

JAERI - M

85-024

INDC(JPN)97/G

NEANDC(J)111/A

医学用原子分子・原子核データW.G報告書

1985年3月

シグマ研究委員会

JAERI-M レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合せは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費領布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division
Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura,
Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1985

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 いばらき印刷(株)

JAERI-M 85-024

医学用原子分子・原子核データ W・G報告書

日本原子力研究所シグマ研究委員会

(1985年1月30日受理)

この報告書は日本原子力研究所・シグマ研究委員会に昭和57年に設置された医学用原子分子・原子核データ・ワーキンググループの昭和57、58年度の活動報告をまとめたものである。報告書では、(1)荷電粒子、電子の阻止能とそれに関連した問題および実際の医療における原子分子・核データの利用上の問題点の検討、(2)国外におけるデータ活動の現状の調査、(3)関連する文献リストの一覧および(4)今後の活動方針について述べている。

Activities of Working Group on Atomic,
Molecular and Nuclear Data for Medical Sciences

Japanese Nuclear Data Committee, JAERI

(Received January 30, 1985)

This is a report on the activities of the Working Group on Atomic, Molecular and Nuclear Data for Medical Science, Japanese Nuclear Data Committee in the fiscal years of 1982 and 1983.

This report consists of (1) brief reviews on stopping powers of charged particles and electrons and related topics, and on problems to use these data for practical radiotherapy, (2) reports on the investigation of the present status of data activities in other countries, (3) references, and (4) future plans after 1984.

Keywords: Nuclear Data, Atomic Molecular Data, Medical Science, Practical Radiotherapy, Stopping Powers, Charged Particles, Electrons

目 次

1. まえがき	1
2. 検討の概要	2
2.1 荷電粒子の阻止能について	2
2.2 低エネルギー電子の阻止能について	12
2.3 重荷電粒子阻止能における Bragg 規則	22
2.4 Low Energy Electron の水中における Track Simulation について	29
2.5 ト ラッ ク構造理論と微生物に対する重イオンの致死効果	46
2.6 放射線治療において要求される線量測定の精度とそれに影響する原子分子・ 原子核データ	60
3. 調査の概要	78
3.1 英国における医学・生物学データ活動について	78
3.2 ICRUのデータ活動について	88
3.3 その他の調査事項	94
4. 文献リスト一覧表	100
5. 59年度以降の計画	123
付録 委員一覧表, 会合日時, 議題	124

Contents

1. Introduction	1
2. Summary of Reviews	2
2.1 Stopping Power of Charged Particles	2
2.2 Stopping Power of Low Energy Electrons	12
2.3 Bragg's Rule Additivity of Electronic Stopping Power	22
2.4 Simulation of Low Energy Electron Track in Water	29
2.5 Track Structure Theories and Inactivation Cross Sections of Bacterial Spores for Heavy Ions	46
2.6 Accuracy and Precision of Dosimetry required for Radioteraphy and Atomic, Molecular and Nuclear Data Affected on Accuracy ..	60
3. Summary of Investigations	78
3.1 Data Activities for Medical and Biological Science in the United Kingdom	78
3.2 Data Activities in ICRU	88
3.3 Others	94
4. List of References on Atomic, Molecular and Nuclear Data for Medical Science	100
5. Future Plans after 1984	123
Appendix	124

1. まえがき

医学生物学分野では放射性核種及び放射線の利用技術の進歩により、使用する核種及び放射線の種類が著しく多岐にわたってきた。それにともない原子分子及び原子核に関する正確なデータとデータの充実が要求されるようになってきている。日本医学放射線学会物理部会ではこの種のデータに強い関心をもち、実用的データの編集を企画している。又、IAEAでも原子炉以外への核データの利用に積極的な態度を示しており、IAEA核データセクションから、わが国における医学用核データについての要求度をまとめよう依頼があった。シグマ研究委員会では、このIAEAの要請に応えるべく1981年8月に医学分野の研究者に対し、核データ、原子分子データの利用及び要求についてアンケート調査を行った。その結果は、「医学用核データ・原子分子データに関するアンケート調査報告書」にまとめられている。それによると、相当数の研究者が日常使用しているデータに満足していないことが分かる。その中には、(1)データが全く存在しないとするものから、(2)データの所在を知らないため利用ができない、(3)公表されたデータは多数あるが、どれが信頼できるデータか判断に苦しむ、あるいは(4)基礎的データはあるが、それから導かれる二次的形態の実用的データがないとするものなどがある。

これらの状況を勘案して、医学生物学分野で使用する原子分子及び核データについて、信頼性が高くかつ矛盾のないデータの整備普及ならびに必要データの測定の促進を目的とする医学用原子分子・原子核データワーキンググループが、シグマ研究委員会の核構造・崩壊データ専門部会の下部組織として設置された。ここでいう医学生物学分野には、核医学、放射線治療、放射線診断、放射線生物学、トレーサ利用を行う生化学・生理学、放射線防護を含む保健物理、環境問題に関連する生物学などの諸分野が含まれる。

このワーキンググループの第1回会合を1982年8月30日に開催し、今後の進め方について討論を行い、次の結論を得ている。

(1) 既存データ及びそれらのデータソースを点検、検討する。(2) 分散している基礎データを組合せた実用的データの作成を検討する。(3) no data is no process という誤解を招かないよう留意する。(4) 次の項目に関連するデータを収集する。(i) 放射線測定器、(ii) ファントム材料、(iii) 吸収線量評価、(iv) 放射線防護、(v) 放射線診断・核医学検査、(vi) 放射線発生装置、(vii) 放射性核種の生産、(5) 当面は、上記項目に共通している阻止能、吸収係数、半減期についての基礎データを洗い直して、手軽なデータブックの作成を目指す。

この方針に基づいて、付録に示すように、昭和57年度は5回の会合をもち、主として、収集・整備の対象となるデータの検討、吸収線量評価のためのデータ利用の現状調査及び現在利用しうる阻止能などのデータの整備状況の調査を行った。昭和58年度は7回の会合を開催し、X線、 γ 線、中性子線及び医療用線源についての線量標準の現状調査、吸収線量測定における吸収線量変換係数の見直し、文献リストの作成、阻止能の調査とそのデータブックのまとめ方について討論などを行った。

以上、このワーキンググループの設立理由、目的及び現在までの活動状況を概説したが、以下の各項において、今までに得られた検討結果、調査結果、文献リストならびに今後の活動計画について報告する。

2. 検討の概要

2.1 荷電粒子阻止能について

VIC 龍福廣

2.1.1 はしがき

1955年, DalgarnoとGriffingはBorn近似により陽子に対する水素原子の阻止能を, 電荷移動を考慮に入れて計算した¹⁾。その結果を, 陽子に対する水素分子の阻止能の実測値^{2~4)}と比較すると, 120 keV以上のエネルギー範囲では実験値とよく一致し, 10~120 keVの範囲でも高々12パーセント程度の違いであった。その後(1962)純粋に水素原子ビーム⁵⁾および陽子ビーム⁶⁾を用いた実験が行われ詳細な検討が可能となった。

Born近似は関係する原子または分子の波動関数に関する正確な知識を必要とする。水素原子以外は複雑な近似的波動関数を用いなければならないので, Born近似による計算も一段と補雑になる。古典二体衝突論(binary-encounter theory B.E.T.⁷⁾)は以上のような厳密な波動関数に関する知識は必要とせず, 標的電子の古典的運動エネルギー, 第一励起エネルギーおよび電離エネルギーに関する評価データのみを基に衝突断面積または阻止能を計算する方法である。

B.E.T.は, 電離断面積の計算においては, 実験値に対して多くの場合2倍とも違わない結果を与える, しかも近接衝突に対しては正確な結果を与えるものとして, 広く実用的方法として用いられている⁷⁾。

本報告では, 電離, 励起, 電荷移動などの素過程に注目しながら, Born近似による計算の概略と結果について述べる。

本題に入る前に荷電平衡に到るまでに失うエネルギーの割合と, 荷電平衡状態における阻止能を明確化しておこう。

荷電重粒子は物質に入射後極めて短い距離を通過するうちに荷電平衡状態になる。この間に粒子が失うエネルギーは次のようにして見積ることができる⁸⁾。例えば, 陽子については, 負荷電成分を無視すれば, 正荷電および中成子成分は次のようになる。

$$f_1 = 1 - f_0 \quad (1)$$

$$f_0 = f_0 [1 - \exp \{-N(\sigma_{01} + \sigma_{10})x\}] \quad (2)$$

ここに,

f_1 : 正荷電(陽子)成分

f_0 : 中性(水素原子)成分

f_0 : 平衡状態における中性成分 ($= \sigma_{10} / (\sigma_{01} + \sigma_{10})$),

σ_{01} : 電離断面積,

σ_{10} : 電子捕獲断面積,

N : 単位体積中の標的の数,

x : 入射粒子の走行距離,

走行距離が $x_0 = \{N(\sigma_{01} + \sigma_{10})\}^{-1}$ となると水素原子成分は $f_0 = 0.632f_0$ となるが, この間に

失うエネルギーの割合は近似的に次のように与えられる。

$$\frac{\Delta E}{E_p} = \frac{S(E_p)}{E_p (\sigma_{01} + \sigma_{10}) N} \quad (3)$$

ただし、

ΔE : 走行距離が x_0 となるまでに失うエネルギー、

E_p : 陽子の入射エネルギー、

$S(E_p)$: 陽子の阻止能

断面積 σ_{01} および σ_{10} として Dagnac 他⁹⁾ ($1.4 \leq E_p \leq 54 \text{ keV}$) および Toburen 他¹⁰⁾ ($100 \leq E_p \leq 2500 \text{ keV}$) による水蒸気に対する実測値を用い、阻止能として Green と Peterson¹¹⁾ により同じく水蒸気に対して求められた値を用いて計算した $\Delta E/E_p$, $f_{0\infty}$ および $f_{1\infty}$ の値を Table 2.1.1 に示す。表より荷電平衡に達するまでに失うエネルギーは極めて小さく、全エネルギー損失の際の放射線効果を計算する場合は前者の寄与を無視することができる。

Table 2.1.1
FRACTION OF ENERGY DEGRADED BEFORE EQUILIBRATION OF CHARGE STATES
AND EQUILIBRIUM CHARGE FRACTIONS

E_p^*	$\Delta E/E_p^*$	$f_{0\infty}^*$	$f_{1\infty}^*$
0.4	4.09×10^{-3}	0.991	0.009
1.0	2.91×10^{-3}	0.976	0.024
4.0	1.87×10^{-3}	0.894	0.106
10.0	1.36×10^{-3}	0.749	0.251
40.0	7.73×10^{-4}	0.462	0.538
100.0	6.37×10^{-4}	0.188	0.812
400.0	2.42×10^{-4}	0.005	0.995
1000.0	9.33×10^{-4}	0.000	1.000

* Primary energy in keV.

* Approximate fraction of initial energy degraded before equilibration of charge states.

* Equilibrium fraction of neutral hydrogen.

* Equilibrium fraction of protons.

荷電平衡状態における阻止能は次のように表わすことができる。

$$S = \sum f_{i\infty} S_i \quad (4)$$

ただし、

S : 平均阻止能、

S_i : 荷電状態 i における阻止能、

$f_{i\infty}$: 荷電平衡状態における成分比 $\sum_i f_{i\infty} = 1$

2.1.2 Born 近似による計算

Dalgarno と Griffing は水素原子ガス中に陽子が入射した場合の阻止能を

$$S = f_{1\infty} S_1 + f_{0\infty} S_0 + f_{-1\infty} S_{-1} \quad (5)$$

と表わした。

2.1.2.1 陽子のエネルギー損失

(1) 励起と電離

励起過程



の断面積を σ_n^{11} , 水素原子固有エネルギーを E_n とすれば, この励起過程の阻止能 (1 水素原子当たり) への寄与は,

$$S_1^e = \sum_n (E_n - E_0) \sigma_n^{11} \quad (7)$$

となる。

電離過程



($e(\epsilon)$ はエネルギー ϵ をもつ放出電子を示す。)

の断面積を σ_ϵ^{11} , I_H を水素原子の電離ポテンシャルとすれば, 電離過程の阻止能への寄与は次のように表わされる。

$$S_1^i = \int_0^{\epsilon_{\max}} (I_H + \epsilon) \sigma_\epsilon^{11} d\epsilon. \quad (9)$$

ただし,

$$\epsilon_{\max} = \frac{4m}{M} E \quad (10)$$

ここに, E は陽子のエネルギー, M はその質量, m は電子の質量である。

直接励起および電離に関する断面積は Bates と Griffing の Born 近似による計算結果¹²⁾を用いる。

(2) 電子捕獲

この過程には次の二つの場合がある。

共鳴電荷移動過程 :



および非共鳴電荷移動過程 :



ただし, $H(n)$ は水素原子の 1s 状態以外の状態を表わす。

共鳴過程では, 励起エネルギーは零であるが, 衝突後の電子は平均して入射陽子と同じ速度で動くので,

$$\frac{m}{M} E \quad (13)$$

のエネルギーを新たに得ることになる。非共鳴過程では, これに励起エネルギーがさらに加えられる。したがって, 電子捕獲過程の阻止能への寄与は,

$$S_1^c = \sum_{n=1} (E_n - E_0 + \frac{m}{M} E) \sigma_n^{10} \quad (14)$$

となる。

ただし, 水素原子固有状態 n への電子捕獲断面積を σ_n^{10} とした。

Born 近似による 1s から 4f までの状態への電子捕獲断面積は Bates と Dalgarno により与えられている¹³⁾。これ以外の励起状態への捕獲断面積は、一定の与えられた入射陽子エネルギーに対して、 $n^3 \sigma_n^{10}$ が近似的に一定であるという関係を用いて評価する^{14), 15)}。ただし、n は主量子数である。このようにして求めた全断面積を実験値と比較すると、25 keV 以上の陽子エネルギー範囲では、極めてよい一致をみる^{16), 17), 18)}。

2.1.2.2 中性水素原子のエネルギー損失

(1) 励起と電離

陽子の場合に比べ次に示すように多くの過程が関係する。

$$H(1s) + H(m) \quad (15)$$

$$H(\ell) + H(m) \quad (16)$$

$$H(1s) + H^+ + e(\epsilon) \quad (17)$$

$$H^+ + e(\epsilon) + H(1s) \quad (18)$$

$$H^+ + e(\epsilon) + H^+ + e(\epsilon') \quad (19)$$

$$H(m) + H^+ + e(\epsilon) \quad (20)$$

$$H^+ + e(\epsilon) + H(m) \quad (21)$$

ただし、H(m) および H(ℓ) は水素原子の基底状態 1s 以外の状態を示す。

上述の各過程の断面積を σ_m^{00} , σ_{lm}^{00} , σ_e^{00} , σ_e^{01} , $\sigma_{ee'}^{01}$, σ_{me}^{00} , および $\sigma_{m\ell}^{01}$ とすれば、これらの過程による阻止能への寄与は各々次のようになる。

$$S_0^{s,e} = 2 \sum_m (E_m - E_0) \sigma_m^{00}, \quad (22)$$

$$S_0^{d,e} = \sum_{l \neq 0} \sum_{m \neq 0} (E_l + E_m - 2E_0) \sigma_{lm}^{00}, \quad (23)$$

$$S_0^i = \int_0^{\epsilon_{max}} (I_H + \epsilon) \sigma_e^{00} d\epsilon, \quad (24)$$

$$S_0^i = \int_0^{\epsilon_{max}} (I_H + \epsilon) \sigma_e^{01} d\epsilon, \quad (25)$$

$$S_0^{i,i} = \int_0^{\epsilon_{max}} \int_0^{\epsilon_{max}} (2I_H + \epsilon + \epsilon') \sigma_{ee'}^{01} d\epsilon d\epsilon', \quad (26)$$

$$S_0^{e,i} = \sum_{m \neq 0} \int_0^{\epsilon_{max}} (I_H + \epsilon + E_m - E_0) \sigma_{me}^{00} d\epsilon, \quad (27)$$

$$S_0^{i,e} = \sum_{m \neq 0} \int_0^{\epsilon_{max}} (I_H + \epsilon + E_m - E_0) \sigma_{em}^{01} d\epsilon, \quad (28)$$

Born 近似による関係する断面積は Bates と Griffing^{19~21)}により計算されている。

(2) 電荷移動

$$H + H \rightarrow \begin{cases} H^- + H^+, \\ H^+ + H^-, \end{cases} \quad (29)$$

$$(30)$$

この両過程は同じ確率で起り得るので電子移動により電子が得る並進運動のエネルギーは互に

打消することになる。したがって $\Delta E = (\text{電離エネルギー}) + (\text{電子親和エネルギー})$ とすれば、上記の過程による阻止能への寄与は、次のようになる。

$$S_0^{\text{CT}} = 2 \Delta E \sigma_{\text{CT}}^{01} \quad (31)$$

ただし、 σ_{CT}^{01} は過程(29)または(30)の断面積を示す。この断面積は計算で得られていないので、Whittierの実験²²⁾によって得られた



の断面積の半分を σ_{CT}^{01} として用いる。

2.1.2.3 負水素イオンのエネルギー損失

負イオン成分 $f_{-1\infty}$ は他に比べて小さいので、全体の阻止能をわざかに補正するだけである。主な過程として次の二つを考慮する。



前者の阻止能への寄与は次のような。

$$S_{-1}^{\ell} = \int_0^{\epsilon_{\max}} (-A + \epsilon) \sigma_{\epsilon}^{-10} d\epsilon \quad (35)$$

ここに、Aは電子親和エネルギーで、 σ_{ϵ}^{-10} は断面積である。

断面積 σ_{ϵ}^{-10} としては、Whittier²²⁾により測定された過程、



の断面積の $\frac{1}{2}$ を用いる。 f_{-1} / f_1 としては、同じく Whittier により測定された水素分子ガス中における値を用いる。過程(34)の寄与 S_{-1}^{CT} は過程(12)と同程度と考える。

2.1.2.4 結果および実験との比較

以上 の方法で得られた電荷分布を Fig. 2.1.1 に、陽子および水素原子の阻止能に対する種々の過程の寄与を Fig. 2.1.2, 2.1.3 に、さらに平均阻止能とこれに対する各荷電状態の寄与を Fig. 2.1.4 に示す。Fig. 2.1.5 には、励起と電離のみを考慮した場合の陽子の阻止能を Born 近似と Bethe 近似で計算した結果、および荷電平衡状態における陽子の存在比を乗じた結果を示した。計算結果はエネルギーが、10 keV 以上について示してあるが、Born 近似であるので 25 keV 以下は問題にすることはできない。

Fig. 2.1.1 より、荷電平衡状態での負水素イオンの存在比は高々 1 パーセントであり、また陽子と中性水素原子との存在比は 55 keV 付近で逆転する。陽子の速度が水素基底状態の電子の古典的速度 $V_0 (= \frac{C}{137})$ に等しくなるときの陽子のエネルギーは 25 keV であるから、55 keV に対応する速度は V_0 の $r = \sqrt{55/25} = 1.5$ 倍となる。図には、 H_2 ガス中の陽子に対する Allison²³⁾ のデータも同じに示した。

Fig. 2.1.2 は純粋に陽子ビームだけを対象とした場合の阻止能と各過程の寄与分を示したものであるが、25 keV 付近で電子捕獲によるエネルギー損失と電離励起によるそれがほぼ同程度となっている。Fig. 2.1.3 は純粋に中性水素原子ビームだけを対象とした場合の阻止能と各過程の寄与分を示したものである。25 keV を境とし、高エネルギー側では一重および二重電離、同時励起

電離が主な寄与をしているが、低エネルギー側では一重電離と励起および電子捕獲が主な寄与をしている。

Fig. 2.1.4 は荷電平衡状態における平均阻止能 S および各電荷状態からの寄与、さらに H_2 ガスに対する実験結果^{2), 3), 4)} (H_2 分子を 2 個の H 原子と同等とみなす) を示したものである。200 keV 以上ではよく実験と一致している。100 keV 以下における実験との差は H_2 分子に対する阻止能が H 原子に対する阻止能の 2 倍にならない。すなわち Bragg 則が成り立たないためと考えられている¹⁾。

最後に、電離と励起による陽子の阻止能の計算結果 ($S_1^e + S_1^i$) を Bethe 近似と比較すると (Fig. 2.1.5)，200 keV 以上では両者はよく一致する。また、荷電平衡状態における阻止能 S と前者の寄与分 $f_{1\infty}(S_1^e + S_1^i)$ を比較すると、200 keV 以下でかなりの差があることが分る。

Fig. 2.1.5, 2.1.6 に Huberman⁶⁾ と Allison 他⁵⁾ による実験結果を示した。ただし、Fig. 2.1.6 に示した下側の点線は Fig. 3 における一重電離と同時励起電離の半分に一重および二重励起による寄与を加えたものである。すなわち、荷電変化衝突過程による寄与分を除いた。

2.1.3 おわりに

本報告は Bates - Griffing の Born 近似による阻止能の計算結果について主に述べたものであるが、現在は非常に精度の高い断面積計算法（緊密結合の方法）²⁴⁾ が確立されつつあるので、間もなくあらゆる素過程を厳密に把握した阻止能の計算が可能となるものと思う。

文 献

- 1) A. Dalgarno and G.W. Griffing : Proc. Roy. Soc. A 232 (1955) 423.
- 2) H.K. Reynolds, D.N.F. Dunbar, W.A. Wenzel and W. Whaling : Phys. Rev. 92 (1953) 742.
- 3) J.A. Philips : Phys. Rev. 90 (1953) 532.
- 4) P.K. Weyl : Phys. Rev. 91 (1953) 289.
- 5) S.K. Allison, J. Cuevas and M. Garcia-Munoz : Phys. Rev. 127 (1962) 792.
- 6) M.N. Huberman : Phys. Rev. 127 (1962) 799.
- 7) L. Vriens : Case Studies in Atomic Collisions ed. E.W. McDaniel and M.R. McDowell (North-Holland Publ. Co., Amsterdam 1969) p.335.
- 8) J.M. Miller and A.E.S. Green : Radial. Res. 54 (1973) 343.
- 9) R. Dagnac, D. Blanc, M. Kucuk and D. Nolina : J. Phys. B 3 (1970) 1239.
- 10) L.H. Toburen, M.Y. Nakai and R.A. Langley : Phys. Rev. A 171 (1968) 114.
- 11) A.E.S. Green and L.R. Peterson : J. Geophys. Res. 73 (1968) 233.
- 12) D.R. Bates and G.W. Griffing : Proc. Phys. Soc. A 66 (1953) 961.
- 13) D.R. Bates and A. Dalgarno : Proc. Phys. Soc. A 66 (1953) 972.
- 14) J.R. Oppenheimer : Phys. Rev. 31 (1928) 349.
- 15) H.C. Brinkman and H.A. Kramers : Proc. Acad. Sci., Amsterdam 33 (1930) 973.
- 16) G.W. McClure : Phys. Rev. 148 (1966) 47.
- 17) W.L. Fite, R.F. Stebbings, D.G. Hummer and R.T. Brackmann : Phys. Rev. 119 (1960) 663.
- 18) W.L. Fite, A.C.H. Smith and R.F. Stebbings : Proc. Roy. Soc. A 268 (1962) 527.
- 19) D.R. Bates and G.W. Griffing : Proc. Phys. Soc. A 66 (1953) 961.
- 20) D.R. Bates and G.W. Griffing : Proc. Phys. Soc. A 67 (1954) 663.
- 21) D.R. Bates and G.W. Griffing : Proc. Phys. Soc. A 68 (1955) 90.
- 22) A.C. Whittier : Canad. J. Phys. 32 (1954) 275.
- 23) S.K. Allison : Rev. Mod. Phys. 30 (1958) 1137.
- 24) H. Ryufuku : Phys. Rev. 25 (1982) 720.

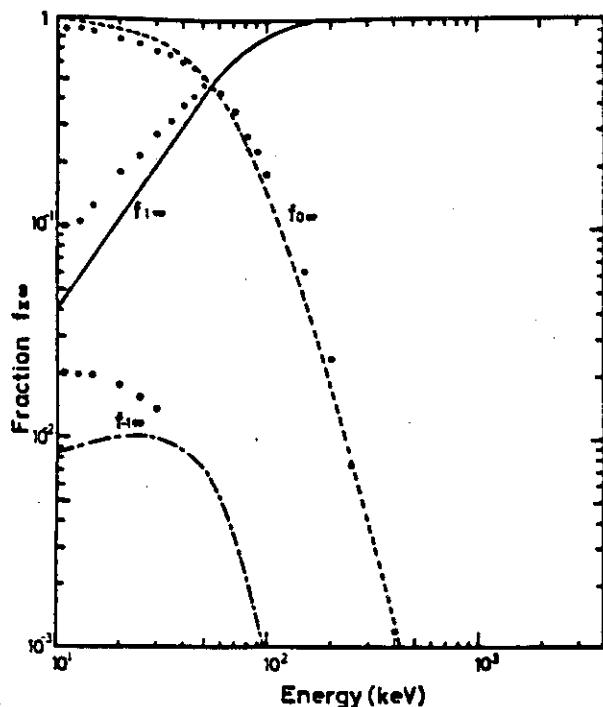


Fig.2.1.1

Charge state fractions for charge equilibrium H-beam in H-gas as a function of energy.
Curves:Born approximation, open circles:experimental results obtained by Allison.

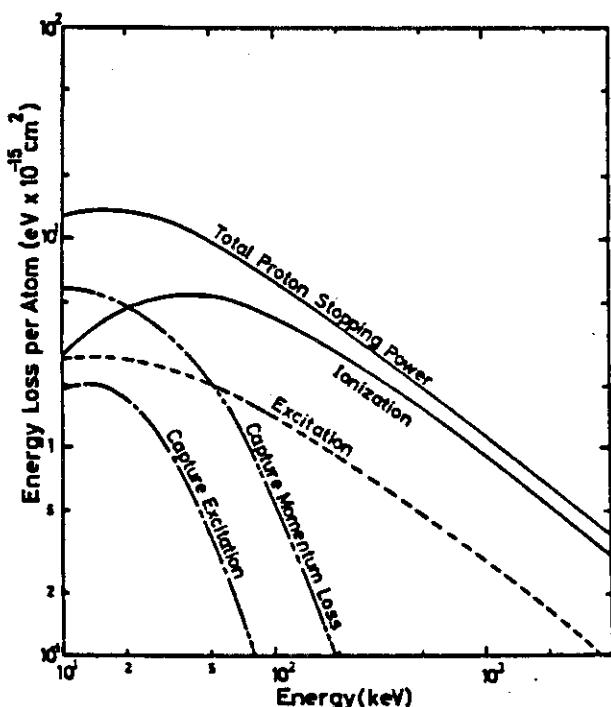


Fig.2.1.2

Stopping power of various processes for proton in hydrogen atoms.

