

中性子の生物学的作用および治療応用の可能性

Biological effects and therapeutic possibilities of neutrons

Locher GL*. Am J Roentgenol 36:1-13, 1936

現在では、その生物学的作用および治療応用の可能性について考えるに十分な量の中性子を得ることができる。物理学的研究により中性子の特徴的なふるまいに関する知識が蓄積し、一定の生物学的作用を予測することができ、少なくとも一般論としてこの新しい粒子線の一定の治療応用可能性を考えることができる。中性子が物質を透過し、原子核を貫通、破壊する能力は、その基本的な特性と考えられており、核物理学の一部の分野では α 線、 β 線、 γ 線と異なる重要性を持ち、当然のことながら粒子放射線、量子放射線の様々な生物学的応用にもこれが反映する。

I. 中性子の特性とふるまい

中性子は、水素原子とほぼ同じ質量を持つ非荷電粒子である。1932年、ケンブリッジ大学キャベンディッシュ研究所のJ. Chadwick博士が発見し、ノーベル賞が授与されている。中性子は通常、金属ベリリウムにラジウムあるいはラドンが放出する α 線を衝突させるか、セメントに電気的に高速に加速した重陽子を衝突させて発生させる。中性子は粒子であるが、通常の物質を透過し、非常に硬い γ 線に類似している。中性子の衝突、相互作用の対象は原子核であり、核外電子ではない。従って、その物質中の飛程上に電離の痕跡を残すことはなく、間隔をあけながら原子核と衝突する。中性子が衝突した原子核は、(電離)反跳原子核としてはじき出されるか、あるいは中性子を捕獲して一時的あるいは永続的に他の原子核に変換される。

中性子は電荷を持たないため、他の衝突粒子のように核外電子の電場の影響を受けたり、原子核境界で制止されることはなく、原子核内にほとんど抵抗なく直接進入する[1]。ひとたび原子核内に入れば、原子核の平衡を攪乱する確率が高い。攪乱の種類は、原子核の種類、衝突する中性子の速度に依存する。遅速中性子は最も効果的である。速度が非常に大きいと、中性子は単に原子核を通過して何も起こさない。しかし中性子が停止すると、原子核は直ちに壊変したり、あるいは他の原子核に変換される。後者の場合、新たな原子核が安定であれば、単に軽い原子核から重い原子核が生成され、通常は単位量子の γ 線を放出する。新たな原子核が不安定な場合はさらに壊変する。すなわち中性子によって放射能が誘導される。中性子が原子核に進入し

てこれらの過程のいずれが発生するかは、原子核の種類と中性子の速度によって異なる。

現在のところ、中性子の照射によって40以上の放射性元素が人工的に生成されている。1つの元素から2つ以上の放射線元素が生成される場合もある。放射性元素の半減期は数秒から約14日にわたる。壊変物質は元素によって異なる特異エネルギーをもつ β 線、 γ 線を放出する。天然放射性元素は3つの重金属、すなわちウラン、トリウム、アクチニウムとその系列元素に限られているが(ルビジウム、カリウム、サマリウムの非常に微弱な放射性を例外として)，人工放射性元素はほとんどの元素から誘導されている。

人工放射性元素の生物学的研究や放射線治療への利用可能性は、既に多くの関心を集めており、この分野は研究施設が設けられて実験が行われれば、ただちに開拓されるであろうことは疑いのないところである。実際、ある種の治療では人工放射性元素がラジウムやラドンにとって替わることも十分考えられる。その主な利点として、放射線の均一性、治療に好適な半減期、壊変物質の無毒性などが挙げられる。しかし、このような元素を中性子の衝突によって(直接的あるいは間接的に)生成する方法は、著しく非効率的である。1個の放射性元素を生成するために必要な中性子の平均衝突回数は10の10乗のオーダーである。従って、中性子源の潜在的な生物学的作用は、それが有用か否かは別として、同じ中性子源で生成される人工放射性物質の作用よりも必然的に大きなものとなる。

II. 中性子線照射による生物学的作用

本稿の目的は、中性子の生物学的作用と応用可能性について述べることである。様々な元素が特徴的な中性子吸収特性をもつことから、非常に重要な応用が発展しうると考えている。遅速中性子が不均一な物体を通過するとき、その吸収は、粒子あるいは量子放射線の吸収、散乱の法則には従わない。逆に、ある種の元素は中性子を非常に強力に吸収し、また別の元素はほとんど吸収しない。さらに、一定の速度における吸収の強弱は、(γ 線、X線のように)原子番号に依存せず、その原子核構造の特徴によって決まる。例えばホウ素(原子量10.82)は遅速中性子を同量の炭素(12)の90倍も吸収する。カドミウム(112.41)は錫(118.7)の825倍も吸収するが、錫の1原子当たりの吸収は炭素と同程度である[2]。このような偶然性から、中性子の生物学領域における非常に有望な応用が考えられるが、

* Bartol Research Foundation of the Franklin Institute. Swarthmore, Pennsylvania.

