者に対する反響は大きかった。最終年度はコロナの影響で実施できなかったが、学生・教員双方から見学の希望は多い。

②業界セミナー：118名の参加があり、学生・参加企業等双方の評価は高かった。

b. 原子力先端セミナー

延べ904名の参加者があり、短期間で学生への意識付けなどで効果があった。

(4) 事業運営委員会

大学及び高専教員間の意思疎通や協力関係強化に役立った。

(5) その他

特になし。

表 2. 育成対象及び人数（結果）

実施項目	実施プログラム	育成対象者	育成人数			
			H30 年度	H31 年度	R2 年度	合計
(Ⅰ)原子力分野導入カリキュラム	A. 原子力分野理解プログラム（原子力副専攻）	学部生等	233 名	193 名	748 名	1,174 名
	B. 原子力導入教育プログラム	高専生	1,068 名	979 名	1,093 名	3,140 名
	C. 原子力体感スクール	高専生、学部生等	13 名	18 名	12 名	43 名
(Ⅱ)原子力安全中核カリキュラム	A. 原子力安全スクール	学部生、大学院生等	7 名	3 名	7 名	17 名
	B. 次世代層原子力プラント実習研修		2 名	4 名	—	6 名
	C. 確率論的リスク評価（PRA）実習研修	原子力専攻大学院生等	6 名	6 名	4 名	16 名

(Ⅲ)先端 原子力実 感カリキ ュラム	A. 原子力発電所等 見学	高専生、学部 生、大学院生等	12名	97名	—	109名
	B. 原子力業界探求 セミナー	高専生、学部 生、大学院生等	35名	49名	34名	118名
	C. 原子力セミナー	高専生	283名	281名	340名	904名
合計			1,659名	1,630名	2,238名	5,527名

### 〈今後の事業計画・展開〉

本事業で実施した内容の一部は令和2年度より開始した機関横断的な人材育成事業「原子力技術の継承と継続的な人材育成を目指した福井県嶺南地域の国際原子力人材育成拠点形成」(代表：福井大学)で継続して実施するとともに、福井大—福井高専—舞鶴高専—岐阜高専の連携を生かしてそれぞれの組織における自立した原子力関連教育は継続して実施している。

### 〈整備した設備・機器〉

特になし

### 〈その他特記すべき事項〉

本事業の実施について、福井大学及び福井高専では、認証評価や中期目標・中期計画評価において、それぞれの学校における特色ある活動として取り上げられており本事業の活動が組織内でも重要視されている。

### 〈参考資料〉

#### (1) 添付資料

- 1) 電気電子工学実験Ⅲテキスト(福井高専)

#### (2) 事業成果の公開事例、関連する文献

- 1) 「放射線計測をテーマとしたものづくり教育」(ポスター発表)、全国高専フォーラム(2019年8月21日)

評価項目に係る事項について

<p>①課題の達成度（採択時の審査評価委員会所見への対応を含む。）</p>	<p>広く学生に向けて原子力に興味を持ってもらうことについては、工学系他学科学生へのアプローチ、高専での多くの授業への原子力内容の追加などで達成できた。それにより導入の取り組みではのべ4300人以上の学生へのアプローチができた。また、原子力分野に來た学生については講義ではなかなか取り組めないテーマに関する内容について教育コンテンツの充実ができ、今後の継続実施に向けた準備ができた。見学・セミナー等の取り組みによって原子力分野への興味を高めることもできた。さらに、原子力の専門家のいない福井高専、岐阜高専、舞鶴高専において、原子力に関係する教育ができる教員が増加し、継続的な原子力教育の素地ができた。</p> <p>以上の結果から、当初予定していた課題は達成できた。</p> <p>採択時コメントにあった他機関との連携とテキスト公開などの期待については、本事業の取り組みによって作成した高専での実験テキストなどは高専機構の取り組みの中で横展開が計画されている。また、他機関との連携については本事業の連携をベースとして後継の人材育成事業（福井大）の中で強化し実施している。</p>
<p>②特記すべき成果</p>	<p>①高専における教員のスキルアップ          福井高専では本事業によって、約3割（23名）の教員が原子力人材育成に携わり、本取り組みを実施する以前と比べ、新しい教員の原子力人材育成事業への参加が増加した。舞鶴高専においては、これまで、原子力／放射線教育に関わる授業はほぼ行われていなかったが、福井大学との連携により4教科について原子力／放射線教育に関わる授業を構築することができた。</p> <p>②良好事例としての評価          高専機構主催の原子力人材育成事業キャリア教育型セミナーにて、卒業研究の取組み2件を発表した。          全国高専フォーラム（2019年8月21日）にて、本事業の成果について「放射線計測をテーマとしたものづくり教育」としてポスター発表した。          令和元年度の認証評価にて、原子力人材育成事業への取り組みが福井高専における特色ある取り組みとして評価された。</p>
<p>③事業の継続状況・定着状況</p>	<p>福井大学では事業終了後も継続して他学科向け導入講義を実施するとともに、サマースクール等の内容も原子力関連講義の中に取り込んで活用することとしている。地域他機関と連携した実習等は継続事業において引き続き実施している。</p> <p>高専では、多くの講義・実験で本事業の内容を継続しており、教育課程の大きな変化がなければ基本的には今後も継続しながら、原子力や放射線について正しく理解した技術者の育成を目指して、原子力人材育成および放射線教育を進めていく予定である。</p> <p>予算が必要な外部有識者による講義などについても、他機関からの予算獲得での実施に向けて活動している。</p> <p>また、令和2年度から始まった高専機構の原子力人材育成事業においても、本事業で中心的に活動した福井高専の米田および岐阜高専の柴田がコアメンバーとして参画しており、中心的な役割を担っている。</p>



<p>④成果の公開・共有の状況</p>	<p>本事業で実施した実験の一部を高専機構の原子力人材育成事業内の高専間連携でのオンライン演習プログラムやバーチャル研究室として実施している。  実験等のテキストについては他校戦での実験科目への提供が可能である。(添付資料1他複数あり)</p>
<p>⑤参加した学生数、原子力関係機関への就職状況、公的資格取得者数</p>	<p>参加学生（延べ人数）  合計 5,527人（H30年度：1,659人、R1年度：1,630人、R2年度：2,238人）</p> <p>就職状況（未卒業者がいるため、今後も増える見込み）  大学生・院生：17名  高専生・専攻科生：49名  高専専攻科から原子力系大学院への進学：1名</p> <p>資格  エックス線作業主任者の資格所得：1名（高専生）  第2種放射線取扱主任者（試験合格）：1名（院生）</p>

## 放射線学習用教材に関する演習

### 1. 実験の目的

2011年3月の東日本大震災に伴う福島第1原子力発電所事故において放射線に関する関心が高まり、一般市民が放射線計測を行う事態になっている。当時は様々な情報が乱れ飛び、正しく放射線を理解せず恐怖心を煽るような情報も数多く見られた。正しい情報も多く発信されている<sup>1)4)</sup>が、不十分な情報も少なくないのが現状である。そのため、本実験ではPINフォトダイオードを用いた放射線検出回路およびGM管を用いた放射線検出回路を作製し、作製した放射線検出回路を用いて実際に放射線計測を行うことで放射線および放射線計測に関する理解を深めること、また必要な電子回路の基礎知識の習得を目的とする。

### 2. 放射線検出器<sup>5-10)</sup>

#### 2.1. 放射線検出器の種類

放射線検出器は、使用センサの種類、用途によって様々な種類のものがある。代表的なものには、ガイガー・ミュラー管を用いたガイガー・ミュラー線量計、シンチレーション検出器、半導体検出器などである。

