

**2016/11/18 大阪府立大学 放射線研究センター
共同利用成果報告会 @ C-13棟 講堂**

**放射線教育での普及を目指した
ペルチエ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
秋吉 優史**

従来型の霧箱の問題点

- ・直感的に放射線の存在を知ることが出来る霧箱は、教育的効果が大変大きい
- ・ドライアイスを用いた霧箱教室は各地のオープンスクールなどで大変人気がある

問題点

- ・ドライアイスの準備、補給が必要
- ・アルコールの補給などでチャンバーを開けると復帰まで数分かかる
- ・高温型の霧箱は起動に時間がかかり、子供向けにはヤケドの危険
- ・天候などにより飛跡が観察できないこともしばしばある

◎ α 線の飛跡が見えた、だけに留まっていた

高性能ペルチェ霧箱の特徴

- ドライアイス不要で長時間安定してクリアな飛跡の観察が可能
 - α 線の飛跡の観察に加えて、 β 線の飛跡の観察も可能
 - さらには γ 線により弾き出された光電子なども観察可能
 - 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出来る
 - 市販品を使用して安価に押さえており、複数ユニット設置可能
-
- 雑イオン除去のために高電圧の発生を行うが、仕組みは加速器の原理そのもの
 - ペルチェ素子、熱電対、ヒートパイプや熱伝導グリースを含めた物質の熱伝導、蒸気圧と過飽和・核生成、電離とイオン化など様々な工学要素が含まれている

→ これらを含めた放射線教育プログラムを提唱する

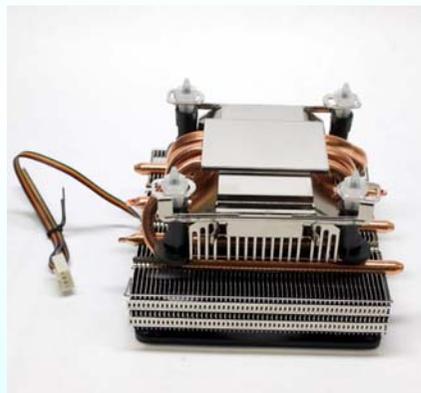
高性能ペルチェ霧箱の製作 (1)



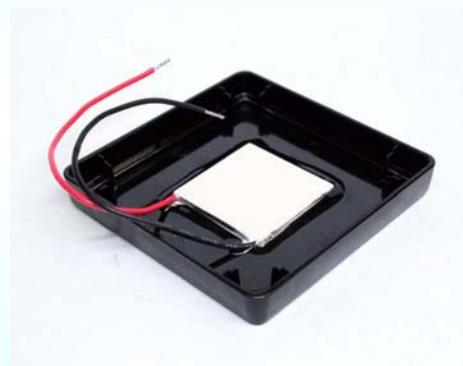
ペルチェ素子は一般的に販売されている 40mm角の製品 (TEC1-12709 など) を使用する。



素子の表面を黒く塗装する。通常のラッカースプレーではアルコールに侵されるため、シリコンオフで脱脂した後にプライマー処理し、ウレタン塗料を塗布する。



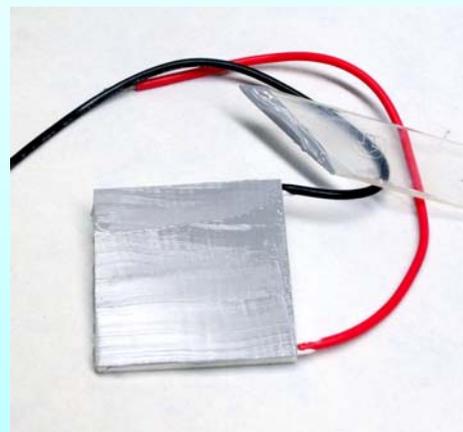
PC用の高性能のCPUクーラーを除熱に使用。ヒートパイプを用いた製品でないとオーバーヒートする。(写真はScythe社Shuriken Rev.B)



超音波カッターでコレクションケース台座を切り抜いた後に、ペルチェ素子を UVレジンでマウントする。冷却面の向き (印字面が冷却側) に注意。



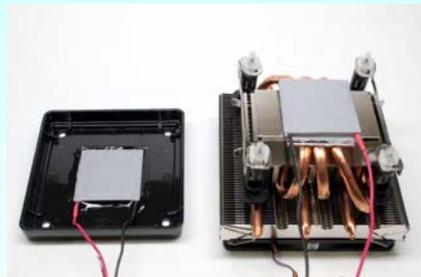
チャンバーとしてダイソーのコレクションケースが非常に優れている。ポリスチレン製でアルコールに侵されず、ドライアイスで冷やせばほぼそのまま霧箱になる。