これについては後述する。

a. 弹性衝突の効果

比較のため、2つの同一の有機物をそれぞれ γ 線、不均一なエネルギーをもつ中性子線で照射した場合、何が起こるかを考える。前者の場合、吸収は原子当たりの電子の数に比例する。従って、概ね原子番号に比例する。このため、重い元素は軽い元素より多く吸収する。吸収されたエネルギーによって電子が放出され、最終的には熱として消失する。

生体を不均一なエネルギーをもつ中性子線で照射する場合、エネルギーの吸収はこれとは全く異なり、中性子を非常に多く吸収する原子がある場合を除けば、原則として水素原子が吸収する。水素原子による「吸収」は、ほとんどが散乱である。すなわち、中性子は水素原子と弾性衝突（非捕獲衝突、玉突き衝突）して、 γ 線により放出される電子と異なり、短いが電離度の高い経路を反跳する。1個の中性子は、静止するまでに何回も散乱しうる。水素による中性子の大きな吸収が起こるのは、次の2つの場合である。生体内に非常に多くの水素が存在する場合、および水素原子の衝突面積が他の原子に比較して大きい場合である（炭素、窒素、酸素の遅速中性子に対する核断面積は、それぞれ水素の0.12倍、0.32倍、0.09倍である）。ここで特に興味深い点は、水素は生体内に均一に分布しているため反跳現象によって吸収されるエネルギーが均一になることで、これに対して、 γ 線、X線を強く吸収する重い元素は、骨その他の特殊な組織にかなり限局する。

ここでは、 α 線、 β 線、および γ 線によって放出される電子と比較して、中性子の生物学的作用を論じることしかできない。高速中性子の主な作用は、組織内の水素原子の放出によるものである。水素原子による単位飛程当たりの電離は α 線の約1/4で、飛程は同じエネルギーをもつ α 線の約4倍である。同じく、水素の単位飛程当たりの電離は、電子の100倍のオーダーであり、その飛程は1量子の γ 線から放出される概ね同じエネルギーをもつ電子の1%である。

α 線（あるいは水素原子）が相応の厚さを持つ組織に及ぼす生物学的作用に関する実験データは、残念ながらおそらく存在しない。このような実験は非常に難しいが、その理由は、重い粒子は、中性子によって生成しない限り、動物や植物組織内に分布することが非常に難しいある種の放射性物質からしか得られないためである。

中性子が水素原子核に衝突する場合、その運動エネルギーの平均63%が水素に移動する。従って、中性子が連続して水素に衝突すると、運動エネルギーは非常に急速に減少する（図1）。高速中性子の連続衝突間の平均距離は比較的大きい（数cmのオーダー）ので、通常

の厚さの組織内における衝突数はかなり少なく、実際に1cm以下の組織では、高速中性子が2回以上衝突する事象は一時近似的にはほとんど無視しうる。以上の事実をもとに、水素の量、入射中性子の運動エネルギー、水素の吸収（散乱）係数がわかれば、水素原子との衝突によって一定の物質層内に付与されるエネルギー量は相応の精度で計算しうる。このような計算は、実際の吸収過程は非常に異なるが、吸収物質や入射放射線の波長が既知の場合のX線吸収、 γ 線吸収の計算に類似している。しかし残念ながら、実際に多くの中性子源から放出される粒子のエネルギーは非常に不均一である。このような中性子源から均一な中性子線を得る問題は、X線管から単色X線を取り出す問題に類似している。すなわち、フィルターによって透過性の低い成分を除去あるいは低減するか、あるいはX線の場合は分光装置、中性子の場合は速度選択装置を使用するかである。しかし後者は非常に非効率であり、出力が非常に小さくても良い場合、あるいは入力が非常に大きい場合以外は利用できない。

b. 選択的吸収効果

中性子の弾性衝突はここまでにして、次に水素よりもはるかに吸収が大きいいくつかの元素による吸収を考える。前述のように、このような元素の強力な吸収能は、遅速中性子の衝突による原子核変換を特に起こしやすい、その特殊な原子核構造に由来するものである。このような元素には、リチウム、ホウ素、イットリウ

