

ペルチェ冷却式高性能霧箱の開発

大阪府立大学・放射線研究センター 准教授 秋吉優史*

1. はじめに

放射線教育を行う上で、霧箱による放射線教育は非常に大きな役割を果たしています。全国各地で行われている放射線に関するオープンスクール活動においても、霧箱工作は世代を問わず大変人気があり、目で見て直感的に放射線の存在を知ることが出来るため教育的効果が大変大きく、様々な研究・教育者が霧箱の改良に携わってきました[1-4]。近年多く行われるようになった、工作などのエンターテイメント色を無くして、測定などを中心とした放射線セミナーなどでも、工作は行わなくても展示物として設置が望まれています。

しかしながら、従来の霧箱はドライアイスが必要という点が最大のネックとなっていました。展示を行う直前にドライアイスの準備が必要であり、遠隔地でのオープンスクールや、小規模なイベントの場合霧箱の展示をためらうことも少なくありません。また、頻繁にドライアイスとエタノールの補給が必要なため、長時間の展示には不向きでした。エチレングリコールを用いた高温拡散型の霧箱も販売されていますが、ガラス製の天板を使用しているため後述する方法での β 線の観察が困難で、電源を投入してから安定して観察できるまで時間がかかり、観察途中の線源の交換などが難しい、大勢の子供が来るオープンスクールではヤケドに対する注意が必要、価格も高価で、展示中のメンテナンスの際に有害なエチレングリコールの蒸気を吸ってしまう可能性があるなどの問題が

あり、余り推奨できません。 $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ などの塩と氷を混ぜた寒剤を用いた霧箱も提唱されています[5, 6]。現在筆者も出来るだけ実験操作が簡略なパッケージ化された教材を目指して開発中ですが、 $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ は冷蔵庫などでの低温保存が必要で、また低温の持続時間が短いため、塩の溶解、発熱・吸熱反応、過飽和、結晶成長と絡めた理科教材としては非常に有望ですが、純粹に霧箱の展示という意味に於いてはまだドライアイス調達した方が楽なのではないかと思われます。

さらに、これまで用いられてきた霧箱では、天候やドライアイスの接触状態などにより飛跡が観察できないことも多々ありました。そして、最大の問題点として「 α 線の飛跡が見えた」に留まっていた、と言う点が挙げられます。

そこで、いつでもどこでも、短時間のうちに放射線観察を可能な装置として、ペルチェ素子を使用した、高性能霧箱を開発しています。最大の特徴はドライアイスが不要であるという点ですが、それに加えて、安定してクリアな飛跡の観察が可能ですので、一般的な霧箱での α 線の飛跡の観察に加えて β 線の飛跡の観察も可能で、さらには γ 線により放出された光電子なども観察可能となっています。これにより、放射線の種類による物質との相互作用の違いを直感的に学習することが出来るため、ただ単に飛んでいるのが見えた、に留まらない奥が深い放射線の世界を紹介することが可能となります。また、構造上長時間エタノールの補給をせずに内部での循環により動作し続ける

* 〒599-8570 堺市中区学園町1-2 akiyoshi@riast.osakafu-u.ac.jp

ことが出来るため、一日がかりのイベントや、科学館などでの展示も人出をかけずに可能となります。

当初は、販売を行いながらの改良を繰り返す、いわゆるオープンベータの状態でしたが、販売開始から1年以上が経過し、十分な耐久性と信頼性を得るに至りました。既に京大、東工大、東北大、神戸大、長崎大学などの多数の放射線関連の大学や、各地の教育大学、大学の教育学部、中学校などの教育機関、KEKやQSTなどの放射線に関連した研究所などへの導入実績を得ています。このペルチェ冷却式高性能霧箱の技術的な情報を公開することで、現在販売している製品を超える装置の製作、改良が各地で行われることを期待しています。なお、既存のペルチェ冷却霧箱に関して取得されている特許[7]には抵触していないことを確認しています。

さらに、ハードウェアの改良だけに留まらず、この装置で説明できることを使って、放射線教育プログラムという、ソフトウェアの改良も期待されます。例えば、放射線の種類により生体への影響がどう異なるのか（4000BqのK-40と20BqのPo-210による実効線量の違い）を、明確な飛跡の違いから説明することが出来ます。そのことからベクレルだけでは生体への影響（シーベルト）は評価できないこと、さらに、どういった核種がどのような放射線を出しているかという情報から、身の回りの放射線と福島事故で放出された核種からの放射線について、同じ土俵で比較する力を付けることが出来るような教育プログラムを作成することが可能です。

2. ペルチェ冷却式高性能霧箱の構成要素

ここでは、ペルチェ冷却式高性能霧箱を構成する、ハードウェア的な要素について説明致します。非常に多くの要素の積み上げで現状の製品に至っていて、正にノウハウの固まりとなっていますが、広く公開することで放射線教育が普及する助けになればと思います。

・ペルチェ素子

ペルチェ素子は様々な業者を通じて広く一般的に販売されていますが、40mm角の大きさのセラミックス板に挟まれた、結露水に対する防水加工済の製品が容易に入手可能であり（図1）、TEC1-127xxというような型番の違いで消費電力、吸熱能力が異なる様々な製品がいずれも一枚800円以下で販売されています[8]。