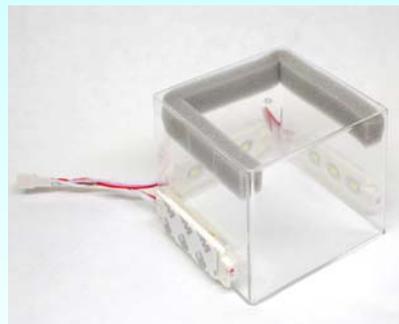
ペルチェ素子の間とCPUヘッドに熱伝導グリスを塗り、熱的なコンタクトを取る。

マウントした素子とCPUヘッドの間にもう一枚ペルチェ素子を挟み込み、二段重ねにする。

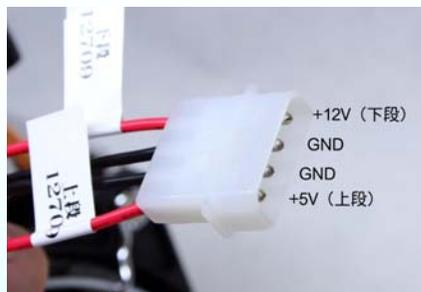
高性能ペルチェ霧箱の製作 (2)



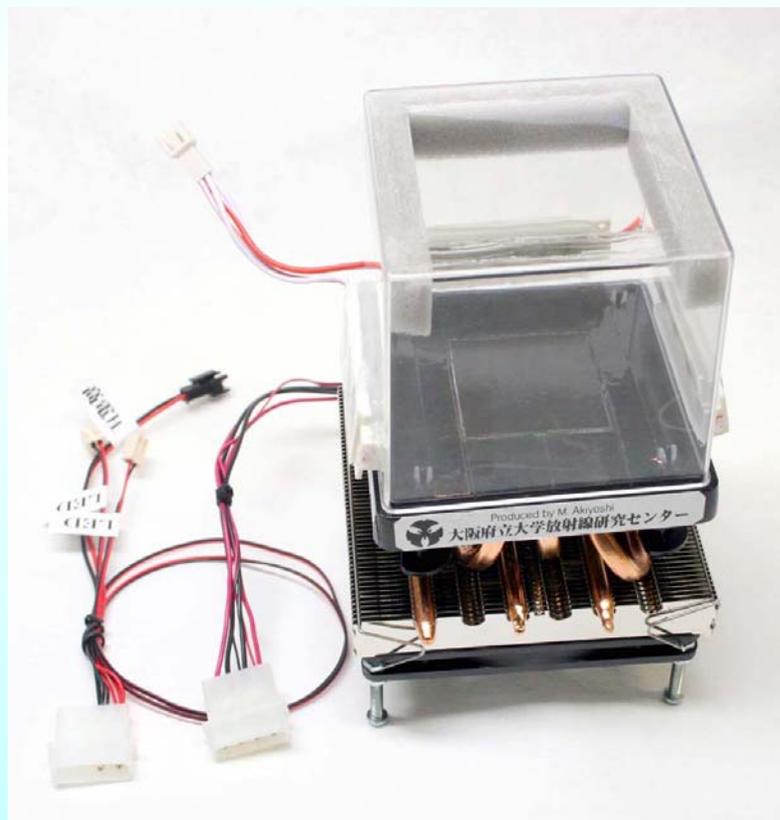
CPUクーラーのリテンションは、製品によって異なるので注意。LGA-775/115xなどのCPU用治具であれば、四隅の穴開けで行ける。トップフロー型のCPUクーラーの場合は、長いネジなどで足を取り付ける必要がある。



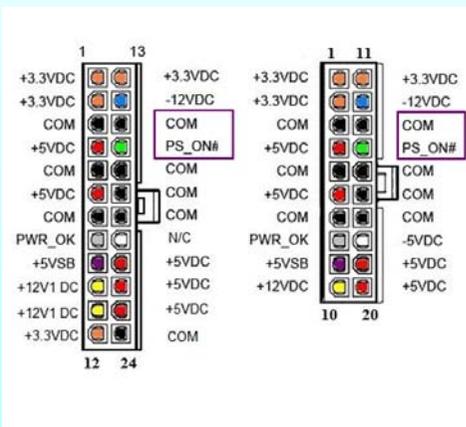
12VタイプのSMD 5730 3-LEDモジュールなどのLED照明をホットグルーガンなどでチャンバーに取り付ける。ケースの上部にスポンジテープを貼付ける。



上段の素子に+5V、下段の素子に+12Vの給電にPC用ATX電源を使用出来るように、コマーシャルメイテンロックコネクタを取り付ける。



完成した本体ユニットと給電ケーブル。



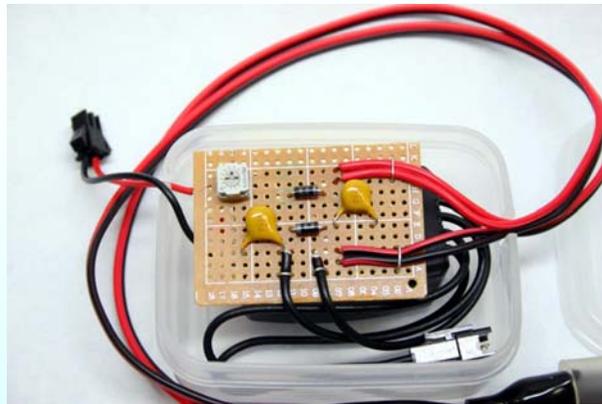
ATX電源は古いPCから取りだした物で十分。2台同時に動かすには350W程度の容量が必要。マザーボード無しでATX電源を使用するためにはPS_ONピン(緑の線)をGNDに落とす必要がある。