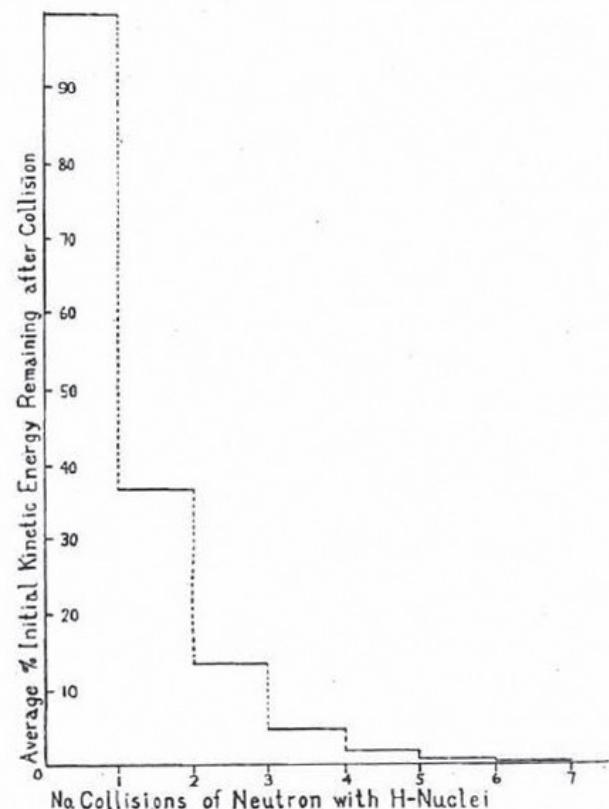


図1. 中性子の衝突回数と運動エネルギーの関係。横軸：中性子と水素の衝突回数。縦軸：衝突後の残存運動エネルギーの平均比率（%）

ム, カドミウム, バリウム, イリジウム, 水銀のほか, いくつかの稀土類元素(サマリウム, ユウロピウム, ガドリニウム, テルビウム, ジスプロシウム)がある。表1に, Dunning, Pegram, Fink, Mitchellらのデータに基づき[3], ここで着目している様々な元素による遅速中性子の吸収の程度を示す。表の上半は大部分の生物組織を構成する元素, 下半は吸収が特に大きい元素である。比較のために鉛を追加してある。

ここですぐ分かることは, 生体組織を遅速中性子で照射された部位に, これを強力に吸収する元素が十分にあれば, そこには周囲の組織よりも大きな中性子エネルギーが付与されることである。このような元素は, 非常に少量でも強力に吸収する。一方, 表の下半に挙げた元素は, 多くの生体組織では中性子の吸収についてもおそらく無視しうるほど少量である。しかしここで, 重要な可能性が存在する。すなわち, 電離エネルギーを多く付与したい部位に, 注射その他の方法で中性子を多く吸収する物質を投与する方法である。この目的に利用する元素は, もちろん毒性のない形である必要がある。中性子の吸収は純粋に原子の現象であり, その吸収については化合物の種類は無関係である。同

様な方法で, X線, γ 線の選択的吸収も可能であるが, 強力な吸収物質は必然的に重い元素であり, これに対して中性子の吸収物質には, 表1に示すように非常に小さな原子番号の元素が含まれている。

遅速中性子の選択的吸収は, いずれの場合も中性子の衝突による吸収元素の核変換に関連するものと思われる。これに関連して特に注意すべきは, 物質中で中性子の吸収によって放出されるエネルギーは, 水素原子との弹性衝突の場合を除いて, 入射する中性子のエネルギーではないという点である。ここで放出されるエネルギーは, 衝突された原子の核エネルギーである。中性子はあくまでも, エネルギーを放出する核変換を開始するトリガーとして働くものである。これは通常の意味でのトリガーとは異なり, 吸収された原子核の一部となる。中性子の捕獲は, 核変換の基本であり, 遅速中性子が速い中性子よりも効率的である理由は明らかである。中性子の核吸収は, γ 線, X線の吸収とは異なる特徴的な現象である。

中性子の核吸収によって放出されるエネルギーの形態は, 吸収物質によって異なる。軽い元素, 特にリチウムやホウ素では, 低エネルギーの α 粒子が放出される。

元素	原子番号	原子量	遅速中性子の衝突断面積 ($\text{cm}^2 \times 10^{24}$)	水素と比較した原子当たりの相対的吸収	炭素と比較した原子当たりの相対的吸収	1g当たりの相対的吸収 炭素=1.00
Hydrogen	1	1.008	35.0	(1.00)	8.5	101.6
Carbon	6	12.00	4.1	0.12	(1.00)	(1.00)
Nitrogen	7	14.01	11.3	0.32	2.76	2.36
Oxygen	8	16.00	3.3	0.09	0.8	0.65
Sodium	11	23.00	4.2	0.12	1.0	0.53
Magnesium	12	24.32	3.5	0.10	0.85	0.42
Phosphorus	15	31.03	14.7	0.42	3.68	1.39
Chlorine	17	35.46	39.0	1.11	9.52	3.22
Calcium	20	40.07	11.0	0.31	2.68	0.80
Lithium	3	6.94	45.	1.3	11.	19.0
Boron	5	10.82	360.	10.3	88.	97.5
Yttrium	39	88.9	800.	22.9	195.	26.4
Cadmium	48	112.41	3300.	94.3	815.	86.0
Barium	56	137.37	140.	4.0	34.	3.
Samarium	62	150.43	4700.	134.3	1144.	92.
Europium	63	152.0	est. < 1000.	< 28.6	< 244.	< 19.
Gadolinium	64	157.6	30000.	857.0	7320.	557.
Terbium	65	159.2	est. < 1000.	< 28.6	< 244.	< 19.
Dysprosium	66	162.5	700.	20.0	171.	13.
Iridium	77	193.1	285.	8.1	69.	4.
Mercury	80	200.61	380.	11.0	93.	5.6
Lead	82	207.20	8.6	0.25	2.	0.1
Thorium	90	232.15	32.0	0.9	8.	0.4

