

海底核物理探査—英国の現状を中心に—

中井 順 二¹⁾

1. はじめに

鉱物資源とくに産業社会に重要不可欠な鉱物のうち陸上産に依存するものは次第に枯渇しつつあり、この情勢の帰結として海底鉱物鉱床開発のための調査あるいは探査が重要視されはじめてから久しい。

海底鉱物鉱床の特徴は熱水鉱床を除けばその形成の過程の結果として、海底にうすい層として広くひろがって分布産出することである。漂砂鉱床であるモナザイト砂は大陸地塊から流出した碎屑物として広く分布するし、深海底で化学的な付着作用によって形成されるマンガンノジュールもこの種の代表的なものであろう。

本来鉱床は海底下の岩石内に潜頭鉱床として胚胎、賦存するものであろうが、現状での探査は大陸棚や深海底の表面の鉱床に集中されている。これはその探査が現在の技術の能力の範囲内にあるからである。海底深部の鉱床の探査は、陸上における技術を海底下という厳しい条件のもとに適用するとすれば克服すべき問題が多すぎるであろう。

海底表面に分布する多くのタイプの鉱床への核物理探査の適用はその有効探査深度が50cm ぐらいに制限されることや、岩石の物理的な記載を一次的な目標にしているという点で合理的であり、よくマッチした探査法といえよう。

地表、坑井内、空中において各種の核物理的技術が鉱物資源探査のため開発され、適用されてきている。これらのうちには天然ガンマ線測定技術、人工放射性同位元素による散乱ガンマ線測定技術、中性子による誘起ガンマ線測定技術などがとくに広く用いられている。天然ガンマ線法や中性子誘起ガンマ線法は資源開発あるいは地質学上重要な元素の分析技術として開発されているが、近年曳航式スペクトロメータ（ガンマ線用）の開発にともなって海底探査に適用されるようにまで発展している。この種の海底調査は西欧諸国とくに英国において盛んで

大陸棚を対象とした成果が多く報告されている。

天然ガンマ線用の曳航式スペクトロメータによる海底調査は広範囲を迅速かつ系統的に調査しようという利点があり、岩石学的、地球化学的な結果がえられ広く適用されてきた。これは放射性鉱物を含む鉱床の発見や、その賦存のポテンシャルティを評価するのに有効な手段となっている。

中性子誘起ガンマ線を利用するための曳航式スペクトロメータはシステムとしてかなり複雑となる。しかし近年海底調査において、興味ある非放射性鉱物の濃集状況や空間的分布を知るのに用いられている。

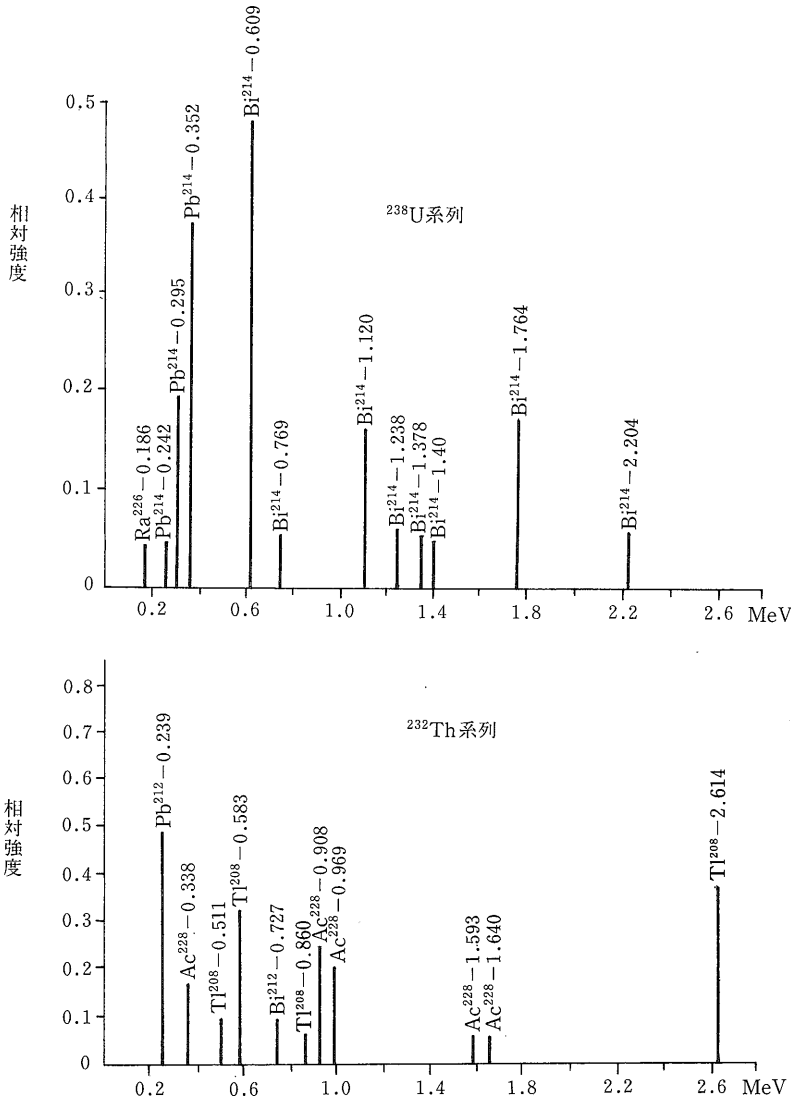
本稿では曳航式スペクトロメータを使った天然ガンマ線測定、中性子誘起ガンマ線測定による海底調査法についてえられた情報にもとづいて、とくに英国の現状を中心として若干のべてみたい。

