福島第一原子力発電所事故による放射能汚染検査装置の開発

10961050
宇宙粒子研究室

堀田修平

目次

1.　前書き
　1－1　福島第一原発事故について
　1－2　放射能
　1－3　放射線
　1－4　放射線の詳細
　1－5　放射性物質

2.　研究目的

3.　装置説明
　3－1　全体
　3－2　アルミケース、鉛ブロック
　3－3　ＮａＩシンチレータ
　3－4　光電子増倍管(PMT)
　3－5　Pre AMP、Shaping AMP
　3－6　マルチチャンネルアナライザ(MCA)
　3－7　マイコン、電子天秤
　3－8　PC、プリンター
　3－9　Ｇｅ半導体検出器

4.　測定原理

5.　運用方法

6.　ソフト

7.　キャリブレーション

8.　まとめ

9.　参考文献

10. 謝辞

1.　前書き

2011 年 3 月 11 日、東北地方太平洋沖地震の発生とそれに伴う東日本大震災が発生した。それにより東京電力福島第一原子力発電所（以下「原子力発電所」は「原発」と略す）を津波が襲い、全電源を喪失して原子炉を冷却できなくなり、1 号機と 3 号機で炉心溶融（メルトダウン）が発生。水素爆発により原子炉建屋が吹き飛び、大量の放射性物質の漏洩を伴う重大な原子力事故に発展した。これが福島第一原子力発電所事故である。

本研究では、農作物の放射線汚染を検査する放射線測定器の開発が目的である。福島第一原子力発電所事故による放射性物質の広範囲土壌汚染や、農作物の放射線汚染の汚染状況を測定する簡易測定器を、宮城県角田市役所と共同で開発し、実際に市役所に設置し運用している。この簡易測定器の運用から得られたデータをもとに、より状況に適した測定器を開発、運用し、除染や農作業の計画作成に活用するため「誰でも簡単に測定できるシステム」にして、事故の影響の測定に適した放射線検出器を開発する。

また福島第一原発事故が発生し、自分に何かできることはないかと考え、この研究テーマに決めた。この研究が誰かの役に立てば幸いである。

１－１．　福島第一原発事故

2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震によって、東京電力福島第一原発の各原子炉（分解点検中の 4 号機、定期検査中の 5 号機と 6 号機を除く 1～3 号機）は自動的に制御棒が上がり緊急停止した。発電所への送電線が地震の揺れで接触・干渉・ショート・切断・倒壊したり、変電所や遮断器など各設備が故障したりしたため、外部電源を失った。非常用ディーゼル発電機が起動したものの、地震の約 50 分後に津波が発電所を襲い、地下に設置されていた非常用ディーゼル発電機が海水に浸かって故障した。

そのためポンプを稼働できなくなったため、原子炉内部や核燃料プールへの送水ができず冷却することができなくなり、核燃料の溶融が発生した。そして、原子炉内の圧力容器、格納容器、各配管などの設備の多大な損壊を伴う、史上例を見ないほど甚大な原発事故へとつながった。また全電源喪失になると非常用冷却装置の弁が自動で閉じることが周知されていなかったことと、同発電所の幹部は 3 号炉の HPCI が手動停止している事実を知らなかったために、7 時間にわたって注水作業が遅れてしまい、状況を悪化させた一因となったとされている。

図 1-1：左から 4 号機、3 号機、2 号機、1 号機

１－２．　放射能

放射能とは、原子核が崩壊して放射線を出す能力のことである。物質は原子でできており、原子は原子核と電子から構成されているが、原子核が状態変化を起こすことを放射性崩壊といい、それに伴って放射線が放出される。全ての原子核が自発的に放射性崩壊を起こすわけではなく、一定の原子核だけが放射性崩壊を起こすが、この放射性崩壊を起こす能力を放射能というわけである。放射能の単位はベクレル（記号 Bq）であり、1Bq は 1 秒間に 1 個の原子核が崩壊することである。

日本語ではしばしば放射能と放射性物質と放射線とが混同されているが、その意味は明確に異なる。放射能とは単位時間に崩壊する放射性物質の数のことであり、単位ベクレルなどであらわされ、プルトニウム 239 が 10 万ベクレルといったとき、10 万ベクレルがプルトニウムの放射能であり、プルトニウム 239 が放射性物質である。そして放射性物質から放出されるのが放射線である。プルトニウム 239 はアルファ線を放出して崩壊するが、ここではアルファ線が放射線ということである。

１－３．　放射線

放射線とは、放射性元素の崩壊に伴い放出される粒子線あるいは電磁波のことである。主にα線、β線、γ線の 3 種を指す。また、それらと同程度のエネルギーを持つ粒子線や宇宙線を含めることもある。そして放射線は、以下のように分類される。

〇粒子線（高速粒子線）

・α線　　・β線

・陽子線　　・重荷電粒子線

・電子線（原子核崩壊によらず加速器で電子を加速するものを指す）

・中性子線　　・宇宙線

〇電磁波（高エネルギーのもの）

・γ線　　・X線

また、粒子線のうち特に電荷を持つものを荷電粒子線と呼ぶことがある。一言で放射線と言ってはいても、その透過力はその種類によって異なり、α線よりもβ線、β線よりもγ線、γ線よりも中性子線のほうが、透過力が強い。

電離性の有無によって区別する時には、電離性を有している放射線を電離性放射線、電離性を有していない可視光線などを「非電離放射線」と呼ぶ。通常「放射線」と言う時は、電離放射線のことを指していることが多く、電離放射線は特に生体破壊作用が大きいのでそれについての説明が中心となることが多い。だからといって非電離放射線に害がないというわけではなく、非電離放射線も種類や強さによっては生体破壊作用や健康被害はある。

電離放射線にはα線、β線、γ線、X 線、中性子線、陽子線、陽電子線、重イオン線などが含まれる。非電離放射線には、電子レンジで使われている極超短波、携帯電話や PHS で用いられている電波、赤外線、可視光などがある。

また生活環境にある放射線を環境放射線という。環境放射線には自然放射線と人工放射線が含まれている。自然放射線とは自然界にもともと存在している放射線であり、人工放射線とは人間が人工的に作り出した放射線のことである。原子力発電所の事故などが発生すると、それによって漏れた放射性物質の分布は一様にはならず、何らかの原因によって偏りや局地的に高濃度になることが知られており、それの影響により人工放射線の線量も高くなる場所があり、「ホットスポット」などと呼ばれている。一般公衆の生活環境中における外部被爆線量の大半は自然放射線によるものである。

１－４．　放射線の詳細

α線　…　α線は原子核がα崩壊を起こしたときに放出される放射線のことである。α崩壊とは重い原子核が分裂して、より軽い原子核とヘリウム原子核になることである。このヘリウムは中性子２個と陽子２個からできている原子核で、これがα粒子である。α線は他の放射線よりもエネルギーと粒が大きいので、近くのものに与えるエネルギーは大きいが、すぐにエネルギーを失ってしまう。透過力が弱く紙１枚で遮断できる放射線のため皮膚でさえぎられ人体への害はない。

β線　…　β線は原子核がβ崩壊を起こしたときに高速で放出される電子、または陽電子のことをβ粒子といい、β粒子の流れをβ線と呼ぶ。またβ崩壊では原子は違う種類の原子になるが質量数は変化しない。つまり、ベータ崩壊は同重体を推移する現象である。β線は透過力が弱く、通常は数ｍｍのアルミ板や１ｃｍ程度のプラスチック板で十分遮蔽できる。ただしβ粒子が遮蔽物によって減速する際には制動放射によりＸ線が発生するため、その発生したＸ線についての遮蔽も必要となる。発生したＸ線を鉛などの高原子番号の物質で遮蔽するという二段構えの遮蔽を行う。

γ線　…　γ線は励起エネルギー状態にある原子核がより低い状態または基底状態に移る時、または粒子が消滅する時に生ずる。この現象をγ崩壊と呼ぶ。放射性核種が崩壊して質量や陽子・中性子の比率が変わっても、その原子核には過剰なエネルギーが残存している場合がある。このとき、残存しているエネルギーをγ線として放出することで原子核は安定に向かう。γ線は放射線の一種で波長がおよそ 10ｐｍよりも短い電磁波であり、電波と同じで物質を透過する力が大きい。コンクリートの壁や鉛の板で遮断することができ、β線よりも弱い電離作用を持っている。

１－５．　放射性物質

放射性物質とは放射能を持つ物質の総称で、ウラン、プルトニウムのような核燃料物質、放射性元素もしくは放射性同位体、中性子を吸収又は核反応を起こして生成された放射化物質を指す。放射性物質は時間とともに崩壊し、最終的には放射能を持たない安定な同位体となる。その期間を示す指標として半減期という値を用いる。半減期は核種により異なり、１μ秒に満たないものから長期間に及ぶものがあり、同じ元素でも質量数が違うと半減期も異なる。半減期が長い元素ほど少しずつ放射線を放出するため放射能濃度が低く、逆に半減期が短い元素は短期間に放射線を放出するため放射能濃度が高い。

この研究では主にＣｓ(セシウム)134、137 を含む試料を扱う。以下その説明。

Cs　…　原子番号５５、原子量は 132.9054 で少なくとも３９種類の同位体を持ち、原子量は 112 から 151 に分布する。

^{134}Cs　…　^{134}Cs はＣｓの放射性同位体の 1 つで、質量数が 134 で原子量 133.9067 を持つ。半減期は 2.0652 年である。大半(99.9997%)がβ崩壊して直接 ^{134}Ba になり、エネルギーが 605KeV と 796KeV の二種類のγ線を放出する。またごく一部(0.0003%)は外部から電子捕獲崩壊して ^{134}Xe になる際に、エネルギーが 1229KeV のＸ線を放出。^{134}Cs はβ線捕獲又は、近隣の元素から電子を受け取らないと崩壊しないため、周囲の状況次第で崩壊のパターンが違う事になる。

^{137}Cs　…　^{137}Cs はＣｓの放射性同位体で、質量数が 137 のもので原子量 136.9071 を持つ。半減期は 30.1671 年である。β崩壊により９５％が短命な ^{137m}Ba に壊変し、512KeV のβ線を放出。その後非放射性の ^{137}Ba となる。その際 661.64ＫｅＶのγ線を放出する。^{137m}Ba の半減期は約 2.55 分。残りの 5 %が直接 ^{137}Ba を作り、1174KeV のβ線を放出する。

２．　研究目的

福島第一原発事故による影響を測定する簡易放射線検出器を開発する。高感度放射線測定にはゲルマニウム検出器など半導体検出器が広く使われている。γ線の測定に対しエネルギー分解能が高いため短時間で正確に測定できるが、液体窒素が必要である上、値段が非常に高く(1500 万円程)一般の事務所に設置することは難しい。そのため NaI シンチレータを使った検出器が一般的に使われる。この放射線検出器は比較的安価で(500 万円程)扱いも簡単な NaI シンチレータを使用した検出器である。本来検出器から試料の放射能の絶対値を求めることは物理の知識と相当の手間を必要とする。またエネルギー分解能が悪く複数の種類の放射性同位体から出るγ線を分離できないため、正確に放射能を求めるためには専門知識も必要になってくる。そこでの農作物の放射線検査を行うためには、誰でも簡単に扱える検出器を開発する必要がある。そのために放射線を算出し、検出器の制御を行うソフトウェアーも開発する。

