

## プラスチックシンチレータ検出器による放射能探査法の開発

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 独立行政法人農業食品産業技術総合研究機構農村工学研究所 公開日: 2025-06-17 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 今泉, 真之, 土原, 健雄, 吉本, 周平, 石田, 聰, 内山, 貞幸, 結城, 洋一 メールアドレス: 所属:
URL	<a href="https://doi.org/10.24514/0002001331">https://doi.org/10.24514/0002001331</a>

[農工研技報 209]  
[73~104, 2009]

# プラスチックシンチレータ検出器による放射能探査法の開発

今泉眞之\*・土原健雄\*\*・吉本周平\*\*・石田 聰\*\*・内山貞幸\*\*\*・結城洋一\*\*\*\*

## 目 次

I 緒言	73	2) 放射能探査に最適な PS の選定	88
II 断層と地下水	74	3) ライトガイドの形態	88
1 断層破碎帯の形態	74	4) 中性子と $\gamma$ 線とを弁別するための装置	88
2 亀裂岩盤における地下水の賦存形態と 断層の役割	74	5) $\gamma$ 線スペクトルを解析する技術開発	89
3 物理探査による地下水調査	76	4) 開発の方法	89
III 放射能探査法による断層探査の原理	77	5) PS 検出器の $\gamma$ 線スペクトルの校正方法	89
1 断層と核種の関係の研究史	77	6) 放射能探査のための PS の選定	90
2 $\gamma$ 線スペクトロメトリーによる $^{214}\text{Bi}$ の 計数率の意義	79	1) PS 検出器候補の選定	90
IV 断層指標としての核種	79	2) PS 検出器の選定	90
1 ダムサイト断層の $\gamma$ 線放射能探査	79	7) PS 検出器の $\gamma$ 線スペクトル解析法の開発	92
2 埋没断層位置の指標	80	1) コンプトン散乱法	92
V $\gamma$ 線放射能探査装置	80	2) 微分曲線面積法	93
1 $\gamma$ 線測定器	80	3) 人工グロスカウント比法	93
2 NaI 検出器による $\gamma$ 線スペクトル	81	8) 放射能探査装置のシステム設計・試作	94
VI $\gamma$ 線放射能探査装置の発達史	84	9) ライトガイドの形態	95
VII プラスチックシンチレータ検出器の開発	85	10) 実証試験	96
1 新たな検出器の開発の必要性	85	1) 試作器	96
2 PS 検出器	87	2) 実証試験の方法	96
3 PS 検出器の開発の課題	87	3) 試験結果	97
1) ゲイン変動の監視法の開発	87	VIII 結言	99
		参考文献	102
		Summary	104

## I 緒 言

地球上に存在する約 13 億 8600 万  $\text{km}^3$  の水のうち、97.5% (約 13 億 5100 万  $\text{km}^3$ ) は塩水で、残り 2.5% (約 3500 万  $\text{km}^3$ ) が淡水であり、さらにそのうちの 69.5% (約 2440 万  $\text{km}^3$ ) は氷河、雪、氷、そして永久凍土層に含まれており、人間には利用不可能である。人間に利用可能な淡水である残り 30.5% のうち 30.1% (約 1050 万  $\text{km}^3$ ) は地下水で、河川や湖沼などの地表に存在する淡水の利用可能量は全体の 0.4% (約 13.5 万  $\text{km}^3$ ) である。世界気象機関によると、世界の水使用の約 19% は地下水で賄われていると推定されている。そのうちの約 2 割

は農業用水である<sup>(33)</sup>。

世界人口が増え続けている現在の状況において食料の安定的な供給を図っていくためには、農業用水の確保が不可欠であり、貧困層の大半が暮らしている農村地域の持続的な発展を図るためにもその十分な量の確保が必要である<sup>(33)</sup>。しかし、良好なダムサイト等の開発適地の多くで既に開発が行われてきた状況を踏まえると、新たな水源開発を得る方法としては、地下水開発が有望な方法の一つである。

水ストレスは、水の使用と水資源の間の不均衡から生じ、総再生可能資源に対する取水の割合で定義される。World Water Council のウェブサイトの水ストレス図を見ると、高い水ストレスの地域は、米国、北アフリカ、中近東、中央アジアに分布している。特にアジア、アフリカでは、将来、水問題が地域発展の大きな制約となり、水供給を助けるなんらかの制度が必要になると予測されている<sup>(40)</sup>。これらの地域の地質は、先カンブリア時代、

\* 農村環境部、\*\* 農村総合研究部地球温暖化対策研究チーム、

\*\*\* クリアパルス株式会社、\*\*\*\* 応用地質株式会社

平成 20 年 12 月 15 日受理

キーワード：地下水調査、地下水資源、埋没断層、割れ目、 $\gamma$  線

古生代の堆積岩、変成岩類で構成されており、地下水はこれらの岩盤の亀裂に胚胎していると考えられる。従って、地下水を開発するためには断層と関係する亀裂位置の調査が最も重要である。

$\gamma$ 線放射能探査は、20世紀初頭にウラン探査のために開発された。ヘリコプターを用いたヘリボーン放射能探査は、短時間で広域の核種分布を決定できる重要なツールであるので、断層調査のみならず、核施設からの放射性核種の漏洩モニタリング、核施設事故後の土壤汚染の広がりの調査等でも利用されている<sup>(41,47)</sup>。日本では1950年代後半から地下水を開発するための有力なツールとして利用されている。 $\gamma$ 線放射能探査装置の発達史を概観すると（詳細はVIを参照）、検出器の大型化の歴史としてまとめられる。大型化の歴史は、ヘリコプターや軽飛行機で飛行しながら調査する空中探査「ヘリボーン・エアボーン」（以下、ヘリボーン）が主流になっていることと関係している。今後の探査装置の開発では、無人ヘリコプターに搭載できる装置の開発も望まれている。この場合、単に検出器を大型化するのみならず、軽量化も求められる。

この報告では、地下水調査のツールとしての $\gamma$ 線放射能探査の原理、発達史を整理するとともに、現在進行中のプラスチックシンチレータ検出器（以下、PS検出器）による放射能探査装置の開発状況を報告する。

## II 断層と地下水

### 1 断層破碎帯の形態

断層は、「それを境として両側で変位が認められる单一割れ目もしくは複数の割れ目ゾーンで、変位を持つ面（Glossary of Geology）」として定義されている。地質図においては断層は線として示されるが、実体としては数条の破碎帯から構成される。露頭スケールの断層は、ほぼ平行に存在する2つの断层面があって、その間には、断層運動の摩擦破碎によって生じた断層粘土や断層角礫が断層内物質として挟まれる。

大規模なセン断破壊の場合、岩盤が相当な幅をもって圧碎され、角礫や粘土が入り交じった状態になる。これが断層破碎帯と呼ばれるものである。露頭スケールでの断層破碎帯は、細粒な断層粘土（ゴージ）を主体とするゾーン（粘土帯）と断層角礫を主体とするゾーン（角礫帯）が断層に沿って、縞状に分布する組織を示す<sup>(43)</sup>。一般に、破碎帯の両側に粘土化帯が分布している。断層破碎帯の外側には、割れ目の多い岩盤があり、その割れ目も、断層破碎帯からある距離以上になると次第に減少して、正常な岩盤に漸移する（Fig.1）。

断層粘土は、母岩が破碎作用によって細粒化したものである。そのため、かならずしも全て粘土サイズではなく、小角礫などを含む。また、母岩の形態を残した粗粒な部分も認められる。粘土鉱物は、母岩の細粒化後に、

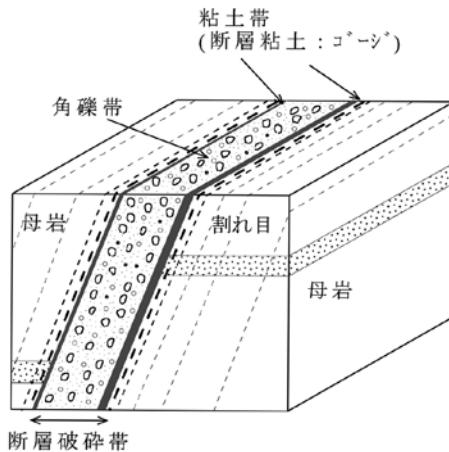


Fig.1 断層破碎帯の形態

Schematic figure of fault fracture zones.

地下水、熱水が関係した化学的風化や変質作用により形成されたものと考えられる<sup>(43)</sup>。

### 2 亀裂岩盤における地下水の賦存形態と断層の役割

山地の地下水は、地形的条件で形成された場に存在する地下水（地形型地下水）と、地質的条件に規定された地下水（地質型地下水）に大別することができる<sup>(34)</sup>。地形型地下水は、崖錐砂礫、土石流堆積物、崩積土、運積土などの谷底堆積層内に存在する。花崗岩山地では、地形型地下水は表層の深層風化部（マサ土帯）に層状水として存在する。地質型地下水は、亀裂性岩盤からなる山体内部に存在し、断層の影響を強く受ける。そのため、その分布は極めて複雑である<sup>(34)</sup>。変成岩や古生層山地では、複雑な地質構造のため、地下水は著しい遍在性を示す。大規模な破碎帯が発達しているところでは、地表の水系を無視した地下水流动系が存在することがある。地下水の賦存量は、地形型地下水より地質型地下水の方が多いので、地下水開発では地質型地下水を対象とする。

亀裂性岩盤中では、連続する割れ目は地下水流动の主要な流路であり、母岩は流体を通さないものと考えられる<sup>(6)</sup>。水が充満する割れ目には、節理と層理面がある。節理は、岩石中の張力およびせん断による小さい割れ目で、断層付近に発達する傾向がある。

断層付近に地下水がどのように賦存するかを、岩盤分類の関係から検討する。岩盤分類は、サイト調査の地質調査において、混沌からある規則を作り出すために発達した。それは、風化の程度・岩塊の硬さ・節理の性状の三要素から岩盤マスを定式化し、同じ挙動のグループ（岩盤クラス）に分けることである。日本のトンネルやダムサイトの岩盤分類では、岩盤をA～Dの4つのランクに分け、CランクをCH、CM、CLに細分類する。AとBは亀裂の少ない硬岩、CH～CLは、亀裂のある中硬岩に相当する。亀裂密度は、CHからCLへ増加する。Dは著しく軟質化し、節理間粘着力がなく、僅かな打撃で崩れる状態である。剥離面には粘土が存在する。サイト

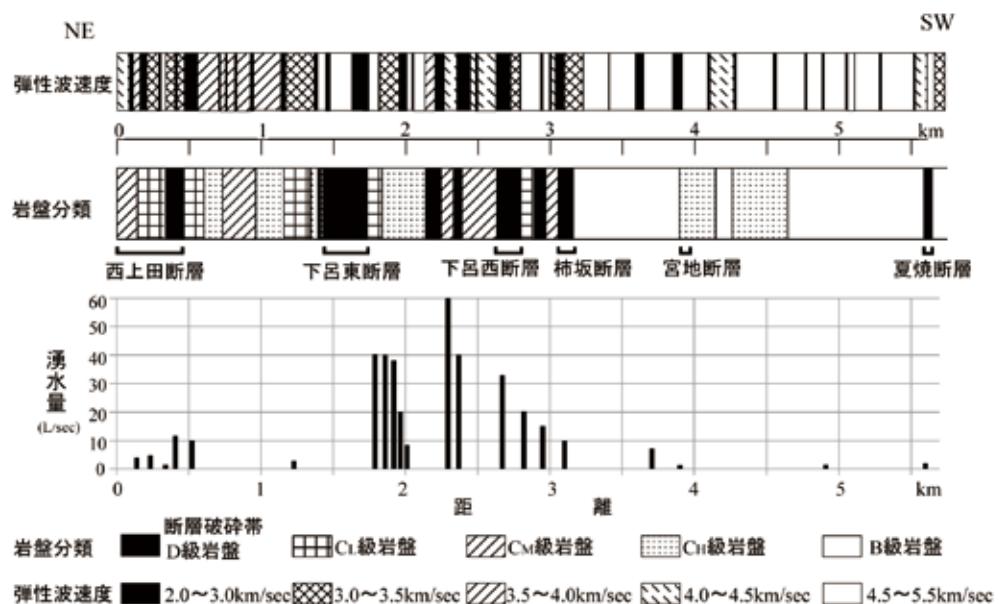
によっては、DをDHとDLに細分することがある。この場合は、DLはより粘土化が進んでいる状態を示す。

**Fig.2**に、下呂東断層や下呂西断層などを横切る中呂導水路トンネルの岩盤分類とトンネル湧水の関係を示す。下呂東断層付近の湧水分布を見ると、湧水はD級岩盤に分布するのでなく、その南西側（涵養域側）のCLとCM岩盤内に分布しているのがわかる。

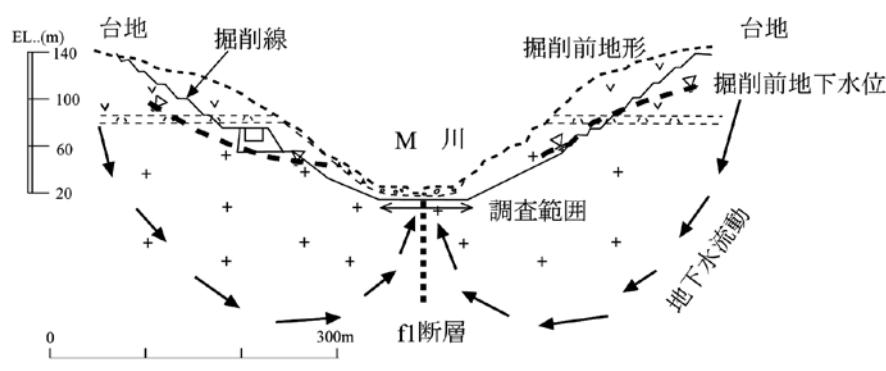
**Fig.3**は、著者らが放射能探査を行ったFダムサイトの地質断面を示している。ダムサイトのあるM川の幅は約20mである。川の両岸は傾斜30°程度の斜面で、その上には標高140m前後の台地が広範囲に分布している。台地は新第三紀の玄武岩類からなり、その下位には中生代の花崗閃緑岩が分布する。図中の波線はダム工事前の地形を示している。調査時には河床砂礫、河岸段丘、岩盤の風化部ははぎ取られ、新鮮な岩盤が露出していた。**Fig.4**に監査廊工事のための掘削面の岩盤分類と湧水の分布を示す。掘削面には、高角度のf1～f8の断層が分布していた。f1断層以外は、破碎帯幅0.3～0.5m

の小断層である。f1断層では、DL岩盤が幅0.5～2mで分布し、その西側には幅2m～5mのDH岩盤が分布していた。f1断層を5m離れると、亀裂は発達しているがCH～CM級の堅硬な岩盤が露出していた。台地で涵養された地下水はダムサイトに向かって**Fig.3**の矢印のように流れていることが予想される。実際に掘削面には沢山の湧水が分布していたが、f1断層付近にはほとんど分布しなかった。湧水は、主に断層東側のCH岩盤の亀裂、CHとCM岩盤の境界亀裂に分布していた。個々の湧水口からの湧水量は数L/minであった。

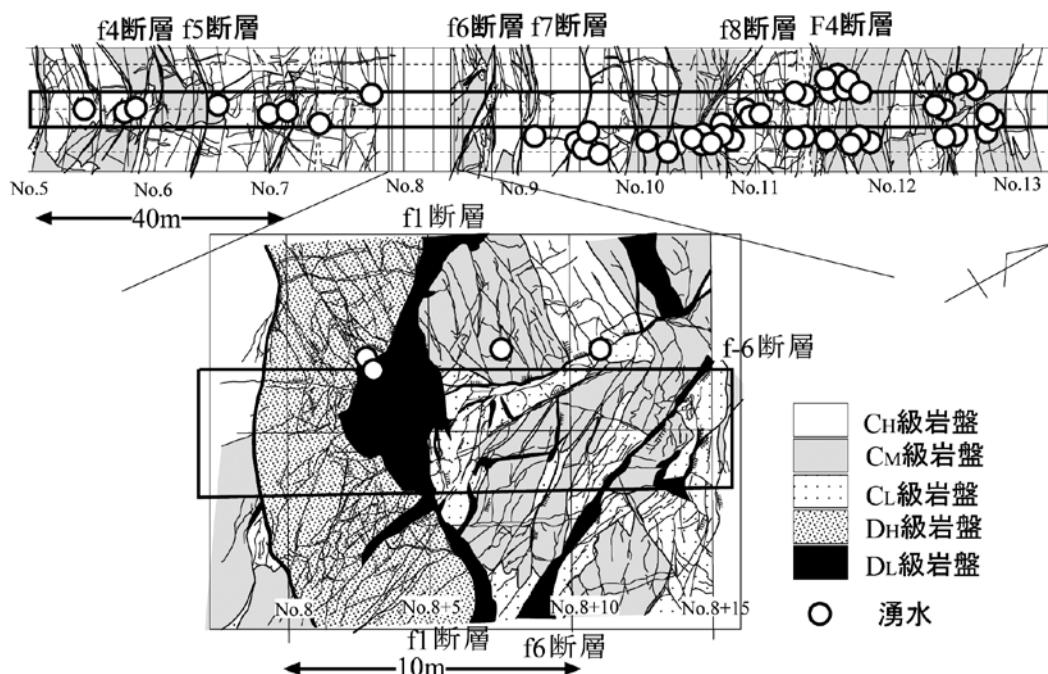
**Fig.2**と**4**の例で示すように、亀裂性岩盤では、地下水は断層破碎で粘土状になった所（D岩盤）に分布しているのではなく、断層破碎帶の外側の亀裂の多いC岩盤に分布する傾向がある。C岩盤を直接探査することは困難であるので、物理探査で断層破碎帶（D岩盤）位置を明らかにし、その後、精査により地下水が賦存しているC岩盤を探査する手順で調査が行われる。



**Fig.2** 中呂導水路トンネルの岩盤分類と湧水の関係（神田（1979）のデータを基に作成。）  
Relationship between rock classification and springs in the Chyoro-tunnel (Original data from Kanda (1979))



**Fig.3** Fダムサイトの地質断面  
Geological section of F dam site



**Fig.4** Fダムサイトの岩盤分類と湧水分布の関係  
Relationship between rock classification and distribution of springs in F dam site

### 3 物理探査による地下水調査

**Table 1** に地下水調査に使われる物理探査法の種類をまとめた。物理探査は、水理地質構造調査と地下水水流動調査に使われる。水理地質構造調査は、探査装置からの信号の地盤の物性に対する応答を利用して、地質構造を探査する。地下水水流動調査は、地盤中の地下水の存在状況によって、探査装置からの信号が変化をすることを利用

し、地下水の動きを探査する。電気、電磁、弾性波探査は、主に水理地質構造調査に利用されるが、繰り返し測定が可能な場合は、地下水水流動調査にも利用される。放射能探査には、地層や土壤に含まれる天然放射性同位元素から放出される自然の放射線を検出する方法と、人工線源から放出される放射線の散乱・吸収などを測定する方法（検層）に大別される。前者は、水理地質構造調

**Table 1** 物理探査から得られる物性と地盤・地下水問題への適応の関係  
Relationship between measured values of various geophysical prospecting and hydrogeological items

測定物性		探査法	地下水調査への適用
電磁気特性探査	比抵抗・電気伝導率	電気・電磁探査	水理地質構造
	分極率・充電率	IP法電気探査	地下水水流動
	比誘電率	電磁波トモグラフィー・電磁探査	地下水水流動
	電磁インピーダンス	地中レーダー探査	水理地質構造
	帶磁率	磁気探査・電磁探査	水理地質構造
弾性特性探査	弾性波速度 (P・S波)	高密度弾性波探査・VSP	水理地質構造
	弾性波Q値	弾性波トモグラフィー・VSP	水理地質構造
	音響インピーダンス	浅層反射法	水理地質構造
熱特性探査	密度	重力探査	水理地質構造
	地温	1m深地温探査	水理地質構造 (地下水水流動脈)
	熱伝導率	熱伝導率地盤探査	地下水水流動
放射能探査	自然放射	$\alpha$ 線	水理地質構造 (断層検出)
		$\gamma$ 線	断層検出
	人工線源	$\gamma$ 線	水理地質構造
		中性子	地下水水流動 (地下水涵養) · 水理地質構造

査のうち、断層調査に特化して利用される。後者には、中性子線源を利用した水分測定、 $\gamma$ 線々源を用いた密度測定などがあり、水理地質構造調査に利用される。中性子水分検層は、地下水流动調査のうち、不飽和帯の水移动の調査にも利用される。この論文では環境に存在する $\gamma$ 線を測定する放射能探査法、特に $\gamma$ 線スペクトロメトリーについて議論する。

$\gamma$ 線スペクトロメトリーは、 $\gamma$ 線スペクトルを測定し、それを分析することにより核種毎の強度（計数率）を測定する探査のことである。詳しくは、V章で説明される。 $\gamma$ 線スペクトロメトリーは、弾性波探査、電気探査などの物理探査法の一つとして分類されているが、他の物理探査との決定的な違いは、他の物理探査法が地盤の物理的な性質を測定しているのに対し、放射能探査は化学的な性質を測定していることである。実験室レベルで行われている $\gamma$ 線スペクトロメトリーは、原子吸光分析などの機械化学分析法の一つに位置づけられている。

Fig.5 には、海外で地下調査をする場合の調査の流れを示している。予備調査では、気象、地形図、地質・水文情報の収集が行われる。概査では、航空写真の判読によりリニアメント分布図が作成され、開発有望地域を選定し、広域の地質調査が行われる。最近では、収集した情報は、GIS でデータベース化され、解析されている。カーボーンやヘリボーンによる放射能探査は、この段階で行われる。精査では、有望地域から選定された開発候

補地で、物理探査により断層位置と規模が明らかにされる。マンボーンによる放射能探査は、この段階で行われる。井戸掘削地点は、調査結果を総合的に判定して決定される。

### III 放射能探査法による断層探査の原理

#### 1 断層と核種の関係の研究史

ウラン ( $^{238}\text{U}$ ) とトリウム ( $^{232}\text{Th}$ ) は、崩壊系列を作り、 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ などの放射壊変を行い、結局は鉛となって安定する (Fig.6)。崩壊系列において、親核種の半減期が娘核種の半減期に比較して十分長いとき、娘核種の半減期の 7 ~ 10 倍の時間を経過した後には親、娘核種の崩壊率は一定となり、両者の原子数の比も一定になる。この状態を放射平衡という。放射平衡の状態にある場合には、親核種の存在量は、娘核種から放出される $\gamma$ 線の測定によって定量することができる。このことを利用して、 $^{214}\text{Bi}$  の測定値からウラン探査では  $^{238}\text{U}$  量を、断層調査では  $^{222}\text{Rn}$  量を評価している。同じように、 $^{208}\text{Tl}$  から  $^{232}\text{Th}$  量を評価している<sup>[31]</sup>。

