

理化学研究所 ニュース

July.—1979

No. 58

γ線を通じて見た固体の電子構造

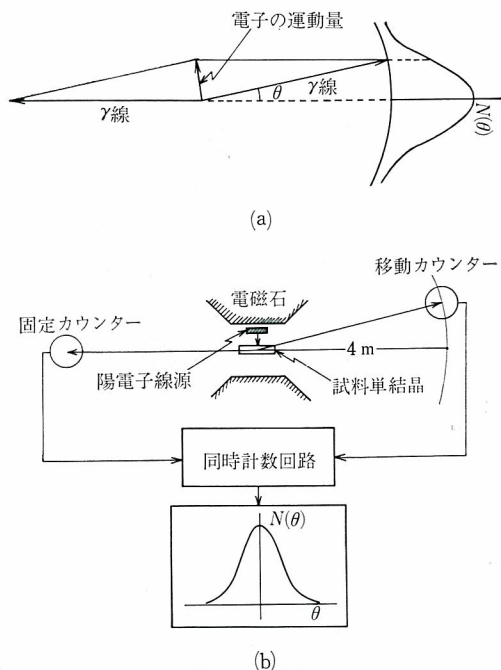
はじめに

固体の電子構造を調べる手段は、実験技術の進歩に伴って、最近ますます多様になってきている。その中で、理化学研究所の我々のグループ（磁性研究室、金属物理研究室）が特に力を入れているいくつかのものがある。すなわち、(i)メスバウアー分光、(ii)摂動角度相関、(iii)陽電子消滅、(iv)コンプトン散乱、の4つである。これらに共通にいえることは、何らかの形でγ線を利用している点である。(i)は固体中の原子核から放射されたγ線が、同じ種類の原子核に共鳴吸収されることを利用しており、核の位置から眺めた周囲の様子を知ることができる。(ii)は(i)ほど広く利用されていないが、2段にカスケードγ線を出す原子核を物質中に入れ、1段目のγ線と2段目のγ線の角度相関を測定して、やはりその核から見た周囲の様子を調べる方法である。この両者は互に相補的な面があり、磁性体の研究には特に有用であるが、今回はこれ以上触れないことにする。

陽電子消滅

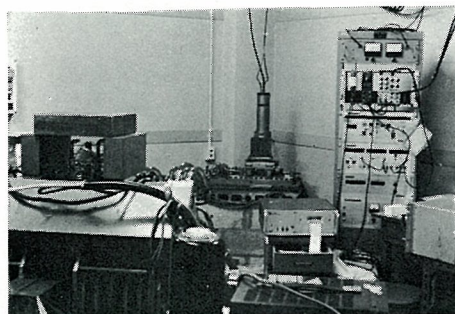
陽電子は、よく知られているように、ディラックによって理論的に予想され、後に実験的に見出

された、正の電荷を持った電子であり、真空中にあって運動量ゼロの状態の、負の電荷をもった普通の電子に出会うと、一定の寿命(10^{-10} sの程度)で対消滅し、2本のγ線（エネルギーはそれぞれ511 keV）を生ずる。その際、運動量保存則のために、2本のγ線は、丁度 180° をなす正反対の方向に放出される。しかし、物質中では必ずしもそうではない。簡単のために話を金属に限ろう。金属中の伝導電子は、大ざっぱには自由電子と見てよく、そうすると、エネルギーの低い、運動量の小さい状態から段々につまんで、相当大きなフェルミ運動量を半径とする、運動量空間のフェルミ球の中を一様に占める。このような金属の中に陽電子をたたきこむと、陽電子はその運動エネルギーを 10^{-12} s程度の時間の中に失い、消滅の起るずっと以前に、運動量がほとんどゼロの基底状態に落ちてしまう。こうして対消滅は、「止まっている」陽電子と「はげしく動いている」電子の間に起り、横方向の運動量を保存するため、γ線は第1図(a)のように、 180° から電子の運動量に比例してずれた角度をなす。したがって、対をなして同時に放出されるγ線の間の角度分布をとれば、そのカウント数は、その角度に相当する運動量成分をもつ電子の数に比例して、図のような曲線となる。（ただし、紙面に垂直な方向の成分は、カウン