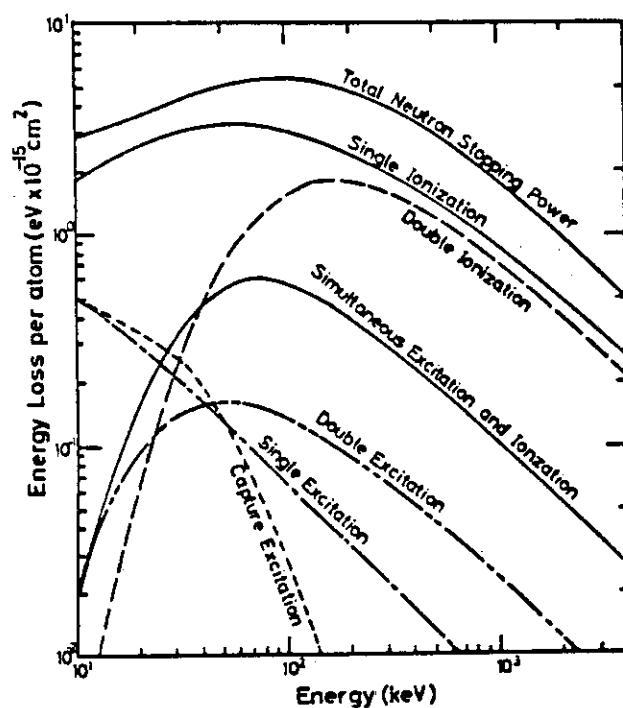


Fig.2.1.3 Stopping power and constituent parts for neutral H-atom in H-gas.

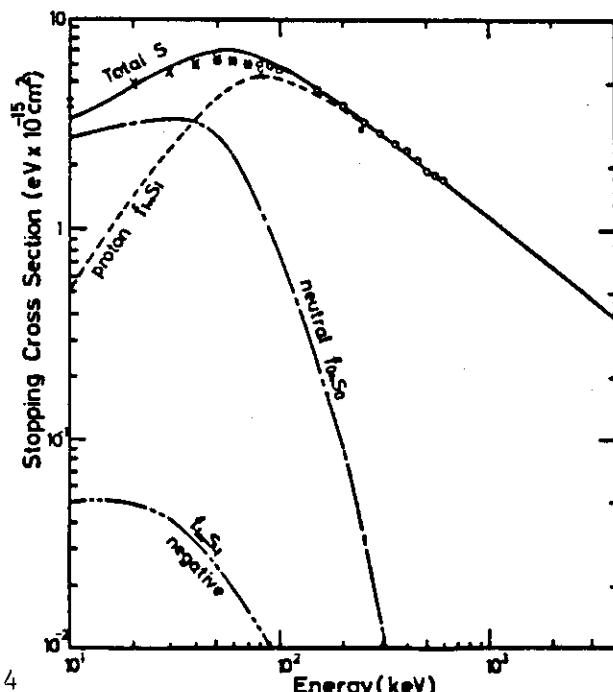


Fig.2.1.4

Stopping cross section of hydrogen atoms for charge equilibrium hydrogen beam, according to the Born approximation and experimental results
 (X: Philips, O: Reynolds et al., ●: Weyl).

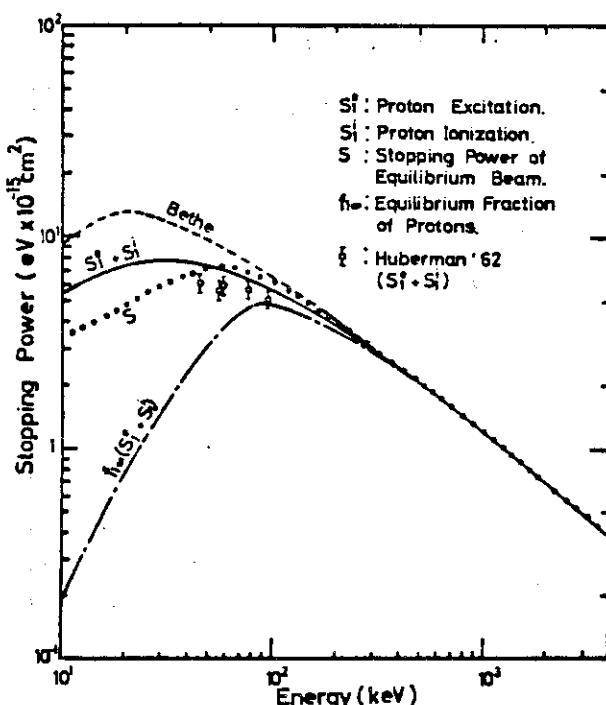


Fig.2.1.5 Comparison of the stopping power due to proton ionization and excitation with total one of equilibrium beam.

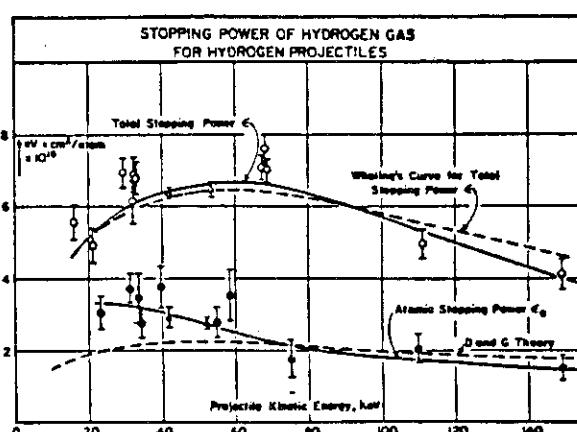


Fig.2.1.6 Total (charge/equilibrium) and atomic (neutral) stopping power. The solid curves are the best curves through the experimental results obtained by Allison et al. ('62) and the lower dashed curve is neutral stopping power without charge-changing collisions calculated by Dalgarno and Griffing ('55).

2.2 低エネルギー電子の阻止能

原研 中井洋太

2.2.1 結論

電子と物質の相互作用の研究は、従来から約10keVが一つの境界線によっている。その理由として、一つには10keV以上では、古くから Bethe の阻止能の式¹⁾が広く利用され、電子と物質の衝突を論じる場合のバイブル的な役割を果してきたためである。

一般に電子と物質の相互作用の素過程は、物質側から眺めてみると、すべて構成している原子や分子およびそれらの集合体の広い意味での励起（電離をも含む）の問題に帰着してしまう。電子の入射エネルギーが、原子・分子の励起、電離などのエネルギー準位のオーダーである場合には、入射電子の挙動はこれらの準位に支配される。そして、入射電子エネルギーが、これらのエネルギー準位に比べて十分大きいと、入射電子の個々の準位への励起に費やされるエネルギー損失の値は、平均励起エネルギーとして平均化されて、Bethe-Bloch の阻止能の式にひっくるめられた形になっている。この阻止能の値は、10keV以上ではいろいろと改良され、実験値とよく合うものが整備されて広く活用されている。最も新しいものとしては、近く ICRU の報告書として出される予定の Berger-Seltzer の計算値がある²⁾。

しかし、10keV以下では Bethe-Bloch の式のようにすべてのエネルギー損失の過程を平均化することはできず Fig. 2.2.1 に例を示すように、個々の損失過程に分けて考えなければならない。

一方、実験的に見ても、10keV以下でオーソドックスな方法で阻止能の測定を行う場合、必要とする物質の試料の厚さは～1000 Å以下である。このような自己保持ができ、かつその厚さを精度よく制御した試料を作ることは一般的に非常にむづかしい。たとえば最も普通に阻止能などの測定が行われており、しかも薄膜の蒸着技術が確立されている Al でも、10keV 以下で阻止能を定量的に測定するには、厚さの制御を10 Å以内にしなければならない。さらに生体等価物質や水などの場合には、測定に適した試料を作ることは、ほとんど不可能である。このような事情から、10年位前までは、実験としては全り系統的な研究は行われていなかった。

しかし、その後、学問的な興味はもとより、以下に述べるような応用面の重要性と、計算機や実験技術の発達とともに、各分野で阻止能を含めた低エネルギー領域での電子の物質透過の研究が盛に行われるようになった。

すなわち、まず放射線生物学では、電子が～10² eV で阻止能の値のピークをもっており、かつ遺伝子の大きさがこのエネルギー領域の電子の平均自由距離 (10～10² Å) のオーダーであることから重要である。また、オージェ電子分光などによる固体表面分析の分野でも、二次電子のエネルギーが10～10³ eV で、対象とする表面領域の深さが10～10² Å であることから、同じ範囲の話となり、阻止能や飛程のデータの精度が、分析の精度や信頼性に直接響いてくる。これらに加えて、最近では、核融合プラズマ中の電子 (10 eV～10⁴ keV) とプラズマ容器（真空壁）や、何らかの目的でプラズマと接している物質（例えばリミターやダイバーターなど）との相互作用の結果による二次電子放射や、容器の表面近くの吸着物質の脱着が、プラズマの粒子およびエネ

ルギーバランスや、プラズマ中への不純物の混入を定量的に把握するうえで重要な問題になってきている。そのためにも、容器などを構成している物質中の電子の挙動に関する基礎データが要求されている³⁾。

上述のような異なった三つの分野で、くしくも同じ問題が重要視されていることは興味深く、このような背景の下で、表題およびそれに関連したここ数年の研究の現状と問題点について検討を行う。

2.2.2 阻止能の定義と他の物理量との関係

10keV以下の電子の物質透過の研究は、上述のように最近盛んに行われているが、全般的に見て阻止能については、技術的な困難さから実験の方は理論に比べて系統性が乏しい。しかし平均自由距離については数多くの測定が行われている。そこで、この節ではエネルギー損失をもたらす非弾性衝突の断面積、平均自由距離、減衰距離および飛程と阻止能の関係について述べ、直接阻止能のデータがなくとも、他の値から評価するための助けにしたい。

一般に低エネルギー領域の電子の物質中に1個の原子に対する全非弾性衝突断面積 σ_T は、

$$\sigma_T = \sum_n \sigma_n \quad (1)$$

で表わされる。ここで、 σ_n はn状態への励起（電離も含む）断面積である。また σ_T 、 σ_n に対応する平均自由距離（mean free path） λ_T 、 λ_n は、単位体積当たりの考えている物質の原子数をNとすれば、 $N\sigma_T = 1/\lambda_T$ 、 $N\sigma_n = 1/\lambda_n$ であることから、

$$1/\lambda_T = \sum_n 1/\lambda_n \quad (2)$$

となる。そして一般に λ_T を全平均自由距離、 λ_n を個々の励起の平均自由距離と区別して呼んでいる。実験的には、 λ_n を区別して個々に求めることは極めてむずかしく、全体と一緒にした形の λ_T を測定したものが多い。そして多くの実験の報告では λ_T のことを減衰距離（attenuation length）と称し、電子の透過曲線の半対数プロットの勾配から求めているのが普通である。

一方、阻止能 $S(E) = dE/dx$ はn状態への励起エネルギーを ΔE_n とすれば、

$$S(E) = \frac{dE}{dx} = N \sum_n \Delta E_n \sigma_n = \sum_n \frac{\Delta E_n}{\lambda_n} \quad (3)$$

で与えられる。

阻止能に関連深い量に飛程（Range）がある。以下、いろいろな飛程の定義について簡単に述べておく。理論的には、通常次式で定義される連続減速近似飛程（Continuous-slowing-down approximation (CSDA) range） R_{CSDA} が求められている。

$$R_{CSDA} = - \int_0^{E_0} S(E)^{-1} dE \quad (4)$$

ここで、 E_0 は入射エネルギーである。 R_{CSDA} の測定は写真乾板等、飛程を記録する検出器を構成する物質について行うことができるが、一般的な物質についてはできないので、平行平板状の吸収体に対する透過係数の測定と関連づけられる別種の「飛程」がいろいろ定義されている。透過曲線（透過係数 η_T と吸収体の厚み t の関係を表わす曲線）のはほとんど直線的に減衰する部分での

接線が t 軸と交わる点を外挿飛程 (extrapolated range) R_{ex} と呼ぶ (実用飛程 (practical range) ともいう)。また透過曲線の尾部の外挿が t 軸と出合う点を最大 (射影) 飛程 R_{max} , 次式で定義される R_{pr} を射影飛程 (projected range) と呼ぶ。

$$R_{pr} = \int_0^{\infty} t [-d\eta_T(t)/dt] dt \quad (5)$$

すなわち, R_{CSDA} が, 行路に沿った平均の長さを表わしているのに対し, R_{max} や R_{ex} は行路の平均を深さ方向へ射影した長さの目安となる量である。

以上要約すると, 平均自由距離 λ_n は, 励起などの個々の非弾性衝突断面積と $N\sigma_n = 1/\lambda_n$ の形で直結しており, 電子と物質の衝突の度合いを論ずる場合の基本的な量である。阻止能は(3)式で, λ_n と関係づけられるが, これはエネルギー E の電子が単位長さ当たりに物質に与えるエネルギー量で, 物質に対する放射線効果を考えるうえでの基本的な量である。また飛程は考えている電子がそのエネルギーを全部物質に与えてしまう, すなわち電子がとまってしまうにいたる距離であり, 例えは電子による物質中の放射線効果の領域を与える量である。そして平均自由距離と飛程は同じ長さの元をもつが, 一般的には

$$\lambda_n < \lambda_T < R_{ex} < R_{max} < R_{CSDA} \quad (6)$$

で, λ_n , λ_T は 1 回の衝突過程, R_{ex} , R_{max} , R_{CSDA} はその電子のエネルギーを全部失うまでの多重衝突過程にもとづく量である。

2.2.3 阻止能と平均自由距離

電子と物質の相互作用を阻止能から眺めてみる。Fig. 1 に示すように, たとえば Al に対しての場合, 低エネルギー側から, フォノンとの相互作用, 外殻の自由電子, 内殻電子との相互作用と順次これらのしきい値 (エネルギー準位に相当する) に応じた相互作用が現われ, 全体としての阻止能は, 個々のそれの和として表わされることになる。

フェルミ準位の上^{*}から 0.15 eV くらいのところに示されるピークは, Fitting ら⁴⁾が, フォノンとのエネルギーのやりとりの阻止能に対する寄与を理論的に求めたものである。しかし, これについての実験的な検証はまだ見当たらない。

ついで, 自由電子 (外殻電子) との相互作用については, Ritchie, Ashley および Tung らの Oak Ridge のグループが自由電子ガス模型を用いて, プラズマ励起 (自由電子の集団励起) を含めた阻止能の値を求めている⁵⁻⁷⁾。すなわち, 速度 v の電子が, 自由電子が一様な密度分布をしている固体中を通るととき, あるエネルギー損失をもたらす非弾性散乱の平均自由距離 λ は次の式で表わされる。

$$\lambda^{-1}(E, \omega) = \frac{2e}{2\hbar v} \int_{k_-}^{k_+} \frac{dk}{k} \text{Im} \left(\frac{-1}{\epsilon(k, \omega)} \right) \quad (7)$$

ここで, $E = mv^2/2$

* フェルミ準位の上からのエネルギーは, (電子の運動エネルギー) + (仕事関数) となる。Al では仕事関数は 4.28 eV である。

$$K_{\pm} \equiv (\sqrt{2m}/\hbar)(\sqrt{E \pm \sqrt{E - \hbar \omega}})$$

で、 $\hbar \omega$ ($\hbar k$) は標的物質へのエネルギー（運動量）移動、 $\epsilon(k, \omega)$ は物質の誘電応答関数である。それゆえ、自由電子との相互作用による考えられるすべてのエネルギー損失に対する平均自由距離 $\lambda_T(E)$ は

$$\lambda_T^{-1}(E) = \int d\omega \lambda^{-1}(E, \omega), \quad (8)$$

対応する阻止能 $S_f(E)$ は

$$S_f(E) = \int d\omega \lambda^{-1}(E, \omega) \hbar \omega \quad (9)$$

となる。したがって、平均自由距離または阻止能を計算するには、(7)式の $\epsilon(k, \omega)$ を知ればよいことになる。Ritchie らは自由電子ガス模型にもとづき、伝導電子に対して、電子-電子、プラズマ励起の寄与を考慮してそれぞれの Al 中での阻止能の計算を行った。これらについては文献5) - 9) に詳しく論じられている。その結果を示したのが、Fig. 1 の自由電子、プラズモンの曲線である。さらに彼らは Al の 2p, 2s および 1s の内殻励起の寄与について、Manson⁸⁾ の Hartree-Slater 波動関数による一般化振動子強度の値を用いて計算したが、それらの結果をも Fig. 2. 2. 1 に示してある。また、Fig. 2. 2. 2 にこれらの過程の全平均自由距離 λ_T を実験結果とともに示してある。ここで

$$\lambda_T^{-1} = \lambda_f^{-1} + \lambda_i^{-1}$$

$$\lambda_i^{-1} = \lambda_{1s}^{-1} + \lambda_{2s}^{-1} + \lambda_{2p}^{-1}$$

である。そして、Al に関し内殻励起による寄与は、電子のエネルギー $10^1, 10^2, 10^3$ および 10^4 eV に対して、阻止能ではそれぞれ $\sim 0, 1, 52$ および 64% 、平均自由距離では $0, 0.2, 12$ および 14% である。また 10keV では全阻止能に関し、Bethe-Bloch の値と $\sim 3\%$ でつながっている。

さらに高原子番号の物質については、Al のような一般化振動子強度の値が得られていないので、 10keV 以下では内殻励起の平均自由距離に対する効果が $10\sim 15\%$ 以下であることから適当な近似法すなわち電子ガス統計模型を用いて Ritchie らは新たな計算を試みた⁹⁻¹¹⁾。これは物質中のすべての電子を一つの集団を見て、密度分布 $n(r)$ を導入して平均化したものである。詳細は彼らの文献を参照されたいが、たとえば Al について、先の自由電子ガス模型と、計算結果は阻止能で 8% 、平均自由距離では 5% 以内でよく合っている。そして彼らは Si, Ni, Cu, Ag および Au などの元素に対する阻止能と平均自由距離の計算を行い、後者について現存する実験データと比較して、互いによい一致を見ている。

また、Ritchie, Ashley らのグループは両模型を拡張して用い、無機および有機絶縁物中での阻止能および平均自由距離の計算を行った¹²⁻¹⁴⁾。Fig. 2. 2. 3 にそれらのうち、ポリスチレンについての計算結果を示す。そして、 10keV では Berger-Seltzer の値と 1% でなめらかにつながっている。

放射線生物学などで最も重要な物質である水の阻止能については、最も新なものとしては、Ashley¹⁵⁾ が上の絶縁物模型に改良を加え、光学的に求めた誘電函数との対応づけを行うとともに、低エネルギーでの外殻電子との交換効果をとり入れた計算がある。これは、同じグループの Ritchie らの行った初期の計算⁷⁾よりも、形は同じであるが、約 120eV のところのピーク値で約 25% ほど低い値を得ている。

一方、これらの阻止能の計算に対応する実験については、まず直接阻止能を測定したものとし

では Al に関して数例しかない。すなわち Garber ら¹⁶⁾が透過法により 300~900 eV, Fitting¹⁷⁾が透過法と飛程の経験式より 500 eV~9 keV, Ishigure ら¹⁸⁾がエネルギー損失スペクトル法により 2~10.9 keV にわたって測定している。これらの結果は同じく Fig. 2. 2. 1 に示してあるが、低エネルギーになるほど実験点のはらつきが大きい。この辺の実験データの不確かさは、当時の実験技術からみて、試料の厚さの測定および制御の不確かさと困難さに起因している。

また、最近の実験例として、Adams ら¹⁹⁾が N₂, O₂ および Ar, Kr, Xe などの希ガスを 11 K のサファイア基板の上に凍らせて、透過電子の強度を基板中の不純物である Cr³⁺ の色中心から出る蛍光によって測るというユニークな方法で 0.1~3 keV の阻止能を測定し、Ritchie らの計算と比較している。

そのほか、水については 1950 年代の古い測定が 1 例あるのみである²⁰⁾。

以上のように阻止能の測定は 1980 年代に至っても乏しく、今のところ理論計算が先行しているのが現状である。

一方平均自由距離については、固体表面分析上の必要性とその副産物から、阻止能の測定に比べてむづかしくないので、数多くの測定例がある。しかし、これらもほとんどは(2)式で示されるように、ある特定の状態への散乱の平均自由距離を区別して測定することはむづかしく、ほとんどは全平均自由距離、すなわち減衰距離を測定している。Fig. 2. 2. 2 に Al について先述の Ashley らの計算結果とともに、今までに得られた実験例^{21)~26)}を示してある。これらの相互の比較から、Al については λ_T として 10 eV 以上では Ashley の計算値をそのまま使えばよいと考えられる。したがって、阻止能についても式(3)または式(8), (9)の関係および 10 keV で Bethe-Bloch の式と一致していることからその妥当性が検証されることになる。Fig. 2. 2. 3 に代表的な有機化合物としてポリスチレンの λ_T を示す。これについては比較すべき実験例が見当らないが、他の金属や金属酸化物の計算値と実験値のよい一致からみて、妥当な値ではないかと考えられる。

このほかの λ_T の実験データは、いくつかの総説や文献^{14, 27~29)}にまとめられている。その中で実験データを整理して経験式の形にまとめたものとして、次のようなものがある。すなわち、まず Penn²⁹⁾ は自由電子ガス模型を適用できる物質に対して

$$\lambda_T(E) = E / [a(\ln E + b)] \quad (10)$$

で表わされることを示し、これを他の物質にも拡張している。ついで Seah ら²⁸⁾ は約 350 の実験点を整理し、~1 eV~10 keV のエネルギー領域で、

$$\lambda_T(E) = a / E^2 + bE^{1/2} \quad (11)$$

なる経験式を得ている。さらに Ashley ら¹⁴⁾ は有機絶縁物（高分子物質）に対し

$$\lambda_T(E) = E / [a \ln E + b - c / E] \quad (12)$$

を与えていた。

これらの経験式は、当面の応用について、限られたエネルギー領域でそのまま使えるが、(10) 式は高エネルギー側で $E^{1/2}$ のエネルギー依存性をもっており、~10 keV 以上の非弾性散乱断面積の $1/E$ 側 (λ_T では E^1) になめらかにつながらないところが問題である。したがってより現実的な経験式については、理論的な背景を考慮に入れた実験データのスケーリングをもとに、今後さらに改良を加えてゆく必要がある。

2.2.4 飛 程

連続減速近似飛程 R_{CSDA} について、Sugiyama³⁰⁾とTungら¹⁰⁾が電子ガス統計模型による阻止能の計算結果から値を求めており、前者はAlに対する値を100eV～10keVの範囲で、後者はAl, Cu, Ag, Auに対する値を40eV～10keVの範囲で図に示しており、Alに対する両者の結果はかなりよく一致している。Ashleyら¹³⁾はそのほか、ポリスチレンに対して、15eV～10keVの範囲の計算結果を表で与えている。これらの計算では、いずれも(4)式の積分の下限を、便宜上10eVにとっている。

飛程に関する最近の実験としては、Fitting¹⁷⁾, Schouら³¹⁾、それにAdamsら¹⁹⁾の仕事がある。Fitting¹⁷⁾は集電極を用いる古くからの方法で、透過係数が1%になる厚さを最大飛程 R_{max} として、BeからAuに至る6種類の物質に対して500eV～1keVのエネルギー領域でその値を測定している。そして、10keV以下では次の経験式が成り立つとしている。

$$R_{\text{max}} = 900 \rho^{0.8} E^{1.3} \quad (13)$$

ここで R_{max} はÅ, ρ は物質の密度で g/cm³, E は keV の単位である。先の Tung ら¹⁰⁾の R_{CSDA} の計算結果は、Alに対してはこの Fitting の結果やそれ以前の実験結果と、また Cu に対しては Fitting の結果とかなりよく一致している。しかし、定義の相違を考えればこの一致は半ば偶然というべきで、実際、多重散乱による行路の曲折の度合いが大きい高原子番号の Ag, Au では、 R_{max} は R_{CSDA} よりかなり小さくなっている。

Schou ら³¹⁾, Adams ら¹⁹⁾の実験はいずれも気体を低温で固体にして標的としたものである。前者は Au の基板からの後方散乱を利用する方法で、H₂とD₂中の「透過深度（penetration depth）」（彼らの表現によるが、実用飛程 R_p と解釈してよい）を 500eV～3keV の範囲で測定し、後者は前述の阻止能の測定と同じ方法で、N₂, O₂, Ar, Kr, Xe 中での R_p を 100eV～3keV の範囲で求めた。そして理論との比較は、定義の相違のため大まかにしか行われていない。

2.2.5 むすび

以上10keV以下の電子に対する物質の阻止能と、関連した平均自由距離、飛程に関する最近の研究の現状と問題点について検討を行った。全般的に、現状としては理論の方が先行していて、これを検証し、また一般に広く利用することに耐え得る精度のよい実験データは、系統性に乏しくいまひとつという感じで、今後のこの方面のより一層の研究の進展がのぞまれる。そのためには、新しい実験技術の開発、たとえば、現在目ざましい発展をしつつある薄膜を利用したエレクトロニックス素子などに目を向けて活用することも考えられる。

現在のところ、計算では、Ritchie, Ashley らの Oak Ridge のグループの仕事が、系統性があって、信頼性も他の散発的なデータに比べて、利用に適しているのではないかと考えられる。原研核データセンター原子分子データ部門では、現在これらのデータの数値データとして公表されているものは、計算機に格納している。また、将来必要な物質に対する阻止能の計算については、Ritchie, Ashley らから積極的にデータの提供をうけたいと思っている。

文 献

- 1) H. Bethe : Handbuch der Physik (Springer Verlag, Berlin, 1933) Vol.24, p.491
- 2) M.J. Berger and S.M. Seltzer : "Stopping Powers and Ranges of Electrons and Positrons", NBSIR-82-2550-A (1982), 2nd ed.
- 3) Reports of the Working Group, IAEA Technical Committee Meeting on Atomic and Molecular Data for Fusion : Phys. Script. 23 204 (1981)
- 4) H.J. Fitting, H. Glaefke and W. Wild : Surf. Sci. 75 267 (1978)
- 5) R.H. Ritchie, C.J. Tung, V.E. Anderson and J.C. Ashley : Radiat. Res. 64 181 (1975)
- 6) J.C. Ashley, C.J. Tung and R.H. Ritchie : IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-22 2533 (1975)
- 7) J.C. Ashley, C.J. Tung and R.H. Ritchie : Surf. Sci. 81 409 (1979)
- 8) S.T. Manson : Phys. Rev. A6 1023 (1972)
- 9) J.C. Ashley, C.J. Tung, R.H. Ritchie and V.E. Anderson : IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-23 1833 (1976)
- 10) C.J. Tung, J.C. Ashley and R.H. Ritchie : IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-26 4874 (1979)
- 11) C.J. Tung, J.C. Ashley and R.H. Ritchie : Surf. Sci. 81 427 (1979)
- 12) C.J. Tung, J.C. Ashley, R.D. Birkhoff, R.H. Ritchie, L.C. Emerson and V.E. Anderson : Phys. Rev. B16 3049 (1977)
- 13) J.C. Ashley, C.J. Tung and R.H. Ritchie : IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-25 1566 (1978)
- 14) J.C. Ashley and M.W. Williams : Radiat. Res. 81 364 (1980)
- 15) J.C. Ashley : Radiat. Res. 89 25 (1982)
- 16) F.W. Garber, Y. Nakai, J.A. Harter and R.D. Birkhoff : J. Appl. Phys. 42 1149 (1971)
- 17) H.J. Fitting : Phys. Status Solidi 926 525 (1974)
- 18) N. Ishigure, C. Mori and T. Watanabe : J. Phys. Soc. Jpn. 44 973 (1978)
- 19) A. Adams and P.K. Hansma : Phys. Rev. B22 4258 (1980)
- 20) ICRU Report 16 (ICRU Publications, Washington DC, 1970)
- 21) H. Kanter : Phys. Rev. B1 522 (1970)
- 22) T.A. Callcott and E.T. Arakawa : Phys. Rev. B11 2750 (1975)
- 23) C.J. Powell, R.J. Stein, P.B. Needham, Jr. and T.J. Driscoll : Phys. Rev. B16 1370 (1970)
- 24) J.C. Tracy : J. Vacuum Sci. & Technol. 11 280 (1974)