図1に示すようにガイガー・ミュラー線量計は、最もよく用いられる放射線検出器の一つであり、Arガス等を封入した管に高電圧を印加し、入射した放射線と封入ガスとの相互作用によって発生した電子・陽イオンが正に印加された管内部の芯線と負に印加された金属壁に移動し、電荷パルスが生じる。内部で発生した電子・陽イオンはなだれ現象により大きな電荷パルスが発生する。

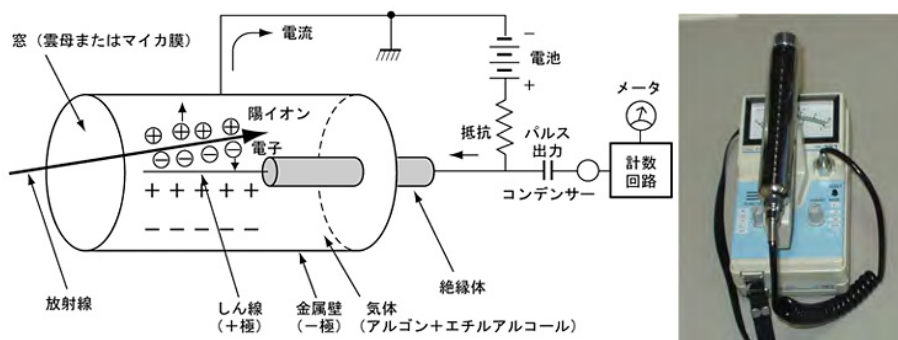


図1 ガイガー・ミュラー線量計の概略図と写真

図 2 に示すようにシンチレーション検出器は、放射線に対して蛍光や燐光を生じるシンチレータと呼ばれる物質を用いて、蛍光を光検出器（光電子増倍管など）で大きな電荷パルスとして出力させることで放射線を検出する。放射線のエネルギーと出力する電荷量の線形性が高いため、ガンマ線のスペクトル分析に用いられる。

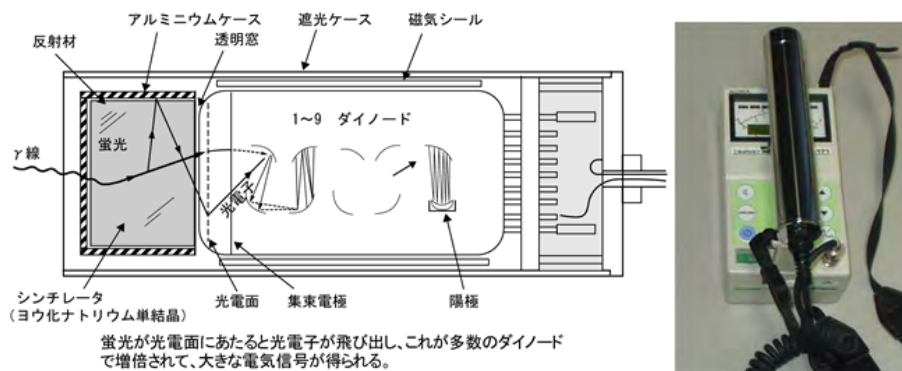


図 2 シンチレーション・サーベイメータの概略図と写真

図 3 に示すように半導体内部に形成された空乏層内に放射線が入射すると電離作用により電子正孔対が生成され電流が生じ、放射線の入射を電気信号に変換でき、この性質を利用した放射線検出器を半導体検出器（semiconductor detector）と呼ぶ。半導体検出器は他の放射線検出器に比べてエネルギー分解能が高く、特にゲルマニウム半導体検出器はガンマ線のスペクトル分析を正確に行えることから放射性核種の同定や放射能測定に広く用いられる。

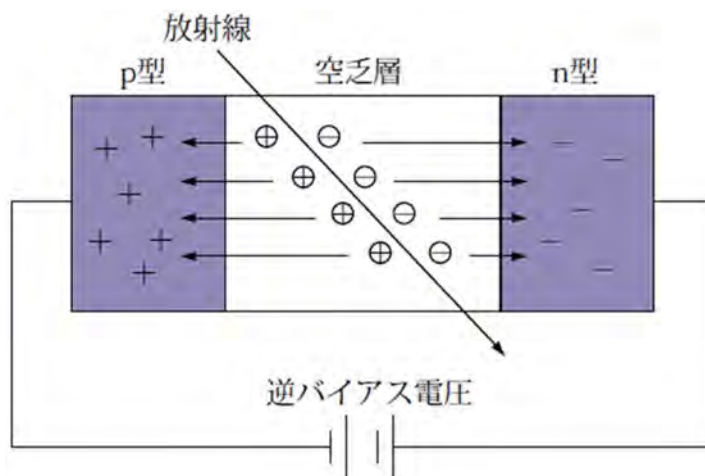


図 3 放射線検出器の概略図と写真

## 2.2. 放射線検出回路のブロック図

放射線検出器から出力される信号は、図 4 に示す様々な回路を通して計測を行う。放射線からの出力信号は微弱な電荷パルスであり、そのままでは計測することが難しい。そのため、出力された電荷パルスをプリアンプ（前置増幅器）で電圧パルスに変換する。次にメインアンプ（シェイピング・アンプ）で AD 変換するために適切な波形整形を行う。メインアンプは、増幅回路、ピークホールド回路、ポールゼロキャンセル（PZC）回路などで構成される。メインアンプからの出力信号はカウンタ回路や波高弁別回路などを通してデジタル処理が行われ、カウント数、線量、エネルギースペクトルなどを表示する。

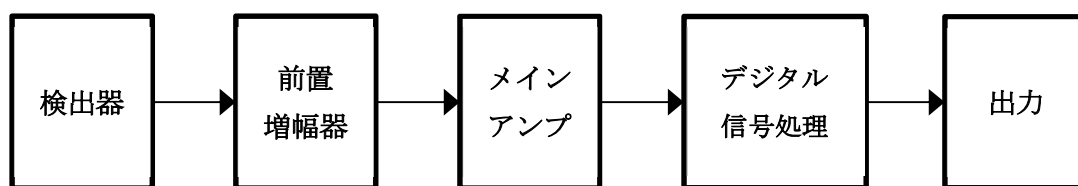


図 4 放射線検出回路のブロック図

## 3. ガイガー・ミュラー管（GM 管）を用いた放射線検出回路<sup>7-11,14,15)</sup>

### 3.1. ガイガー・ミュラー管（GM 管）を用いた放射線検出回路

今回作製する放射線検出回路のブロック図を図 5 に示す。この回路のセンサ部分には GM 管を使用し、高電圧を GM 管（今回の SBM-20 の場合は 200～450V 程度）に印加することで放射線が入射すると電荷パルス信号が出力される。このパルス信号は PIN フォトダイオードに比べて十分大きいのでそのままでもオシロスコープ等で計測することが可能である。GM 管への印加電圧は一般に高電圧電源を使用するのですが、今回の実験ではレンズ付きフィルムの「写ルンです」で使用されている昇圧トランスを使用して、1.5V 乾電池を昇圧して 250V 程度の電圧を発生させることができる高電圧発生回路（図 6）を作製する。