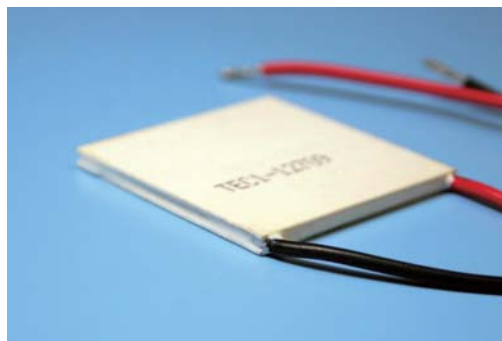


図1 ペルチェ素子の例。型番の印字面が冷却側です。結露水に対応するため防水処理がされています。

ペルチェ素子は、電流を流すと素子の片側から反対側に熱を「輸送」という働き（ペルチェ効果）を示します。熱を吸収する素子ではなく、また、熱を輸送する際に仕事をするため素子自体の発熱も伴い、闇雲に電流を流せばよく冷えるというわけではないことに注意する必要があります。TEC1-12708素子単体に、銀ペーストとしてZAWARD社MX-4を塗布した上でScythe社製Shuriken Rev.B CPUクーラーに載せて、アルインコDM-330MV安定化電源で入力電圧を変えていったところ、電流は単純に電圧に比例していて、ペルチェ効果による熱輸送量は電流量に比例しますが、ジュール発熱量は電流の二乗に比例するため、素子の表面温度は電流の増加と共に下に凸の放物線を描き、12V程度で最も素子表面温度が低くなりました。

しかしながら、いずれの素子も単体では霧箱として観察可能な -20°C 以下に冷却することは出来ないため、二段重ねのカスケードを形成することで十分な冷却能力を得る必要があります。一段目

と二段目の組み合わせによっては到達可能な温度が異なり、下段の素子に12V、上段の素子に5V印加という条件で素子の組み合わせを検証した結果、TEC-12705を上段に、TEC1-12708を下段に配置すると最も到達温度が低くなることが確認されました[9]。気温にも依りますが、チャンバーを載せない状態で-40℃程度にまで冷やすことが可能です。この結果から、PCで一般に用いられているATX電源からの12Vと5Vの出力を利用してシステムを構築可能であることが分かります。

ペルチェ素子の使用上の注意点としては、ヒートシンクとのサーマルコンタクトが不十分で廃熱が上手く行かないと、到達温度が下がらないこと、そして最悪、ヒートシンクとの間に異物が挟まるなどして素子の温度が150℃以上に上がると、内部で素子を固定しているハンダが溶けてしまい、使用不能になってしまうという点が挙げられます。素子をヒートシンクにねじりながら押しつける、さらには熱伝導グリスを塗り直すなどしてサーマルコンタクトを取り直しても到達温度が不十分な場合、どちらかの素子が破損していないか確認する必要があります。

・ヒートシンク

上述のように、ペルチェ素子はあくまでも熱を輸送する素子であり、吸収してしまうわけではないので、必ず高温側の熱を放熱するヒートシンクが必要となります。販売している製品では、コストパフォーマンスに優れているPC用のCPUクーラーを使用しています。現在のCPUは高集積化、高クロック化が進んだ結果、発熱量が非常に上昇しており、最新の製品ではTDP(熱設計電力)が140Wにも達しているため、ヒートパイプを使用した高性能なCPUファンが開発されています。なお、現在CPUファンに用いられているヒートパイプはどの向きでも使用することが可能で、本来使用する方向と違う向きでも正常に動作します。製品の販売を開始した当初から、2017年5月現在に至るまで、Scythe社のShuriken Rev. Bという、コンパクトなトップフロー型CPUクーラー(図2)を使用し

ていますが、様々な製品が販売されていますので、リテンションさえ問題無ければ好みの製品を用いると良いでしょう。開発初期には、より高性能な、Scythe社の虎徹というサイドフロー型の製品を使用していました。

注意すべき点としては、現代のCPUファンはCPUの温度に応じて、ファンの回転数をPWM制御によりコントロールしています。この制御を行う信号線に、後述する高電圧モジュールからのノイズが入ると、回転速度が落ちて冷却効率が下がります。+12V(赤)、GND(黒)線以外の線(黄色と青の場合が多いようです)は、根本から切断してしまうと良いでしょう。



図2 Scythe Shuriken Rev.B CPUクーラーのパッケージ内容。使用するリテンションは左側の2本のみで、熱伝導グリスも同梱されています。

・サーマルグリス

高性能なCPUクーラーに加えて、大きな発熱量を処理するために様々な高性能の熱伝導グリスがPC用に販売されています。銀の微粒子を使用した製品が数多く売られており、定番と言われているものに、熱伝導率9.0W/m・KのArctic Silver社のAS-5、熱伝導率8.5W/m・KのZAWARD社MX-4が挙げられます。MX-4は長期間高温で使用してもグリスのオイルが抜けず硬化しにくいと言われており、現在販売している霧箱ではこのMX-4を使用しています。銀以外では、JouJye Computer社のナノ・ダイヤモンドサーマルグリスOC7は、20nmの人工ダイヤモンドを40%使用していると謳っており、12.6W/m・K

