九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

14.1MeV中性子照射における反跳原子核の生物学的効果への寄与

長，哲二

上原，周三

吉永，春馬

https://doi.org/10.15017/64

出版情報：九州大学医療技術短期大学部紀要. 2, pp.35-41, 1975-02-10. 九州大学医療技術短期大学部
バージョン：
権利関係：

14.1 MeV中性子照射における反跳原子核の生物学的効果への寄与

長　哲二，上原周三，吉永春馬

Contribution of Recoiled Nuclei in 14.1 MeV Neutron Irradiation

Tetsuji Cho, Shuzo Uehara and Haruma Yoshinaga

緒　言

中性子を物質に照射した場合，物質が受け取るエネルギーは，物質を構成している原子核と中性子が相互作用し，二次的に生じた荷電粒子又は電磁波が物質内で電離と励起を行うことによって与えられる。ただし速中性子照射における電磁波の寄与はきわめてわずかである。中性子と物質の相互作用の第一段の機構は原子核反応であるが，これによって生じる荷電粒子の種類とエネルギーは，照射する中性子のエネルギーと物質を構成する核種によって決まる。

荷電粒子としては中性子反応による放出粒子と反跳原子核（残留核）があり，この両者に入射中性子のエネルギーが配分される。このエネルギーを求めることにより，中性子照射によって物質に与えられるエネルギーが求まる。この方法により Randolph[1] や Bach等[2] は中性子の組織へのエネルギー付与を計算によって求めている。

放射線照射による生物学的効果は，吸収エネルギーが同じであっても照射した放射線の種類，エネルギーによって変化する。いわゆる生物学的効果比 RBE 値があることが知られている。中性子照射では被照射体に作用する電離粒子の種類は陽子，α 粒子，反跳原子核等さまざまであり，そのエネルギーもまた広い範囲にわたっている。14.1 MeV 中性子照射の場合，吸収線量の70%程度は反跳陽子による[1] とされているが，その LET（線エネルギー付与）から考えて生物学的効果はそれほどの割合を占めないことが予想される。

10 MeV 以下の中性子照射による生物学的効果に対する陽子より重い粒子（α 粒子，C，O等）の寄与については Snyder[3] の報告がある。ここでは ^{3}T (d, n) ^{4}He 反応による 14.1 MeV 中性子を組織等価物質に照射した場合の反跳原子核による生物学的効果の大きさを，それぞれの LET と RBE の関係から求め，さらに放射線防護で用いられる QF 値を用いた場合についても検討を加えた。

方　法

14.1 MeV 中性子の組織等価物質へのエネルギー付与の計算にあたっては，中性子反応による放出粒子，反跳原子核はともに重心座標系では等方的な角度分布を示し，単位質量中で発生した荷電粒子は全てその中で吸収される，即ちその単位質量中に全運動エネルギーを与えると仮定した。但し弾性散乱については実験的に得られた角度分布[4] を利用した。

Table 1. Components of tissue-equivalent material used in this calculation

Element (j)	percent by weight	Number of atoms/g (N_j)
Oxygen	74	2.78×10^{22}
Carbon	12	0.60×10^{22}
Hydrogen	10	6.02×10^{22}
Nitrogen	4	0.17×10^{22}
Total	100	9.57×10^{22}