2. 天然ガンマ線法

すべての岩石はそれらが含む天然放射性元素の崩壊にもとづく放射線を発生する。野外で測定する場合は多くの場合ガンマ線を対象としている。岩石のガンマ線強度は天然放射性元素の性質や含有率に依存するが、これらは岩種によって変わる。たとえば含有率は花崗岩や海底粘土では比較的大きい。一方玄武岩など塩基性岩や石英砂岩などでは小さい。この様に岩石、地層はこれらが放射するガンマ線の強度やエネルギーを測定することによってかなりの場合同定しうる。ウラン、トリウム鉱石はそのガンマ線をエネルギー分析することにより明確に同定しうる。このことは天然放射性元素が随伴する鉱石についても可能である。たとえば経済的に見込のある燐灰土は普通～150ppm のウランを含有しており、ガンマ線のエネルギー分析が同定の手段となりうる。

地球上の岩石の天然ガンマ線は3つの主な源から放射される。放射性崩壊物を伴い崩壊系列をなすウラン・ト

1) 地質調査所 地殻物理部



第1図
放射平衡にある²³⁸U系列, ²³²Th系列により放射される0.1MeV以上のおもなガンマ線.

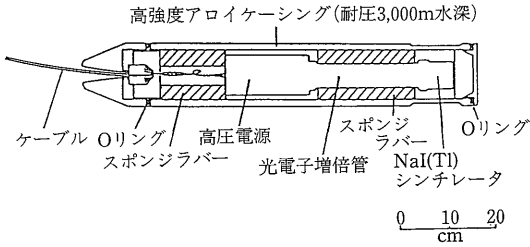
リウムと ⁴⁰Kである。

第1図は²³⁸U, ²³²Thの崩壊系列からの主要なガンマ線のエネルギースペクトラムである。各系列は放射平衡にあるとしているので、どちらの系列においてもガンマ線のどれかの強度を決めると存在するウラン、トリウムの含有率を決めることができる。実際には²³⁸U系列の²¹⁴Biからの1.76MeVのガンマ線、²³²Th系列の²⁰⁸Tlからの2.61MeVのガンマ線、⁴⁰Kが電子捕獲により⁴⁰Ar壊変するときの1.46MeVのガンマ線が一般に測定の対象としてえらばれている。²³⁸U, ⁴⁰Kの場合はその存在比からU, Kの含有率を決めることができる。

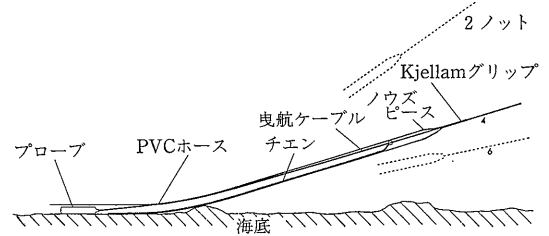
2.1 天然ガンマ線測定システム

1.46, 1.76, 2.61MeVのガンマ線はNaI(Tl)シンチレーターを用いれば十分弁別して検出することができる。この検出器は検出効率もよく相対的には頑健であるので曳航式のガンマ線スペクトロメータとしてプローブに組入れられている。一般的な構造を第2図に示した。

B. W. Thomasらが使用したのは長さ1m, 外径125mmのステンレススチールのプローブ内に3"×3"NaI(Tl)シンチレータ, 前置増巾器, 高圧電源, 光電子増倍管が組込まれている。²⁴¹Am(0.5μCi)線源がシンチレータに付着させてあり, ゲインスタビライザーとして60KeVのエネルギーレベルがレファレンスとして使用されている。さらにこの装置を用いてB. W. Thomas



第2図 曳航式ガンマ線スペクトロメータのプロープの構造 (C. P. Summerhayes らによる)。



第3図 “eel” の構造と曳航速度による姿勢。数字はノット (J. M. Miller らによる)

らは重要な実験をしている。すなわち水でおおわれたキャリブレーションパッドと称する海底地層模型の上におかれたガンマ線用プロープでえられたスペクトルと空気中のポイントソースによってえられたスペクトルを比較している。それによるとプロープ周辺の海水のガンマ線散乱効果が最小に保たれていることが確認されている。したがって海底と接触してプロープが曳航されるときにスペクトルの品質の損失はほとんど考えられないと報告している。

海底でのプローブの曳航はメカニカルな面でいろいろ工夫されている。第3図に英国本土の大陸棚の数地域で広範囲にわたって曳航されている方式を示す。これによるとプローブは二重アーマード同軸ケーブル (外径12mm) につながれている。プローブが海底面の大きな転石、露出した岩石、残がい破片物質中にわりこむ危険をさけるためプローブと曳航ケーブルの先端30mはプラスチック製の補強用チューブに入れられる。この設置は“eel”とよばれそのまは海底面をほふくし、リーディング端は海底面より約7mの高さに保たれて曳航される。この装置は“eel”に海底面で行くわず障害物をうまくクリアさせており、英国の AERE では10,000km の海底調査を無事故で終えていると B. W. Thomas らは報告している。

