

「中性子工学の提唱」

大阪大学工学部原子力工学科助教授 住 田 健 二

1. はじめに

いきなり耳なれない用話を使って人をびっくりさせるのはよい趣味とはいえないだろう、私なりにこの小論にはもうすこし気のきいた表題はないものかと考えてみたのだが、やはりこれ以外のものが見つからず、「中性子工学」という言葉を思いきって使うことにした。つい数年位前までは、アメリカの大手出版社のMから技術誌として Nucleonics (原子力工学) という表題のものが刊行されていた。これをもじって“Neutronics”という英語を作って、それを和訳すればこの言葉になる。私がここであえてその廃刊になった雑誌の表題をひき合いに出してまで「中性子工学」という言葉にこだわるのは、現在のエネルギー中心の考え方の「原子力工学」とは異なった立場の可能性を展望してみたかったからに外ならない。こういう夢のような話は普通の号ではすこし抵抗があると思うが、新年号ということに免じてすこし気焰を上げさせていただきたいと思う。

一般に原子力平和利用の最大の目標は将来エネルギー資源の確保であるとされている。化石燃料(石炭、石油)が無くならない中に、原子力開発を進め、石油は主として化学工業の貴重な原材料の方に残しておきたい。このようにエネルギー資源を次第に原子力中心に移行させて行くという大前提のもとに世界中の主要国が原子力開発にむかっている。この新エネルギー資源の原子核分裂エネルギー源であるウランやトリウム鉱石が消費しつくされる前には、核融合が軌道にのって次のエネルギー源としてスイッチされてくるようにと、この方は目下基礎研究中である。こうした、エネルギー源としての核エネルギー利用についての技術開発はこの四半世紀の間に誠にめざましいものがあつた。もう

今日では原子力発電の実用性を疑う人は少なくなつたと思う。今後の発電用原子炉にとっては、安全性確保へ一段と努力が必要であり、すでに経済性と安全性のよきバランス点が見出されたとはいいい難い。ここ四年位このだろバランスにはまだまだ大きな変動がおりうるが、まず実用期に入ってきたということは許されよう。したがって、こうしたエネルギー利用の技術もまたある程度開発されてきており、原子核物理の世界と家庭の電灯や工場の電動機との間の種々の段階がほぼ埋めつくされてきている。

ところが、この核分裂エネルギーを放出させる場合に、ウランなどの核分裂性物質核分裂連鎖反応をつなぎ合せているのが「中性子」に他ならないことは御存知の通りである。その核分裂時に高エネルギーでとび出した「中性子」をうまく原子炉の中へとじこめて、反応をおこし易い低エネルギーのものに変化させて行く経過を調べるのは「原子炉物理」とよばれている「原子力工学」の一分野の仕事の内なのである。目下の所筆者もこの辺に腰を下して仕事をしているのだが、この分野でも一応の実用的な話はケリがつきつつある。主要問題は材料とか安全性の方へ移ったといつてはいいすぎだろうが、まあ我々がキーポイントを司どっているとは、いいにくくなつた。しかし、原子核エネルギー開放—いいかえれば動力炉開発—という立場から見ると一応のケリがついたように思えるのが、この媒体になっている中性子集団の振舞をつきとめて、それを工学的に他方面利用してやろうと考えれば、ほとんどその性質が分らないのに驚かされるのであ。

筆者が「原子力工学」という名をさけて、あえて「中性子工学」と呼ぼうとしたのは、この

欠けた分野から、将来なにを期待できるかを考えてみたかったのである。ついでながら、核融合研究の方はこの逆でエネルギー放出を行なう核融合炉の基礎研究も開始されているが、この方がやっと手についた段階なのに、基礎になるプラズマ工学の方はどんどん進んでいるので、すでにその応用面もかなり充実しているらしい。

2. 中性子の性質と状態

原子核内に陽子と共存している状態での中性子は強力な核エネルギーでその中に束縛されているから、これをそのまま利用することは難しい。したがって、我々はこの中性子が原子核からなんらかの方法によって放出された後の「自由な中性子」を利用したいのである。この自由化の方法については後にのべるとして、ここでは中性子が単独で存在するものとして扱う。

中性子が原子核からとび出してからの寿命はせいぜい10分そこそこである。中性子そのままでは存在しえないで、電子を放出して崩壊し陽子に変化することが確かめられている。だから、我々は常に新鮮な中性子を使うことになる。