に達します。一方で、製品のカタログ性能も重要ですが、塗り方も非常に重要で、開気孔の多いセラミックス表面の凸凹を埋めるようにしっかりと塗り込む必要があります。グリスの硬さなども重要です。また、本来必要な範囲で出来る限り薄く塗り伸ばすのが理想的なのですが、運搬した際の振動などで隙間が空かないよう、やや多めに塗り込む方が、安定した冷却を可能として好ましいようです。

・ ATX電源

ペルチェ素子2枚、CPUクーラー、LEDライト、高電圧回路を駆動するために、+5V と、+12V の二種類の出力を持つ電源が必要となります。霧箱本体一台につき12Vで5A程度とかなりの容量が必要で、実験用の安定化電源ではかなり高価な製品が必要となるため、PCで使用するATX電源などを使用します。容量は、一台だけの駆動であれば150W程度、同時に二台並べて使用する場合は250W以上の物を選ぶと良いでしょう。製品によっては200W程度でも2台駆動できるようです。SATAデバイスが普及する前にHDDが電源コネクタとして使用していた、ペリフェラル4ピンコネクタ（大）などと呼ばれる、コマーシャルメイテックコネクタ（図3）が有れば十分です。SATAデバイス用の電源コネクタや、最新のマザーボードに対応するための特殊なコネクタなどは一切必要ないため、不要になった古いデスクトップPCから抜き出して調達が可能です。このコネクタにペルチェ素子、CPUクーラー、LEDなどの電源を接続するためには、コマーシャルメイテック ソケットハウジング1-480426-0とコンタクトピン60618-1（図4）が必要ですが、電氣的に安全に接続できるのであれば、好みの製品を使用すればよいでしょう。

なおATX電源はPC用のマザーボードに挿して使用することを前提としているため、そのまま電源を入れても動作しません。マザーボードに接続する20pinもしくは24pinのコネクタのうち、緑の線が繋がっているPS_ONを、黒い線が繋がった適当なCOM（左右どちらでも良い）に Y端子などを使用

して短絡することで、単体で動作するようになります（図5）。

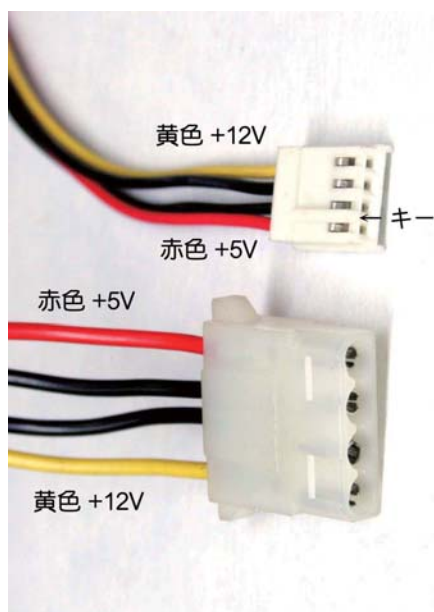


図3 ATX電源から出力されている+12V、+5Vの電源コネクタ。上は3.5inch FDD用コネクタで、下がIDEデバイスなどに用いられるコマーシャルメイテックコネクタ。

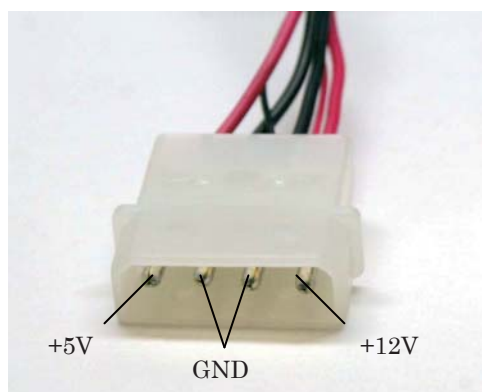


図4 コマーシャルメイテック ソケットハウジング1-480426-0とコンタクトピン60618-1を用いた、ペルチェ素子とCPUクーラーに給電するためのコネクタ。12Vと5Vの向きに注意して下さい。

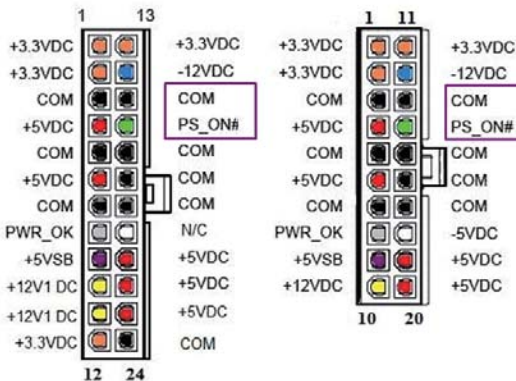


図5 ATX電源をマザーボード無しで動作させるためにCOM(GND, 黒)と短絡が必要なPS_ON(緑)の配置。

・観察用チャンバーとLEDライト

観察用のチャンバーとしては、ダイソーのコレクションケースが非常に優れています(図6)。通常のタッパーなどを利用する際は底面を黒く塗ったり、黒い紙を切り抜いて敷いたりする必要がありますが、このコレクションケースは底面が黒色です。材質的にも、アクリル製のチャンバーはアルコールに徐々に侵されて細かいひび割れなどが全面に入ってしまうますが、このコレクションケースは台座もフタもポリスチレン製であり全く問題無く使用することが出来ます。さらに、LEDライトの貼付けの際に円筒状のケースでは加工が困難ですが、四角いケースであるため問題有りません。理想的です。