各系列の中間にあるラドンは、不活性のガスで、狭義にはウラン系列のラドン ( $^{222}\text{Rn}$ : 半減期 3.83 日)、トリウム系列のトロン ( $^{220}\text{Rn}$ : 半減期 50 秒) がある。トロンは、大気中の放射能強度が低く、半減期が短いので、放射能探査では  $^{222}\text{Rn}$  のみを考慮すればよいと考えられる。

ラドンは、ウラン系列の放射性核種では唯一の気体であるので、この性質が断層亀裂での移動性を推測させ、放射能探査による断層調査の根拠となると考えられている。そのため、全 $\gamma$ 線放射能探査による埋没断層調査ではバックグランドの $\gamma$ 線強度より高い値を示す箇所を異常点と解釈し、断層位置を推定している場合が多い (吉村・松本, 1994)。埋没断層は、断層が表層土壤に被われて、直接、断層露頭を観察できない断層を言う。 $\gamma$ 線スペクトロメトリーでは  $^{214}\text{Bi}$  や  $^{214}\text{Bi}/^{208}\text{Tl}$  を指標として断層を探査している<sup>[18, 19]</sup>。落合<sup>[38]</sup>は、 $^{214}\text{Bi}$  以外に、トリウム系列の  $^{228}\text{Ac}$  と  $^{40}\text{K}$  も断層指標となるとしている。

日本の多くの放射能探査の報告では、「移動しやすい不活性のラドンが、断層破碎帶の割れ目を通って地表付近に運ばれる」ことを前提とし、この仮定により、断層付近で放射能異常が検出されない場合、「割れ目は粘土等により充填され、閉塞している」といった議論を何のデータも示さずに行っている場合が見受けられる (例えば、落合 (1999))。一方では、異常点の分布は破碎帶の形態 (粘土化・開口亀裂等) には必ずしも依存するものでないということも指摘されており<sup>[50]</sup>、断層調査への放射能探査の原理が、未だあいまいな状態にある。

ここでは、断層とラドンの関係を議論した研究史をまとめ、放射能探査による埋没断層調査の問題点を整理する。

放射能探査により、堆積物に被覆された断層と放射能

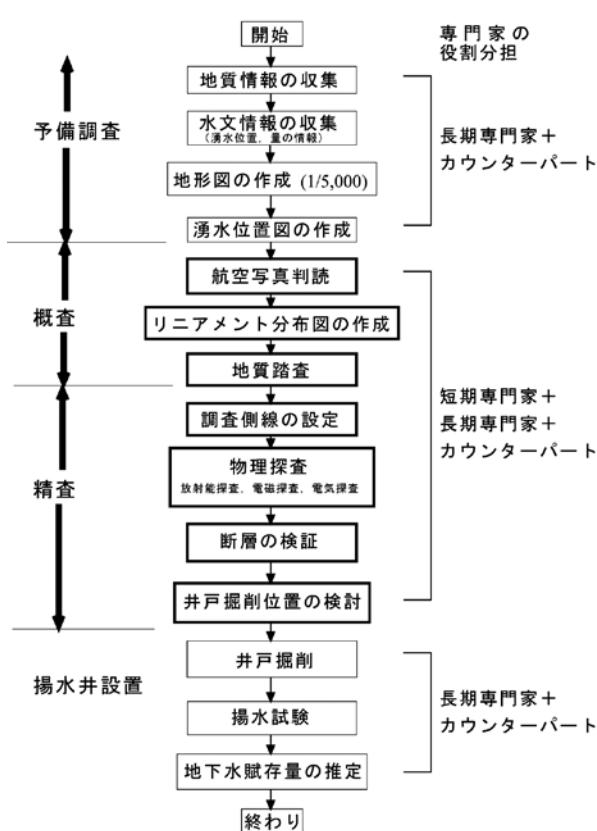


Fig.5 地下水資源開発調査の流れ  
Flow chart of investigation stages for groundwater development

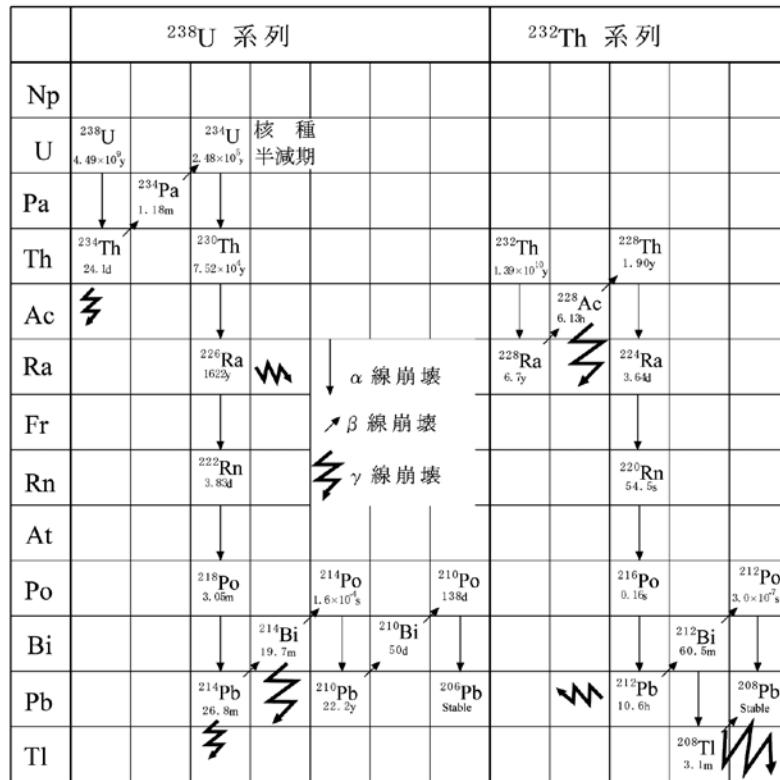


Fig.6  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ の崩壊系列  
Radioactive decay series of  $^{238}\text{U}$  and  $^{232}\text{Th}$

の関係を初めて明らかにしたのは、Ambronn<sup>(2)</sup>である。彼は、断層上の土壤中で  $\alpha$  線が顕著に増加し、 $\gamma$  線がわずかに増加することを見いだし、この方法がウラン鉱物の探査のみでなく、断層位置を決定する方法として使えることを指摘した。日本では、Hatuda et al.<sup>(8)</sup>が、六甲断層上で、地中ガスの放射能を電離箱により測定し、放射能の急激な増加を認めた。Lane and Bennett (1934) は、井戸水中のラドンの濃度が既知の断層の指標となると考えた。当時、断層付近で放射能が増加する現象はウラン塩あるいはラジウム塩が断層破碎帯を上昇して地表付近の土壤中に沈積することと、ラドンが割れ目を上昇してくることの両方の原因が考えられていた<sup>(9)</sup>。

Israel and Bjornsson<sup>(14)</sup>は、既知の断層の上の土壤ガス中のラドン ( $^{222}\text{Rn}$ ) とトロン ( $^{220}\text{Rn}$ ) の含有量を測定し、断層の上の放射能異常に 2 つのタイプのあることを示した。一つはトロンの異常が伴われないタイプであり、他の一つはラドンとトロンの異常が同時に起こるタイプである。彼らは最初の異常タイプは断層に沿ってラドンが移動するタイプと考えた。

ラドンの移動メカニズムは拡散によるものと、移流により間隙の流体が移動するのにともない一緒に運ばれるものとがある<sup>(45)</sup>。一般的には土壤中のガスの移動は拡散によるところが大きい。それは、土中気体の全圧の勾配が、通常の状態では、無視しうるほど小さいからである<sup>(28)</sup>。理想的な乾いた礫層では、ラドンの最大の拡散は 10m である<sup>(44)</sup>。実際の乾燥土壤においては、その拡

散移動は数mになり、高い水分量で小さい間隙率の土壤では、それはずっと短くなる。一般的な間隙率の土壤では約 1m とされている<sup>(44)</sup>。しかし、Kristiansson and Malmqvist<sup>(20)</sup>は、地下 100m にある鉛床の地表におけるラドンの測定で、岩石中の断層を通じてラドンが 100m 以上の距離を移動してきた証拠を示した。多くの埋没断層調査では、地表と破碎帶の間に数 10m の不飽和帯が存在することは希で、一般には地下水位が数 m 下にあるため、放射能異常を非拡散移動ラドンの濃集とすることには無理があると思われる。

マグマからの結晶した鉱物中で、 $^{238}\text{U}$  と  $^{232}\text{Th}$  は 4 倍の状態で存在する。 $^{238}\text{U}$  は容易に酸化して 6 値となり、ウラニルイオン ( $\text{UO}_4^{2-}$ ) を作り、さらに炭酸等と結合して錯イオンを作り、水に溶け出す。一方、 $^{232}\text{Th}$  は 4 値の状態でのみ存在し、風化による溶脱を受けない<sup>(17)</sup>。 $^{238}\text{U}$  は普通の地下水の酸化還元状態では溶脱するのみで、有機物や粘土鉱物（特に、モンモリロナイト）<sup>(17)</sup>への吸着以外、蓄積することはない。Lowson et al.<sup>(25)</sup>は、地下水からのアモルファス Fe が  $^{238}\text{U}$  を供給させることを示した。Latham and Schwarcz<sup>(23)</sup>は、花崗岩の石切場の割れ目を調査し、Fe と  $^{238}\text{U}$  は、割れ目に向かって増大することを示している。一般に断層破碎帯では、 $^{238}\text{U}$  が流出するが、断層粘土部にモンモリロナイトが形成されているところでは、 $^{238}\text{U}$  が粘土に吸着されると考えられる。 $^{238}\text{U}$  の吸着濃集の程度は、移動しない  $^{232}\text{Th}$  との比 ( $^{238}\text{U}/^{232}\text{Th} : ^{214}\text{Bi}/^{208}\text{Tl}$ ) で強調されることが推定される。

Tanner<sup>(44,45)</sup>はラドンの移動に関する膨大な資料を総括し、次のようにまとめている。

- a. エマネーション法（土中ラドン濃度調査）は、ラドン移動を測る鋭敏な方法であるが、これによりラドンの（長距離）移動が測定されたとすると、そのメカニズムはラドン（のみ）の移動でなく、その親核種の移動による。
- b. 地球物理学的な調査での（非拡散の）ラドン移動を明らかにした成功例は、実質的なラドンの移動が起こっていることを示していると思われる。しかし、いくつかの調査例では、ラドンの移動とその親核種の移動との区別がつかない。放射能異常の原因は<sup>222</sup>Rnのみによるのではなくウラン系列のなかで移動性の高い核種<sup>238</sup>U, <sup>234</sup>U, <sup>226</sup>Raも関係している。
- c. ウランとトリウム核種の非平衡の研究でも、ラドンの移動は、ウランとラジウムの移動に関係していることが示されている。

## 2 γ線スペクトロメトリーによる<sup>214</sup>Biの計数率の意義

木村<sup>(18)</sup>と木村ほか<sup>(19)</sup>は、γ線の物質による吸収を理論的に検討し、γ線検出器への影響範囲を明らかにしている。彼らの検討によれば、1.5g/m<sup>3</sup>の乾燥した土壤を仮定した場合、携帯用のγ線検出器の計数率の90%は、検出器周囲半径1m、深度30～45cmの逆三角錐内の土壤からのγ線の寄与による。

今泉他<sup>(11)</sup>は、土壤粒子から間隙に放出された<sup>222</sup>Rnと地下から地表へ放出する<sup>222</sup>Rnの<sup>214</sup>Biの計数率への寄与を理論的に計算した。<sup>214</sup>Biの計数率は、①検出器下の三角錐内の土壤の<sup>226</sup>Ra起源の<sup>214</sup>Bi、②土壤粒子から間隙に放出された<sup>222</sup>Rn起源の<sup>214</sup>Bi、③地下から地表へ放出する<sup>222</sup>Rn起源<sup>214</sup>Bi、④検出器周辺からの散乱<sup>214</sup>Biの4つの成分から構成されている。各成分の寄与率を計算するためには、土壤の密度と間隙率の他、土壤粒子の<sup>226</sup>Ra含有量と間隙の<sup>222</sup>Rn濃度分布の情報が必要である。

今泉他<sup>(11)</sup>は、これらのデータが揃っているニューメキシコ鉱物技術研究所のキャンパスの実験サイトの礫混じり砂質ローム<sup>(42)</sup>の以下の条件で計算を行った。

- a. 地表の平均時間フラックス密度は、0.85～0.11pCi m<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup> (31.45～4.07mBq m<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>)、
- b. 土壤ガス中のラドン濃度は、深度2m以深では、1.4pCi m<sup>-2</sup> (51.8mBq m<sup>-2</sup>) (放出能38%)で、深度0～60cmでは、Fig.7のように変化する<sup>(42)</sup>。図の2本の線は大気圧の高い時と低い時を示している。計算には中間の線を使った<sup>(11)</sup>。

計算を簡単にするために、④の散乱線の影響と土壤粒子の自己吸収は無視した。計算の結果、土壤粒子の<sup>214</sup>Biは423,900pCi (15684.3Bq) (寄与率: 98.5%)、土壤間隙のラドンガスからの<sup>214</sup>Biは約6,500pCi (240.5Bq) (1.5%)、地表の空気中の<sup>222</sup>Rn放出からの<sup>214</sup>Biは約3pCi (111Bq) (0%)であった。土壤ガス中のラドンの影響が、1.5%しかないことは注目に値する。このことは、ラドン濃度が断層を上昇したラドン成分により10数倍（測線Aの最大ラドンガス濃度／低濃度部分の平均値）に変化しても、γ線の計数率は15%程度の増加としか現れないことを意味する。検出器の効率や測定誤差を考えると、増加率は更に低くなり、バックグランドの変動内に隠されてしまうものと考えられる。従って、<sup>214</sup>Biの変動は主に土壤粒子のウラン含有量を示していると考えるのが妥当である<sup>(11)</sup>。

## IV 断層指標としての核種

### 1 ダムサイト断層のγ線放射能探査

Fig.4に示したf1断層を中心に、50mの測線を設定し、5m間隔で携帯用放射能探査装置によるγ線スペクトロメトリーと土中ラドン濃度調査を行った。放射能探査装置は、クリアパルス社製8675型である。測定時間は300秒である。土中ラドン濃度調査は活性炭法を行った<sup>(29)</sup>。活性炭法には、ピコラッド・ラドン(<sup>222</sup>Rn)検出器（米国Accustar Labs社製）が使用された。Fig.8

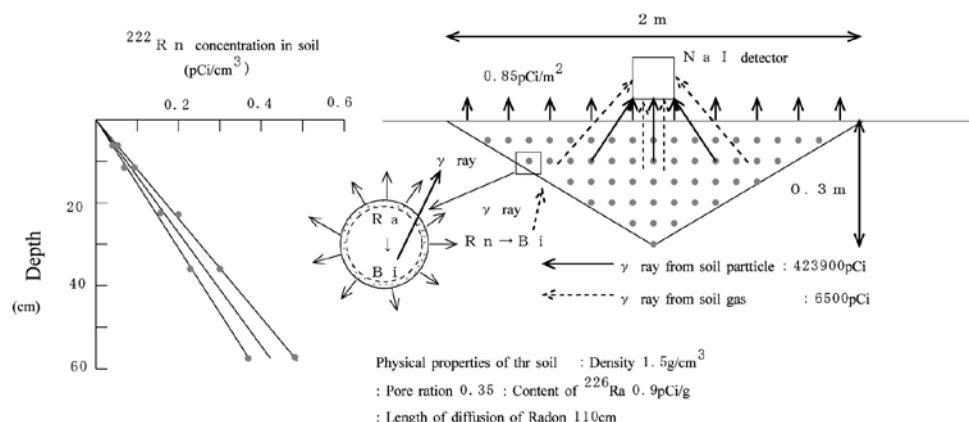


Fig.7 ニューメキシコ鉱物技術研究所内の土壤中のラドン濃度分布図（今泉他（1993）による）  
Physical properties of the soil in the New Mexico Mineral Technological Laboratory (From Imaizumi et al. (1993))

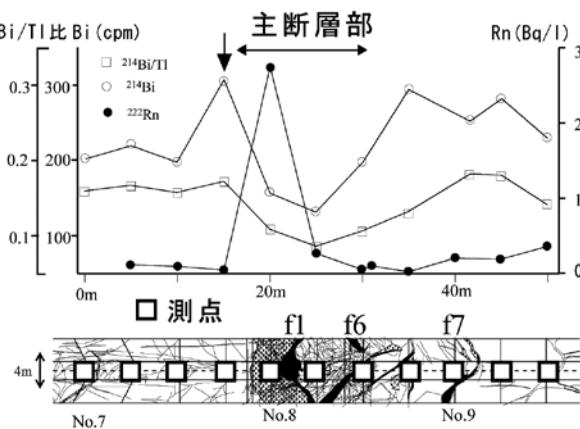


Fig.8 Fダムサイトの放射能と割れ目の関係  
Relationship between radioactivity and fissure in F dam site

上段の図は、 $^{214}\text{Bi}$ ,  $^{214}\text{Bi}/^{208}\text{Tl}$ ,  $^{222}\text{Rn}$  ガス濃度の変化を示す。Fig.8 下段の図は、Fig.4 から D 岩盤と亀裂を抽出した図である。白塗り部分は $C_L$ 以上の岩盤を示す。f1 から f6 断層までの亀裂密集部（主断層部）では、 $^{214}\text{Bi}$  と  $^{214}\text{Bi}/^{208}\text{Tl}$  が低くなっている。これらの低下は  $^{238}\text{U}$  の溶脱により生じていると思われる。主要断層部の両側には、 $^{214}\text{Bi}$  の比較的大きなピークと  $^{214}\text{Bi}/^{208}\text{Tl}$  比の小さいピークがある。特に、図左側  $^{214}\text{Bi}$  ピーク（↓）は平均値より 30% 以上増加している。f1 断層左側のピークは、断層から 10m 程度離れている。一方、 $^{222}\text{Rn}$  ガスの変化は f1 付近に約 3Bq/L のピークを形成している。図から f1 付近のラドン濃度のピークは、 $^{214}\text{Bi}$  分布に影響を与えていないことは明らかであり、今泉他<sup>(11)</sup>の計算結果を支持する。

## 2 埋没断層位置の指標

Fig.9 は、断層位置が文献等から明らかな断層周辺で

の  $^{214}\text{Bi}$ ,  $^{208}\text{Tl}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{214}\text{Bi}/^{208}\text{Tl}$  の変動パターンを示している<sup>(29)</sup>。○は極大パターンを、△は極小パターン、斜め下向きの矢印は減少パターンを示している。5 調査地域の核種の変動パターンでは、断層付近に  $^{214}\text{Bi}$  と  $^{214}\text{Bi}/^{208}\text{Tl}$  の極大があり、 $^{214}\text{Bi}/^{208}\text{Tl}$  の極大位置は公表されている断層位置から 0 ~ 30m 離れている。表で「階段状変化」とは、断層付近で核種の計数が階段状に変化していることを示している。断層からの距離は、0 ~ 100m である。この現象は、異なる地層が断層を境界として接している場合に生じる。しかし、阿寺断層の花崗閃緑岩と花崗岩の境界では検出されなかった。断層が同じ核種濃度の地層で生じている場合は、階段状変化の指標は使えないことに注意が必要である。F ダムサイト調査と同じ活性炭法による  $^{222}\text{Rn}$  ガス濃度異常は、光市断層では検出されなかった。ピーク位置は、断層位置から 0 ~ 180m 離れている。また、 $^{214}\text{Bi}/^{208}\text{Tl}$  の極大位置とは、30m ~ 160m 離れている。限られた例からの結論ではあるが、 $^{214}\text{Bi}$  と  $^{214}\text{Bi}/^{208}\text{Tl}$  の指標とし、その極大位置を探査することにより、数十 m の誤差で埋没断層位置を探査することは可能であると思われる。

## V $\gamma$ 線放射能探査装置

### 1 $\gamma$ 線測定器

環境中には、Table 2 に示すような  $\gamma$  線放出核種が存在する。主要な天然の核種は、 $^{238}\text{U}$  及び  $^{232}\text{Th}$  系列の核種であり、系列を作らない  $^{40}\text{K}$  や陽電子の崩壊による放射線等がある。核実験等のフォールアウトの  $^{137}\text{Cs}$  からの  $\gamma$  線、原子力施設周辺での平常時・異常時の計測では、施設起因の放射性  $^{85}\text{Kr}$ ,  $^{135}\text{Xe}$ ,  $^{41}\text{Ar}$  等の希ガス、放射性ヨウ素等からの  $\gamma$  線がある。

$\gamma$  線を測定する方法は、電離作用を利用した電離箱、

断層名	地質	Bi	Tl	K	$\frac{\text{Bi}}{\text{Tl}}$	階段状変化	ラドン濃度異常	Bi/Tl異常点とラドン濃度異常点との距離
断層	阿寺断層 花崗閃緑岩 花崗岩	○	△	△	○ 20 m	×	○ 60 m	80 m
	網走湖東岸断層群 火山岩類 火山岩類	○	↖	↖	○ 20 m 100 m	○ 180 m	○ 160 m	
	本宮断層 第三紀 第四紀 互層岩	○	△	△	○ 20 m 0 m	○ 120 m	○ 40 m	
断層変動非	棚倉破碎帶断層 花崗岩 マイロナイト	○	△	△	○ 30 m 0 m	○ 0 m	○ 0 m	30 m
	光市断層 花崗閃緑岩 花崗閃緑岩	○	△	△	○ 0 m 40 m	×		
	變成岩 变成岩	○	△	△	○ 0 m 0 m	○ 0 m	×	

○：極大 △：極小 ↖：減少 ○：有り ×：検出されず

数字は公表されている断層位置からの距離を示す

Fig.9 既知断層周辺の放射的核種の変動パターン  
Radioactive anomaly patterns over already known faults