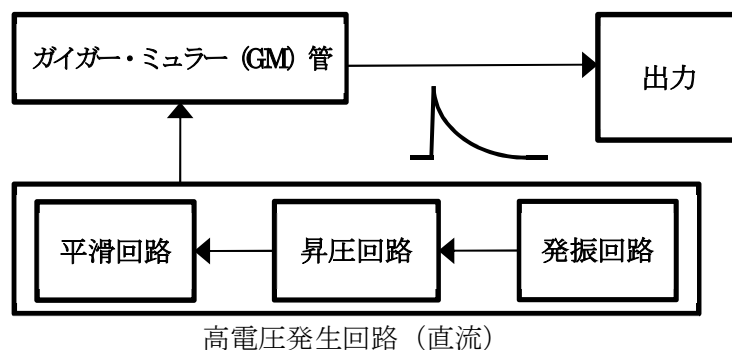


図 5 GM 管（SBM-20）を用いた放射線検出回路のブロック図

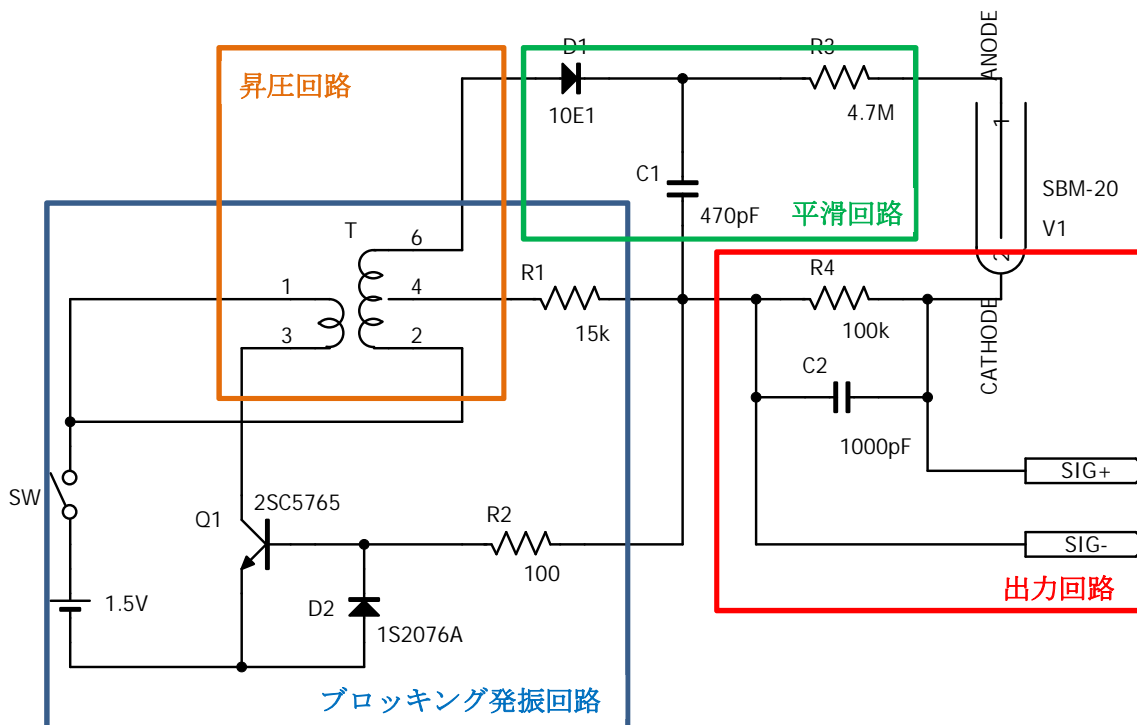


図 6 GM 管 (SBM-20) を用いた放射線検出回路の回路図

### 3.2. ガイガー・ミュラー (GM) 管 (SBM-20)

ガイガー・ミュラー (GM) 計数管は放射線による気体の電離作用を利用して放射線の強さを測定する装置で、電離作用によって引き起こされた“電子なだれ”による電圧パルス数を計数するものである。たとえば図 1 のような構造 (端窓型 GM 計数管の例) の管にアルゴンとエチル・アルコール・ガスを封入した GM 計数管に、電離を起こさせるような粒子が入射すると、その飛跡にそってイオンを作り、電子は心線に向かってすみやかに移動する。心線付近は電界が強いため、荷電粒子は加速され中性分子に衝突・イオン化する。ここではこの現象が特にひんぱんに起こり、いわゆる“電子なだれ効果”により心線に大きな電流脈流が生ずる。この電流が抵抗を流れるとき抵抗の両端に電圧脈流が生じてこれを電子回路で増幅して計数する。



図 7 ガイガー・ミュラー管 (SBM-20) の外観写真

本実験で使用する GM 管は、図 7 に示す旧ソ連製の高感度ガイガー=ミュラー管 SBM-20 です。γ線とβ線を高感度に検出可能で、主な仕様は推奨動作電圧が 350-475 V、最小アノード抵抗が 1MΩ、推奨アノード抵抗が 5.1MΩ、GM 管容量が 4.2pF である。

### 3.3. 高電圧回路（ブロッキング発振，トランスによる昇圧，平滑回路）

図 6 に示す回路は，ブロッキング発振回路で 1.5V の直流を交流に変換し，昇圧トランスで高電圧に変圧し，ダイオードで整流化した波形をコンデンサと抵抗により平滑化しています。

スイッチ SW を ON にすると抵抗 R1 と R2 を通りトランジスタ Q1 のベース電流が供給され，コレクタ電流が流れ，トランス巻線 1-3 間に大きな電流を流す．コレクタ電流が飽和すると，電磁誘導によるトランス巻線 4-2 間の起電力がなくなり，ベースの電位が降下し，Q1 は OFF 状態となり，コレクタ電流の流れも停止する．この瞬間トランス巻線 1-3 間に逆起電力が発生し，溜まったエネルギーを放出し，2 次巻線側 4-6 間に巻線に応じた高電圧が発生する．このときコイルも放電状態になっているので，Q1 が OFF になったらすぐに充電状態に切り換わり，再び Q1 を ON の導通状態になる．したがって，これらの一連の繰り返りで目的の高速切換え動作が得られる．

## 4. GM 管を用いた放射線検出回路の作製

### 4.1. 回路の作製

今回の実験では，レンズ付きフィルムの「写ルンです」に使用されているフラッシュ回路基板を改造して使用します．まず，図 8 に示すように「写ルンです」を分解し，フラッシュ回路を取り出します．取り付けられているコンデンサに電荷が溜まっていると危険なため，抵抗付きのケーブルで放電させます．そして，不要な部品を取り外せば基板を使用できるようになります．