第1図 (a) 陽電子消滅による電子の運動量分布測定
の原理図。(b) 測定装置の略図。

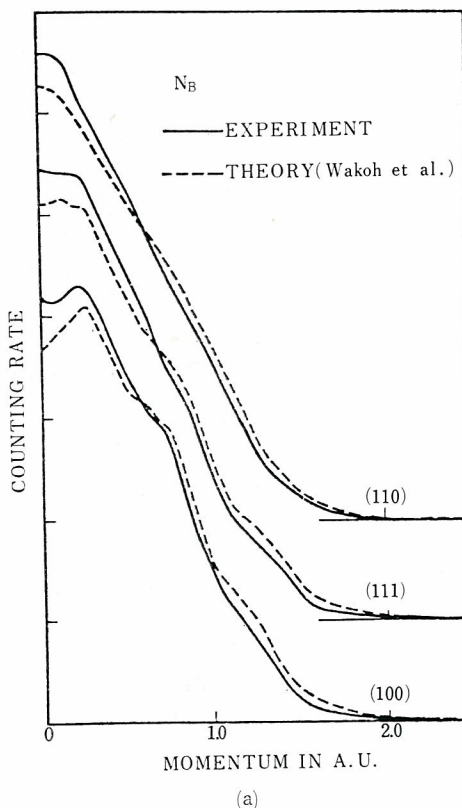
ターが十分に長いために、積分されてしまっている。) いいかえれば、角度相関曲線は電子の運動量分布を反映しており、それを測定することにより、金属の電子構造に関する貴重な情報を得ることができるのである。第1図(b)は装置の略図で、陽電子線源としては、 ^{22}Na (半減期2.6年) がよく使われる。線源と試料単結晶とは、対向して電磁石の磁極間に置かれている。この電磁石は、陽電子の集束と、磁性体研究の場合の試料磁化の役を果す。一方のカウンターは固定されているが、他方のカウンターは、試料を中心とする半径4mの精密な円弧上を動き、角度の関数として γ 線の強さを計測する。第2図は、装置の写真である。カウンターの動きをモーターで制御し、精密に移動させることは、高度の工作技術を必要とするが、幸い当研究所工作部の努力により完成された装置は、約10年間ほとんど故障なしに連続して動いている。また最初は、カウンターの移動や測定時間のセット、記録等はすべて手動で行っていたが、これも当研究所の工作部によって、自動化回路システム的设计製作が行われ、極めて複雑な測