**Table 2** 環境中に存在する  $\gamma$  線放出核種とそのエネルギー  
Gamma ray emitted nuclides and their energy.

Isotope	Energy (KeV)	Isotope	Energy (KeV)
Ux-rays	13.0,13.3	$^{137}\text{Cs}$	661.6
$^{231}\text{U}$	25.6	$^{214}\text{Bi}$	727.2
$^{137}\text{Cs}$	31.8,32.2,36.4	$^{234m}\text{Pa}$	766.6
$^{210}\text{Pb}$	46.5	$^{228}\text{Ac}$	911
$^{234}\text{Th}$	63.3	$^{228}\text{Ac}$	969
$^{234}\text{Th}$	92.6	$^{234m}\text{Pa}$	1001
$^{235}\text{U}, ^{226}\text{Ra}$	185.7,186.2	$^{214}\text{Bi}$	1120.3
$^{212}\text{Pb}$	238.6	$^{60}\text{Co}$	1173
$^{214}\text{Pb}$	295.5	$^{214}\text{Bi}$	1238
$^{214}\text{Pb}$	351.9	$^{60}\text{Co}$	1332.5
宇宙線	511	$^{40}\text{K}$	1460.8
$^{208}\text{Tl}$	583.1	$^{214}\text{Bi}$	1764.5
$^{214}\text{Bi}$	609.3	$^{208}\text{Tl}$	2614.5

GM 計数管, 半導体検出器, 蛍光作用を利用した NaI (Tl) シンチレーション検出器（以下、「NaI 検出器」と称する), 熱蛍光線量計 (TLD), 蛍光ガラス線量計, 写真作用を利用するフィルムバッジがある (Table 3)。これらのうち,  $\gamma$  線のエネルギー ( $\gamma$  線スペクトル) を測定できるのは, NaI 検出器と半導体検出器 (Ge (Li) 検出器等) である。半導体検出器は, エネルギー分解能が高く, 環境に存在する放射性核種の同定と定量に適しているが, 測定中, 液体チッソで検出器を冷却しなければならないなど現場での取扱に細心の注意が必要である。また, 検出効率が低く, 測定に時間がかかるなどの欠点がある。半導体検出器による野外調査例としては, 落合<sup>(38)</sup>が断層調査に, Winkelmann et al.<sup>(47)</sup>が, 核施設からの放射性核種の漏洩のモニタリングに使用しているが, 放射能探査で半導体検出器が用いられるることは希である。

NaI 検出器でも, サーベーメータとして使われる簡易な測定器では, ノイズレベル以上の全エネルギーを測定

していく, 核種を特定できない。この論文では,  $\gamma$  線のエネルギー ( $\gamma$  線スペクトル) を測定 (弁別) できるものを  $\gamma$  線スペクトロメータと呼び,  $\gamma$  線スペクトロメータによって得られるパルス波高分布のことを  $\gamma$  線スペクトルといい,  $\gamma$  線スペクトル測定技術および  $\gamma$  線スペクトルのデータ解析を総称して  $\gamma$  線スペクトロメトリーと呼ぶ。 $\gamma$  線スペクトロメトリーは広い分野において種々の目的で用いられているが, この論文では  $\gamma$  線パルス波高分析を行う放射能探査法に対して使う。これに対しノイズレベル以上の  $\gamma$  線全エネルギーを測定する放射能探査を全  $\gamma$  線放射能探査と呼ぶ。

## 2 NaI 検出器による $\gamma$ 線スペクトル

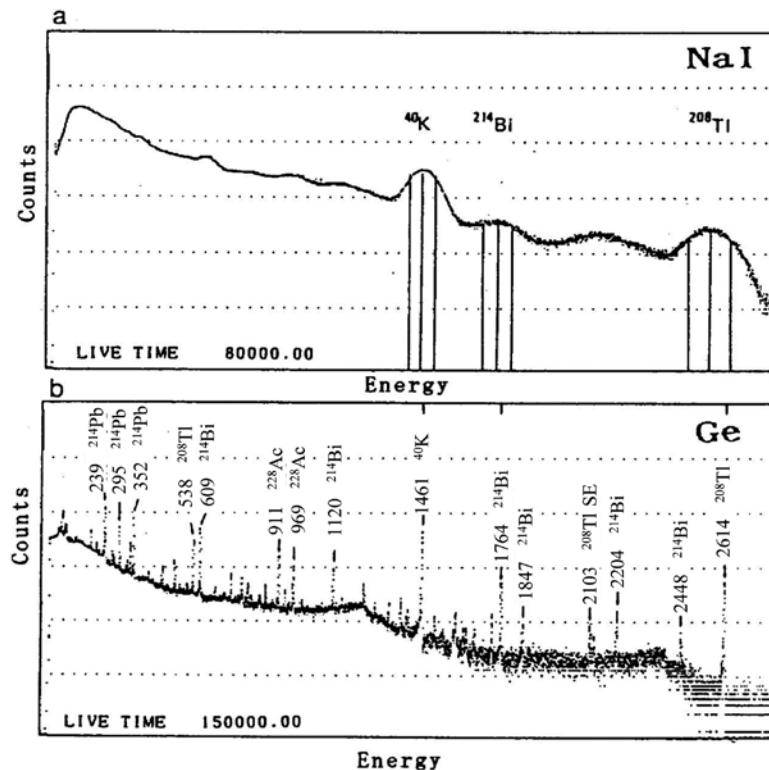
スペクトルの例として, Ge(Li) 半導体検出器と NaI 検出器で測定したつくば市の土壤の  $\gamma$  線スペクトルを Fig.10 に示す。半導体検出器では, 後述するフォトピークは極めてシャープで, 線スペクトルとして検出されている。これより  $^{212}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{208}\text{Tl}$ ,  $^{214}\text{Bi}$ ,  $^{228}\text{Ac}$ ,  $^{40}\text{K}$  が含まれていることがわかる。一方, NaI 検出器では核種のピークは広がりをもつていて, 近接したピークは重ね合わさってしまう。1 核種として同定できるのは  $^{214}\text{Bi}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{208}\text{Tl}$  に限られる。

NaI 検出器は, 半導体検出器に較べてエネルギー分解能が劣るが, 常温で測定ができ, 環境  $\gamma$  線のスペクトルとエネルギー別の線量寄与の測定や線源核種のおよその同定が可能である。NaI 検出器は, 現状では野外の厳しい環境で放射能探査のための  $\gamma$  線スペクトルを測定できる唯一の検出器と考えられている。

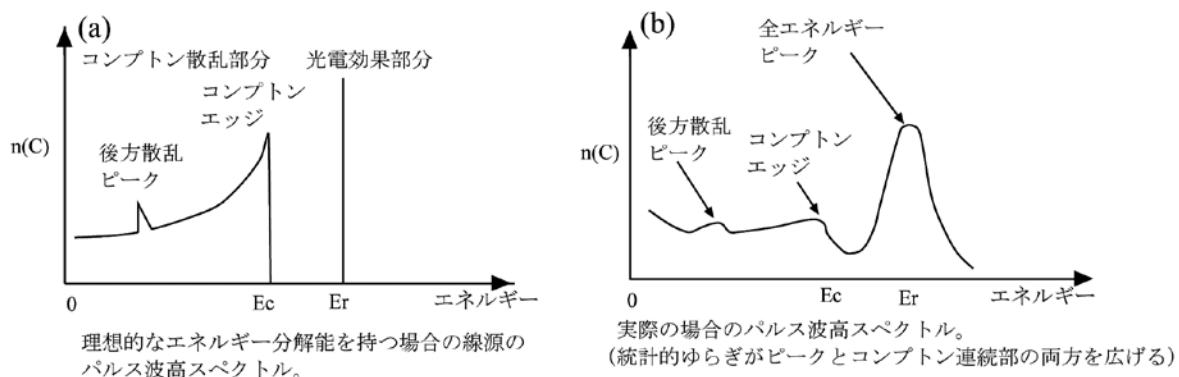
$\gamma$  線が NaI 検出器に入射した際に, 両者の相互作用(光電効果, コンプトン散乱, 電子対生成)によって発生した二次電子が NaI 結晶物質を励起し, この励起から定常状態に戻る際に, 分子がシンチレーションと呼ばれる光を発生する。NaI 検出器は, このことを利用した測定法である。光電効果と電子-陽電子対生成は,  $\gamma$  線の全エネルギー  $E_\gamma$  が電子(および陽電子)に移行するので,

**Table 3** 一般的な放射線の検出方法と検出器  
Typical measurement methods of radiations and detectors

検出方法	検出器名	主な測定対象放射線
電離作用を利用するもの	電離箱	$\alpha$ 線, $\beta$ 線, $\gamma$ 線
	GM 計数管	$\beta$ 線, $\gamma$ 線
	比例計数管	中性子線
	ガスフロー型計数管	$\alpha$ 線, $\beta$ 線
	半導体検出器	$\alpha$ 線, $\gamma$ (X) 線
励起作用(蛍光)を利用する物	Nal (Tl) シンチレーション検出器	$\gamma$ 線
	ZnS (Ag) シンチレーション検出器	$\alpha$ 線
	プラスチックシンチレーション検出器	$\beta$ 線, 中性子
	熱蛍光線量計 (TLD)	$\gamma$ (X) 線
	蛍光ガラス線量計	$\gamma$ (X) 線, $\beta$ 線, 中性子線
写真作用を利用する	フィルムバッジ	$\gamma$ (X線), $\beta$ 線, 中性子線



**Fig.10** つくば市の土壤のNaI 検出器による $\gamma$ 線スペクトル (a) とGe(Li)半導体検出器による $\gamma$ 線スペクトル (b)  
Gamma-ray spectrums of the soil in Tsukuba city by the NaI detector (a) and Ge(Li) semiconductor detector (b)



**Fig.11** 単一エネルギーの $\gamma$ 線が検出器に与えるエネルギー分布を示す模式図  
(a) は、理想的なエネルギー分解能を持つ場合の線源のパルス波高スペクトルである。

(b) は、実際のパルス波高スペクトルを示す模式図である。

Schematic figures showing gamma ray spectrum by nuclide emitted a discriminated energy.

(a) Gamma ray spectrum using ideal detector. (b) Gamma ray spectrum using real detector.

エネルギー分布は  $E_{\gamma}$  に位置するピークとなる。これを全吸収ピーク (full-energy peak) またはフォトピークと言う (以下、「フォトピーク」と言う)。Fig.11 は、単一エネルギーの $\gamma$ 線が検出器に与えるエネルギー分布の理想的な場合と実際の場合を模式的に示した図である。縦軸は計数、横軸はエネルギーである。フォトピークは、理想的には線状の分布であるが、実際は統計的な揺らぎにより、ある広がりを持っている。

一方、コンプトン散乱が起こると、 $E_{\gamma}$  の一部しか電子にエネルギーを移行しないので、散乱された $\gamma$ 線

が検出器の外に逃げてしまった場合には、散乱角度  $\theta$  の分布に応じて連続的なエネルギー分布 (コンプトンプラトー) を示す (Fig.11)。連続分布の「端」をコンプトンエッジ (Compton edge) と言う。コンプトンエッジは、反跳電子の最大エネルギーを表すものであり、 $\gamma$ 線のエネルギーから以下の式で一意的に決められる。

$$E_c = \frac{2Er^2}{2Er + 0.511} \quad \dots \dots \quad (1)$$

ここで、 $E_c$  (MeV) は、コンプトンエッジに対応する

エネルギー、Er (MeV) は  $\gamma$  線のエネルギーである。

コンプトン散乱に基づくブロードな領域には、理論的なX線に基づくピーク、後方散乱に基づくピーク、escape peak が存在するが、NaI 検出器では識別が困難である。

**Table 4** は、単一エネルギーの  $\gamma$  線核種のコンプトンエッジのエネルギーを示すものである。実際には、一回のコンプトン散乱で  $\gamma$  線が検出器から逃げてしまわずに、多重コンプトン散乱 (multi-Compton scattering) を検出器内で起ることがあり、フォトピークとコンプトンエッヂとの間にも連続的な分布が見られ、統計的なゆらぎ等により、ピークとコンプトン連続部の両方をブロードにしている (**Fig.11(b)**)。

野外の一般環境での  $\gamma$  線計測では、天然核種  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  からの多数の  $\gamma$  線と、場合によっては核実験等のフォールアウトの  $^{137}\text{Cs}$  からの 0.662MeV の  $\gamma$  線が重なって観測される。NaI 検出器においては、ピーク領域が明確でないので、放出  $\gamma$  線のそれぞれのエネルギーに対応したピークをひろい出すことは一般に容易でない。そのため、スペクトル分析は、比較的単純な  $\gamma$  線を放出する、限られた数の核種の存在にのみ適用される。一般には、特別のピークに着目するよりも、全波高分布を入射スペクトルに引き戻し、いくつかのチャンネルをひとまとめにしたエネルギー ブロックごとに扱うことが多い<sup>(26)</sup>。放射能探査での標準的な測定では、 $^{40}\text{K} = 1.37 \sim 1.57\text{MeV}$  ( $^{40}\text{K}$  の 1.46Mev のピーク),  $^{238}\text{U}$  または  $^{222}\text{Rn} = 1.66 \sim 1.86\text{MeV}$  ( $^{214}\text{Bi}$  の 1.76MeV のピーク),  $\text{Th} = 2.42 \sim 2.81\text{MeV}$  ( $^{208}\text{Tl}$  の 2.62MeV のピーク) を測定する。落合<sup>(38)</sup>は、断層破碎帯の  $\gamma$  線探査では、ウラン系列の  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Bi}$  からの  $\gamma$  線、トリウム系列の  $^{228}\text{Ac}$ ,  $^{208}\text{Tl}$  からの  $\gamma$  線を指標とすることを提案している。**Table 5** に落合<sup>(38)</sup>が測定しているエネルギー領域を示す。彼の方法では、以下に述べるコンプトン補正を行っていない。

$\gamma$  線のスペクトルは、より高エネルギー核種からのコンプトン連続部と光電効果のピーク部から成る。ピーク位置 (ch: パルスの波高の階層) は、 $\gamma$  線エネルギーにはほぼ比例しており、またピークの面積は  $\gamma$  線強度に比例しているので、スペクトル解析は、光電効果のピークについて行われる。NaI スペクトルの解析方法は、予めエネルギー領域を広い範囲に定め、マトリックス解析やストリッピング法による解析を行うが（文部科学省、1990），放射能探査ではストリッピング法がもっぱら用いられている。

ストリッピング法は補正波高分布の高エネルギー チャンネルに対応する单一ピークのレスポンス関数を補正波高分布から差引き、高エネルギー チャンネルの値をほぼ 0 にするという操作を逐次低エネルギー側に適用する手法である。レスポンス関数は検出系と線源の配置に固有のものである。レスポンス関数を決定する方法には、1)

**Table 4** コンプトンエッジのエネルギー  
Energy of Compton edge from various nuclides emitted gamma ray

Type	E $\gamma$ , MeV	Ecompton, MeV
203Hg	0.279	0.146
22Na	0.511	0.341
137Cs	0.662	0.477
54Mn	0.835	0.639
88Y	0.898	0.699
65Zn	1.115	0.907
22Na	1.275	1.061
24Na	1.369	1.154
40K	1.461	1.244
88Y	1.836	1.612
208Tl	2.614	2.381
24Na	2.754	2.25

**Table 5** 落合(1999)のヘリボーンの測定エネルギー領域  
Energy ranges of gamma ray prospecting by Heri-bone  
(from Ochiai, 1999)

チャネルNo	主な検出核種	検出エネルギー領域
SCA 1	$^{214}\text{Bi}$	$609\text{KeV} \pm 100\text{KeV}$
SCA 2	$^{228}\text{Ac}$	$907\text{KeV} \pm 100\text{KeV}$
SCA 3	$^{40}\text{K}$	$1461\text{KeV} \pm 100\text{KeV}$
SCA B	エア $^{214}\text{Bi}$	$609\text{KeV} \pm 100\text{KeV}$

実験的に決定する方法と、2) モンテカルロシミュレーションによる方法とがある<sup>(26)</sup>。

**Fig.12** は、実験的にレスポンス関数を決定した場合のストリッピング法の例を示す図である。コンプトン連続部のうち散乱した  $^{208}\text{Tl}$  の放射線は低エネルギーの  $^{214}\text{Bi}$  と  $^{40}\text{K}$  のチャンネルのカウントに寄与する。散乱した  $^{214}\text{Bi}$  は、 $^{40}\text{K}$  のチャンネルにのみ寄与する。

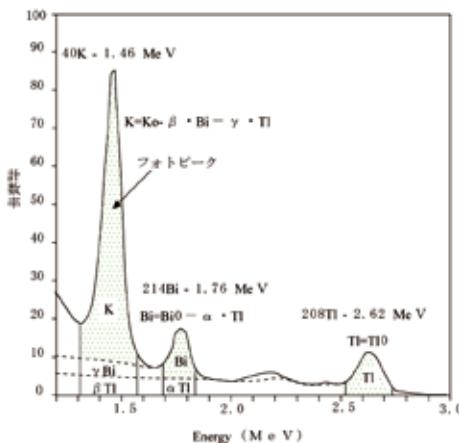
$$\text{Tl} = \text{Tl}_0 \quad \dots \dots \quad (2)$$

$$\text{Bi} = \text{Bi}_0 - \alpha \cdot \text{Tl}_0 \quad \dots \dots \quad (3)$$

$$\text{K} = \text{K}_0 - \beta \cdot \text{Tl}_0 - \gamma \cdot \text{Bi} \quad \dots \dots \quad (4)$$

ここで、サフィックスのゼロは、ウインドウ（各核種ごとに設定したチャンネル (ch) の幅）の全計数率（グロスカウント）を示す。 $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  はストリッピング係数と呼ばれ、ウインドウの幅、検出器の大きさ、数、配置に依存するので、装置毎に各核種の標準線源を用いて実験で求める。コンプトン散乱線の影響を除いた  $^{214}\text{Bi}$ ,  $^{40}\text{K}$  を正味計数率（ネットカウント）と呼ぶ (**Fig.12**)。

ストリッピング係数は、地質、地形等により変化するが、一般的には固定して使われる所以誤差の原因となる。この誤差を補正するため今泉他<sup>(12)</sup>は、**Fig.13** に示す簡易コベル法を開発している。この方法は、 $^{214}\text{Bi}$  と  $^{40}\text{K}$  のエネルギー範囲のチャンネルを固定 ( $X_2 \sim X_1$ ) し、グロスカウント (T) を求める。コンプトン散乱部 (B) は、



**Fig.12** 実験的にレスポンス関数を決定した場合のストリッピング法の例

Correction of the data by Stripping method. The stripping ratios are determined by experiment using standard nuclies.

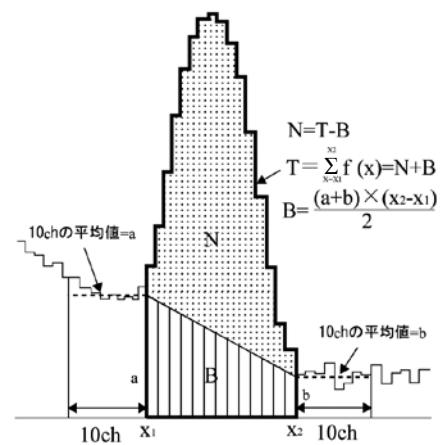
それぞれの核種のピーク両裾野部 10Ch 区間の平均計数 (a と b) とチャンネル区間 ( $X_2 - X_1$ ) から台形面積としてもとめ、ネットカウント (N) を  $N=T-B$  から計算する方法である。

## VI $\gamma$ 線放射能探査装置の発達史

放射能探査の歴史を装置発達史から見ると、1940～1965 年までの全  $\gamma$  線放射能探査装置の第Ⅰ期時代と、1966 年以降の  $\gamma$  線スペクトロメータの第Ⅱ期時代に区分される<sup>(5)</sup>。

放射能探査は、今世紀の初頭にドイツでウラン鉱床探査のために、電離箱を使って行われたのが最初である<sup>(9)</sup>。1944 年には、GM 計数管の  $\gamma$  線放射能探査装置が開発され、エアボーンがカナダで初めて行われた<sup>(5)</sup>。1950 年には、カナダの物理探査学会は、径 ( $\phi$ ) 2 インチ × 高さ 2 インチ (0.1 ドル) の NaI 検出器を開発した。この検出器は、当時使われていたアントラセン検出器の 3 倍の効率 (計数値) を示した。次に、 $\phi 4 \times 2$  インチ (0.4 ドル) の NaI 検出器を開発し、光電子増倍管と結晶の接触部を改良したところ、従来の検出器より 8 倍の効率が得られた。この探査装置を航空機に搭載し、17300 マイル調査し、55 箇所で  $\gamma$  線の異常増を発見したが、ウラン鉱床の発見にはいたらなかった<sup>(5)</sup>。結局、1950 年代のウラン開発のブームでは、エアボーンによる全  $\gamma$  線放射能探査は、大きなウラン鉱床の発見にほとんど寄与できなかった。そのため、ウラン探査ブームが終ったとき、エアボーン用の探査装置の開発がほとんど中止された<sup>(5)</sup>。

1960 年代初期に大気中で核実験が行われるようになると、核爆発によって作られた核分裂生成物の健康に対する影響を調べるためにエアボーンの放射能モニター装置の開発が求められた。これを受け、エアボーン用の  $\gamma$  線スペクトロメータの開発が 1966 年に再び始まった。



**Fig.13** 簡易コベル法によるコンプトン散乱補正の例  
Correction of the data by simplified Cobele method

この時期、半導体が使えるようになったことが幸いして、エアボーンの振動に耐えられる  $\gamma$  線スペクトロメータの組み立てが可能になった。これが第Ⅱ期の始まりである (Darnly, 1972)。