さて、中性子はその運動エネルギーによって分類することが、通常次のようによばれる。高速中性子 (10KeV以上)、共鳴 (もしくは熱外) 中性子 (0.15 ~ 10 KeV)、熱中性子 (0.01 ~ 0.15eV)、冷中性子 (0.01以下)。勿論この分離はきわめて大まかなもので、人によって適当に範囲を異にして使用している。

中性子の最も重要な性質は電氣的に中性粒子であるという点で、このため物質を構成する原子核やその周辺の電子との相互作用が極めておこり難く、大きな透過能力を持っている。この点で、荷電粒子とははっきり区別することができるし、同じ中性粒子の γ 線やX線との類似性を指摘できる。

この相互作用をおこす確率を「断面積」とよんでいるが、直観的にも分るようにその値は中性子の速度 v に逆比例するという一般的傾向が多く物質に対して発見されている。しかし、

γ 線の場合と異なって、この断面積の値は物質によって大きく異なり、又結晶性物質ではその構造から冷中性子領域で急に散乱断面積が低くなるとか、共鳴中性子が特定物質に対する特定エネルギーの所で強く吸収される——いわゆる共鳴吸収——されるなどの種々の特異現象が見られる。これらの性質が特定エネルギーの中性子の選択に役立つことについては後述することにしてしよう。

次に中性子は粒子であるけれど、量子力学の示すように同時に波動性を有する点では、他の粒子、たとえば光子 (photon) と同じような性質を持っている。この性質の有無を確認するためには、波動性をより観測し易い低エネルギー、つまり波長の長い中性子で回折 (図1参照) 反射 (図2参照) や屈折、という現象の観測が行われてい。中性子粒子であるため、その特性は光の場合に類似し、波動としての性質を論じる立場は Neutron optics (中性子光学) という名称でよばれている位である。屈折という一つの現象でみると、中性子の場合屈折率がごく1に近いので、十分注意しないと観測し難いし、また方向も光とは逆に多くの場合は1以下であることが多い。このことから光との類似性を使って、全反射の可能性が出てくる。中性子の

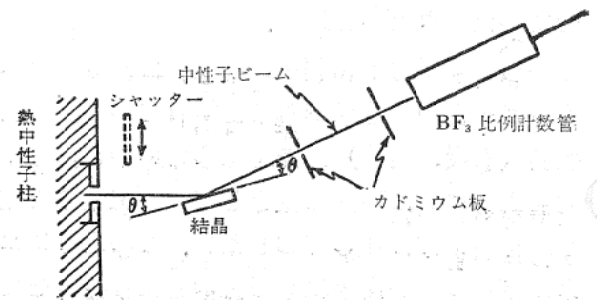


図1 中性子回折実験

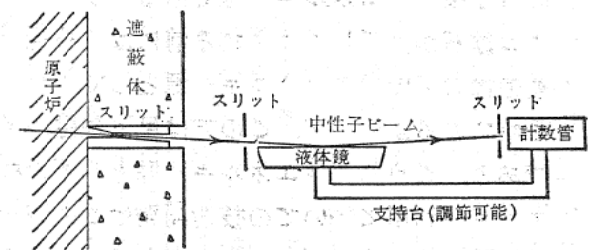


図2 中性子反射実験

場合は非常に小さい入射角で空気からある物質に中性子を入射するとよいことが分るが、現実にはこの状態を作り出すのは難しい。しかし、最近、京大原子炉で四塩化炭素の液面で反射を作り出した成功例もあるように、滑めらかな物質面を作ることができればよいのである。

中性子の性質としてもう一つ特記しておくべきことは、磁気モーメントに関する性質であろう。たしかに電気的には粒子一ケ全体は中性なのだが、あたかも磁石のように中性子が指向性を有していることも確かめられている。(図3参照) 原子炉からとび出してきた中性子は無指向性であるが、光の場合の偏光と同じように、偏向中性子ビームを作り出すことが可能であり、全反射光が偏光であるように上述の全反射中性子は偏向中性子である。

最後に上げておくべきことは、中性子が物質に吸収されたときにそれを放射化せる性質があるという点であろう。これは他の放射線でも非常に高エネルギーの場合におこる現象であるが、中性子の場合にはエネルギーに関係なく、低エネルギーでも捕獲さえおこれば放射化がおこる。この特性は原子炉の誕生によって飛躍的に多くの放射性同位元素の生産を可能ならしめることになったのであるが、原子炉内では中性子捕獲によって生じた新元素がまた中性子捕獲を行なう。二重捕獲、三重捕獲の可能性があり、多くの超ウラン元素がつくり出されるようになったことも附記しておきたい。