図6 ダイソーのコレクションケース(ミニ)。

ペルチェ冷却式の霧箱作成のパーツとしてだけでなく、ドライアイスを用いた従来型の霧箱を作成する際にも、台座が最初から黒く、薄く熱伝導が良いため(間に紙などを敷くと大きく熱伝導が損なわれてしまいます)、短く切ったスポンジテープを付けるだけの短時間の作業で極めて安価で高性能な霧箱が作成出来る上に、入手性の良さによる教員間のノウハウの共通化などから、現在考えられる範囲で最適な選択支と言えます。エタノールの注入も、透明な箱状のチャンバーのフタをひっくり返した底側にスポンジを張り付けるため、スポイトを使わずにビーカーなどで注ぎかけるだけで済みます(通常のタッパーなどとはジオメトリが逆です)。300円程度のより大型のケースも販売されており、これを用いた展示用の大型霧箱も実証済です。

これらのケースのチャンバーのフタは薄いプラスチック製であるため、天板の上にマントル線源を載せると、 α 線は透過せずに、 β 線・ γ 線だけをチャンバー内に入れることが可能です(図7)。これによって、特殊な線源無しに β 線観察を可能としています。より β 線の透過率を上げるために、チャンバーの天板を切り抜き、使い道の無くなったOHPシートを切って貼付けた製品も販売しています。これはガラス製のチャンバーでは不可能であり、大きな特徴となっています。さらに、天板の上に5mm程度のアルミ板を敷いて β 線を完全に遮蔽する状態でマントルを載せれば、 γ 線だけを導入することが可能であり、それによって叩き出される光電子などが、 β 線と同じように観察される、とすることを直感的に学習することが出来ます。

照明としては、普通の室内程度の明るさでも飛跡を明確に観察可能とするため、電飾用に市販されている12Vタイプの高輝度LEDモジュールを使用します。例えばSMD 5730 3-LEDモジュールなどです。抵抗などもモジュールに組み込まれておりそのまま12V電源に繋ぐだけで終端処理等せずに使用することが出来ます。時期によって入手できるモジュールに若干の違いがあるようです(外

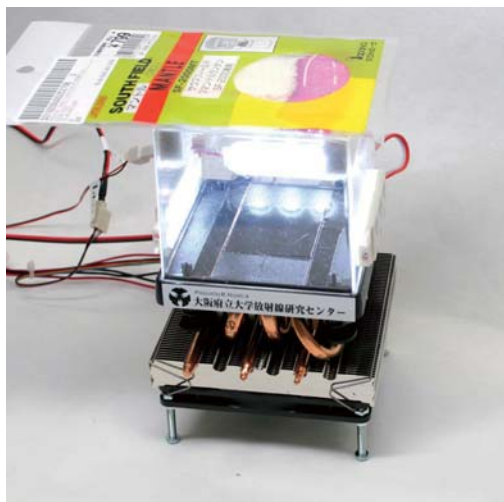


図7 β 線観察のためにマンテル線源をチャンパー上部に設置した状況。さらに、チャンパーと線源の間に6mm程度のアلم板を設置すれば、ガンマ線だけをチャンパー内に導入できます。

形や、色温度などが異なりますが、大きな違いはありません。

・UVレジン

ペルチェ冷却式の霧箱を製作する上で、最も問題となるのがペルチェ素子をどのようにチャンパー底面にマウントして、さらにヒートシンクに密着させるためのテンションを確保するか、です。

現在販売している製品では、試行錯誤の末にコレクションケースの底面に四角く穴を開けて、ペルチェ素子をUVレジンで接合しています。エポキシ接着剤などでも構わないのですが、流動性が高く隙間に流れ込んでくれる、仕上がりが綺麗で、2分程度で完全に硬化するが紫外線照射するまでは硬化せず作業性が非常に高い、硬化後の強度が高い、などの点でUVレジン是非常に優れています。通販や手芸店、さらにはダイソーなどでネイルアート用やアクセサリ製作用などで多数の製品が売られています。製品によっては臭いがきつかったり表面がべたついたりして、硬化後にアルコールで拭き取ること概ね解決可能ですが、現在までのところ、やや高価ですが、清原株式会社のUVレジン液が最も無難なようです(図8)。硬化には



図8 最も定番となっている、清原のUVレジン。25g1000円程度で入手可能です。

日光に当てるかUVライトを使用しますが、LED式のUVライトは日亜化学工業製の375nm LEDを使用していると明記していないと硬化に必要な波長と合わず、多灯式の物でも全く硬化しないため注意を要します。ネイルアート用の、蛍光管を使用したタイマー付きの物が手頃で便利です(図9)。



図9 ネイルアート用などで販売されている蛍光管式のUVライト。2分のタイマーが付いていて便利です。

なお、チャンパー底面の切り抜きは、Pカッターなどでも可能ですが、本田電子株式会社などから販売されているホビー用の超音波カッター(図10)の使用を強くおすすめします。樹脂加工全般で、