その後、検出器の大型化と分析器の改良が進んだ。Winkelman et al.<sup>(47)</sup> は、12 ドルの NaI 検出器によるエアボーンで、ドイツのウラン鉱山の粉碎処理地の空中測定を行い、 $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  の放射能濃度分布を明らかにした。測定は 100m の高度から、100km/時で飛行し、1 秒毎に測定した。測定前に、大きい湖の上を飛行測定し、この測定値をバックグラウンド (以下 BG) 値とした。測定値を  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Th}$  の放射能濃度に変換するために、カリウム、ウラン、トリウムの一定量を含む大型の較正パッドが開発され、この測定実験でストリッピング係数が決定された。Rybacha et al.<sup>(41)</sup> は、16.7 ドルの NaI 検出器と 256 チャンネルの分析装置で、スイスの原子力施設周辺の人工放射能の漏洩モニタリングを行っている。測定は 90m の高度から、90km/時で飛行し、1 秒毎に測定した。Winkelman et al.<sup>(47)</sup> と同じように、大きな湖上の測定から BG 値と高度減衰係数を求め、空中測定結果を地表の放射能に変換した。彼らは、人工放射性物質の漏洩モニタリング指標として、人工グロスカウント比を提案している。これは、原子力発電所から発生する  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{238}\text{U}$  などが、1.4MeV 以下の低エネルギーであることを利用した方法で、人工グロスカウント比 ( $V_{MMGC}$ ) は、以下の式で表現される。

$$V_{MMGC} = \frac{GC_1}{GC_2} \quad \dots \dots \quad (5)$$

ここで、

$$GC_1 = \sum_{400keV}^{1400keV} I_E (\text{cps}); \quad \dots \dots \quad (6)$$

$$GC_2 = \sum_{1400keV}^{3000keV} I_E (cps); \quad \dots \quad (7)$$

である。

日本における放射能探査は、Hatuda et al.<sup>(8)</sup>が、六甲断層上で、地中ガスの放射能を電離箱により測定したことが始まりである。1955年度に地質調査所は、ウラン探査を目的として、エアボーンとカーボーンによる全γ線放射能探査を開始した。エアボーンは1956年～1960年の間に17地区、61,000km<sup>2</sup>の調査が実施された<sup>(15)</sup>。またカーボーンは1956年～1965年の間に調査面積151,000km<sup>2</sup>が実施された<sup>(10)</sup>。ここで用いられた装置は、Φ5×2インチ(1.9ドル)NaI検出器で、50KeV以上の全エネルギーを測定している。

農業土木試験場（現在の農村工学研究所）では1956年から地下水開発のため埋没断層調査を目的として、放射能探査を開始した。初代の地下水資源研究室長（当時、土地改良第二研究室長）の落合は、最初に埋没断層を地中ガス中の放射能の測定で検出しようと試みた。次に、GM計数管やシンチレーションカウンタを地表面に置いたり、地中孔にいれて、一定時間計測する方法がとられるようになった<sup>(35)</sup>。これらの方法で広域を調査することは困難であったので、落合<sup>(35)</sup>は空間γ線を計測するシンチレーションカウンタを自動車に取り付けて、連続測定できる装置を開発した。最初は、3個のΦ5×2インチ(1.9ドル)NaI検出器を車載し、その合成値を計測していた。その後、5チャンネルγ線スペクトロメータ<sup>(35)</sup>により、大まかなエネルギー弁別が行われるようになつた。これが日本での第2期の開始時期になる。この装置は4つのしきい値を設定し（Table 5）、しきい値間の差からエネルギー範囲を測定するもので、完全なγ線スペクトロメータではない。落合は1947年～1981年まで農業土木試験場に在籍し、放射能を利用した様々な地下水調査法の開発を行つた。

落合の後を引き継いだ木村<sup>(18)</sup>は、1024チャンネル(Ch)のスペクトロメータを開発し、コンプトン散乱線の補正にはストリッピング法を採用した。断層指標核種として<sup>214</sup>Bi/<sup>208</sup>Tl, <sup>214</sup>Bi/<sup>40</sup>Kの核種比を提案している。木村は、カーボーンで4km/時で走行中30秒間の空間γ線を測定するのに12個のΦ5×5インチNaI検出器(19.3ドル)を利用した。その後、地下水資源研究室では、検出器を18個(28.9ドル)まで増加させ、コンプトン散乱線の補正には簡易コベル法が使われている<sup>(12)</sup>。

落合は1981年から（株）エースヘリコプターの空中探査技術研究所へ所長で転任し、ヘリボーンのための放射能探査装置の開発を引き続き行った。彼は、Table 5のエネルギー領域を設定し、多くの調査例を報告している（例えば、落合、1992；1999）。落合は、地表からのγ線検出用として、10.3ドルのNaI検出器2台と、上空のラドンを測定するために10.3ドルのNaI検出器1台（エア<sup>214</sup>Bi

検出器）を使用している。エア<sup>214</sup>Bi検出器は、地表からのγ線の影響を排除するために、検出器の下側は厚い鉛板で遮蔽している。

上述したように放射能探査装置の歴史を概観すると、NaI検出器の大型化の歴史として見ることができる。当初は市販されているΦ2インチ、Φ5インチの検出器が使われ、その後Φ5×5インチ(1.6ドル)を並列させ、検出器の大型化が図られた。最近では、10ドル～16ドルの特殊の大型検出器が用いられている。

## VII プラスチックシンチレータ検出器の開発

### 1 新たな検出器の開発の必要性

NaI検出器の測定誤差を小さくするためには検出器を大きくし、計数率を高くしなければならない。Rybacha et al.<sup>(41)</sup>が使ったNaI検出器は、16.7ドル（密度3.67g/cm<sup>3</sup>とすると61.3kg）であり、周辺機器を含めた総重量は200kg以上になると思われる。落合<sup>(38)</sup>のエアボーンでは、10.3ドルのNaI検出器3台を装備し、1台は地上からのγ線を遮断するために鉛板を敷いている。この場合、総重量は数100kgになるであろう。このような巨大NaI検出器は、特殊仕様であるので高価で、手に入れにくい。

放射能探査は地表から放出されるγ線を測定しているので、同じ容量の検出器なら面積の広い板状の形態が有利である。一般入手できるNaI結晶の寸法はΦ3インチ球またはΦ2×2インチ(0.1ドル)Φ3×3インチ(0.35ドル)、Φ5×5インチ(1.6ドル)である。NaIは結晶であるため、板状に加工することは技術的、経済的に困難である。

次のγ線放射能探査装置に求められるのは、無人ヘリコプターに搭載できる装置の開発であろう。最も搭載量の大きい産業用無人ヘリコプターBの搭載量は60～80kgであるので、探査装置の軽量化が求められる。したがって、今後の放射能探査の検出器には、検出器の大型化と軽量化という、相反する要求が求められる。

Table 6に、よく用いられる無機シンチレータの特性を、Table 7に代表的有機シンチレータの特性を示す。アルカリハライドの比重は、NaIの3.67からCsI(Tl)の4.51まである。その他の無機質の検出器は、比重が4～8である。ガラスシンチレーターは、2.64～3.03でやや軽い。一方、有機液体シンチレータ（NE213）の密度は0.867、有機結晶（アントラゼン）で1.25であり、無機シンチレータに比較して1/3～1/4の密度である。

有機液体シンチレータは、γ線を伴う放射線場での中性子の計測に1960年代から用いられている。有機液体シンチレータでは、Nuclear Enterprise社のNE-213<sup>(注)</sup>が特にγ線弁別性能が優れており、標準的な中性子検出器として使われている<sup>(1)</sup>。しかし、液体シンチレータを野外で使用する場合、その毒性とほぼ室温に近い引火点<sup>(1)</sup>の問題がある。また、シンチレータ容器として、一般に、

**Table 6** よく用いられる無機シンチレータの特性<sup>(7)</sup>  
Specifics of typical inorganic scintillators<sup>(7)</sup>

	比重	最高放出波長 (nm)	屈折率	減衰時間 (μs)	絶対光収率 (光子/MeV)	バイアルカリ光電子増倍管による相対的パルス波高	参考文献
アルカリハライド							
Nal(Tl)	3.67	415	1.85	0.23	38000	1.00	
CsI(Tl)	4.51	540	1.80	0.68 (64%) 3.34 (36%)	65000	0.49	78,90,91
CsI(Na)	4.51	420	1.84	046,418	39000	1.10	92
Lil(Eu)	4.08	470	1.96	1.4	11000	0.23	
その他の遅い無機シンチレータ							
BGO	7.13	480	2.15	0.30	8200	0.13	
CdWO <sub>4</sub>	7.90	470	2.3	1.1 (40%) 14.5 (60%)	15000	0.4	98-100
ZnS(Ag) (多結晶)	4.09	450	2.36	0.2		1.3*	
CaF <sub>2</sub> (Eu)	3.19	435	1.47	0.9	24000	0.5	
活性化物質なしの高速無機シンチレータ							
BaF <sub>2</sub> (高速成分)	4.89	220		0.0006	1400	na	107-109
BaF <sub>2</sub> (遅発成分)	4.89	310	1.56	0.63	9500	0.2	107-109
CsI (高速成分)	4.51	305		0.002 (35%) 0.02 (65%)	2000	0.05	113-115
CsI (遅発成分)	4.51	450	1.80	数 μsまで 多くの成分	多い	多い	114,115
CeF <sub>3</sub>	6.16	310,340	1.68	0.005,0.027	4400	0.04~0.05	76,116,117
Ce活性化高速無機シンチレータ							
GSO	6.71	440	1.85	0.056 (90%) 0.4 (10%)	9000	0.2	119-121
YAP	5.37	370	1.95	0.027	18000	0.45	78,125
YAG	4.56	550	1.82	0.088 (72%) 0.302 (28%)	17000	0.5	78,127
LSO	7.4	420	1.82	0.047	25000	0.75	130,131
LuAP	8.4	365	1.94	0.017	17000	0.3	134,136,138
ガラスシンチレータ							
Ce活性化Liガラス <sup>b</sup>	2.64	400	1.59	0.05~0.1	3500	0.09	77,145
Tb活性化ガラス <sup>b</sup>	3.03	550	1.5	~3000~5000	~50000	na	145
比較用、典型的な有機(プラスチック)シンチレータ							
NE102A	1.03	423	1.58	0.002	10000	0.25	

**Table 7** 代表的有機シンチレータの特性<sup>(7)</sup>  
Specifics of typical organic scintillators<sup>(7)</sup>

物 質	最大発光の波長 (nm)	相対シンチレーション効率 (%)	減衰時間 (ns)	密 度 ( $10^3 \text{kg/m}^3$ )
アントラセン	454	100	~30	1.25
トランヌスチルベン	385	~60	4~8	1.16
NE102	350~450	~65	2	1.06
NE110	350~450	60	3	1.06
NE213 (液体)	350~450	~60	2	0.867
PILOT B	350~450	68	2	1.06
PILOT Y	350~450	64	~3	1.06

もろいガラスが使用されており、これも野外測定器としては問題である。容器を鉄鋼かアルミニウムの金属にすれば、高重量になる。これらの理由から、有機液体シンチレータを野外調査に利用することは困難であると思われる。

プラスチックシンチレータ（以後、PS と言う）は、有機シンチレータを溶媒に溶かした後、これを高分子化して固溶体としたものであり、液体シンチレータと同様の性質を示すが、液体に比べて容器を必要としないという利点がある。PS は細い線（fiber）から薄い板（sheet）まで任意の形状と寸法に加工できる。なにより材料は安価なので、大体積の固体シンチレータが必要な場合、PS 以外選択の余地がないことが多い<sup>7)</sup>。

これらのことから、検出器の大型化と軽量化するための素材としては PS が最も有望であると考えられる。PS は、速中性子の測定も可能であるので、PS 放射能探査器が開発されれば、原子力発電所のモニタリング器としての利用も見込まれる。

## 2 PS 検出器

ある種の有機物には、放射線が入射すると、単一分子のエネルギー準位間での遷移によって螢光現象が生じる。これは分子の種類によって定まるもので、その物理的状態には依存しない<sup>7)</sup>。例えばアントラセンは固体の多結晶状態でも、気体でも、あるいは多くの成分から成る溶液の一部であっても螢光が起きる。この性質は NaI のように規則的な結晶格子の無機結晶シンチレータとは著しく異なる<sup>7)</sup>。

PS 検出器は、ポリスチレンあるいはポリビニルトルエンなどの透明なプラスチックに有機シンチレータ等を溶かし込んだものである。有機シンチレータは、その成分が水素、炭素および酸素という原子番号（Z）の低い成分より成るため、 $\gamma$  線エネルギーに対する光電効果の断面積は事実上ほとんどゼロに等しい。その結果、 $\gamma$  線に対するスペクトルではフォトピークが表れず、コントン散乱による連続スペクトルだけを生じる<sup>7)</sup>。また、 $\gamma$  線の検出効率が低い（NaI 検出器の 1/3 ~ 1/4）。そのため、有機シンチレータは、これまでベータ線スペクトル測定と中性子測定用に用いられてきた（Table 3）。

近年、有機物のシンチレータで、中性子と $\gamma$  線とを識別できるものが見つかり、 $\gamma$  線と中性子との混合場での $\gamma$  線あるいは中性子の検出に用いられている。NE213 や BC501 などの液体シンチレータ検出器に関しては、中性子と $\gamma$  線の弁別法、中性子のエネルギーの測定法、 $\gamma$  線のエネルギーの測定法等に関してたくさんの研究がなされている。Akimov<sup>1)</sup> は、有機液体シンチレータを使用する放射線検出方法をレビューしている。Nordell<sup>32</sup> と Coelho et al.<sup>4</sup> は、NE-213 スペクトロメータを使った光中性子エネルギースペクトルの測定結果を報告している。工藤他<sup>21</sup> は、熱中性子場で混在する $\gamma$  線のエネ

ルギー分布を正確に把握するために、天然の Li フィルターを外側に装着した NE-213 液体シンチレータを用いて、熱中性子場に混在する $\gamma$  線エネルギー分布を測定し、ライブタイムと波高分布の 2 パラメータ測定により $\gamma$  線信号に起因する波高分布だけを切り出し、波高分布を GRAVEL および MLEKE コード（HEPRO program package）でアンフォールディングすることにより、 $\gamma$  線のエネルギー分布を求めている。

PS に関する研究としては、Lipnik et al.<sup>24</sup> が高エネルギー中性子のための低コストプラスチック検出器について報告している。Pozzi et al.<sup>39</sup> は、プラスチック（BC-420）と液体（BC-501）シンチレータの比較分析を行っている。核燃料サイクル機構では、臨界事故の発生を検知し速やかに退避警報を発生させることを目的とする臨界検出器として、 $\gamma$  線を検出する PS と中性子を検出する減速材付き核分裂検出器を使用している。辻村ほか<sup>46</sup> は、中性子と $\gamma$  線とを单一の検出器で検出し、かつ、両者による合計の吸収線量を測定する臨界検出器を開発している。これは、PS と光電子増倍管からなる検出部とを、熱中性子捕獲線コンバータである Cd、さらに厚さ 5cm のポリエチレン減速材で覆うことによって検出器の外部から入射する $\gamma$  線だけでなく、Cd (n,  $\gamma$ ) 反応を利用して間接的に中性子も検出することができる検出器である。ポリエチレン減速材の厚さを 50mm とし、厚さ 1mm の Cd を PS と減速材の境界面と減速材表面から深さ 35mm の二層に配置した構造である。しかしながら、著者らの知る限り、PS で $\gamma$  線のエネルギーを弁別した例はない。

## 3 PS 検出器の開発の課題

これまで PS 検出器が、環境 $\gamma$  線測定に利用されていない理由は、光電子増倍管（PMT）の動作の不安定性（ゲイン変動）が主因となって、信頼性の高い測定器になり得なかったためである<sup>49</sup>。PS 検出器を放射能探査装置の検出器とするための技術的課題は、以下のとおりである。

- 1) ゲイン変動の監視法の開発,
- 2) 放射能探査に最適な PS の選定,
- 3) ライトガイドの形態,
- 4) 中性子と $\gamma$  線とを弁別するための装置,
- 5)  $\gamma$  線スペクトルを解析する技術開発

### 1) ゲイン変動の監視法の開発

検出器のゲインは高圧電源の変動、温度変化その他の影響で生じる。NaI 検出器では、数%から 10%まで変動する。後述するように、PS 検出器では、これらの影響は更に大きい。野外で長時間の環境 $\gamma$  線を測定するためには、ゲイン変動をモニタリングし、ゲインスタビライザーにより変動を自動調整する装置の開発が不可欠である。

NaI検出器のゲイン監視法では、<sup>137</sup>Cs線源を検出器周辺に設置し、このフォトピーク位置を監視することにより、ゲイン変動を監視している。しかし、有機シンチレータ検出器では、スペクトルにフォトピークが生じないので、この方法が使えず、測定結果に高い精度を期待できない場合が少なくない<sup>(27)</sup>。スペクトルのエネルギー校正を十分に高い精度でしかも手軽に行うことのできる方法は未だ確立されていない。

従来から、有機シンチレータ検出器に対して用いられている最も簡単なエネルギー校正法は、適切なRI線源からのγ線を外部照射して得られるコンプトン反跳電子スペクトルのコンプトンエッジをエネルギー尺度として利用するものである<sup>(27)</sup>。しかしながら、実際に観測されるパルス波高スペクトルは分解能による広がりを含むために、スペクトル上でコンプトンエッジを識別することは一般に困難である<sup>(27)</sup>。

スペクトル上のコンプトンエッジの位置を近似的に決定するための方法として、スペクトルの高さがピークに対して一定の比率となる位置を指定する方法がある。これは、スペクトルにおいて、スペクトルピークの高さnpの0.5npから0.9npとなる位置がコンプトンエッジに良く対応するというものである。しかしながら、この方法がどの程度まで正しいものであるか判断する明確な根拠はない<sup>(27)</sup>。門間ほか<sup>(27)</sup>は、パーソナルコンピュータ上に作成したコンプトンスペクトルを対象に、データを

反復法と逐次近似法によりデコンボリューションを行うことで、コンプトンエッジを抽出できることを示した。しかしながら、この検討は仮想的なノイズ発生器を利用した種々の異なるノイズ成分（統計的変動）をもつ擬似コンプトンスペクトルでの検討であり、実際の測定データに基づいていないこと、平滑化の係数はノイズの程度により変える必要があることなどの問題がある。

## 2) 放射能探査に最適なPSの選定

コンプトンエッジの正確な位置は、検出器の寸法、分解能等の種々の要因に依存する<sup>(48)</sup>。そのため、現在市販されているPS（Table 8）から、中性子とγ線とが検出可能な材料を選択する必要がある。PSでγ線の相互作用を起こさせるためには、極端に薄い検出器を作ることはできない。この厚さによりPSの重量がきまるため、プラスチックの質、シンチレーターの種類の選択が軽量化の重要なポイントである。

## 3) ライトガイドの形態

平板状の検出器では、シンチレータ検出部より小さい受光部の光電子増倍管を用いる必要がある。そのため、シンチレータと光電子増倍管との接合部のライトガイドをどのような形態にするかが重要である。

## 4) 中性子とγ線とを弁別するための装置

有機液体シンチレータでは、発光の減衰時定数（3.7ns程度）がエネルギー付与の差によって異なることを利用して、光電増倍管出力回路での粒子の立ち上がり時間差

**Table 8** 市販のプラスチックシンチレータの特性<sup>(7)</sup>  
Specifics of typical organic scintillators on the market<sup>(7)</sup>

Bicron社	光出力アン トラセンに 対する割合*	最高 放出 波長 (nm)	減衰 定数 (ns)	減衰距離 (cm)	屈折率	水素／ 炭素比	密度	軟らかくなる 温度または閃 光の出る温度 (°C)	用 途
BC-400	65	423	2.4	250	1.581	1.103	1.032	70	汎用
BC-404	68	408	1.8	160	1.580	1.107	1.032	70	高速計数用
BC-408	64	425	2.1	380	1.580	1.104	1.032	70	大面積TOF用
BC-412	60	434	3.3	400	1.580	1.104	1.032	70	汎用、大面積、長尺
BC-416	38	434	4	400	1.580	1.110	1.032	70	
BC-420	64	391	1.5	110	1.580	1.100	1.032	70	超高速、シート
BC-422	55	370	1.4	8	1.580	1.102	1.032	70	非常に高速、小形
BC-422Q	11	370	0.7	<8	1.580	1.102	1.032	70	超高速タイミングと計数
BC-428	36	480	12.5	150	1.580	1.103	1.032	70	光ダイオードやCCD用、ホスウィッチ検出器用
BC-430	45	580	16.8	NA	1.580	1.103	1.032	70	Si光ダイオード、赤色光用光電子増倍管
BC-434	60	425	2.2	350	1.590	0.995	1.049	100	汎用
BC-436	52	425	2.2	NA	1.610	0.960	1.130	90	薄い板
BC-444	41	428	285	180	1.580	1.109	1.032	70	dE/dx研究用ホスウィッチ検出器用
BC-452	32	424	2.1	150	1.580	1.134	1.080	60	100keV以下のX線量測定用
BC-454	48	425	2.1	120	1.580	1.169	1.026	60	中性子スペクトル測定用、熱中性子用
BC-470	46	423	2.4	200	1.580	1.098	1.037	65	線量測定用
BC-490	55	425	2.3		1.580	1.107	1.030	70	汎用
BC-498	65	423	2.4		1.580	1.103	1.032	70	β線、γ線用

を分析する粒子弁別が行われている。この方法は、パルス波形弁別（pulse shape discrimination）と呼ばれ、中性子検出器から $\gamma$ 線事象を取り除く方法として検討されている（グレン, 2001）。しかし、PS検出器での有効な方法は開発されていない。

### 5) $\gamma$ 線スペクトルを解析する技術開発

有機液体シンチレータで、 $\gamma$ 線のエネルギーを弁別する一般的な方法は、スペクトルをモンテカルロ法によりアンフォールディングする方法があり、MATXUF, FERDOR/COOLC, SCINFUL-CGなどの計算コードが開発されている。この方法は、検出器形状や測定条件の制約があり、室内の安定した状態での測定で使用されている。しかし、PS検出器の $\gamma$ 線エネルギーを弁別する簡単な方法は開発されていない。

## 4 開発の方法

開発しようとする装置は、飛行機、ヘリコプターなどをを利用して、高空から遠隔で天然に存在する $\gamma$ 線核種( $^{40}\text{K}$ ,  $^{214}\text{Bi}$ ,  $^{208}\text{Tl}$ )、原子力発電の過程で生成される人工 $\gamma$ 線核種と中性子とを測定するための、軽量で、かつ、大型化が可能なPS検出器および周辺装置（測定値を補正等する演算回路等）からなる放射能探査装置である。