高性能ペルチェ霧箱の製作 (3)



悪天候時など雑イオンのために α 線の飛跡すらも観察しにくいことがある。

→ この状態では、 β 線はほとんど観察することが出来ない。



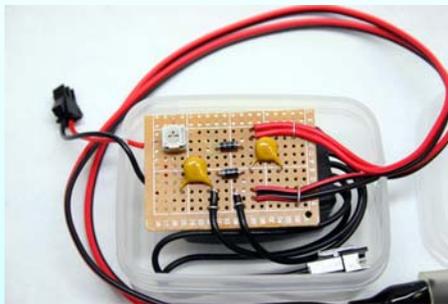
この雑イオンの除去のために、高電圧を印加する。簡単には、摩擦により静電気を生成しても良いが、悪天候時にはその静電気も発生しにくい。



○バンデグラフ起電機とライデン瓶の組み合わせ
◎冷陰極管(CCFL)用インバータ回路とコッククロフト回路を組み合わせた高電圧発生回路で、雑イオンを除去すると良い。
これらの高電圧発生器で加速器の原理も学習できる。
電極は、アルミテープなどを使用すると便利である。

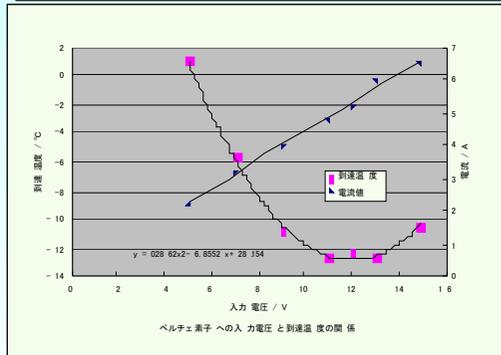
技術的特徴

- ・ペルチェ素子を2段重ねの
カスケード接続することで、
到達温度は -30°C 以下とした。
- ・市販の高性能CPUクーラーを使用
強烈な廃熱を処理
- ・チャンバーはポリスチレン製で
アルコールに侵されない
- ・電圧可変の高電圧ユニットにより
空気中の雑イオンを低減させ、
クリアな飛跡を観察可能
(500V前後がもっとも観察しやすい)
- ・素子表面、高圧テープは温度変化、
アルコールに対する耐性のために、
2液混合ウレタン塗装とした
- ・高輝度LED 9灯使用で、明るい環境
でも観察可能



インバーター回路に入力する電圧を半固定抵抗で落とすことで、出力電圧をコントロール可能。
最適なセッティングでの出力電圧を測定すると、500V程度であった。

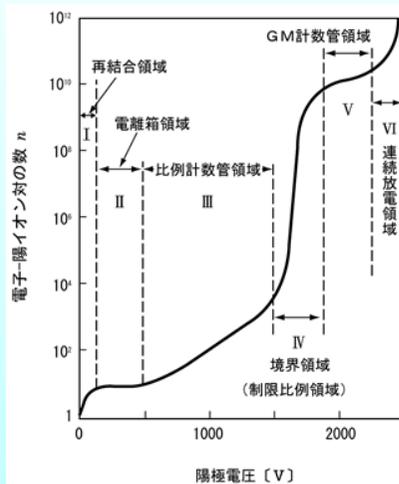
素子への印加電圧の最適化



TEC1-12708 ペルチェ素子1枚をShuriken Rev.Bクーラーに載せて(銀ペーストはMX-4)、電圧を変えたときの表面温度の変化。

ペルチェ効果は電流に比例し、ジュール発熱は電流の二乗に比例する。

雑イオン除去電圧の検討



印加電圧とイオン電流の関係

素子の組み合わせの最適化

カスケード接続したペルチェ素子の組み合わせによる到達温度の違い

素子	なし	下段(12V)							
		なし	12703	12705	12706	12708	12709	12710	12715
上段 (5V)	なし	25	-13	-15	-14	-15	-10	-9	4
	12703	0	-20	-22	-24	-25	-24	-22	-4
	12705	0	-17	-23	-21	-26	-21	-20	-4
	12706	0	-17	-23	-20	-25	-21	-17	-4
	12708	-2	-12	-19	-17	-23	-17	-12	0
	12709	0	-12	-22	-18	-25	-19	-14	-1
	12710	1	-6	-15	-13	-19	-13	-7	-6
	12715								