曳航そりに4個の3"×3" NaI (TI) シンチレータによる検出器を載せる方法が J. E. Noakes らによって報告されている。これはフロリダの Atlantic 沿岸の海底地質図を作るために使用された。しかし海底面がとくにスムーズでない限りひっかかりによって装置を紛失する危険が大きいとされている。またスムーズな海底面は一般には地球化学的に興味が低いところからあまり高い評価をうけていないようである。

プローブの中で発生した信号は曳航ケーブルを通じて船上に送られる。信号は船上で処理される。全計数とウラン、トリウム、カリウムの各々のエネルギーウィンドウ (1.76, 2.61, 1.46 MeV を中心として適当な幅を持たせたエネルギー領域) における計数率をデジタル・アナログ量

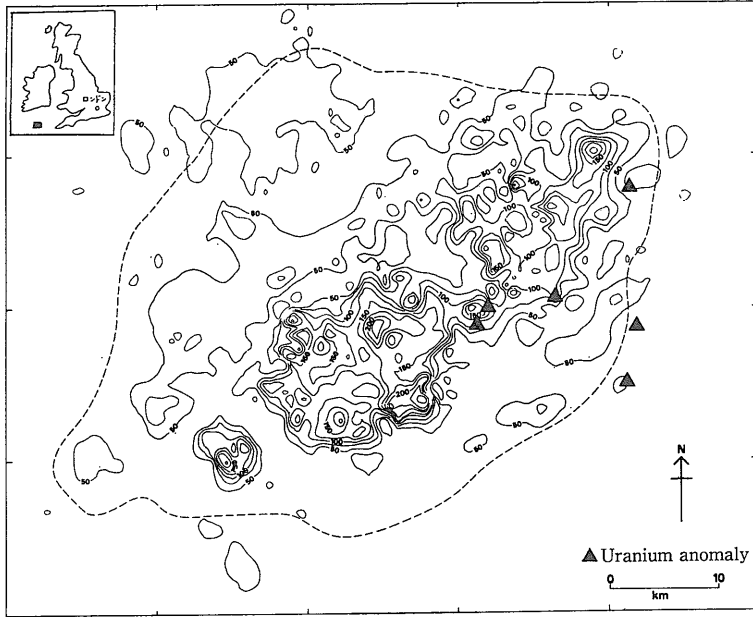
として与えるように処理される。デジタルデータは累積され1～10分間隔でナビゲーションデータとともに記録される。ウラン、トリウム、カリウム含有率を直接算出できるようにするため、バックグランド補正、高エネルギーガンマ線のコンプトン散乱の影響を除くためのスペクトルストリッピング補正をほどこす。これらの結果はつづいて放射性元素の分布を示すコンターマップとして表わされる。

2.2 曳航式スペクトロメータによる海底調査

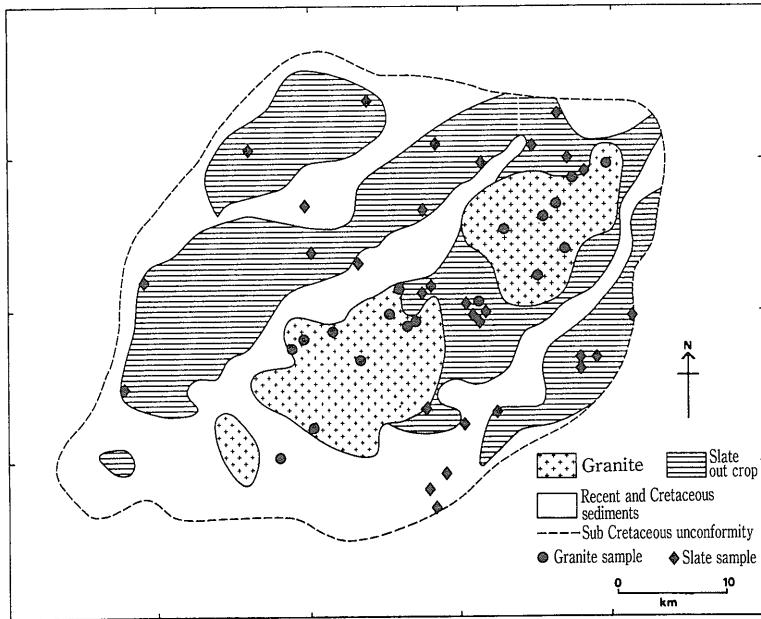
海底の天然ガンマ線調査ではヨーロッパのうちでもとくに英国における大陸棚の調査が目立っている。これらの結果は他のデータとあわせて検討され、海底地質を理解するのに有効的に利用されている。

ランズ・エンド岬西方150kmの海域での調査を例としてあげる。海底には花崗岩が露出しており、これとその周辺部の岩石は海面下にかくれたリッジを形成している。岩盤のサンプリングは可能で、それによると花崗岩はデボン紀-石炭紀時代の粘板岩で囲まれている。これを掩って上部白亜紀の砂岩や石灰岩が南西方向にのびている。