- 25) H. Kanter : Phys. Rev. B1 2357 (1970)
- 26) R.J. Stein : Surf. Sci. 60 436 (1976)
- 27) C.J. Powell : Surf. Sci. 44 29 (1974)
- 28) M.P. Seah and W.A. Dench : Surf. Interface Anal. 1 2 (1979)
- 29) D.R. Penn : J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom. 9 29 (1976)
- 30) H. Sugiyama : Jpn. J. Appl. Phys. 15 1779 (1976)
- 31) J. Schou and H. Spresen : J. Appl. Phys. 49 816 (1978)

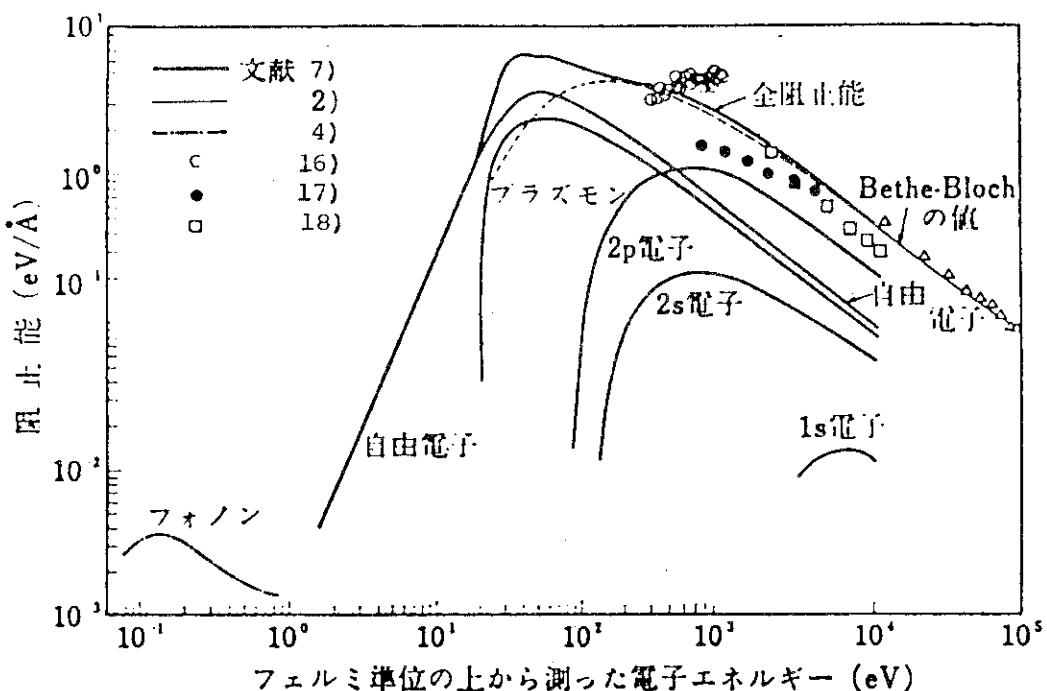


Fig. 2.2.1 電子に対する Al の阻止能（全阻止能に対するフォノン、自由電子励起、プラズマ励起、内殻励起の寄与を示している。実線以外は実験値を表わす）

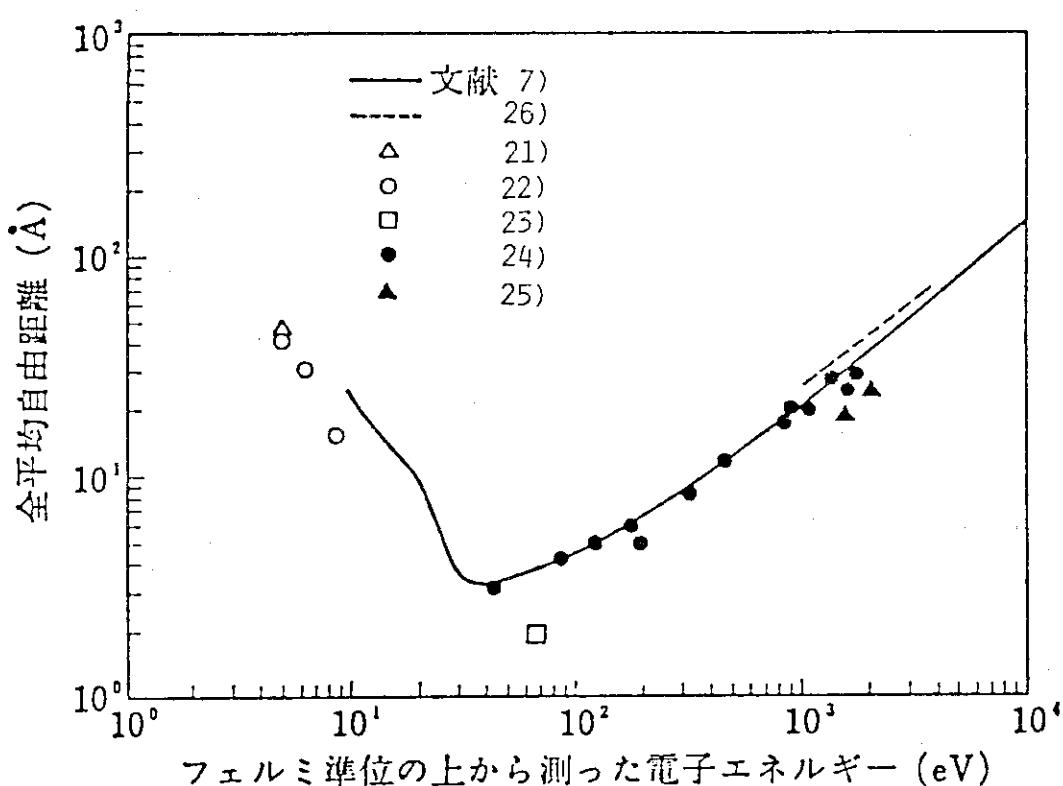


Fig. 2.2.2 Al 中での電子の全平均自由距離（実線は Ashley ら⁷⁾ の計算値、他は実験値を表わす）

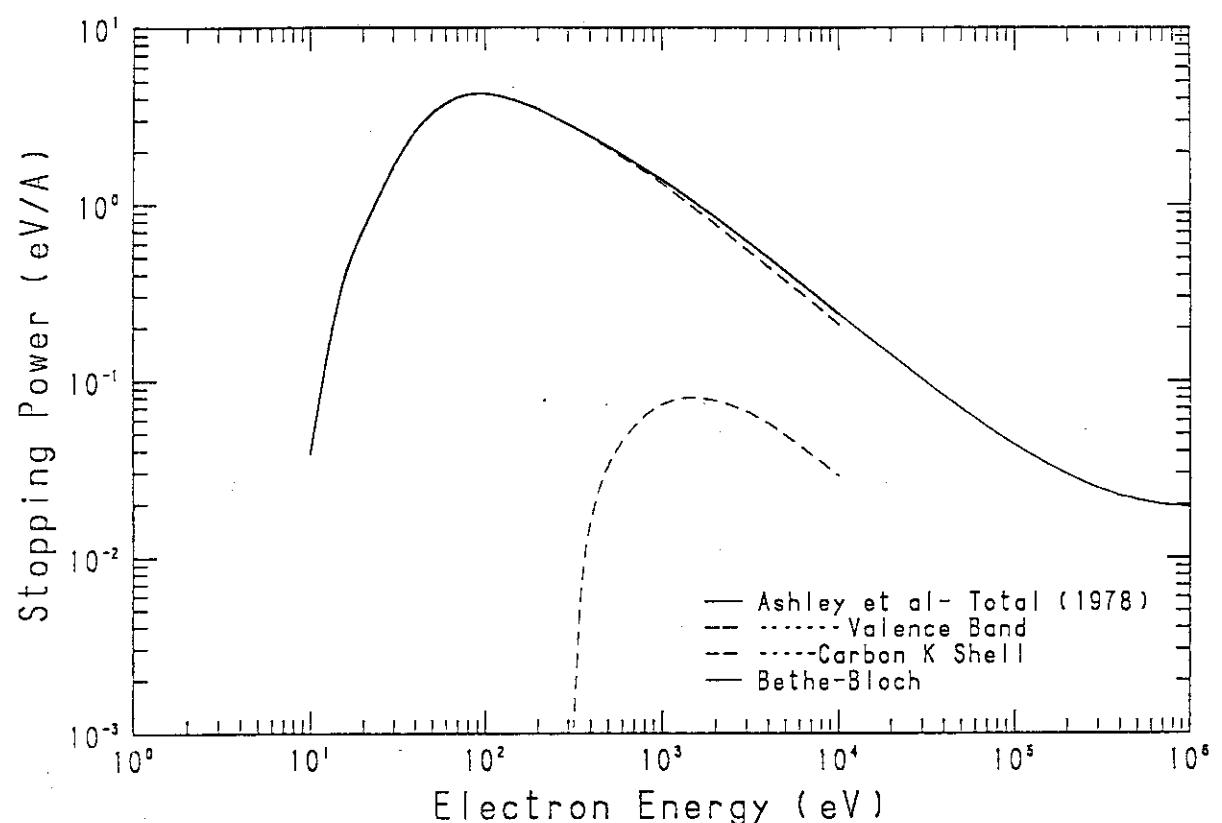


Fig. 2.2.3 電子に対するポリスチレン中の阻止能の計算例

2.3 重荷電粒子阻止能における Bragg 規則

電子技術総合研究所 杉 山 治 男

2.3.1 はじめに

荷電粒子に対する化合物や混合物の阻止能を、その構成元素または分子の阻止能から単純に求めることができるというのが Bragg 規則である。この規則がどの程度まで信頼できるものなのについて、多くの実験がなされてきた。この種の実験では高精度の測定技術が必要であり、物理的状態の変化や化学結合の変化とともに阻止能の差を正確に見出すことが要求される。従って、実験誤差が大きいときにははっきりとした結果が得られないことがある。また理論的にも Bethe の阻止能公式における平均励起エネルギーの計算精度が良くなかったために、定量的評価が困難であった。

しかしながら、ここ20年来行われた Bragg 規則のチェックを目的とした実験結果から、低原子番号物質 ($Z_2 \leq 18$) で物理的状態の違いによる差異が見出され、また化学的結合の変化による差異も見出されてきた。特に入射エネルギーが低い場合にははっきりした阻止能差が見られることが判ってきた。このような問題についての総合報告として、Ahlen¹⁾, Janni²⁾, そして Thwaites³⁾ のものがある、そこでは多くの論文が引用されている。

Bragg 規則を適用するとき、われわれは化合物の平均励起エネルギーに比べて、化学結合のためのエネルギーは無視できるものと仮定することになる。また気体でも液体または固体になったときでも阻止能は全く変化しないと仮定していることになる。このような仮定が満足されれば使ってもよいであろう。たとえば空気(気体)の阻止能は、その構成分子である N_2 , O_2 , Ar , 等の阻止能がわかっているれば簡単に計算でき、その結果は実験結果とよくあうものと考えられる。また Emulsion の場合、平均励起エネルギーが 331eV と高いので、結合エネルギーを無視して、Ag, Br 等の元素の阻止能から計算してもほとんど誤差は生じないものと思われる。

Bragg 規則が成立しないと考えられる場合についての実験結果を分類してみると

- (a) 物理的状態効果：気体であるときと、液体・固体であるときの差異、
- (b) 化学結合効果：化合物または分子について、結合エネルギーの変化をともなうことによる差異、

の 2 種類に分けられる。

この報告ではまず平均励起エネルギーの物理的状態および化学的結合による変化を調べ、さらにどのような場合に、Bragg 規則からどの程度のはずれができるのかについて、定量的な阻止能の計算結果と実験結果の代表的例をとりあげて比較してみることにした。

2.3.2 電子的阻止能公式と平均励起エネルギー

重荷電粒子阻止能に対する物質の阻止能の理論式として Bethe 公式⁴⁾がよく知られている：

$$Se = \frac{4\pi e^4 Z_1^2}{mv^2} NZ_2 \left\{ \ln \left(\frac{2mv^2}{I} \right) - \frac{C}{Z_2} \right\} \quad (1)$$

ここで e は電荷, Z_1 は入射粒子の原子番号, v は入射粒子速度, m は電子質量, N は単位体積当たりの原子数, C/Z_2 は内殻補正項, Z_2 はターゲット原子番号, そして I は平均励起エネルギーで, この量がターゲット物質の物理的・化学的性質を反映することになる。

Bragg 規則は, 阻止断面積 ϵ を $\epsilon = (1/N) S_e$ と定義すると, 化合物 $X_m Y_n$ の阻止断面積 $\epsilon(X_m Y_n)$ が,

$$\epsilon(X_m Y_n) = m \epsilon(X) + n \epsilon(Y) \quad (2)$$

で表わされるというものである。この Bragg 規則が特に問題になるのは, 主として中間エネルギー領域であって, Bethe 公式はそのままの形では適用できない。実験データの詳しい分析の結果は, いくつかの複雑な形をした補正項が必要であることが判ってきた。その結果は次のような一般化された公式で書くことができる⁵⁾。

$$S_e = \frac{4\pi e^4 Z_1^{*2}}{mv^2} N \left\{ Z_2^{*} \ln \left(\frac{2mv^2}{I^*} \right) + D \right\} (1 + B) + S_{eq} \quad (3)$$

ここで Z_1^* , Z_2^* , I^* はそれぞれ入射粒子の有効原子番号 (effective charge), ターゲットの有効原子番号, そして有効平均励起エネルギーであって, Bohr の判定条件から決められる。D は遠方衝突と近接衝突との差であって, 等分配則が成立しない場合の補正項である。B は Z_1^3 補正項を表わし, そして S_{eq} は入射粒子とターゲット原子とが衝突に際して準分子を形成して電子交換を行うことによる補正項である。

平均励起エネルギー I についての改良された Bloch 公式は次のように書くことができる^{5) 6)}:

$$I = 10.0 Z_2^{\frac{1}{3}} \left(\frac{E_{HFS}}{E_{TF}} \right)^{\frac{1}{2}} Z_s^{\frac{1}{3}} + I(\text{diss.}), (\text{eV}) \quad (4)$$

ここで E_{HFS} と E_{TF} はそれぞれ Hartree-Fock-Slater そして Thomas-Fermi 近似での各軌道エネルギーの和, $Z_s^{\frac{1}{3}}$ はしゃへい効果に関連した有効原子番号で, 次式のように定義される:

$$U_{TF}(1.13 Z_s^{\frac{1}{3}} r/a_0) \equiv U_{HFS}(1.13 Z_s^{\frac{1}{3}} r/a_0) \cdot F \quad (5)$$

ここで U_{TF} は Thomas-Fermi 近似でのしゃへい関数, U_{HFS} は Hartree-Fock-Slater 近似でのしゃへい関数そして F は注目する原子のまわりに存在する距離 r/a_0 における他の原子に属する電子群によるしゃへいの増加を表わす修正因子である。分子あるいは化合物については, さらに結合を解離するためのエネルギー I (diss.) を加えてやる必要がある。

Table 2.3.1 は気体状態における I 一値の比較をしめす^{7)~10)}。分子および化合物については解離エネルギーを加えた値 (括弧内第 2 項目) を記した。実験値あるいは勧告値と (4) 式の計算値は 10% 以内であっており, 阻止能に換算して高エネルギーで 1.5% 以内であっている。Table 2.3.2 は液体および固体状態における I 一値の比較をしめす^{8)~12)}。Thompson¹¹⁾ の実験結果は, (4) 式の銅についての計算値 $I(Cu) = 348 \text{ eV}$ に規格化してある。Berger-Seltzer¹⁰⁾ の $H_2 O$ のデータは Ritchies¹³⁾, そして Ashley¹⁴⁾ の理論計算値である。一般的に液体の I 一値は気体の値よりも大きくなっていることがわかる。なお (3) 式からわかるように, Z_1^3 一補正や D 一補正などを考慮に入れると, 実験データから求められた I 一値は, 物質によってはやや増加する可能性があり, 計算値との差は減少すると考えられる。

表から明らかなように, 分子や化合物では結合のために, そして液体や固体の場合には周囲の

電子群によるしゃへい効果のために I_1 値は増大して、阻止能は減少することがわかる。従って物理的状態変化があるときや、化学結合状態に変化のあるときには Bragg 規則は成立しないといえる。たとえば気体の H_2 と O_2 が化合して液体 H_2O となるとき、密度の変化がおこるために、気体の阻止能データをそのまま適用できない。また固体 C のデータを気体である CO や CO_2 の阻止能の計算に使用することは正しくない。さらに三重結合分子 N_2 の値をそのまま一重結合化合物アンモニア NH_3 の阻止能計算に使えないことになる。Tissue equivalent gas の阻止能はその構成各気体の阻止能のデータがわかっているれば求めることができる。しかし Tissue そのものは液体であるから、液体状態での各構成分子の阻止能から Bragg 規則を使って求める必要があろう。

2.3.3 阻止能における Bragg 規則からのくい違い

実際に入射エネルギーと物質の状態によって、陽子阻止能がどの程度変化するか計算して実験結果と比較してみた。Fig. 2.3.1 は気体と固体・液体との阻止能差の割合をしめす。点線は Janni²⁾ が実験データをもとにまとめたもので、実線は(3)式による計算値で、C と O_2 (N_2 もほぼ同じ) について比較したものである。Janni の実験データからの推定値が 0.5 MeV 附近で消えているのは、実験精度がよくないためと考えられる。

Fig. 2.3.3 は陽子および He イオンが C に入射した場合について、Besenbacher et al.⁷⁾ の実験結果と(3)式による計算値との比較をしめす。気体と固体との阻止能差が、実験誤差の範囲内ではほぼあっているといえよう。Fig. 2.3.3 は α -粒子が水 H_2O に入射した場合の、気体と液体との阻止能比をしめす。実験結果は Thwaites¹²⁾ のもので、計算結果は実験誤差の範囲内であっているといえる。なお Bichsel¹⁵⁾ はルサイトについて、等価気体と固体との阻止能差が高エネルギーでも存在する計算結果をしめしている。

2.3.4 結論

これまで述べたことをまとめてみると、物理的な状態変化や化学結合変化がある場合には、Bragg 規則は成立しなくなるということが判ったといえる。一般的にいえば、低原子番号物質からなる分子または化合物については低エネルギーになるほど Bragg 規則からのくい違いは大きくなる傾向をしめす。物理的状態が変化する場合も同じ傾向が見られる。エネルギーが高い場合でも平均励起エネルギーの違いによる阻止能差は無視できないことがある。化合物の阻止能を求めるには、まずその物質が気体か液体か固体かを確認することから出発する。もしその物質が液体であれば、その液体の構成元素が液体である状態での平均励起エネルギーをそれぞれ求める必要がある。次に Bragg 規則を使って化合物の平均励起エネルギーを求めて、その結果に結合のための解離エネルギーを加えて、阻止能の計算を行うことになる。

References

- 1) Ahren, S.P. : Rev. Mod. Phys., 52, 121 (1980)
- 2) Janni, J.F. : Atomic Data and Nuclear Data Tables, 27, 147 (1982)
- 3) Thwaites, D.I. : Rad. Res., 95, 495 (1983)
- 4) Bethe, H.A. : Ann. d. Physik, 5, 325 (1930)
- 5) Sugiyama, H. : Rad. Eff. (1984) in press
- 6) Sugiyama, H. : Bull. Electrotech. Lab., 47, 951 (1983)
- 7) Besenbacher, F., Bøttinger, J., Graversen, O. and Hasen, J.L. : Nucl. Instr. Methods, 188, 657 (1981)
- 8) Dalton, P. and Turner, J.E. : Health Phys., 15, 257 (1968)
- 9) Bichsel, H. : American Institute of Physics Handbook, 3rd edn. Gray, D.E. (Ed.), Chapter 8D (McGraw-Hill, New York 1972)
- 10) Berger, M.J. and Seltzer, S.M. : "Stopping Powers and Ranges of Electrons and Positrons", NBSIR82-2550-A (1982), 2nd ed.
- 11) Thompson, T.J. : UCRL-1910 (1952). Data taken from ref. 8
- 12) Thwaites, D.I. : Phys. Med. Biol. 26, 71 (1981)
- 13) Ritchie, R.H., Hamm, R.N. and Turner, J.E. : Proc. Sixth Symposium on Microdosimetry, Vol.1, p.345 (Harwood Acad. Pub., New York 1978)
- 14) Ashley, J.C. : Rad. Res., 89, 25 (1982)
- 15) Bichsel, H. : Phys. Med. Biol. 27, 449 (1982)

Table 2.3.1 Comparision of the mean excitation energies of typical gaseous medium recommended in various publications. The present results are the calculated I(molecule) plus dissociation energy I(diss.). Values are given in units of eV.

	N ₂	O ₂	Ne	Cl ₂	Ar	H ₂ O	Air
Dalton-Turner (1967)	89.6	101	132	176	189		92.9
Bichsel (1972)	78	100	137	176	182		
Besenbarcher et al. (1978)	86.7	102.1	139		194		90.8
Berger-Seltzer (1982)	82	95	137	174	188	71.6	85.7
Present estimate	92 (82+10)	102 (97+5)	126	178 (176+2)	182	73.5 (69.1+4.4)	94.5

Table 2.3.2 Comparision of the mean excitation energies of typical liquids and solids. Values are given in units of eV.

	N ₂	O ₂	H ₂ O	C	Al	Cu	Ag
Thompson (1952)		97.7*	112.6*				
Dalton-Turner (1967)				81.2	163	316	466
Bichsel (1972)				78	166	319	475
Thwaites (1981)			79				
Berger-Seltzer (1982)	90.5	104.3	75**	78	166	322	470
Present estimate	98	109	79	81	167	348	497

* Values normalized to I(Cu) = 348 eV.

** Theoretical estimate by Ritchie et al.^{13), 14)}

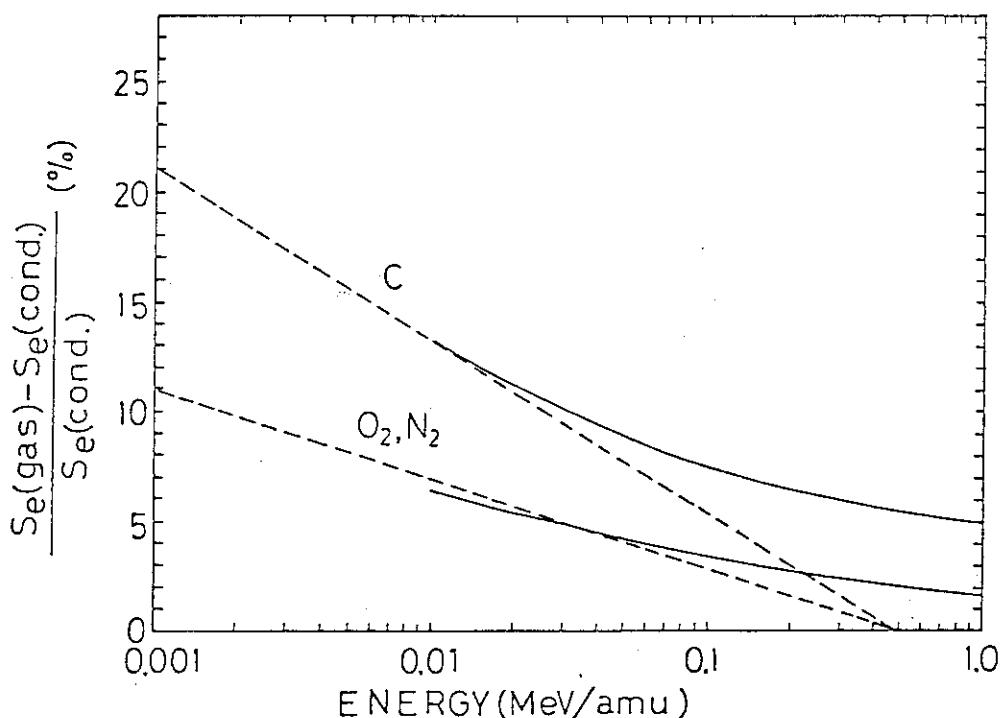


Fig. 2.3.1 Comparision of the percent deviation from Bragg's rule as a function of proton energy. Solid curves are the present calculations. Dashed curves are the semi-empirical estimate by Janni.²⁾

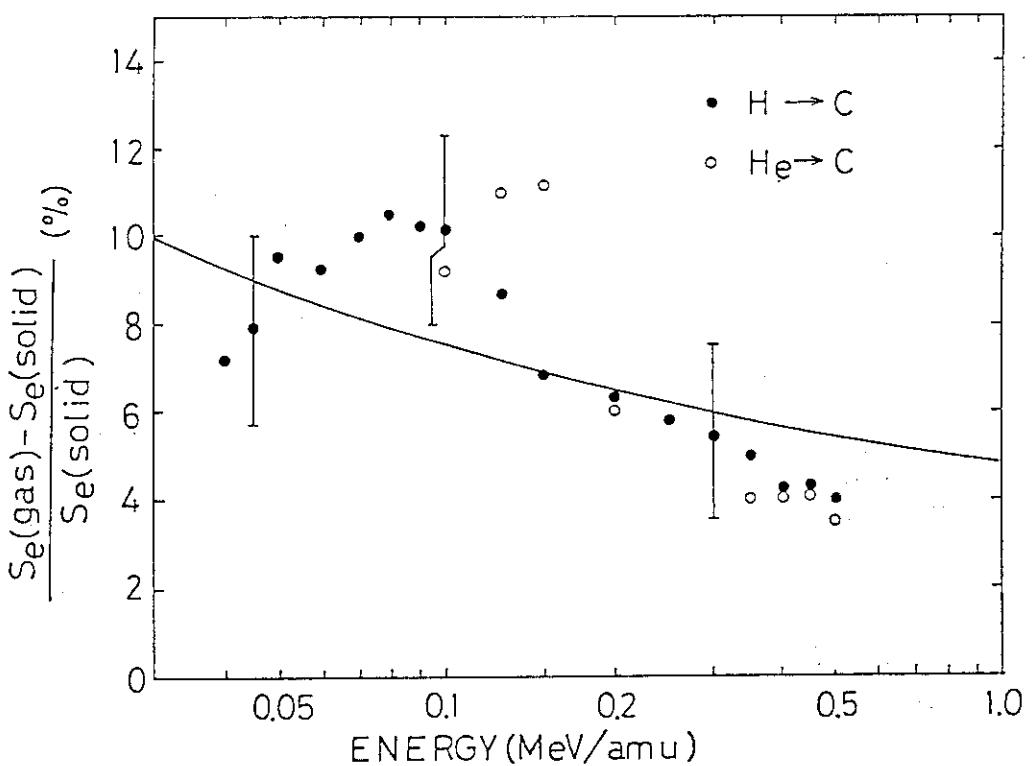


Fig. 2.3.2 Comparision of the relative difference between the stopping cross sections for H and He ions in gaseous and solid C. Solid curve shows the present estimate. Experimental points are taken from Besenbacher et al.⁷⁾