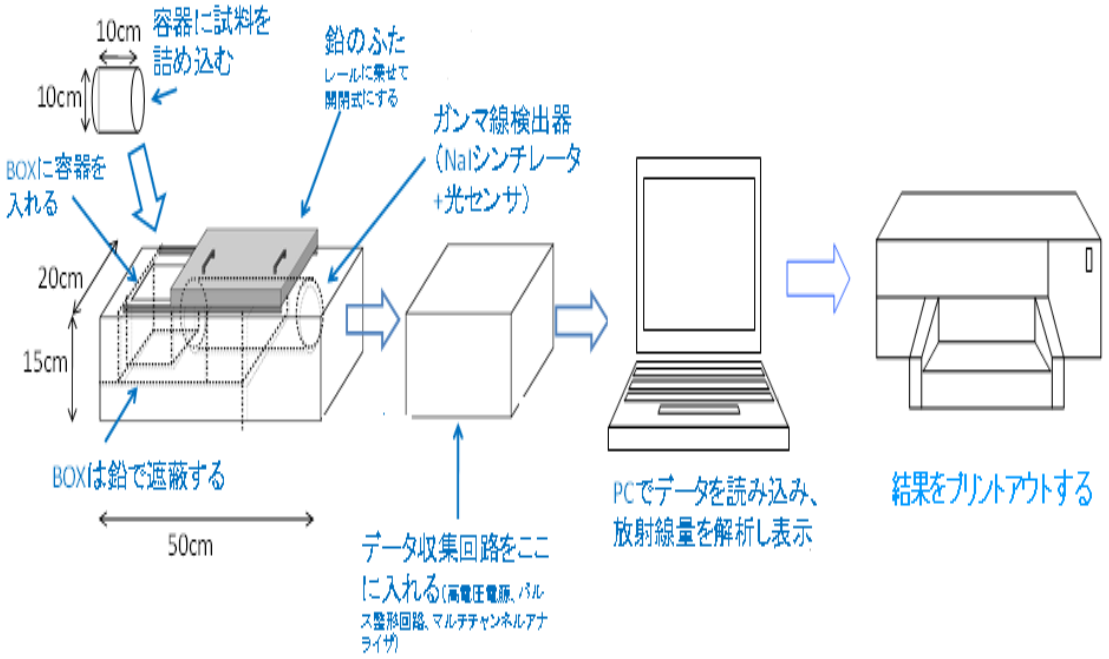
開発は宮城県角田市役所と共同で行い様々な農作物の汚染に関するデータを収集する。効率よく事故の影響とその時間経過を測定し、除線や農作業の計画作成に活用など、事故の際に必要な側定器とその運用方法を研究することが目的である。

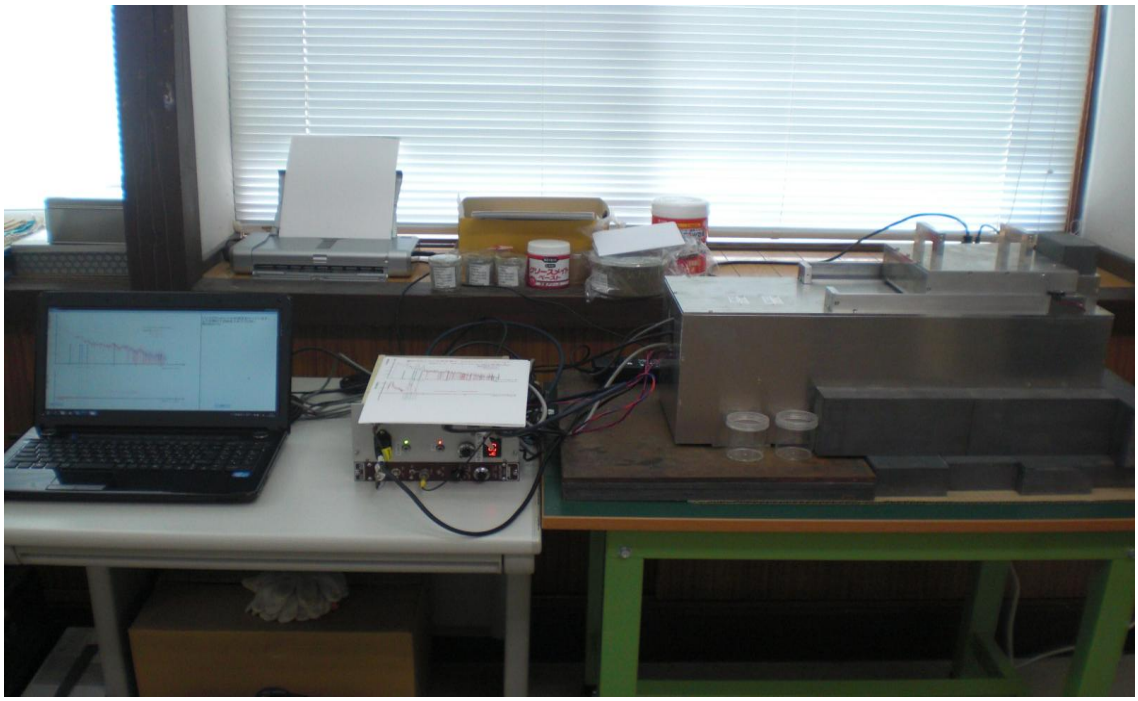
３．　装置説明

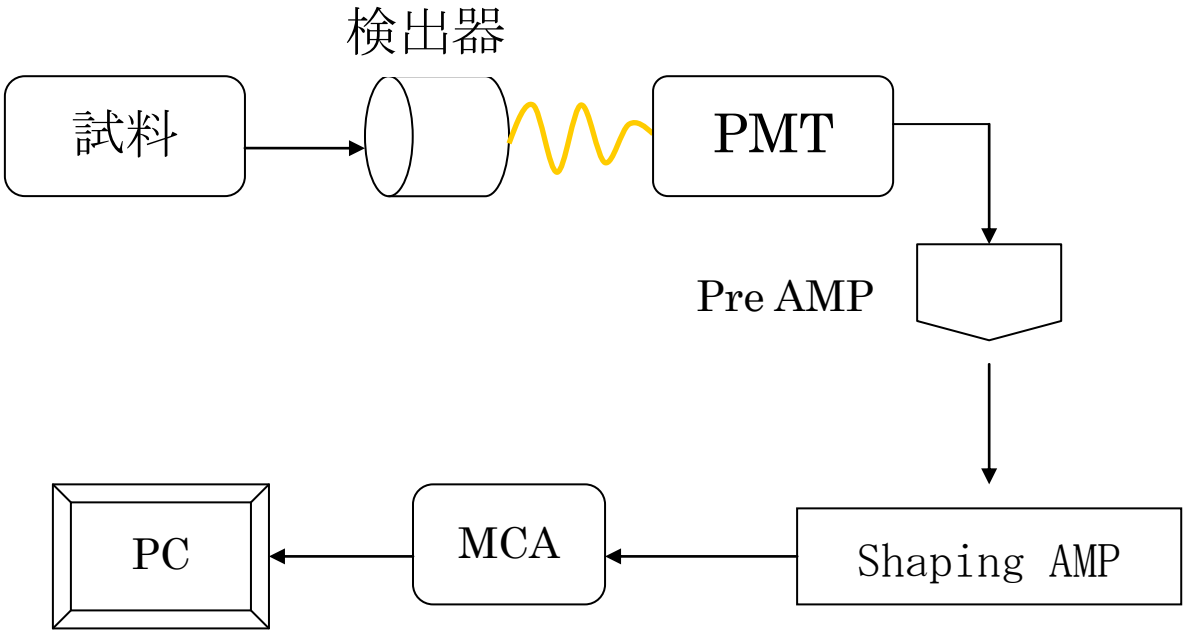
装置は測定器、データ収集回路、PC の3つからなり、それぞれをケーブルでつないでいる。アルミの箱の中に NaIシンチレータと光電子増倍管（光センサ）、前置増幅器からなる NaIシンチレーション検出器と電子天秤が入っており、試料の質量をγ線量と同時に計測している。これらの装置は鉛ブロックで覆われており、図 2-1 のように上面にふたがついていて、ふたを開けて試料を入れるようになっている。このふたにリミッタースイッチがついており、マイコンにより開閉を自動検知している。センサと電子天秤、リミッタースイッチからの情報はケーブルを通しデータ収集回路に送られる。

検出器を用いて、試料から放出されるγ線を NaI シンチレータで検出し、光センサにより電気信号に変換する。その信号を増幅・波形整形してマルチチャンネルアナライザ（MCA）を用い計測する。ふたを閉じれば自動的に測定を開始する。試料がない状態でふたが閉まっていると周辺の土壌や検出器自体から発生しているバックグラウンドのγ線を測定する。そのデータを PC で読み込みバックグラウンドと比較した解析結果を表示する。その結果を印刷する。

図 2-1：装置全体図






検出器
試料
PMT
Pre AMP
PC
MCA
Shaping AMP

３－１．　アルミケース、鉛ブロック

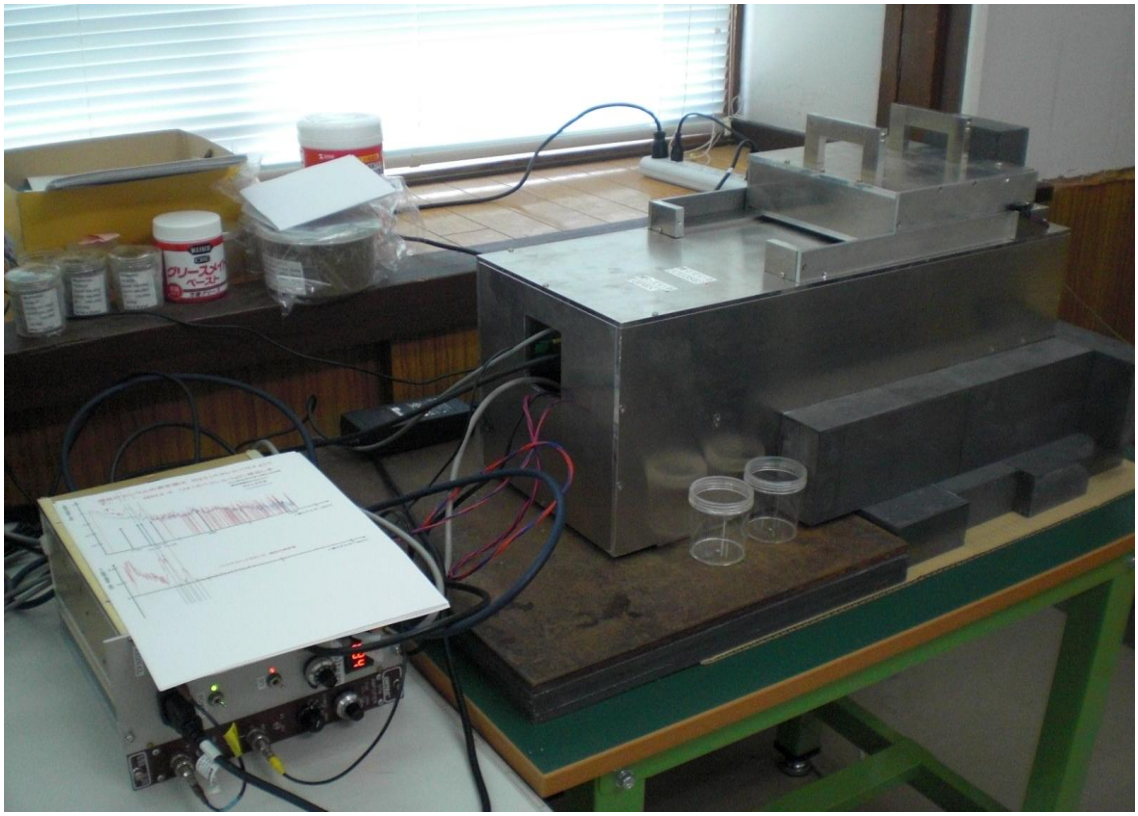
アルミケース

検出器を格納するのにアルミのケースを作製した。バックグラウンドの放射線(α線、β線)を遮蔽するため、基本的に 6mm 厚の定型アルミプレートを使用する。に地面から１ｍほど離したところに設置する。

鉛ブロック

5×10×20cm の鉛ブロックをバックグラウンド遮蔽のために使用する。またβ粒子が遮蔽物によって減速する際には制動放射によりＸ線が発生するため、その発生したＸ線についての二段構えの遮蔽を行う。積み上げる際は鉛中毒を起こさないよう念のため軍手を使用する。

図 2-2：アルミケース、鉛ブロック



３－２．　NaI シンチレータ

ガンマ線の検出は２inch のタリウムを少量混ぜたヨウ化ナトリウム(NaI)からなる NaI シンチレータを使用する。

γ線が入射すると，光子は光電効果，コンプトン散乱，電子対生成によって電子にエネルギーを与え，飛ばされた NaI の電子はシンチレーター内の他の電子を励起させることを繰り返しながらエネルギーを失う。励起された電子は元の基底状態に戻るため光子を放出する。この光子をシンチレーション光という。

こうして放出された光子数(つまりシンチレーション光の強度）は，γ線がシンチレーター内で失ったエネルギーに比例しており，光電子増倍管で個々の光子を電気パルスに変換すれば光子数が分かり，γ線がシンチレーター内で失ったエネルギーがわかるという仕組みとなっている。