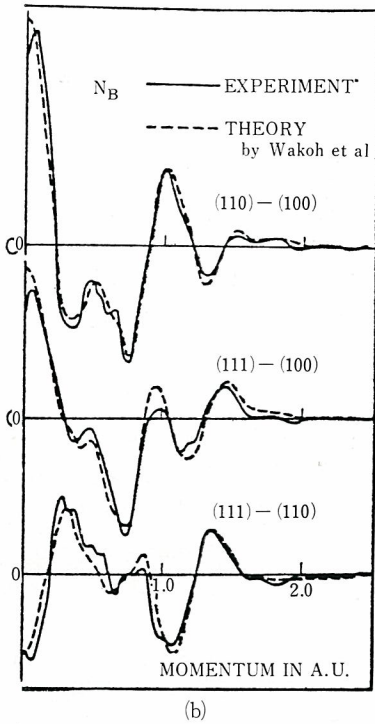
第2図 陽電子消滅測定装置の写真。固定カウンター
の位置から見たもの。

定プログラムが、最初ボタンを押すだけで、無人で測定できるようになったことは、研究上大きな支えとなった。

研究成果の一例として、第3図(a)に金属Nb単結晶の角相関曲線と、その結晶方向による異方性を示す。実線は実験曲線を示し、点線は理論曲線



第3図 (a) 金属Nb単結晶に対する陽電子消滅の角
相関曲線。実線は測定結果、点線は理論曲線を
示す。



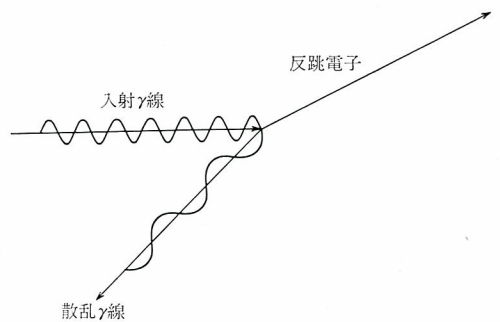
第3図 (b) その結晶軸方向間の差を示す。実線は測定，点線は理論。

を示している。多くの特徴的な形がよく合っているのが見られる一方、系統的な不一致も見られる。(b)は試料単結晶の方向を変えた時の、角相関曲線の違いを示しており、理論曲線と極めてよい一致を示している。このような測定は、既に V, Nb, Cr, Ni, Mo, Pd などの、d 電子を持つ遷移金属や、Al, Mg など、自由電子に近い伝導電子を持つ軽金属について、高い精度で系統的に遂行され、理論と比較されて、金属の電子構造に関して、基礎的な新しい知見を加えることに、著しい成功をおさめた。この研究は、現在更に多くの金属について測定を広げているが、それと並行して、2次元カウンターと呼ばれる新しい測定方式の開発をも行っており、それが完成すれば、更に研究の質の著しい向上が期待される。

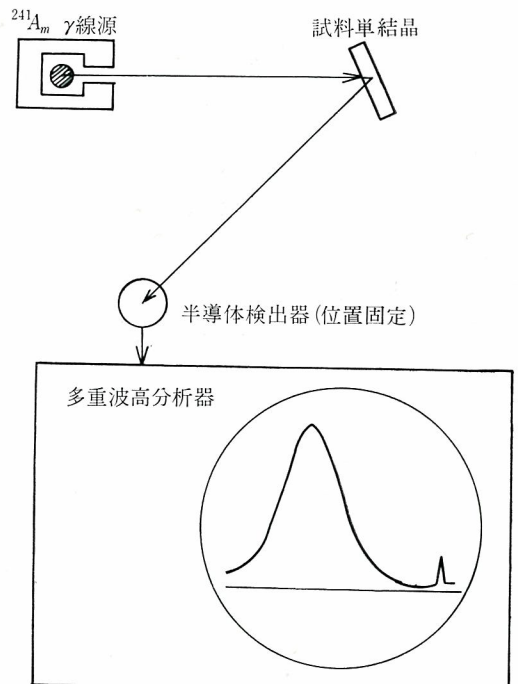
コンプトン散乱

コンプトン散乱は、電子による光子の非弾性散乱であり、エネルギーおよび運動量保存則によって理解される。すなわち、跳ね飛ばされた電子のエネルギー分だけγ線のエネルギーが減って(振

動数が下って)、散乱されるのである(第4図(a))。ただし、これは、電子が始めに運動量ゼロの状態にあった場合の話である。では、金属中の電子のように、大きな運動量を持って運動していた場合はどうであろうか。その時は、大ざっぱには、電子を動いている鏡のように見なして、反射されたγ線が、上記のコンプトン効果による振動数のずれのほかに、ドップラー効果による振動数のずれを受けて、エネルギーに幅ができるとして理解できる。いいかえれば、コンプトン散乱されたγ線



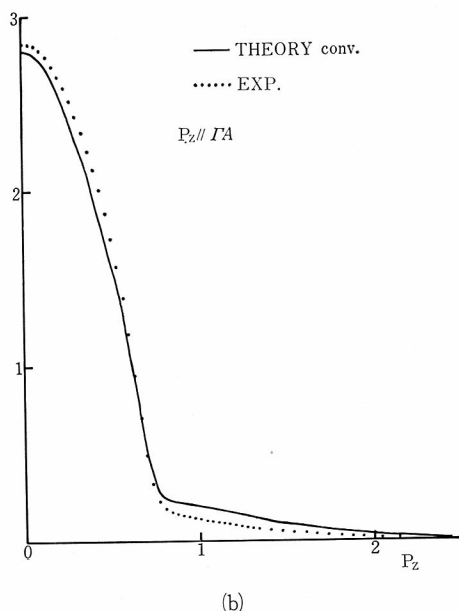
(a)