これらの花崗岩の露出部やその周辺部にわたってえられた曳航スペクトロメータの調査結果は、どの程度にこの技術が海底地質の概略を知るのに役立っているかを示している。第4図は全ガンマ線強度のコンターマップ、第5図はサンプリングデータを参考にして第4図を地質学的に解釈した結果である。全ガンマ線強度図でもっとも注意をひく特徴は中央部に位置する高強度であり、これが花崗岩の露出ときわめてよく一致することである。北東端の露出の境界をこえて高強度が延びているのは周辺の粘板岩がウランの鉱化作用をうけていることによるものと解釈されている。さらに北東に向って高強度域がある。これは中心部よりも低い強度であるが、花崗岩の分布を示している。この放射能レベルの減少、低下は花崗岩のつよい変質によるものと考えられている。中央地域の南西方向に広がるやや高い強度分布はもう一つの小さい花崗岩の露出の存在を示すものである。粘板岩は長



第4図 ランズ・エンド岬西方における海底全ガンマ線強度分布図 (カウント/秒) (B.W. Thomasらによる).

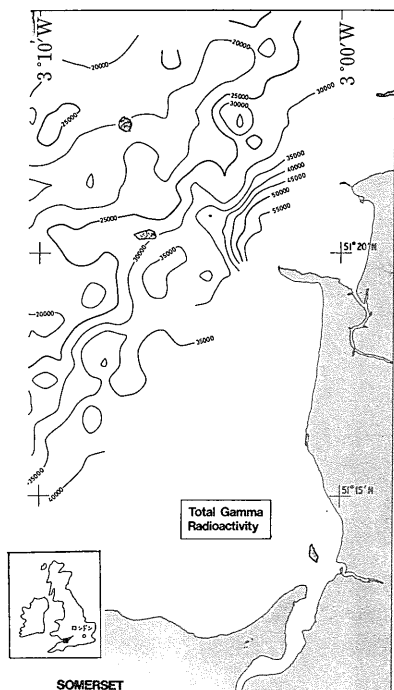


第5図 海底全ガンマ線強度分布の地質学的解釈 (B. M. Thomasらによる).

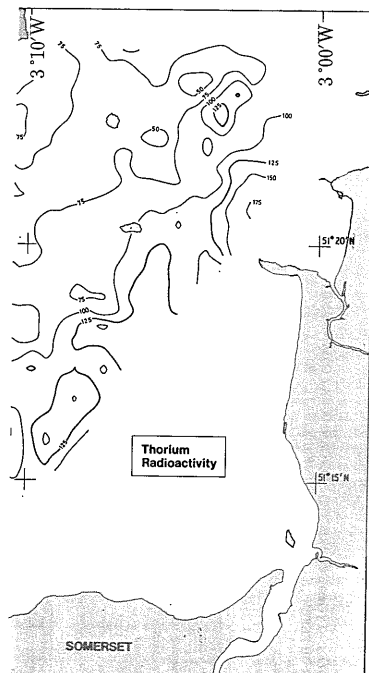
くのびる花崗岩の両側に露出しており、花崗岩を中央部と北東部の露出にわけている。粘板岩はこの調査では概して低強度に対応しているが、粘板岩の中の高強度の地域は、トリウム、カリウム含有率の増加によるものとされている。また一般的に低い強度の地域は現世堆積物におおわれている地域に対応している。

非常に異なった岩種の分布する地域の調査例としてブリッジウォーター湾での結果が報告されている。ここで

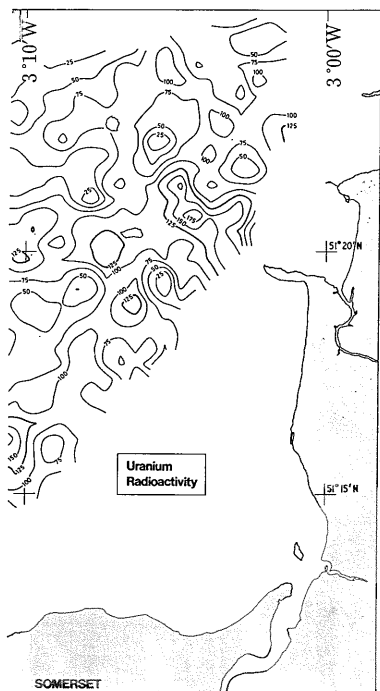
は異なった岩種はえられた放射能データから容易に区別できるものであった。ブリッジウォーター湾は7つの相異なった地質単位からなるが、それぞれ意味のある相異なった放射能のレスポンスを示している。このことは全ガンマ線強度の広い変化によってわかる。またウラン、トリウム、カリウムに対応したエネルギーウィンドウにおいて観測されたガンマ線計数率によっても示されている。第6図～第9図はその一部である。第10図はこれら



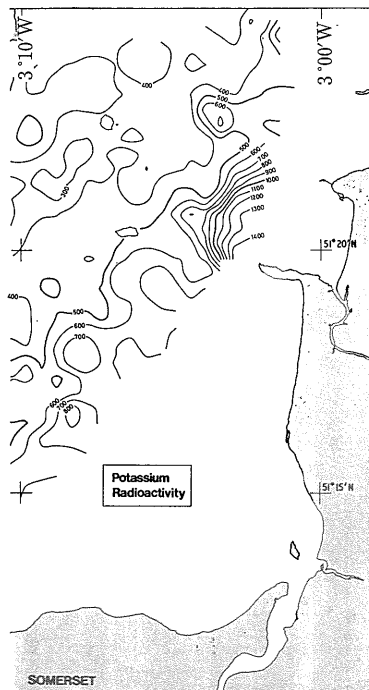
第6図 ブリッジウォータ湾底における全ガンマ線計数率分布. カウント/500秒への換算値 (J.M. Miller らによる).