表1. 各種元素の中性子衝突断面積, 吸収係数

重い元素の場合は、(我々が知る限り) β 線, γ 線が生成される。中性子の吸収と放出は同時の場合もある。その他の場合、すなわち人工放射能が誘導される元素では、元素の放射性壊変の法則に従い、吸収に続いて放出が起こる。中性子吸収によって放出されるエネルギー量は、吸収される中性子の数 N と、1 個の中性子の吸収により放出されるエネルギー e の積である。いくつかの軽い元素については、相対的な概略値が得られている [4]。その他の元素についても間もなく計測されるであろう。放出されるエネルギー e は、元素や変換の種類に応じて正負いずれの値もとる。天然放射性物質、人工放射性物質いずれにおいても、核エネルギー放出は当然のことながら外部刺激なしに起こる。中性子による元素の瞬間的壊変は、(本当にそれが瞬間的であるなら) 半減期ゼロの放射能誘導と言っても間違いない。

c. 中性子照射により期待される効果

中性子の作用から期待できる生物学的効果は、2 つに分けられる。 (a) 中性子の(特に水素原子との)弾性衝突による組織全体に発生する効果、および (b) 高吸収度の原子が(少量であっても)存在する局所に発生する効果。いずれの場合も、中性子照射による電離作用は、 γ 線、X 線照射と同様に主に破壊的な作用であることから、動植物における変異の誘発、癌組織など悪性細胞の破壊に応用しうる。相補刺激の問題は、他の放射線と同じくなお検討の必要がある。中性子の作用は他の放射線と大きく異なっている。すなわち、ひとことで言えば、 γ 線は重い元素に吸収されるのに対して、中性子は水素のような軽い元素に最も良く吸収されるということである。水素による中性子の散乱は、短飛程ではあるが強力な電離粒子を生成し、 γ 線が放出する電子は長飛程で電離力の弱い粒子を生成する。そしてさらに、中性子はある種の元素により強力な選択的吸収を受ける。これによって中性子自体からではなく、吸収した原子から原子エネルギーが自発的に放出されることになる [5]。

III. 解決すべき物理学的問題

実際の中性子源からの中性子線の照射により物質から放出されるエネルギーの量、形態、分布を正確に計算できるためには、純粋な物理学的研究によって解決すべき多くの問題がある。このような問題をいくつか挙げる。

- (1) 中性子線の中性子の毎秒当たりの個数、その速度分布を簡便かつ十分な精度で計測する手法の開発
- (2) 吸収物質による中性子の「吸収」は2 つに分けられる。すなわち原子核吸収(真の吸収)と散乱である。異なる元素、異なる中性子エネルギーについて、両者の比を求める必要がある。これに関するデータの一部

は既に入手可能であり [6]、その他についても早晚明らかになるであろう。

(3) 様々な条件下における連続衝突間の平均飛程を知るために、異なる物質、異なる速度の中性子の散乱についてさらなる研究が必要である。この情報は、吸収物質内の散乱により放出されるエネルギーの量と分布を知り、中性子源をとり囲む適切な散乱装置あるいはフィルターを設計する上で非常に重要である。

(4) 核変換の過程とエネルギー関係についてさらに研究が必要である。ある場合には人工放射能が誘導され、また別の場合には即時核変換が発生して α 線、 β 線、 γ 線が放出される。両者が同時に起こることもある [7]。各元素について、どのような過程が発生するか、各過程にどの同位元素が関係するか、壊変する元素から放出される粒子の種類とエネルギー、これらの過程における中性子の速度の影響を決定する必要がある。

IV. 中性子の生物学および医学研究への応用例

生物学的研究や治療に、(中性子による人工放射性元素の利用ではなく) 中性子を直接利用できる着想をここに示す。このような応用は2 つに大別される。すなわち中性子と照射物体中の水素あるいは他の原子核との弾性衝突による「全体的効果」、および中性子吸収能が大きい原子による核変換に伴う核エネルギーを放出する、中性子の選択的吸収による「特異的局在効果」である。後者には、前述のように少量の中性子高吸収物質を生体の特定の領域に導入して中性子を照射するという興味深い可能性がある。

実験生物学の領域では、以下のような可能性がある。
(1) 生体(動物あるいは植物)における中性子の全体的効果の研究、例えばその細胞分裂速度への影響、(2) 中性子による細菌の殺菌あるいは弱毒化、(3) 遅速中性子照射下における高等動物の臓器、組織への特異的効果、(4) 動物、植物における中性子による変異生成の効果。著者は、このうち(4)が中性子の純粋生物学への応用として最も興味深いと考えている。

医学研究の領域では、(1) 中性子の全体的あるいは選択的吸収による癌細胞の死滅あるいは抑制。特に電離エネルギーを放出すべき部位に少量の強力な中性子吸収物質を導入する可能性(例えばホウ素、リチウム、ガドリニウム、金などの可溶性非毒性化合物を表在性癌に注射し、遅速中性子を照射する)、(2) 遅速中性子により病原細菌に対して破壊作用を及ぼす可能性。これは医学的にも純粋生物学の立場からも、十分考慮に値するものである。可能性は低いとはいえ、強力な中性子吸収元素の非毒性化合物を感染巣に集中させ、中性子照射によって細菌を死滅させることは考えられないことではない。

この分野の研究には、多くの研究者が長年にわたって

専念する必要があると思われる。しかし、それによって1つの疾患を撲滅できたり、あるいは疾患の生物学的病態をより良く理解できるようになって治療法への道がひらけるなら、その努力に値するものである。