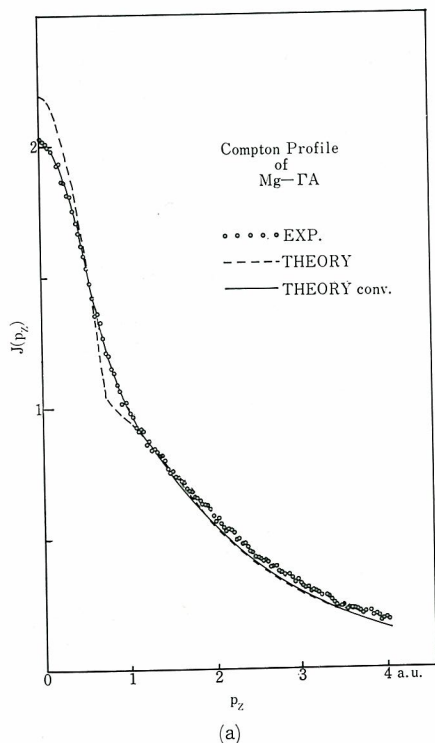
(b)

第4図 (a) コンプトン散乱の説明図。(b) コンプトン散乱による電子の運動量分布測定装置の略図

のエネルギーの広がりを観測すれば、それが電子の運動量分布を反映しているのである。実験装置としては、第4図(b)に見られるように、 ^{241}Am からの59keVの γ 線を試料単結晶にあて、散乱された γ 線のエネルギーを高分解能半導体検出器により検出し、多重波高分析器によって記録させるのである。ブラウン管上のパタンは、横軸がエネルギー、たて軸はそのエネルギーを持って散乱された γ 線の数に比例している。右端の小さな鋭いピークは弾性散乱された γ 線によるもので、左側の山の中心までが、いわゆるコンプトン散乱によるもので、山の幅が散乱電子の運動量分布によって生じたものである。第5図(a)は、Mgのコンプトン散乱エネルギースペクトルを示しているが、これと(b)に示した陽電子消滅の角相関曲線とを比較すれば、その相似と相異が容易に見てとれるであろう。ここに見られるように、陽電子消滅とコンプトン散乱は、どちらも、固体中電子の運動量分布に関して類似した情報を与えるが、陽電子はその陽電荷によって電子や原子核と電気的な相互作用をする一方、光子としての γ 線にはそれがないと



第5図 (a) コンプトン散乱によって求めたMg中の電子の運動量分布曲線。(b) 陽電子消滅によって求めた同じ分布曲線。



いう根本的な相違があり、そのことは、得られる運動量分布曲線にも反映して、互に相補的な知見を提供することができるのである。我々は、この2つの方法をうまく組合わせて利用し、固体の電子構造に関する研究を進展させようとしている。特に、磁性体に関しては、陽電子消滅では、原子核から放射される陽電子線の偏極を利用することにより、またコンプトン散乱では、極低温に冷却した強磁性体中の原子核から放射される円偏光 γ 線を利用することにより、電子スピンの方向を区別した電子構造の解明という、困難も大きい、意義もまた大きい研究を、推進しようとしている。

磁性研究室
主任研究員 関 沢 尚

開発テーマ

環境放射線スペクトロメータ

はじめに

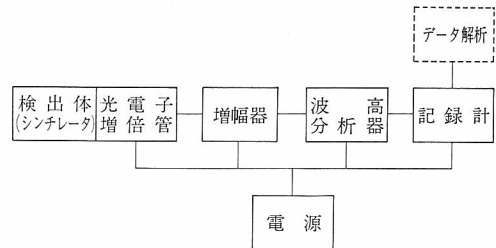
放射線の測定は今世紀初頭における放射性物質および宇宙線の発見ならびにX線の利用にともなうて発達した技術で、多くの研究と機器開発によってささえられている。環境放射線スペクトロメータも放射線測定の一手段で、環境の放射線の特徴を把握するために有効に利用されている。