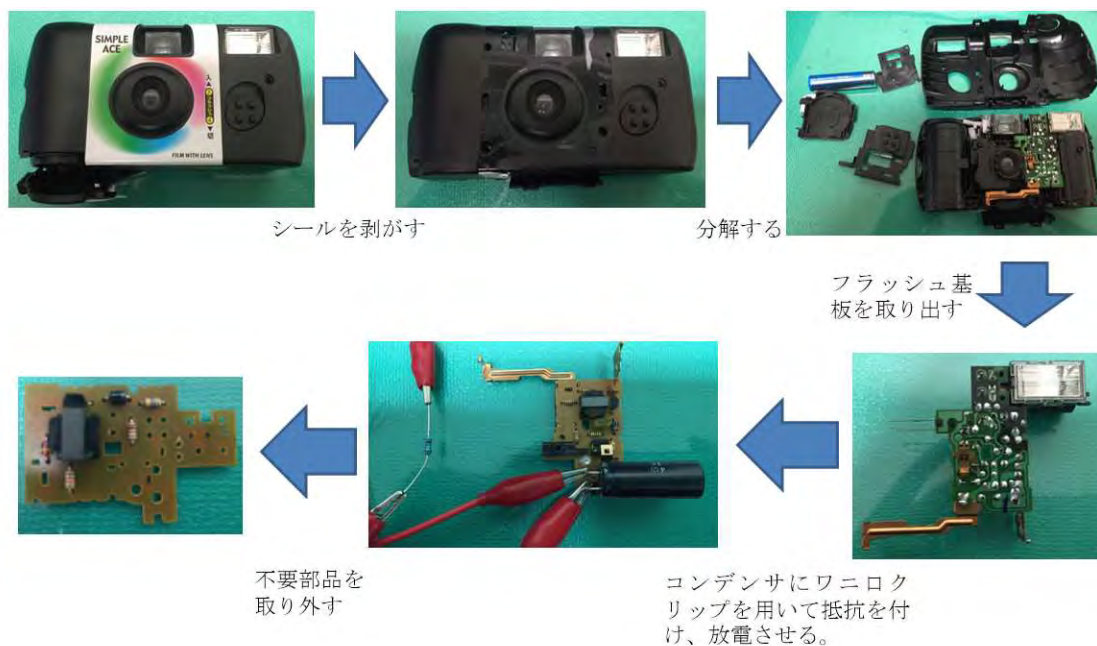


図 8 「写ルンです」の分解手順



取り出したフラッシュ回路基板にコンデンサ C2 (470pF) をはんだ付けする, その際に出力用配線と接続するため基板面で曲げる. 出力用配線 (赤線・黒線) をはんだ付けする際には, 図 9 の左下写真の左側に示す黄色線のようにコンデンサの配線と接続させる. そして, 図 9 左下写真の中央に示す黄色線のようにスズメッキ線でショートさせる. そして, 図のように電池用および高圧出力用の配線 (赤線・黒線) またはピンヘッダをはんだ付けする

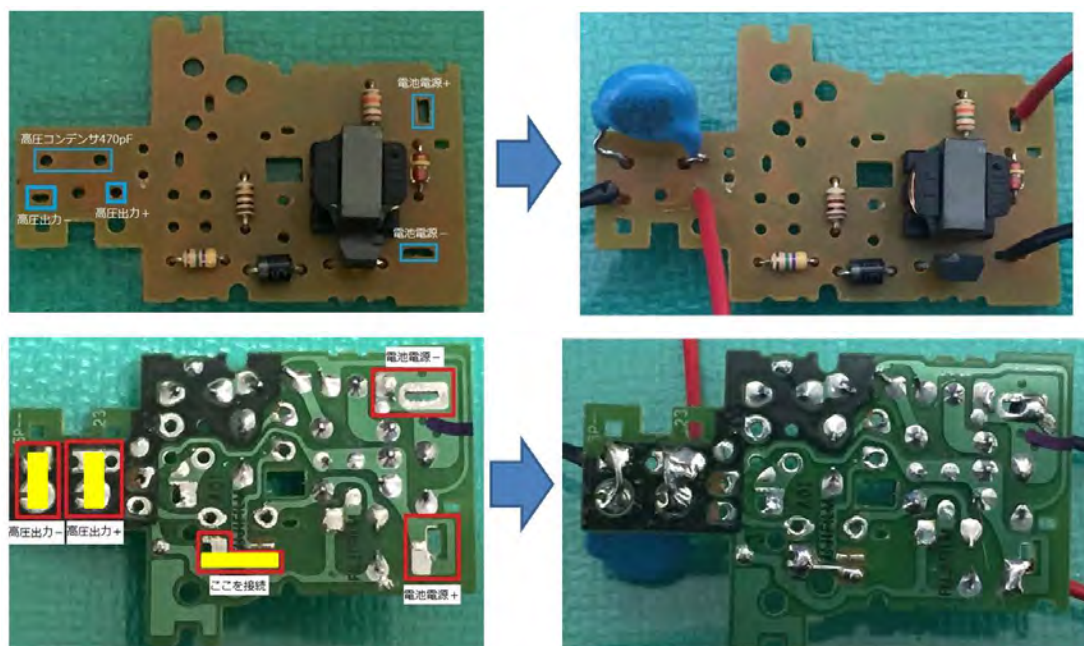


図 9 「写ルンです」のフラッシュ回路基板の改造手順

改造したフラッシュ回路基板の赤黒の配線および表 2 に示す部品のはんだ付けを図 10 に示す実装図に従って行うことで, 図 11 に示す GM 管を用いた放射線検出回路を作成する. はんだ付けを行う手順は, 背の低い部品から行うため, 抵抗 R1, R2, コンデンサ C2, ソケット SIG, ヒューズホルダー, フラッシュ回路改造基板, 電池ボックス, スイッチ SW の順に行う.

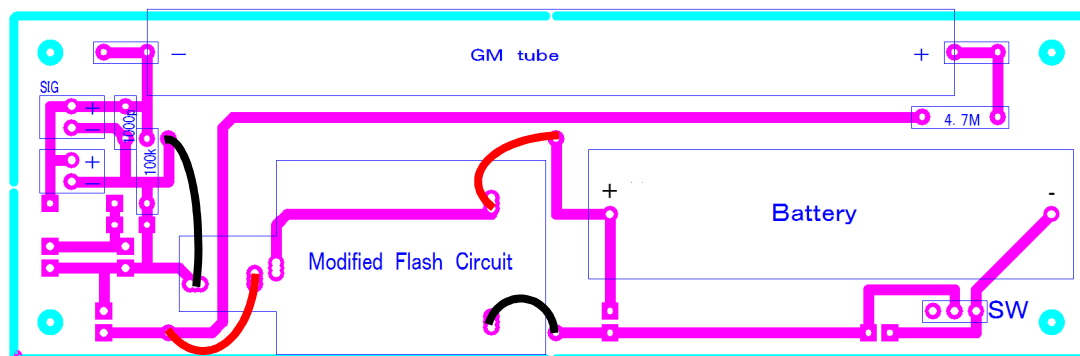


図 10 GM 管 (SBM-20) を用いた放射線検出回路の実装図. ○ランド: はんだ付けを行う部分, □ランド: 確認用端子をはんだ付けする場合に使用する.

表 2 使用部品一覧

素子名	型番・値	記号名
GM 管	SBM-20	V1
ヒューズホルダー	FC-05C-E*2	
改造基板	「写るんです」のフラッシュ回路基板	
抵抗	4.7M $\Omega$	R3
抵抗	100k $\Omega$	R4
コンデンサ	1000pF	C2
ピンソケット	モレックス, 5045-02A	SIG
電池ボックス	タカチ電機工業, SN3-1PC	BATTERY