著者らは、中性子と $\gamma$ 線とが異なる透過能を有することを利用して、中性子と $\gamma$ 線とを弁別する方法を考案した。すなわち、第1の厚さを有するPSの中性子検出器（1PS）と、第2の厚さを有するPS（2PS）の $\gamma$ 線検出器と、2つのPS間に挟み込まれた中性子吸収部とを有する3層の構造の検出器を特徴とする放射能探査装置である。

この構造では、地上から中性子と $\gamma$ 線が放出されている場において、中性子は1PSに入射し、PSと相互作用を起こし、ほとんどのエネルギーを消耗する。中性子検出器を通過した一部の中性子は、中性子吸収部で吸収される。 $\gamma$ 線は1PSと中性子吸収部とを通過し、2PSと相互作用を起こし、シンチレーションを発する。中性子は、1PSと中性子吸収部でほとんど除去されるので、中性子フリーの $\gamma$ 線のみが2PSに到達するようしなければならない。そのため、1PSの厚さは、前記中性子吸収部と協働して中性子を吸収する厚さ以上にシステムを設計する必要がある。

装置の開発は以下の手順で行った。

- 1) PS検出器の $\gamma$ 線スペクトルの校正方法
- 2) 市販のPSから3種類のPSを選択し、PS検出回路の試作による測定結果から放射能探査用PSの選定
- 3) PS検出器スペクトルの解析法の開発
- 4) 測定システムの設計・試作
- 5) 実証試験

以下に、上記手順に従い、開発結果を記述する。

## 5 PS検出器の $\gamma$ 線スペクトルの校正方法

コンプトンエッジに注目し、以下に説明する方法（「微分法」と称する。）でスペクトルを校正し、基準となる $\gamma$ 線のコンプトンエッジ位置を追跡することによりゲイン変動を監視する。

Fig.14に示す手続きにより微分曲線を求める。1～1024チャンネル(ch)までの各計数データを入力して、

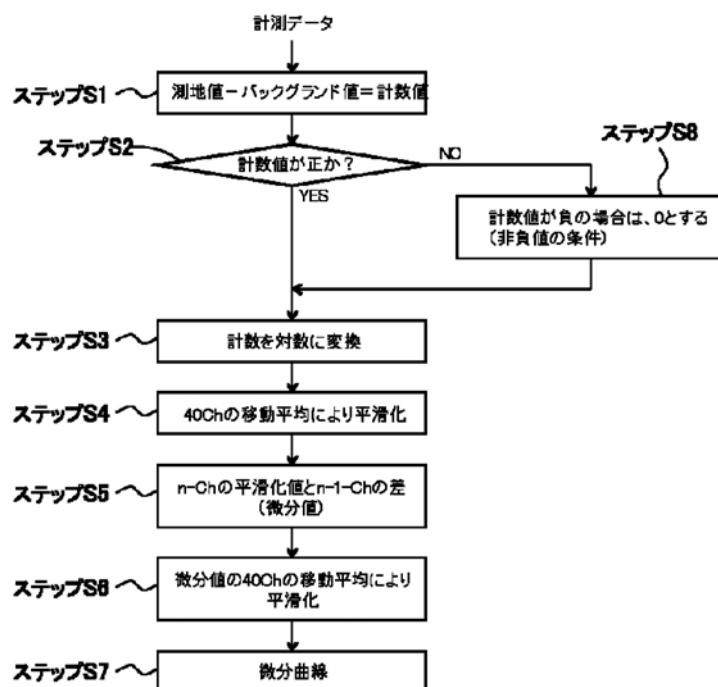


Fig.14 PS検出器の $\gamma$ スペクトルから微分曲線作成する手順を示すフローチャート  
Flow chart of procedures to make a differential curve of gamma ray spectrum by PS detector

まず、ステップS1において、1) 測定値 - BG 値 = 計数値を演算する。次いで、ステップS2において、2) 計数値が正か否かを判定する。ステップS2の判定結果が負及び0の場合には(No), ステップS8に進み、計数値を1とし、ステップS3に進む(非負値の条件)。ステップS2で正の場合には(YES), そのままステップS3に進む。ステップS3において、3) 計数値を対数に変換する。ステップS4において、4) ノイズ除去のために対数変換値の40chの移動平均により平滑化し、ステップS5において、5) n-chの平滑化値とn-1-chの平滑化値の差(微分値)を計算する。次いで、ステップS6において、6) 微分値の40chの移動平均により平滑化する。実際の測定では、測定器周辺に<sup>40</sup>K, <sup>214</sup>Bi, <sup>208</sup>Tlの線源からのγ線を外部照射し、常に3核種のコンプトンエッジを強調し、3核種のコンプトンエッジエネルギーでエネルギー校正する。次いで、ステップS7で、微分法によるエネルギー校正を完了する。以上の処理手順により、PSのパルス波高のエネルギー校正を十分に高い精度でしかも手軽に行うことができる。実際の例は、Fig.17に示した。

## 6 放射能探査のためのPSの選定

### 1) PS検出器候補の選定

シンチレータ中で荷電粒子が失った運動エネルギーのごく一部分が螢光エネルギーに変換され、残りは光にならぬ熱の形で費やされる。放射能探査用のPSを選定する場合、光出力の高いシンチレータが適している。多種類の有機シンチレータにおいて、観測されるシンチレーション光のはほとんどは即発螢光である。しかし、多くの場合、遅発螢光に対応する、より長寿命の成分が観測される。数nsという即発減衰時間に比べて、この

遅い成分は通常数百nsの減衰時間を持っている。放射能探査ではγ線と中性子を弁別し、2成分の有用な情報を導くために、遅い成分を区分可能な減衰距離の長いシンチレータを選択する必要がある。Table 8の市販のPSの特性一覧からこの条件に適合するPS検出器候補を検討した結果、PSからの光出力が高く、減衰距離の長いBC-400(NE-102), BC-408, BC-412(NE-110)の3種類を候補として選定した。

### 2) PS検出器の選定

BC-400, BC-408, BC-412のγ線に対する応答を発光量と減衰の観点から検討してみる。BC-400は発光量であるアントラセン比: 0.65, 減衰量: 250cm(Table 8)からシンチレータの中心からライトガイドまでの長さ125cmを考えて光電子増倍管の受け取る光量の相対値Xは、

$$\text{BC-400 : } X_{400} = 0.65 \times \exp(-125/250) = 0.395$$

である。同じようにBC-408と412とは、

$$\text{BC-408 : } X_{408} = 0.64 \times \exp(-125/380) = 0.461$$

$$\text{BC-412 : } X_{412} = 0.60 \times \exp(-125/400) = 0.439$$

となり、BC-408と412とが、BC-400より大きな光量を得られることが予想された。

次に、BC-400, BC-408, BC-412の3種類のシンチレータを使った25cm × 25cm × 5cmの検出部とライトガイドからなる検出器を試作し、γ線：<sup>137</sup>Cs(0.02MBq)と高速中性子：<sup>252</sup>Cf線源(0.5MBq)の線源を測定し、測定結果と3インチNaI検出器のスペクトルの比較等からγ線測定に関して有効なPSを検討した。また、<sup>252</sup>Cf線源からの距離を変化させた測定から、中性子測定の精度を検討した。

Fig.15は、PSの選定試験に使用した検出システム

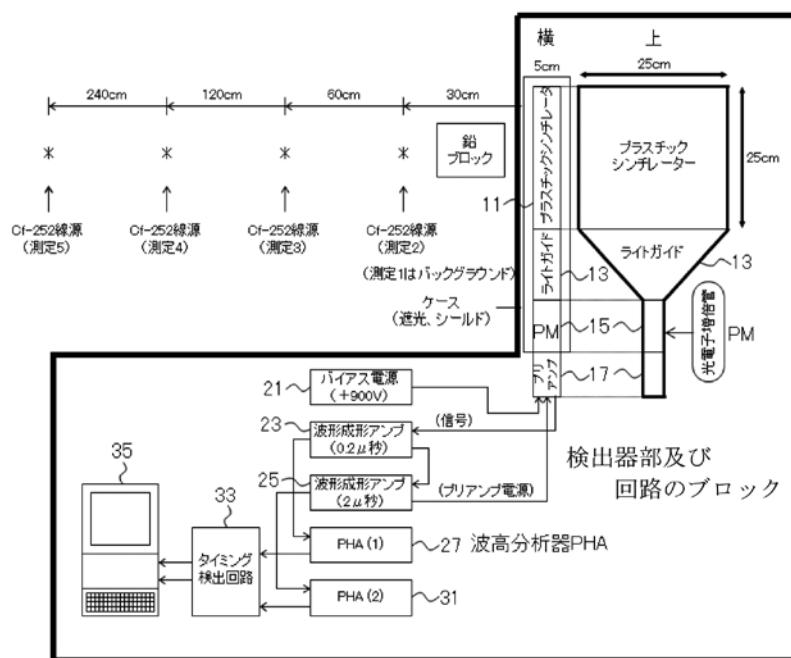
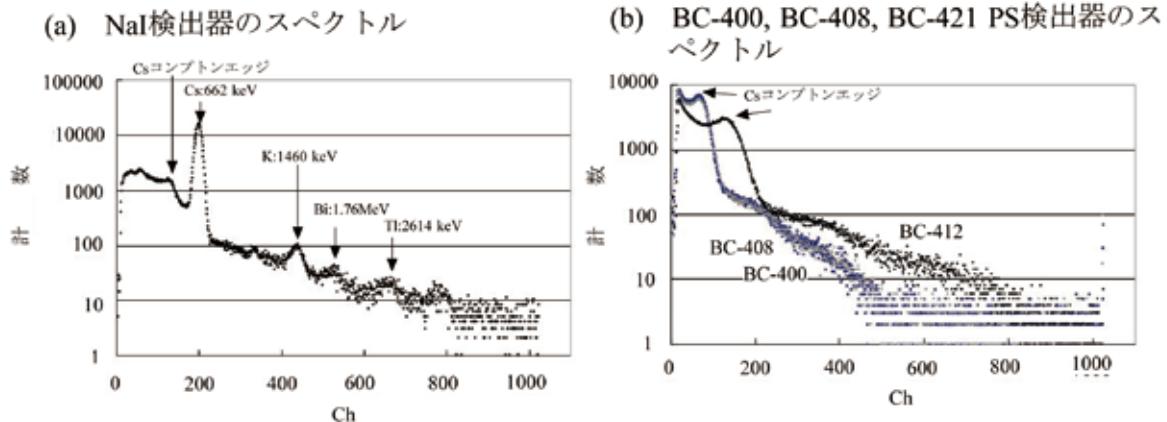


Fig.15 プラスチックシンチレータの選定試験の検出器と波高分析器の回路概略図  
Block diagram of circuit with PS detector and pulse height analyzer for selection of PS materials



**Fig.16** 試作システムによる<sup>137</sup>Cs線源の3インチNaI検出器(a)とBC-400(NE-102), BC-408, BC-412(NE-110)プラスチック検出器(b)の測定スペクトル例(BC400とBC408のスペクトルはほとんど重なっている。)

Typical spectra obtained from a NaI detector (a) and from the PS detector (b). The spectra acquired from BC400 and BC408 were similar.

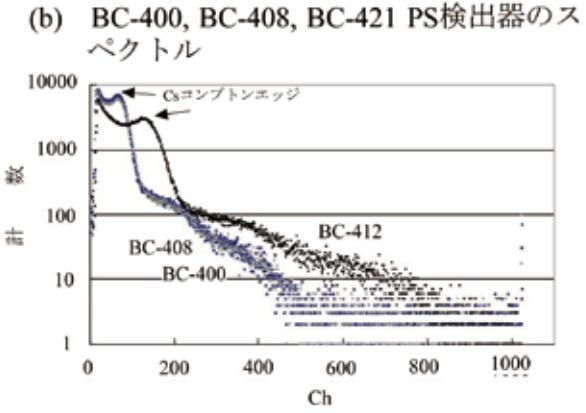
の概略図である。Fig.15の左側上の4つの“\*”印は、<sup>252</sup>Cf線源を4つの位置に置いて測定したことを示している。回路のブロックは、それぞれ、PS11, ライトガイド13, 光電子増倍管15, プリアンプ17, バイアス電源21, 波形整形アンプ23・25, PHA(1)27・(2)31, タイミング検出回路33, データ収集・表示器(パソコン用コンピュータ)35から構成されている。検出器部は、PS検出器部とプリアンプ17からなる。

Fig.16は、NaI検出器とPS検出器とで<sup>137</sup>Cs線源(0.02MBq)を測定した場合の、測定スペクトルデータの例である。これらのスペクトル図は、各チャンネル毎に検出されたデータ数を示す頻度分布図である。横軸はチャンネル(1024ch(1~3MeV)), 縦軸は1000秒間の計数である。NaI検出器のスペクトル(Fig.16(a))では、<sup>137</sup>Cs: 662keVのフォトピークが200chに、コンプトンエッジが130ch付近に現れている。<sup>137</sup>Csからの662keVのフォトピーク以外に、環境同位体である<sup>40</sup>K: 1461keV, <sup>214</sup>Bi: 1764keV, <sup>208</sup>Tl: 2615keVのフォトピークも、430ch, 520ch, 770chに現れている。

BC-412のPS検出器のスペクトル(Fig.16(b))では、130ch付近にコンプトンエッジのピークが存在する。BC-400とBC-408のPS検出器のスペクトル(Fig.16(b))は、ほぼ同じスペクトルを示し、コンプトンエッジが100ch付近に現れている。

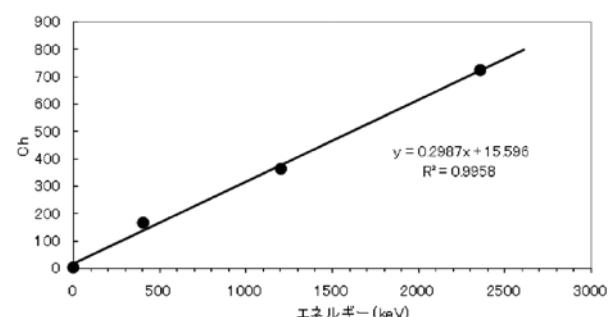
Fig.17は、BC-400, BC-408, BC-412のPS検出器のスペクトルを微分曲線に変換した例を示す。各PS検出器の微分曲線では、<sup>137</sup>Csのコンプトンエッジが明瞭なピークとして抽出されている。また、環境同位体である<sup>40</sup>K, <sup>208</sup>Tlのコンプトンエッジも抽出できていることがわかる。特に、BC-412は、BC-400, BC-408よりも明瞭に<sup>208</sup>Tlのコンプトンエッジを抽出できている。

Fig.18は、BC-412の<sup>137</sup>Cs, <sup>40</sup>K, <sup>208</sup>Tlのコンプトンエッジのエネルギー(横軸)とチャンネル(ch)との校正結果を示す図である。BC-412プラスチック検出器のエネ



**Fig.17** Fig.14の手続きによるPS検出器のスペクトルの微分曲線の例

Examples of differential curves obtained by means of the procedure outlined in Fig.14.



**Fig.18** BC-412 検出器のエネルギー校正結果例

Examples of calibration of BC-412 detectors between energy of gamma ray and channels of pulse height analyzer

ルギー校正においては直線関係があり、例えば、図の場合 ch とエネルギーの関係式の決定係数は 0.996 であり、充分な精度を有している。従って、エネルギー弁別という観点からみた検出器としては、BC-412 が適していると言える。

Fig.19 は、BC-412 検出器に対し、<sup>252</sup>Cf 線源を 30cm, 90cm, 210cm, 450cm だけそれぞれ離した場合の平滑

化したスペクトルの変化と、BGを除去した計数を示す図である。 $^{252}\text{Cf}$ 線源は、数MeVにピークを持つMaxwell型の幅広いエネルギースペクトルを有するので<sup>(30)</sup>、0~3MeVのスペクトルではBGである自然の $^{40}\text{K}$ :1461keV,  $^{214}\text{Bi}$ :1764keV,  $^{208}\text{Tl}$ :2615keVの $\gamma$ 線スペクトルに隠れて明瞭なピークは示さない。中性子からの計数は以下の式(8)で示される。

$$^{252}\text{Cf} \text{の計数} = \sum_{Ch=f}^{Ch=1024} E(Ch) - \sum_{Ch=f}^{Ch=1024} BG(Ch) \dots (8)$$

ここで, fは、カットオフのチャンネルである。E(Ch)は、各チャンネルの計数、BG(Ch)はBGの各チャンネルの計数である。中性子からの計数はFig.19の棒グラフで示したように、距離と計数値との間には明瞭な関係があり、PS検出器で高速中性子が検出できているのがわかる。これらの実験から、検出器としてはBC-412が適していると判定した。

## 7 PC検出器の $\gamma$ 線スペクトル解析法の開発

PSは、 $\gamma$ 線のフォトピークが形成されないので、プラスチック検出器の遠隔操作利用例としては、スイッチとしての利用（中性子や $\gamma$ 線が測定器に入射されたことを検知し、測定装置を起動させるなど）がある程度で、エネルギーを弁別する測定器として利用しようという発想はこれまでなかった。

微分法を使ったエネルギー校正結果に基づき、次の3

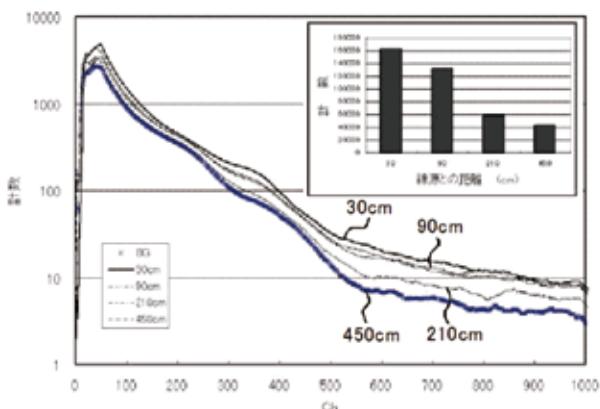


Fig.19 BC-412検出器の $^{252}\text{Cf}$ 線源の距離と計数との関係  
Relationship between distance from standard source of  $^{252}\text{Cf}$  and count rate of BC-412 detector.

つの方法：1)コンプトン散乱法、2)微分曲線面積法、3)人工グロスカウント比( $V_{MMGC}$ )法で $\gamma$ 線のエネルギーを弁別する。

### 1) コンプトン散乱法

2 MeV以下のエネルギー領域のPS検出器のスペクトルは、様々な核種のコンプトン散乱スペクトルが重なって合成されたスペクトルになっている。Fig.20は、環境で測定できる $\gamma$ 線の核種 $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{214}\text{Bi}$ ,  $^{208}\text{Tl}$ のコンプトン散乱スペクトルとそれらの合成スペクトルの概念図である。横軸はチャンネル番号、縦軸は計数( $n(C)$ )である。環境で測定できる $\gamma$ 線の核種は、 $^{40}\text{K}$ ,  $^{214}\text{Bi}$ ,  $^{208}\text{Tl}$ と、原子力施設周辺の $^{137}\text{Cs}$ で構成されていると仮定すると(Fig.20(a)), このパルス波形を核種毎に区分すると、Fig.20(b)のように弁別することができる。

Fig.21は、コンプトン散乱法を説明する概念図である。Fig.21(a)に示すように、1核種からのコンプトン散乱によるパルスは、コンプトンエッジを含む凸部(エッジ部)と、それより低エネルギー側のコンプトンプラター(プラター部)からなっている。合成されたスペクトルで(Fig.21(b)), aからfまでのチャンネル番号(ch位置)がわかれば、核種毎のコンプトン散乱計数を知ることができる。

ここで、aは $^{208}\text{Tl}$ のエッジ部の高エネルギー側の始点のチャンネルである。このチャンネルの計数を $C(a)_{\text{Ti}}$ と書く。aチャンネル以上の高エネルギー部の計数は宇宙線からの $\gamma$ 線の影響である。bは $^{208}\text{Tl}$ のエッジ部の低エネルギー側のチャンネルであり、 $^{214}\text{Bi}$ のエッジ部の高エネルギー側の始点のチャンネルである。このチャンネルの計数を $C(b)_{\text{Ti}}$ と書く。cは $^{214}\text{Bi}$ のエッジ部の低エネルギー側のチャンネルであり、 $^{40}\text{K}$ のエッジ部の高エネルギー側の始点のチャンネルである。このチャンネルの計数を $C(c)_{\text{Bi}}$ と書く。dは $^{40}\text{K}$ のエッジ部の低エネルギー側のチャンネルであり、 $^{137}\text{Cs}$ のエッジ部の高エネルギー側の始点のチャンネルである。このチャンネルの計数を $C(d)_{\text{K}}$ と書く。eは $^{137}\text{Cs}$ のエッジ部の低エネルギー側のチャンネルである。このチャンネルの計数を $C(e)_{\text{Cs}}$ と書く。fはカットオフのチャンネルであり、これより下のチャンネル番号では、計数が急激に減少する。カットオフのチャンネルは測定器に固有のチャンネルである。