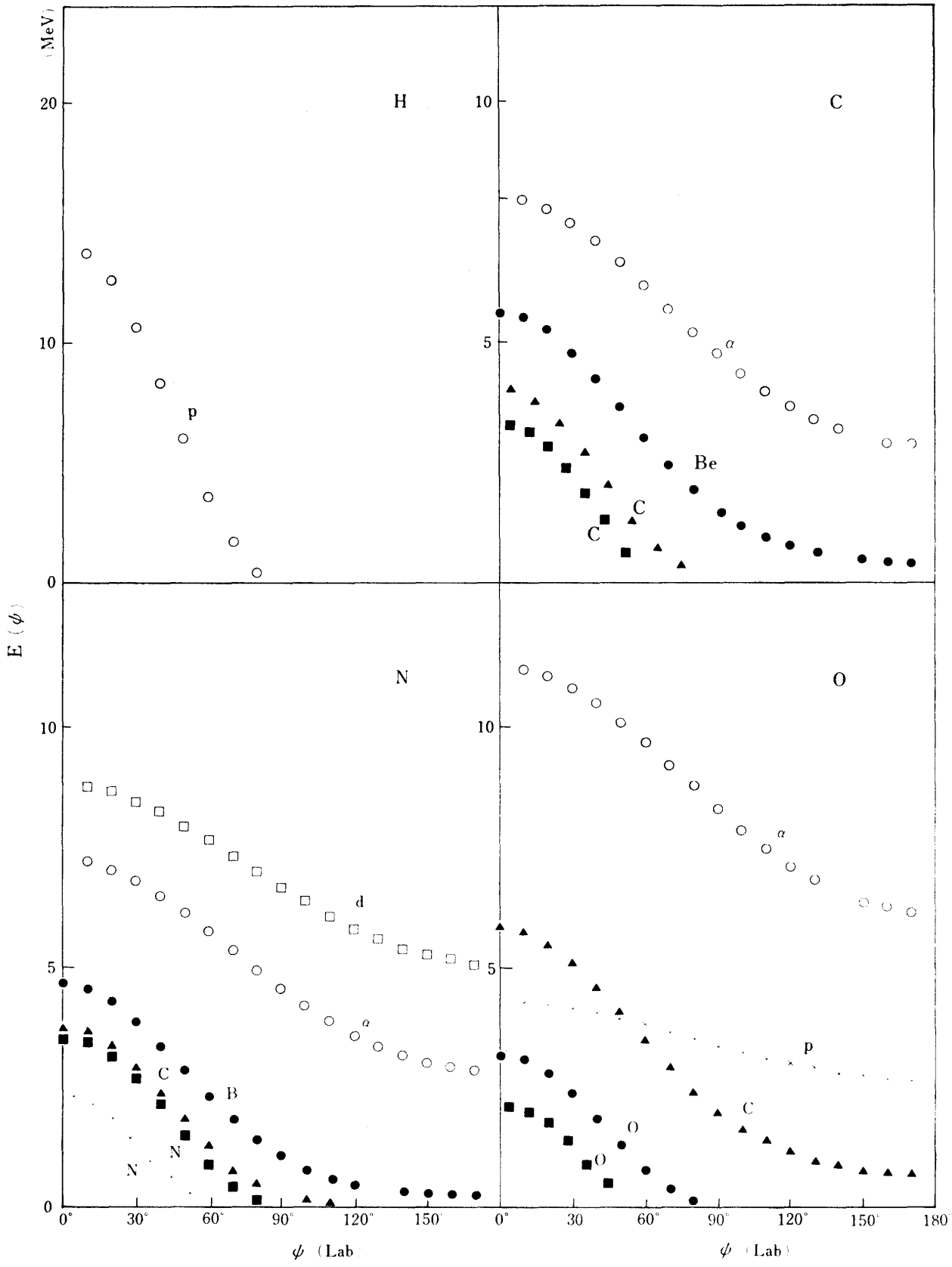

Fig. 1　Energies of reaction products in the laboratory system.

組織等価物質の元素組成としては表1に示す値を用い，反応の断面積はBNL325 Suppl. No. 1[5]，Nuclear Data[6]，Grin[7]の値を引用した。$^{12}C(n, n')^{12}C^*$，$^{14}N(n, \alpha)^{11}B^*$，$^{16}O(n, n')^{16}O^*$のQ値はRandolph[1]の値を用いた。

いま重心座標系での反応の微分断面積をI(θ)，とすると実験室系での微分断面積J(ψ)は

$$J(\psi)=\frac{I(\theta)}{G(\psi)} \qquad (1)$$

で求まる。ここでG(ψ)は座標の変換係数である。重心座標系での微分断面積$I(\theta)=1\left(\frac{mb}{sr}\right)$とすると実験室系での反応の断面積は

$$\sigma=2\pi\int J(\psi)\sin\psi d\psi$$
$$=2\pi\int\frac{1}{G(\psi)}\sin\psi d\psi \ (mb) \qquad (2)$$