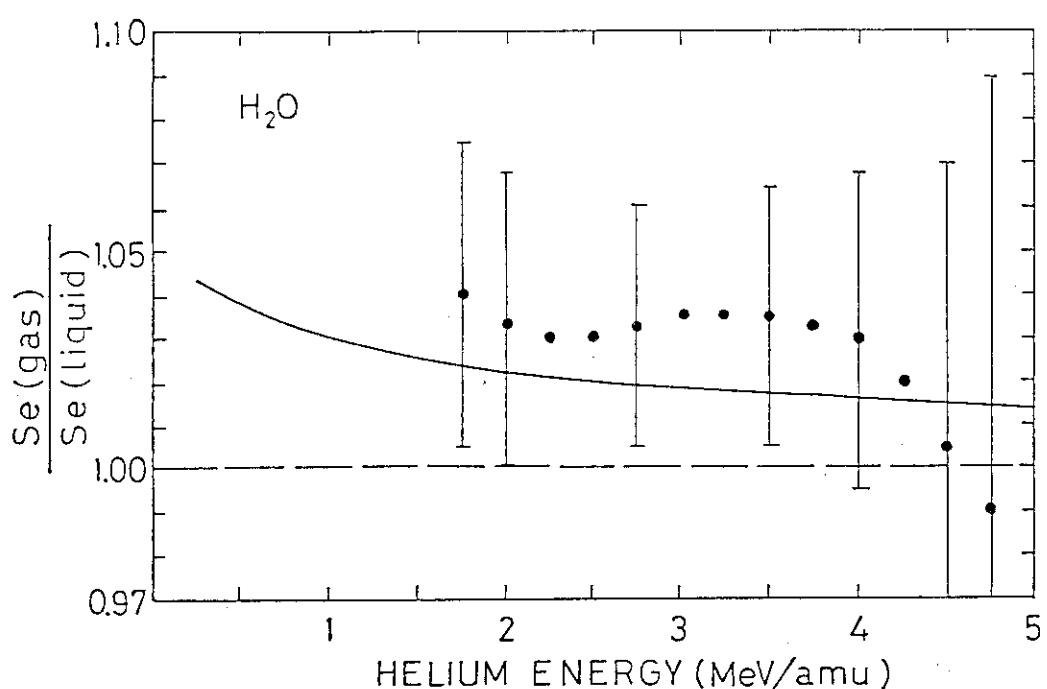


Fig. 2.3.3 Comparision of the stopping power ratio (vapor/condensed phase) for α -particles in H_2O . Solid curve shows the present estimate. Experimental points are taken from Thwaites.¹²⁾

2.4 低エネルギー電子線の水中における飛跡の模擬について

東京大学医科学研究所 伊藤 栄

要 旨

トリチウム (^3H) β 線などの低エネルギー電子線による放射線生物効果を研究する上では、低エネルギー電子線に特異的な 2 つの線量評価上の問題点を研究する必要がある。第 1 点は、 $^3\text{H}\beta$ 線の標的細胞あるいは細胞核内での不均等分布の問題である。第 2 点は、低エネルギー電子線の局所的な高 LET 効果（トラック端効果）である。問題とする標的の大きさおよび問題とする生物学効果により、それぞれの問題の解決に適した研究方法を取る必要がある。微小標的内での $^3\text{H}\beta$ 線の線量測定は技術的に困難なので、電子と物質（水）との衝突の基礎過程にもとづいた理論的アプローチが有力である。

この目的のために、モンテカルロ法を利用して、水中における $^3\text{H}\beta$ 線の飛跡を求めた。電子の水との衝突の基礎過程を追跡して、個々の衝突事象（イベント）の種類、付与エネルギーおよび衝突の位置を解析する計算機プログラム（ETRACK）を作成した。電子の衝突断面積および非弾性衝突の平均付与エネルギーのデータは Paretzke および Berger (1978) が評価した値を用いた。 δ 線および Auger 電子を含む電子の飛跡は、運動エネルギーが水のイオン化エネルギー (12.6 eV) に下がるまで追跡した。単一エネルギー又はエネルギー分布を持つ電子の飛跡（進行方向、衝突位置、衝突の種類、損失エネルギー）を逐一記録して、飛跡構造ファイル（磁気テープ）に出力した。この飛跡構造ファイルを解析することにより減速スペクトル、LET スペクトル、微視的線量分布など各種の 2 次的な物理量を求めることができる。

細胞周辺のトリチウムの空間的分布を、(1)点線源、(2)インサイダー、(3)アウトサイダー、(4)表面および(5)均等、の 5 種類に分類して、細胞核内での $^3\text{H}\beta$ 線の吸収線量の比較検討を行った。点線源の場合は、 R_{50} ($^3\text{H}\beta$ 線の 50 % の線量が吸収される距離) は $0.85 \mu\text{m}$ および R_{90} は $2.8 \mu\text{m}$ と計算された。アウトサイダーの場合には、標的（細胞核）内への線量の『染み込み』がある。均等分布で直径 $1.8 \mu\text{m}$ の球の標的の時に、内部 β 線源よりの吸収線量と外部 β 線源よりの吸収線量が等しくなる。

トリチウム (^3H) β 線による放射線生物効果を研究する上では、電子の水中での飛跡構造を模擬する方法は、実験では得られない情報が得られ、また多様な問題の解決に有力な手段を提供してくれる。

2.4.1 はじめに

低エネルギー電子線の放射線生物効果は、従来は、低 LET 放射線として、 γ 線および X 線などをまとめて議論されていたが、最近は新して視野から見直されている。低エネルギー δ 線（2 次電子線）は阻止能が高く放射線生物効果にとって重要なことは、古くより認識されていた

が、近年になって、 δ 線発生の二重微分断面積が実測されるようになり、定量的な議論がされるようになった。また、マイクロドシメトリーの議論も始めは μm 程度の標的を問題にしていたのが、より小さな標的を考慮する必要にせまられ、 δ 線に关心が向けられるようになった。

一方、実際的な問題としては、核融合炉の研究開発に伴うトリチウム(^3H)の環境への放出・汚染、および人間の $^3\text{H}\beta$ 線による被曝の危険の評価の問題があり、 $^3\text{H}\beta$ 線の微視的線量分布の評価をより精密におこなう必要がある。医療の立場からは、 ^{125}I を密封小線源として腔内照射に利用する場合の吸収線量を評価する上で、Auger電子などの低エネルギー電子線の特質を理解する必要がある。また、『Auger Therapy』と呼ばれる特異性の高い癌の治療法も提案されている。これは、沃素あるいはブロムなどを含んだ化合物を、癌組織中に取込ませた上で、外部よりその元素のK吸収端よりエネルギーの僅か高いX線を照射し、高い効率で内殻電離を起こさせる。沃素等の内殻電離に引き続いて、多数のAuger電子の発生などにより、局所的に極めて集中的に高LETの状態を作り出すことができ、効率的に癌組織に障害を与えることが可能である。

低エネルギー電子線の放射線生物効果を議論する場合には、飛程が短いので問題とする標的の大きさおよび問題とする最終効果を考慮しなければならない。Fig. 2.4.1は、例として、 $^3\text{H}\beta$ 線の生物効果を定量的に議論するための吸収線量の評価の考え方が、問題とする標的の大きさによって異なることを示している。 ^3H が生物中で均等に分布している場合には、 ^3H の濃度(A $\mu\text{C}/\text{ml}$)より平均の吸収線量率(2.9 A mGy/day)を計算することができる(1)。しかし、細胞($\sim 10 \mu\text{m}$)あるいは細胞核($\sim \text{数} \mu\text{m}$)内での $^3\text{H}\beta$ 線の生物効果を問題とする場合には、平均的な線量概念の使用は適切でなく、 ^3H の空間的分布および各 β 線の飛跡(1 μm)を考慮して標的内の吸収線量を評価しなければならない(2)。さらに、DNAなど分子レベルの標的の生物効果を理解するためには、飛跡に沿った個々の電離・励起の事象(イベント)の分布および標的の構造と放射線感受性を考慮して、議論を展開する必要がある(3)。

上記の各問題に対して、最も正確で応用範囲の広い研究方法がモンテカルロ法による飛跡構造の模擬(Simulation of Track Structure)である。西ドイツの放射線防護研究所(Neuherberg munchen)のParetzke等は、水溶液中の低エネルギー電子線の衝突断面積を、水蒸気中の値をもとにして求め、電子の飛跡(電離・励起)をモンテカルロ法で模擬(MOCAプログラム)し、実験結果と良い一致を得ている⁽¹⁾。NBSのBerger⁽²⁾、ORNLのTurner等⁽³⁾も同様にモンテカルロ法によるTrack Simulationを行ないマイクロドシメトリーの研究に役立てている。

筆者は従来は、LETカウンター(球形比例計数管)による、高LET放射線(中性子線、 π 中間子線、陽子線等)の実験的マイクロドシメトリーの研究に従事していたが、1 μm 以下の空間での微視的線量分布の測定・評価は困難であるので、モンテカルロ法による理論的な研究を始めた。

2.4.2 方 法

2.4.2.1 電子飛跡の模擬法の概要

モンテカルロ法による低エネルギー電子線の水中での飛跡の模擬とは、Fig. 2.4.2に示すようにある初期エネルギー E_0 を持つて点 P_0 に入射した電子が、次ぎに衝突を起こす位置(点 P_1)ま

での距離・衝突の種類・エネルギー損失等を予測し、電子線の飛跡を計算機の中で めてゆくことである。この過程を電子の運動エネルギーが充分低くなるまで続けると、一つの完全な電子線の飛跡が得られる。衝突の個々の発生確率は統計的（偶然）であるが、それらの平均値は衝突断面積として与えられる。

低エネルギー電子（10eV～100eV）の水（H₂O）との衝突には、弾性散乱とがある。非弾性散乱には電離衝突と励起衝突とがある。電離衝突にも H₂O の各軌道電子により様子が異なるが、O（酸素）の 1s 軌道（K-Shell）電子と衝突すると、電離に引き続き Auger 電子が放出される（523eV）ので、この場合は独立に評価する必要がある。電離衝突の結果たたき出された 2 次電子（ δ 線）は、充分高い運動エネルギーを与えられると、独立なトラックとして局所的なエネルギー付与に寄与する。励起衝突も様々なエネルギー準位を取りうるが、放射線生物効果にとっては、余り重要ではないと考えられるので、平均の励起エネルギーを各衝突点に与えている。

Fig. 2.4.3 は、水中の電子飛跡の模擬法の全体の仕事の流れを示したものである。第 1 に重要な仕事は、考えるべき基礎過程の整理と衝突断面積の評価である。その評価の結果は、衝突断面積の表または式として与えられる。第 2 に、電子飛跡の模擬を、計算機の中で発生させる乱数を道具として、実行する。電子の衝突過程を忠実に表現するモデルと偏りのない一様乱数が重要である。飛跡の模擬の結果は、個々の衝突事象を記録した飛跡構造ファイル（Track Structure File）として、磁気テープに保存する。そして、この磁気テープを解析目的（飛跡のプロット、減速スペクトルの計算、LET 分布の計算、微視的線量分布の計算等）に応じた解析プログラムを作成して、2 次的な結果を得ることができる。筆者は、現在は PDP-11/34 のミニコンピュータを使ってモンテカルロ計算を行っている。

2.4.2.2 衝突断面積の評価

低エネルギー（10eV 以下）電子の水に対する衝突断面積は、系統的に評価されたデータが無い。モンテカルロ法により、飛跡の模擬を行うためには、問題にするエネルギー範囲（10eV～100keV）のすべてにおける衝突断面積のデータを必要とする。筆者は、Paretzke および Berger がそれぞれ独立に評価した水の衝突断面積データ（10%程度の違いを含む）⁽⁴⁾ のうち主として Paretzke の値を採用して計算をおこなっている。これは、実験データが得られる領域では実験値をできるだけ採用して、実験データが無い領域では経験的な式にもとづいて内挿をおこなうという、実験データ中心の評価法を採っている。筆者は、Paretzke が評価した非弾性衝突の断面積、電離衝突と励起衝突との割合、酸素の内殻電離の割合および、各非弾性衝突による平均エネルギー損失の計算結果を用いて、モンテカルロ計算に必要なすべての衝突断面積および衝突当たりの損失エネルギーを評価した。弹性散乱の断面積は、Motto and Massay の教科書⁽⁵⁾ 中の式より計算した。電離衝突時の 2 次電子線（ δ 線）のエネルギー分布は Moller の式⁽⁶⁾ を用いて計算した。Fig. 2.4.4 に、このようにして得られた電子の水に対する断面積を示す。断面積は μm^{-1} 単位のマクロ断面積で示している。同図の右側の縦軸は、nm 単位の平均衝突距離を示す。全電離断面積は、各入射エネルギーにおける 2 次電子線のスペクトルにもとづき、ソフト電離断面積（2 次電子の運動エネルギーが水の電離ポテンシャル = 12.6 eV 以下）とハード電離断面積（ δ 線発生断面積）とに分類した。さらに、電離断面積のうち、酸素の内殻電離の断面積を別に取出し Auger

電子発生の断面積とした。実際のモンテカルロ計算では、各エネルギーにおける全衝突断面積を1に規格化したでんめんせきの割合を用いて、衝突の種類を決定する。Fig. 2.4.5に、断面積の割合を示す。低エネルギー領域では、弾性散乱の割合が多いので、場合によっては、計算時間の節約のため弾性散乱を無視して計算をおこなう。Fig. 2.4.6は、各衝突毎に失われるエネルギーの平均値を示している。現在のところ、各衝突における電離・励起準位の詳細な違いは問題としていないので、この様な平均的なエネルギー損失モデルを採用している。

Fig. 2.4.7は、衝突断面積と衝突毎のエネルギー損失を積分して得られた阻止能のデータである。150eVに阻止能の最大値(25eV/nm)が得られる。90eV以下では、励起衝突によるエネルギー損失が電離損失を上回っている。

2.4.2.3 電子飛跡の計算機上の模擬

電子の水に対する衝突断面積が、評価されると、これを用いて、水中での電子の飛跡を模擬(再現)することが可能となる。Fig. 2.4.7は、モンテカルロ法による電子の飛跡の模擬プログラム(ETRACK)の流れ図を示す。入力データをセットしたのち、SOURCEで電子を発生させる。COLIDEにて、衝突を起こすまでの距離および衝突の種類を乱数を用いて決定する。質の良い一様乱数の利用は、モンテカルロ法にとって極めて重要である。一般に使われている疑似乱数を用いないで、井上らの物理乱数を用いた⁽⁷⁾。各衝突の種類(ELSCAT, EXCITE, IONIZE, DELTA, AUGER)に分類された電子は、平均のエネルギー損失を差し引かれ、衝突後の新しい散乱角度を与えられて、ヒストリーを繰返す。初期エネルギーE₀(eV)の電子は、この様な個々の衝突を繰返して、その運動エネルギーを失い、水の電離ポテンシャル以下のエネルギーにまで減速されるまで追跡する(TRKEND)。 δ 線およびAuger電子が発生すると、元の飛跡に関する必要な情報は保存しておいて、2次電子の飛跡を先に追跡する。2次電子の追跡が終わると、ふたたびもとの電子の飛跡を続行する。このようにして8次の電子線までの飛跡を模擬することができる。個々の衝突の記録は、飛跡構造ファイル(磁気テープ)に、各事象毎に記録する。例えば、³H β 線(平均エネルギー5.7keV)の約4000個の飛跡を1本の磁気テープ(2400 feet, 1600BPI, 約30MByte)に収めることができる。

ETRACKでは、水中における飛跡構造の模擬の仕事だけを行い、2次的な物理量の計算等は、飛跡構造ファイルをどうして、他のプログラムで実行する。

2.4.3 結果と考察

2.4.3.1 ³H β 線の飛跡構造

Fig. 2.4.9には、一例として、5.7keVの電子(³H β 線の平均エネルギー)の水中の飛跡を三次元でプロットした図を示す。同図中央左側(→印)より入射した5本の電子の飛跡を重ねて示す。○印は電離を、×印は励起が起った点を示す。弾性散乱は省いてある。飛程はほぼ1μmであるが、 δ 線が発生すると、飛程は短くなる。飛程の終端部および δ 線の部分では、電離・励起の密度が高くなっている様子等が示されている。

2.4.3.2 各種の物理量の計算

モンテカルロ法で求めた飛跡構造ファイルを解析することにより、減速スペクトル、LET分布、微視的線量分布など、各種の物理量を導き出すことができる。それらのうちで、最も基礎的な物理データは、減速スペクトルである。モンテカルロ法による求め方は、通常の連続減速モデルと異なり、減速スペクトルの定義に従ってあるエネルギーにある電子（ δ 線、Auger電子を含む）飛行距離をヒストグラムにすれば、直ちに求められる。減速スペクトルの直線による寄与、 δ 線による寄与あるいは、Auger電子による寄与を分離して評価することも容易である。Fig. 2.4.10 にこのようにして求めた ${}^3\text{H}$ β線の減速スペクトルを示す。

同様の方法により、LET μrad 以上（ δ 以上のエネルギーの δ 線を独立な飛跡と見なして計算したLET分布）を求めることが容易に行い得る。

一方で、LETカウンター（球型比例計数管）を用いて、実験的に求められる微視的線量分布（y分布）を算出することもできる。y分布（等価直径 $d_{\mu}\text{m}$ の球に付与される微視的エネルギー分布）は、実際の立場から定義された量であって、解析的な手法では、導出が困難であるけれども、モンテカルロ法により求めることが可能である。

この為には、直径 $d_{\mu}\text{m}$ の球の周辺に、 ${}^3\text{H}$ β線をランダムに発生させ、そのβ線の飛跡が、球内に発生させる電離の数を求めることにより、LETカウンターを模擬することができる。

このようにして、計算で求めた水中のy分布（の平均値）は、組織等価ガスの中で求めた実験値とは、10%程度の誤差で一致した。

2.4.3.3 ${}^3\text{H}$ β線の微視的線量分布の計算

${}^3\text{H}$ などの低エネルギーβ線による放射線生物効果を研究する場合には、低エネルギーβ線の線質効果と同時に ${}^3\text{H}$ 線源の細胞・細胞核内の分布を知ることが、重要である。 ${}^3\text{H}$ β線の飛程は、約 $1\ \mu\text{m}$ と極めて短いので、細胞内の ${}^3\text{H}$ 分布により放射線生物作用の基本標的と考えられる。DNAを含んだ細胞核での吸収線量は、大きく影響を受ける。このような細胞レベルでの微視的線量の分布を評価する上で、モンテカルロ法は有力な手段を提供する。

Fig.2.4.11は、細胞周辺の ${}^3\text{H}$ の分布を5つのモデルにして示したものである。(1)点線源モデルは、微視的線量分布を考える基本モデルである。(2)インサイダーモデルは、細胞核内の ${}^3\text{H}$ が存在し、核外（細胞質）には存在しない場合のモデルであり、細胞核に取込まれた ${}^3\text{H}$ チミジン等のDNA合成の材料からの線量を評価する上で使用できる。(3)表面分布モデルは、核膜の ${}^3\text{H}$ が付着していることを想定した線量分布計算モデルである。(4)のアウトサイダーモデルは、(2)とは逆に、細胞質にのみ ${}^3\text{H}$ が存在し、核内には存在しないとしたモデルであり、 ${}^3\text{H}$ 水(HTO)等による細胞の被曝がこれに近い状態である。(5)の均等分布モデルは、 ${}^3\text{H}$ が、空間的に均等に分布する場合であり、この場合に限ってのみ、 ${}^3\text{H}$ β線の低エネルギー電子線としてのLET効果を議論することが可能である。

Fig.2.4.12は、点線源モデルに基づいて、線源からの半径方向の微視的線量分布を計算したものである。解析的な他の方法と比較すると、半径 $3\ \mu\text{m}$ までの値は良く一致しているが、それ以遠では、モンテカルロ法が高い結果を与えていた。これは、飛程のストラッギング効果を考慮に入れてあることによる差と思われる。

Fig.2.4.13は、インサイダーモデルの計算結果の一例を示したものである。同図の枠は $8 \mu\text{m} \times 8 \mu\text{m}$ の大きさで、細胞の大きさを示す。左上($1 \mu\text{m}$)は ${}^3\text{H}\beta$ が $1 \mu\text{m}$ の核内にのみ限極している場合の β 線の飛程(100個)をプロットしたものである。核外の線量が『染みだし』ている様子がわかる。 ${}^3\text{H}$ を含んだ核の大きさ $2, 3, 4, 5, 6, \mu\text{m}$ と大きくしていくと、細胞内の線量が均等に近付いてゆく様子がわかる。このように、細胞内の ${}^3\text{H}$ 不均等分布による、微視的な線量分布の違いをモンテカルロ法により、定量的に評価することができる。

2.4.4 結論

モンテカルロ法による低エネルギー電子の非程構造の模擬法により、電子衝突の基礎過程を忠実に再現し、各種の重要な2次量を計算、評価することができる。 ${}^3\text{H}\beta$ 線の放射線生物学的效果を考える上で、必要なマイクロドシメトリーの諸量を、計算で求めることができた。

今後さらに、水およびDNAなど生体高分子に対する電子の衝突断面積(とくに、電離断面積)を、広いエネルギー幅にわたって評価したデータファイルの整備が望まれる。

文 献

- 1) H.G. Paretzke, G. Lentheld, G. Burger and W. Jacobi, Approaches to Physical Track Structure Calculations, Proc. of the Forth Symp. on Microdosimetry, EUR 5122 d-e-f, pp.123-140, 1974.
- 2) H.G. Paretzke, An appraisal of the relative importance for radio-biology of effects of slow electrons, in Proc. of the Fifth Symp. on Microdosimetry, EUR 5452 d-e-f, pp.41-60, 1976.
- 3) Hamm, R.N. et al., Spatial correlation of energy deposition events in irradiated liquid water, Proc. of the Sixth Symp. on Microdosimetry, Harwood Academic Publisher, pp.179-186, 1978.
- 4) M.J. Berger, On the Spatial Correlation of Ionization Events in Water, Proc. of the Seventh Symp. on Microdosimetry, pp.521-526, Oxford, Sep. 1980.
- 5) H.G. Paretzke and M.J. Berger, Stopping power and energy degradation for electrons in water vapor, Proc. of the Sixth Symp. on Microdosimetry, Harwood Academic Publisher, pp.749-758, 1978.

Dosimetry and Microdosimetry of ${}^3\text{H}$ β -ray(1) Macro-Dosimetry

$$A = 1 \mu\text{Ci/ml}$$

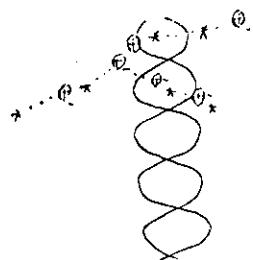
$$D = 0.29 \text{ rad/day}$$

(2) Micrometer-Dosimetry (Cellular level)(A) Microscopic Dose Distribution ($D(X)$)

- > Direct measurement is impossible !
- > Cellular ${}^3\text{H}$ distribution data

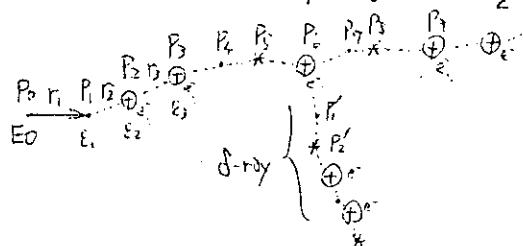
(B) Energy Deposition Spectrum ($f(y)$)

- > Measurable for $d=0.5$ to $20 \mu\text{m}$
- > Theoretical RBE based on DRA model

(3) Nanometer-Dosimetry (DNA level)(A) Hit Distance Distribution ($P(x)$)
or Proximity Function ($T(x)$ or $t(x)$)

(B) Distribution of Target Sensitive Site

Fig.2.4.1

Collision of ${}^3\text{H}$ β -ray with H_2O 

E_0	: Initial Energy (eV)
P_i	: Collision Point (x_i, y_i, z_i) (nm)
r_i	: Collision Distance (nm)
ϵ_i	: Energy Transfer (eV)
*	: Elastic Scattering
+	: Excitation
+	: Ionization