NaI シンチレータ

図 2-3：検出器

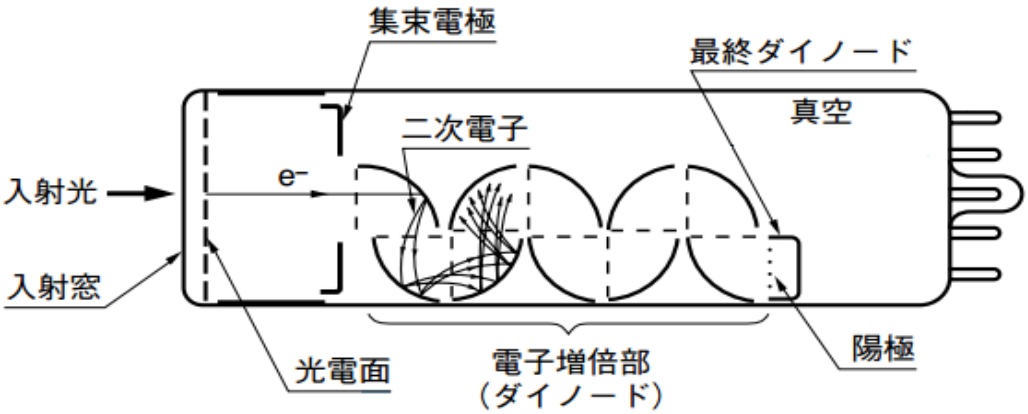
光電子増倍管

3－3.　光電子増倍管(PMT)

光電子増倍管(Photomultiplier Tube、PMT)は、光電効果を利用して NaI シンチレータから発生した光エネルギーを電気エネルギー(電気信号)に変換する光電管を基本に、電流増幅機能を付加した高感度光検出器のことである。光電子増倍管には 950V 程度の正高電圧をかける。

NaI シンチレータからでたシンチレーション光を入射光として、ガラスでできている入射窓を通過する。そうすると光電面に入射光が当たり光電効果を起こす。光電効果により金属内部の電子が飛び出し、飛び出した電子は集束電極による強い電場によって加速されて第一ダイノードに衝突する。ダイノードに衝突した電子は、加速で得たエネルギーを使ってダイノード内の電子を次々と飛び出させる。この電子を二次電子といい、それらは第二ダイノードに入ってさらに増倍される。その結果、二次電子は隣り合うダイノード間の電位差により加速されながら電子増倍部を通過する間に次々と増倍され、最終的には数十万倍から一千万倍以上になって陽極に到達し、信号電流として外部に取り出される。

図 2-4：光電子増倍管の内部構造



3－4.　Pre AMP 、Shaping AMP

Pre AMP

Pre AMP は前置増幅器とも言い、検出器のすぐ近くに置かれる。光電子増倍管からの電気信号をパルス整形し、電荷量と比例した電圧に変換する。つまり光電子増倍管から取り出された信号の増幅を行い、その後のノイズが相対的に小さくなるようにしておく。そうすることであらかじめノイズを無視できるようにすることを目的とする。

Shaping AMP

Shaping AMP は波形整形増幅器とも言い、波形整形増幅器は Pre AMP のパルス出力信号をノイズの増加を抑えつつ、必要な電圧パルスレベルまで増幅する。幅の狭い信号(２μ秒程度)に変換する。小さい間隔ではそのパルスは個々の粒子線のエネルギーによって起こされた電流だといえる。

図 2-5：Shaping AMP

3－6.　マルチチャンネルアナライザ(MCA)

MCA とは、入力パルスのエネルギーを各チャンネルに分けて出力する機器のことで、特に放射線スペクトルの解析に用いられる。

型名	MCA8000A 型
メーカー	Amptek 社製
A/D 変換速度	5μsec
チャンネル数	256ch、512ch、1024ch、2048ch、4096ch、8192ch、16kch に設定可能
入力電圧	5V または 10V/フルスケール
寸法、重量	165x71x20mm、300g 未満（電池含む）
電源	単 3 アルカリ乾電池×2 本もしくは DC9V（AC アダプタ付属）
出力	RS232C 出力
重量	780g
標準付属品	Lemo-BNC ケーブル 2 本、RS232 ケーブル 1 本、AC アダプタ 1 個、Pmca.exe ソフトウェア 1 式

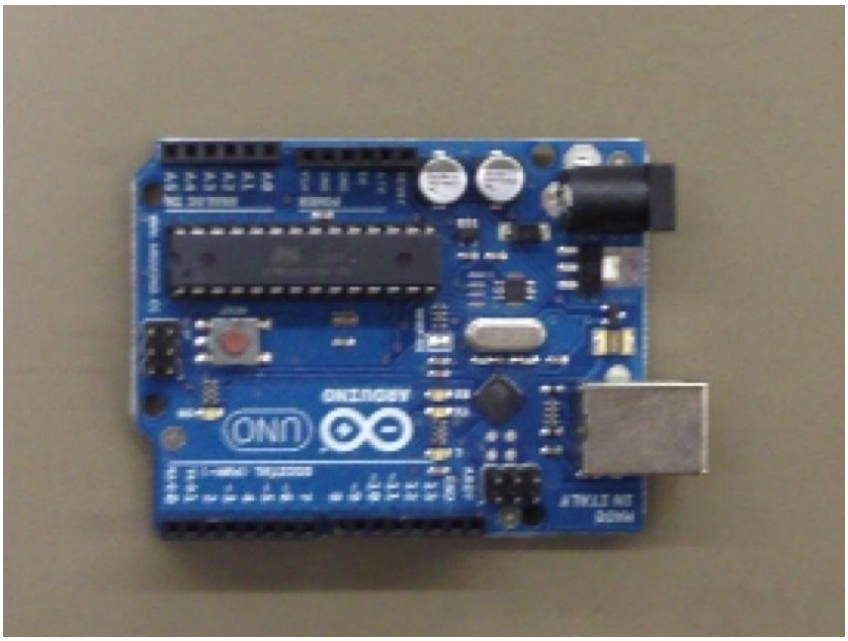
図 2-6：MCA

３－７．　マイコン、電子天秤

マイコン　Arduino

マイクロコンピュータ、ないしマイクロコントローラの略。使用しているものは、従来の Duemilanove と同じ ATmega328 を使用しているが、シリアルコンバーターにはあらかじめプログラムされた ATmega8U2 を使用している点が FTDI のチップを使用していた従来のモデルと異なっている。Arduino　Uno　R2　Front

図 2-7：マイコン



電子天秤

試料の重さを測るために電子天秤がアルミの箱の中に設置されている。試料を Bq/kg で表示するためには必要であるが、Bq のみの測定の場合には必要がない。

スペック

型名		上皿電子天秤 GF-2000
製作会社		AND 株式会社
秤量		2100 g
最大表示		2100.84 g
最小表示		0.01 g
標準偏差		0.01 g
直線性		±0.02 g
安定所要時間		約 1 秒
感度ドリフト(10℃～30℃)		±2ppm/℃
動作温度・温度範囲		5℃～40℃、85%RH 以下(結露しないこと)
表示書簡時間		5 回/秒または、10 回/秒
表示モード		g(グラム)、PC(個数)、Pct(パーセント)、ct(カラット)、mm(もんめ)、比重計モード
個数モード	最小単位質量	0.01g
	サンプル数	10、25、50、または 100 個
パーセントモード	最小 100%質量	0.01g
	パーセント最小表示	0.01%、0.1%、1%(100%質量により自動切換え)
カラット	秤量	10500ct
	最小表示	0.05ct
もんめ	秤量	560mom
	最小表示	0.005mom

通信機能　RS-232C(標準装備、なおデータ通信用ソフトウェア WinCT 付き)

使用可能な外部校正分銅	2000g、1000g
計量皿寸法	165×165mm
外形寸法	210(W)×317(D)×86(H)mm

電源(AC アダプタ)

AC アダプタ規格名:TB109 または TB237、入力:AC100V(+10%、－15%)　50Hz/60Hz

消費電力：約 11VA(AC アダプタを含む)

本体質量　約 4.3kg

図 2-8：電子天秤

A&D GF-2000
Max2100g Min0.5g e=0.1g d=0.01g
ON:OFF
CAL
SAMPLE
PRINT
MODE
RE-ZERO
SHS inside
Super Hybrid Sensor

３－8.　PC、プリンター

PC

電子天秤、マイコン、MCA はシリアルパスを使い USB ポートを通じてコンピュータと通信する。コンピュータは Wendows7 を搭載しており、MS-Visual C++により計測制御を行う仕組みになっている。

プリンター

計測した結果が PC に表示されるため、それを印刷する。印刷も PC の MS-Visual C++に制御されている。

以下スペック

Canon　インクジェットプリンタ
PIXUS　iP100

最高解像度(dpi)	9600※1（横）×2400（縦）
インク滴サイズ(最小)	1pl
プリントヘッド	
総ノズル数	計 1856 ノズル
各色ノズル数	C／M×各 512 ノズル、Y／染料 BK×各 256 ノズル、顔料 BK×320 ノズル
プリント必要マージン(カット紙)	
フチなしプリント時	上下左右：0mm(対応用紙サイズ：A4、はがき、L 判、2L 判、六切、KG サイズ、専用名刺)
通常時	上端：3mm、下端：5mm、左右：各 3.4mm（レター・リーガルは左：6.4mm、右：6.3mm)
使用可能用紙サイズ	
カット紙／当社純正用紙	A4～A5、レター、リーガル、洋形封筒 4 号/6 号、長形封筒 3 号/4 号、はがき(郵便はがき、インクジェット郵便はがき、インクジェット光沢郵便はがき、当社純正はがき)、郵便往復はがき

当社純正用紙のみ	L 判、2L 判、六切、KG サイズ、専用名刺
給紙方式	後トレイ
給紙可能枚数(最大積載枚数)	
普通紙	50 枚
郵便はがき	20 枚
インターフェイス(PC 用)	Hi-Speed USB、IrDA IR7、Bluetooth v2.0 <最大通信速度 1.44Mbps>(オプション)
対応インクタンク	BCI-19Color/BCI-19Black
インク残量検知機能	ドットカウント方式
稼働音	約 38.7 dB(A)
動作環境	温度：5～35℃、湿度：10～90%(結露しない)
消費電力	プリント時:約 9W、待機時(USB 接続):約 1.5W
電源	AC100～240V、50／60Hz
外形寸法(横幅×奥行き×高さ、トレイ類を含まず)	約 322×185×61.7 (mm)
質量(インクタンクを含む)	約 2.0kg
主な付属品	インクタンク一式/セットアップ CD-ROM/スタートガイド他(紙)

３－8.　ゲルマニウム(Ge)半導体検出器

半導体検出器、または固体検出器と言い、半導体を利用した粒子あるいは放射線検出器である。 主にシリコンまたはゲルマニウムが用いられる。Ge 半導体検出器はバンドギャップの幅が小さいため、常温では熱エネルギーによりバンドギャップを超えて電子が存在するので電気抵抗が低すぎて検出器としては使いものにならない。そのため液体窒素により冷却することによってバンドギャップを超える電子がなくなるので抵抗値が実用レベルになって検出器として用いることができ、使用しないときは常温で保管が可能である。

他の検出器に比べエネルギー分解能に極めて優れているため、放射線のもつエネルギーを精密に測定できる。放射線のエネルギーを精密に測定することや、高い確率で特定のエネルギーを持った放射線を放出する放射性同位体の放射線を測定エネルギーから逆算して求められるので、環境放射線の計測などで放射性物質をある程度推定することが可能である。特に Ge 半導体検出器はγ線エネルギー分解能が約 2eV と非常に高いため、核種の同定にはほとんど Ge 半導体検出器が用いられる。ゲルマニウム半導体検出器は NaI シンチレーション検出器に比べ約 50 倍と極めて高い分解能を持つ。分解能に非常に優れているため低レベル放射線でも感度よく計測できる。

４．　測定原理

放射線を測定するためにNaIシンチレータを検出器に使用する。NaI結晶内を十分なエネルギーの荷電粒子(高速な電子など)が通過すると、その通路に沿って結晶格子から電子が電離され、その残った格子点は正孔(ホール)となる。即ち、結晶の荷電子帯にある電子は放射線のエネルギーを受け伝導体に持ち上げられる。あるいは、荷電子帯にある電子は励起されて励起子帯に移り、荷電子帯の正孔とペア状態となった励起子をつくる。これら自由電子と正孔あるいは励起子は結晶中を動き回り禁止帯にある捕獲中心や発光中心にトラップされて励起状態となる。その励起状態から基底状態への遷移が許されるならば、10^{-6}秒以下の短時間の間に光子を放出して基底状態となる。これがシンチレーションと呼ばれる現象で、出た光子をシンチレーション光と呼ぶ。