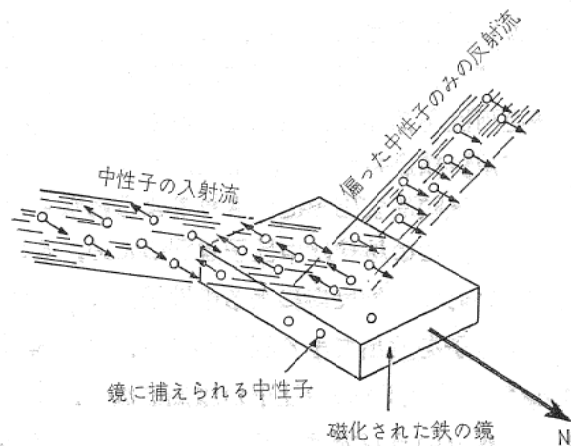


図3 偏向中性子実験

3. 強中性子源と簡便な中性子源

中性子を使って種々の目的に使用したいのだから、なによりまず豊富に中性子を手する必要がある。しかし、通常は原子核の内に陽子と堅く結びついてひそんでいる中性子を取り出して使うのは容易なことではない。電子の場合には金属その他の物質中にうろろしている自由電子がある。たとえば真空管の熱陰極を加熱して仕事関数以上のエネルギーを与えることによって熱電子を空間に放出させることもできる。それらのエネルギーと中性子放出の場合を比較すると、核分裂という特殊な場合を除いては後者は前者の 10^6 倍位のエネルギーが必要になるので、いかに大変なことかが分るだろう。

中性子が発見されてから最近に至るまでの中性子源の発展史を示したのが図4である。中性子発見(1932)当初はポロニウムやラジウムのような放射性同位元素から放出される α 線をリリウムに衝突させて核反応によって生じる中性子が実験に使われていたが、これはやがて、加速器で加速された荷電粒子による核反応から生成される中性子に取り変えられるようになり、それもまた原子炉の出現によって最強中性子源の王座を奪われたことが分る。しかも注目すべきことは、その最強値は1950年代初期頃までに急上昇した後は、きわめてゆるやかにしか上昇せず、この20年位はもう横ばいといえる状態に入っている。

この原因は需要がなかったからではなかった

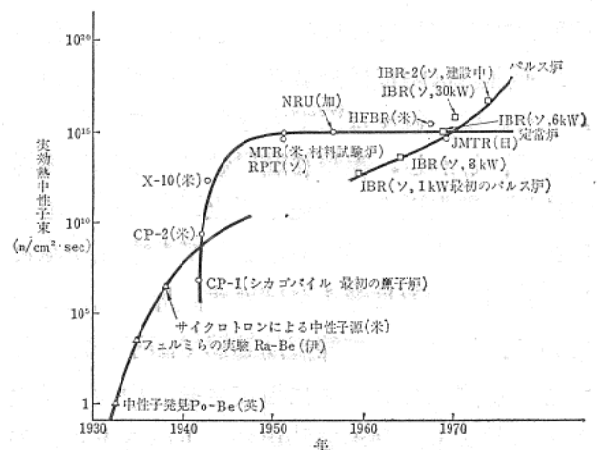


図4 中性子源の平代順推移

かという質問もあろうが、現実には非常に強い要望を受けながら「原子炉工学の進歩によって、やっとこの値にたどりつき得たのであって、図でも分るように歴史の浅い日本では、まだこのクラスの炉はできていない位である。燃料、材料の中性子照射による損傷を中心とした技術的難点が克服されてこの 1×10^{15} 程度という値が得られたのであるが、これ以上はちょっとやそっとでは不可能ではないかと考えられている。その理由は燃料の燃焼度が大きくなり、かつ運転中に蓄積してくる妨害物質のこともあり、数日おきに燃料交換するとか、運転中の連続燃料交換が必須となるため、運転上の制約が大きくなりすぎ、かつ経済性の点でも出力上昇当りの負擔がこの辺から急上昇することにある。