環境の放射線を測定する際、測定する放射線に関する情報、すなわち、放射線の種類、エネルギー、強度、方向分布さらにはそれらの時間変化、場所によるちがいを得ようとする要求がある。特に最近原子力の利用にともなうて放射線の利用が広く一般社会につながりをもつようになってから、環境放射線に関しより一層くわしい内容を知る必要にせまられてきた。

放射線測定の歴史の流れをみると、環境放射線は未知の要素が多く含まれ、また自然放射線すなわち宇宙線や環境に存在する放射性物質からの放射線から多くの興味ある現象や新しい発見がなされた。これらに関する研究は放射線測定の技術の向上に刺激を与えた。

スペクトロメータの出現

環境放射線の測定に際しては対象となる放射線を限定して測定を行うわけにはいかず、複雑な環境放射線の特徴に関する知識を得なければ正確な情報を得ることができない。従来より行われていた電離箱によるイオン量の測定やガイガー計数管などによる測定は、単独使用によっては環境放射線に関する多くの情報は得られず、主に相対強度に関する情報のみがとらえられていた。これに対して放射線をスペクトルとして測定するスペクトロメータの出現は1950年代に芽生え、放射線測定に大きな改革をもたらした。すなわち、このスペクトロメータは放射線の検出体として固体を用い、放射線と検出体との相互作用で検出体が吸収したエネルギーを個々の放射線毎に電気的な信号の大



第1図 シンチレーションスペクトロメータの構成図

きさのスペクトルとしてとり出す測定手段である。この方法は従来からまったくなかったわけではないが、大型の検出体の出現により、検出体の内部で起る現象の検出が半導体や、透明蛍光体を利用しているため検出でき、 γ 線に対して特に高感度となった。特に検出体としての蛍光体利用は、よう化ナトリウム(NaI(Tl))など大型の任意の寸法の透明蛍光体が市販され、蛍光体から発する光の検出に使用される光電子増倍管の開発とあいまって広く普及した。すなわち、シンチレーションカウンタ、シンチレーションスペクトロメータがこれである。第1図はシンチレーションスペクトロメータの構成図で、シンチレータ、光電子増倍管、増幅器、波高分析器、記録計およびこれらに電圧を供給する電源とからなっている。一方、スペクトル測定に必要な波高分析器は多くの方式が考案され開発された。スペクトロメータで得られるスペクトル情報から環境放射線の主な成分である γ 線の情報を多角的にとらえることができる。すなわち、放射線と物質の作用に関する基礎的な資料から吸収エネルギーの大きさ、入射放射線の種類、エネルギーに関する多くの情報を得ることが可能となった。

環境放射線スペクトロメータ

スペクトロメータで得られるスペクトル情報は入射放射線によって得られる直接情報である。第2図はゲルマニウム半導体およびNaI(Tl)シンチレータを検出体として用いて環境放射線を測定した際のスペクトルである。

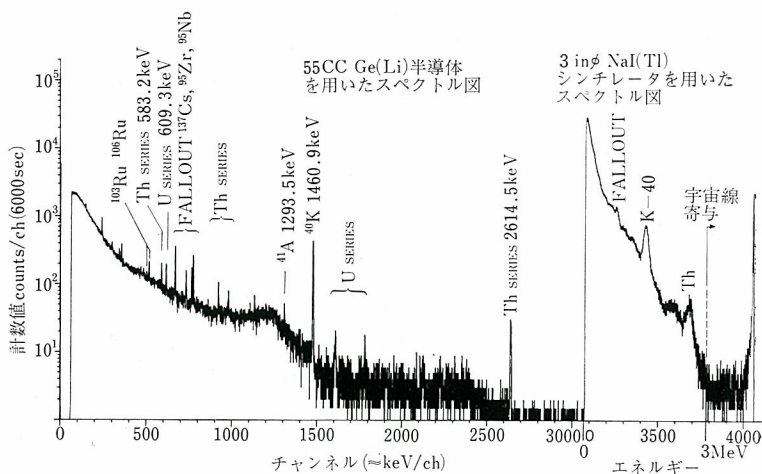
図にも示されているように、このスペクトルは環境放射線の主成分であるγ線に関する多くの情報を提供してくれる。