光の強さは結晶内で電子が失ったエネルギーに比例するため入射放射線のエネルギーに関する情報が得られ、γ線エネルギースペクトル測定やγ線量率測定に利用できる。シンチレーション光は微弱であるため、シンチレーション光を入射光として光電子増倍管を用いて増幅する。入射光を光電面で光電効果を起こして光を電子に変換し、この電子をダイオートで加圧し増倍して、光の強さに比例したパルスを得る。

光電子増倍管から得られた電気パルスは比較的大きな電流パルスであるため信号を大きく増幅する必要はないが、出力インピーダンスが高いので電圧パルスとして変換して取り出す必要がある。前置増幅器(プリアンプ)は高感度、低ノイズの高インピーダンス増幅器であり、２つの目的を持っている。第一はγ線のエネルギーに応じた光電子増倍管からの電流パルスを、それに比例した電圧パルスに増幅することである。第二の目的は光電子増倍管の感度調整で、同一のロットであっても一本一本感度が大きく異なり、使用に伴い劣化するため定期的に前置増幅器のゲインを調整して検出感度を一定に保つ必要がある。

前置増幅器から出力された電気パルスは１個１個の光子のエネルギーに比例した電圧を持ったパルスとなっている。従って個々のパルスの電圧を調べることで入射したγ線のエネルギーを測定することができる。MCAはγ線エネルギーを広範囲に検出し、各エネルギーレベルの光子数を計数することができる。すなわちγ線のエネルギーと強度分布を描くこと(γ線スペクトロメトリー)ができる。

5.　運用方法

1.　マイコンを通してふたの開閉を検知する。

2.　試料の重さを検知し、試料が無いときはバックグラウンドを測定する。

3.　バックグラウンドのデータを常時更新する。

4.　試料があるときはそのγ線のエネルギー分布を測定する。

5.　試料とバックグラウンドの測定データを解析し、試料の放射能を Bq/kg の単位で表示する。

6.　解析した測定データを印刷する。

測定は測定器のふたが閉まれば測定を開始し、ふたが開けば測定を終了する。従って測定の際にすることは、ふたを開けて試料を入れることと、ふたを閉じること以外にない。測定のほとんどを自動でするため、知識のない人でも簡単に扱える。

6.　ソフト

　MicrosoftのVisual C++を使いコンピュータから機器を制御し、データを解析し、結果を表示するためのソフトである。ソフトは以下の機能を持つ。

・電子天秤、マイコン、MCAを初期化し起動する。
・それぞれの機器にデータを要求し受け取る。
・ふたの開閉を1秒毎に検知し、開閉の状態が変われば次の行動を判断し実行する。
・電子天秤からの解答が20g以下であればバックグラウンドを測定し、それ以上であれば試料の測定としてデータを扱う。
・試料の測定の場合、バックグラウンドと比較し、Cs137とCs134によるγ線信号を探す。3σ以上の信号を検出した場合、ベクレル(Bq)に直し表示する。
・試料、バックグラウンドの測定をスペクトル表示する。
・ふたが開き測定が終了したらデータをディスクに保存する。
・バックグラウンドのデータについて、その時点で保持しているバックグラウンドデータと新しいデータを比較する。データの継続性が確認され、半日以上の測定時間があればバックグラウンドを更新する。

以上の機能に印刷できるようにプログラムを追加し改良した。以下そのコードである。

```
// ソースファイル　printer.cpp //

#include <windows.h>
#include "resource.h"

LRESULT CALLBACK WndProc(HWND, UINT, WPARAM, LPARAM);
ATOM InitApp(HINSTANCE);                          //InitApp関数の定義
BOOL InitInstance(HINSTANCE, int);                //InitInstance関数の定義
int MyPrint(HWND);                                //自作関数MyPrintの定義

TCHAR szClassName[] = TEXT("printer1");           //ウィンドウクラス
```

```
// プログラムの出発点 //

int WINAPI WinMain(HINSTANCE hCurInst, HINSTANCE hPrevInst, LPSTR lpsCmdLine, int
nCmdShow)                                          //WinMain関数
{
        MSG msg;
        BOOL bRet;

        if (!InitApp(hCurInst))                    //InitApp関数の呼び出し
                return FALSE;
        if (!InitInstance(hCurInst,nCmdShow))      //InitInstance関数の呼び出し
                return FALSE;
        while ((bRet = GetMessage(&msg, NULL, 0, 0)) != 0) {
                if (bRet == -1) {
                        break;
                } else {
                        TranslateMessage(&msg);
                        DispatchMessage(&msg);
                }
        }
        return (int)msg.wParam;
}
// ウィンドウクラスの定義と登録 //
ATOM InitApp(HINSTANCE hInst)                      //InitApp関数
{
        WNDCLASSEX wc;                             //構造体の各メンバを指定
        wc.cbSize = sizeof(WNDCLASSEX);            //構造体のサイズ
        wc.style = CS_HREDRAW | CS_VREDRAW;        //クラスのスタイル
        wc.lpfnWndProc = WndProc;                  //ウィンドウプロシージャの関連付け
        wc.cbClsExtra = 0;                         //補助メモリ
        wc.cbWndExtra = 0;                         //補助メモリ
        wc.hInstance = hInst;                      //インスタンスハンドル
        wc.hIcon = NULL;                           //アイコン
        wc.hCursor = (HCURSOR)LoadImage(NULL,MAKEINTRESOURCE(IDC_ARROW),
        IMAGE_CURSOR, 0, 0, LR_DEFAULTSIZE | LR_SHARED);          //カーソル
        wc.hbrBackground = (HBRUSH)GetStockObject(WHITE_BRUSH);   //背景ブラシ
```

```
        wc.lpszMenuName = TEXT("MYMENU");          //メニュー名
        wc.lpszClassName = szClassName;            //クラス名
        wc.hIconSm = NULL;                         //小さいアイコン

        return (RegisterClassEx(&wc));
}

// ウィンドウの生成 //
BOOL InitInstance(HINSTANCE hInst, int nCmdShow)  //Instance関数
{
        HWND hWnd;

        hWnd = CreateWindow(szClassName, TEXT("printer"), // CreateWindow関数
                WS_OVERLAPPEDWINDOW,               //ウィンドウの種類
                CW_USEDEFAULT,                     //X座標
                CW_USEDEFAULT,                     //Y座標
                CW_USEDEFAULT,                     //幅
                CW_USEDEFAULT,                     //高さ
                NULL,          //親ウィンドウのハンド、親を作るときはNULL
                NULL,          //メニューハンドルクラス、メニューを使うときはNULL
                hInst,                             //インスタントハンドル
                NULL);
        if (!hWnd)
                return FALSE;
        ShowWindow(hWnd,       // ShowWindow関数、ウィンドウハンドル、
                  nCmdShow);   //表示状態
        UpdateWindow(hWnd);    // UpdateWindow関数、更新したいウィンドウのハンドル
        return TRUE;
}

//ウィンドウプロシージャ //
LRESULT CALLBACK WndProc(HWND hWnd, UINT msg, WPARAM wp, LPARAM lp)  //コールバック関数
{
        int id;

        switch (msg) {
```

```
        case WM_COMMAND:
                switch (LOWORD(wp)) {
                case IDM_END:                       //「終了」が選択されたときの処理
                        SendMessage(hWnd, WM_CLOSE, 0, 0);
                    break;
                case IDM_PRINT:                     //自作関数
                        MyPrint(hWnd);              //MyPrintの
                        break;                      //呼び出し
        default:
                return (DefWindowProc(hWnd, msg, wp, lp));
                }
                break;
        case WM_CLOSE:                               //ウィンドウを閉じたときの処理
                id = MessageBox(hWnd,
                        TEXT("終了してもいいですか？"),
                        TEXT("確認"),
                        MB_YESNO | MB_ICONQUESTION);
                if (id == IDYES)
                        DestroyWindow(hWnd);
                break;
    case WM_DESTROY:    // WM_DESTROYメッセージ、Windowsがウィンドウの破棄を行う
                PostQuitMessage(0);  //メッセージキューにWM_QUITメッセージをポストする
                break;
        default:
                return (DefWindowProc(hWnd, msg, wp, lp));  //DefWindowProc関数
                                                            //デフォルトの処理
        }
        return 0;
}

// 印刷関数 //
int MyPrint(HWND hWnd)
{
        int i;
        PRINTDLG pd;
        DOCINFO di;
```

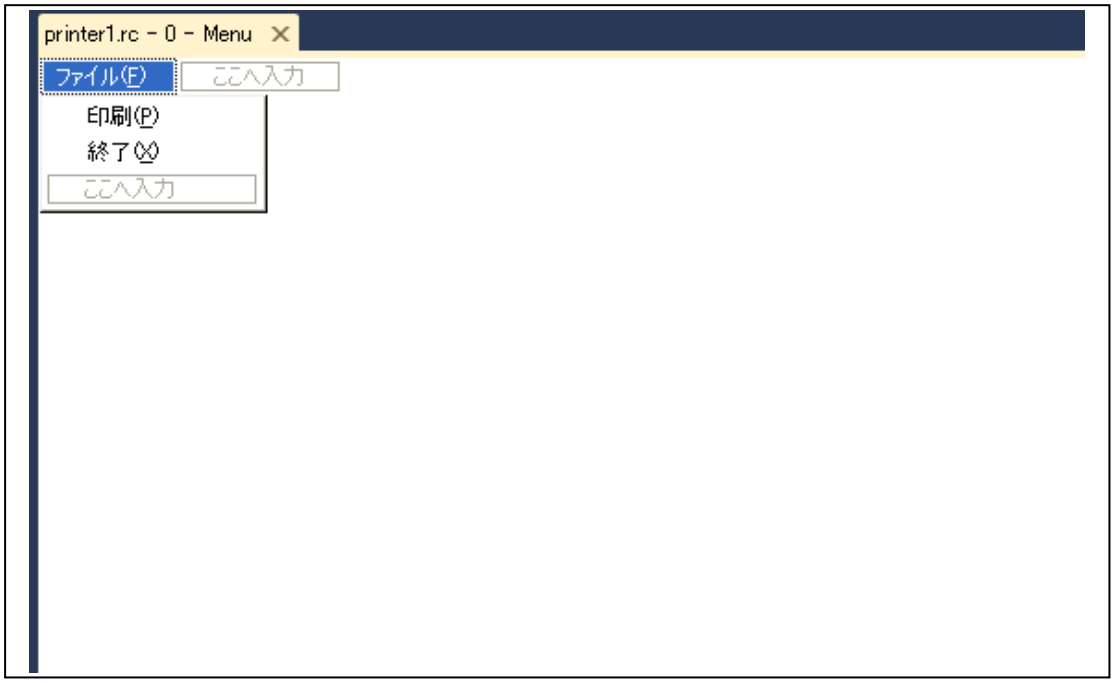
```
        TEXTMETRIC tm;

LPTSTR lpszBuf = TEXT("ここが印刷されます")
memset(&pd, 0, sizeof(PRINTDLG));              //PrintDlg関数、「印刷」ダイアログを表示

// PRINTDLG構造体、PrintDlg関数に渡す情報を保持  //

        pd.lStructSize = sizeof(PRINTDLG);     //構造体のサイズ
        pd.hwndOwner = hWnd;                   //ダイアログの親ウィンドウハンドル
        pd.hDevMode = NULL;                    //DEVMODE構造体を含んだメモリのハンドル
        pd.hDevNames = NULL;                   // DEVNAMES構造体を含んだメモリのハンドル
        pd.Flags = PD_USEDEVMODECOPIESANDCOLLATE | PD_RETURNDC | PD_NOPAGENUMS |
PD_NOSELECTION | PD_HIDEPRINTTOFILE;           //ダイアログボックス初期化フラグ
        pd.nMinPage = 1;                       //ページ範囲の最小値
        pd.nMaxPage = 1;                       //ページ範囲の最大値
        pd.nFromPage = 1;                      //開始ページ
        pd.nToPage = 1;                        //終了ページ
        pd.nCopies = 1;                        //部数の初期値

        if (PrintDlg(&pd) == 0)
                return -1;

// DOCINFO構造体の定義 //
        memset(&di, 0, sizeof(DOCINFO));       //DOCINFO構造体,入出力ファイルの情報を収納
        di.cbSize = sizeof(DOCINFO);           //構造体のサイズ
        di.lpszDocName = TEXT("Test");         //ドキュメントの名前

        StartDoc(                              //StartDoc関数、印刷ジョブを開始
        pd.hDC,                                //プリンタのデバイスコンテキストハンドル
        &di);                                  //DOCINFO構造体へのポインタ
        StartPage(          //StartPage関数、プリンタドライバにデータの受信準備をさせる
        pd.hDC);                               //プリンタのデバイスコンテキストハンドル
        GetTextMetrics(pd.hDC, &tm);           //GetTextMetrics関数、現在選択されている
                                        //フォントの情報を指定されたバッファに格納する
        for (i = 0; i < 10; i++) {
        SetTextColor(pd.hDC, RGB(255, 0, 0));
```

```
        TextOut(pd.hDC, 10, 10 + (tm.tmHeight * i + 20), lpszBuf, lstrlen(lpszBuf));
        }
        EndPage(pd.hDC);                    //EndPage関数、１ページ分の書き込みが完了
                                            //したことをデバイスに通知する
        EndDoc(pd.hDC);                     //EndDoc関数、印刷ジョブを終了
        DeleteDC(pd.hDC);                   //DeleteDC関数、デバイスコンテキストを破棄

        return 0;
}
```