かくして原子炉の方が足ぶみしている中、今度は加速器による中性子発生の方では、電子線型加速器が次第に増強されてきた。連続運転では炉に対抗できないが、パルス運転でなら、そのピーク値は、炉での平均値に匹敵しうる所まで中性子生成が可能となってきたのである。ここでは加速された電子線を適当な金属面に衝突させて γ 線に変換し (Bremsstrahlung) それを鉛やウランのような重金属にぶっつけて中性子を発生させている。勿論、積分的な中性子総量を必要とする実験に対しては原子炉の圧倒的優位は不変であるが、パルスの利用に対してはこの両者の優劣は速断できない。たとえば原子炉建設に関連して要求される多くの保守、管理施設や敷地選定上の問題を考えると、たとえ中性子1ヶ当りの価格が多少高くついても、加速器の方が容易に達成しうるとゆう利点もある。不必要な時には無駄な中性子を出さないということは、色々な面で大きなプラスとなるのである。しかし、線型加速単独ではやはり限界があり、現在以上の加速電圧上昇やビーム増強はある程度まで可能であるとしても中性子源としての利用本位に考えればまず限界が見えてきている。したがって線型加速器で陽子を加速してこれを液体ビスマスに衝突させ、中性子発生とターゲット冷却を同時に行うというような新構想も生れているが、まだ実現していない。

一方、原子炉の方でも、炉の運転をパルス化するという発想があり、その起源は古く原爆研究の初期にさかのぼりうるが、ごく短時間、 $10 \mu\text{s} \sim 1 \text{ms}$ 位のみパルス状に出力発生させて、それ以外の時は炉を休止させておくというパルス炉が開発されつつある。これによると、定常運転の炉では困難であった 10^{16} 以上の中性子束達成は比較的容易である。この種の炉では、たとえば原子炉の事故時における燃料破壊の模擬実験も可能であるが、パルス状の中性子ビームを取り出すことも可能である。したがって定常炉から中性子ビームを引き出し、これを中性子チョッパーで断続化してパルス化した上で利用するような形式の実験に対しては(次章参照)、このパルス炉の方が優位に立つことは明らかである。単に得られる最高中性子束がないのでS/N比が向上するという利点もある、なお所要のパルス巾は中性子の炉内平均寿命に支配されるので、ごく短いパルス巾が($10 \mu\text{s}$ 程度)必要な場合は高速中性子炉が、またms程度のものに対しては熱中性子炉が使用され、必要に応じて単発型も、周期的繰返し型も可能である。

単位時間当りの中性子生成として現在、考えられる最高のものはこのパルス炉に前述の線型加速器を組合せるという形式である。この種のもは、現在ソ連で運転中のIBRが唯一の存在であるが、欧州原子力共同体やインドと共に、わが日本でも計画が進められている。

一方、こうした原子炉や加速器の運転を必要としない中性子源としては簡易な放射性同位元素を使う必要がある、最近 Cf^{252} (カリフォルニウム)が注目されている。これは原子炉内に生じる超ウラン元素の一種で、天然ウランが中性子を何回も補獲して生成されるものであり、最近使用済核燃料からの分離技術が向上するにつれて、比較的安価で提供されるようになったのである。この核種は中性子過剰のため、これまでのいわゆる核反応による中性子源よりも大量の中性子を放出できる利点がある。たとえば $1 \mu\text{g}$ で 10^9 ヶ/秒の中性子が放出される。半減期2年半という点では、ラジウム、とかアメリカシウムのように放射性同位体元素を使用する中

中性子源の半減期数百年という利点におよばないが、維持費を要しない中性子源としては手頃なものであるとして観迎されており、近い将来には小出力の原子炉より安価な中性子供給源となりうるだろうといわれている。

また、加速器を小型化して、真空封じ切り管内部で、重水素イオン発生、加速、ターゲットへの衝突までをも行なわせるものがここ10年位前から市販されている。これは当初は水と石油の中性子減速効果の差を利用した石油探査用に開発されたといわれている。今日ではより強力化され、放射化分析その他にも利用される出力のものが製作され、国産でも近く市販品が発売されると噂されている。この程度のものは丁度X線装置と同じ規模で使用するので、応用範囲は極めて広い。なお、連続発生では問題が多いのでパルス運転型にして、負荷率を落しているのが通常のものである。(1パルス 10^6 ケ $\sim 10^7$ ケ中性子, 200pps位まで発生可能)

4. 中性子の操縦法

加速器を使った核分裂によるにせよ、発生する中性子は高エネルギーのもので、数 MeV 程度の高速度で放出される。原子炉内では発生時そのままのものから、熱エネルギーのものまで共存している。(図5, 6参照)