となる。

実験室系で角度ψ方向に放出される粒子のエネルギーE(ψ)は運動学の公式により計算される。計算の結果を図1に示す。

各角度方向に放出される粒子のエネルギーがわかると，ある特定の中性子反応によって放出される粒子の平均運動エネルギーは

$$\bar{E}=\frac{2\pi\int E(\psi)\frac{1}{G(\psi)}\sin\psi\, d\psi}{2\pi\int\frac{1}{G(\psi)}\sin\psi\, d\psi} \qquad (3)$$

で求めることが出来る。反跳原子核についても同じ方法で求まる。図2に弾性散乱の場合，図3に弾性散乱以外の反応について元素別の$E(\psi)\sin\psi\triangle\psi/G(\psi)$の角度分布を示す。これは実験室系で$\psi\pm\frac{\triangle\psi}{2}$方向に放出される粒子の全エネルギーを表わす。

中性子反応で放出される全エネルギー，つまり組織の吸収エネルギーは標的原子核jの単位質量当りの個数をN_jとすると

$$E_{total}=\sum_j N_j\left\{\sum_i \sigma_i\left(\bar{E}_i^{(emit)}+E_i^{(recoil)}\right)\right\} \qquad (4)$$

となる。(4)式で$E_i^{(emit)}$，$E_i^{(recoil)}$はiという形の反応での放出粒子，反跳原子核の平均運動エネルギーでσ_iはその反応の断面積である。放出粒子，反跳原子核のLETについても

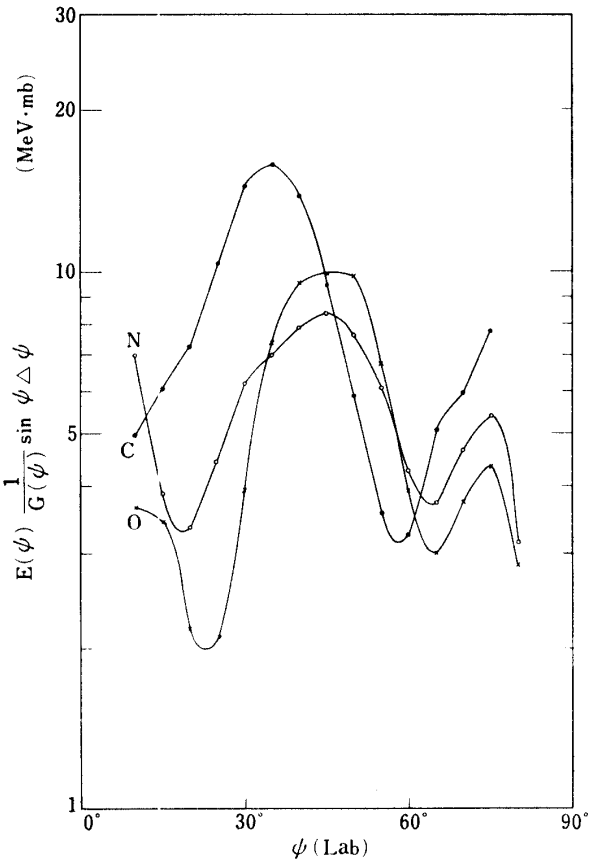

Fig. 2 Angular distributions of energy released by recoiled nucleus in elastic scattering.

平均エネルギーを求めたのと同様の方法で平均LET∞を求めた。組織等価物質でのLET∞を求める際に使用するエネルギーと飛程の関係はSaigusa[8]の表を利用した。

結　　果

上記の計算結果を表2に示す。表2の5欄に各放出粒子および反跳原子核の平均エネルギーを，6欄にその粒子の組織等価物質中でのLET∞を，8欄にそのエネルギー付与の値を示した。平均エネルギー，平均LET∞ともに各角度方向への放出エネルギーを重加として重加平均を求めた。

この計算の結果から組織等価物質に14.1MeV中性子を照射したときのエネルギー付与を求めると$7.44\times10^{-7}erg\cdot g^{-1}\cdot(n/cm^2)^{-1}$となる。このエネルギー付与に対する構成元素別の寄与を求めると，水素62.8%，炭素6.1%，窒素1.4