// ヘッダーファイル resource.h //

```
//{{NO_DEPENDENCIES}}
// Microsoft Visual C++ generated include file.
// Used by printer1.rc
//
#define IDR_MENU1                       101
#define IDM_PRINT                       102
#define IDM_END                         103

// Next default values for new objects
//
#ifdef APSTUDIO_INVOKED
#ifndef APSTUDIO_READONLY_SYMBOLS
#define _APS_NEXT_RESOURCE_VALUE        103
#define _APS_NEXT_COMMAND_VALUE         40004
#define _APS_NEXT_CONTROL_VALUE         1002
#define _APS_NEXT_SYMED_VALUE           101
#endif
#endif
```

// リソースファイル printer1.rc //



７．　キャリブレーション

較正手順

検出器は試料が放出するγ線の計数率を測定する。この計数率を試料の崩壊率 Bq に変換するために検出器のγ線検出効率が必要になる。この検出効率は福島県や宮城県で採取した土から線源を作り、その線源の崩壊率をゲルマニウム検出器で測定しておき、この線源を使い検出器を較正する。この較正の手順は以下のようになる。

1. La_2O_3 と Lu_2O_3 と土、KCl と砂を混ぜた線源を U-8 容器に詰める。La と Lu、K はそれぞれガンマ線を放出する同位体を持ち、そのガンマ線放出率は正確に計算できる。この試料を標準線源として使用する。

2. 標準線源からのガンマ線をゲルマニウム検出器で測定する。ゲルマニウムによるγ線の計数率と計算により求めたガンマ線の放出率を比較することにより、ゲルマニウム検出器の検出効率をγ線のエネルギーの関数として求める。

3. 福島や宮城県で採取された Cs を含む土や堆肥を U-8 容器に入れ更正線源を作る。この更正線源中の Cs の崩壊率をゲルマニウム検出器で測定する。

4. 更正線源からのγ線を NaI 検出器により計測し、検出器のγ線検出効率を求める。

標準線源(La,Lu,K からのガンマ線放出率の計算)

La_2O_3: La（ランタン）は原子番号 57 で原子量 A=138.905。^{139}La が安定で、^{138}La を存在比 a=0.0009 含む。^{138}La は 788.742keV と 1435.795keV のγ線を放出する。放出効率はそれぞれ b=0.32、0.66。La_2O_3 は分子量 M_r=325.8082。この分子を M[g]含む標準線源を作ると、その線源の放射能 Ac[Bq]は以下のように計算される。まず La_2O_3 の物質量 M_2[mol]は

$M_2=M/M_r$

したがってこの試料の中に含まれる ^{138}La の数 N_0 はアボガドロ数を Na として

$N_0=(M/M_r)\times Na\times 2\times a$

ここで ^{138}La の半減期を T[y]とすると試料の放射能 Ac[Bq]は

$$Ac = \frac{\ln 2}{T \cdot 356 \cdot 24 \cdot 3600} N_0 \quad [Bq]$$

したがって、γ線の放出率 Ng [/s]＝Ac×b が求まる。

同様に ^{175}Lu (ルテチウム)の同位体 ^{176}Lu と ^{39}K(カリウム)の同位体 ^{40}K から放出されるγ線の放出率を計算する。これらの同位体のパラメータは表 1 に示している。

標準線源は３つ作った。それぞれの成分は以下の通り。

標準線源 1 (Soil18): La_2O_3 2.971g ＋ $Lu_2O_3$1.026g ＋ 砂
標準線源 2 (Soil2): La_2O_3 29.1989g ＋ $Lu_2O_3$0.999g ＋ 砂
標準線源 3 (KCL): KCl 50g ＋ 砂

このうち標準線源 1 (Soil18)の La は検出されなかった。これらの標準線源のγ線放出率を表 1 に示す。

標準線源によるゲルマニウム検出器の更正

それぞれのγ線エネルギーに相当する測定結果を図 1 から図 11 に示す。これらのピークのγ線検出率は以下の手順で求める（図 5 参照)。

1. γ線のエネルギーに相当するピークの位置を求める。
2. ピークの幅 RMS を求める。
3. ピークから ±６RMS の範囲で±４RMS の範囲を除き最少２乗法によりベースラインを求める。
4. ピークから±４RMS の範囲でベースライン差し引いた検出率 CPS（count per second）を積分する。
5. バックグラウンドのデータでも同じ計算をし、BG 成分を引く。

BG 成分を引いた後の CPS を使いγ線の検出効率 ε =CPS/Ng を求まる。K, La, Lu から 4 つのエネルギーで検出効率 ε が求まる。求められた検出効率を最少 2 乗法によりエネルギーの一次関数として求める。
検出結果は表 1 に示している。

更正線源の作成と測定

次に原発事故により汚染された試料を使い更正線源を作る。汚染された土や堆肥をU-8 容器にいれ、Cs134 と Cs137 から放出されるγ線を計測し、検出効率で割りその試料の放射能を求める。Cs 崩壊率の測定

NaI 検出器による更正線源の測定

検出効率の測定

表 1:　Ge 検出器更正用標準線源のパラメータと測定結果

資料	Soil18				Soil2				KCl
核種	La：(La_2O_3)		Lu：(Lu_2O_3)		La：(La_2O_3)		Lu：(Lu_2O_3)		K
質量数	138		174		138		174		40
存在比	0.0009		0.0259		0.0009		0.0259		0.00012
半減期[y]	1.05e11	1.05e11	3.78e10	3.78e10	1.05e11	1.05e11	3.78e10	3.78e10	1.25e9
γ線 E[keV]	788.742	1435.795	201.83	306.78	788.742	1435.795	201.83	306.78	1460.83
放出率	0.32	0.66	0.86	0.94	0.32	0.66	0.86	0.94	0.11
質量[g]	2.971	2.971	1.026	1.026	29.1989	29.1989	0.999	0.999	50.0
放射能	2.07	2.07	46.8	46.8	20.3	20.3	45.5	45.5	854.0
γ線放出率[/s]	0.662	1.37	40.2	44.0	6.51	13.4	39.2	42.8	93.9
検出率[/s]	----	--------	0.469	0.334	0.0153	0.0164	0.428	0.323	0.1150
検出効率	----	--------	0.00117	0.00761	0.00221	0.00122	0.01093	0.00755	0.00123

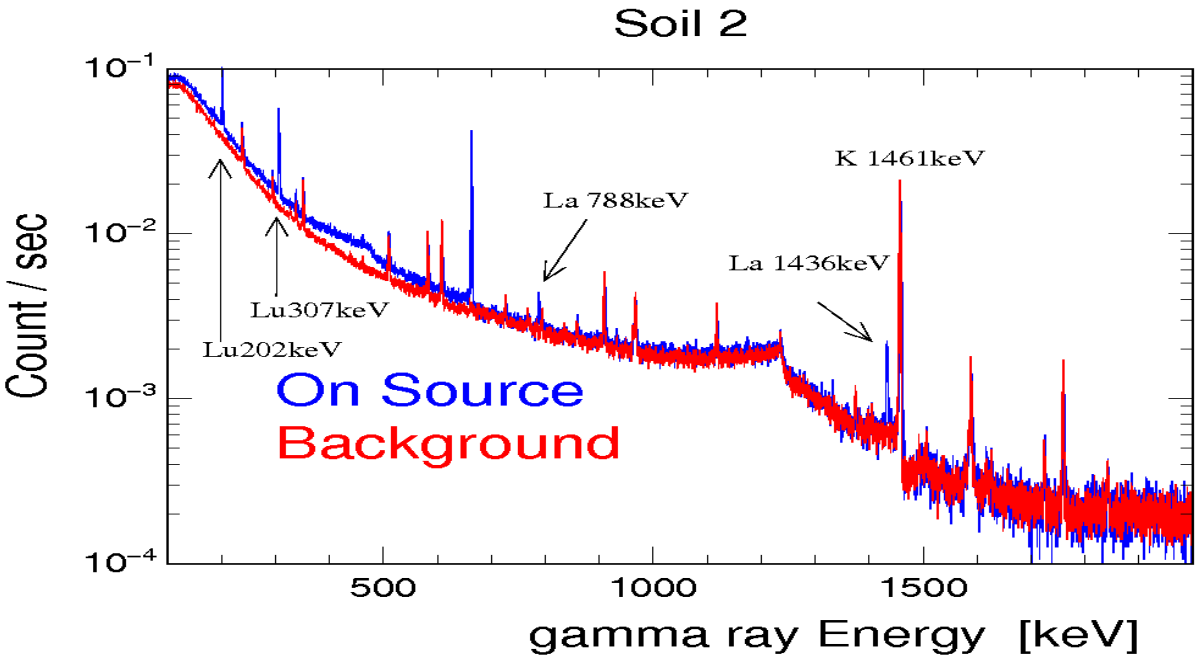
表 2:　NaI 検出器更正用標準線源のパラメータと測定結果。測定結果は Ge 検出器で測定。

試料	福島土①　(Mad3)			福島土②　(Mad4)			角田市堆肥		
核種	Cs134	Cs134	Cs137	Cs134	Cs134	Cs137	Cs134	Cs134	Cs137
γ線 E[keV]	604.72	661.66	795.86	604.72	661.66	795.86	604.72	661.66	795.86
検出効率[/s]	0.003285	0.002961	0.002394	0.003285	0.002961	0.002394	0.003285	0.002961	0.002394
放出効率[/s]	0.9762	0.8510	0.8553	0.9762	0.8510	0.8553	0.9762	0.8510	0.8553
検出率[/s]	0.747	0.771	0.438	0.292	0.286	0.175	0.200	0.201	0.118
γ線放出率[/s]	227.3	260.4	182.9	88.8	96.7	72.9	60.9	68.0	49.4
放射能[Bq]	232.8	306.0	213.9	91.0	113.6	85.2	62.3	79.8	57.7
質量[g]	102.5			102.1			24.9		
Bq/kg	2271.0	2985.4	2086.8	891.3	1112.6	834.5	2502.0	3204.8	2317.3
計[Bq/kg]	5256.4			2003.9			5706.8		