所が、中性子を利用すると高エネルギーのままでの利用よりもエネルギーの低い熱中性子や冷中性子としての利用の方がかなり多いよう

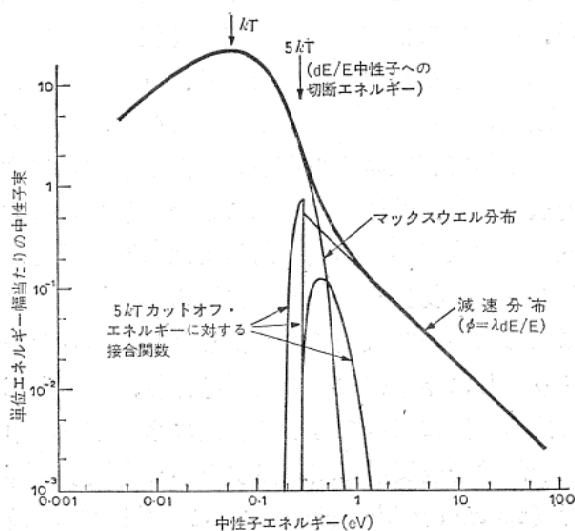


図5 熱中性子炉の炉中性子スペクトル

ある。我々は電子を熱電子として低エネルギーで発生させておいて、その電荷を利用して高電圧場において加速し高エネルギー化するという手段をよく使うが、中性子の場合にはこれと逆に低エネルギー化を行う必要があるのである。いわゆる減速、熱化、冷化とよばれている過程である。これが自由に行えるかどうかは、我々の「中性子工学」の大きなきめ手になる。その上欲をいえば、いわゆる偏向中性子をつくることができれば、その利用は飛躍的に拡大することは確実である。電気的に中性である点は同一であるX線や γ 線では(光子波)、こうしたエネルギー、即波長を自由に調節、選択するのは極めて困難なことなのである。勿論コンプトン散乱を使うとか、波長変換素子(たとえば、蛍光灯の場合紫外光を管面に塗ってある発光体で可視光に変換している。)を使うということも不可能ではないにせよ、中性子ほどの自由さはとうてい困難であろう。

中性子の散乱によるエネルギー変更には、軽い原子核ほど好都合であることが分っており、熱中性子化には含水素物質(H_2O , D_2O 有機物他)や黒鉛、ベリリウムなどが使用されている。この場合は熱中性子化の効率と共に生成された熱中性子をできるだけ吸収しないものということから材料の選択が行われる。丁度熱エネルギーレベルに到達した中性子は周囲物質の核や分子との相互作用によって、それ以下のエネルギーには下らずマックスウエル分布のエネルギー・スペクトルを保持することが知られている。そこで、よりエネルギーの低い中性子を

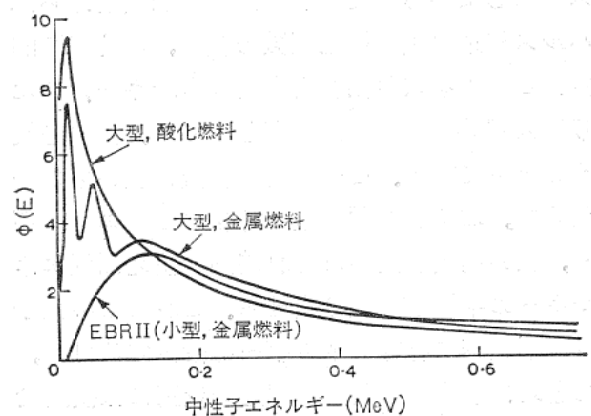


図6 高速炉の炉中性子スペクトル

取り出して使用する、しには上記の物質を冷却したもの、即ち氷とか液体アンモニア、メタンから、最近では液、固体水素までを利用して冷中性子源を作っている。非常に低温になると、

(10°K 近傍以下) 前述の衝突による減速、熱化モデルでは説明できない奇妙な現象がいくつか発見されているが、(筆者も目下その辺をつづけている) ここではあまりに専門的な話になるので省略しておこう。冷中性子を作るもう一つの方法は、冷中性子領域での散乱確率が低い黒鉛のような結晶性減速材を使うことで、フェルミ達初期の研究者はこの黒鉛フィルターを愛用して、原子炉から取り出した中性子ビームを黒鉛柱に導いて、そこから洩出する冷中性子成分の多い中性子源による実験を行っていたのである。