図10 超音波カッター、本田電子株式会社ZO-40。振動と熱でプラスチックをバターのように切ることができます。

驚異的に加工効率が向上します。

UVレジンの硬化は、工作に使用するのみならず、放射線による重合反応の説明に应用することが出来ます。さらに、紫外線自体も、電波や赤外線、可視光線から続く光の仲間として、X線やガンマ線を説明する際に理解の助けとなります。UVレジンを使用したアクセサリー工作は近年極めて人気が高く、母親層を含めた広い年齢層に対してアピールすることが出来る新しい放射線教育のツールとして現在ソフトウェアを開発中です。2016年度の「みんなの暮らしと放射線展」に於いてアクセサリー工作ブースを試行した際は、意外にも男子にも人気が高かったことを付け加えておきます。

・線源

容易に入手できる線源としては、何と言ってもトリウムを含んだランタン用のマンテルが最も適していますが、近年ほとんどの製品がトリウムを含んでいません（ β 線を検出可能なサーベイメーターを持ってスポーツ用品店に行ってみると分かります）。現在手に入るトリウム含有マンテルとして、サウスフィールドブランドのSF-2000用マンテルSF-2000MTとD-Xハイパワーランタン3000用のD-Xハイパワーマンテルが挙げられます(図11上)。

スポーツ用品店のアルペンにて販売されており、800円程度で通販でも入手可能です。しかし、同社の似たような製品でもSF 200MTやSF-DX400MTと言う製品は全く放射線を出しておらず、前述の製品も産地によってはトリウムを含んでいないという情報もあるため、返品が可能かなど注意が必要です。なお、元々がキャンプ用品であるため、冬場はほとんど市場に出回っておらず、入手しにくくなるため、夏場に購入しておく必要があります。

次に入手しやすいのは、ラジウムセラミックボール(図11下)で100g 2000円程度で入手可能です、マンテルに比べるとやや線量率が低く、丸いボールなので、ワッシャーのような物を台座にする必要がありますし、表面積が小さいため α 線の放出量はマンテルよりだいぶ劣ります。



図11 サウスフィールドブランドD-Xハイパワーマンテル(左)とSF-2000MT(右)、ラジウムセラミックスボール(下)

最も簡単に α 線源を入手するには、空気中のラドン娘核種を掃除機で捕集します。捕集する際にろ紙のような目の詰まったフィルターを用いると、非常に捕集効率が悪く時間がかかりますが、ベンコットなどのようなガーゼを使用すると極めて高い効率で捕集することが出来ます。掃除機の吸い込み口にガーゼを当てて輪ゴムで止め10分程度吸引するだけで十分です(図12)。掃除機は一般的な物で十分です。地下室や、コンクリートむき出しの壁で、ロッカーの裏など空気が滞留しているところを吸引したところ、下記のインスペクターUSBで測定して17000cpm以上という、マントルよりもはるかに強力な線源を得ることが出来ました。

半減期40分程度で減衰するため(図13)霧箱工作教室などでの配布の際にも安心です。USB接続してPCに計数値を取込可能な高感度のパンケーキ型の広窓GMサーベイメーターであるSE International社製インスペクターUSBなどの製品を用いれば、授



図12 掃除機とガーゼを用いた空気中のラドン娘核種の捕集の様子。目の詰まったろ紙やペーパータオルとは全く違った次元の捕集効率で、短時間での捕集が可能です。

業時間内程度で半減期を明確に評価可能であり、放射能の減衰挙動を直接学習することが出来る極めて貴重な線源を得ることが出来ます。

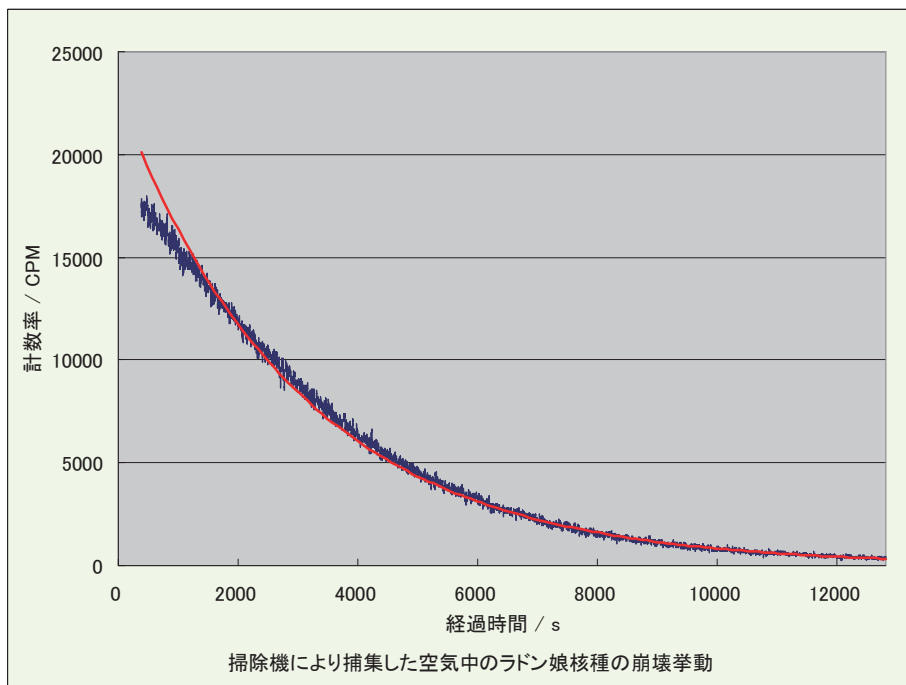


図13 掃除機により捕集したラドン娘核種の崩壊挙動を、インスペクターUSBを使用して連続的測定した例。測定当初は計数率が高すぎて数え落としが起こっていると考えられる。10000cpm程度以降の値を用いると、半減期は34分程度であった。