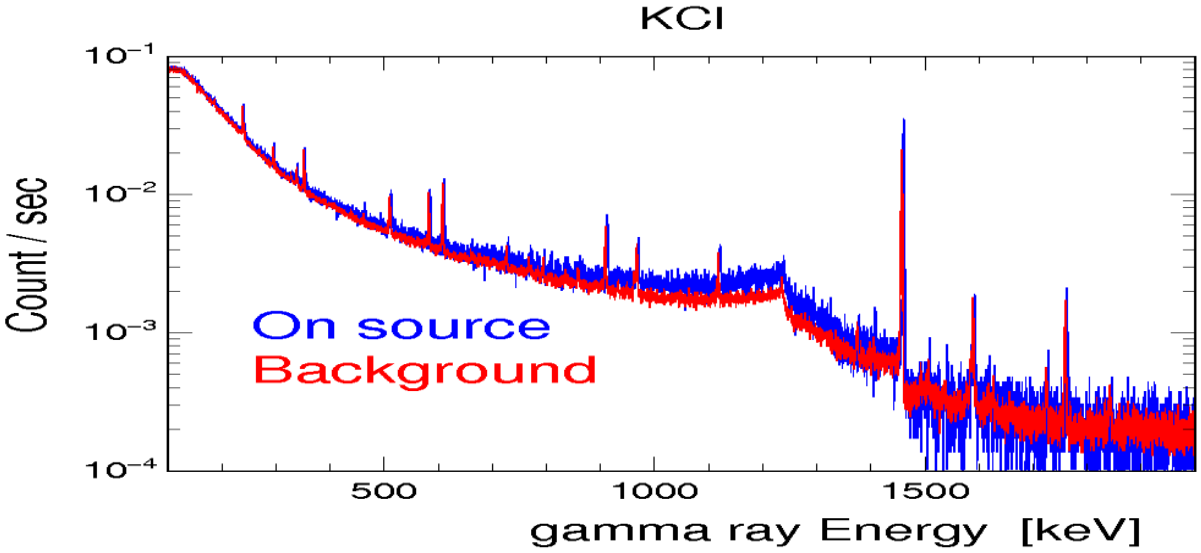
試料	福島土③　(Mad5)			角田市土　(Mad6)					
核種	Cs134	Cs134	Cs137	Cs134	Cs134	Cs137	Cs134	Cs134	Cs137
γ線 E[keV]	604.72	661.66	795.86	604.72	661.66	795.86	604.72	661.66	795.86
検出効率[/s]	0.003285	0.002961	0.002394	0.003285	0.002961	0.002394	0.003285	0.002961	0.002394
放出効率[/s]	0.9762	0.8510	0.8553	0.9762	0.8510	0.8553	0.9762	0.8510	0.8553
検出率[/s]	0.139	0.133	0.079	0.241	0.245	0.145			
γ線放出率[/s]	42.4	44.8	33.1	73.4	82.9	60.4			
放射能[Bq]	43.4	52.7	38.6	75.1	97.4	70.6			
質量[g]	89.6			143.1					
Bq/kg	484.4	588.2	430.8	524.8	680.6	493.4			
計[Bq/kg]	1072.6			1205.4					

結果

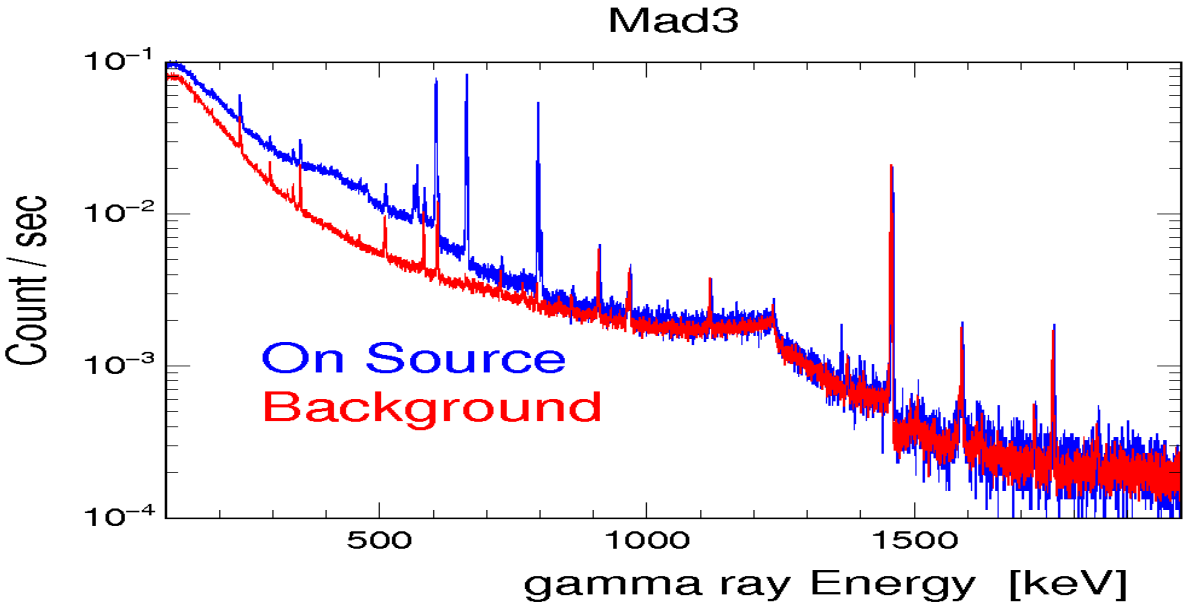
標準線源 1 (Soil18)の La は検出されなかった



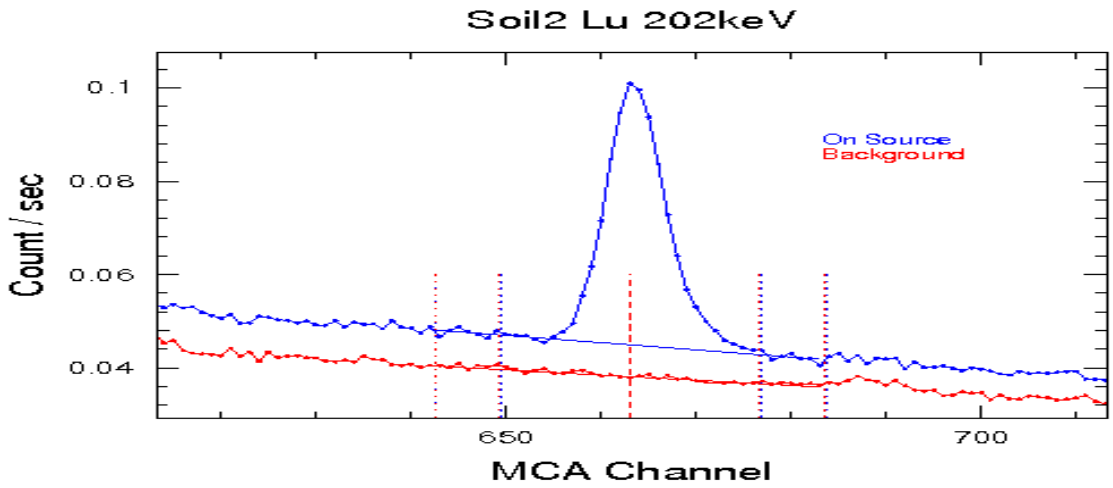
La_2O_3 と Lu_2O_3 を入れた標準線源 Soil2 を測定した結果。La と Lu からの信号がそれぞれ見られる。662keV のところにもピークが見られるが、これは近くで Cs137 を使った実験をした影響が見えていると推測。



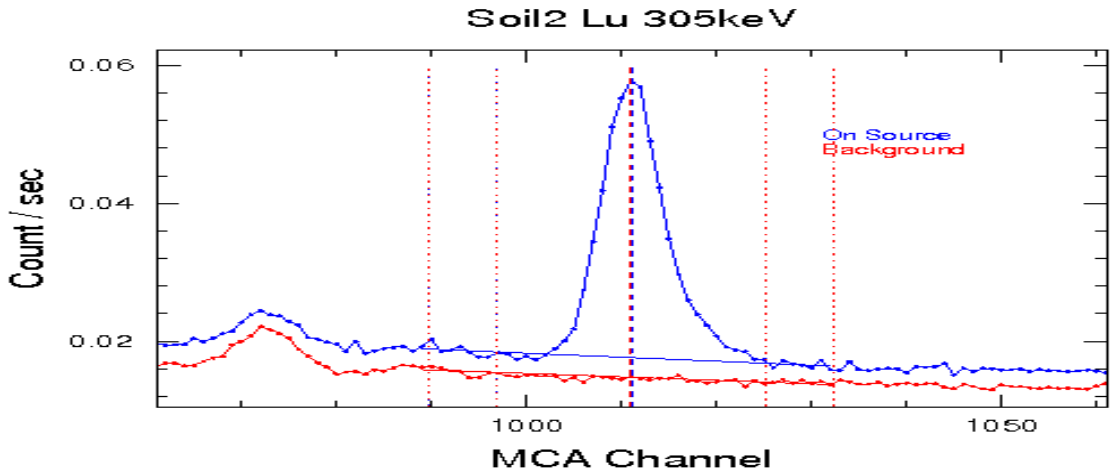
KCl から放出されるγ線を Ge 検出器で測定した結果。青が KCl 検出器の中に入れた時で、赤が何も入れないで BG を測定した結果。1461keV に BG より優位に大きな信号が見える。



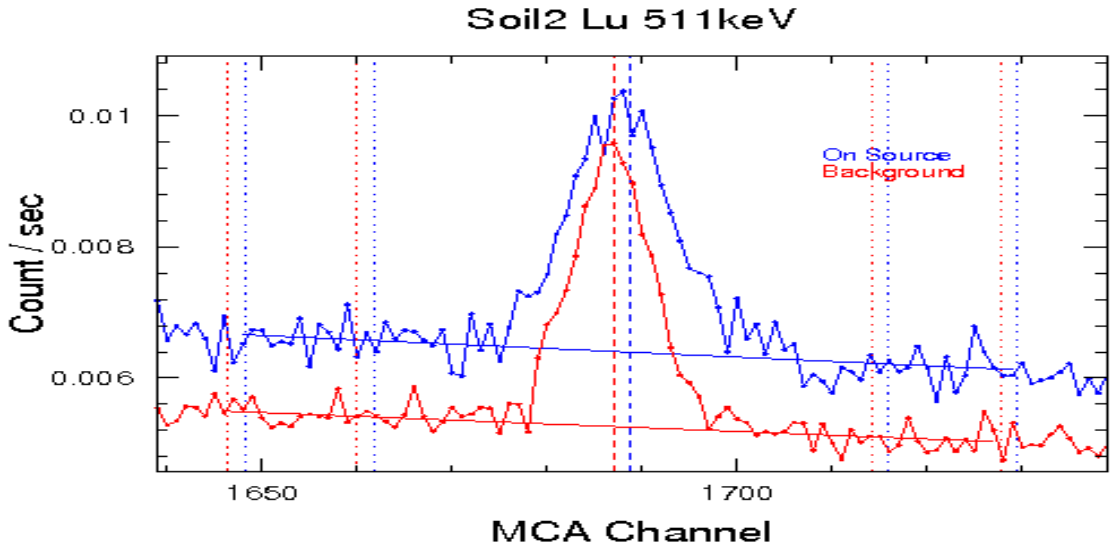
福島で採取した土の測定結果。Cs137 と Cs134 によるピークがはっきり見られる



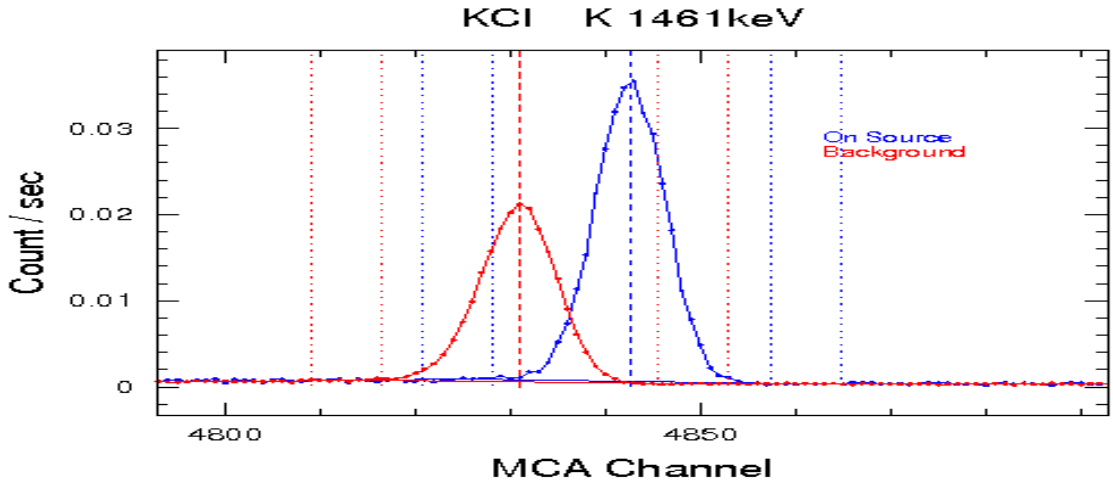
Soil2: Lu から放出される 202keV γ 線ライン。
青は検出器に Soil2 を入れた時、赤は何もいれず BG を測定した結果。実線でベースライン、点線でピーク、4σ、6σの値を示している。
4σと 6σの間のデータを使いベースラインをフィットし、4σ以内のデータを使いγ線のカウント数を算出した。