一方、熱、冷エネルギーまで下げないで中性子を使用したい場合。適当に高いレベルで使用したいという場合には困難な点が多い、最初に述べたように、加速器による反応を除く殆んどの中性子発生は高速中性子領域で行われる。できる限り重い原子核に衝突させると一回当りのエネルギー減少度は小さくなるがあいにく高エネルギー領域は衝突断面積自体が低いので中性子ビームをウランの塊に導入しても衝突しないでどんどん外へ洩れ出してしまい手頃なエネルギーの中性子が体系内にたまってくれるという具合にならない。そこで、あまり効率はよくないが、適当に少い回数だけ衝突させて中性子を取り出す、即ち薄い層を通して中性子を取り出すという手法が考えられる。もし中性子源がパルス運転しているのであれば適当な物質をえらぶパルス打込直後の散乱回数の少い、ごく短時間内にビームを取り出すと所要エネルギーのあたりに大部分の中性子が存在している。現象を使うこともできる。その場合の物質に重いものをえらび、おくれ時間を短かくすれば高エネルギー、軽い物質を長いおくれ時間で使えば低エネルギーの中性子が取り出せる。これらの中性子はそう厳密に特定エネルギーを指定する目的、たとえば核物理実験とか測定器校正には使用できないが、工学的利用に対しては十分な利用価

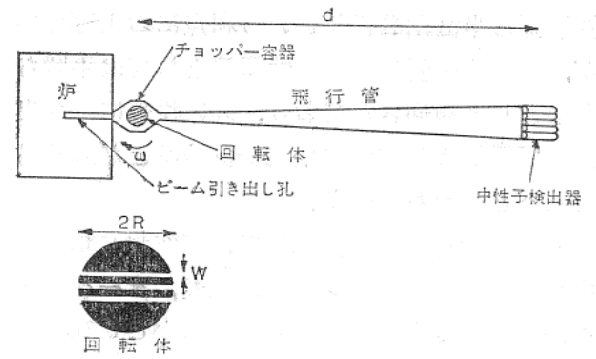


図7 中性子飛行時間法の原理

値がある。

なお、あるエネルギーのみのモノクロ(単色)中性子を発生させて利用するには、次のような手法がある。一つは核反応による高エネルギー用のもので、これは加速器による荷電粒子加速電圧と核反応の種類がきまれば、かなり厳密な指定が可能である。一般にはヴァンデ、グラシー型加速器による陽子加速が重要視され、測定器のエネルギー感度校正によく使用される。

熱、冷中性子ではこのような直接発生が不可能であるから、飛行時間法を使う。(図7) これは色々なエネルギーの中性子が、混合したままの中性子ビームを回転吸収体(チョッパー)で断続してパルス化して、これを真空中で飛行させると、特定観測点では中性子飛行時間の差によって到達する中性子のエネルギー選別が可能となるのである。また、別の方法は中性子ビームを適当な格子間隔の結晶体によって回折をおこさせ、特定の角度に散乱してくる中性子を利用することで、エネルギー選別が可能となる。これまで構造解析などによく使われているのはこの手法によるものである。(図1参照)

最近になって注目を浴びているのは、全反射を利用して特定エネルギーの中性子を取り出す方法である。前述のようにこの全反射をおこす入射角は大ていの物質に対しては1°以下で、しかもその物質表面を非常に滑らかにしなければならぬので大変である。しかし、ニッケルメッキした非常に大きな円環を作り、その内部で曲率半径によってきまる特定エネルギーの中性子だけを全反射で取り出すという中性子誘導管(neutron guide tube)は、この分野での最近の大きな成功と考えられている。

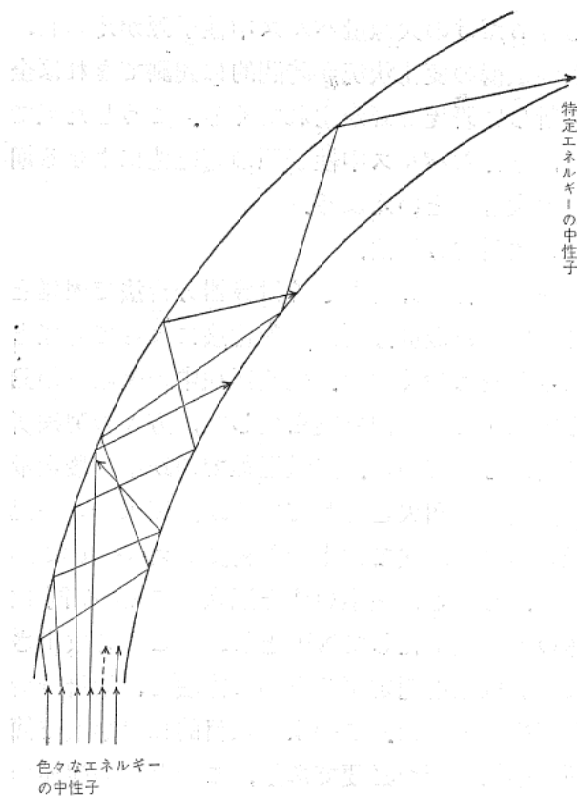


図8 特定エネルギー偏向中性を取り出す
中性子誘導管の原理

5. 中性子の応用

あまりにもよく知られている「核分裂」エネルギー放出の例を除いて、中性子の特徴を生かした応用例を若干上げておこうと思う。全てを取り上げることはできないから、なるべく多くの分野に亘ってすこしずつ代表例をとってみようと思う。