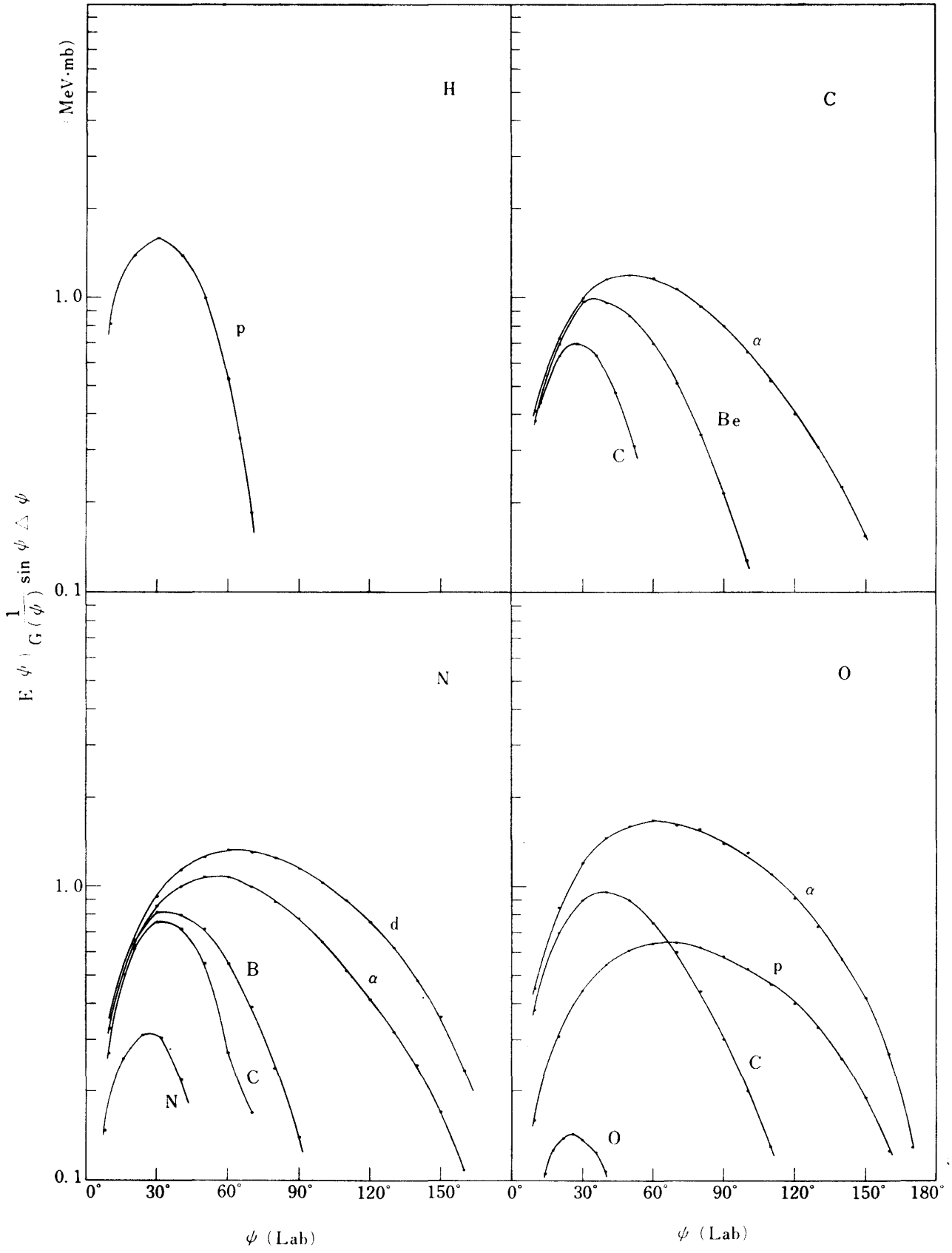

Fig. 3　Angular distributions of energy released by charged particles in neutron induced reactions without elastic scattering.