V. 中性子線の発生

「中性子の発生」とは、原子核から中性子を解放することを意味する。 α 粒子と同じく、中性子は原子核内にのみ存在し、これを利用するにはそこから取り出す必要がある。原子核から中性子を取り除くと、 α 粒子の自然放出の場合と同じように核壊変が起きる。しかし、23の放射性元素と同位元素から放出される α 粒子と異なるのは、中性子を自然に放出する元素は知られておらず、高エネルギーの粒子や量子を衝突させて放出する必要があることである[8]。この事実から、高密度の中性子線の発生は、これまで開発されたいかなる方法をもっても、困難あるいは高価なものとなる。

中性子は、原子核を α 粒子(ヘリウム原子核)、重陽子(重水素核)、 γ 線により壊変させることにより得られる。いずれの場合も、入射する物体は原子核に進入して原子核内に中性子を保持している結合エネルギーに打ち勝つに十分なエネルギーを有する必要がある。 γ 線の場合は、原子核に進入する必要がないことから、結合エネルギーだけが問題となる。

中性子を発生させるオリジナルな方法、すなわちポロニウムからの α 粒子をベリリウムに照射する方法は、他の方法にくらべて中性子の発生量が少なく、大量のポロニウムを用意することが難しいことからここでは考慮しない。毎秒100万個以上の中性子を発生させる3つの方法を中性子発生可能量の少ない順に考えてみる。

(1) ラジウムあるいはラドンから得られる α 粒子をベリリウムに照射する方法。

この方法では、密封容器内で金属ベリリウム粉末とラジウムあるいはラドンを混合する。もちろんRa-Be中性子源は一定であるが、Rn-Be中性子源はラドンガスと同じ速度で減少する。ベリリウムをラドンやラジウムあるいはラドンと混ぜても、通常の γ 線利用に支障を来たすことはない。中性子は、他には利用されない α 粒子によって生成され、ベリリウム(原子量9.02)による γ 線の吸収は非常に小さい($\mu = 0.074/\text{cm Be}$)からである。単に γ 線の放出に中性子の放出が加わるだけである。

Fermi, Arnaldi, D'Agostino, Rasetti, Segre[9]によると、ベリリウムガスとラドン1Ciから、毎秒およそ100万個の中性子が発生する。これによれば、ラジウム1gとベリリウムで、毎秒130万個の中性子が得られる。この方法の効率は、 α 粒子10万個あたり中

性子1個となる[10]。最近の推測では、Rn-Beからさらに多くの中性子が得られる。JaeckelはRn 1Ciのとき、中性子の生成は1,000万/秒/Ciとしている[11]。Paneth, Loleitによれば、300万/秒/Ciである[12]。この場合の効率は、 α 粒子1~3万個につき中性子1個となる。

Ra-Be中性子源からの γ 線は、必要に応じて厚さ数cmの鉛でフィルターすることにより、大幅に低減できる。鉛は中性子に対して非常に透過性であるため(表1)、中性子線の強度に影響することはない。逆に中性子線の強度は、数cmのパラフィン(中性子の減速用)、ホウ素あるいはカドミウム箔(遅速中性子の吸収用)で順にフィルターすることにより、 γ 線を失うことなく大きく低減できる。パラフィンあるいはその他の水素に富む物質を使用しなければ、中性子を有意に吸収することはできない。その初速は非常に大きいため、物質を通過する際の吸収は既知の最も硬い γ 線よりもさらに小さい。従って、Ra-Be, Rn-Be中性子源は、中性子をフィルターせずとも γ 線源として利用できる。この種の線源として現在最も強力なものは、Paneth, Loleitが報告したラドン2,200mCiとベリリウムの組合せである[13]。

(2) ベリリウムに硬 γ 線を照射する方法

1934年、Szilard, Chalmers[14]は、ラジウムやラドンが放出する硬い γ 線により、ベリリウムが壊変すると同時に、Chadwick, Goldhaberが予測した通り、中性子が放出されることを発見した。さらに近年、Chadwick, Goldhaber[15]はこの現象を追求し、その計測から、いくつかの中性子源から放出される中性子数を計算できるようになった。ベリリウム原子核の面積を 10^{-28}cm^2 、この光壊変現象におけるラジウム1.0gあるいはラドン1.0Ciのエネルギーを $1.7 \times 10^6\text{eV}$ 、 $1.14 \times 10^{10}/\text{秒}$ とすると、厚さ10cmの固体ベリリウム(7.8kg)に囲まれたラジウム1gあるいはラドン1Ciは、90万個/秒の中性子を放出する。これは、前述の(1)と同程度である。フィラデルフィアのAmerican Oncologic Hospitalの協力を得て、Dr. L. H. Rumbaughと著者は、ラジウム4gの γ 線の一部を金属ベリリウム500gを通過させて得られる約20万/秒の光中性子源により一連の実験を行っている。もちろん(1)と(2)を組合せることもできる。

硬い γ 線によるベリリウム、重水素の光壊変による中性子の生成は、高圧電源による高エネルギー γ 線の発生という既知の、しかし未開拓の可能性があることから、興味深い問題である。170~350万Vの管球において、 $1\mu\text{A}$ の電流は、 γ 線あるいはX線に変換されれば、ベリリウムの光壊変によって毎秒50億個の中性子を生成できる。この中性子線は、少なくともラジウム200gから得られる中性子に匹敵する。最も容易に

壊変するベリリウムでもその核結合エネルギーは 130 ~ 200 万 V とされ, このため光中性子を生成するには非常に硬い γ 線が必要がある. 一方, ラジウム, ラドンが放出する γ 線のうち, 核壊変に十分な硬さのものは約 16% にすぎない.