Fig.2.4.2

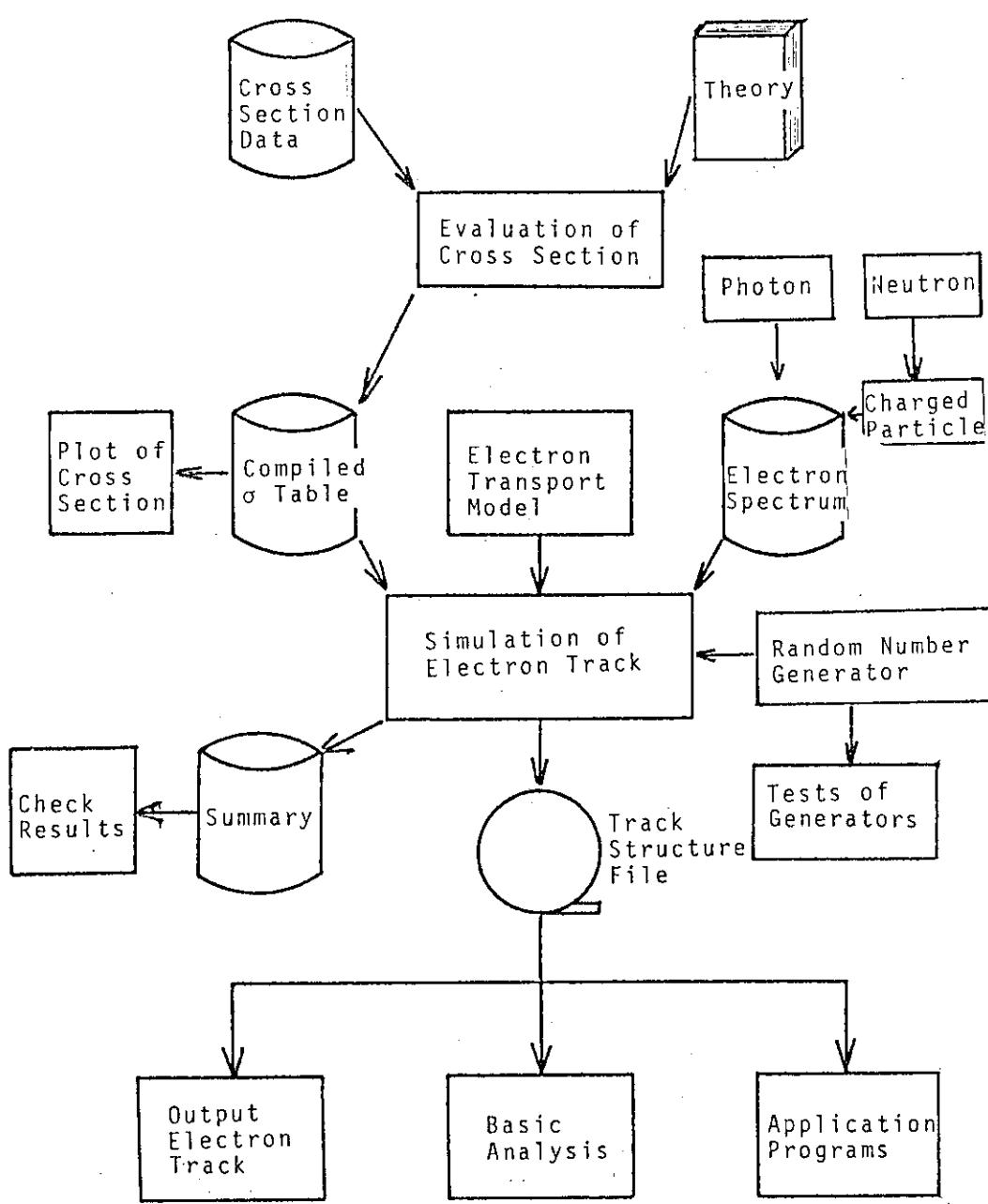


Fig.2.4.3

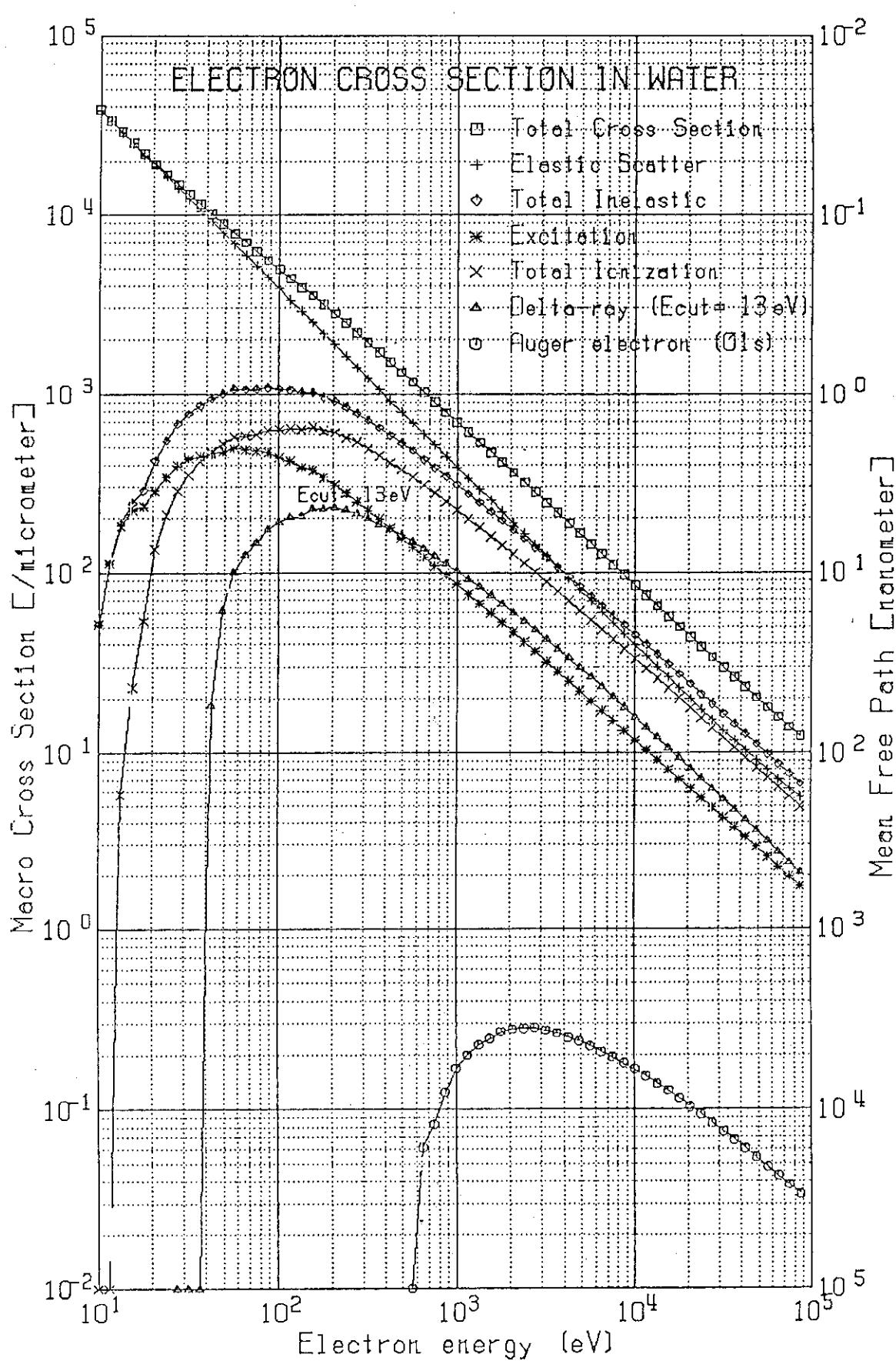


Fig.2.4.4

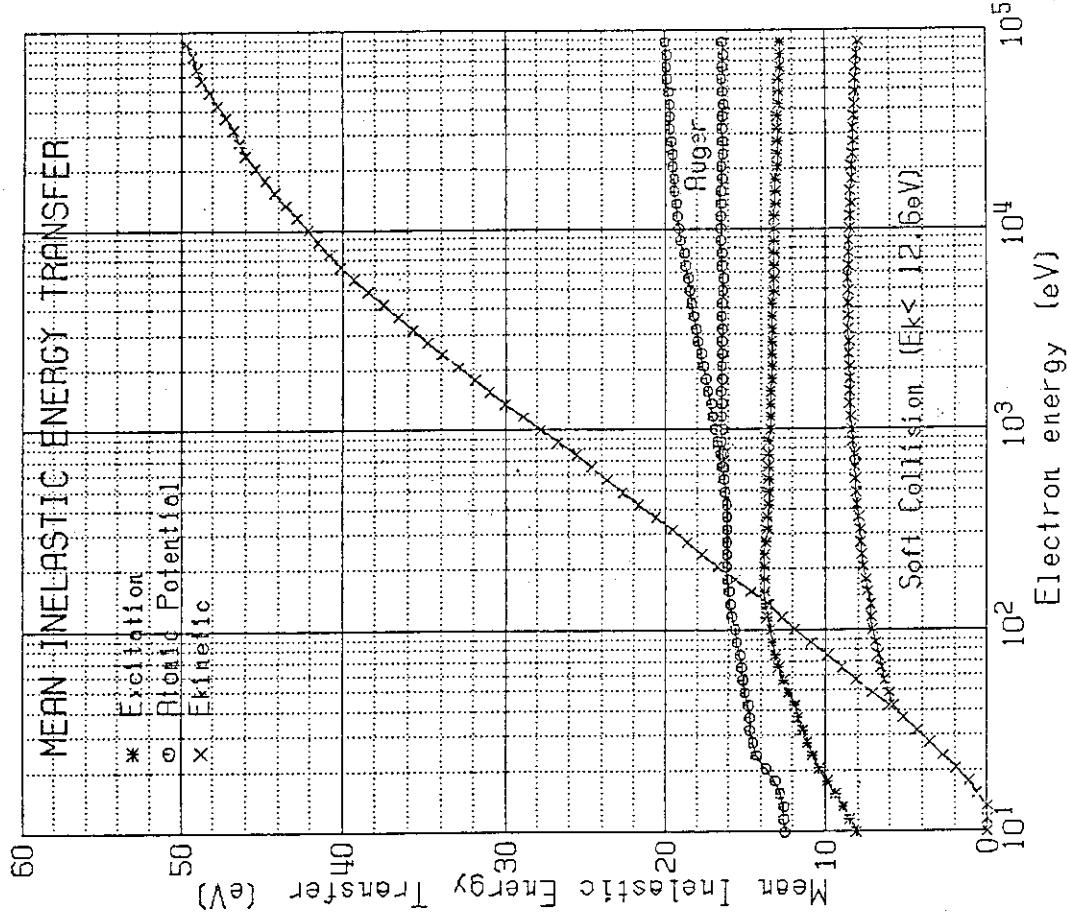


Fig.2.4.6

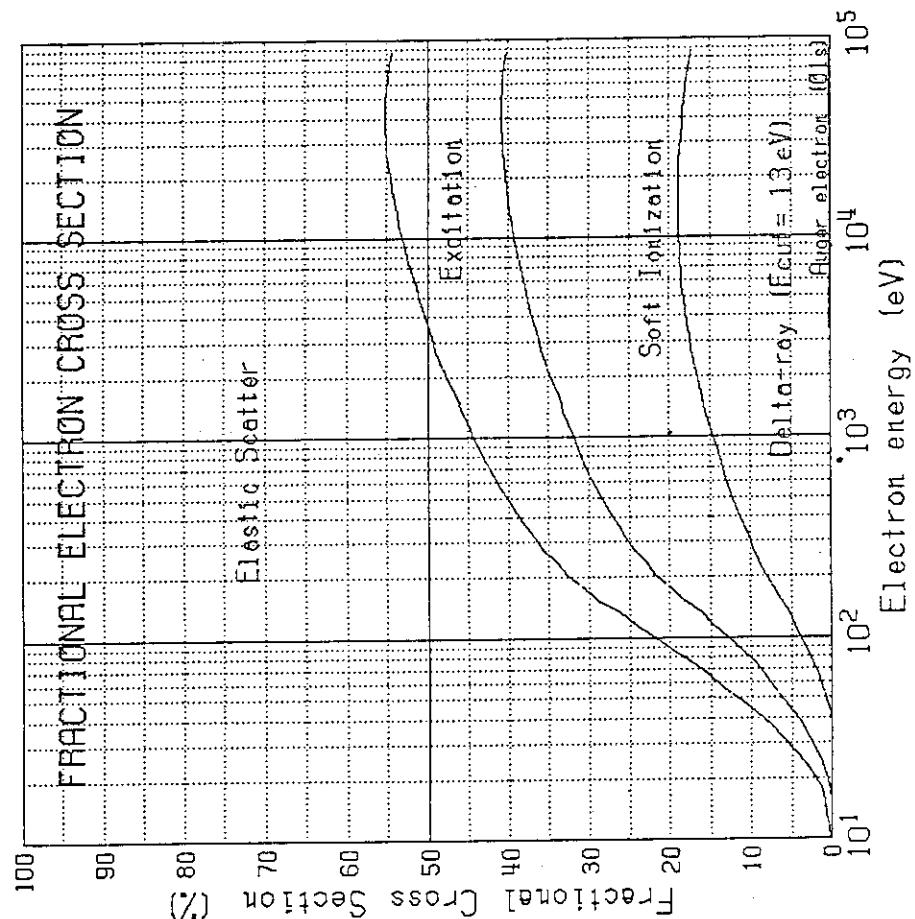


Fig.2.4.5

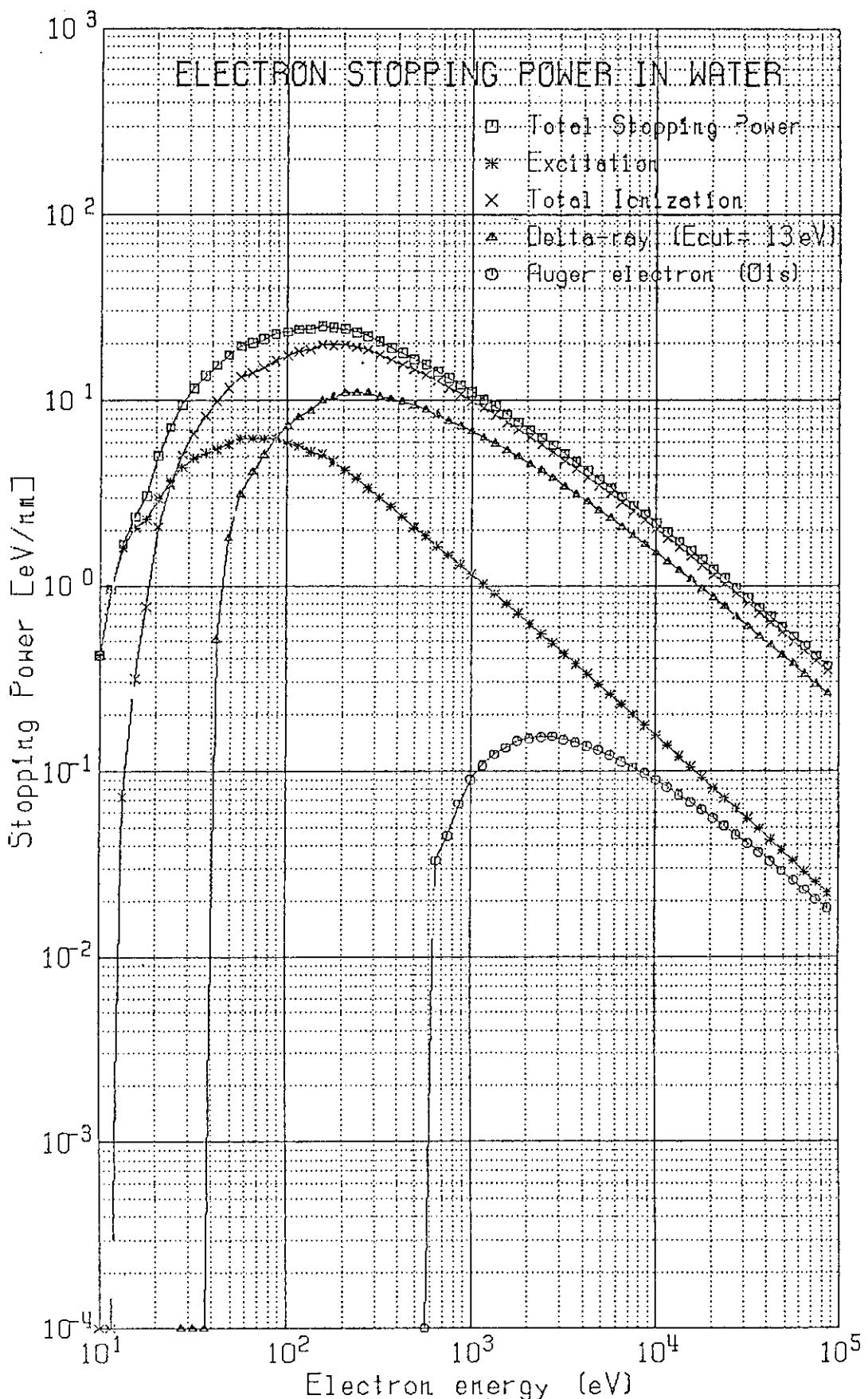


Fig.2.4.7

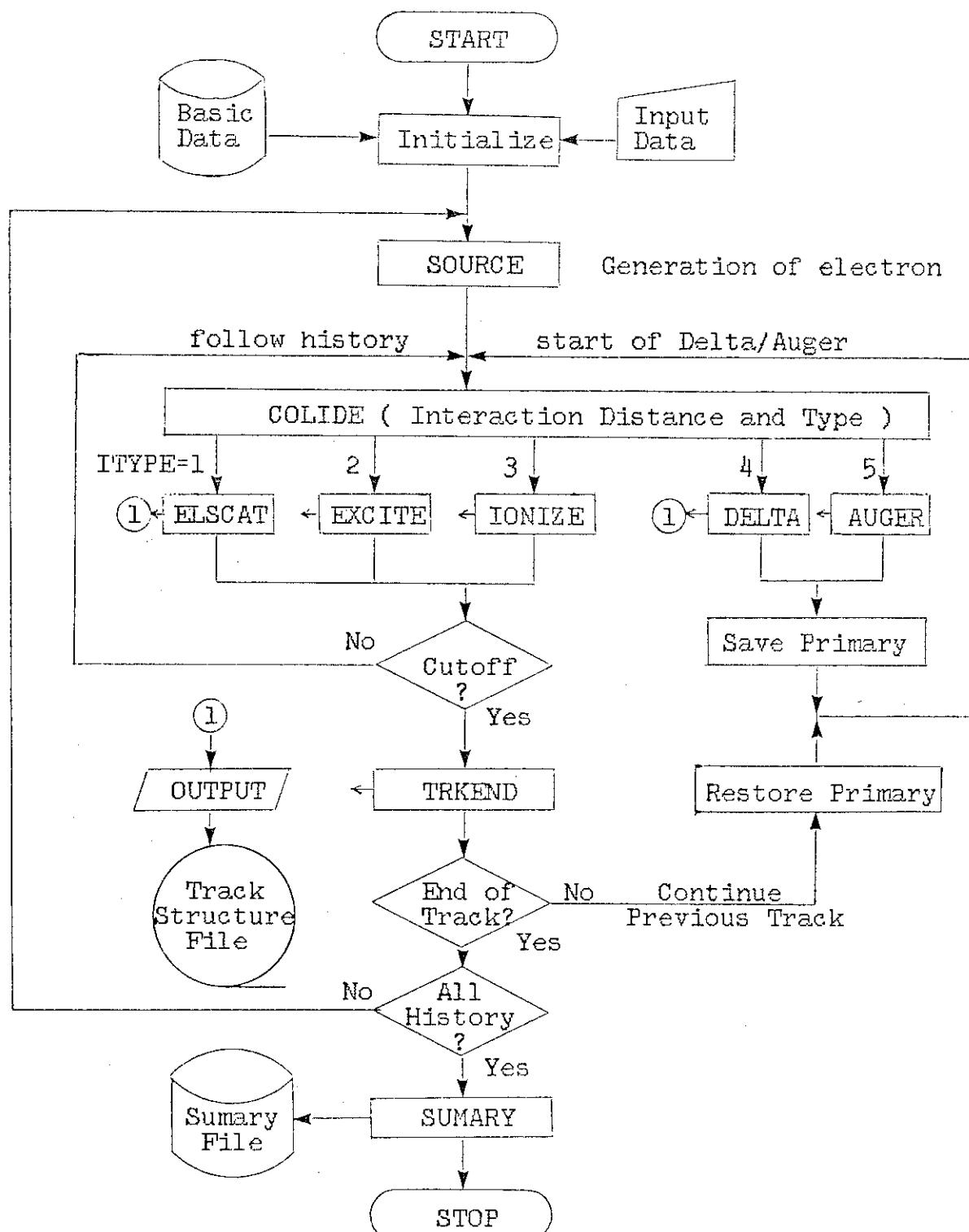
ELECTRON TRACK SIMULATION (ETRACK)

Fig.2.4.8

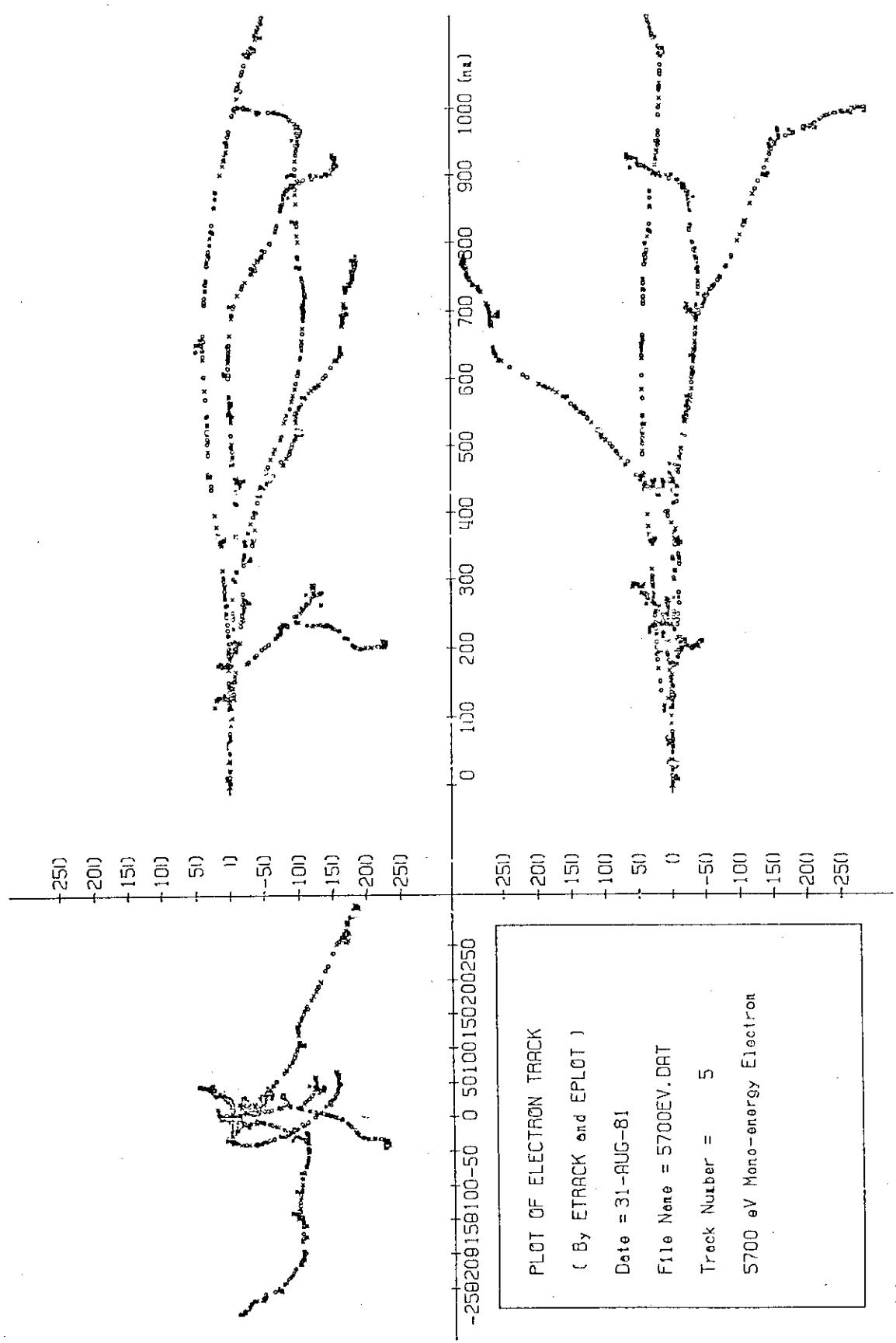


Fig.2.4.9

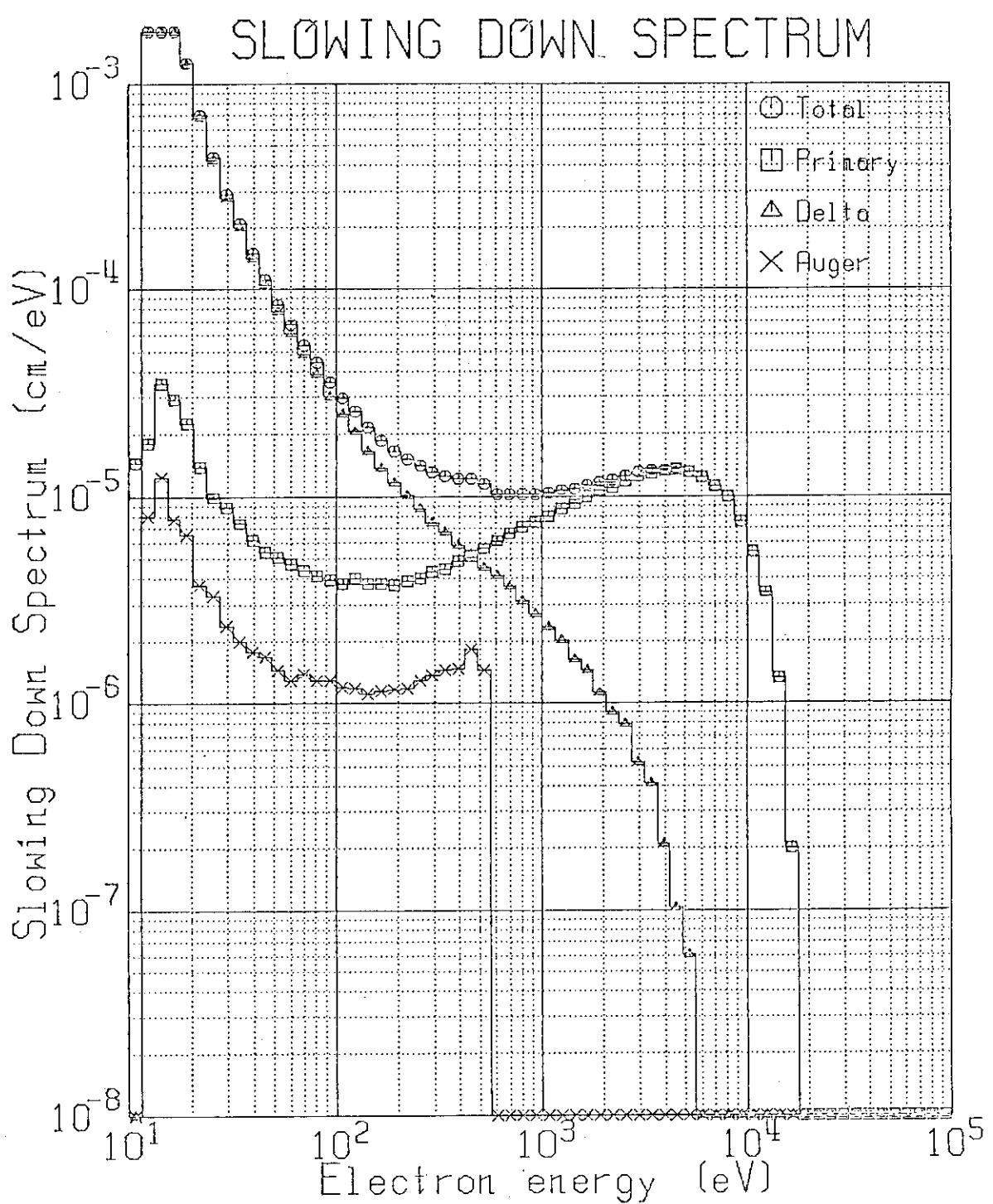
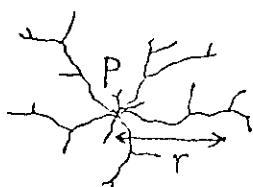


Fig.2.4.10

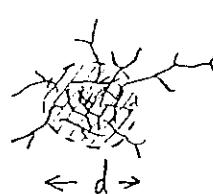
(1) Point



Extreme case for dose calculation

Radial dose distribution ?

(2) Insider

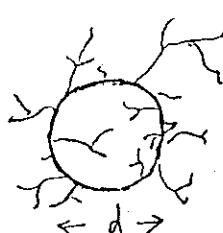


Labelled ${}^3\text{H}$ in cell nucleus

Escape of β -ray from target

Radial dose distribution for $d(\mu\text{m})$?

(3) Surface



Escape of β -ray from target

Labelled ${}^3\text{H}$ on the membrane

Radial dose distribution for $d(\mu\text{m})$?