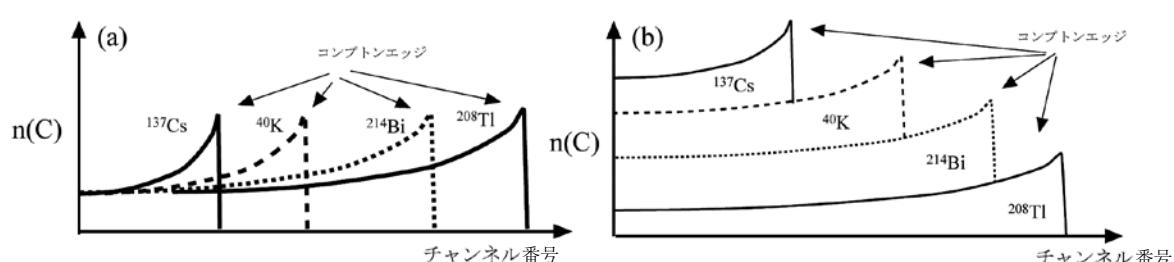


Fig.20 環境で測定できる $\gamma$ 線の核種 $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{214}\text{Bi}$ ,  $^{208}\text{Tl}$ のコンプトン散乱スペクトル(a)とそれらの合成スペクトル(b)の概念図  
Schematic figures showing Compton scattering spectra of environmental  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{214}\text{Bi}$  and  $^{208}\text{Tl}$  (a) and compounded spectrum (b)

a～eのチャンネルは、スペクトルの微分曲線の谷の位置から決定する (Fig.21(a))。 $^{208}\text{Tl}$  のコンプトンエッジ部の計数には、宇宙線からの  $\gamma$  線の影響  $C(a)_{\text{Tl}} \times (a-b)$  があるので、この影響を除去するために、計数から差し引く。 $^{208}\text{Tl}$  のプラトー部分にも、宇宙線からの  $\gamma$  線の影響  $C(a)_{\text{Tl}} \times (b-f)$  があるので、これを差し引く。その結果、は、 $^{208}\text{Tl}$  のみの計数は、下記の式(9)のように表せる。同じように、 $^{214}\text{Bi}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  のネットの計数は、それらの核種より高エネルギーの影響を差し引くことにより、それぞれ、下記式(10)から式(12)のように表すことができる。

$$\begin{aligned} ^{208}\text{Tl} \text{ の計数} &= \left\{ \sum_{Ch=b}^{Ch=a} E(Ch) - C(a)_{\text{Tl}} \times (a-b) \right\} \dots (9) \\ &\quad + \{(C(b)_{\text{Tl}} - C(a)_{\text{Tl}}) \times (b-f)\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} ^{214}\text{Bi} \text{ の計数} &= \left\{ \sum_{Ch=c}^{Ch=b} E(Ch) - C(b)_{\text{Tl}} \times (b-c) \right\} \dots (10) \\ &\quad + \{(C(c)_{\text{Bi}} - C(b)_{\text{Tl}}) \times (c-f)\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} ^{40}\text{K} \text{ の計数} &= \left\{ \sum_{Ch=d}^{Ch=c} E(Ch) - C(c)_{\text{Bi}} \times (c-d) \right\} \dots (11) \\ &\quad + \{(C(d)_{\text{Bi}} - C(c)_{\text{Bi}}) \times (d-f)\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} ^{137}\text{Cs} \text{ の計数} &= \left\{ \sum_{Ch=e}^{Ch=d} E(Ch) - C(d)_{\text{k}} \times (d-e) \right\} \dots (12) \\ &\quad + \{(C(e)_{\text{Cs}} - C(d)_{\text{k}}) \times (e-f)\} \end{aligned}$$

## 2) 微分曲線面積法

微分曲線面積法は、微分曲線によるエネルギー校正後の、コンプトンエッジ部分の微分曲線の面積を計測するものである (Fig.22(a) : 微分曲線面積法の解析原理を示す概念図)。Fig.22(b) は、 $^{137}\text{Cs}$  線源から 1, 2, 3, 4, 5m だけ離れた場合の微分曲線を重ね合わせた例を示す図である。横軸はチャンネル数、縦軸は微分値である。 $^{137}\text{Cs}$  線源からの線量は、Fig21 の d と e チャンネル間の微分曲線式を  $D(\text{Ch})$ , d と e チャンネル間の BG の微分曲線式  $BG(\text{Ch})$  とすると、下記の式(13)で示される。

$$\begin{aligned} ^{137}\text{Cs} \text{ の線量} &= \\ \alpha \times &= \left( \int_e^d D(\text{Ch}) d\text{Ch} - \int_e^d BG(\text{Ch}) d\text{Ch} \right) \dots (13) \end{aligned}$$

ここで、 $\alpha$  は実験から求められる微分面積と線量の間の関係を示す係数である。

## 3) 人工グロスカウント比法

Rybacha et al.<sup>(41)</sup> は、スイスの原子力発電所の放射線漏洩のモニタリングのための指標として、人工グロスカウント比 :  $V_{\text{MMGC}}$  を提案している。彼らはこの指標を NaI 検出器によるスペクトルに基づき、(5)～(7) 式のように定義している。 $V_{\text{MMGC}}$  の分子は、人工放射性同位体の低  $\gamma$  線エネルギーの範囲で、400keV～1400keV の計数の合計値である。分母は、 $^{40}\text{K}$ ,  $^{214}\text{Bi}$ ,  $^{208}\text{Tl}$  と宇宙線からの  $\gamma$  線エネルギー区間 (1400keV～3000keV)

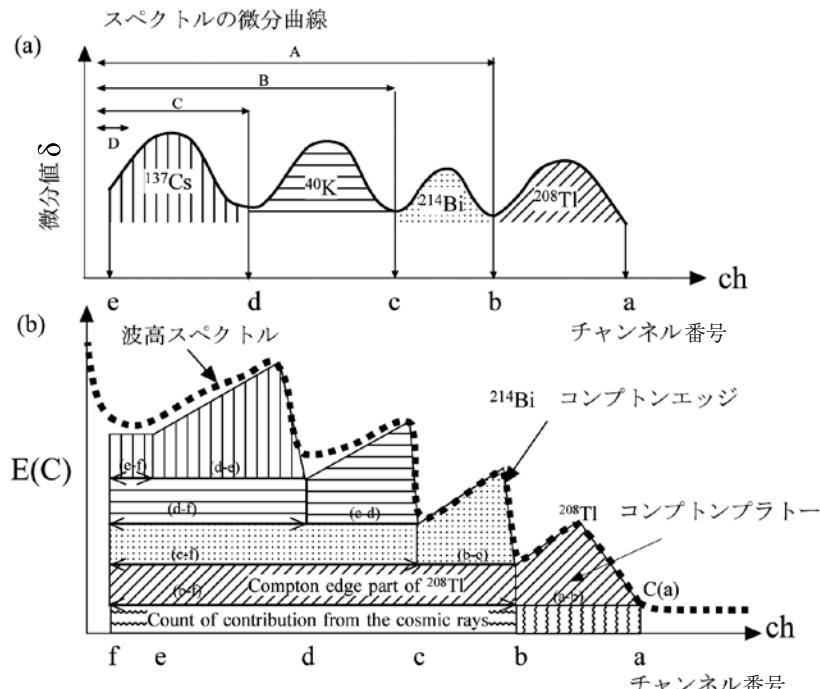


Fig.21 コンプトン散乱法を説明する環境  $\gamma$  線核種の微分曲線とPSスペクトルの概念図

Schematic figures showing the Compton scattering method using differential curves and PS spectrum calculated from environmental nuclides.

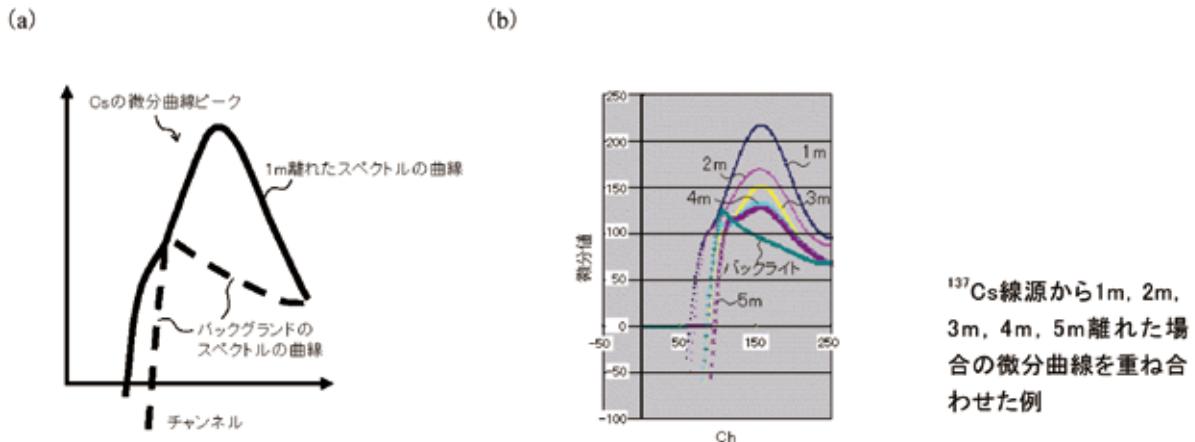


Fig.22 微分曲線面積法の概念図 (a) と解析例 (b)

Schematic figure showing the integral method of differential curve (a) and an example of analysis for differential curves (b).

の計数の合計値である。PS 検出器のスペクトルデータにおける人工グロスカウント比 ( $C_{MMGC}$ ) は、次式で定義される。

$$C_{MMGC} = \frac{\sum_{Ch=d}^{Ch=d} E(Ch)}{\sum_{Ch=f}^{Ch=1024} E(Ch)} \quad \dots \dots \quad (14)$$

$d$  は <sup>40</sup>K のエッジ部の低エネルギー側のチャンネルであり、<sup>137</sup>Cs のエッジ部の高エネルギー側の始点のチャンネルで、これより低エネルギー側が人工放射同位体の低  $\gamma$  線エネルギーの範囲である。

## 8 放射能探査装置のシステム設計・試作

中性子と  $\gamma$  線とを弁別するための装置のシステム構成として、1PS（薄い中性子検出用 PS）－中性子吸収部－2PS（厚い  $\gamma$  線検出用 PS）の3層構造の諸元を決定するために、PS および中性子吸収部の厚さと中性子の検出効率の関係を理論的に検討した。

プラスチックは、水素と炭素とを含んでいる。検出効率  $\varepsilon$  は次の式で計算できる<sup>7)</sup>：

$$\varepsilon = \frac{N_H \sigma_H}{N_H \sigma_H + N_C \sigma_C} \{1 - \exp(-(N_H \sigma_H + N_C \sigma_C)d)\} \dots \dots \quad (15)$$

ここで、添字 H および C はそれぞれ水素および炭素についての値であることを意味している。N は標的核の密度、 $\sigma_s$  はこれらの原子核の散乱断面積、そして d は入射中性子が検出器を通過する長さである。

Fig.23 は、プラスチックが水素と炭素とから構成されているとし、H（水素）断面積と C（炭素）断面積とを、既存の文献<sup>7)</sup>から読みとり、計算した各部分の中性子エネルギーと吸収率との関係図である。プラスチックシンチレータの素材としては、スチレンを仮定した。スチレンは化学式  $C_6H_5C_2H_3$  で、密度  $900\text{kg/m}^3$  である。中性子吸収部にはパラフィンを仮定した。パラフィンは化学式  $CH_4$  で、密度  $745\text{kg/m}^3$  である。PS の厚さは 5mm と

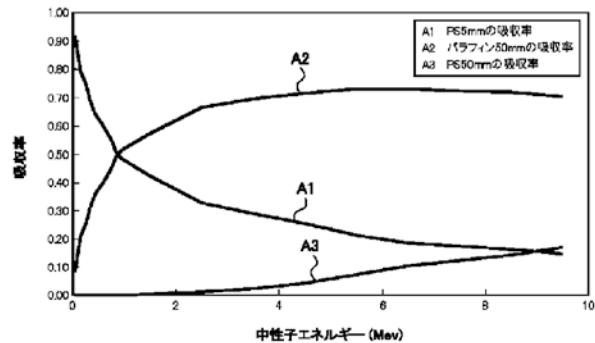


Fig.23 PS5mm厚, パラフィン50mm厚, PS50mm厚に対する中性子吸収計算結果

Calculation results of absorption rate of neutron to PS with 5 mm in thickness, paraffine layer with 50 mm in thickness and PS with 50 mm in thickness

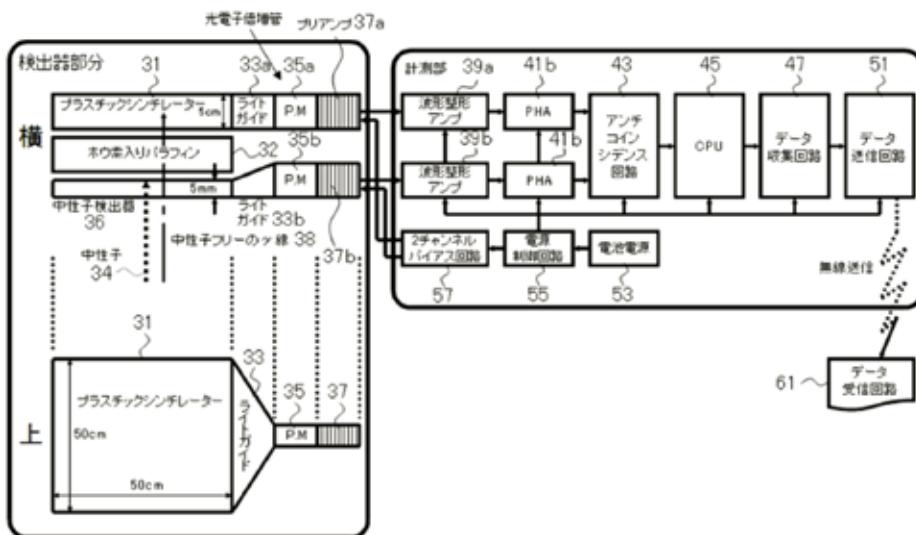
50mm を仮定した。図から 4MeV 以下のエネルギーの中性子のはほとんどは、5mm 厚の中性子検出器 (36 : Fig.24 中の数字を示す、以下同様) と中性子吸収部 (32) とで吸収され (A1・A2)，50mm の検出器 (31) には到達していない (A3) ことがわかる。この結果に基づき、中性子検出器として厚さ 5mm の BC-412PS， $\gamma$  線検出器として厚さ 50mm の BC-412PS とした。中性子吸収部は、ホウ素含有パラフィン層とした。

中性子からの計数は下記の式に基づいて計算する。

$$^{252}\text{Cf} \text{の計数} = \sum_{Ch=f}^{Ch=1024} E(Ch) - \sum_{Ch=f}^{Ch=1024} BG(Ch) \quad \dots \dots \quad (16)$$

ここで、f はカットオフのチャンネルである。E(ch) は、各チャンネルの計数、BG(ch) はバックグラウンドの各チャンネルの計数である。

Fig.24 にシステムの構成を示す。Fig.24 に示す装置は、検出部と計測部との2つの構成に大別される。検出部は、中性子検出用 1PS (36) と  $\gamma$  線検出用 2PS (31) の2検出器と、2検出器 (36・31) の間に中性子吸収部 (32) を挟み込む3層の構造である。Fig.24 の左上図は、検出



**Fig.24**  $\gamma$  線検出部、中性子吸収部、中性子検出部の3層構造の放射能探査装置のシステム構成図  
Block diagram of three-layered PS detector for radioactivity prospecting.

部の側面図であり、左下図は、検出部を上から見た図である。右図は、制御回路（計測部）である。

検出部は、PS（31・36）と、ライトガイド（33a・33b）と、光電子増倍管（PM: 35a・35b）と、プリアンプ部（37a・37b）とからなる。PS（31・36）は、それぞれ $\gamma$ 線と中性子とを光エネルギーに変換する。ライトガイド（33a・33b）は、検出された光を光電子増倍管（35a・35b）へと導く機能を有する。光電子増倍管（35a・35b）は、光信号を電気信号に変換する。プリアンプ部（37a・37b）は、光電子増倍管（35a・35b）の電気信号を増幅する機能を有する。ホウ素入りパラフィン（32）は、5mm 検出器（36）を通過した中性子を吸収させる機能を有する。

計測部は、検出部側から順番に以下のように配置・構成されている。すなわち、計測部は、不必要的ノイズ成分を除去し、以降の回路が信号処理可能になるように、例えば、約 $2\mu$ 秒幅のパルスに整形する波形整形アンプ（39a・39b）で、プリアンプ（35a・35b）からの増幅信号に、2種類のガウシアン波形整形を行う。中性子と $\gamma$ 線との分離能をあげるために、高速波形整形と低速波形整形との両方の整形回路を備えたアンプを配置した。PHA（波高分析器）（41a・41b）は、パルスの波高をADコンバータでデジタル値に変換する装置である。

アンチコインシデンス回路（43）は、PHA（41a・41b）から入力された2つの信号のタイミングを比較して同時に入力されたか、異なるタイミングで入力されたか否かを判別する。

制御回路部（CPU）（45）は、入力された2つの信号の判別とデジタル値から波高分布の記憶を行う。データ収集回路（47）は、例えば一定の時間毎にCPU（制御回路）（45）から、そこに記憶された波高分布のデータを受け取り、後段のデータ送信回路（51）に送る装置である。

2チャンネルバイアス回路（57）は、検出器の直後におかれた光電子増倍管（35a・35b）に対してプリアンプ

（37a・37b）を通して高圧電源を供給する装置である。データ受信回路（61）はデータを受け取り、表示及び記録する装置である。電源制御回路（55）は、電池電源（53）からの入力を各回路が必要な電圧に変換して、各回路に供給する装置である。

信号の流れは、以下のようになる。

- a) 50mm 検出器（31）→ライトガイド（33a）→光電子増倍管（35a）→プリアンプ（37a）→アンプ（39a）→PHA（コンバータ）（41a）→アンチコインシデンス回路（43）→CPU（45）→データ収集回路（47）→データ送信回路（51）→出力。
- b) 5mm 検出器（36）→ライトガイド（33b）→光電子増倍管（35b）→プリアンプ（37b）→アンプ（39b）→PHA（コンバータ）（41b）→アンチコインシデンス回路（43）→CPU（45）→データ収集回路（47）→データ送信回路（51）→出力。

地上からの中性子と $\gamma$ 線とは、最初の検出器である5mm 検出器（36）に入射するが、 $^{137}\text{Cs}$  の 667keV 以上のエネルギーの $\gamma$ 線は 5mm 厚の検出器（36）と中性子吸収部（32）とを通過し、50mm の検出器（31）でPSと相互作用を起こし、シンチレーションを発する。中性子は、5mm 厚の中性子検出器（36）でシンチレーションを発し、ほとんどのエネルギーを消耗する。5mm 検出器（36）を通過した一部の中性子は、中性子吸収部（32）で吸収されるため、50mm 検出器（31）に中性子は到達しない。従って、50mm の検出器（31）には、中性子フリーの $\gamma$ 線のみが到達する。

## 9 ライトガイドの形態

選択したPSを平板状に加工し、シンチレーションを光電子増倍管へ誘導するライトガイドを形成した。一般的には、検出器の1面から光を収集するライトガイドが採用されているが、検出器の2面から光を収集するライ

トガイドとしている。Fig.25に示すように、PSの角部であって2面に接する位置に、ライトガイドとフォトマルとを形成し、2面から光を収集することができる。

## 10 実証試験

### 1) 試作器

Fig.26(b)に試作器の外観を示す。BC-412PS中性子検

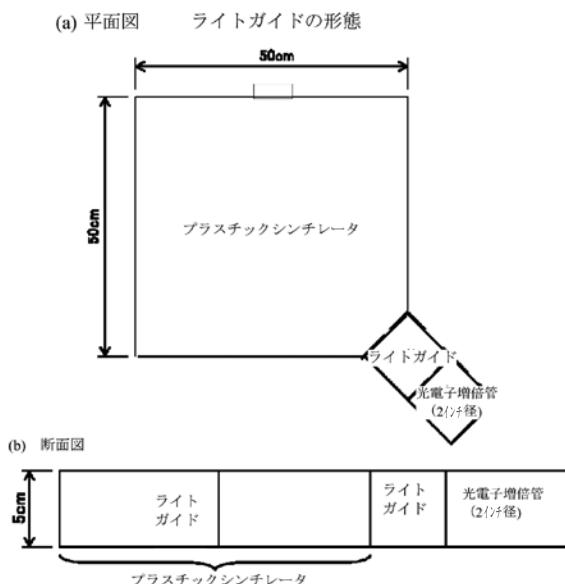


Fig.25 ライトガイドの形態図  
Structural form of light-guide

出器(以下「PS5」と称する。)として、5mm(厚さ)×500mm×500mm, BC-412PSの $\gamma$ 線検出器(以下「PS50」と称する。)として50mm(厚さ)×500mm×500mmのシンチレータと光電子増倍管をライトガイドで接続した。検出器は、外部からの光が入射しないように黒い遮光テープで包装し、シリコンオイルで接合した。中性子吸収部には、10%ホウ素入りポリエチレンブロック(200mm×100mm×50mm)を、検出器間に敷き詰めた。Fig.26(b)に示す写真の0.6m四方の白いシートの下がPSであり、その手前の黒い部分が光電子増倍管とプリアンプである。赤色パネルのものが2チャンネルバイアス電源、緑色パネルのものは2台のアンプである。左のケースには青いパネルのものが2台のPHA、黄色のパネルのものはタイミング回路(出力回路を兼ねる)である。エネルギー校正のために、 $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{208}\text{Tl}$ の線源を測定器付近に置き、線源からの $\gamma$ 線を検出器に外部照射し、これらの核種のコンプトンエッジエネルギーでエネルギー校正を行った。

### 2) 実証試験の方法

実証試験は、高さ9mの上屋屋内プール(50m×25m)の中心に電動リフトで測定システムを吊り下げ、コンクリート床に置いた線源を測定し、 $\gamma$ 線と中性子の分布を観測した(Fig.26(a))。 $\gamma$ 線の線源として $^{137}\text{Cs}$ (1.8MBq)を、中性子の線源として $^{252}\text{Cf}$ 線源(0.5MBq)を、 $^{40}\text{K}$ の線源としてカリ肥料(10袋/10kg, 2.0MBq)を使用した。

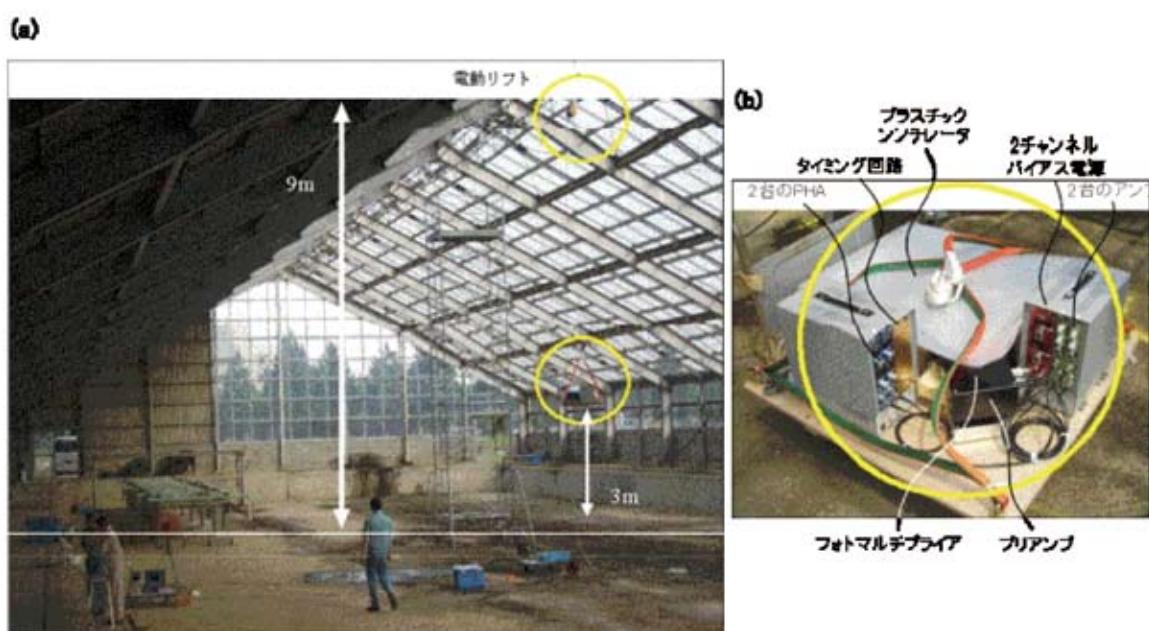


Fig.26 中性子( $^{252}\text{Cf}$ )と $\gamma$ 線( $^{137}\text{Cs}$ と $^{40}\text{K}$ : KCl化学肥料)を使った実証試験 (a) 実証試験の状況、(b) 試作器の外観。図中のバーツ名はFig.24に対応する。

Experiments using standard sources of neutrons ( $^{252}\text{Cf}$ ),  $\gamma$ -rays ( $^{137}\text{Cs}$  and  $^{40}\text{K}$ : potash chemical fertilizer) (a) experimental conditions. (b) the appearance of radioactivity prospecting instrument. The labeled parts of device shown in the figure correspond to the parts of device in Fig.24.