使用クーラー: Scythe Shuriken B (制御端子カットにより常時フルパワー)
使用銀ペースト: Arctic MX-4
RT: 25°C

上段は TEC1-12705、下段は TEC1-12708 の組み合わせが最適

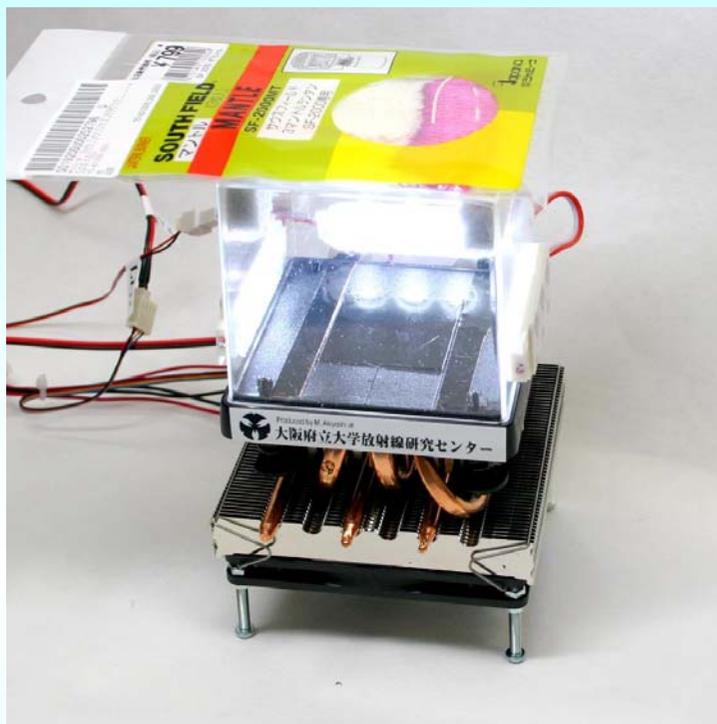
素子表面の塗装の強靱化

従来品: 高耐久性ラッカースプレー

→ 現行の塗装プロセス
シリコンオフ(ヘプタン)で表面の脱脂、
密着プライマーで下地処理、
2液混合ウレタンスプレーで塗装

温度変化でも剥離せず、エタノール、イソプロパノールに侵されない強靱な塗膜が得られた

高性能ペルチェ冷却霧箱 製品版

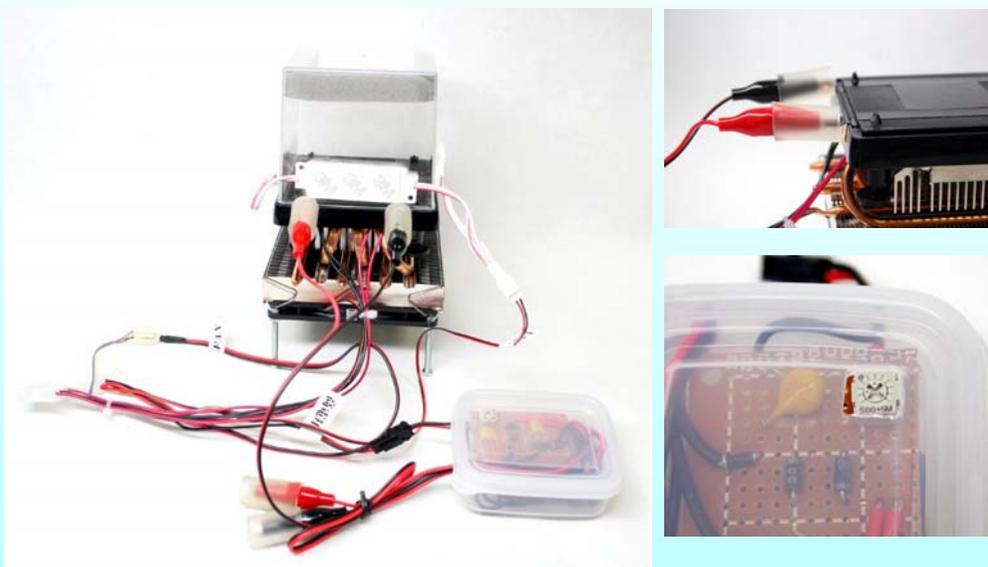


・線源としてはランタン用マントルがやはり最適。季節物なので、冬場は入手困難なので注意。サウスフィールド SF-2000MT, DX-HP マントルは現在トリウム含有が確認されている。

・冷陰極管インバータに給電する電圧をボリューム抵抗で下げることで、出力される高電圧をコントロール可能。天候などに応じて最適な電圧を印加し雑イオンを除去する。

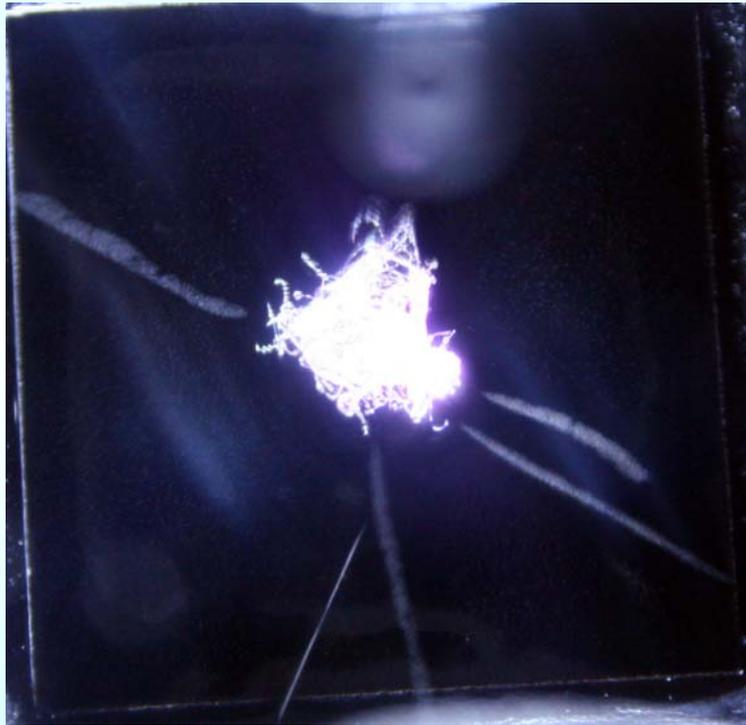
アルコールとして試薬用のエタノールでなくても、消毒用の物で十分。イソプロピルアルコールが入っている物もあるが、むしろイソプロピルアルコールの方が観察には適している。