これらのスペクトルは、さらに、基礎的な情報を導入することによって、γ線については光子のエネルギースペクトルに変換することができる。例えば第2図のNaI(Tl)シンチレータによる測定スペクトルからγ線エネルギー別の光子スペクトルや照射線量、さらに各種の測定器の特性に合せた測定結果や目的の対象物(体内臓器など)に対する線量評価などができる。またこのスペクトルから環境に存在する放射性物質の種類や量に関する情報を得ることもできる。このように環境放射線に関する情報を得るため、固体検出体を利用したスペクトロメータの使用が大変さかんととなり、1960年代においては大気圏内で行われた核爆発実験の環境に対する影響の調査に広く利用された。一方、これらのスペクトロメータによって得られる情報をうらづける理論的な解析も多くの研究者によって行われ、環境放射能と環境放射線をむすびつける放射線源と検出体の位置関係にもとづく基礎研究が進んだ。これらの研究をもとに、固体検出体を用いたスペクトロメータは現在非常に有効な手段となった。このような観点から、環境放射線用のスペクトロメータの開発と供給に対する要求は大変強く、これに必要な波高分析器の改良に努力がはらわれてきた。一方、電子回路の小型化や、その研究開発が年とともに進み、これらのバックアップで波高分析器も小形化された。

スペクトロメータの小形化

今回理化学研究所で研究開発された小型スペクトロメータもその一つである。

環境放射線スペクトロメータは検出体と検出体から得られる電気的信号を記録する波高分析器とからなっている。波高分析器は検出体に吸収されたエネルギーを電気的な信号の大きさとしてとら



第2図 Ge(Li) 半導体検出器, NaI(Tl) シンチレータを用いて測定した環境放射線スペクトル図

えて記録し、その大きさの分布を測定するもので、光のスペクトルを測定するのと同様波長の大きさの分布を得るものである。波高分析器はその開発当時(1950年代)は重量約500kg 所要電力2kW におよぶものであったが1970年代には数10kg 約100W程度となり、最近我々が利用しているものは検出体(3''φ球形NaI(Tl)シンチレータ)を含めわずか10kg程度で数ワット(単一乾電池8個で数時間)のものが開発されている。写真1はその一つで任意の場所のスペクトル情報を市販のテープレコーダで集録することができる。

環境放射線の情報をスペクトロメータを利用して解析した例を第3図に示すが、ここに示されるような内容なども表示することができる。すなわち、環境放射線のうちその主成分であるγ線と宇宙線の線量などが、目的の場所および着目す