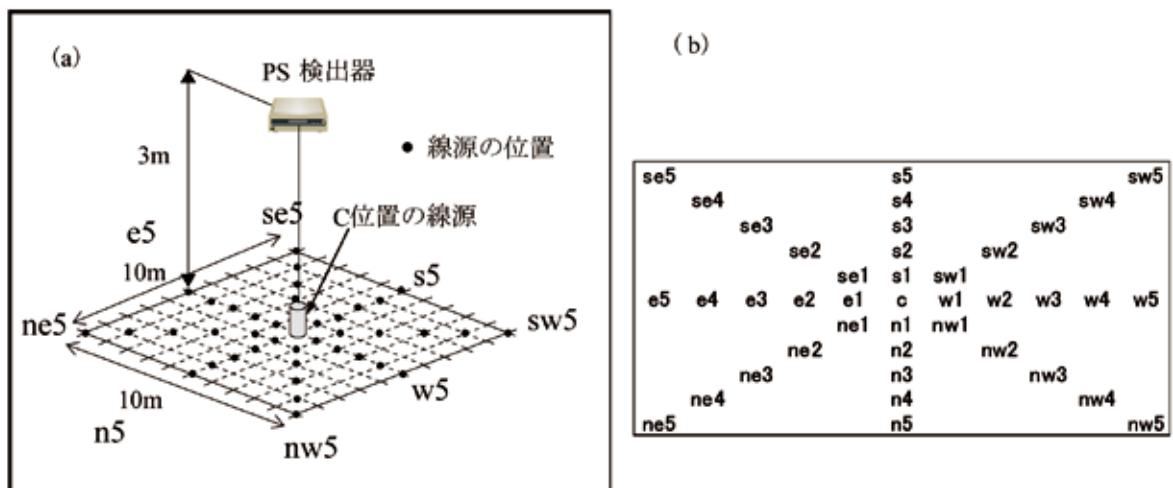


Fig.27 3m上空からの検出器と線源との関係(a)と測点名(b)

Relationship between the detector at a height of 3 meters and standard sources of nuclide, and title of survey points.

最初に測定システムと線源の高度差を変えた $\gamma$ 線の減衰状況を調査した。各測定時間は500秒である。その後、高度差を3mに固定した性能試験を行った。Fig.27(a)は、3m上空の測定システムと線源の関係を示す。測定システムを固定し、線源を移動させた。Fig.27(b)は線源位置の測点名を示している。中心をcとし、2m間隔で、南北(s1～5, n1～5)方向、東西(e1～5, w1～5)方向、北西-南東(nw1～5, se1～5)方向、北東-南西(ne1～5, sw1～5)方向に番号を付けた。総測定点は41点である。各測定時間は200秒である。

### 3) 試験結果

Fig.28は、 $^{137}\text{Cs}$ 線源からの高度が上がることによるCs- $\gamma$ 線の減衰を示す。x軸は $^{137}\text{Cs}$ 線源からの高度差を、y軸は、高度差1mでのコンプトン散乱法、微分曲線面積法、人工グロスカウント比( $C_{\text{MMGC}}$ )法で解析したCs- $\gamma$ 線のエネルギーを1とした場合の、減衰比率である。高度差3mまでは、直線関係で減衰しているが、高度差4m、5mでは、 $\gamma$ 線が屋根で散乱するために、直線関係が乱れてくる。そこで、以降の性能試験では、高度差3mで固定し、地上からの線源の距離により、計数がどのように変化するかを求めた。

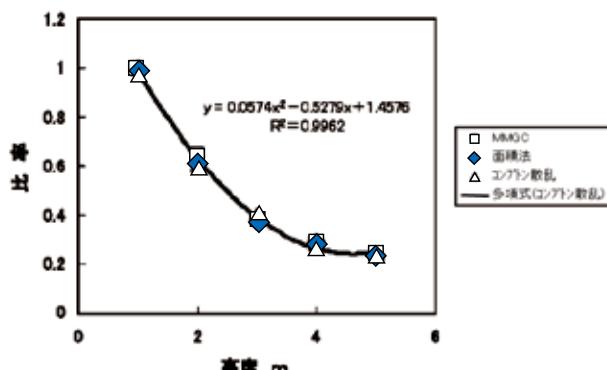
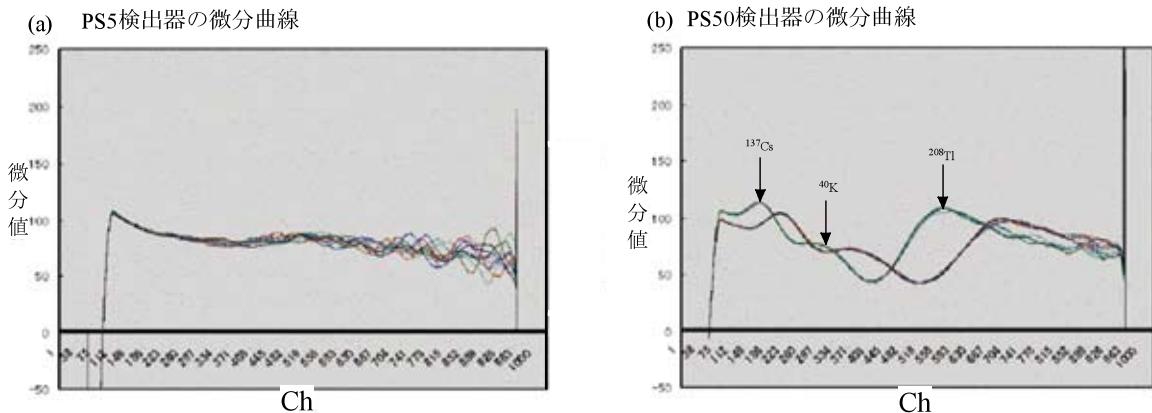
Fig.28  $^{137}\text{Cs}$ 線源からの高度差によるCs- $\gamma$ 線の減衰を示す図  
Attenuation of gamma ray of  $^{137}\text{Cs}$  with the distance from source of  $^{137}\text{Cs}$ 

Fig.29は、3mの高度から、 $^{252}\text{Cf}$ の点線源を、PS50と測定したときの微分曲線例を示す。測定位置ごとの微分曲線は異なる色で示している。PS50の微分曲線(Fig.29(b))には、検出器付近に置いた $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{40}\text{K}$ 、 $^{208}\text{Tl}$ 線源の3つのピークが表れている。微分曲線は、北測線を測定したn1～n5までと、南東方向を測定したse1～se5までの2測線グループにまとめられる。2グループに分けられたのは後述するゲインのジャンプが起きたためである。Fig.29(a)は、PS5で測定したスペクトルの例を示している。PS5の微分曲線には、これらの3線源からの $\gamma$ 線を示すピークは表れていない。このことは、3線源からの $\gamma$ 線はPS5を貫通し、相互作用を示さなかったことを示している。

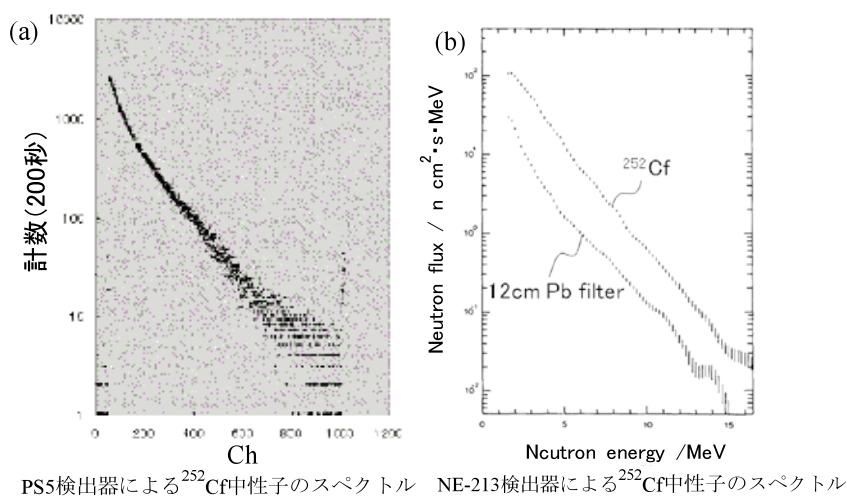
Fig.30はPS5検出器(a)と有機液体シンチレータ(NE-213)検出器(b)で $^{252}\text{Cf}$ 線源からの中性子を測定した時のスペクトルを比較している図である。同様のスペクトルを有することがわかる。

Fig.31は、 $^{252}\text{Cf}$ 点線源の3m上空からの $^{252}\text{Cf}$ の中性子分布図を示す。式(16)により $^{252}\text{Cf}$ 点線源位置が明瞭に測定されている。ここで、Fig.31は、Fig.27の測定位置と中性子線源の関係において、PS5で測定し、式(16)による計数値をZ軸で、測定位置をX、Y軸でプロットした。

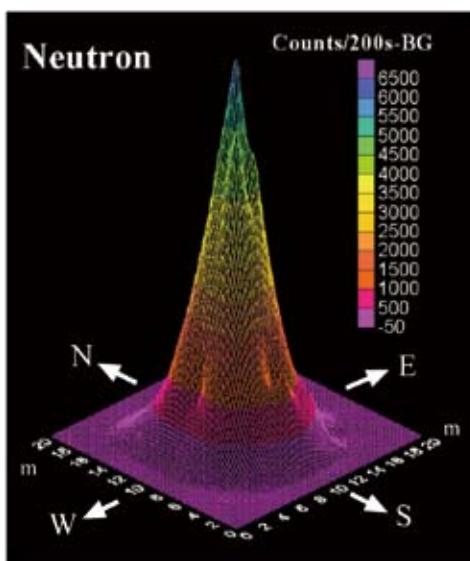
測定中、ガラス張りの屋内プールの室温は、18°C～30°C程度まで変化していた。Fig.32は、試験開始後の時間経過に伴い $^{40}\text{K}$ の $\gamma$ 線のコンプトンエッジのエネルギーチャンネルが、どのように変化したかを示している。 $^{40}\text{K}$ の $\gamma$ 線のコンプトンエッジのエネルギーチャンネルは、170分間で335chから320chに変化している。このような遷移的に生じるゲインの変化では、同一のエネルギーに対応するチャンネルは低エネルギー側へシフトする傾向がある。この変化は、測定条件で遷移的な変化は温度条件だけであるので、測定器周辺の温度変化に関係していると推測される。



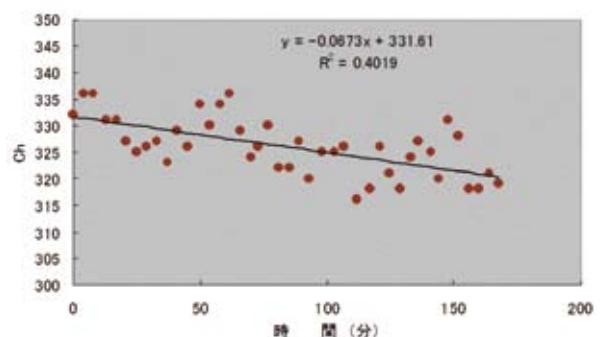
**Fig.29** 3mの高度から $^{252}\text{Cf}$ の点線源をPS5とPS50で測定したときの微分曲線例  
Examples of differential curve measured the source of  $^{252}\text{Cf}$  by PS5 (a) and PS50 (b) directors at the height of 3 meters.



**Fig.30**  $^{252}\text{Cf}$ 線源のPS5検出器(a)と有機液体シンチレータ(NE-213)検出器(b)のスペクトルの比較  
有機液体シンチレータ検出器のスペクトルはNordell(1984)による。  
Comparison of spectrum forms of the source of  $^{252}\text{Cf}$  measured by PS5 and by organic liquids scintillator (NE-213).  
The spectrum of organic liquids scintillator by Nordell(1984).



**Fig.31**  $^{252}\text{Cf}$ 点線源の3m上空からの中性子分布図  
3D distribution diagram of neutrons measured by PS5  
for the  $^{252}\text{Cf}$  neutron source at the height of 3 meters

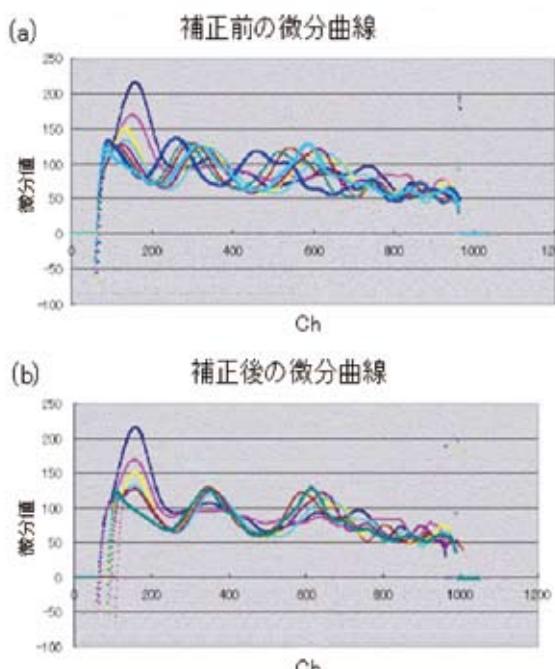


**Fig.32** 測定時間経過とともに40Kコンプトンエッジエネルギーチャンネル位置の変化  
The drift of the channel to the energy of the Compton Edge of 40K with the progress of measurement.

**Fig.33(a)** は、上空 3m から  $^{137}\text{Cs}$  線源を測定した 1 測線の微分曲線を重ね合わせて、ゲインを補正した例を示す図である。測定位置ごとの微分曲線は異なる色で示している。 $^{137}\text{Cs}$  のコンプトンエッジがある 160ch 付近に注目すると、最初の測定である 1m 距離からの微分曲線のピークの位置から、距離が離れるにつれて低エネルギー側にピーク位置がシフトしているのがわかる。**Fig.33(b)** は、 $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{208}\text{Tl}$  のコンプトンエッジのチャンネル位置を最初の測定位置に固定するように補正した結果を示している。このように微分曲線を基にゲインの変動を補正できる。

従来法の NaI 検出器のゲイン補正では、微弱な参照  $\gamma$  線（例えば  $^{137}\text{Cs}$  線源 662keV フォトピーク）を常に測定器に照射しておいて（参照線源を内蔵させる）、このピーク位置を追跡する（最初に、662keV の ch が 100ch であるとすると、この ch が 95ch に減少すれば、測定器の電圧を上げ、増加すれば電圧を減少させる）。しかし、PS では、フォトピークが形成されないために、参照  $\gamma$  線のスペクトルを、一旦、微分曲線に変換し、コンプトンエッジを強調したピークを追跡する。

尚、自動補正システムを用いない場合には、測定後に微分曲線を計算し、参照ピーク位置が常に同じチャンネルになるようにマニュアルで ch 位置を平行移動（100ch のピーク位置が 95ch に移動したら、全てのチャンネルを -5ch 下方修正）する方法で補正しても良い。自動化のために、例えば LED を参照エネルギーとした補正と微分曲線による補正との両方又はいずれかを自動化する方法もある。今後の課題としたい。



**Fig.33** ゲインが漸移的に移動する場合のエネルギー補正例  
(補正前 (a), 補正後 (b))  
Example of adjustment of gradually drifted gain.  
(a) Original differential curves. (b) Corrected differential curves.

**Fig.34(a)** は、ゲインの変動が、ジャンプするように起こっている場合を示す図である。**Fig.34** では 40 回の測定結果を異なる色の微分曲線で示している。ゲインの変動は、3 回生じている。このような場合にも、微分曲線によりゲインを上記と同様に補正することができる (**Fig.34(b)**)。尚、**Fig.34(a)** に示すように、「ゲインの変動が 3 回生じている」との記載は、例えば、セシウムのコンプトンエッジのピークが異なる 3 つの位置にあることを示す。ゲインの変動が生じていなければ、**Fig.34(b)** に示すようにピーク位置 (ch) は同じになる。

ゲイン変動には、測定環境の温度が徐々に上昇し、エネルギー軸が漸移的に数 ch ずつずれしていく場合と、何らかのショック（電圧の変動等が考えられる）により、エネルギー軸が数 10ch、一瞬にしてずれる場合がある。

**Fig.35** は、コンプトン散乱法、微分曲線面積法、人工グロスカウント比法で解析した、 $^{137}\text{Cs}$  の  $\gamma$  線の分布図である。各方法での解析の前に、測定スペクトルは、微分曲線によりゲイン補正を行っている。いずれの手法でも、 $^{137}\text{Cs}$  線源の位置を明瞭に検出していることがわかる。人工グロスカウント比法が、最もピンポイントで  $^{137}\text{Cs}$  線源位置を検知している。微分曲線面積法は、線源位置に鋭いピークを形成しているが、ピークの裾野が広がっている。コンプトン散乱法は、線源位置のピークはやや不明瞭であるが、裾野の広がりは、微分曲線面積法よりも小さいことがわかる。

**Fig.36(a) ~ (d)** は、 $^{137}\text{Cs}$  点線源を 3m 上空から測定したときのコンプトン散乱法による  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{214}\text{Bi}$ ,  $^{208}\text{Tl}$   $\gamma$  線の分布図を示す図である。環境中の  $^{40}\text{K}$ ,  $^{214}\text{Bi}$ ,  $^{208}\text{Tl}$  の  $\gamma$  線の分布はほとんどフラットであり、 $^{137}\text{Cs}$  の分布とは明瞭な違いを示していることがわかる。

**Fig.37(a)** は、KCl 肥料のブロックを 3m 上空から測定したときの  $^{40}\text{K}$   $\gamma$  線の分布図をコンプトン散乱法により解析した結果を示す図である。KCl 肥料は 20kg の袋、10 袋を 2 段に重ねたものであり (**Fig.37(b)**)、点線源になっていないので、 $^{137}\text{Cs}$  線源の  $^{137}\text{Cs}$   $\gamma$  線の分布ほど、明瞭なピークを示さないが、中心で凸の分布を示すことがわかる。

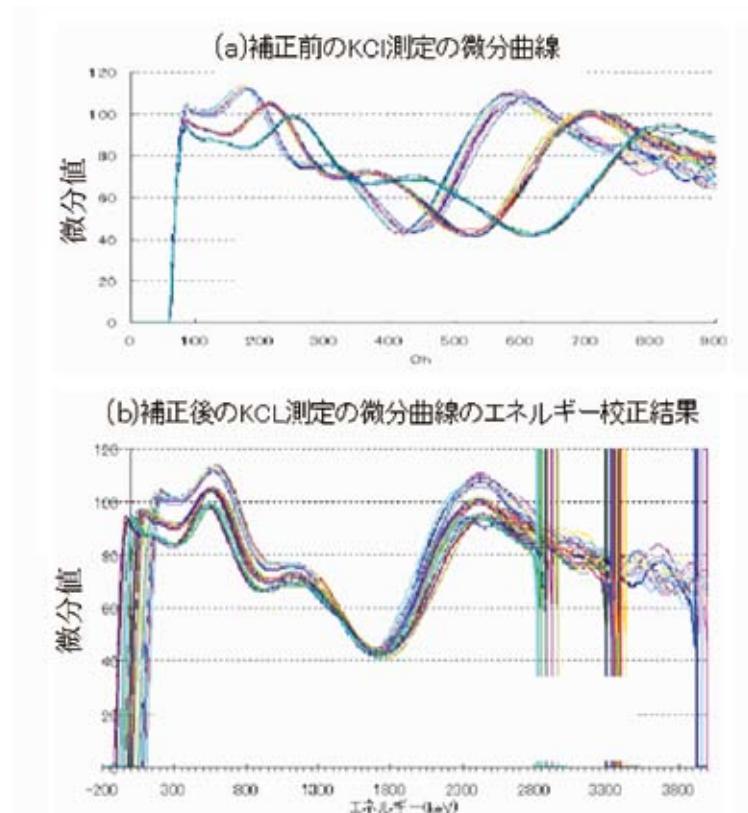
## VIII 結 言

$\gamma$  線放射能探査装置の発達史を概観すると、測定精度を向上させるための検出器の大型化の歴史になっている。現在、 $\gamma$  線放射能探査は、空中から探査するヘリボーンが主流になっている。ヘリボーンによる放射能探査は、断層調査のみならず、核施設からの放射性核種の漏洩モニタリング、事故後の漏洩後の土壤汚染の広がり調査などで、短時間で広域の核種分布を決定できる重要なツールとなっており、今後も検出器の大型化が必要であると考えられる。一方では、無人ヘリコプターに搭載できる軽量な装置の開発も望まれている。この場合、単に検出器

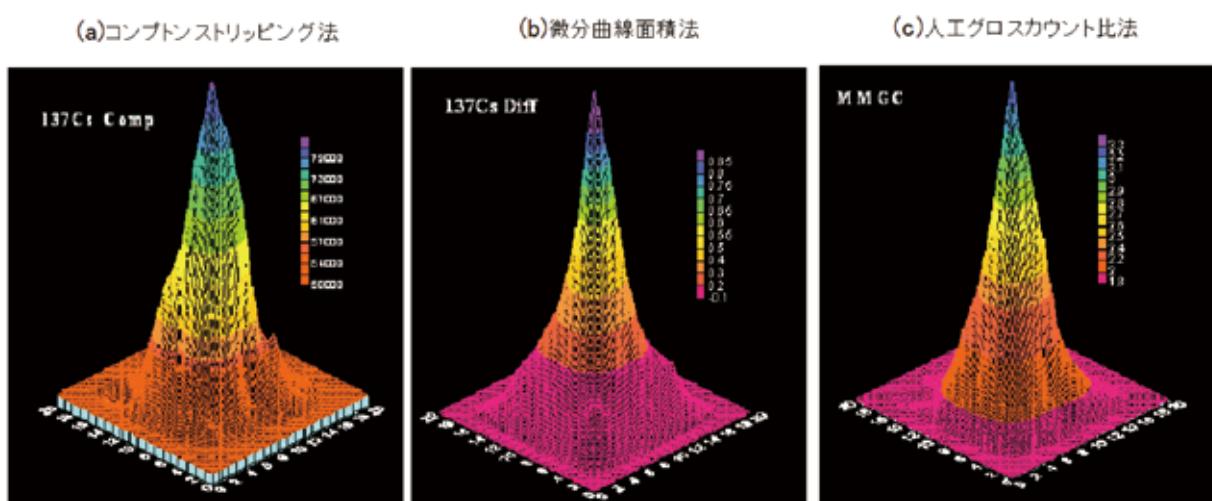
を大型化するのみならず、軽量化も求められる。このような矛盾する要望に応えられる検出器はPS検出器しかない。

この論文では、地下水調査のツールとしての $\gamma$ 線放射能探査の原理を整理するとともに、著者らが進めているPS検出による放射能探査装置の開発状況について述べた。内容は以下のようにまとめられる。

1. 山地の地下水のうち多量の地下水が期待できる地下水は、断層付近に分布する。そのため、山地の地下水開発では、断層位置、規模の把握が重要である。
2. 断層周辺では、ウラン系列核種が濃集する傾向がある。核種弁別ができる $\gamma$ 線放射能探査装置 ( $\gamma$ 線スペクトロメータ) により、 $^{214}\text{Bi}$ 、と  $^{214}\text{Bi}/^{208}\text{Tl}$ を指標として調査することにより、埋没断層位置を探査できる。



**Fig.34** ゲインがジャンプするように移動する場合のエネルギー補正例（補正前 (a)、補正後 (b)）  
Example of adjustment of discontinuously drifted gain. (a) Original differential curves. (b) Corrected differential curves.