β 線観察時は、線源をチャンバーの上に置いて観察すると良い。上から入射しても β 線は散乱されるため底面に平行に走る電子が観察される。



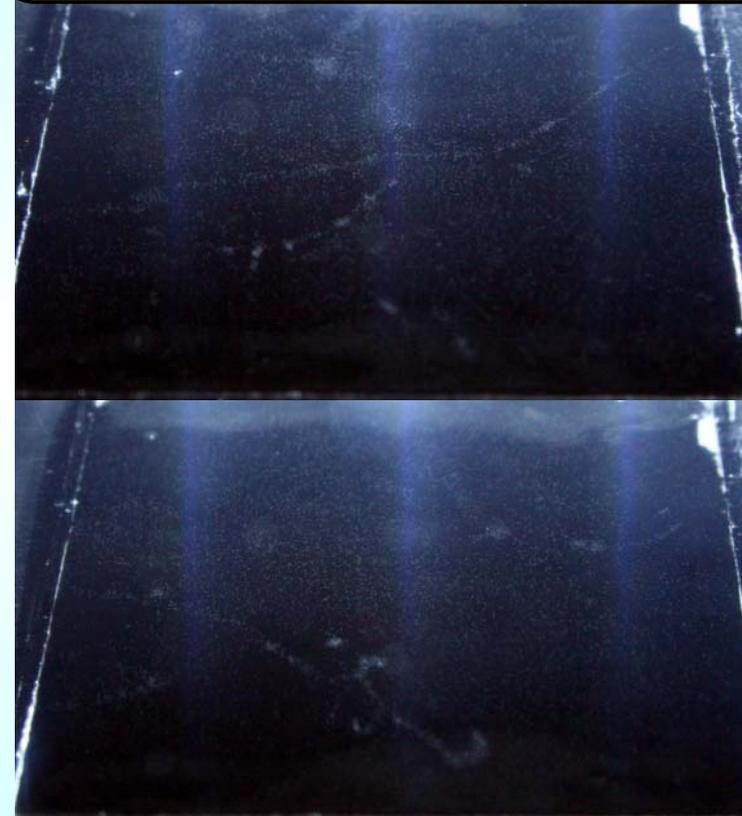
霧箱での飛跡の観察

α 線の飛跡



直線的ではっきりとした飛跡を示す。気流の関係で生成した霧がたなびく事で曲がって見えることがあるが、散乱や磁石による偏向ではない。

β 線の飛跡



霧の液滴の密度が低く、うっすらとした飛跡しか示さない。電子線の入射方向と関係なく様々な方向に飛び、空気中에서도散乱されている様子を確認できる。

電子線 (β 線) と α 線の比較

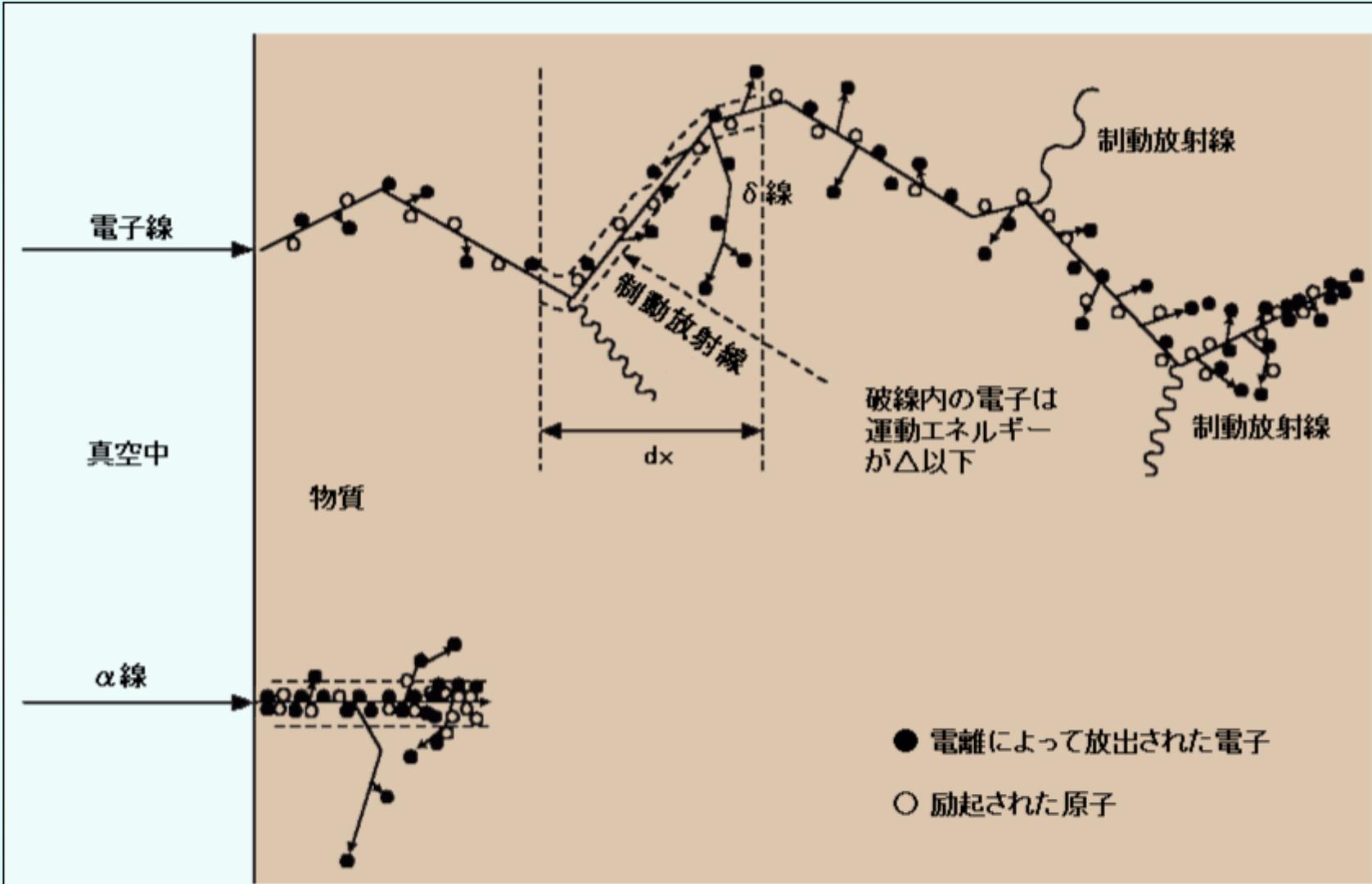


図1 荷電粒子と物質の相互作用

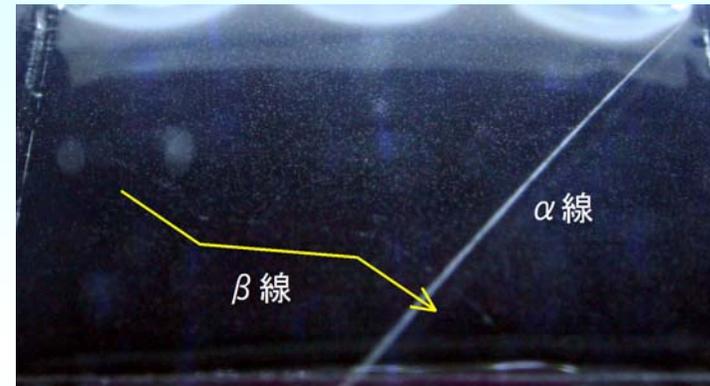
[出典]江藤秀雄(ほか):放射線防護、丸善(1982年12月)、p.54

放射線加重係数の説明

$$\text{実効線量(Sv)} = \text{吸収線量(Gy)} \times \text{放射線加重係数} \times \text{組織加重係数}$$

→ α 線: 20, β 、 γ 線: 1

この相互作用の違いから
直感的に理解



体内の放射能 *体重60kgの日本人 年間に被ばくする実効線量

K-40: 4,000Bq

170 μ Sv/年

$\beta \cdot \gamma$ 線のみ

Po-210: 20Bq

800 μ Sv/年

α 線を放出

空気中のラドンロンも α 線を放出 → 世界平均で 1.26mSv/年
日本は木造建築が多く比較的被ばく量は少ない(0.48mSv/年)

*そもそもの吸収線量、
組織加重係数
なども異なる

γ 線の観察

入射電子線のエネルギー E (MeV),

最大飛程 R (g/cm^3) とすると、

$$R = 0.542 E - 0.133 \quad (0.8 < E)$$

ウラン系列核種からの β 線のアルミ中での最大飛程は、Bi-214 からの 3.27MeV による 6.1mm。

マントル線源を6mm以上のアルミ板で遮蔽してからチャンバーに乗せても、 γ 線が光電子などを叩き出して、 β 線と同じように飛跡が観察されることが分かる。(イベント数は非常に落ちる)