1) R, I (放射性同位元素)の生産。

かつて最強の医療用放射線源として重視されていたラジウムが、いつの間にかより安価な Co^{60} におきかえられていることに気づかれた方は多い筈である。原子炉のエネルギー利用と平行して、最も早い時期に重要な利用対象となっていたのはこのR, I生産であった。高エネルギー実験用小容量加速器ではとうてい生産不可能であったR, Iが炉内で次々と生産され各方面に使われている。日本の場合は生産技術そのものより市場が確立していないために立ちおかれていた面もあるが、今日では次第に国産化可能なR, Iが増加してきている。これは海外から輸入する場合、放射線遮へいのために大重量

の容器に納めた形で運搬するための手間や費用を考えると、価格引下げによって新しい需用を生むようになってきたともいえよう。なお、治療用などで要望される短寿命R, Iの生産は、炉もしくは大線量加速器の周辺でなければ使用できない欠点があり、日本のように研究炉が東京周辺に集中し、その他は大阪府下にこれまた集中している現状では、多くの不便を生んでいる。

2) 中性子回折——構造解析

すでに何回も述べてきたように、中性子の粒子と波動としての二重性を利用して、どの波長の中性子が回折現象をおこすかをしらべて、物質中での原子配列を決定することが可能である。この種の中性放射線の回折現象を利用するには、すでに古い歴史を有し、多くの成果を上げてきたX線回折法があり、中性子回折はそれとの類似性から理解されていることが多い。たしかに中性子の方がより透過能力が大きい点や、エネルギー変更すなわち波長変更が可能であり、かなり大きい原子間隔のものを取扱いうる点で特徴がある。これは熱中性子の波長で数Å位であるから、冷中性子を使えば有機分子間の原子結合まで対象とできるわけである。これだけでも多くの新しい利用が生じ、日本で原子炉周辺に附設されている研究装置で最も混雑し

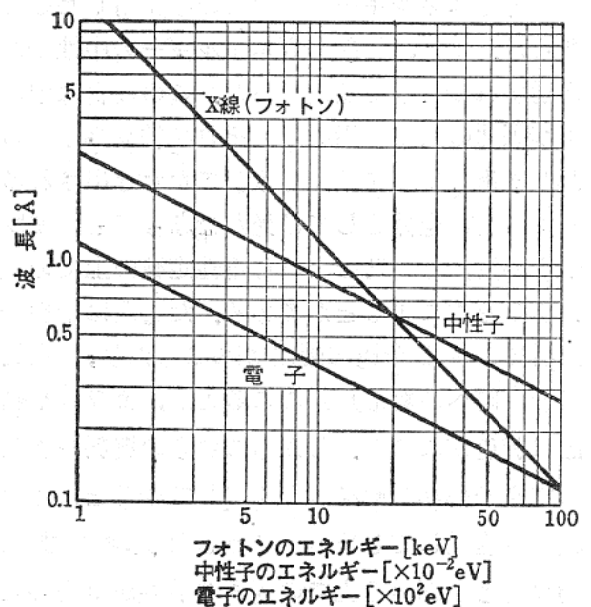


図9 フォトン、中性子、電子に関する波長とエネルギーの関係

て、数年待たないと使えないことがあるといわれているのが中性子回折装置である。

正直な所、ここで止まっているならばX線によってすでに結晶構造が決定されているものを中性子でも測定しうるにすぎないことになる。しかし、当然のことながら中性子はX線と同じようには散乱されない。それに故に中性子独自の境域が生れてくるわけである。

たとえば水素は唯一ケの電子を持っているのみであるためX線の散乱は極めておこりにくく、含水素系有機物や氷の構造には歯が立たなかったのである。一方、中性子と水素との散乱確率はかなり高く、十分利用にたえる。これに上記の波長の選択自由度が加わるので、ここでは中性子側が圧倒的な強みを持つのである。

またX線については、それが電磁波の一種であるから磁場の影響は受けなくて、原子の核外電子のみによって散乱されているので、物質中の磁気構造に関する情報獲得の手段にはなりえない。中性子の場合は偏向中性子を作ることができるので、これを使った回折実験で強磁性体の研究用に二種の情報を同時にうることもできるという強みが生れる。