・高圧電源

通常の霧箱では、雨天時などでは冷却は十分出来ていて霧の発生は確認できても、 α 線の飛跡がよく観察できないという事態が頻繁に発生します。これは、空气中的の雑イオンが多すぎるため、放射線が通らなくてもアルコールが核生成してしまい、いざ放射線がイオン生成しても過飽和蒸気圧が低下しており飛跡に添った核生成が行われないためであると考えられています。この雑イオンを、高電圧を印加することで除去する必要があります。

最も簡単には、化学繊維の布などでチャンバー

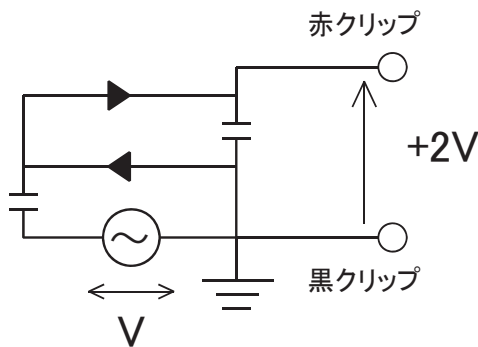
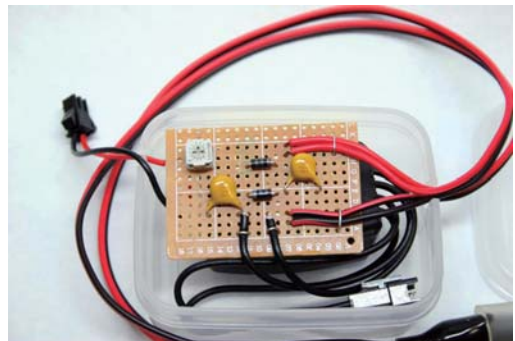


図14 コッククロフト・ウォルトン回路の例。上図では2段だけであるが、段数を上げれば簡単に10kV程度の高電圧を得ることが出来ます。さらに、インバータ回路に入れる電圧を半固定抵抗で落とすことで、自在に電圧のコントロールが可能です。

チャンバー底面に銅箔テープを用いて平行に電圧をかけていた場合、余り電圧を上げすぎると、逆にイオンを加速して雑イオンを増やしてしまうことが、これまでの研究で明らかになっています。インバータに入れる電圧を50 Ω 程度の半固定抵抗器を用いてコントロールすることで出力電圧を可変として、最適な電圧を評価したところ500V程度で、これは放射線検出器の電離箱領域上限に相当し、それ以上になると比例計数領域からGM領域となるという電圧と一致しています。

しかしながら、チャンバーの天板の上にメッシュ状の電極を載せて上下方向に電圧をかけた方ははるかに高性能となり（線源を入れない状態での雑イオンに起因する霧の発生状況が全く異なり、同じ線源を用いた際のイベント数が数倍になります）、印加電圧もより高い方が観察しやすいよう

を直接こすることで静電気を発生させ方法ですが、飛跡が見えない悪天候時は湿度が高く静電気も発生しにくくなっています。そこでコッククロフト・ウォルトン回路（図14）を用いた高電圧発生装置を利用します。冷陰極管（CCFL）用のインバータ回路が安価で入手できるため、これを1kV程度までの交流の高圧電源としてコッククロフト・ウォルトン回路に入れて、昇圧・整流を行います。コンデンサー、ダイオードの耐圧に注意して、耐圧が低い場合は素子を直列に繋いでそれぞれにかかる電圧を落として下さい。



すので、今後より適切な電場のかけ方を検討する必要があります。2017年5月から販売する最新版では、チャンバーの天板の上にメッシュ状の電極を載せた仕様に変更となります（図15）（図16）。

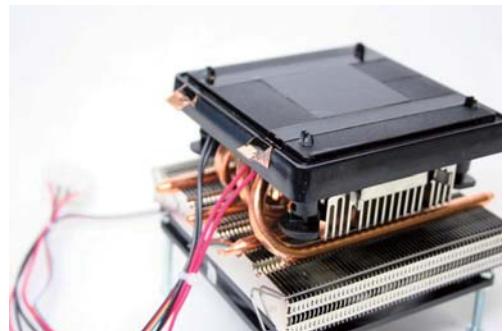


図15 2017年4月まで販売分の製品における高電圧電極の配置。黒く塗った銅箔テープを平行に貼付けていました。



図16 2017年5月以降に販売する製品の高压電極。GND側はCPUクーラーの金属部分に接続し、チャンパー内への電極貼付けが不要となりました。

・素子表面の塗装

コレクションケースにUVレジンでマウントした上段側のペルチェ素子表面は、観察しやすくするために黒く塗装する必要がありますが、室温以上から -40°C 以下への温度変化を繰り返し受け、さらにアルコール（イソプロピルアルコールを含む場合もある）に曝され続けるため、その双方に耐える塗装は非常に困難です。様々な塗料を試しましたが、少量、短期間の使用であればアサヒペンの高耐久性ラッカーズプレーがある程度の耐久性を示しますが、エタノールに徐々に侵されます。現在は、同じくアサヒペンの弱溶剤2液ウレ