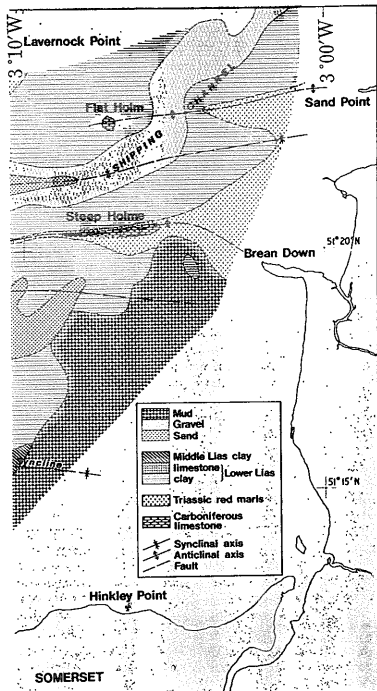
第8図 トリウムウィンドウ (2.475~2.970MeV) 計数率分布. カウント/500秒への換算値 (J.M. Miller らによる).



第7図 ウランウィンドウ (1.62~1.94MeV) 計数率分布. カウント/500秒への換算値 (J.M. Miller らによる)



第9図 カリウムウィンドウ (1.31~1.61MeV) 計数率分布. カウント/500秒への換算値 (J.M. Miller) らによる



第10図 放射能,地震探査,ソナー,サンプリングデータによる全ガンマ線計数率分布図の地質学的解釈 (J.M. Miller らによる)。

の放射能情報に加えて地震,ソナー,サンプリングデータをもとにえられた第6図の海底地域の地質解釈である。

これと対象的にライム湾では地質学的に著しい特徴がなく各エネルギーウィンドウにおいてフラットコンターを示すと報告されている。

3. 中性子法

天然ガンマ線による海底調査は天然放射性元素を含む

岩石, 鉱物に適用される。一方海底鉱床に伴うよりひろい範囲の元素, よりひろい範囲の鉱物は, 中性子との相互作用によって誘起されるガンマ線によって同定できるのである。これに関連し利用される数種の重要な反応がある。なかでも熱中性子捕獲 (n, γ) 反応, 非弾性散乱 ($n, n'\gamma$) 反応, 中性子放射化による短寿命の放射性元素の発生がきわめて重要である。

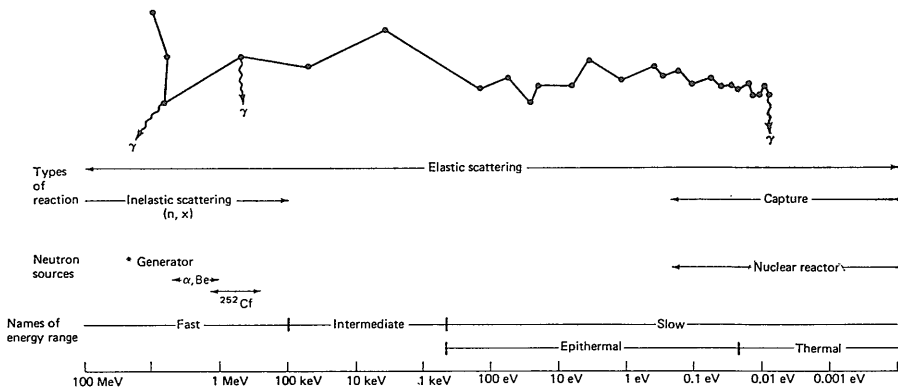
海底面上あるいは面下に存在する堆積物や岩石中の水の存在は中性子法にきわめて重要である。高速の中性子は発生した直後, 弾性散乱あるいは非弾性散乱により次第にエネルギーを失い, ついに熱中性子となる。とくに水素の原子核との衝突によってエネルギーがきわめて効果的に失われ, 急速に熱中性子化する (第11図参照)。この熱中性子は海底物質の中で高い確率で捕獲される。それゆえ, 海底調査にもっとも適した反応は (n, γ) 反応であって, そのうえ都合のよいことには即発する捕獲ガンマ線は 10 MeV にも達する高いエネルギーを有する (第12図参照)。したがって相対的につよい透過力を有し容易に検出できるのである。各元素の検出感度は熱中性子の捕獲断面積と捕獲ガンマ線の相対強度に依存する。しかしながら実際には競合する反応, 主として海水中の塩素による捕獲ガンマ線にもとづくバックグラウンドは多くの元素に対する検出の感度をきびしく制限することになる。もっとも第12図からもわかるように 7 MeV 以上の捕獲ガンマ線を放射する元素の場合は問題とならない。