(3) 様々な元素に高電圧発生装置により生成した高速重水素を照射する方法

荷電粒子を高速に加速する高電圧発生装置の開発は, 強力な中性子線の生成に大きな展望をもたらした. 近いうちにこのような装置が, これまで採掘されたすべてのラジウムによる Ra-Be, Rn-Be 中性子源を合わせたものよりもさらに高速に中性子を生成できるようになると考へることには十分な理由がある. 現在のところ, 高電圧発生装置は実験開発段階にあるが, 中性子を直接あるいは間接に利用する多くの重要な物理学実験を可能としており, このような装置の将来の発展の道が示されている.

中性子は, 高電圧発生装置で水素, ヘリウム, 重水素など様々な元素のイオンを照射することによって生成されるが, 最も効果的なものは, 重水素イオン(重陽子)である, ここではこれについてのみ検討する.

中性子の発生効率は, イオンの電圧とともに急速に上昇するため, 200 万 V 以上の電圧が望ましい. このような電圧の発生に伴う困難は, 様々方法で解決されている. そのすべての可能性が尽されたわけではないので, 「最良」の方法を示すことはできない. ある方法は電圧, イオン電流の大きさの観点から, また別の方法は出力の定常性, 均一性の観点から開発されている.

高電圧発生装置は, 便宜的に 2 種類に大別できる. (A) 1 ステップで最大電圧を発生するもの, (B) イオンの経路に沿って低い加速電圧を繰返し印加してイオンを加速することにより「出力電圧」を得るもの. 第 1 のグループとしては, 次のものがある.

(1) 静電発生器. 特に Van de Graaf & Bramhall, Tuve, Dahl, Hafstad らによる Van de Graaf 装置.

(2) 高電圧変圧器. 特に Crane & Lauritsen による, 一連の変圧器をカスケードに接続する方法.

(3) 直列 - 並列コンデンサー発電機. Cockcroft & Walton が発明した, 一連の高電圧コンデンサーを並列に充電し, 直列に放電する装置(この装置は, 初めて研究室レベルで核壊変を起こすのに十分なイオンの加速を達成した方法である).

第 2 のグループには, 次のものがある.

(4) 高周波発振真空管に連結した中空シリンドー内で連続的にイオンを加速する方法. Lawrence & Sloan が開発したもので, その出力電圧はピーク電圧に加速管対の数を掛けた値となる.

(5) E. O. Lawrence の発明によるサイクロトロン. この独創的かつ非常に成功をおさめた装置は, 2 つの電極と, 電界に直交する強力な磁界だけで動作する. (4) と同様, 電極は高周波発振装置に接続されている. わずか 25,000V のピーク電圧で, 600 万 V 以上の重水素エネルギーが得られている. 現状ではこの装置により, 核変換に関して最も多くの情報が得られており, 他の高電圧発生装置にくらべて多くの人工放射性物質の生成に利用されている.

(6) Beams による連続加速装置. 原理は (4) に類似するが, 発振回路ではなく「トロリー」内の電気パルス伝送を利用している. 他の装置より新しく, 実験段階にある.

紙面の制約でこれらの装置の詳細について述べることはできないが, 中性子生成における高電圧発生装置のラジウム, メソトリウムに対する利点は, 大出力が可能な点にある. その理由は, α 粒子のかわりに陽電子を利用していること, 陽電子は自然発生する α 粒子をはるかに凌ぐ高速に人工的に加速できることにある. 欠点は, 装置の建設に費用がかかること, 綿密な設計が必要であること, 専門のオペレーターが常に必要なことである.

VI. 中性子の取扱い

(a) 防護

中性子の身体的有害作用(「中性子火傷」ともいえる)に対する取扱者の防護法は, γ 線, X 線の場合と同様である. 中性子の防護吸収材は, 同程度の放射性物質からの γ 線の防護にくらべて厚いことが求められる. これは, いずれの元素についても高速中性子の吸収係数が小さいためである.

中性子の吸収は, 2 つの連続ステップから成る. まず散乱による減速, そして原子核吸収による遅速中性子の除去である. 前者は, パラフィン, 水, 油など, 水素が豊富な物質内に中性子を通過させることで最も良く達成できる. 後者は, ホウ素, カドミウム, リチウムあるいはこれらの化合物が最も効率的かつ便利である. 深さ 2-3 フィートのホウ素水溶液は, このいずれにも良く機能する.