3) 放射線損傷

前述の回折実験では、物質構造そのものは変化させないことが前提であり、したがって中性子の方もエネルギーの低いものを使用したのであった。では、結晶に高エネルギーの中性子が入射すればどうなるだろうか。この場合は中性子が固体の原子に衝突し、それを結晶格子からたたき出してしまふ。こうしてたたき出される原子の数は全体としては僅かであっても、硬度や伝導度、透明度のような物性定数の上での変化をひきおこすことができる。たとえば中性子照射によって金属に硬化がおこったり、生長（一方向への変形）がおこるとか、ガラスや結晶に着色がおこる。しかもこれらの資料を加熱して原子の熱運動をさかんにしてやると、元の状態へ復元してしまふ。こうした実験もまた物質構造を調べる上での大きな手がかりを与えることはいうまでもない。またこの種の実験で極く短時間の照射により観測可能な変化をおこ

しうるだけの大線量パルス中性子源がえられ、かつ損傷の変化状況が時間的に観測できれば全く新しい研究分野が生れてくる。こうした点では、強力なパルス中性子源の可能性によせる期待は大きいといえよう。

4) 放射化分析法

在来の化学分析もしくは機器分析法で困難とされていた微量分析が放射化法によって可能となった例は少ない。例えば鉄中の酸素量の測定例はすでに国内で実用化して、方々の製鉄所で利用されている。製鉄過程での鉄中の酸素量の測定は不可欠とされているが、旧来からの発光スペクトル法では十分な精度がえられなかった。しかし、酸素 O^{16} と混在している同位体 O^{17} を放射化して N^{17} とし、ここから放出される γ 線量を測定するという方法で、微量分析が可能となった。このような目的には小型で簡便な中性子源が必要であり、このための前述の可搬小型加速器が国産化されている。

また最近の公害研究で、大気もしくは土壌中の微量汚染の検出にもこの放射化法が利用されようとしている。ただ放射化分析では、他物質との結合の形態などは全く無視され、2価では有毒だが、3価では安全とか、有機水銀が無機水銀かという種類の区分には役立たない。

5) 中性子照射による治療

在来からも腫瘍やガン部分に対して高速中性子を照射する方法があるが、最近注目されているのは熱中性子による捕獲療法がある。これは熱中性子でもなお透過能力を持っていること（例えば人体内では1.8cmで半減する）、捕獲時に n, α 反応によって飛程の短い α 線を放出しうることを利用したものである。即ち体内のガンや腫瘍部に予め集まり易い形で B^{10} （硼素）を注入しておき、外部からここへ熱中性子ビームを集中して照射すると α 線が放出されるが、その飛程はせいぜい10ミクロン程度であるから、 α 線は全て患部内で止まり病的細胞を破壊するが、健康な部分までは侵さないという原理である。日本でもこと数年間に8回の臨床例があるが、いずれも脳腫瘍破壊には成功したものの約半数のこの患者の生命は長期には守りえなかつ

た。しかし、体内深部に発生したガン治療の方法としては、最も将来性のあるものとして期待されており、入射中性子のエネルギーを適当に選り、丁度患部での α 線放出が最大となるように改善するなどの努力が行なわれつつある。

6) 中性子ラジオグラフィ。

X線や超音波による非破壊検査が不可能な高密度物体に対するものとして、中性子のより大きな透過能力を利用した透視写真法がある。この場合は写真フィルムそのものは中性子では感光しないが、高速中性子はフィルム被膜中の水素に衝突して反跳陽子を放出し、これが感光作用を持ってくれる。

また別の見方をすると、X線ではその透過能力はほとんど物質の密度できまってしまうが、中性子の断面積は物質によって大きく異なっている。したがって特定元素のものの有無を目標

とするラジオグラフィも可能になる。たとえばX線では透過してしまうような含水素物質（代表例は水）の位置の検出には極めて有効である。

6. あとがき

本稿を書き上げた直後に、中性子捕獲によるガン治療を研究している研究者のグループと話合う機会があったが、そうした実際上の問題を取扱うためには、現在のようにエネルギー源としての原子炉設計目的のために発展してきた原子炉物理がそのままでは役立たないことを改めて痛感させられた。勿論、基礎となるべき中性子の振舞いに対するデータや理論的解釈が異なるはずはないが、エネルギー利用中心の見方とは別個の体系づけが必要になりつつあることだけは確実なようである。