3.1 線源

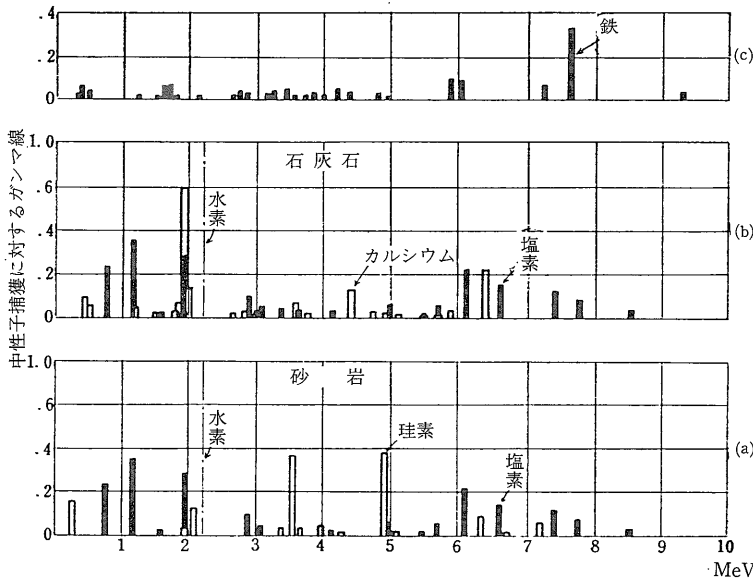
海底調査に適すると思われる中性子源には次の2つのタイプがある。

- a ラジオアイソトープ中性子源
- b 中性子発生管

ラジオアイソトープ中性子源は容積が小さく比較的安



第11図 中性子のエネルギーと名称, 物質との相互作用, 二次放射線, 中性子源の概括 (J.R. Hearst らによる)。



第12図 捕獲ガンマ線エネルギースペクトル。
(a)砂岩 (b)石灰岩 (c)鉄
(R.L. Caldwell による)。

価に入手できるという大きい利点がある。通常用いられるものには

- (i) ^{252}Cf .
- (ii) $^{238}\text{Pu-Be}$
- (iii) $^{241}\text{Am-Be}$

などがある。熱中性子捕獲反応を用いるものとしては、 ^{252}Cf がもっとも適している。その理由として出力（中性子発生率）が非常に大きいこと、これに伴って出るガンマ線の強度が比較的低いこと、中性子の平均エネルギーが他の2つより小さく、その熱中性子化にとって都合がよいこと、などがあげられる。

中性子発生管は野外で使用する場合、かさばるうえ、頑健さという点でラジオアイソトープ中性子源におよばない。またパワー供給が必要という不利な点がある。しかし一方においては大きい出力がえられ、また中性子の発生をスイッチオフすることができる。したがってパルス状の中性子の発生操作が可能となる。このことは実際上有利に利用できる。中性子パルスと同期させた検出装置でえられたガンマ線信号は、高エネルギー中性子反応

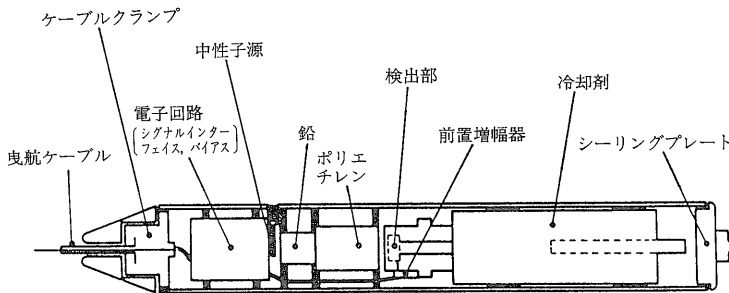
に対してS/N比を向上させるという著しい利点がある。中性子の発生には $^3\text{H}(d, n)^4\text{He}$ 、あるいは $^2\text{H}(d, n)^3\text{He}$ の核反応を用いる。前者は 14MeV の高速中性子を発生する。連続エネルギースペクトルを有するラジオアイソトープ中性子源にくらべて物質との相互作用が理論的に取扱いやすくなる。

3.2 中性子捕獲ガンマ線の検出

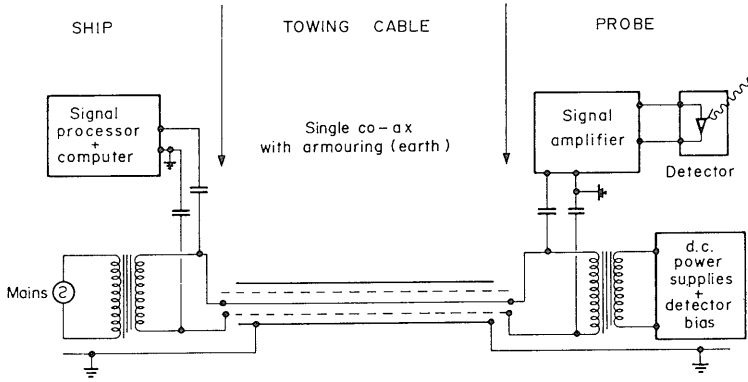
熱中性子による即発の捕獲ガンマ線は複雑なスペクトルを有するので、エネルギー分解能の高い検出器が必要である。このため半導体検出器が使われる。Ge(Li) 検出器は液体窒素の温度で使用、保存しなければならない不便があるが、高純度ゲルマニウム検出器は使用のときだけ冷却すればよい。一般にゲルマニウム検出器を冷却するには種々の方法があるが、野外使用にともなう幾何学的拘束から、検出器が動作する範囲内の温度の融点をもつ固体の冷却剤にたよっている。しかしこの場合可燃性と圧力調整からくる設計上の問題がともなう。

3.3 プロープと測定システム

曳航式中性子法プロープの内部の構成、配置の1例を



第13図 中性子捕獲ガンマ線法のプロープの構成 (B. W. Thomas による)。



第14図 中性子捕獲ガンマ線法の送信システム (B.W. Thomas による).