Table 2. Energy deposition in tissue-equivalent material by 14.1-MeV neutrons

Reaction	Q / MeV	σ_i / mb		E_i / MeV	L_∞ / keV/μm	$E_i \cdot \sigma_i$ / MeV·mb	$E_i \cdot \sigma_i \cdot N_j$ / MeV·mb/g
$^1H(n,n)$	0	689	p	7.05	16.7	4857	292.39×10^{24}
$^{12}C(n,n)$	0	770	^{12}C	1.37	287	1055	6.33
(n, n′)	−4.43	216	$^{12}C^*$	1.85	352	400	2.40
	−7.66	30	$^{12}C^*$	1.81	355	54.3	0.32
	−9.6	72	$^{12}C^*$	1.44	318	104	0.62
(n, α)	−5.69	124	α	5.40	115	670	4.02
			^9Be	3.00	365	372	2.23
	−10.12	288	α	2.33	145	671	4.03
			$^9Be^*$	1.64	272	472	2.83
(n, n)	−7.26	190	3α	1.7	223	969	5.81
$^{14}N(n,n)$	0	870	^{14}N	0.80	217	696	1.18
(n, n′)	−8.0	480	$^{14}N^*$	1.54	338	739	1.26
(n, d)	−5.32	180	d	6.86	18.9	1235	2.10
			^{13}C	1.83	340	329	0.56
(n, α)	−6.65	100	α	5.01	118	501	0.85
			^{11}B	2.41	366	241	0.41
$^{16}O(n,n)$	0	879	^{16}O	0.73	218	642	17.53
(n, n′)	−8	500	$^{16}O^*$	1.33	327	665	18.28
(n, p)	−9.62	43	p	3.48	18.7	150	4.13
			^{16}N	1.33	317	57.2	1.57
(n, α)	−2.21	292	α	8.63	102	2520	69.30
			^{13}C	3.40	502	993	27.31

%，酸素29.7%となる。次に粒子を三つのグループにわけそれぞれの寄与についてみると，陽子63.7%，α粒子18.5%，反跳原子核17.8%という値になる。陽子の63.7%という値には $^{16}O(n,p)^{16}N$ 反応からの陽子によるものが1%程度含まれるがそのほとんどは反跳陽子によるものである。

次にエネルギー付与を重加として陽子，α粒子，反跳原子核の平均エネルギーを求めると，それぞれ6.98MeV，7.47MeV，1.97MeVとなる。

同様の方法で各グループの平均 LET_∞ を求めると陽子16.7keV/μm，α粒子111keV/μm，反跳原子核357keV/μmという値となりエネルギー付与のほぼ35%を占める粒子（α粒子，反跳原子核）の平均 LET_∞ が100keV/μm以上であるということになる。

考　　察

組織等価物質に14.1MeV中性子を照射した場合のエネルギー付与中その大きな役割を占める反跳陽子のエネルギー付与の値をRandolph[1]の計算結果と比較すると差はないがその寄与の割合については10%の違いがある。これは $^1H(n,n)^1H$ 反応以外の反応によるエネルギー付与の値が違うことによるものであり，その原因は計算に使用した反応断面積のちがいが主なものである。

14.1MeV中性子を組織等価物質に照射すると中性子反応によって生じる荷電粒子とそのエネルギーはさまざまでこれ等の荷電粒子の生物学的効果への寄与もまたさまざまであろう。

作用する放射線のRBE値はLETが修飾するがここではそれぞれの反跳原子核のLETとRBE値との関係から反跳原子核の生物学的効果への寄与について検討する。LETとRBE値との関係についてはConger[9]，Barendsen[10]，Todd[11]の実験結果があるが，一般にLETが水中10keV/μm以下でのRBE値はほぼ1でLETの増加とともにRBE値も大きくなり100〜300

keV/μm の間で最大となり，さらに LET が大きくなると RBE 値は減少する傾向にある。

14.1MeV 中性子照射の RBE 値は照射物，効果の判定法によって異るが細胞死を指標とすると RBE 値は 2 以上の値になる。[12)13)] 一方エネルギー付与の 64% を占める陽子の平均 LET_∞ は前の計算の結果から 16.7keV/μm でありこれによる RBE 値が 1 の範囲に入り，大きな生物学的効果は望めない。Todd[11)] の T-1 細胞についてのデータと前の平均 LET_∞ の計算結果から陽子，α粒子，反跳原子核の RBE 値を求めると大略陽子は 1.3，α粒子，反跳原子核は 4 となる。この値から 14.1MeV 中性子照射の RBE 値を計算すると RBE 2.3となる。この値から 14.1MeV 中性子照射の生物学的効果に対する反跳原子核の寄与の割合を求めると31%となる。即ち rem単位で表わした線量の31%は反跳原子核によるものである。同じことを陽子，α粒子について計算するとそれぞれ36%，33%となり，エネルギー付与とは逆に生物学的効果の64%は陽子よりも重い荷電粒子の寄与ということになる。