中性子の生成, フィルターに γ 線その他の透過光線も絡む場合は, そのような光線の防護も必要である. 例えば, Ra-Be, Rn-Be 中性子源を使用する場合は, ラジウム, ラドンの γ 線に対する一般的な防御が必要である. これに加えて, これらの線源による中性子の生成にあたっては, (比較的弱い) 非常に透過性の高い γ 線放出を伴う(その平均エネルギーは, Ra C [124Bi の旧称] の最大エネルギー 219 万 V に対して 600 万 V のオーダーと推測される). 高電圧発生装置による中性

子源は通常 γ 線を放出する。Crane, Celsasso, Fowler, Lauritsen[16] らは、100 万 V 以下の高速陽子の照射により、リチウムから 11 種類の波長の γ 線が放出されることを発見している。この中で最も硬い γ 線は、エネルギー 1,600 万 V のものであった。ある種の元素による中性子の吸収も γ 線放出を伴う。例えば、遅速中性子がカドミウムに吸収されると 1,000 万 V と推定されるエネルギーを放出する[17]。吸収一放出現象をおこす量子の数は、おそらく量子吸収過程で吸収される中性子の数に等しい。そのエネルギーは非常に大きいことから、生理学的作用の危険は最小限にとどまる。

強い中性子線に曝露される人には、頻繁な血球数検査を行うことにより γ 線の過剰照射、そしておそらく中性子についてもこれを検出することができるが、中性子についてはまだ実験で証明されていない。最近の報告では、カリフォルニアのサイクロトロンの近傍で働いていた人が、遅速中性子を吸収して体内組織に人工放射性物質が生成され、非常に強い放射性を帯びたという。このような放射能の測定により、(速中性子ではなく) 遅速中性子への曝露の程度を、ただちに容易に決定できるはずである。この方法の変法として、銀、ロジウム、バナジウム、臭素、ヨウ素など(遅速中性子によって人工放射能が誘導される元素)をポケットいれて持ち運ぶことにより、ある時点での遅速中性子への曝露を計測することが考えられる。高速中性子の曝露の測定は容易ではない。

(b) 計測とフィルター

中性子線の基本的特性は、第 1 に単位時間に単位面積を通過する個数、第 2 に速度、第 3 に飛程の方向である。最初の 2 つによって、中性子線のエネルギー流量 (flux) が決まる。第 3 は、線源の面積が広い場合、中性子線が広い範囲の散乱物質を通過する場合に、その影響を計算する上で重要となる。

残念ながら、これらの特性の計測は難しいのが現状である。線源によらず毎秒あたり放出される中性子の個数は、せいぜい 2 倍のオーダーの精度でしか求められない。速度の分布は、個数よりもさらに不確実である。特に中性子のエネルギーが不均一な場合、その実施、解釈に誤差のない実験を計画することは容易ではない。このような困難の主たる原因是、中性子の検出、計測効率が、その速度によって大きく変動すること、そしてこの変動範囲が計測法によって異なることがある。一般に、中性子線のエネルギー流量の計測にあたっては、それが概算であっても、複数の計測法を用いることが必要である。6 つの中性子線計測法を挙げる。

(a) パラフィンを張った電離箱

中性子によりパラフィンから放出される水素粒子による電離の総和が計測される。この方法は高エネルギー

の中性子には比較的適しているが、原子核粒子の電離計測にまつわる誤差に加え、水素粒子の放出確率の中性子速度への依存性による不確実性がある。遅速中性子の計測には不適である。

(b) 薄い電離箱と高感度線形増幅機の組合せ

個々の電離粒子の通過を記録し、核粒子の飛程 1cmあたりの電離を計測し、これから粒子のエネルギーを求める。中性子の研究には非常に有用であるが、異なる速度の中性子の検出効率に不確実性を伴う。電離箱をリチウムあるいはホウ素で内張りすれば遅速中性子の計測に、パラフィンを使えば高速中性子の計測に利用できるが、効率は異なる。

(c) 中性子による誘導される人工放射能の利用

適当な「検出元素」(detector element)を中性子線に曝露し、その放射能壊変による電離を Geiger-Muller カウンターあるいは電離箱で計測する。検出元素は、異なる速度の中性子に非常に選択的に反応し、低エネルギーないし比較的低エネルギーの中性子に最も高感度である。

(d) 写真乾板の原子核崩壊

特殊な方法により、軽い元素の崩壊による α 粒子、水素粒子の飛程をある種の写真乾板に記録できる。この方法の欠点は、比較的広範囲を顕微鏡で観察する必要があるため時間がかかること、ならびに比較的遅い中性子に選択性があることである。記録はもちろん永久的である。今後確実にさらに発展すると思われる。

(e) Wilson 霧箱

この装置では、原子核壊変による崩壊産物の飛程を写真に撮影し、粒子の種類、エネルギーを決定する。線源は比較的弱い必要があり、強力な γ 線がある場合は使用不能である。

(f) 化学的計測。

近年 Hopwood & Phillips[18] は、コロイドに対する化学作用、あるいは単純な化学反応の促進により中性子照射の累積効果を測定する試みを報告している。いずれの場合も、その効果は γ 線の場合に類似しているという。同様の方法がさらに開発されるであろう。

不均一な中性子線に強力なフィルターをかけて、低エネルギー粒子を除去できる。厚さ数 mm のカドミウム、ホウ素、リチウムなどのフィルターにより、遅速中性子の大部分を、高速中性子の比率にほとんど影響することなく除去しうる。しかしフィルターについてはなお研究の余地がある。例えば最近、遅速中性子を著しく吸収するカドミウムが、金に放射能を誘発しうる遅速中性子を発生することが見いだされた[19]。同様の現象は、銀、インジウムでも発見されており、強力に吸収される中性子には、元素によって異なる最小エネ