Soil2: Lu から放出される 30keV ライン

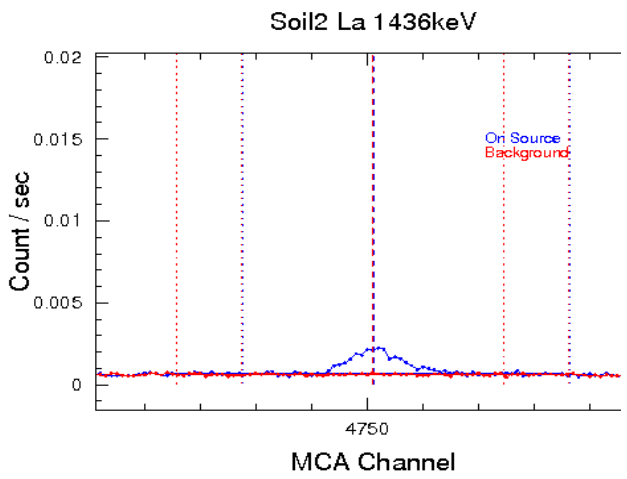


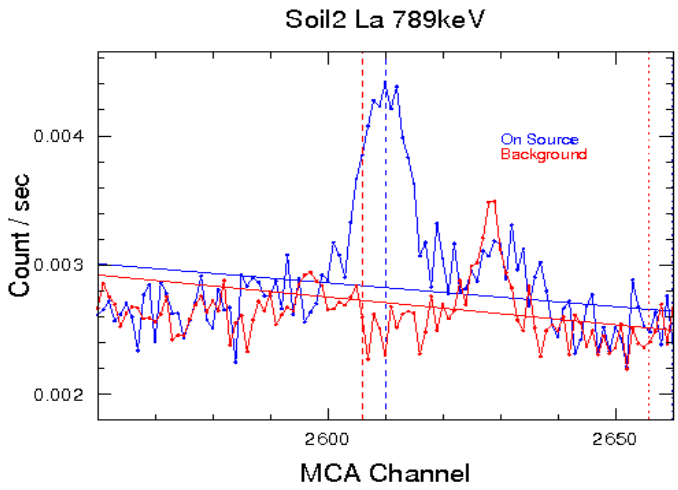
Soil2: Lu からの陽電子により発生したγ線のピーク。この値は解析に入っていない。

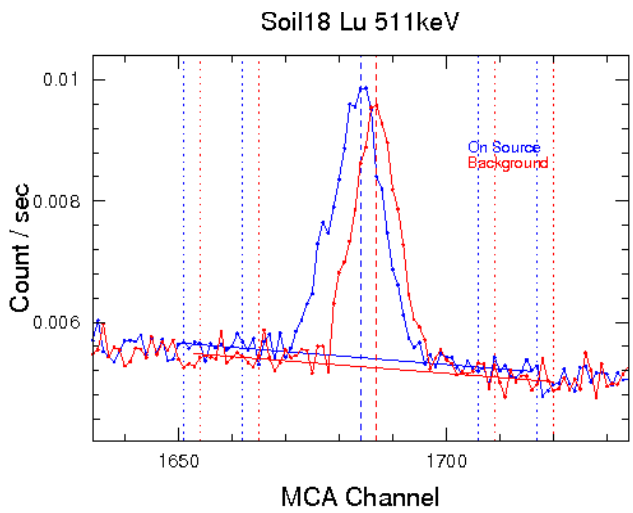


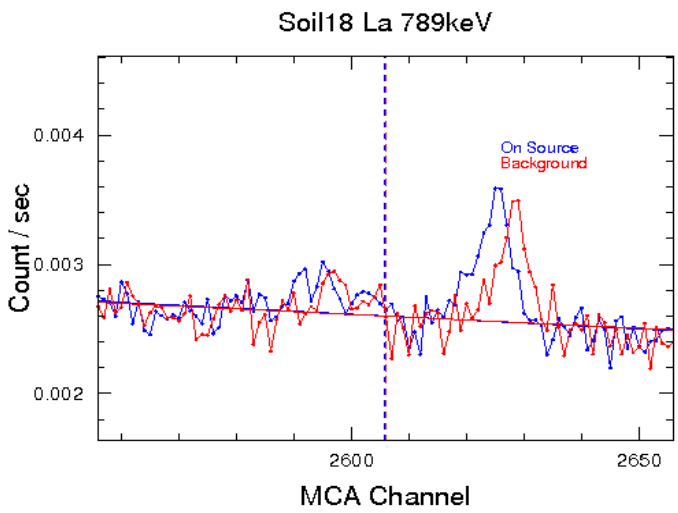
前図にある KCl の測定結果で 1451keV 付近を拡大した図。それぞれのピークに関してベースラインをフィットし、超過分を積分している。測定時間は約 1 日。On source と BG でピークの位置がずれているが、室温によりアンプの利得が変動したためと推測している。

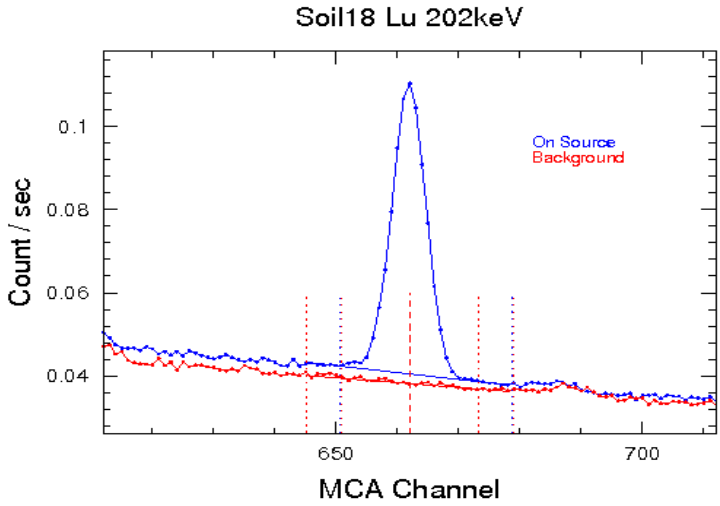
以下は Soil18、Soil2 から放出されるガンマ線のライン。
Soil18、La から放出される 789keV γ線ラインは検出されなかった。

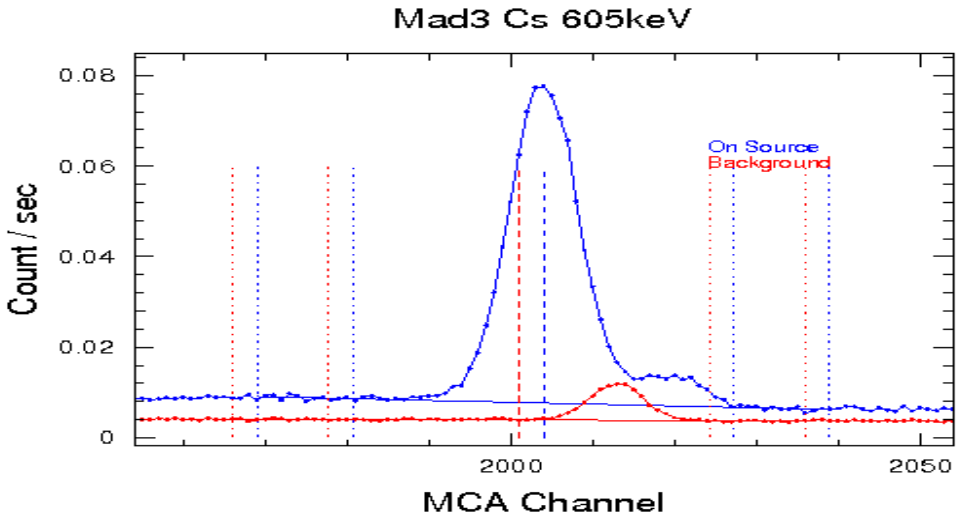




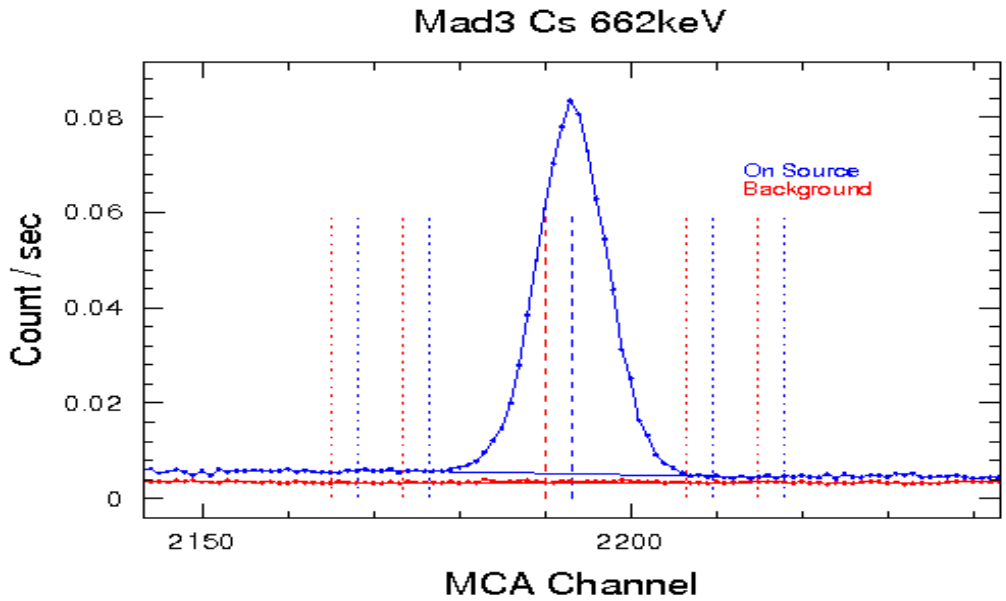




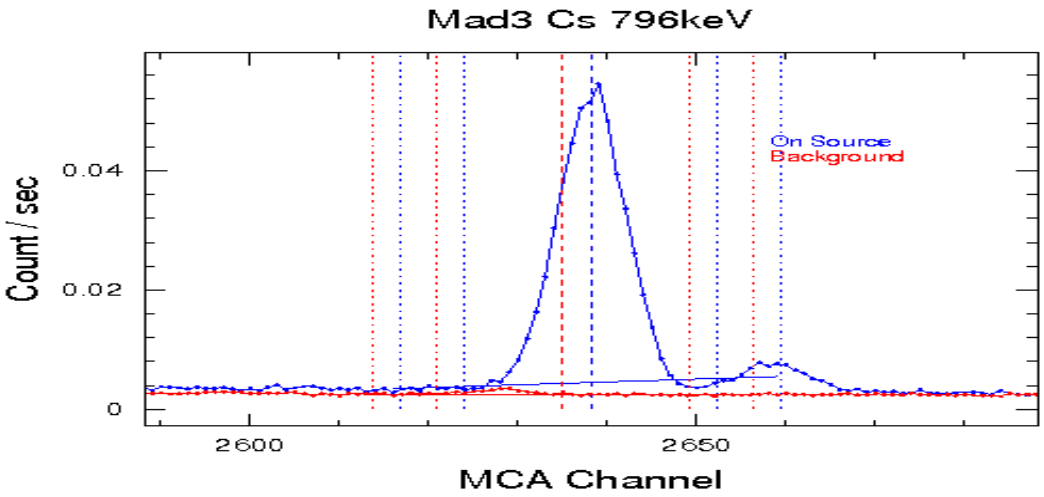




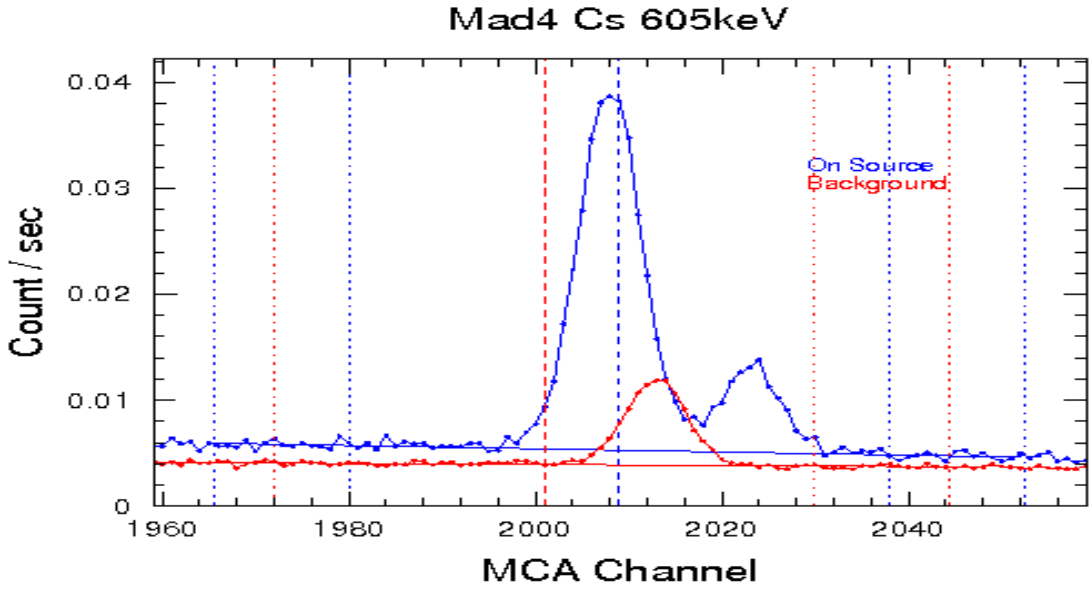
Mad3: 福島の土に含まれている Cs134 から放出される 605keV γ 線ライン。