タンスプレーを使用しています。塗膜は非常に強靱であり、イソプロパノールにも全く侵されませんでした。温度変化によりひび割れ・素子表面からの剥離が発生してしまいました。このため素子表面をシリコンオフ（ヘプタンが主成分）でしっかりと脱脂し、密着性の良いプライマー剤（ミツチャクロンや万能タロウなどの商品名で販売されています）を間に一層塗布した後に、弱溶剤2液ウレタンスプレーを使用することで、温度変化にも溶剤にも強い塗膜を得ることが出来ました。2液ウレタンスプレーは1回使い切りであり、補修などに使用するのは困難なため、一般向けには上述の高耐久性ラッカーズプレーか、車の補修用のタッチペンなどが手頃です。

さらに、塗装後の素子表面は撥水性を持っており、素子表面で結露したアルコールが玉状となってしまう光が乱反射して非常に観察しにくくなってしまう。そこで、親水性のガラスコーティング剤を素子表面に塗布して、親水性と耐久性の向上を果たしています。ガラスコーティング剤は自動車用品などとして市販されていますが、大半は撥水性を示す製品ですので、注意して下さい。現在は、クリスタルコートGFGC01という製品を使用しています。液体となったアルコールが素子を滑らかに覆い、明らかに観察しやすくなるのが分かります（図17）。

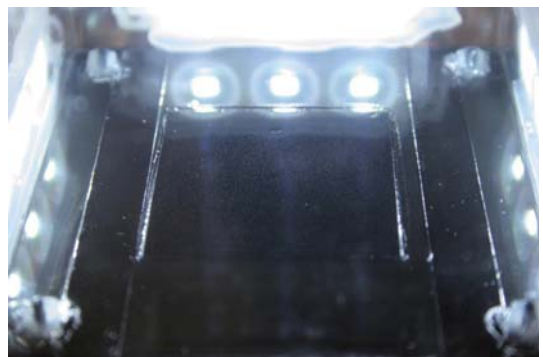
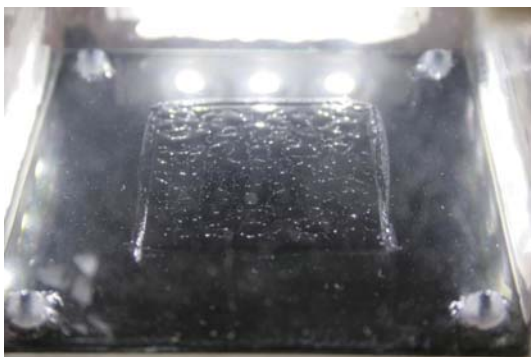


図17 親水化処理の有無による見え方の差。左が親水化処理を施していない状態で、右が処理後。処理後ではアルコールが滑らかに表面を覆っていることが分かります。

3. ペルチェ冷却式高性能霧箱の運用

これまで述べたような特徴を持つ、ペルチェ冷却式高性能霧箱ですが、実際の運用について以下に述べたいと思います。

まず、実際に霧箱として使用する前に、素子の表面温度の測定を行ってみて下さい。温度測定には、熱電対を用いたデジタル温度計が一般的ですが、熱容量の小さい細い熱電対先端をアルミテープなどを用いて密着させる必要があります。頻繁に運用するようであれば、赤外線センサーを用いた、非接触式の温度計の使用を強くおすすめします。1500円程度で入手可能です。

温度測定により、 -30°C 以下に冷えていれば問題有りません。 -20°C 程度でも観察は可能ですが、かなり過飽和度が小さく、観察しづらくなります。どうしても温度が下がらない、と言う場合は、スポンジテープ周辺にUSBハンディウォーマーか、より手軽には使い捨てカイロなどを貼付けると良いでしょう。これらの製品は、それ自体である一定の温度以上に上がらないようになっており、ヒーターを温度コントローラーでコントロールする、と言うような労力が不要です。これにより、アルコールの蒸気圧を上げて素子周辺での過飽和度を上げることが出来ます。

使用するアルコールはエタノールですが、試薬特級といった高純度の物を使用する必要は全くありません。消毒用の安価な物、さらに言えば、イソプロピルアルコールを含んでいるより安価な製品で全く問題有りません。イソプロピルアルコール単体で使用すると、エタノールよりも観察しやすくなるのですが、臭いがきつく、スポンジテープの糊を溶かしてしまうなどの問題があるため、余りおすすめはしません。アルコールは、スポンジの糊を溶かさないう程度にやや多めに注入した方が観察しやすいです。チャンパー底面にもある程度塗布しておいた方が良いでしょう。現在販売している製品では、チャンパー内部でアルコールが自然循環するように設計されており、長時間の観察が可能です。