第13図に示した、中性子源と半導体検出部の間には、源からのガンマ線によるバックグラウンドの増加や、中性子による検出器の損傷を防ぐため適当なシールドをおかなければならない。この例では鉛と、ポリエチレンを用いている。中性子源と検出部との間の距離は感度を最適にする様調整される。また有効測定範囲が目的にマッチする様調整される。

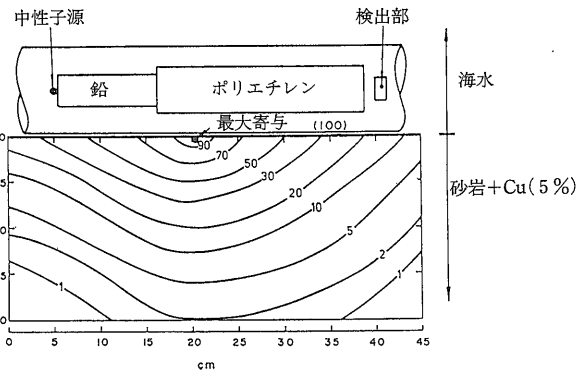
天然ガンマ線検出用プローブの場合、供給電圧や船上のエレクトロニックユニットへ送られるアナログ信号は単芯同軸ケーブルにのせて送ることができる。この一般的な概念は中性子法プローブにも適用される。しかし検出器のすぐれたエネルギー分解能を十分に利用するため、また増加する電源電圧の必要量を供給するための調節が必要となる。第14図には船上とプローブとの間の電源電圧供給や信号の転送のための一般的な構成が示されている。電源電圧は110V (AC) でプローブに供給される。さらに検出部や信号増巾部への電圧の供給に使われる。プローブからの信号は供給電圧の上のせられて船上に送られる。これは適当なフィルターを通して波高分析装置にインプットされる。しかし最高の分解能と感度をえる様にするため、またケーブル内での減衰を克服するためにも波高分析器はプローブの中に組込まれることがのぞましい。

中性子法で利用する信号は捕獲や非弾性散乱反応にとまって生じる複雑なガンマ線スペクトルのうち幅のせまい光電ピークの形で生じるものである。これらのピークは検出部の中のコンプトン散乱から生じる低エネルギー域の連続的スペクトルのバックグラウンドの上に重ね合わされる。この様に利用されるデータは記録された全計数のわづかな部分にすぎない。したがって捕獲ガンマ線の検出による元素の同定に十分な精度をえるには、計数時間を長くする必要がある。これは船の速度とともに海底鉱物品位の空間的分解能を制限する要素となる。

捕獲ガンマ線による元素の同定技術の潜在能力について種々の相異なった測定条件での計算がこころみられている。この技術が現在開発段階にあることから、これらのこころみはプローブの改良設計を助け、海底鉱物のタイプや海底の条件に対する応答を理解するのに役立つ。

評価されるパラメータとしてこの技術の本質的な感度、有効測定深度、元素の含有状態や海底の物理的状态からくる中性子束の空間的、エネルギー分布などが対象となっている。

感度の問題は重要かつ興味のある問題である。プローブの較正は海底の熱中性子束に依存しており、このため装置に対するこのレスポンスを計算しておくことは重要である。B. W. Thomas らは検出感度は熱中性子束の空間分布、熱中性子捕獲断面積、捕獲ガンマ線の分岐比(相対強度)に依存するものとして海底物質(砂, 泥, 粘土)の中の種々なマイナー元素について算定している。元素については経済的に興味のあるものについて、そして最もよい捕獲ガンマ線(通常4~10MeV)について計算している。第1表にその結果が示されている。感度(σ/A)は熱中性子捕獲ガンマ線検出技術の適合性を表す基準に



第15図 中性子捕獲ガンマ線法におけるレスポンスに対する単位体積当りの相対的寄与。数字は% (B.W. Thomas による)

3.4 技術的ポテンシャル

第1表 熱中性子と元素との相互作用に関する定数と捕獲ガンマ線による検出限界 (B.W.Thomas らによる)