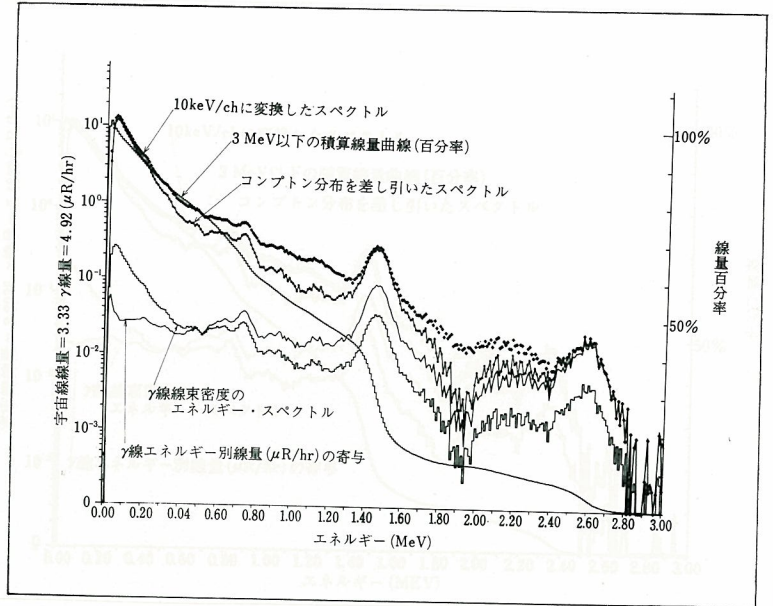


写真1 NaI(Tl) 球形小型スペクトルレコーダ

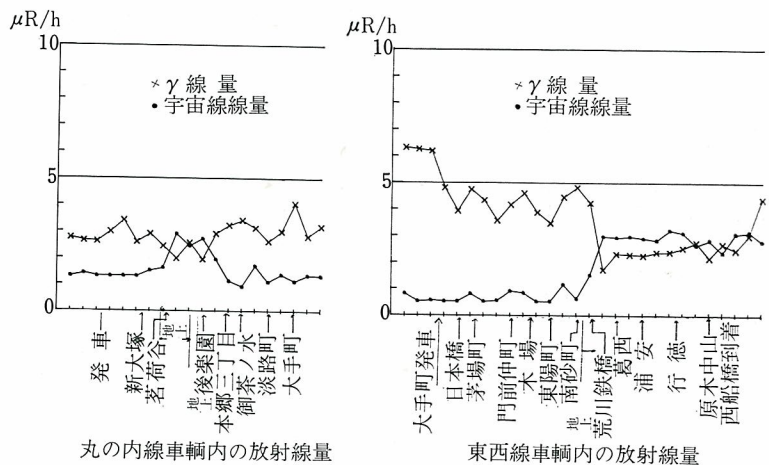
る物質についてかなりの精度で得られる。また環境に存在する放射性物質の主なものについての情報も容易に得られる。これらの成果は環境放射線スペクトロメータの利用とその小形化軽量化が完成されたことによる。さらに測定データの解析方法の研究も年々改良されている。最近はこのように小形化されたスペクトロメータの出現によって任意の場所の放射線情報を要求に応じて測定することができるようになった。第4図は東京の地下鉄内で測定した結果で、テープレコーダによってスペクトルを連続測定し、得られた記録テープを再生し、データ処理したもので、 γ 線量、宇宙線線量($\mu\text{R/hr}$)を1分間隔で出力している。この図でわかるように、地下鉄内での放射線レベルが通過場所のまわりの材料に含まれる天然放射性物質の放射エネルギーのちがいによって変化している様子が γ 線量から把握できる一方、地下の深さの程度によって宇宙線線量が変わるので宇宙線線量から逆に地下の深さがわかる。またこの値は通勤中にうける線量の正確な把握にも役立つ。さらに環境放射線スペクトル測定の結果から、例えば天然放射能の種類(ウラン系、トリウム系、カリウムなど)や人工放射能の有無などの情報や、着目する目的臓器(生殖線、骨髄など)の線量などを算出することも可能である。

まとめ

環境放射線スペクトロメータは従来の放射線測定器に比して多くの情報が得られる測定器で、これが小形化され、容易に持ち運びができ、自由に利用することによって次の内容の測定が容易とな



第3図 NaI (Tl) シンチレーション・スペクトル (10keV/ch) の線量評価



第4図 地下鉄車輦内における小型スペクトロメータによる放射線測定

- る。
- (1) 環境放射線のうち γ 線に関するエネルギー、強度に関する情報が得られ、これから γ 線量評価が正確に行えるほか、環境 γ 線の発生源である放射性物質に関する情報が得られる。
 - (2) 宇宙線に関する情報が併せて得られ、宇宙線の強度やこれによる線量が他の放射線と分離して得られる。
 - (3) このスペクトロメータを用いることにより、通常的生活環境における人の被曝線量すなわち室内、屋外、乗物(航空機、自動車、車輦内)中など任意の場所の線量を得られる。