(4) Outsider

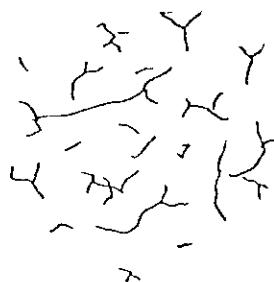


HTO in cytoplasm

Sink of β -ray into target

Radial dose distribution for $d(\mu\text{m})$?

(5) Uniform



Simple assumption

"Random" distribution of β -ray

LET effect of ${}^3\text{H}$ β -ray

Fig.2.4.11 Model of Cellular ${}^3\text{H}$ Distribution

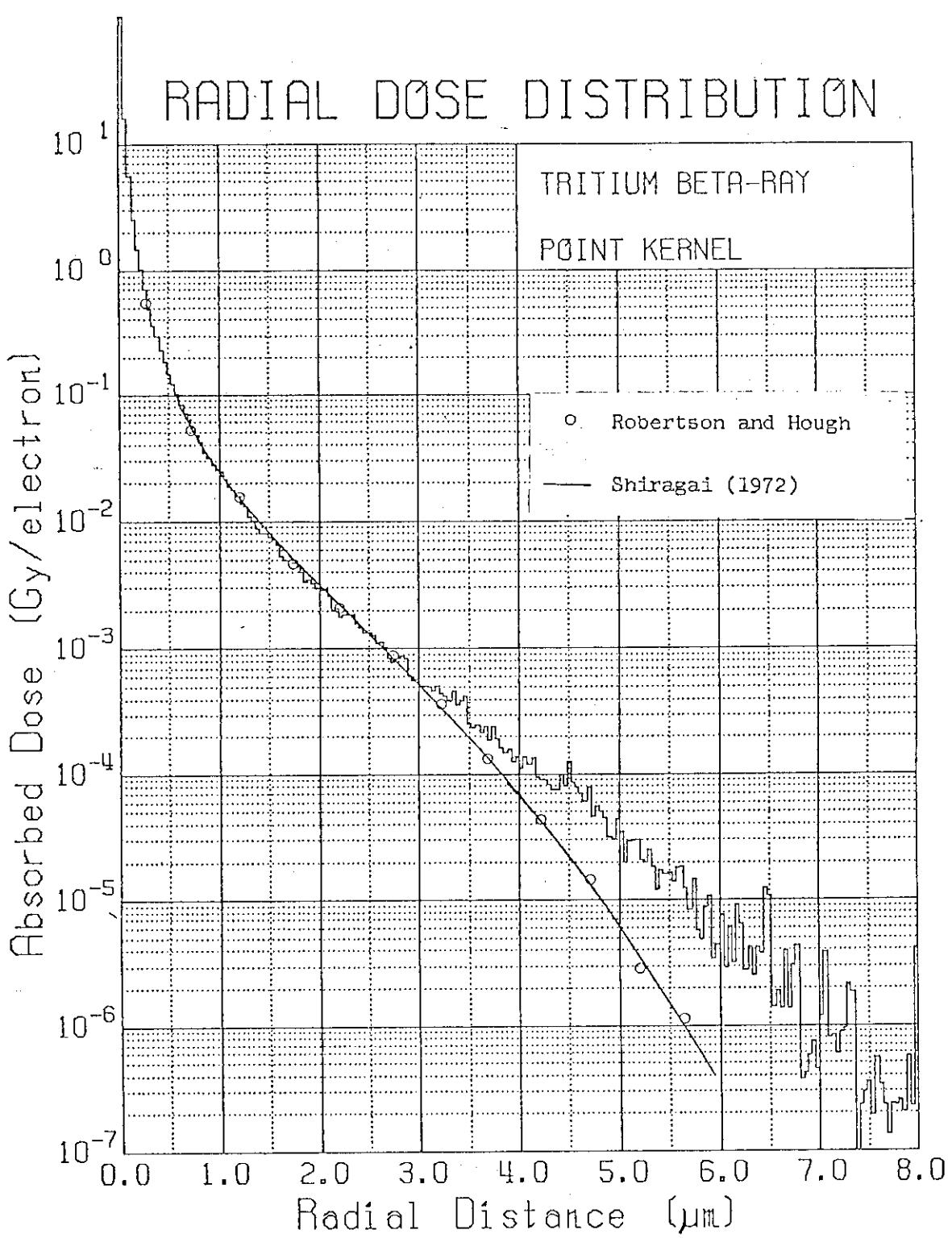


Fig.2.4.12

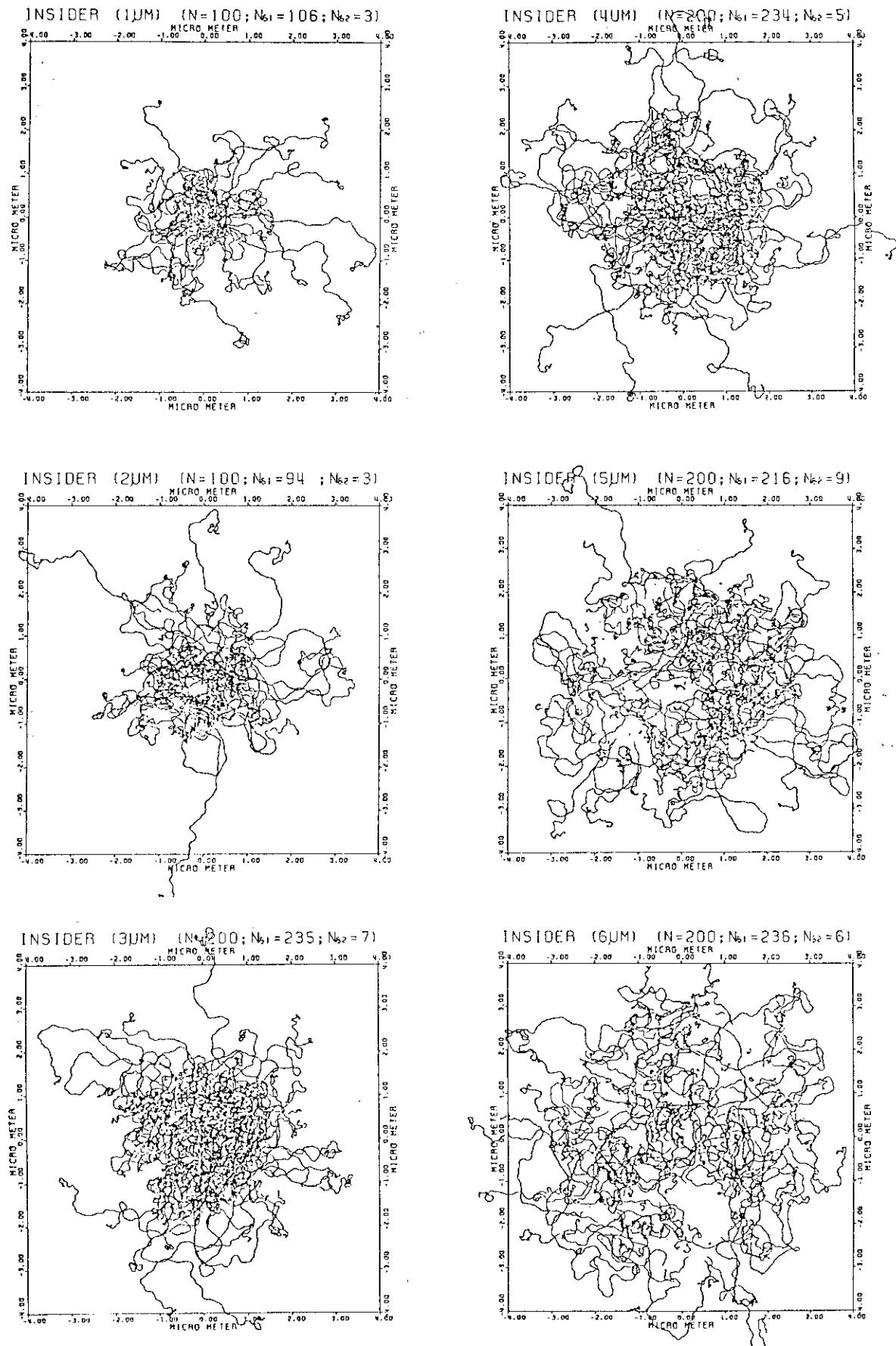


Fig.2.4.13

2.5 ト ラ ッ ク 構 造 理 論 と 微 生 物 に 対 す る 重 イ オ ン の 致 死 效 果

理研 高 橋 旦

2.5.1 はじめに

枯草菌胞子、大腸菌等微生物の重イオンによる不活性化の実験が1970年頃から理研において行われて来た^{1~3)}。また1970年代後半から、主としてArからUイオンまでの高いZ番号のイオンによる枯草菌胞子不活性化の実験が西独航空医学研究所のBucker教授のグループによって行われている⁴⁾。理研グループは数MeV/amuのHeからNeイオンまでを用いてきたが、最近理研リニアックから1~3MeV/amuのArやXeイオンが使えるようになった。1974~5年の論文^{1,2)}で、我々は実験結果をト ラ ッ ク・セグメント法^{5~7)}、Powers, Lyman, Tobiasの方法⁸⁾および織田理論⁹⁾によって解析した。また数年前の論文¹⁰⁾ではKatz理論^{11,12)}をそのまま借用してみた。Katzの重イオン通路周辺へのエネルギー付与の理論は簡単な式で、しかもエマルジョンの実験によく合うようであるが、標的論の部分には難点があると思われる。現に、枯草菌胞子の γ 線に対する生存曲線が片対数目盛でプロットしてほぼ直線になるにもかかわらず、Katzの推奨しているパラメーターを使うと非常にはっきりとshoulderが出なければならず、実験結果と矛盾する¹⁰⁾。本論文ではKatzの標的論の部分をより現実に即したものとすることを試みた。すなわち、標的の大きさは実際の胞子の“core”の部分となるべく同じ大きさにとり、また重イオンが胞子のcoreを直撃した場合と単にそばを通過して δ 線の影響だけがある場合とで数式の上の取扱いを分離した。以下に述べるように、この方法により、CからNeあたれまでのイオン照射で不活性化断面積のエネルギー依存が殆んどない領域の存在する理由を説明することができる。なお、E. coli B/rに対する不活性化についても解析を行った。

2.5.2 重イオンによる微生物の照射

Bacillus subtilis胞子^{3,13)}およびE. coli B/rの1975年頃までの照射法については既に文献1,2で述べたものでそれ以後改良した、動物培養細胞兼用の照射装置について簡単に記す。理研サイクロトロンからのイオンを厚さ2 μm の金箔で散乱させ約2°45'に散乱してくるイオンをミリポア・フィルター上のmonolayer状試料に照射する。散乱イオンが上下左右で多少非対称になることがあるので試料はビームの中心に対して自転・公転するよう設計された照射装置に4ヶずつはめこまれ、必要と思われる線量だけ照射される^{4~16)}。なお、最近单一重イオンによる胞子の不活性化の実験を行うため~1MeV/amu Arイオンの照射をCR-39ト ラ ッ ク・デテクターと組合せて行っており、その方法については文献17で述べる。

2.5.3 イオンの通路周辺における吸収線量

Katzの重イオン・ト ラ ッ ク周辺への近接衝突によるエネルギー賦与理論に遠隔衝突の線量も別途考慮しようとする試みがAhlenによりなされている¹⁸⁾。遠隔衝突による線量は主として励起を引き起こすのであるが、H₂Oや炭水化物ではその約20%が内殻励起であるので、それに伴い

Auger 電子が放出される。しかもそれはイオンの通路から~15 Å 以内に線量を集中して与えるので無視できない。Chatterjee-Schaefer 理論²⁰⁾ でも遠隔衝突を考慮している。

Katz の吸収線量 D_{KZ} 。Katz は吸収線量についていくつかの式を提唱しているが、ここでは最も単純な式を用いる。 $D_{KZ}(x)$ はイオンの通路から x の距離のところに二次電子によって賦与される線量である：

$$D_{KZ} = \frac{C Z^{*2}}{2 \pi x \beta^2} \left(\frac{1}{x} + \frac{1}{X_m} \right) \quad (1)$$

ここに C は定数 (水に対して $C = 1.36 \times 10^{-7}$ ergs/cm = 0.85 keV/(100 μm)), Z^{*e} はイオンの実効電荷, β_c はイオンの速度 (c は光速), X_m は最大エネルギーを持つ δ 線の飛程である。実効電荷は

$$Z^{*e} = Ze [1 - \exp(-125 \beta Z^{-\frac{2}{3}})] \quad (2)$$

で与えられる。ここに Ze はイオンの核電荷である。最大エネルギーの δ 線の飛程は

$$X_m = \kappa \omega_{max} = \kappa (2mc^2 \beta^2 r^2), \quad (3)$$

ここに κ は定数 (水に対して $\kappa = 10 \mu g/cm^2 \text{keV}$), $r = (1 - \beta^2)^{-\frac{1}{2}}$ である。Ahlen¹⁸⁾によれば(1)式は $Z \leq 26$, $\beta \leq 0.8$ に対するエマルジョンの実験に良く一致する。Pierce と Blann²¹⁾ は(2)式中の定数 125 の代りに 130 を採用している。我々は 130 としたときどうなるか N イオンについて検討したところ、結論にほとんど影響ないことが分かった。

Katz-Ahlen の吸収線量 D_{KA} 。Katz の吸収線量は近接衝突のみを考慮しているので、遠隔衝突による線量はこれとは別に計算する。Ahlen¹⁸⁾によれば、遠隔衝突の吸収線量あるいは prompt primary dose は

$$D_p = \frac{2NZ^{*2}e^4}{m\beta^2 c^2 x^2} \sum_K f_K [\xi_K^2 K_1^2(\xi_K) + r^{-2} \xi_K^2 K_0^2(\xi_K)], \quad (4)$$

ここに N は単位体積当りの電子の数, ξ_K は $\omega_K x / r \beta_c$ で与えられるものであり, $E_K = h \omega_K / 2 \pi$ は k 番目の励起準位のエネルギー, K_0 と K_1 はそれぞれ order 0 と 1 の変形ベッセル関数, f_K は振動子強度を分子中の電子数で割ったものである。我々は文献19の table 2 に与えられた水に対する f_K 値を用いた。Fig. 2.5.1 に見られるように, $D_p(x)$ は数 Å より小さい x に対して $D_{KZ}(x)$ よりも大きい。我々の計算では, Katz-Ahlen の吸収線量 $D_{KA}(x)$ を次のように定義した：

$$D_{KA}(x) = D_p(x) \quad (D_p(x) > D_{KZ}(x) \text{ のとき}), \quad (5)$$

$$D_{KA}(x) = D_{KZ}(x) \quad (D_p(x) < D_{KZ}(x) \text{ のとき}). \quad (5')$$

D_p は Fig. 2.5.1 に見られるように D_{KZ} となめらかに接続する。

Chatterjee と Schaefer の吸収線量 D_{CS} 。Chatterjee と Schaefer²⁰⁾ は水に対して次のような式を与えていている。

$$\left. \begin{aligned} D_{CS}(x) &= \frac{\text{LET}_{\infty}}{2 \pi r_c^2} + \frac{\text{LET}_{\infty}}{4 \pi r_c^2 \ln(e^{\frac{1}{2}} r_p / r_c)}, \quad x < r_c \\ D_{CS}(x) &= \frac{\text{LET}_{\infty}}{2 \pi x^2 \ln(e^{\frac{1}{2}} r_p / r_c)}, \quad x > r_c \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

ここに r_c と r_p は core と penumbra の半径であり、それぞれ

$$\begin{aligned} r_p &= (0.768 T - 1.925 \sqrt{T} + 1.257) \mu\text{m}, \\ r_c &= 0.0116 \beta \mu\text{m}, \end{aligned} \quad (6')$$

である。また、TはMeV/amu単位で表わしたイオンのエネルギーである。 D_{CS} と D_{KZ} は比較のためにFig. 2.5.2に示してある。

2.5.4 不活性化断面積の解析

(1) 円筒標的模型

我々は細胞内に一箇の感受域があると仮定し、その大きさが電子顕微鏡で観測される胞子のcoreの部分と等しいとみなす。我々の観測によれば、coreの面積は $0.2 - 0.3 \mu\text{m}^2$ である。一方、電顕写真で白く抜けたようにみえるDNAの部分は約 $0.12 \mu\text{m}^2$ であった。我々はここで $0.12 \mu\text{m}^2$ ではなく、Schafer et al.⁴⁾に従って $0.22 \mu\text{m}^2$ という値を用いる。その理由は、解析の過程で我々は $0.22 \mu\text{m}^2$ という値が $0.30 \mu\text{m}^2$ あるいは $0.12 \mu\text{m}^2$ といった値よりも良く実験結果を説明することを見出したからである。さらに、 $0.22 \mu\text{m}^2$ という値は織田理論を用いた我々の重イオンデータから得られた感受域($0.215 \mu\text{m}^2$)とも良く一致する。もし胞子のcore全体が感受域であり、イオンの通路から r の距離においてその軸がイオンの通路と平行であるような半径 a の短かい円柱でその感受域を近似すれば、平均吸収線量 $\bar{D}(r)$ は次のように計算される¹⁰⁾:

$$\left. \begin{aligned} \bar{D}(r) &= (\pi a^2)^{-1} \left[\pi r_1^2 D(r_1) + \int_{x=r_1}^{x=a-r} 2\pi x D(x) dx + \int_{a-r}^{a+r} 2x \theta D(x) dx \right], \quad r < a \\ \bar{D}(r) &= (\pi a^2)^{-1} \int_{r-a}^{r+a} 2x \theta D(x) dx, \quad r > a \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

ここに θ は

$$\theta = \arccos [(r^2 + x^2 - a^2) / 2rx] \quad (8)$$

で与えられる。

ここで定数 r_1 は Katz の吸収線量 D_{KZ} に対しては $a/1000$ に、Katz-Ahlen 吸収線量 D_{KA} に対しては 1 \AA に、Chatterjee-Schaefer の吸収線量 D_{CS} に対しては r_c になるように選んだ。 $a/1000, 1 \text{ \AA}$ といった値は適当に選んだものであるので、我々は次のような比を計算し、これが妥当であるかどうか検討した:

$$R = [x r_1^2 D(r_1) + \int_{r_1}^r D(x) dx] / \text{LET} \quad (9)$$

$D_{KZ}(x)$ と $D_{KA}(x)$ に対する R を Fig. 2.5.3 に示す。 $D_{CS}(x)$ に対してはこの比は 1 になることが知られている。LET の値は文献 15 から得た。我々は D_{KA} に関しては U イオンに対する R が 1.0 を越えないように r_1 を調整した。不活性化の確率と断面積は ketz の標的理論を手直しすることにより求めた。(7)式及び(8)式を用いると、不活性化の確率は、もし感受域がその中に m 箇の標的を持つとすれば、

$$P = [1 - \exp(-\bar{D}(r)/E_0)]^m \quad (10)$$

で与えられる。 E_0 は平均して 1 標的当たり 1 ヒットを与えるような吸収線量である。不活性化断面積は、

$$S = \int_0^a 2\pi r P dr \quad (11)$$

で与えられる。Katz et al.¹²⁾は胞子に対し $m = 4$, $a = 5.8 \times 10^{-6}$ cm を用いているが、多標的モデルは γ 線を照射された。*B. subtilis* 胞子に対して観察される指数関数型の生存曲線を説明できない¹⁰⁾。そのうえ、Katz et al. によって用いられた a の意味が明確でない。我々は m を 1 とし、面積はまだよく知られていないけれども、胞子の core の面積が $0.22 \mu m^2$ になるよう πa^2 を選んだ。(2.5.4 の初めの論議参照)。

He イオンのデータは、(10), (11)式で $m = 1$ とおき、 $63.5 \text{ krad} \geq E_0 \geq 8 \text{ krad}$ の範囲の E_0 を与えて解析した (Fig. 2.5.4 – 2.5.5)。その際 D_{KA} を用いると D_{KZ} を用いた場合に比べて数パーセント高い不活性化断面積が得られる。我々は δ 線の効果を区別するために重イオンに対して (10), (11)式の代りに次式を用いた：

$$P_{in} = 1 - \exp(-\bar{D}(r)/E_{in}), \quad r < a \quad (12)$$

$$P_\delta = 1 - \exp(-\bar{D}(r)/E_\delta), \quad r > a \quad (12)$$

$$S = \int_0^a 2\pi r P_{in} dr + \int_a^\infty 2\pi r P_\delta dr. \quad (13)$$

ここに P_{in} はイオンが胞子の core を貫通するときの不活性化の確率であり、 E_{in} はパラメータである（後出）。 P_δ はイオンが胞子の core のそばを通過するとき胞子が δ 線によって不活性化される確率である。 E_δ は δ 線に対する 37% 線量であるが、正確な値は知られていないので、まず E_δ を $D_{37}^\delta = 63.5 \text{ krad}$ に固定し、 E_{in} のみを 63.5 krad から減少させた。 63.5 krad から 8 krad の E_{in} を仮定したとき、U イオンに対する不活性化断面積の計算値 S に変化は見られなかった (Fig. 2.5.6)。 E_{in} は He イオンに対する不活性化断面積の実験値によって制限される。もし E_{in} が $8 - 10 \text{ krad}$ より低ければ、計算値 S は最低のエネルギーの He イオンに対する断面積の実験値より大きい断面積を与える (Fig. 2.5.4 – 2.5.5 参照)。一方、最も適した E_{in} 値は N イオン (Fig. 2.5.6 – 2.5.7) に対して $8 - 10 \text{ krad}$ である。従って $8 - 10 \text{ krad}$ の E_{in} 値は N イオンと低エネルギー He イオンの実験値を説明できるといえよう。

今まで E_δ を 63.5 krad に固定してきたが、実際はこの値より小さい可能性がある。Howard – Flanders⁶⁾によれば、 δ 線に対する LET 分布は 10 MeV/amu の He イオンに似ている。Fig. 2.5.4 と Fig. 2.5.5 に見られるように、 $5 - 6 \text{ MeV/amu}$ He イオンに対する断面積は D_{KZ} と D_{KA} に対して $E_0 = 30 \text{ krad}$, D_{CS} に対して 40 krad の曲線上に良くのっている。これらの値は δ 線に対する E_δ の下限であると考えられる (10 MeV/amu の He イオンに対する E_0 は $5 - 6 \text{ MeV/amu}$ He イオンよりやや大きくなるであろう)。従って我々は D_{KZ} と D_{KA} に対して 30 krad , D_{CS} に対して 40 krad と E_δ を固定し解析を行った (Fig. 2.5.7 – 2.5.8)。U イオンと Xe イオンについては E_{in} を $8 \text{ krad} \leq E_{in} \leq E_\delta$ の範囲で変えても (13) 式で与えられる S の計算値には何らの影響も与えないことが分った。 $E_\delta = 63.5 \text{ krad}$ の場合、N イオンに対して最も適した E_{in} 値は $8 - 10 \text{ krad}$ であった。He イオンに対して S は主として E_{in} の値によって決まることが分る。例えばもし E_{in} を 10 krad に固定し、 E_δ を 10 krad から 63.5 krad に増加させれば、 6 MeV/amu において断面積は約 20% 低くなる。しかしこの理論値でもなお、断面積の実験値よりは依然として高い (Fig. 2.5.4 – 2.5.5)。これらの計算において我々は πa^2 を $0.22 \mu m^2$ とした。 πa^2 を $0.30 \mu m^2$

にしても E_δ の許容範囲は同じであるが、N と C イオンの断面積のプラトー状の領域の説明が困難になる。 πa^2 を $0.12 \mu\text{m}^2$ とすると実験結果はさらに説明しにくくなる。

E. coli B/r の場合は $D_{37}^r = 3.65 \text{ krad}$ ²⁾ をそのまま使って $E_{in} = E_\delta = 3.65 \text{ krad}$, $\pi a^2 = 0.44 \mu\text{m}^2$ となると実験結果の傾向をほぼ説明することができる (Fig. 2.5.9)。枯草菌胞子の場合にとって $E_{in} = E_\delta = D_{37}^r$ で説明できるのは修復能の LET 依存が著しくないことを示しているのではないかと思われる。

(2) 球標的模型

これまで述べた解析では標的が円筒形であるとしてきたが、試みに球形の標的を仮定してみた。結果は Fig. 2.5.10 に示すように円筒形の場合と著しい違いはない。Fig. 2.5.10 は枯草菌胞子の場合であるが、*E. coli* B/r の結果を球模型で解析しても円筒の場合と著しい差はなかった。

2.5.5 不活性化の機構について

Fig. 2.5.4 あるいは Fig. 2.5.5 に見られるように、 $E_0 = 30 \text{ krad}$ 又は 40 krad に対する理論曲線は $4 \sim 6 \text{ MeV/amu He}$ イオンに対する実験に基づく不活性化断面積と割合良く合っている。また、低エネルギー He イオンに対する実験から求められた断面積は低い E_0 値の理論曲線と一致する。この事実は Horneck²²⁾ が示した LET の増加に伴う修復能の減少によって説明できると思われる。RBE のピークもまた 0.8 MeV/amu He イオンに相当する約 $150 \text{ keV}/\mu\text{m}$ の LETにおいて現われる (Fig. 2.5.11)。文献 1 で論じたようにトラック・セグメント法では He イオンによって胞子を不活性化するには 7 箇又は 8 箇以上の “primary ionization” が 30 \AA のトラック・セグメント内で生じることが必要とされる^{1, 6)}。それは、これだけの密度のイオンができると修復能が機能を失うという意味かも知れない。“Primary ionization” は直接 DNA を傷つけるだけでなく、間接効果の主役である OH ラジカル等も生成するであろう。OH ラジカルの拡散距離は $60 \sim 100 \text{ \AA}$ であると言われている²³⁾。

U イオンに対しては、計算された不活性化断面積は E_δ を 63.5 krad (上限値) ととっても、 30 krad (D_{KZ} と D_{KA} に対する下限) または 40 krad (D_{CS} に対する下限) としても、すべて Schafer et al.⁴⁾ の実験から得られた断面積より低い値となる (Fig. 2.5.6 - 2.5.8)。 $Z^* = 33$, $\beta = 0.1$ の重イオン・トラックの中心から 10 \AA 以内では殆んどすべての原子、分子は D_p (10 \AA) = 10^{11} ergs/g という高線量を受け (Fig. 2.5.1)，励起やイオン化を起こすであろうと思われる。このように稠密に励起またはイオン化された原子・分子はお互いに反応し * いわゆる thermal spike^{1, 10, 25)} や shock wave⁴⁾ を生じ、不活性化断面積の増加や生物組織の破壊²⁶⁾ を起こす原因となるであろう。重イオンの生物効果が δ 線の飛程より遠方にまで及ぶ現象を遠達効果 (long range effect) ということがある。これまで分極効果⁵⁾ や thermal spike 効果による説明が試みられており、また非常に重いイオンでは遠達効果がはっきり出るようであるが²⁷⁾、どの程度の重イオンからこの効果が起こるのかまだよく分かっていない。Johnson と Inokuti²⁸⁾

* Roots (Ref. 31)によれば Okada と Roots (Ref. 23) が動物培養細胞について示した X 線の場合の OH radical による間接致死効果 (~65%) も Ar イオンでは ~10% に減る。これは chemical core 内でのラジカル同士の反応 (Ref. 24) により間接効果が抑制されるためであろう。

は希ガス固体のスパタリングの収率が非常に大きいことに関連して、電子状態の励起エネルギーが核の運動エネルギーに変わってゆく過程を詳しく説明している。生物作用における重イオンの遠達効果もこのようなことと関係がありそうである。²⁹⁾ 遠達効果の原因としては ion explosion 説も捨てきれないと思われる。なお、Matsui と Imamura²⁵⁾によれば N イオンによって thermal spike によると思われるラジカルの分解生成物が生ずるということであり、これに伴う不活性化が N イオンあたりすでに起こっている可能性があるが、それが実測できるほどに効くかどうかは今後解明すべき課題である。

(12)式から分かるように E_{in} はイオンの原子核が胞子の core に当った時の 37 % 生存線量に相当する。N イオンと低エネルギー He イオン ($LET > 150 \text{ keV}/\mu\text{m}$) に対する 8–10 krad の E_{in} 値は Sadaie と Kada³⁰⁾ が報告した repair deficient strains に対する最も低い D_{37}^r (~ 24 krad) よりも低い値となっている。このような低い E_{in} 値は線量 $D(r)$ が胞子の core の全面積についての平均であるということによって説明されるかも知れない。そうだとすれば、比 E_{in}/D_{37}^r はイオンの核によって損傷を受けた部分の大きさと関係がありそうである。

文 献

- 1) F. Yatagai, T. Takahashi, Y. Kitajima and A. Matsuyama : J. Radiat. Res. 15, 90 (1974).
- 2) F. Yatagai, T. Takahashi and A. Matsuyama : J. Radiat. Res. 16, 99 (1975).
- 3) T. Takahashi, F. Yatagai and S. Kitayama : Adv. Space Res. 3, No.8, P.95 (1983).
- 4) M. Schäfer, R. Facius, K. Baltschukat and H. Bücker : 7th Symp. on Microdosimetry (1980); G. Horneck and H. Bücker : Int. J. Radiat. Biol. 37, 558 (1980).
- 5) S. Kondo : Hoshasen Idengaku (in Japanese), Shokabo, Tokyo (1964).
- 6) P. Howard-Flanders : Adv. Boil. Phys. 6, 553 (1958).
- 7) G.W. Barendsen : Int. J. Radiat. Biol. 8, 453 (1964).
- 8) E.L. Powers, J.T. Lyman and C.A. Tobias : Int. J. Radiat. Biol. 4, 313 (1968).
- 9) N. Oda : IAEA-SM-145/47, Vienna (1971) P.99.
- 10) F. Yatagai, T. Takahashi and A. Matsuyama : Int. J. Radiat. Biol. 37, 558 (1980); T. Takahashi, F. Yatagai and A. Matsuyama : Sci. Pap. Inst. Phys. Chem. Res. 74 51 (1980).
- 11) J.J. Butts and R. Katz : Radiat. Res. 30, 855 (1967).
- 12) R. Katz, B. Ackerson, M. Homayoonfer and S.C. Sharma : Radiat. Res. 47, 402 (1971); R. Katz, 9th Int. Conf. Solid State Nuclear Track Detectors (1976).
- 13) H. Yoshikawa : Proc. Natl. Acad. Sci. (U.S.A.) 53, 1476 (1965).
- 14) F. Yatagai, S. Kitayama and A. Matsuyama : Radiat. Res. 77, 250 (1979); F. Yatagai and A. Matsuyama, IPCR Cyclotron Progr. Rept. 13, 118 (1979).
- 15) L.C. Northcliffe and R.F. Schilling : Nucl. Data Tables A7, 233 (1970).
- 16) G.L. Jr. Kochanny, A. Timnick, C.J. Hockanadel and C.D. Goodman : Radiat. Res. 19, 462 (1963).
- 17) T. Takahashi et al. : RIKEN Accelerator Progr. Rept. 17, (1983) to be published.
- 18) S.P. Ahlen : Rev. Mod. Phys. 52, 121 (1980).
- 19) K.H. tan et al. : Chem. Phys. 29, 299 (1978).
- 20) A. Chatterjee and H.J. Schaefer : Radiat. Environ. Biophys. 13, 215 (1976).