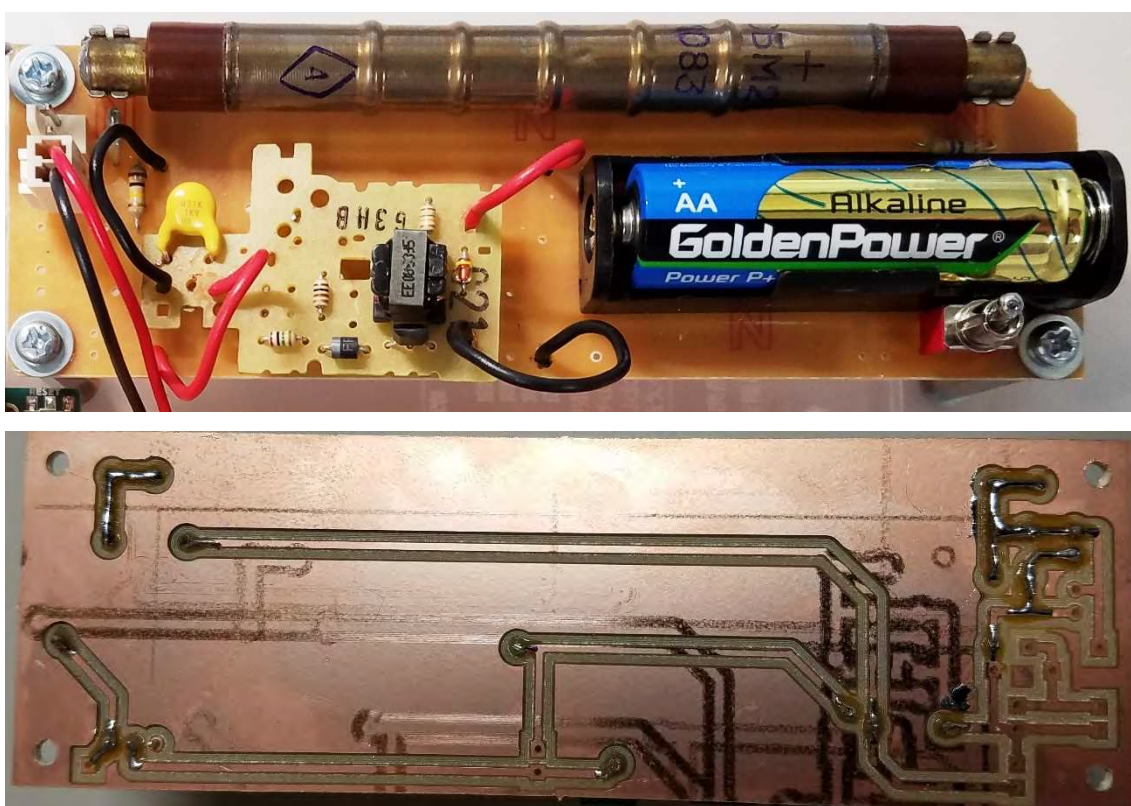


図 11 GM 管 (SBM-20) を用いた放射線検出回路の実装写真. フラッシュ回路改造基板の接続用端子としてピンヘッダを用いたもの.

#### 4.2. 作製した回路の動作確認

作成した回路の動作確認を行うために, テスターで GM 管の両端の電圧計測 (DC300V レンジ) を行う. 作成した回路の動作確認を行うために, オシロスコープで出力端子 (SIG) の放射線を検出しない場合の波形および検出した場合の波形を計測せよ. 出力端子 (SIG) は 500mV/Div $\sim$ 1V/Div 程度で検出ピークを計測することが出来る. 正しく計測できると図 12 に示すような波形を得ることができる.



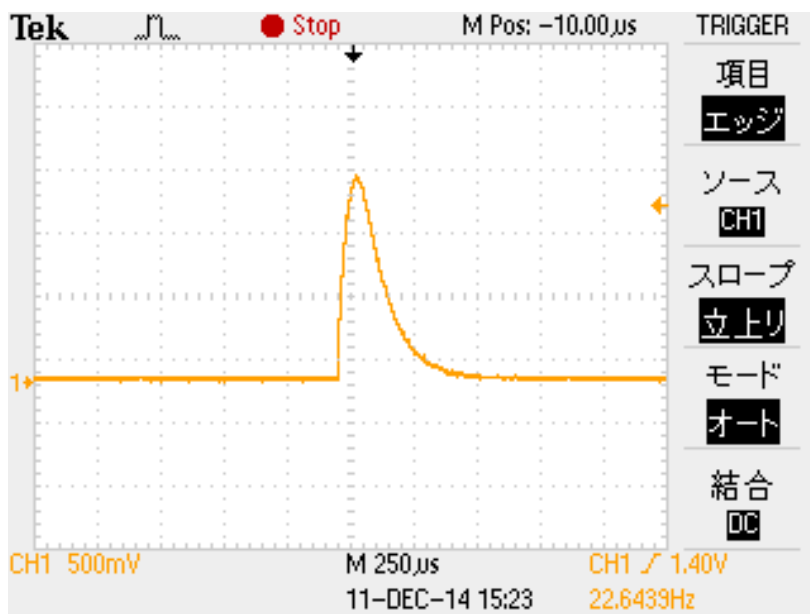


図 12 放射線を検知したときのパルス波形

## 5. オペアンプによる波形整形と Arduino によるカウンタ回路<sup>7-11)</sup>

### 5.1. 波形整形回路（非反転増幅回路，コンパレータ回路）<sup>12)</sup>

今回作製した放射線検出回路の出力波形はそのままではカウントすることが難しいため、出力波形の波形整形を行い、パルス波形として出力させることによりマイコン等でカウントすることが可能になる。図 13 に波形整形回路のブロック図を示す。

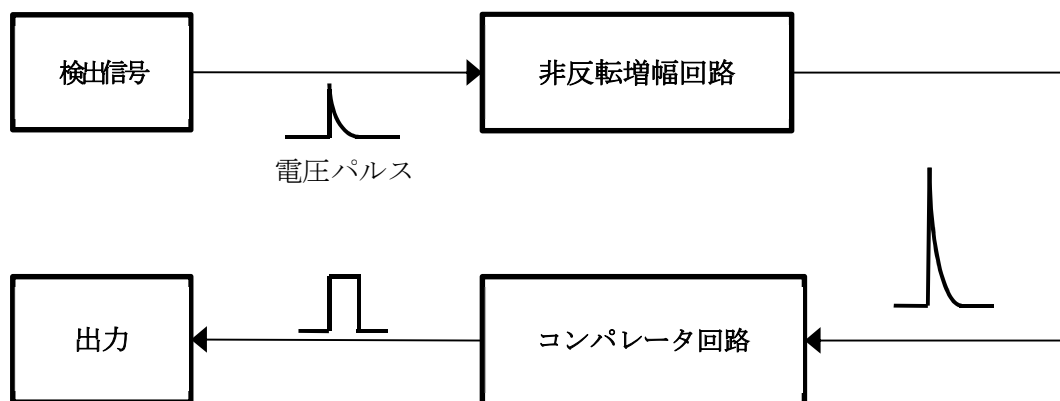


図 13 放射線検出器の波形整形回路のブロック図

この波形整形回路では、非反転増幅回路にて増幅を行い、コンパレータ回路にてパルス波を出力する。図 14 に示す波形整形回路を実装基板ブレッドボード上に作製し、発振器を用いて波形整形回路に適切な信号を入れたときの出力信号を計測し、作製した波形整形回路が正常に動作していることを確認せよ。