Mad3: 福島の土に含まれている Cs137 から放出される 662keV γ 線ライン

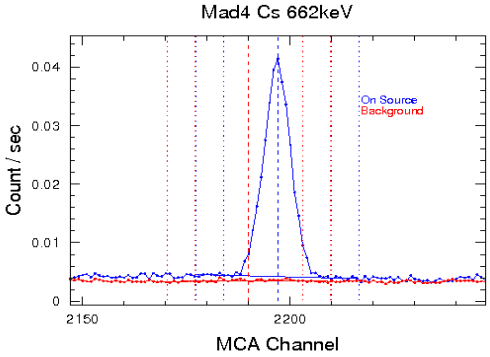


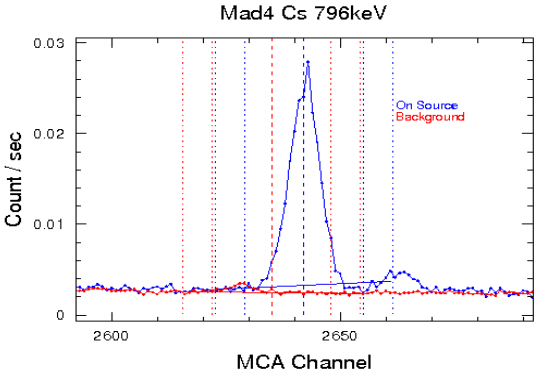
Mad3: Cs134 の 796keV ライン。On source の結果に 796keV γ 線とは別のピークもみられる。そのピークによりベースラインが正しく求められていない。このエネルギーのガンマ線は使わず 605keV のピークのみにより Cs134 の量を求めている。

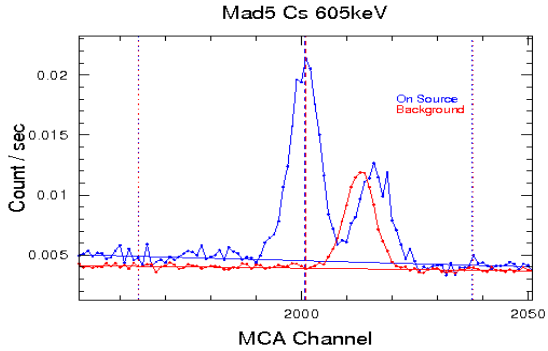


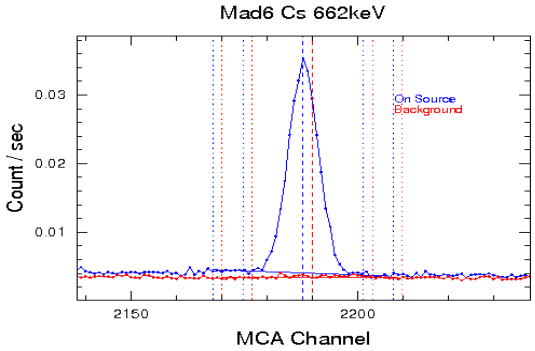
Mad4: Cs134 から放出される γ 線以外に別のピークが見えていて、BG と On source でピークの位置がずれている。室温の影響であると推測している。

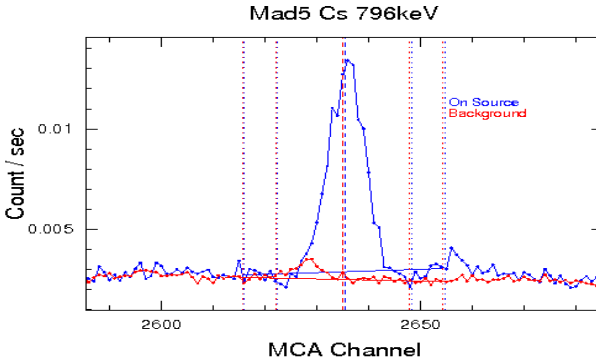
Mad4, Mad5: 福島で採取した土を測定した結果。

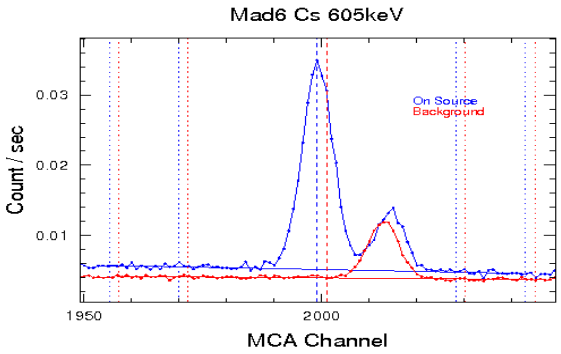


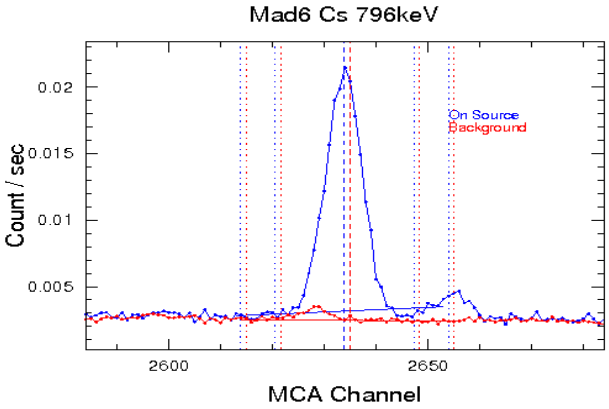




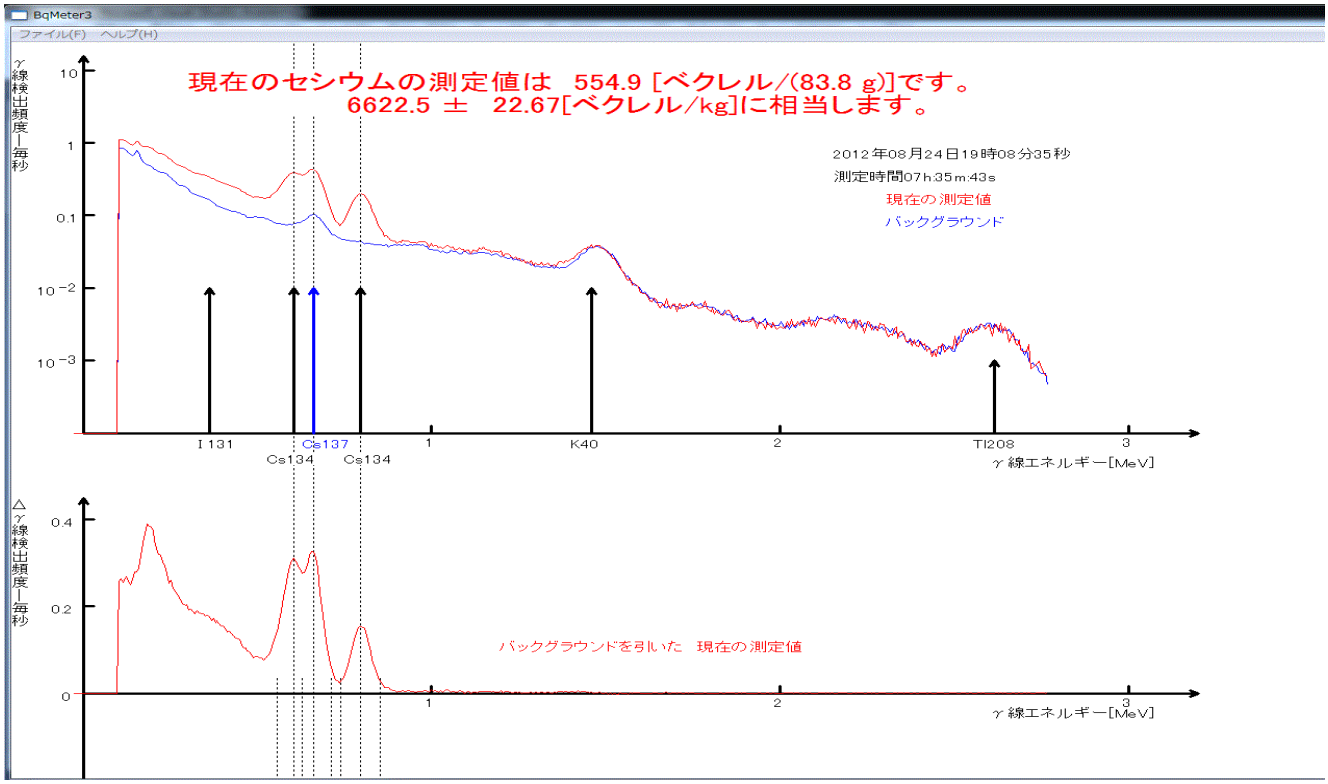








ＮａＩシンチレーション検出器の測定結果



上部のグラフの赤い線が現在の試料の測定値。青い線がバックグラウンドとなっている。横軸がγ線エネルギー[MeV]で、縦軸がγ線検出頻度－毎秒となっている。
下部のグラフは上部のグラフの現在の測定値とバックグラウンドを引いた値のグラフとなっている。
下部のグラフより ^{134}Cs、^{137}Cs のピークがはっきりと分かる。そのためこの試料には Cs が含まれている。
試料の Cs の測定値は 554.9[Bq/83.8g]でこれは 6622.5±22.67[Bq/kg]となっている。

8.　まとめ

3.11 に起きた東日本大震災により原子力災害が起こった。その結果環境に様々な核種の放射性物質が放出された。その影響として放射性物質、特に Cs を調べるため、NaI シンチレータを用いた簡易放射能汚染測定器を開発した。ソフトはふたの開閉以外は全て自動で測定が行われるようにプログラミングされている。そのソフトに NaI シンチレータ検出器の測定結果が表示されたものを印刷できるように書き加えた。これによってより使いやすくなり、データの比較などが安易になった。

今後も装置を角田市の施設で運用しながら改良を加えていき、誤差数%～10%を目指す。そして、より信頼性の高い測定法を開発していく。

9.　参考文献

猫でもわかる Windows プログラミング 第 3 版
物理学実験 III「放射線の測定」 甲南大学　物理学科
NaI(TI)シンチレーションスペクトロメータ機器分析法

10.　謝辞

本研究を進めるに当たり多くのご支援とご指導を賜りました梶野文義教授、山本常夏准教授に深く感謝しております。特に山本先生には大変お世話になりました。測定器を製作する際には、たいへん御助力いただき深く感謝致します。また同回の皆様にも協力していただきとても励みになりました。

最後になりますが、卒業論文の作成に協力してくれた皆さんにお礼申し上げます。ありがとうございました。