γ 線は物質を透過したあと、最終的に相互作用する際は β 線と同様になるというのが良く分かる



福井県若狭高校からの訪問研修メニュー

午前中に1時間の講義、安全講習の後、

3班(18-19名)に分けて各テーマ(40min + 移動 10min)で実習を実施

- 1) 放射線研究センター 線源棟での 水中 Co-60線源等見学, パネル説明
- 2) ペルチェ冷却式高性能霧箱による α ・ β ・ γ 線の観察
- 3) サーベイメーターを用いた自然放射線の測定、空气中Rn娘核種の減衰評価

ペルチェ冷却式高性能霧箱による α ・ β ・ γ 線の観察

- ・熱電対を用いたペルチェ素子表面温度の測定
(ペルチェ効果とゼーベック効果の簡単な説明)
- ・ポリパックに入れたマントル線源を入れた霧箱と、空の霧箱の観察
- ・ポリパックから取り出したマントル線源を入れた霧箱での α 線の観察
- ・空の霧箱の上にマントル線源を置いての β 線の観察
- ・空の霧箱とマントルの間に5mmのアルミ板を載せての γ 線
(からの光電子など)の観察
- ・霧箱の原理、 α 線、 β 線、 γ 線の物質との相互作用との違いと、
生体影響の違いを説明

熱電対を用いたペルチェ素子表面温度の測定



アルミテープによる熱電対の素子表面への貼付け

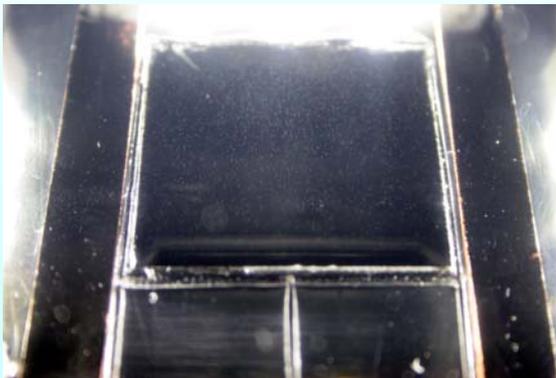


素子上面が冷やされる半面、裏面に放熱しているのを体感

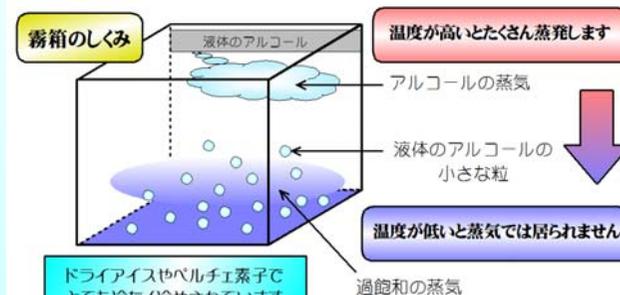
熱電対式のデジタル温度計により霧箱表面温度(-30°C程度)を測定する。

- ・熱電対とは温度差があると電流が流れる、ゼーベック効果を利用している
- ・ペルチェ素子は逆に電流を流すと温度差が発生する。吸熱している訳ではなく熱を裏面に輸送している
- ・点接触では正確な温度測定は出来ず、アルミテープでしっかりと熱接触を取って測定する

ポリパックに入れたマントル線源を入れた霧箱と、空の霧箱の観察



正常な状態の霧の状態。極端に悪天候下では霧の量が多くなり観察できない。



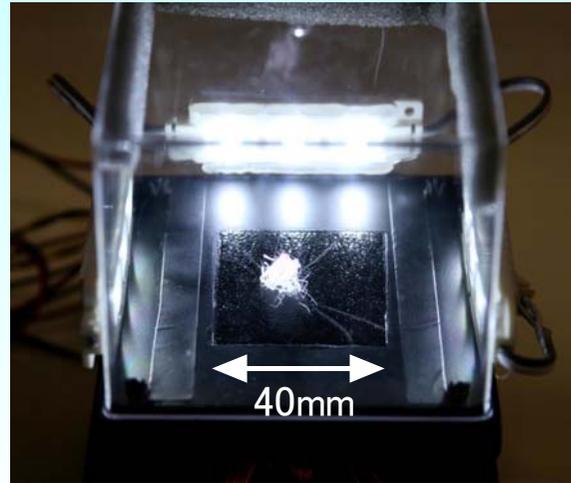
温度が低くなると、蒸発した気体のアルコールは液体に戻ろうとします。霧のように見える白い点々は液体のアルコールの小さな粒です。でも、温度が下がったのに液体の粒を作らずにためらっている蒸気も漂っています(過飽和状態と言います)。そこにちょっとした刺激を加えてやると、過飽和の蒸気は次々に液体の粒に変化していきます。

- ・スポンジテープへエタノールを注入してチャンバーを閉じ電源を入れる。IPA入りの消毒液で構わない。
- ・空の霧箱中にうっすらと霧状の液滴が生成していることを確認
- ・アルコールの気体が冷やされることにより過飽和蒸気となり、空気中の雑イオンなどにアルコール分子が集まって核生成している
- ・ポリパックに入れたマントル線源からはα線は放出されておらず、ビニール一枚で遮蔽されていることを確認