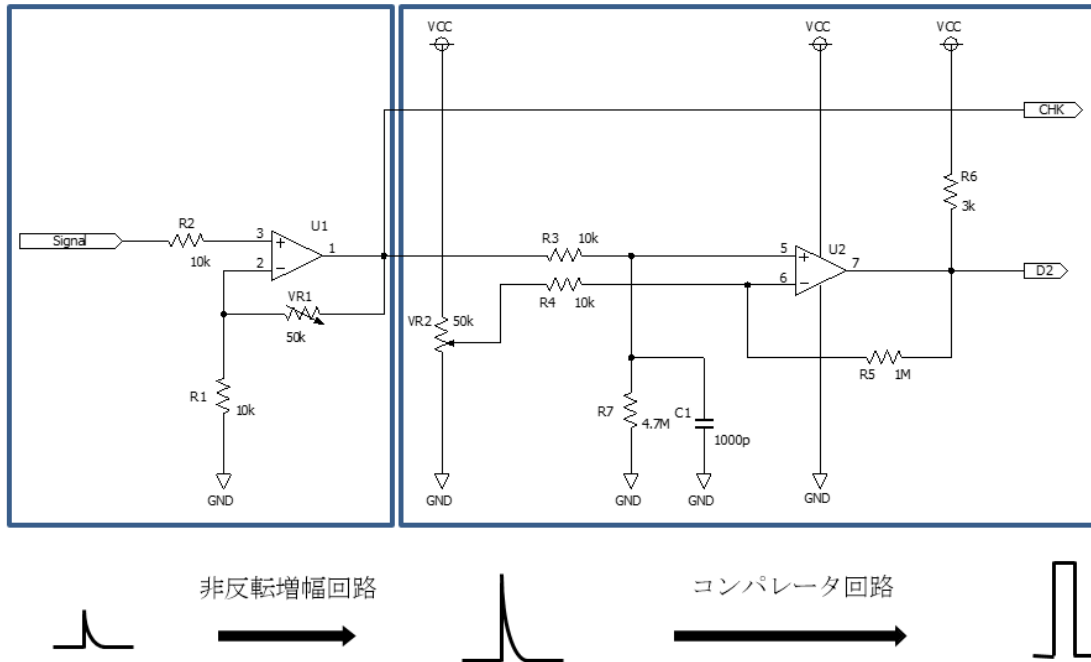


図 14 放射線検出器の波形整形回路の回路図

作製した放射線検出回路 (GM 管) を用いて波形整形回路に放射線検出パルスを入れたときの波形, 非反転増幅回路の出力波形, コンパレータ出力波形を計測せよ. その際に非反転増幅回路の VR1, コンパレータ回路の VR2 を変化させた場合の出力波形を観測し, 適切な波形となるように設定せよ.

## 5.2. Arduino によるカウント数 (CPM) の表示<sup>13)</sup>

作製した図 14 の回路の出力を Arduino マイコンの 2 番ピンに入力することによりパルスカウント計測が出来る. 図 15 に示すカウンタ・プログラムを作成することにより, シリアル通信で PC 上のターミナルソフト上に 60 秒間毎に計測したパルス数の値 (CPM) を表示させることが出来る. 値が 3 ケタ以上ない場合はもっと長時間の計測が必要であるので, 適時修正して下さい.

図 15 カウンタ用プログラム

<pre>volatile unsigned long count = 0; unsigned long startPeriod;  void setup() {   Serial.begin(9600);   attachInterrupt(0, GetEvent, RISING);   startPeriod = millis();   Serial.println("### Counter Started."); }</pre>	<pre>void loop() {   if ( millis() &gt; startPeriod+60000 ) {     Serial.println(count);     startPeriod = millis();     count = 0;   } }  void GetEvent() {   count++; }</pre>
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

割り込み処理を行うためには、`setup()`関数内で、外部割り込みが発生したときに実行する関数 `attachInterrupt()`関数を宣言する。Arduino UNO では割り込みピンとして 2 番ピンと 3 番ピンが用意されており、関数の引数で 0 を指定しているため 2 番ピンとなる。割り込み処理が発生したときに呼び出す関数 `GetEvent()`は変数 `count` を増加させる処理を行い、割り込み処理中に使用する変数の宣言には、`volatile` の指定が必要である。またこの割り込み処理では、立ち上がりパルス (RISING) を検出している。

### 5.3. 放射線のカウント (計数)

作製した GM 管を用いた放射線検出回路および波形整形回路を用いて、バックグラウンド (BG) およびマントル (または他の線源) に対して 1 分間当たりのカウント数 (各 3 回) の測定結果を示せ。

作製した GM 管を用いた放射線検出回路および Arduino のカウンタ回路を用いて、バックグラウンド (BG) およびマントル (または他の線源) に対して 1 分間当たりのカウント数 (各 3 回) の測定結果を示せ。また、マントルの 1 分間当たりのカウント数を 60 回計測し、その頻度分布がポワソン分布に従うことを示せ。

## 6. 放射線計測実験

### 6.1. 距離の効果

作製した GM 管を用いた放射線検出回路 (波形整形回路を含む) および市販の線量計 (HORIBA 社製, PA-1000) を用いて、マントル (または他の線源) に対する 1 分間当たりのカウント数および線量 (各 3 回の平均値) の線源から距離特性 (10cm, 20cm, 30cm, 40cm, 50cm) を測定し、カウント数と距離の関係性を求めよ。

### 6.2. 遮蔽効果

作製した GM 管を用いた放射線検出回路 (波形整形回路を含む) および市販の線量計 (HORIBA 社製, PA-1000) を用いて、マントル (または他の線源) にできる限り近付けた状態で、厚さの異なるアルミ板 (なし, 0.3mm, 0.5mm, 1mm, 1.5mm, 2mm, 3mm, 5mm) を間に入れた状態で 1 分間当たりのカウント数および線量 (各 3 回の平均値) を測定し、カウント数とアルミ板の厚さとの関係性を求めよ。

### 6.3. 福井高専校内における放射線測定

作製した GM 管を用いた放射線検出回路 (波形整形回路を含む) および市販の線量計 (HORIBA 社製, PA-1000) を用いて、以下に示す校内各地の放射線量を測定せよ。ただし、各測定地点において高さ 1m および地面上の 2 か所で 1 分間当たりのカウント数および線量 (各 3 回の平均値) を測定せよ。

- ・物質棟と地域連携テクノセンターの渡り廊下
- ・物質棟 1 F 階段下
- ・創成教育ラボ

- ・4E 教室
- ・食堂
- ・体育館（授業をしていない場合のみ）
- ・グラウンド（授業をしていない場合のみ）
- ・第1 駐車場（砂利駐車場）

#### 6.4. 霧箱

ホームセンターや 100 円ショップ等で購入したものをを用いて液体窒素を用いた霧箱を作成し、放射線の飛跡を観察せよ。観察結果についてはカメラの画像で撮影すること。研究室にある物品は使用しても構わない

#### 6.5. 空気ガイガー・ミュラー計数管

ホームセンターや 100 円ショップ等で購入したものをを用いて大気圧空気 GM 計数管を作成し、放射線源がある場合とない場合で有意な差が出るような計測を行え。研究室にある物品は使用しても構わない。

### 7. 課題

- (1) GM 管を用いた放射線検出回路の回路図，実装図，実装写真を示し，作製した放射線検出回路の動作について説明せよ。
- (2) 作製した放射線検出回路（GM 管）において，オシロスコープで放射線を検出しない場合の波形および検出した場合の波形を計測せよ。
- (3) 作製した波形整形回路の回路図，実装図，実装写真を示し，作製した波形整形回路の動作について説明せよ。
- (4) 作成した Arduino プログラムのソースプログラムを示し，プログラムの動作について説明せよ。
- (5) 作製した放射線検出回路（GM 管）を用いて波形整形回路に放射線検出パルスを入れたときの波形，非反転増幅回路の出力波形，コンパレータ出力波形を計測せよ。
- (6) 作製した放射線検出回路（GM 管）および Arduino のカウンタ回路を用いて，バックグラウンド（BG）およびマントル（または他の線源）に対して 1 分間当たりのカウント数（各 3 回）の測定結果を示せ。
- (7) 放射線の特性として，身の回りに存在する放射性物質と自然放射線による被ばくについて述べよ。
- (8) 作製した GM 管を用いた放射線検出回路（波形整形回路を含む）および市販の線量計（HORIBA 社製，PA-1000）を用いて，(a) 線源からの距離とカウント数の関

係, (b) 遮蔽体の厚さと遮蔽効果の関係, (c) 身の回りの場所の放射線計測の結果を示せ.

- (9) 以上の結果から得られた知見について述べ, 考察せよ. なお, 回路作製時に生じた問題点およびその解決方法についても述べること.