Table 3. Values of QF as a function of L_∞

L_∞ in water kev/μm	QF
3.5 or less	1
7.0	2
23	5
53	10
175	20

ICRP(1966)は放射線防護の立場から LET と QF（線質係数）の関係を表3のように勧告している。この勧告に従って陽子，α粒子，反跳原子核の QF を求めるとそれぞれ4.47，17.5，20.0となる。この値から14.1MeV中性子の QF を計算すると QF＝9.7という値になり，線量当量への反跳原子核，陽子，α粒子の寄与を求めるとそれぞれ36.9%，29.5%，33.6%となり線量当量の37%が反跳原子核の寄与でありこれにα粒子の寄与を合せて考えると陽子より重い荷電粒子の寄与が70%になる。

このように反跳原子核が大きな生物学的効果をもたらすことから，中性子照射の生物学的研究あるいは放射線防護の面においても反跳原子核の作用に十分な考慮をはらう必要がある。特にこれ等の反跳原子核は大きな値の LET を持つので放射線感受性の細胞周囲依存性，酸素効果等の問題についてその影響は大きいものと思われる。

さらに図2，図3でわかるように反跳原子核は実験室系ではほとんどが前方方向に反跳されるので元素組成の異る物質の境界面近傍での線量および生物学的効果が中性子の入射方向，つまり照射方向によって大きな影響を受けることが予想される。

要　　約

組織等価物質について 14.1MeV 中性子のエネルギー付与を計算によって求めた。さらに相互作用によって放出される荷電粒子を陽子，α粒子，反跳原子核（α粒子よりも重い原子核）の三つのグループにわけ，その平均 LET_∞ を求めた。求めた平均 LET_∞ の値と LET と RBE，LET と QF の関係を用いてそれ等粒子の生物学的効果への寄与の割合を求めた。

これをまとめると次のとうりである。

1. エネルギー付与：

$$7.44\times10^{-9}\,\mathrm{erg\cdot g^{-1}}\cdot\left(\frac{\mathrm{n}}{cm^2}\right)^{-1}$$

陽子の寄与63.7%，α粒子の寄与18.5%，反跳原子核の寄与17.8%

2. RBE 値：2.3

陽子の寄与36%，α粒子の寄与33%，反跳原子核の寄与31%

3. QF：9.7

陽子の寄与29.5%，α粒子の寄与33.6%，反跳原子核の寄与36.9%

稿をおわるにあたり有益なご助言をいただいた九州大学医学部の吉村厚講師に感謝の意を表します。また本研究の一部は文部省科研費岡島班の援助を受けたことを感謝します。

文　献

1) M. L. Randolph: Radiat. Res. 7, 47 ('57)
2) R. L. Bach et al: Radiat. Res. 35, 1 ('68)
3) A. V. Astin: Protection Against Neutron Radiation up to 30 Million Electron Volts NBS Handbook 63('57)
4) D. I. Garber et al: Angular Distributions in Neutron-Induced Reactions BNL400 vol. 1 ('60)
5) D. J. Hughes et al: Neutron Cross Section, BNL 325 Suppl. No. 1 ('60)
6) P. Jessen et al: Nuclear Data section A vol. 1. 103('66)
7) G. A. Grin: Private communication.
8) T. Saigusa: Health Phys. 18, 547('70)
9) A. D. Conger et al : Radiat. Res. 9, 525('58)
10) G. V. Barendsen et al : Radiat. Res. 18, 106 ('63)
11) P. Todd : Radiat. Res. 7, 196 ('57)
12) K. Masuda : J. Radiat. Res. 11, 107 ('70)
13) 増田康治：福岡医学雑誌 62, 951 ('73)