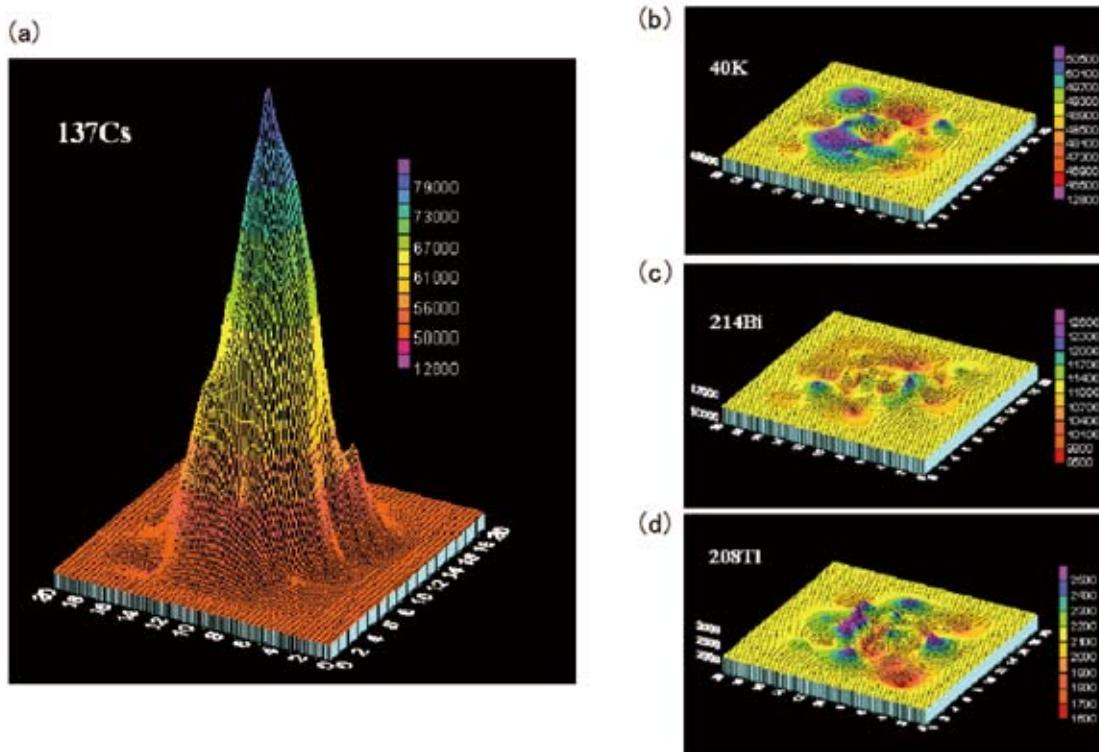


**Fig.35**  $^{137}\text{Cs}$ 点線源を3m上空から測定したときのコンプト散乱法 (a)、微分曲線面積法 (b)、人工グロスカウント比法 (c)によるCs- $\gamma$ 線の分布図 (X軸Y軸の関係はFig.31と同じである)  
3D distribution diagrams of gamma ray of  $^{137}\text{Cs}$  analyzed by methods of the Compton scattering, the integral of differential curve and man-made gross count ratio when PS50 detectro at the height of 3 meters mesured  $^{137}\text{Cs}$   $\gamma$ -ray source.

3. 放射能探査装置の歴史は、測定精度向上のための NaI 検出器の大型化の歴史としてまとめられる。当初は 1 ドラム以下の容量の NaI 検出器が使われ、現在では、10 ドラム～16 ドラムの指摘の通り修正しました。大型検出器が用いられるようになってきた。現在、放射

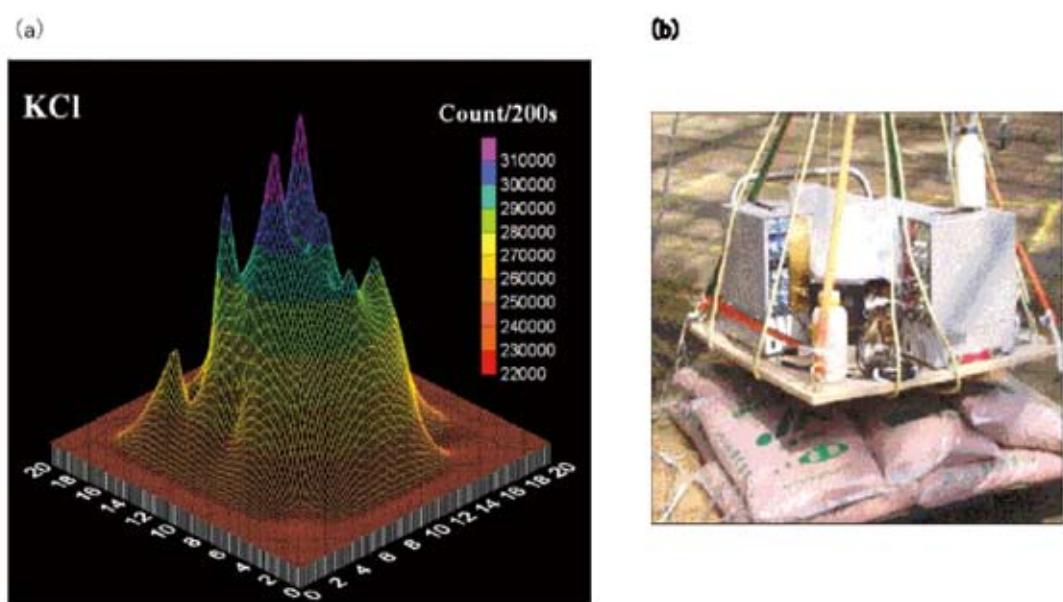
能探査のための  $\gamma$  線スペクトロメータ検出器としては、NaI 検出器が主流である。

4. 今後の探査装置の開発では、検出器の大型化と軽量化が求められる。この要求に応えられる素材として、PS を選定し、実用的な検出器を試作した。



**Fig.36**  $^{137}\text{Cs}$ 点線源を3m上空から測定したときのコンプトン散乱法による $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{214}\text{Bi}$ ,  $^{208}\text{Tl}$   $\gamma$  線の分布図である(a～d)。(X軸Y軸の関係はFig.31と同じである)

3D distribution diagrams analyzed  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{214}\text{Bi}$ , and  $^{208}\text{Tl}$  by method of Compton scattering when PS50 detector at the height of 3 meters measured the gamma ray source of  $^{137}\text{Cs}$ .



**Fig.37** KCl肥料を3m上空から測定したときのコンプトン散乱法による $^{40}\text{K}$   $\gamma$  線の分布図 (a) と $^{40}\text{K}$   $\gamma$  線源： $\text{KCl}$ 肥料の外観 (b) (X軸Y軸の関係はFig.31と同じである)

3D distribution diagrams(a) analyzed  $^{40}\text{K}$  by method of Compton scattering when PS50 detctor at the height of 3 meters measured the gamma ray source of  $^{40}\text{K}$  and the appearance of potash chemical fertilizer (b).

5. 試作された検出器の実証試験により、次のことが明らかになった。
- 1) 中性子検出用 PS5 と  $\gamma$  線検出用 PS50 の 2 検出器の間に、中性子吸収部を挟み込む 3 層構造の測定システムにより、中性子 -  $\gamma$  線が弁別できる。
  - 2) PS50 のスペクトルの微分曲線によりゲインをモニタリングし、ゲインを補正することにより、安定して  $\gamma$  線が測定できる。
  - 3) コンプトン散乱法、微分曲線面積法、人工グロスカウント比法により  $\gamma$  線のエネルギー弁別が可能である。

実証試験は、単純な線源に対する応答から測定器の性能を実証したものであり、実際に野外調査で使用するためには更に複雑な線源や測定条件による試験が必要であるが、今回の実証試験により PS 検出器を放射能探査の検出器として利用可能であることを検証することができた。

### 謝 辞

本研究の PS 検出器の開発は、文部科学省原子力試験研究費により実施されたものである。閲読者 B の丁寧な査読に感謝する。

注) Nuclear Enterprise 社の NE-213 は、生産を中止している。同等の機能を有するものが米国バイクロン社製 BC501 である。

### 参考文献

- 1) Akimov, Yu. K. (1996): Nuclear Radiation Detectors Based on Liquid Organic Scintillators (Review) Instruments and Experimental Techniques, 39, (3), 315-348
- 2) Ambronn, R. (1928): Element of Geophysics, as Applied to Explorations for Minerals, Oil and Gas. New York: McGraw Hill Book Co., 123-129
- 3) Carroll T. R. (1981): Airborne Soil Moisture Measurement Using Natural Terrestrial Gamma Radiation, Soil Science, 132 (5), 358-366
- 4) Coelho, P.R.P., Da Silva, A. A. and Maiorino, J.R.(1989): Neutron energy spectrum measurements of neutron sources with an NE-213 spectrometer, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 280, 270-272.
- 5) Darnly A. G.(1972): Airbone gamma-ray survey techniques, Uranium Prospecting Handbook, The Institution of Mining and Metallurgy, 174-211.
- 6) ドミニコ, P.A.・シュワルツ, F.W. (大西有三監訳) (1995) : 地下水の化学 I - 地下水の物理と化学 - . 土木工学社, 235p.
- 7) グレン F. ノル (木村逸郎, 阪井英二訳) (2001) : 放射線計測ハンドブック第 3 版, 931, 日刊工業新聞
- 8) Hatuda Z., Matsuzawa A and Kamei K. (1942): The reflection of underground structure on the radio-activity of soil air, Sci. Rep. Geol. Mineral. Inst. Kyoto Univ., 1, 1-10
- 9) 初田甚一郎 (1953) : 放射能探鉱 . 物理探鉱, 6 (3・4), 131-137
- 10) 堀川義夫 (1969) : 自動車放射能探査による放射能強度分布 -特に花崗岩類の  $\gamma$  線強度について-, 日本におけるウランの産状(その 2), 地質調査所報告, 232, 365-395
- 11) 今泉真之・竹内睦雄・小前隆美 (1993) : 長野県山口村の阿寺断層の土壤ガス中の  $^{222}\text{Rn}$  濃度と  $\gamma$  線スペクトロメトリーの違いについて, 応用地質, 34 (1), 1-13
- 12) 今泉真之・奥山武彦・小前隆美・浜田浩正 (1995) : VLF-EM 法と放射能探査による 1888 年磐梯山爆裂カルデラ内の断層系調査, 応用地質, 36, 5, 322-338
- 13) 今泉真之・石田 聰 (2001) : 環境地質調査ツールとしての  $\gamma$  線スペクトロメトリー, 環境地質学シンポジウム論文集, 11, 235-240
- 14) Israel H. and Bjornsson S. (1967): Radon ( $^{222}\text{Rn}$ ) and thoron ( $^{220}\text{Rn}$ ) in soil air faults: Zeitschrift. Geophys., 33, 48-64
- 15) 岩崎章二 (1969) : 空中放射能探査, 日本におけるウランの産状 (その 2), 地質調査所報告, 232, 353-358
- 16) 神田祐太郎 (1979) : 弹性波探査結果より見た阿寺断層の破碎帶, 物理探鉱, 32(4), 1-6
- 17) 片山信夫 (1961a) : 総説, ウラン・その資源と鉱物, 朝倉書店, 1-12 : 40-53
- 18) 木村重彦 (1987) : 地表の自然ガンマ線による温泉開発位置の探査法について, 温泉科学, 37, 73-92
- 19) 木村重彦・高野 彰・五十嵐生男 (1990) : 携帯用自然ガンマ線測定装置による割れ目の解析, 応用地質, 31(4), 187-194
- 20) Kristiansson K. and Malmqvist L.(1982): Evidence of nondiffusive transport of  $^{222}\text{Rn}$  in the ground and a new physical model for the transport, Geophysics, 47, 1444-1452
- 21) 工藤勝久・武田直人・越川誠一・豊川弘之・瓜谷章 (2001) : 熱中性子場に混在する  $\gamma$  線スペクトル測定, 日本原子力学会「2001 年秋の大会」, E53, 204
- 22) Lane A. C. and Bennett W. R. (1934): Location of a fault by radioactivity, Beitr. angew. Geophys, 4, 353-357
- 23) Latham A. G. and Schwarcz H. P. (1989): Review of the modelling of radionuclide transport from U-series disequilibria and of its use in assessing the safe disposal of nuclear waste in crystalline rock, Appl. Geochem, 4, 527-537

- 24) Lipnid P, Bol A, Gilot J F, Leleux P, Macq P. (1991): A low-cost plastic detector for energetic neutrons. Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A, 305(1), 158-161
- 25) Lawson R. T., Short S. A., Davey B. G. and Gray D.J.. (1986):  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  and  $^{230}\text{Th}/^{234}\text{Th}$  activity ratios in mineral phases of a lateritic weathered zone. Geochim, Cosmochim. Acta, 50, 1697-1702
- 26) 文部科学省 (1990)：放射能測定法シリーズ 20, 空間  $\gamma$  線スペクトル測定法, 159, 財団法人日本分析センター
- 27) 門間正彦・山下幹雄・五十嵐隆士・加藤和明・稻田哲雄 (1999)：ノイズとボケを伴う放射線スペクトルにおける特徴の抽出に関する研究－ステップエッジを抽出するためのデータ平滑化とデコンボリューション法の検討－, 茨城県立医療大学紀要, 14, 43-54
- 28) 中野政詩 (1991)：土の物質移動学, 189, 東京大学出版会
- 29) 二平 聰・今泉眞之 (1999)：放射能探査法の測定原理と調査事例, 農業土木学会誌, 67, 1183-1190
- 30) 日本アイソトープ協会 (1999)：中性子による計測と利用, 260, 丸善株式会社
- 31) Nielson D. L, Linpei C, and Ward S. H (1990) Gamma-ray spectrometry and radon emanometry in environmental geophysics, Geotechnical and Environmental Geophysics, Vol.1, Society of Exploration Geophysics: 219-250.
- 32) Nordell B. (1984): Measurement of photoneutron energy spectra from tin, lead and uranium using an NE-213 neutron spectrometer, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 224, 547-556
- 33) 農林水産省監修 (2003)：世界のかんがいの多様性－持続的な水使用と健全な水循環の形成に向けて, 68
- 34) 太田猛彦 (1992)：山地の地下水, 森林水文学 (塚本良則編), 157-164, 文永堂出版
- 35) 落合敏郎 (1965)：放射能式地下水探査法, 234, 昭晃堂
- 36) ——— (1992)：リモートセンシング（選択 gamma線）による地下水脈の検出とその水量測定（1）, 地下水技術, 34(2), 9-13
- 37) ——— (1992)：リモートセンシング（選択 gamma線）による地下水脈の検出とその水量測定（2）, 地下水技術, 34 (3), 1-11
- 38) ——— (1999) : 活断層のガンマ線探査, 156, リベル出版
- 39) Pozzi S.A., Mullens J. A. and Mihalczo J.T. (2004): Analysis of neutron and photon detection position for the calibration of plastic (BC-420) and liquid (BC-501) scintillators, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 524, 92-101
- 40) Rijsberman, F. R.(2006): Water scarcity: Fact or fiction?, Agricultural Water Management, 80, 5-22
- 41) Rybacha, L. B. Bucher, G. Schwarz (2001): Airborne surveys of Swiss nuclear facility sites, Journal of Environmental Radioactivity, 53, 291-300
- 42) Schery D. H., Gaeddert D. H. and Wilkening M. H. (1984): Factors Affecting Exhalation of Radon From a Gravelly Sandy Loam, J. Geophys. Res., 89, 7299-7309.
- 43) 田中和宏 (1993) : 平成元年度シンポジウム予稿集－活断層の調査法と解釈, 応用地質学会, 15-26
- 44) Tanner A. B. (1964): Radon migration in the ground: A review, Natural Radiation Environment, Univ.Chicago Press, 161-190
- 45) Tanner A. B. (1980): Radon migration in the ground: A supplementary review, Natural Radiation Environment III, Symposium Proceedings, US DOE, NTIS Report CONF-780422, 1, 5-56.
- 46) 辻村憲雄・吉田忠義・石井雅人 (2005)：中性子・ $\gamma$  線用臨界検出器の開発, サイクル機構技報, 28, 65-66
- 47) Winkelmann I., Thomas M. and Vogl K. (2001): Aerial measurements on uranium ore mining, milling and processing areas in Germany. Journal of Environmental Radioactivity 53, 301-311
- 48) 山下幹雄 (1981) : 有機シンチレータによるパルス波高スペクトルにおけるコンプトン端位置を決定する新しい方法. 放射線. 1981 ; 8(3) , 98-115
- 49) ———・河田 燕 (1983) : 有機シンチレータ検出器による  $\gamma$  線吸収線量率の高精度絶対測定（1）基礎技術と予備実験. 電子技術総合研究所兼報, ; 47 (9/10), 96-107
- 50) 吉村辰朗・松本宏彰 (1994) :  $\gamma$  線測定で見る断層破碎帯－本質的問題と今後の課題－, 土と基礎, 42 (5), 41-46

# Development of Radioactivity Prospecting Device with Plastic Scintillator

IMAIZUMI Masayuki, YOSHIMOTO Shuhei, TSUCHIHARA Takeo,  
ISHIDA Satoshi, UCHIYAMA Sadayuki and YUUKI Youichi

## Summary

A large amount of undeveloped groundwater may still be left in the rocky mountainous areas of Asia and Africa. A location of buried fault is of particular concern for the development of groundwater resources in the rocky mountainous areas because groundwater tend to occur around the fault. However, these groundwater resources are unevenly distributed around buried fault zones. The prospecting methods to accurately locate buried fault zones for development of groundwater resources in the rocky mountainous region has thus been needed. Radioactivity prospecting by means of gamma-ray spectrometry using the NaI detector is a geophysical prospecting method that can detect buried fault zones and has been successfully used as an important tool in Japan during the past ten years, but there are still several problems to solve such as the empirical unederstanding principal of detecting buried fault by radioactivity prospecting, and development of high efficient and cheap detector.

The buried fault in the dam-site where the surface soil was stripped showed that many springs were observed along the fracutures in granodiorite of CM and CH levels on the both sides of the main fault zone. The radioactivity prospecting across the main fault zone showed that  $^{214}\text{Bi}$  and  $^{214}\text{Bi}/^{208}\text{Tl}$  decrease over the main fault zone. These phenomenons are interpreted as the leaching of the uranium. The fluctuation of  $^{222}\text{Rn}$  concentration showed the peak at the point near the f1 fault.  $^{222}\text{Rn}$  concentration over the areas of springs showed the low concentration. The high  $^{222}\text{Rn}$  concentration did not have any influence on  $^{214}\text{Bi}$  and  $^{214}\text{Bi}/^{208}\text{Tl}$ . This can be explained by the parent nuclides of radon,  $^{238}\text{U}$  and radium ( $^{226}\text{Ra}$ ). The indexes of  $^{214}\text{Bi}$  and  $^{214}\text{Bi}/^{208}\text{Tl}$  measured by  $\gamma$ -ray spectrometry are useful to detect the location of unknown buried fault.

We developed a new radioactivity prospecting device featuring a PS, which is lightweight, easy-processing and inexpensive compared with conventional NaI detectors. Experiments showed that the three-layered PS detectors and the analysis method used here accurately measured the distributions of fast neutrons and also discriminated between  $\gamma$ -rays of different nuclides. These results do indicate that PS can be used for radioactivity prospecting, thus potentially providing substantial advantage over the currently employed NaI detectors, although additional tests with more complex spectra are needed to more completely test the device and methodology.

**Keywords :** *groundwater investigation, groundwater resources, buried fault zones, fracture,  $\gamma$ -rays*