## 8. レポート

前述した課題を用いて以下の構成のレポートを作成すること. 指定された期日(実験最終日の1週間後)までに Moodle への提出および印刷したものと併せて提出する(電気棟3F 実験室5前のボックス)こと. レポート内で使用する図は, 自分で作成したものを使用するか, 図のキャプションに出典元(作成者, 雑誌名や書名, 発行年, ページ番号など)を明記した上で適切な範囲に留めること.

- (1) 実験の目的
- (2) ガイガー・ミュラー管 (GM 管) を用いた放射線検出回路
  - ① 理論・実験手順 (課題 1)
  - ② 実験結果 (課題 2)
  - ③ 考察 (課題 9)
- (3) オペアンプによる波形整形と Arduino によるカウンタ回路
  - ① 理論・実験手順 (課題 3,4)
  - ② 実験結果 (課題 5,6)
  - ③ 考察 (課題 9)
- (4) 作製した放射線検出器を用いた計測
  - ① 理論・実験手順 (課題 7)
  - ② 実験結果 (課題 8)
  - ③ 考察 (課題 9)
- (5) 霧箱の実験または大気圧空気 GM 計数管による放射線計測実験における理論・実験手順および結果について示すこと. また, 本実験を行った際の参考書および参考 URL 等を列挙し, どのような点を参考にしたのか, 問題が発生した場合はその問題点および解決方法について述べること.
- (6) 参考文献
- (7) 事前課題レポート

## 参考文献

1. 菊池 誠, 小峰 公子, おかざき 真里, いちから聞きたい放射線のほんとう: いま知っておきたい 22 の話, 筑摩書房, 2014
2. 田崎 晴明, やっかいな放射線と向き合って暮らしていくための基礎知識, 朝日出版

- 社, 2012
3. 安齋 育郎, 増補改訂版 家族で語る食卓の放射能汚染, 同時代社, 2011
  4. 中川 恵一, 放射線のひみつ, 朝日出版社, 2011
  5. 柴田 徳思, 放射線概論, 通商産業研究社, 2011
  6. 日本アイソトープ協会, はじめての放射線測定—正しく理解し, 正しく測ろう放射線, 日本アイソトープ協会, 2013
  7. Glenn F. Knoll, "放射線計測ハンドブック", オーム社, 2013
  8. W.J. プライス, 放射線計測, コロナ社, 1994
  9. 山崎 文男, 放射線 (実験物理学講座 26), 共立出版, 1977
  10. 熊谷 寛夫, 加速器 (実験物理学講座 28), 共立出版, 1975
  11. 河田 燕, 放射線計測技術(物理工学実験 9), 東京大学出版会, 1981
  12. 岡村 迪夫, 放射線測定回路とシステム, 日刊工業新聞社, 1975
  13. J. A. Narud, M. R. Aaron, Analysis and Design of a Transistor Blocking Oscillator Including Inherent Nonlinearities, *ell Labs Technical Journal*, Vol.38 (1959) 785-852. [トランジスタブロッキング発振の動作原理に関する論文]
  14. J. McDonald, Circuit models to predict switching performance of nanosecond blocking oscillators, *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, Volume 11, Issue 4, (1964) 442- 448. [トランジスタブロッキング発振の動作原理に関する論文]
  15. 赤津光治, トランジスタテルビ水平発振回路, *テレビジョン*, 19 (1965) 343-348. [トランジスタブロッキング発振の動作原理に関する論文]
  16. 藤井 信生, なっとくする電子回路 (なっとくシリーズ), 講談社, 1994
  17. Massimo Banzi, *Arduino をはじめよう 第2版*, オライリージャパン, 2012
  18. 宇都宮 泰, 図解入門 よくわかる最新線量計の基本と作り方, 秀和システム, 2013
  19. 澤田 淳一, "放射線量をカウントする電子工作 Part1 ガイガー・カウンタの製作", 別冊 CQ ham radio QEX Japan, No.1 (2011) 45-52
  20. Wilson, C. T. R., "On a Method of Making Visible the Paths of Ionising Particles through a Gas". *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences.*, 85 (578), pp.285–288, 1911. [ウィルソンの霧箱の原著論文]
  21. Das Gupta, N. N., Ghosh S. K., "A Report on the Wilson Cloud Chamber and its Applications in Physics". *Reviews of Modern Physics*. Vol.18(2) (1946) p225–365. [ウィルソンの霧箱に関するレビュー]
  22. 油井多丸, "手作り霧箱で $\alpha$ 線の飛跡を観察しよう!", *Isotope news*, 624 (2006) p31-34.
  23. 戸田 一郎, "ガラス容器で霧箱を作ろう", *Isotope news*, 625 (2007) p23-27.
  24. 戸田 一郎, "演示実験用卓上型霧箱", *Isotope news*, 626 (2008) p25-28.

25. 柚木 朋也, 伊藤 雄一, 浜田 康司, "S霧箱を使用した放射線の観察に関する研究", 理科教育学研究, 57 (2016) p155-168 .
26. 秋吉 優史, "放射線教育におけるペルチェ冷却式高性能霧箱の活用", 日本放射線安全管理学会誌, 16 (2017) p72-78
27. 秋吉 優史, "ペルチェ冷却式高性能霧箱製作のための要素技術", 日本放射線安全管理学会誌, 16 (2017) p79-84
28. 矢野 淳滋, 高校生にも作れて $\alpha$ 線も計れる大気圧空気 GM 計数管, 物理教育, 38 (1990) 312-315
29. 米村 傳治郎, 小学生にも作れる静電気 GM 管 : 矢野・米村式 GM 管, 物理教育, 41 (1993) 192-193
30. 三門 正吾, 大気圧空気 GM 係数装置の製作と放射線測定, 物理教育, 41 (1993) 262-265
31. 三門 正吾, 御須 利, 大気圧空気 GM 計数器の改良, 物理教育 42 (1994) 39
32. 三門 正吾, 紙筒と空き缶を利用した高感度 GM 管の製作, 物理教育, 50 (2002) 23-27
33. 三門 正吾, 紙筒ガイガー計数管を用いた放射線の測定, Isotope news, 629 (2006) 31-34
34. 三門 正吾, 紙筒ガイガー計数管の製作, 物理教育学会年会物理教育研究大会予稿集, 22 (2005) 10-13

放射線学習用教材に関する演習における事前課題

事前学習課題 1（1 週目の実験前日までに Moodle へ提出） 1-11)

- (1) 放射線（ $\alpha$  線， $\beta$  線， $\gamma$  線）の特徴について述べよ。
- (2) GM 管の原理について説明せよ。
- (3) ブロッキング発振回路，トランスを用いた昇圧回路について説明せよ。

事前学習課題 2（2 週目の実験前日までに Moodle へ提出） 3-5,12-14)

- (1) オペアンプの反転増幅回路・非反転増幅回路・積分回路・微分回路における入力電圧  $V_{in}$  と出力電圧  $V_{out}$  の関係式を導出せよ。