多少の湿度、気温の変化があっても高電圧ユニットの働きで問題無く観察できることが確認されていますが、現在のところ、ストーブを使用している部屋では観察が出来ないことが確認されています。これは、飛行機雲のことを思い出し頂ければ理解できるかと思います。霧箱での放射線の飛跡は、飛行機雲にたとえられることが多いかと思いますが、飛行機雲は、過飽和水蒸気中を飛行機が飛び、ジェットエンジンからの排気ガスが凝縮核となって水滴が生成しています。全く同様に、ストーブからの排気ガスが凝縮核となり、エタノールの液滴が生成してしまうのです。簡単には、ガスコンロの炎の十分上の方にチャンパーのフタをかざし（ヤケド、火事に注意して下さい）、上昇気流を入れてから霧箱として動作させてみて下さい。真っ白な霧が観察できます。2017年5月販売分以降は、チャンパーの密閉度を上げており、外気でチャンパー内を良く換気した後に密閉すれば、高電圧ユニットの働きで徐々に霧が晴れてきますが、霧箱を使用する環境でのストーブの使用は、避けた方が無難でしょう。エアコンであれば、全く問題有りません。また、加湿機などによる極端な高湿度も同様の悪影響を与えます。ポットからの湯気を導入したチャンパー内では、嵐のような霧が観察できます。

β 線、 γ 線の観察については上述していますが、 α 線が紙一枚程度で止まってしまう、と言うのを実演するためには、ポリパックに線源を入れて直接飛跡が出ないことで理解してもらっています。これらの実験によって、 α 線、 β 線、 γ 線それぞれ物質との相互作用が異なり、それによって霧箱での見え方が異なる事が理解できます。紙一枚で遮蔽されてしまう α 線は、実は短い距離で強烈な相互作用をしておりはっきりした飛跡が見えており、内部被ばくを考えると非常に危険なことが体感できます。透過力の強い γ 線は逆に体をほとんど素通りしていて、時々光電子を出して結局は β 線と同じ作用をする、などが理解できます。このことからベクレルだけでは生体影響は評価できず、 α β γ の種類の違いやエネルギーの違いも考えな

くてはならないこと、それによって体内のたった20BqのPo-210が年間800 μ Svの実効線量を与えるのに対して、4000BqのK-40は年間170 μ Svにしかならない訳が説明できます。また、 α 線が直線状の飛跡を示すのに対して β 線は曲がりくねった飛跡を示します。そもそも、線源をチャンバーの上に設置しているのに素子に平行に走る β 線が観察できています。このことから、電子一つだけが飛んでいる β 線は非常に軽く、空気分子などによって簡単に弾き飛ばされてしまう、ということも理解できるかと思えます。

4. 結言

放射線教育を行う場で極めて有効な装置であるペルチェ冷却式高性能霧箱の開発を行い、ハードウェアとしての技術的特徴と、製作上の注意点、運用上の注意点や活用法を紹介致しました。販売されている製品のユーザーのみならず、これから開発を行う研究・教育者にとって、製作・運用上の参考となれば幸いです。

最後に、極めて低予算で授業を行う小・中学校の教育現場に必要なハードウェアを供給できるよう、ふるさと納税制度を用いた大阪府立大学つばさ基金でのプロジェクトを立ち上げています。ふるさと納税制度は、一般的には全国の特産品をお得に手に入れられる制度として広く認識されていますが、本来は納税者が自分の税金の使い方を決めることが出来る制度として、居住地以外の自治体に寄付を行い、寄付先の自治体で活用してもらった上で、自己負担2000円を除いて翌年の住民税/所得税に還付される制度です(年収などにより上限額は異なります)。

大阪府立大学は「公立大学」であるのに加えて、「つばさ基金」と言うしくみを大阪府の協力により実現し、寄附金を様々な研究・教育プロジェクトに活用することが出来ます。現在、「放射線教育振興プロジェクト」として、広く一般に向けた放射線教育振興活動を行っています。この制度を活

用することで、ペルチェ霧箱のみならず、インスペクターUSBなどのサーベイメーターや、霧箱ワークキットなどの様々な消耗品も寄付者がほぼ無償で入手することが可能となりますので、ふるさと納税の枠を使わずにいるようでしたら、是非この制度をご活用頂ければ幸いです。詳しくは、以下のURLを参照願います。

<http://bigbird.riast.osakafu-u.ac.jp/~akiyoshi/Works/index.htm#CloudChamber>

参考文献

- [1] “手作り霧箱で α 線の飛跡を観察しよう！”，油井 多丸, Isotopenews, No. 624(2006) 31-34.
- [2] “ガラス容器で霧箱を作ろう”，戸田 一郎, Isotopenews, No. 625 (2006) 23-27.
- [3] “演示実験用卓上型霧箱”，戸田 一郎, Isotopenews, No. 626 (2006) 25-28.
- [4] “気体を用いた荷電粒子検出器の製作と性能テスト”，東京工業大学 理学部物理学科 卒業論文，寄林侑正，2010年2月.
- [5] “塩化カルシウムを寒剤とした拡散霧箱の開発”，柚木 朋也，津田 将史, 物理教育, 60 (2012) 184-187.
- [6] “S霧箱を使用した放射線の観察に関する研究—中学校における取組—”，柚木 朋也，伊藤 雄一，浜田 康司, 理科教育研究, 57 (2016) 155-168.
- [7] 特許出願公開番号 特開2007-232416, “低温拡散型霧箱”，中村理化工業株式会社.
- [8] <http://www.everredtronics.com/thermoelectric.TEC1.html>
- [9] “ペルチェ冷却式高性能霧箱を用いた放射線教育プログラムの開発”，秋吉 優史，安藤 太一，奥野 泰希，松浦 寛，第5回放射線教育に関する国際シンポジウム 論文集，印刷中.