- 21) T.E. Pierce and M. Blann : Phys. Rev. 173, 390 (1968).
- 22) G. Horneck : 1st Int. Conf. on Cell and Molecular Biology in Space, Toledo (1978).
- 23) R. Roots and S. Okada : Radiat. Res. 64, 306 (1975).
- 24) A. Hitachi et al. : Phys. Rev. B27, 4779 (1981); A. Chatterjee and J.L. Magee : LBL Report 11220 (1980).
- 25) M. Matsui and M. Imamura : IPCR Cyclotron Progr. Rep. 5, 93 (1971); Bull. Chem. Soc. Japan 47, 1113 (1974).
- 26) C.A. Tobias et al. : 6th Int. Congress. Radiat. Res., C-Sy-3-1, Tokyo (1979); LBL Report 11220 (1980).
- 27) R. Facius et al. : Adv. Space Res. 3, No.8, P.85 (1983).
- 28) R.E. Johnson and M. Inokuti : Nucl. Instr. Meth. 206, 289 (1983).
- 29) B.E. Fischer and R. Spohr : Rev. Mod. Phys. 55, 907 (1983).
- 30) Y. Sadaie and T. Kada : Mutation Res. 17, 138 (1973).
- 31) R. Roots : LBL Report 11220 (1980).

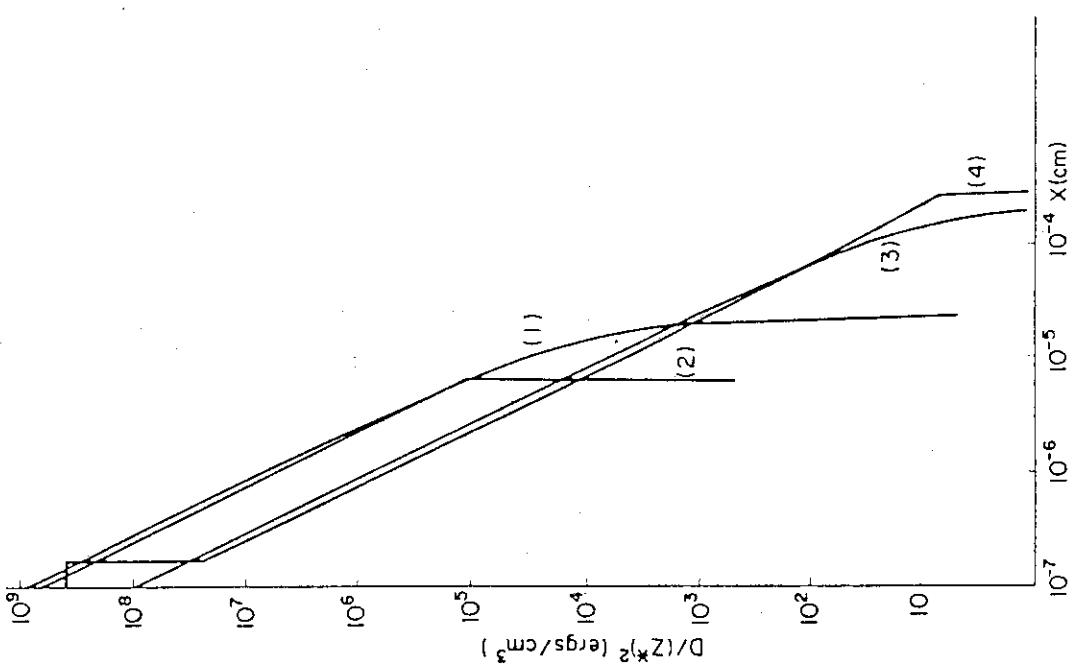


Fig. 2.5.2

1) Katz's dose for $\beta = 0.05
 2) Chatterjee and Schaefer's dose for $\beta = 0.05$;
 3) Katz's dose for $\beta = 0.15$;
 4) Chatterjee and Schaefer's dose for $\beta = 0.15$.$

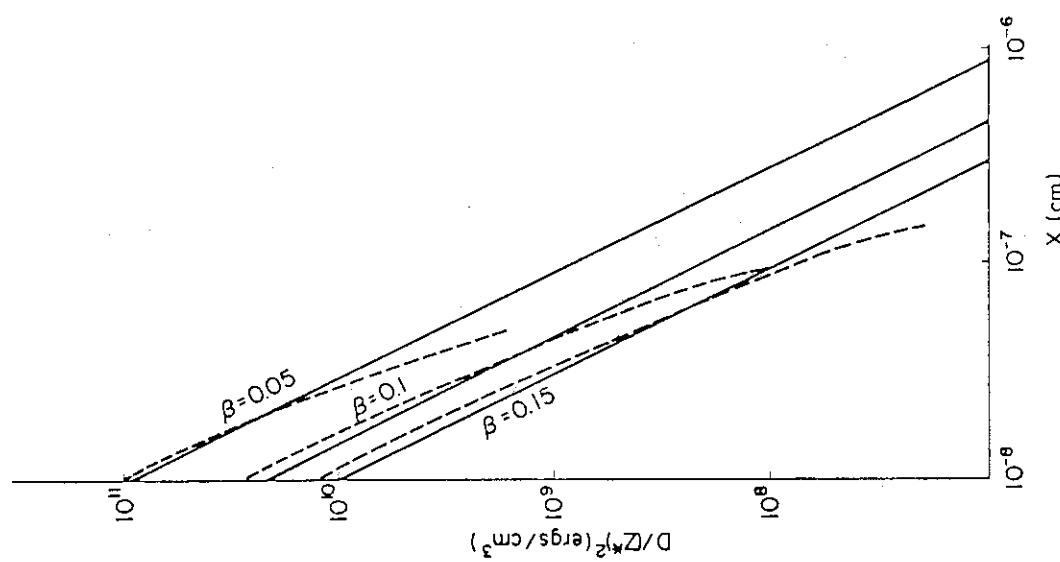


Fig. 2.5.1 Solid lines are Katz's doses from Eq.(1) and dotted lines are Ahlen's prompt doses from Eq.(4) for $\beta = 0.05, 0.1$ and 0.15 .

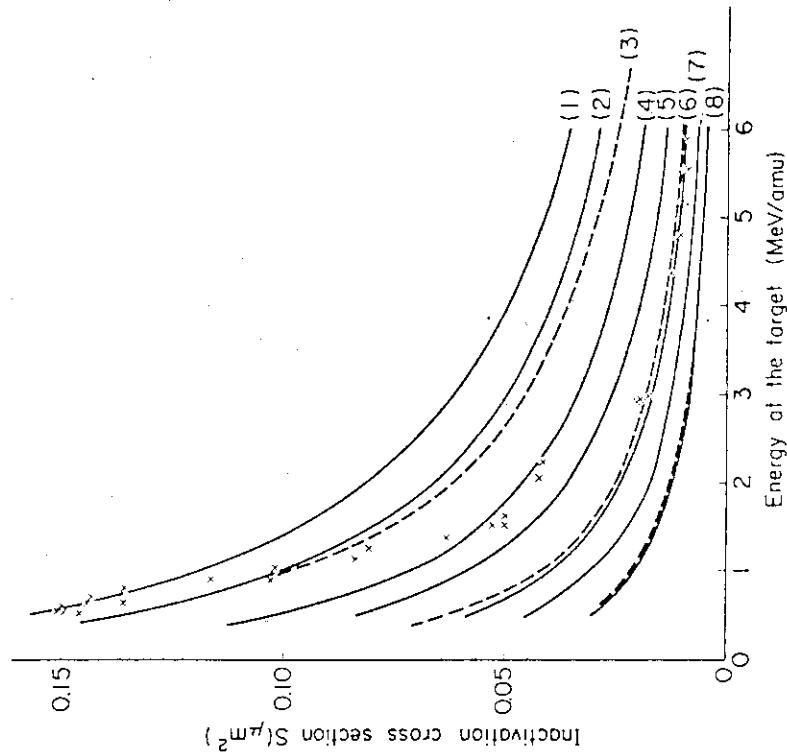


Fig. 2.5.4 Inactivation cross sections of Bacillus subtilis as a function of He ion energy.

x: Experimental; 1)-(8): Theoretical curves (Eq. 11 or Eq. 13) for $\pi a^2 = 0.22 \mu\text{m}^2$. 1) $E_0 = 8 \text{ krad}$, D_{KZ}; 2) $E_0 = 10 \text{ krad}$, D_{KZ}; 3) $E_{in} = 10 \text{ krad}$, $E_0 = 63.5 \text{ krad}$, D_{KZ}; 4) $E_0 = 15 \text{ krad}$, D_{KZ}; 5) $E_0 = 20 \text{ krad}$, D_{KZ}; 6) $E_0 = 30 \text{ krad}$, D_{KZ} & D_{KA} (dotted line); 7) $E_0 = 40 \text{ krad}$, D_{KZ}; 8) $E_0 = 63.5 \text{ krad}$, D_{KZ} & D_{KA} (dotted line).

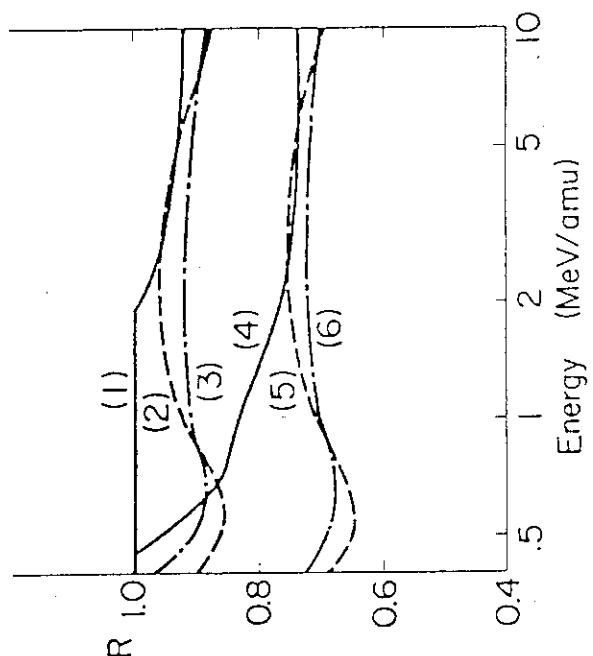


Fig. 2.5.3 Ratio R given by Eq. (9).
 1) R for D_{KA}, Z = 92; 2) R for D_{KA}, Z = 2; 3) R for D_{KA}, Z = 7; 4) R for D_{KZ}, Z = 92; 5) R for D_{KZ}, Z = 2; 6) R for D_{KZ}, Z = 7.

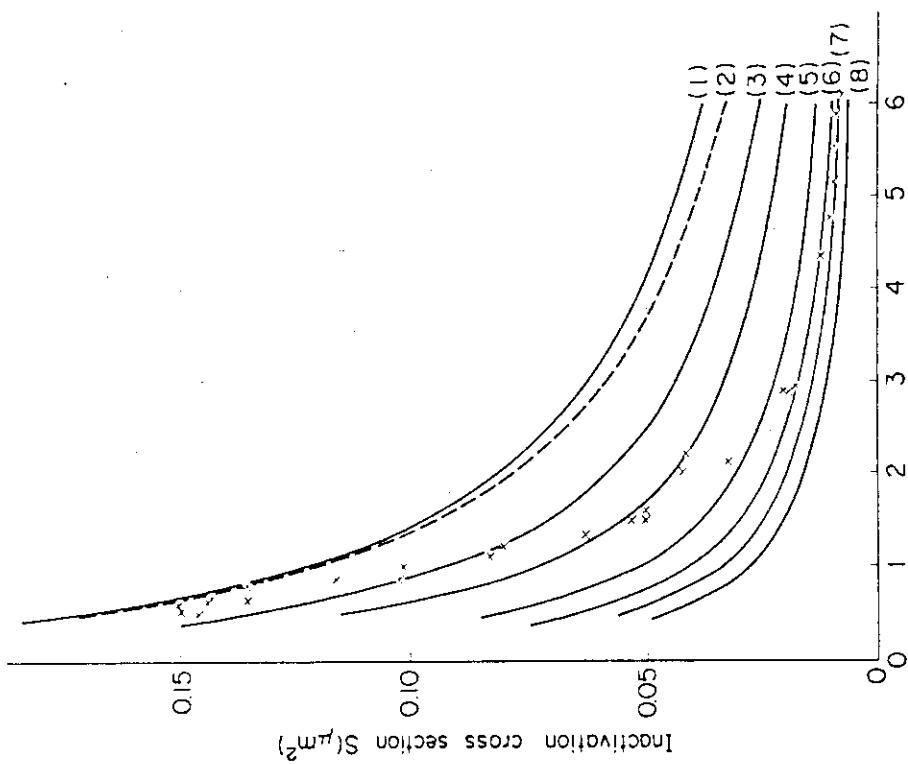


Fig. 2.5.5 Inactivation cross sections of Bacillus subtilis as a function of He ion energy.
x: Experimental; 1)-8: Theoretical curves for $\pi a^2 = 0.22 \mu\text{m}^2$ calculated by DCS. 1) $E_0 = 10 \text{ krad}$; 2) $E_{in} = 10 \text{ krad}$, $E_\delta = 63.5 \text{ krad}$; 3) $E_0 = 15 \text{ krad}$; 4) $E_0 = 20 \text{ krad}$; 5) $E_0 = 30 \text{ krad}$; 6) $E_0 = 40 \text{ krad}$; 7) $E_0 = 50 \text{ krad}$; 8) $E_0 = 63.5 \text{ krad}$.

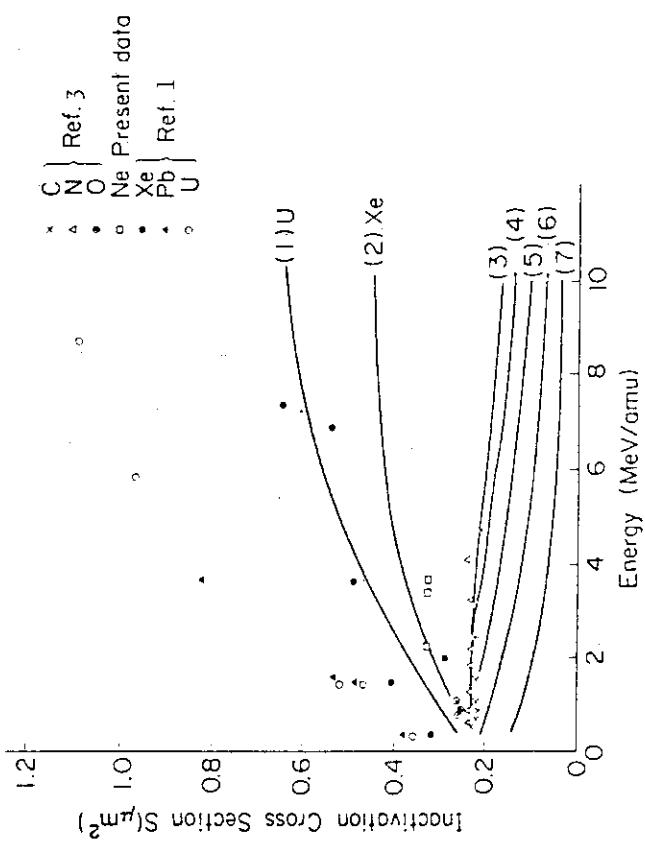


Fig. 2.5.6

Experimental and theoretical inactivation cross sections of Bacillus subtilis.
1)-7: Theoretical curves from Eqs. (12), (12') & (13), by using DKZ. E_δ was fixed to be 63.5 krad. Almost the same result was obtained for DKA. 1)-2) $E_{in} = 8-63.5 \text{ krad}$; 3) N ion, $E_{in} = 8 \text{ krad}$; 4) N ion, $E_{in} = 10 \text{ krad}$; 5) N ion, $E_{in} = 15 \text{ krad}$; 6) N ion, $E_{in} = 25 \text{ krad}$; 7) N ion, $E_{in} = 63.5 \text{ krad}$.

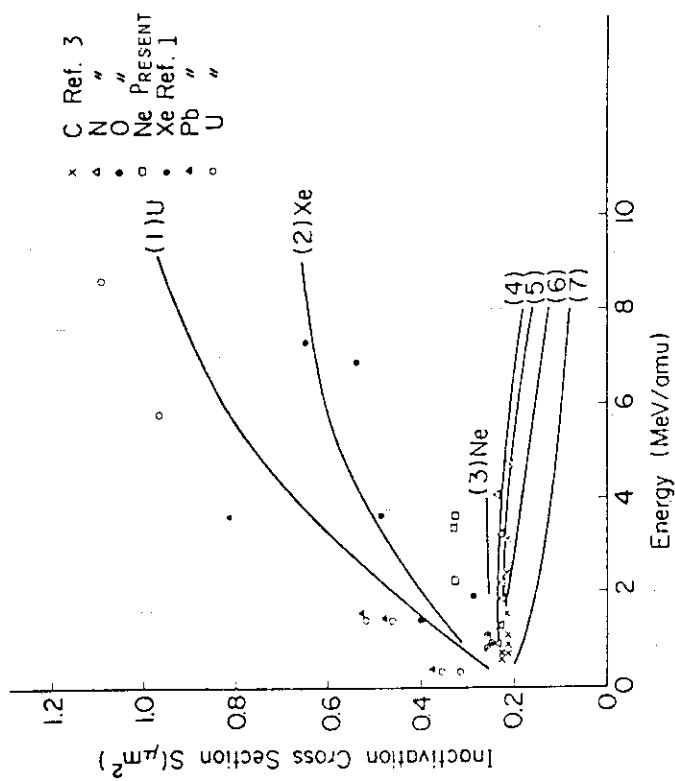


Fig. 2.5.7 Experimental and theoretical inactivation cross sections of *Bacillus subtilis*.
 1)-7): Theoretical curves from Eqs. (12), (12') & (13), by using DCS. (1) $E_\delta = 40$ krad, $E_{in} = 10\text{-}40$ krad; 2) N ion, $E_\delta = 40$ krad, $E_{in} = 10$ krad; 3) N ion, $E_\delta = 40$ krad, $E_{in} = 15$ krad; 4) N ion, $E_\delta = 40$ krad; 5) $E_\delta = 63.5$ krad, $E_{in} = 10\text{-}63.5$ krad; 6) N ion, $E_\delta = E_{in} = 63.5$ krad.

Fig. 2.5.7

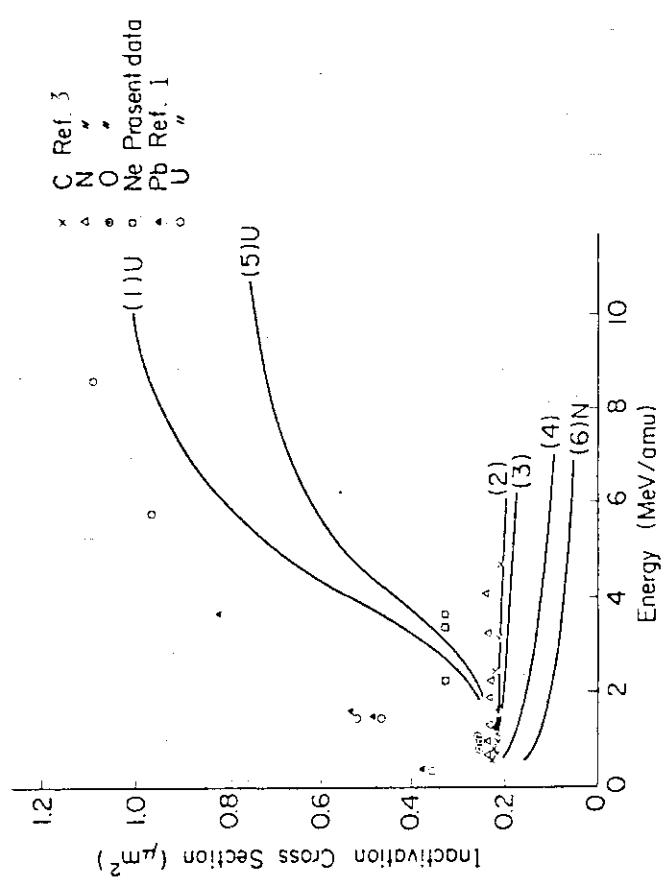


Fig. 2.5.8 Experimental and theoretical inactivation cross sections of *Bacillus subtilis*.
 1)-7): Theoretical curves from Eqs. (12), (12') & (13), by using DkZ. E_δ was fixed to be 30 krad. Almost the same result was obtained for DKA: 1)-2) $E_{in} = 8\text{-}30$ krad; 3) $E_{in} = 8$ krad; 4) N ion, $E_{in} = 8$ krad; 5) N ion, $E_{in} = 10$ krad; 6) N ion, $E_{in} = 15$ krad; 7) N ion, $E_{in} = 30$ krad.

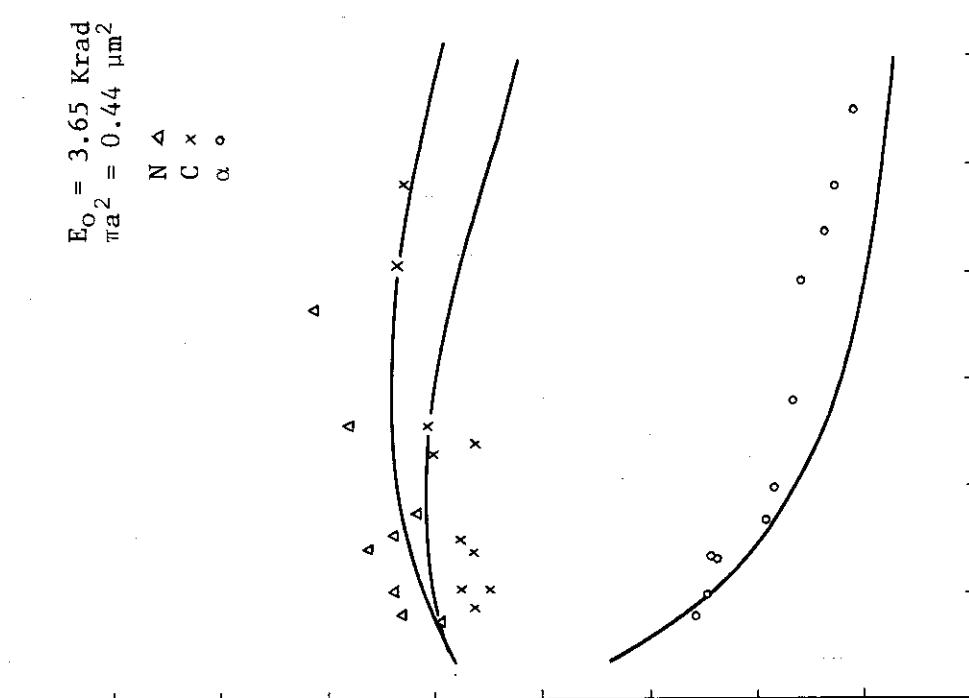


Fig. 2.5.9 Experimental and theoretical inactivation cross sections of *E. coli* B/r.
1)-3): Theoretical curves from equations (10) and (11) with $m = 1$. 1) N ion; 2) C ion; 3) He ion.