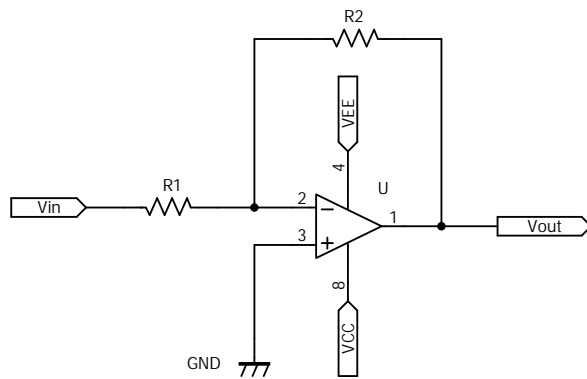


図 A-1 反転増幅回路の実験用回路図

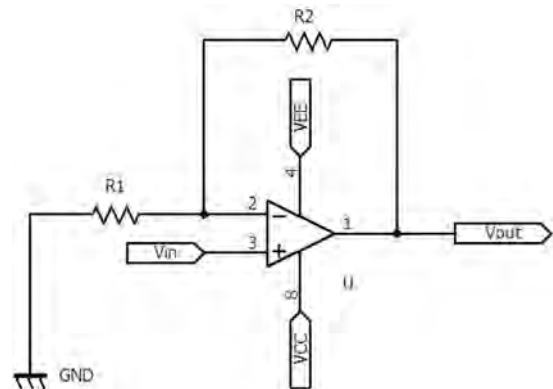


図 A-2 非反転増幅回路の実験用回路図

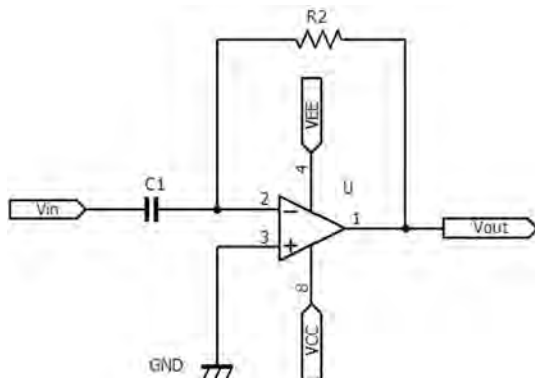


図 A-3 OP アンプを用いた微分回路

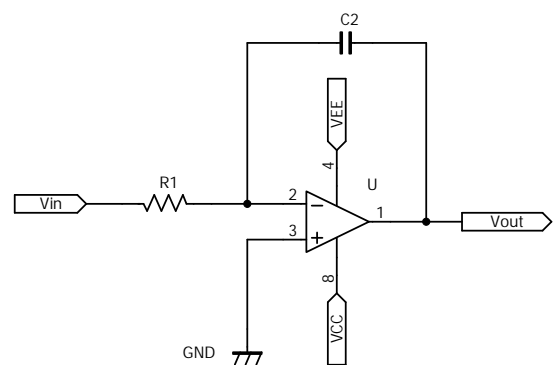


図 A-4 OP アンプを用いた積分回路

- (2) 電圧フォロワ，差動増幅回路，コンパレータ回路について説明せよ。
- (3) Arduino でパルスを検出する処理について説明せよ。
- (4) ポアソン分布について説明せよ。



### 事前学習課題 3 (3 週目の実験前日までに Moodle へ提出) 15-29)

- (1) 霧箱の原理について説明せよ。特に  $\alpha$  線および  $\beta$  線の秘跡が生じる物理現象について述べよ。また、ドライアイスではなく液体窒素を用いた霧箱の具体的な作り方について述べよ。
- (2) 大気圧空気 GM 計数管の原理および具体的な作り方について述べよ。
- (3) 静電気を貯める装置であるライデン瓶 (ライデンびん) の原理について説明せよ。
- (4) 静電気を利用した高電圧発生 of 仕組みについて説明せよ。

### 事前課題に関する参考文献

1. 柴田 徳思, 放射線概論, 通商産業研究社, 2011
2. 日本アイソトープ協会, はじめての放射線測定—正しく理解し, 正しく測ろう放射線, 日本アイソトープ協会, 2013
3. Glenn F. Knoll, "放射線計測ハンドブック", オーム社, 2013
4. W.J. プライス, 放射線計測, コロナ社, 1994
5. 山崎 文男, 放射線 (実験物理学講座 26), 共立出版, 1977
6. 熊谷 寛夫, 加速器 (実験物理学講座 28), 共立出版, 1975
7. 河田 燕, 放射線計測技術(理工学実験 9), 東京大学出版会, 1981
8. 岡村 迪夫, 放射線測定回路とシステム, 日刊工業新聞社, 1975
9. J. A. Narud, M. R. Aaron, Analysis and Design of a Transistor Blocking Oscillator Including Inherent Nonlinearities, *ell Labs Technical Journal*, Vol.38 (1959) 785-852. [トランジスタブロッキング発振の動作原理に関する論文]
10. J. McDonald, Circuit models to predict switching performance of nanosecond blocking oscillators, *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, Volume 11, Issue 4, (1964) 442- 448. [トランジスタブロッキング発振の動作原理に関する論文]
11. 赤津光治, トランジスタテレビ水平発振回路, *テレビジョン*, 19 (1965) 343-348.
12. 藤井 信生, なっとくする電子回路 (なっとくシリーズ), 講談社, 1994
13. Massimo Banzi, *Arduino をはじめよう 第 2 版*, オライリージャパン, 2012
14. ar Simeon Denis Poisson (1857), *Recherches sur la probabilité des Jugements, Des Regles Generares du Calcul des Probabilites*, Bachelier, Imprimeur-Libraire. [ポアソン分布の原著論文 (in French) ]
15. Wilson, C. T. R., "On a Method of Making Visible the Paths of Ionising Particles through a Gas". *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences.*, 85 (578), pp.285–288, 1911. [ウィルソンの霧箱の原著論文]

16. Das Gupta, N. N., Ghosh S. K., "A Report on the Wilson Cloud Chamber and its Applications in Physics". *Reviews of Modern Physics*. Vol.18(2) (1946) p225–365.  
[ウィルソンの霧箱に関するレビュー]
17. 油井多丸, "手作り霧箱で $\alpha$ 線の飛跡を観察しよう!", *Isotope news*, 624 (2006) p31-34.
18. 戸田 一郎, "ガラス容器で霧箱を作ろう", *Isotope news*, 625 (2007) p23-27.
19. 戸田 一郎, "演示実験用卓上型霧箱", *Isotope news*, 626 (2008) p25-28.
20. 柚木 朋也, 伊藤 雄一, 浜田 康司, "S霧箱を使用した放射線の観察に関する研究", *理科教育学研究*, 57 (2016) p155-168 .
21. 秋吉 優史, "放射線教育におけるペルチェ冷却式高性能霧箱の活用", *日本放射線安全管理学会誌*, 16 (2017) p72-78
22. 秋吉 優史, "ペルチェ冷却式高性能霧箱製作のための要素技術", *日本放射線安全管理学会誌*, 16 (2017) p79-84
23. 矢野 淳滋, 高校生にも作れて $\alpha$ 線も計れる大気圧空気 GM 計数管, *物理教育*, 38 (1990) 312-315
24. 米村 傳治郎, 小学生にも作れる静電気 GM 管 : 矢野・米村式 GM 管, *物理教育*, 41 (1993) 192-193
25. 三門 正吾, 大気圧空気 GM 係数装置の製作と放射線測定, *物理教育*, 41 (1993) 262-265
26. 三門 正吾, 御須 利, 大気圧空気 GM 計数器の改良, *物理教育* 42 (1994) 39
27. 三門 正吾, 紙筒と空き缶を利用した高感度 GM 管の製作, *物理教育*, 50 (2002) 23-27
28. 三門 正吾, 紙筒ガイガー計数管を用いた放射線の測定, *Isotope news*, 629 (2006) 31-34
29. 三門 正吾, 紙筒ガイガー計数管の製作, *物理教育学会年会物理教育研究大会予稿集*, 22 (2005) 10-13

※ 上記参考文献については図書館および Moodle 上に用意されている