(4) 現在主として NaI (TI) シンチレータを用いているが、検出体の大きさと種類を変えることによってより多くの情報、例えば中性子や、環境の放射線のうち特定の成分についての情報を得ることができる。このように環境放射線スペクトロメータは従来の測定器に比して多くの利点をもっている。



「肥満とランニング」

一時期食糧事情の好転と経済の高度成長とで家庭には電化製品がふえ、企業での労働もオートメ化によって省力化が進んだ。乗物も著しい普及をみせ、ほとんど歩かずに用がたせるようになってしまっ

た。オイルショック以来、経済の低成長時代に入ったとはいえ、簡単に歩け歩けの昔にもどせるわけではない。

こういう状況だから、中年男女だけでなく、小・中学校などの成長期の子供たちにまで肥満体の者が増加してきた。体重が増えてくると、まず動作がぶくなり、何かやる時に積極的な気力がわかなくなってしまうことである。運動量が少ないために摂取したカロリーの一部が消費されずに、余分なものとして体内に蓄積されてしまう。例えば過剰のコレステロールが血管壁に沈着してきて、動脈硬化が進行し、血管内を通る血液の流れが徐々にわるくなる。時には血管にひびが入ったり、またつまったりする。これが心臓なら心筋硬塞、脳の動脈なら脳閉塞を引き起こすなどということになる。こんなわけで太り過ぎには危険がいっぱいなのである。

それでは太り過ぎ解消にはどうしたらよいのだろうか。私の経験では、日に1度はかならず汗をかくことである。そして体内に摂り入れたエネルギー源を燃焼させ、全身の老廃物を体外に排出させることである。そのためには何か運動をすることが望ましい。私は太り過ぎ解消のためのランニングを試みている。勤務のかたわらの運動としてはいろいろなものがある。野球は9人1チームで相手がいる。バレー、サッカー、テニス、卓球なども相手がいるのである。これらの運動は相手次第ということになる。そのほか場所の問題、お

今後は環境放射線スペクトロメータをより多くの研究者ならびに機関が利用することによって、環境放射線の場所的変化、時間的変化を含め、多くの情報を集め、環境放射線の特性に関する理解を深めるとともに、これらに関心を持つ人たちに役立つことを望んでいる。

互いの折合のつく時間の問題がある。これらの条件がととのった時にはじめてやれるわけだが、毎日適度にこれらの運動をやるには条件が多すぎるように思う。また全身汗をかくためには、とくに冬場にはやや時間がかかり過ぎるきらいがある。そんなこともあって私は自分の意志だけが条件となるランニングに落着いたのである。約8年前にはじめて、ほとんど毎日のように走っている。はじめは日に1~2kmだった。徐々に体重が減って内臓諸器官も丈夫になったので、日に5kmから10kmとなった。体重が15kgほど減量して、身体の様子もきわめて良好である。

6月18日オーストリアのウィーンで開かれた米・ソ首脳会談の時、カーター大統領はソ連のブレジネフ書記長と顔を合わせる前にひと走りしたという。会談にのぞむにあたって、一方はじつに軽快な足どりで、もう一方はよろよろと側近に助けられるようにのぞむ姿が対照的であった。

カーター大統領はホワイトハウスの庭を毎日6~10km走って、体重70kgを66kgに、脈拍も毎分60回から40回に減り、血圧は80~120であるという。

ランニングをやるとよいことは太る心配がないから、食べたいものが何でも食べられることである。殿粉質のもの、糖分の多いもの、おまけにアルコールがいける。

ところで米は長い歴史を経て育んできた我国の主食であり、国土の立地条件に合った生産物である。この米の生産が減反目標200万tをかかげて抑えられているが、あまり意味のないことのように思う。というのは運動することによって主食である米がおいしく食べられるからである。

ランニングの効用はそれだけではない。けっこう仕事の能率もあがるということである。こんなわけで、私はそれぞれに適したランニングをすすめたいと思うのである。

生物試験室(理研走友会)
本間保男