ルギーおよび最大エネルギーが存在することが示唆される。言い換えれば、遅過ぎる中性子、速過ぎる中性子は、原子核に捕獲されない可能性がある。この問題に関して更なる知見が加われば、フィルター方法も改良されるであろう。

Rn-Be 線源からの中性子の減速に最適なパラフィンの厚さは、遅速中性子の検出にリチウムの崩壊を利用する場合約 10cm である [2]。初エネルギーがさらに低い中性子では、パラフィンの最適厚は 10cm 以下である。これより高いエネルギーの中性子の場合は、明らかに 10cm 以上となる。様々な最大エネルギー、エネルギー分布をもつ中性子線源に対する最適な散乱物質の決定はなお今後の課題である。中性子と水素原子の衝突は、水素自体が遅速中性子の一部を吸収し、これに伴って γ 線が放出されるため多少複雑である（この吸収は、中性子と水素原子核が直接合体して重水素を形成することによる）。中性子が水素に最も多く吸収される場合の吸収量とエネルギーは、まだ正確には求められていない。

補遺

本稿執筆後、高速中性子の生物学的作用に関する重要な論文が 2 編発表された。その 1 つでは、Lawrence & Lawrence[20] が、サイクロトロン（カリフォルニア大学）からの中性子線量とラットの血液への影響の関係を、非常に硬い X 線（90 万 V）と比較したものである。その効果は類似しており、リンパ球の減少が認められたが、同等の作用をもたらす中性子線量は X 線量のわずか 1/10 で、この作用について高速中性子は X 線の 10 倍の効率をもつことが示唆された。もう 1 編は Zirkle & Aebersold[21] によるもので、一定の中性子線と硬 X 線による小麦未生の根の生長速度遅延を測定する実験である。それによると高速中性子線 1R が、X 線の 20R に相当する。これらの報告の装置、計測法は、Lawrence & Lawrence の論文と同じであり、2 つの実験結果を直接比較しうることは重要である。このことから、異なる生体に対する同量の中性子線の生物学的作用は、生体、生物学的作用種類によってかなり異なると結論できる。

【註】

1. より正確には、中性子場は他の原子場と、非常に近い距離でのみ相互作用する。その「半径」は 10^{-13} cm のオーダーで、これに対し原子の半径は $5\text{--}19 \times 10^{-9}$ cm、原子核の半径は $1\text{--}10 \times 10^{-13}$ cm である。
- 2, 3. Dunning, Pegram, Fink, Mitchell. Interactions of neutrons with matter. *Phys Rev* 48:256, 1935
4. H. J. Taylor (Proc Roy Soc A47:873, 1935) によると、ホウ素は遅速中性子により壊変するとエネルギー約 2×10^6 eV の α 粒子を放出する。これは空気中では約 1.1 cm、写真乾板のゼラチン中では約 7.6μ に相当する。
5. 中性子は、 α 粒子と同じく自然界には遊離状態で存在しない。 α 粒子が電子を捕獲してヘリウム原子となる。中性子は原子核に進入してその一部となり、核変換を起こす。
6. Mitchell ACG, Murphy EJ. *Phys Rev* 48:653, 1935. *Bull Amer Phys Soc* 11:13, 1935
7. Artificial radioactivity produced by neutron bombardment. Part I. Fermi E, Arnaldi E, D'Agostino O, Rasetti F, Segrè E. *Proc Roy Soc A146:483*, 1934. Part II. Amaldi E, D'Agostino O, Fermi E, Pontecorvo B, Rasetti F, Segrè. *E Ibid 149:522*, 1935
- 8, 9. 中性子を放出する放射性元素が地殻に存在したとしても、壊変して長寿命の親核種は存在しない。
10. ラジウム 1g は毎秒約 7.26×10^{10} の γ 線を放出し、そのうち 4.45×10^{10} が硬線である。Rutherford, Chadwick, Ellis. *Radiations from radioactive substances*. Cambridge University Press, p.501, 1930
11. Jaeckel R, Ztschr f Phys 91:493, 1934
- 12, 13. Paneth FA, Loleit H. *Nature* 136:950, 1935
14. Azillard, Chalmers. *Nature* 134:494:1934
15. Chadwick J, Goldhaber M. *Proc Roy Soc A* 151:479, 1935
16. Crane HR, Delsasso LA, Fowler WA, Lauritsen CC. *Phys Rev* 48:125, 1935
17. Herszfinkiel H, Wertenstein L. *Nature* 137:106, 1937
18. Hopwood FL, Phillips JT. *Nature* 136:1026, 1935
19. Frisch OR, Hevesy G, McKay HAC. *Nature* 137:149, 1936
20. Lawrence JH, Lawrence EO. The biological action of neutron rays. *Proc Nat Acad Sc. Feb* 22:124, 1936
21. Zirkle RE, Aebersold PE. Relative effectiveness of x-rays and fast neutrons in retarding growth. *Proc Nat Acad Sc Feb*, 22:134, 1936