元素名	原子量	熱中性子吸収断面積 σ (バール)	強度 (ガンマ線/100中 性子)	感度 $I\sigma/A$	砂岩 (SiO ₂) 内での最低検 出限度 (計数時間: 15分, 線源: 100 μ g ²⁵² Cf) Wt%
Nickel	58.71	4.6	42	3.2	0.2
Copper	63.54	3.9	28	1.7	0.3
Zinc	65.37	1.1	12	0.2	2.0
Molybdenum	95.94	2.7	3.5	0.1	4.0
Silver	107.87	63	1	0.6	2.0
Tin	118.69	0.63	<1	<0.005	~100
Gold	196.97	100	5	2.5	0.2
Mercury	200.59	372	16	29	0.01
Lead	207.19	0.17	95	0.08	2.0
Chromium	51.99	3.1	24	1.4	0.2
Cobalt	58.93	38	8	5.0	0.2
Selenium	78.96	12.3	4	0.6	2.0
Miobium	92.91	1.1	1	0.012	40
Antimony	121.75	5.5	1	0.05	20
Barium	137.34	1.2	16	0.15	10
Tantalum	180.95	19	<1	≤0.1	5.0
Tungsten	183.85	19.1	4	0.46	0.8
Platinum	195.09	9.6	4	0.20	2.0
Vanadium	50.94	5.0	19	1.8	1.0
Manganese	54.94	13.3	12	2.8	0.3
Iron	55.85	2.62	25	1.2	0.3
Zirconium	91.22	0.19	16	0.03	20
Magnesium	24.312	0.06	40	0.1	20
Titanium	47.90	6.1	54	6.9	0.3
Cadmium	112.40	3620	2.3	75	0.01

なるものであるが、海底曳航調査の場合では、海底地質、線源の強度、計数時間、バックグラウンド、検出効率の影響を受ける。第1表の最後の欄には100 μ gの²⁵²Cfを海底の砂岩 (SiO₂) の中に照射し、15分間捕獲ガンマ線を計数するという条件のもとでの検出の最低限度を示している。

有効探査深度は中性子の海底面下への透過力、捕獲ガンマ線の海底での減衰の程度に依存する。モンテカルロ法による計算結果が第15図に示されている。これは5%のCuが砂岩 (SiO₂) 中に一様に分布しているという条件のもとに単位体積あたりの全計数率への相対的な寄与を表わしており、表面に近い最大寄与を示す点を基準にして百分率で示してある。さらに海底面下の深度と累積計数率との関係が求められ、この場合の有効探査深度は10~15cmと考えてよいとされている。この値は中性子捕獲ガンマ線による元素同定の有効探査深度の目安となりきわめて意味が深い。

これらの理論計算の結果を実証するため模型実験が行われている。海底をシミュレートした石英砂と海水からなる模型を使い、²⁵²Cf中性子源と高純度ゲルマニウム

検出器を使った装置により検証をこころみている。100 μ gの²⁵²Cfの使用と15分間の計数によりFe、Tiに対する検出の最低限界はそれぞれ0.38、0.26%で第1表のデータとよく一致することが検証された。また有効探査深度を実験的に推定するためにCuを含有した種々の厚みの石英砂について計数し、飽和状態になる様子をしらべ、有効探査深度を10cmとしている。これはモンテカルロ法による計算結果とよく一致している。

4. おわりに

文献からえた情報をもとに英国を中心として開発されている海底の核物理探査技術について若干のべた。

もとより日々発展の途をたどっているであろうが、このうち天然ガンマ線による手法はすでに空中探査等で著しい発展をとげている。海底という特定の物理的条件下ではハードウェアの問題がのこされているといえよう。とくにプローブ内での波高分析技術の確立の問題がのこる。熱中性子捕獲ガンマ線の検出による海底調査技術のポテンシャルについて若干紹介したが、線源の種類、レ

スポンズの理論的取扱い、半導体検出器の安定化、などにもなる問題も多い。なかでもレスポンスの物理的背景の定式化が可能になれば、測定条件の最適化の問題の解決、ひいては感度の向上に大きく前進するものと思われる。最後にこれらの技術が近い将来さらに発展し、従来 of 海底物理探査技術とあわせて適用され、海底地質の解明により役立つことをのぞみたい。

主な参考文献

- Summerhayes, C. P., Hazelhoff-Roelfzema, B. H., Tooms, J. S., and Smith, D. B. (1970): Phosphorite prospecting using a submersible scintillation counter. *Economic Geology*, **65**.
- Bowie S. H. U., and Clayton, C. G. (1972): gamma spectrometer for sea-or lake bottom surveying. *Trans. Inst. Min. Metall.* **81**.
- Miller, J. M., and Symons, G. D. (1973): Radiometric traverse of the seabed off the yorkshire Coast. *Nature*, **242**.
- Miller, J. M., Roberts, R. D., Symons, G. D., Merrill N. H. and Wormald, M. R. (1977): A towed sea-bed gamma-ray spectrometer for continental shelf surveys. *Nuclear Techniques and Mineral Resources*, IAEA. Vienna.
- Thomas, B. W. and Clayton, C. G. (1983): V. V. C. Rana-singhe and I. M. Blair Mineral exploration of the sea bed by spectrometers. *Nuclear Geophysics*, pergamon press.
- Morse, J. G. (1977): *Nuclear Methods in Mineral Exploration and Production* Elsevier.
- Hearst, J. R., and Nelson, P. H. (1985): *Well Logging for Physical Properties*. Mc Graw-Hill.
- Californium-252 Information Center (1970): *Californium-252 Progress No. 2*.
- Clayton, C. G. (1977): Some recent application of nuclear techniques in the exploration and mining of metalliferous minerals. *Nuclear Techniques and Mineral Resources*, IAEA. Vienna.
-
- NAKAI Junji (1990): Ocean bottom nuclear survey.
-

<受付：1990年1月16日>