ポリパックから取りだしたマントル線源を入れた霧箱での α 線の観察

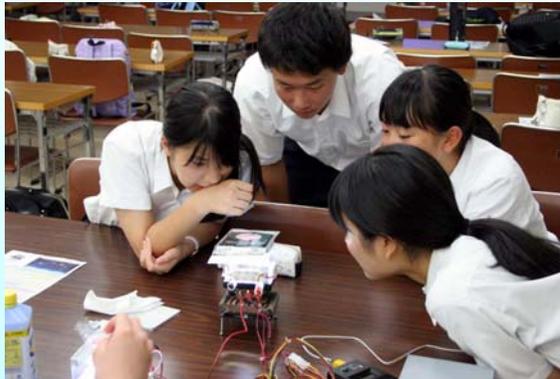


飛跡観察の様子



- ・マントルからの α 線の飛跡を観察
- ・飛行機雲と同じく、粒子自体は見えなくても飛跡が見えている
- ・空気中での飛程はせいぜい数cm
- ・はっきりと、直線的に飛ぶ。
- ・上下方向にも飛んでいるが、過飽和層が層状になっているため水平方向に飛んだ α 線だけが観測できている。

空の霧箱の上にマントル線源を置いての β 線の観察



チャンバートン板の上にマントル線源を置いての β 線飛跡観察の様子。



- ・ α 線は天板のプラスチック板を透過できない
- ・ β 線は薄いプラスチック板程度は透過できる上に、非常に軽く散乱されやすいので、上から入射しても空気や素子表面で散乱されて素子に平行に走る電子線が観察できる。
- ・相互作用は α 線よりもずっと小さく、うっすらとしか観察されない
- ・平行に走っている間にも散乱されて糸くずのように曲がりくねる様子が観察できる。

空の霧箱とマントルの間にアルミ板を載せての γ 線 (からの光電子など) の観察

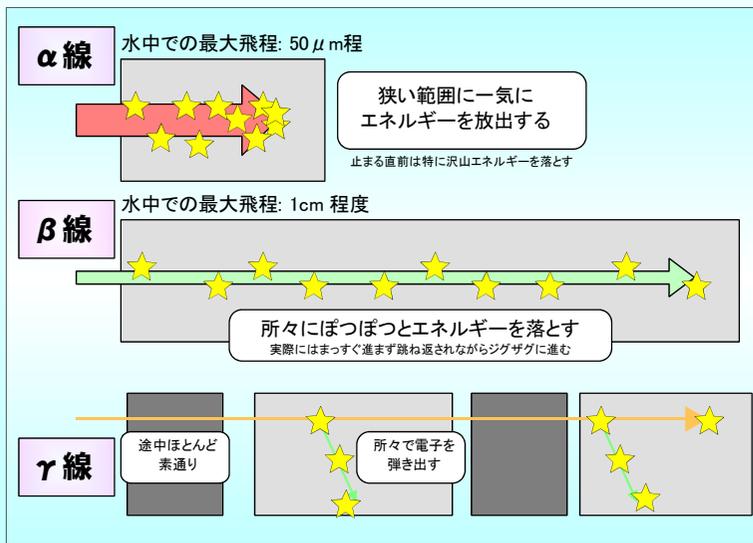


γ 線により放出された光電子などの δ 線の飛跡

入射電子線のエネルギー E (MeV), 最大飛程 R (g/cm³) とすると、
 $R = 0.542 E - 0.133$ ($0.8 < E$)
 ウラン系列核種からの β 線のアルミ中での最大飛程は、Bi-214 からの 3.27MeV による 6.1mm。

- ・トリウム系列核種からの β 線が透過できない 6mm のアルミ板を、マントル線源とチャンバー天板の間に入れて β 線を遮蔽し、 γ 線のみをチャンバー内に入射する。
- ・非常にイベント数は落ちるが、 γ 線によって放出された光電子などが電離作用を示す、 δ 線が観察される。
- ・見た目は β 線と同様であり、 γ 線が最終的には β 線と同じような作用を示すことが分かる。
- ・チャンバーの状態が非常に良くないと観察されない。実習時点では素子の組み合わせを変更した改良版ではなかったため、半分程度のグループしか観察できなかった。改良版ではほとんどの場合で観察可能。

α 線、 β 線、 γ 線の物質との相互作用との違いと、生体影響の違いを説明



放射線加重係数の説明

実効線量(Sv) = 吸収線量(Gy) \times 放射線加重係数 \times 組織加重係数
 $\rightarrow \alpha$ 線: 20, β 、 γ 線: 1

この相互作用の違いから直感的に理解

体内の放射能 *体重80kgの日本人 年間に被ばくする実効線量

K-40: 4,000Bq	\rightarrow	170 μ Sv/年	(β ・ γ 線のみ)
Po-210: 20Bq	\rightarrow	800 μ Sv/年	(α 線を放出)

空気中のラドン同位体も α 線を放出 \rightarrow 世界平均で 1.26mSv/年
 日本は木造建築が多く比較的被ばく量は少ない(0.48mSv/年)

*そもそも吸収線量、組織加重係数なども異なる

- ・ 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。
- ・何発出たかのベクレルだけでは生体影響は評価できない。 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。