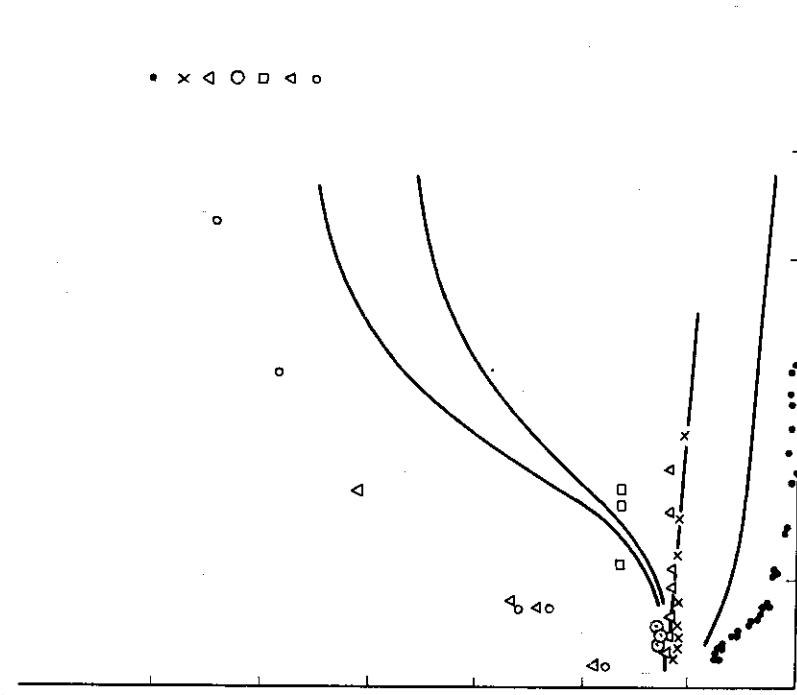


Fig. 2.5.10

Experimental and theoretical inactivation cross sections of *Bacillus subtilis*.
Solid lines are calculated for spherical target (cross sectional area $\pi a^2 = 0.25 \mu\text{m}^2$).
1) U ion, $E_{in} = 10-63.5 \text{ krad}$, $E_0 = 45 \text{ krad}$, 2) U ion, $E_{in} = E_0 = 63.5 \text{ krad}$,
3) N ion, $E_{in} = 12 \text{ krad}$, $E_0 = 45 \text{ krad}$,
4) N ion, $E_{in} = E_0 = 63.5 \text{ krad}$.

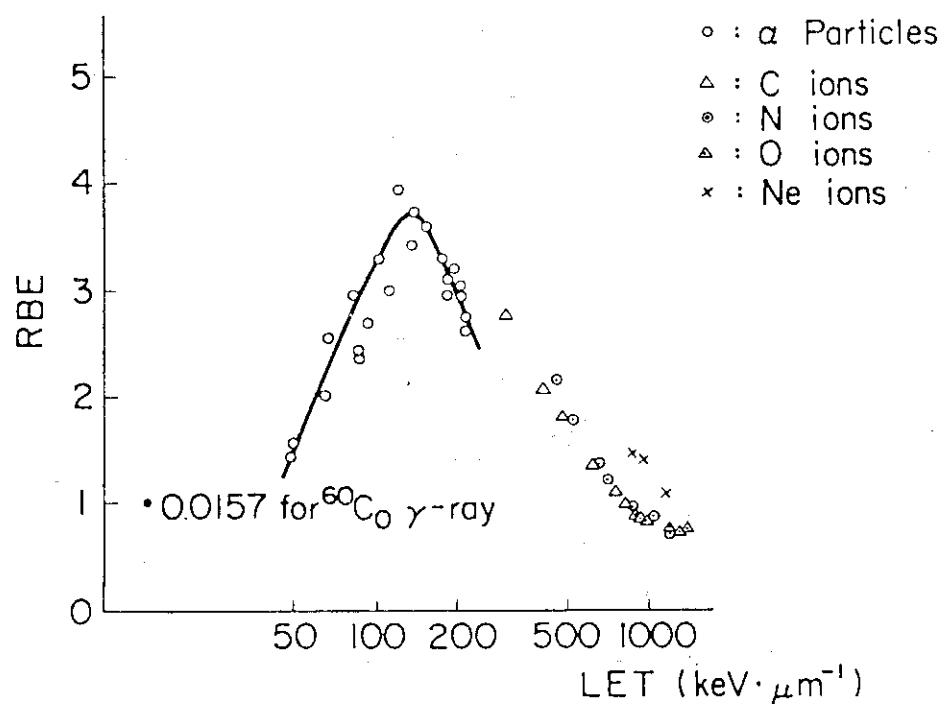


Fig. 2.5.11 Relation between LET_∞ and RBE
 $(1/D_{37}^\gamma = 0.0157 \text{ krad}^{-1})$.

2.6 放射線治療において要求される線量測定の精度と それに影響する原子・分子・原子核データ

癌研究所 尾 内 能 夫

要 旨

正常組織の障害発生率及び腫瘍の制御率は、関連する組織の吸収線量に著しく依存することから、患者への線量投与は精密さで±2%以上、全不確定度で±5%以下が要求されている。患者に線量投与されるまでの過程とその各過程において不確定度に影響する因子について概説し、X線、高エネルギー電子線及び高速中性子線治療における出力線量評価法とそれに必要な物理学的パラメータについて解析した。

2.6.1 まえがき

放射線治療においては、病巣の位置と拡がり及び種類などに応じて、病巣領域（標的容積、target volume という）に十分な線量を与え、かつその周囲の放射線感受性の高い臓器（要注意臓器、organs at risk という）の線量をできるだけ小さくする物理的線量分布を計画する。更に生物学的因子特に時間的線量配分を考慮して、治療効果が最大となるような空間的及び時間的線量分布を決定する。放射線生物学及び臨床的研究によれば、正常組織の障害発生率と腫瘍の制御率は、関連する組織の吸収線量に著しく依存することが分っている。このことから、患者への線量投与の精度が問題となる。

ここでは、線量投与の精度を上げなくてはならない理由ならびに線量投与過程とその各段階において線量精度に影響する因子について簡単に述べた上で、X線、電子線及び速中性子線治療における絶対線量の評価法とそれに関係する物理学的パラメータならびにその不確定度について概説する。

2.6.2 標的容積と線量投与の精度を上げなくてはならない理由及び要求される精度

放射線治療成績は高エネルギーX線装置の開発普及によって著しく向上してきたが、1977年発表の米国のデータでは、Table 2.6.1 に示すように、癌制御失敗例のうち30%から85%が局所、制御に失敗している¹⁾。その原因が本質的のものか、単なる線量不足かは明らかでないが、ある種の癌は腫瘍線量を10%下げるとき、癌の制御率が70%から10%に下がってしまうことが分かっている²⁾。（Fig.2.6.1）。そして、腫瘍制御率の線量依存性は大きな腫瘍ほど急峻である³⁾（Fig.2.6.2）。

又、正常組織の障害も線量に依存し（Fig.2.6.2）、照射容積が大きくなるほど耐容線量が小さくなる。照射容積を小さくするためには、コンピュータ断層装置（CT）などを用いて標的容積を正確に把握し、照射法を工夫して限局した線量分布を作成する必要がある。そうすることによって、投与線量を増大できるので、今まで失敗していた癌を制御できる可能性がある。又、熟練した治療医によれば、5%の線量の相違を臨床的に区別できるという。以上のよ

うなことから、ICRU（国際放射線単位測定委員会）では、患者への投与線量は精密さで±2%以上、全不確定度で±5%以下にする必要があるとしている³⁾。又、米国の放射線腫瘍研究委員会では、装置の出力線量を±2.5%，標的線量の計算を±3%，実際の標的線量を±5%の精度以内にすることを要求している⁴⁾。

2.6.3 線量投与の過程と不確定度

放射線治療には、体外から放射線を照射する外部照射と、腔内あるいは組織内に密封小線源を設置して照射する内部照射（密封小線源治療あるいはbrachytherapyという）がある。それらの照射法について、患者に対する線量投与に至るまでの線量測定の過程をFig.2.6.3及びFig.2.6.4に示す。これらの各段階において線量評価にある不確定度が導入される。X, γ線の外部照射についてはその不確定度が推定されている³⁾。それについて簡単に述べる。

放射線治療では、人体と放射線的に等価なファントムを用いて線量測定を行い、そのデータを基本にして患者についての線量評価をする。不確定度はファントムへの線量投与の段階で起こるものと患者への照射の段階で起こるものがある。

2.6.3.1 ファントムへの線量投与の不確定度

絶対線量はその国の国家标准との比較で決定されているが、国家标准のない線質については、理論的あるいは実験的に決められた物理学的パラメータを用いて決定されている。これについては後で述べる。

わが国では、放射線治療に用いられている線量計は、電総研とトレーサビリティのある放医研の二次標準で校正した日本医学放射線学会医療用線量標準センター（全国に14個所）の標準線量計で校正されている。各施設では、その線量計を用いて照射装置の出力を測定し、照射装置に装備されているモニタ線量計を校正する。出力はファントム内のある深さで測定し、各施設で予め測定してある深部線量表又は同じ線量のX線について他の施設で測定した深部線量表を用いて、基準深での出力を求める。これらの各段階での不確定度が累積されて最終的な不確定度となるが、Loevinger³⁾の評価では、非常によく線量管理を行っている施設で2.5%，一般的な施設で5%程度である。

2.6.3.2 患者への照射の段階で起る不確定度

患者に関係して起る不確定度は、(1)ファントムで得られたデータを患者に適用するために起るもので、患者の特性（大きさの相違、表面の凹凸、肺、骨などの不均質性）によるもの、(2)治療計画の段階で、患者の輪郭、臓器の解剖学的配置などを誤って取得することによるもの、(3)患者に照射を始めてから、計画時と体位や輪郭などが変動することによるものの3種に大別できる。これらの原因による不確定度はどの程度なのか明らかでない場合が多い。

照射の段階では、この他に人的ミスに基づく不確定度がある。線量計算、タイマ又は照射線量のセット、照射野・架台の角度などの装置のパラメータのセット、ビームの位置決めなどの誤りによる線量誤差がそれで、これらのうちでビームの位置決めの誤りが最も多い。

2.6.4 放射線治療における出力線量の評価法とその精度に影響する物理学的パラメータ

これまで述べたように、放射線治療では治療過程の各段階で不確定度が導入されるが、そのうちでも患者に関する因子が最も大きいので、物理学的パラメータなど問題とならないのではないかと考えがちである。しかし最近の治療装置は機械的精度がよくなってきたし、線量計算もCT画像を用いてコンピュータで実施するようになって、線量投与の精度は向上してきた。そのため、線量測定に関する物理学的パラメータの見直しが必要となってきた。

密封小線源、X・ γ 線、電子線及び速中性子線による治療における出力線量の評価法とその精度に影響する原子分子及び核データについて述べる。

2.6.4.1 密封小線源治療における吸収線量

わが国では、 ^{226}Ra , ^{60}Co , ^{137}Cs , ^{192}Ir などが1時装着 γ 線源として、 ^{198}Au , ^{125}I が永久刺入 γ 線源として使用されている。

刺入時の放射能が A_0 (mCi)である点線源から r (cm)離れた点の組織の吸収線量 D (Gy)は、 t 時間後では

$$D = 0.01 X \cdot f = 0.01 \frac{f}{r^2} \int_0^t \Gamma_\delta A_0 e^{-0.693 t / T} dt \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

X : 照射線量(R)

f : R-rad 換算係数で、空气中で1イオン対を作るのに必要なエネルギー $W = 33.85 \text{ eV}/\text{イオン対}$ とすると⁵⁾、 $f = 0.873 (\mu_{\text{en}}/\rho)_{\text{tissue}} / (\mu_{\text{en}}/\rho)_{\text{air}}$ (2)

Γ_δ : 照射線量率定数($\text{R cm}^2 \text{h}^{-1} \text{mCi}^{-1}$)

$$\Gamma_\delta = \sum_i P_i \Gamma_i (h\nu_i), \quad \dots \dots \dots \quad (3)$$

$$\Gamma_i = 194.5 (\mu_{\text{en}}/\rho)_{\text{air}} \cdot h\nu_i \quad \dots \dots \dots \quad (4)$$

$h\nu_i$ は γ 線のエネルギー(MeV), μ_{en}/ρ は質量エネルギー吸収係数である。従って、線量計算には、各線源の放射能、半減期、放出 γ 線(又はX線)のエネルギーと数、空気及び組織の質量エネルギー吸収係数が必要である。実際には放射能 A_0 は分からなくても、1cmの距離における照射線量率 $\Gamma_\delta A_0$ が測定してあればよい。

線量は筋肉に対する吸収線量で表示する。Table 2.6.2に各種 γ 線源の筋肉に対する f を示す。

2.6.4.2 外部照射X・ γ 線の吸収線量

わが国では ^{60}Co γ 線及び4から10MV程度の高エネルギーX線が主として用いられているが、400kV以下のX線も生物学的研究には欠かせない。

2.6.4.2.1 400kV以下のX線

400kV以下のX線については、電総研に照射線量の国家標準があるから、使用するX線の線質について照射線量で校正してある電離箱で測定すればよい。

150kVから300kVのX線(HVL 0.5mmCuから4mmCu)については、水中の校正点 d (5cm)にその線質のX線について照射線量(R単位)で校正した電離箱の中心をあわせ、X線を照射したときの読みをMとすると、電離箱がないときの深さ d における水の吸収線量 D_{water} (Gy)

は

$$D_{\text{water}} = 0.01 M_{x,\lambda} f$$

M : 大気補正, イオン再結合補正を施した値

$N_{x,\lambda}$: 電離箱のその線質の X 線に対する照射線量校正定数

f : R-rad 換算係数で, X 線の線質によって変る。Table 2.6.2 の値を用いる。

線量計が空気カーマ (単位 Gy) で校正してある場合には, その校正定数を $N_{k,\lambda}$ とすると

$$D_{\text{water}} = 1.145 M_{k,\lambda} f$$

40 kV から 150 kV の X 線 (HVL 0.5 mmAl から 8 mmAl) の場合には, 線源表面間距離と等しい距離の空气中において測定し, 表面位置の水の吸収線量 D_{water} (Gy) を次式より求める。

$$D_{\text{water}} = 0.01 M_{x,\lambda} f B$$

又は $D_{\text{water}} = 1.145 M_{k,\lambda} f B$

B : 背後散乱係数で, ファントムがないときの空气中におけるよみ値に対するファントムがあるときの表面におけるよみ値の比をいう。線源から電離箱までの距離はファントムがある場合もない場合等しくし, 照射野の大きさも同一とする。

散後散乱係数は X 線の線質と照射野の大きさによって異なる。

2.6.4.2.2 高エネルギー X 線

高エネルギー X 線の出力も水の吸収線量で評価する。水中における校正点の深さは, X 線エネルギーによって変る。後で述べる電子線の場合も同様である。

水中の校正点 d に, $^{60}\text{Co}\gamma$ 線の照射線量で校正した電離箱の中心を設置し, X 線を照射したときのよみを M とすると, 電離箱がないときの深さ d における水の吸収線量 D_{water} (Gy) は

$$D_{\text{water}} = 0.01 M_{x,c} C_\lambda \quad \dots \quad (9)$$

M : 大気補正, イオン再結合補正を施した値

$N_{x,c}$: 電離箱の $^{60}\text{Co}\gamma$ 線に対する照射線量校正定数で, 空気中において R 単位で校正

C_λ : 吸収線量への変換係数で光子エネルギーの関数電離箱を $^{60}\text{Co}\gamma$ 線に対する空気カーマ (単位 Gy) で校正した場合には, その校正定数を $N_{k,c}$ とすると

$$D_{\text{water}} = 1.140 M_{k,c} C_\lambda \quad \dots \quad (10)$$

$^{60}\text{Co}\gamma$ 線の場合には, 空気中で発生した 2 次電子の 0.4% が制御放射となるので⁶⁾, (8) 式の係数 1.145 が 1.140 となる。

吸収線量への変換係数 C_λ は, 川島によれば

$$C_\lambda \equiv A_w \cdot A_c \left(\frac{W_{\text{air}}}{e} \right) \cdot \left(\frac{S_{\text{water}}}{S_{\text{air}}} \right)_\lambda \cdot \left[\frac{(\mu_{\text{en}}/\rho)_{\text{water}}}{(\mu_{\text{en}}/\rho)_{\text{wall}}} \right]_\lambda \cdot P_\lambda \quad \dots \quad (11)$$

e : 電子の電荷で, $W_{\text{air}}/e = 0.873 \text{ rad}/R$

$$= 33.85 \text{ J/C}$$

s : 質量阻止能

μ_{en}/ρ : 質量エネルギー吸収係数

P_λ : 電離箱をおいたことによる全擾乱補正係数。置換係数とフルエンスに対する擾乱係数を

含む : 空洞サイズに依存。グラフアイト 0.97 ~ 0.99, 水 0.99 ~ 0.995⁶⁾

A_w , A_c は ^{60}Co γ 線に対する値で

$$A_w \equiv \left[\frac{(\mu_{\text{en}}/\rho)_{\text{wall}}}{(\mu_{\text{en}}/\rho)_{\text{air}}} \right]_c \left(\frac{S_{\text{wall}}}{S_{\text{air}}} \right)_c \quad (13)$$

$$A_c \equiv \beta_{\text{wall}} \cdot A_{\text{wall}} / P_c \quad (13)$$

$$\beta : D / K^{\text{col}} \quad (14)$$

D : 吸収線量

K : カーマ, $K^{\text{col}} = K(1 - g)$

A_{wall} : 電離箱の壁厚を平衡厚としたときの壁物質によるX線の減弱及び散乱に対する補正係数

^{60}Co γ 線の場合 $\beta = 1.005$, $A_{\text{wall}} = 0.98 \sim 0.99$

P_c : 電離箱内に空気の空洞をもちこんだことに対する補正係数, 普通 $P_c = 1$

$A_w \cdot A_c$ はビルドアップキャップの材質と厚さに依存し, P_c は空洞サイズに依存する。

(7)又は(8)式と(9)式より, 高エネルギーX線の吸収線量評価の精度は, 電離箱の ^{60}Co γ 線に対する校正定数と C_λ の精度に依存する。 C_λ は空気に対する水及び電離箱の壁物質の質量阻止能比, 壁物質と空気の質量エネルギー吸収係数の比及びWに依存する。

英国の物理学協会(HPA)では, グラファイト電離箱について Berger と Selzer (1982)⁷⁾ による新しい質量阻止能のデータと Hubbell (1977)⁸⁾ による質量エネルギー吸収係数のデータを用いて C_λ を計算し直している⁹⁾。その結果を Table 2.6.3 に示す。

2.6.4.3 高エネルギー電子線の吸収線量

わが国では直線加速器, ベータトロンあるいはマイクロトロンからの6~35 MeV程度の電子線が治療に用いられる。

高エネルギーX線の場合と同様に, ^{60}Co γ 線により照射線量又は空気カーマで校正した電離箱の実効中心を水中の校正点dに設置し, 電子線を照射したときの読みをMとすると, 電離箱がないときの深さdにおける水の吸収線量 D_{water} (Gy) は

$$D_{\text{water}} = 0.01 MN_{x,c} C_E P_E \quad (15)$$

$$\text{又は } D_{\text{water}} = 1.140 MN_{k,c} C_E P_E \quad (16)$$

である。

C_E : 電子線の場合の吸収線量への変換係数で, 電子線の入射エネルギーと深さによって変る。

$$C_E \equiv A_w \cdot A_c \cdot \left(\frac{W_{\text{air}}}{e} \right) \cdot \left(\frac{S_{\text{water}}}{S_{\text{air}}} \right)_E \quad (17)$$

P_E : 電離箱を置いたことによる擾乱補正係数

高エネルギーX線の場合には, C_λ に擾乱補正係数 P_λ を含んでいたが, 電子線の場合には C_E に擾乱補正係数は含まれていない。その代り電離箱の実効中心を幾何学的中心から変位させる半径・変位補正の形をとっている。Table 2.6.4 に C_E を示す¹⁰⁾。

電子線の吸収線量評価の精度は, ^{60}Co γ 線による校正定数と C_E の精度に依存し, C_E は空気に対する水の質量阻止能比及びWの関数である。

2. 6. 4. 4 速中性子線の吸収線量

わが国では放医研と医科研において、サイクロトロンを用いた $30\text{ MeV d} + \text{Be}$ 及び $14\text{ MeV d} + \text{Be}$ 中性子が治療に用いられている。

速中性子線場には必ず γ 線が混在していて、しかも γ 線と速中性子線とでは生物効果比が異なるので、 γ 線と速中性子線の吸収線量を別々に評価する必要がある。そのために、中性子線と γ 線に同程度の感度を有する T形測定器（記号に添字 T をつける。例えば組織等価電離箱）と中性子に低感度の U形測定器（記号に添字 U をつける。例えば壁材料をグラファイトを塗布したテフロン、空洞気体を CO_2 としたテフロン- CO_2 電離箱、壁材料をアルミニウム、空洞気体をアルゴン 90%、メタン 10%とした Al-Ar 電離箱）を一対として用いる。両者を同じ混在場においていたときのレスポンスをそれぞれ M_T 及び M_U 、両者に校正 γ 線を組織吸収線量で 1 Gy 照射したときのレスポンスをそれぞれ M_{GT} 及び M_{GU} とすると、

$$R_T = M_T / M_{CT} = k_T D_N + h_T D_G \quad \dots \dots \dots \quad (18)$$

$$R_H = M_H / M_{CH} = k_H D_N + h_H D_O \quad \dots \dots \dots \quad (19)$$

D_N : 中性子の組織における吸収線量 (Gy)

D_G：光子の組織における吸収線量（Gy）

k_T , k_U : 各測定器の校正 τ 線についての感度に対する混在場の中性子についての感度の比

h_T , h_U : 各測定器の校正 γ 線についての感度に対する混在場の光子についての感度の比

(18), (19)式を解いて

$$D_N = \frac{h_U R_T - h_T R_U}{h_U R_T + h_T R_U} \quad \dots \dots \dots \quad (20)$$

$$D_G = \frac{k_T R_U - k_U R_T}{h_{UkT} - h_{TkU}} \quad \dots \dots \dots \quad (21)$$

k_T , h_T , k_U , h_U が分かれればこの(2)式を用いて中性子と光子の吸収線量を別々に評価できる。しかしある媒質中の吸収線量を評価する場合には、高エネルギーX線あるいは電子線の場合と同様に、媒質が電離箱と置き換わることに対する補正が必要である。

Broerse ら¹¹⁾は、組織等価電離箱による混在場における ICRU 筋肉組織¹²⁾の吸収線量を次式で評価している。

$$D_N + D_G = N_C \cdot (\pi k_A)_C \cdot (f_t)_C \cdot d_T \cdot k_T^{-1} \cdot \frac{1}{1+\delta} \cdot R_T \cdot (\pi k_R)_T \dots \dots \dots \quad (22)$$

添字 N は中性子、添字 G は光子、添字 C は校正 γ 線、添字 T は組織等価電離箱を意味する。

$$k_T^{-1} = \frac{r_N}{(S_{m,g})_c} \cdot \frac{W_N}{W_C} \cdot \frac{(K_t/K_m)_N}{[(\mu_{en}/\rho)_t / (\mu_{en}/\rho)_m]_c} \quad \dots \quad (23)$$

添室tはICRII筋肉組織、添室mは組織等価重難箱(A=150)の壁材料を意味する。

$N_{C\gamma}$: 校正 γ 線に対する照射線量校正定数

πk_A : 空気中で測定したときの電離箱の大きさ, ビルドアップキャップ, システムなど影響に対する全補正係数

f : 組織に対する R_{-rad} 摘算係数

d_{m} : 置換補正係数

r_N : 気体の吸収線量を壁の吸収線量に換算する係数

$S_{m,g}$: 電離箱内の気体に対する壁物質の質量阻止能比

δ : 混在場において光子と中性子に対する電離箱の感度の差を補正するための値。

πk_R : よみ Rに対する大気補正

$w, k, \mu_{en}/\rho$ は高エネルギーX線の場合と同じである。

速中性子線の吸収線量評価の不確定度は、校正 γ 線である $^{60}\text{Co} \gamma$ 線に対する照射線量校正定数、W, $\mu_{en}/\rho S_{m,g}$ の不確定度の他に、中性子線に対するW及びカーマ比の不確定度に依存する。

2.6.5 物理学的パラメータと線量評価の不確定度

2.6.5.1 高エネルギーX線

ICRU (1969)¹³⁾ で C_λ を用いた水の吸収線量評価の不確定度を解析している。その結果を参考にして、各物理学的パラメータの不確定度を見積ったのが Table 2.6.5 である。質量阻止能比の不確定度が最も大きい。Fig. 2.6.5 に出典による質量阻止能比の相違を示す¹⁴⁾。Fig. 2.6.5 の 1 から 6 までは $^{60}\text{Co} \gamma$ 線に対するもので、自乗和の平方根をとって全不確定度を表わすと 2.3 % となる。7 と 8 は 30MV X 線に対するもので、全不確定度は 3.3 % である。HPA では 1983 年に新しい C_λ 値を提案したが、それを用いて得られる線量評価の不確定度は、検正放射線で 2%, 35 MV X 線で 3.5 % としている⁹⁾。

2.6.5.2 高エネルギー電子線

高エネルギーX線と殆んど同じ物理学的パラメータを用いているので、吸収線量評価の不確定度も高エネルギーX線と同程度である。しかし、実際のビームについては、電子線のスペクトルの評価がX線よりよきないので、線量評価の精度はX線の方がよい。

2.6.5.3 速中性子線

Table 2.6.6 に Broerse ら¹¹⁾ の見積った各物理学的パラメータの不確定度を示す。W と カーマ比の不確定度が最も大きい。Table 2.6.7 に各種粒子線の各種気体に対するWの値を示す。中性子に対するWの値の精度は電子に対するものよりよくない。

カーマ係数は ICRU Report 26¹²⁾ に 30MeV まで与えられている。Fig. 2.6.6 にその一部を図示した。Fig. 2.6.7 はそのデータを基にして計算したカーマ比で、tissue approximation を 1 とした。電離箱に用いられている組織等価プラスチック A-150 は、組織にくらべて C が多く、O が少ないので、高エネルギー中性子に対して組織との相違が大きい。

30MeV 以上のエネルギーの中性子に対するカーマ係数は、報告者によってその値が著しく異なるので¹⁶⁾、Table 2.6.6 のカーマ比も高エネルギー中性子に対して不確定度が大きくなっている。

2.6.6 むすび

放射線治療においては、患者への線量投与は精密さで±2%以上、全不確定度で±5%以下が要求されているが、患者への線量投与に至るまでに各段階があって、全過程についての不確定度を5%以下にすることは容易でないことを述べた。

線量投与までの初期の段階である出力線量の評価では、いずれの放射線についても、 ^{60}Co γ 線の照射線量又は空気カーマで校正した電離箱を用いるので、これの校正精度が重要な因子となる。

X線の出力線量評価の不確定度は、 ^{60}Co γ 線で2%，35MVX線で3.5%以下であり、物理学的パラメータのうちで最も大きい不確定度は質量阻止能である。電子線もX線と同程度であるが、校正深におけるスペクトルの評価がX線よりよくないので、線量評価の精度もX線より悪い。

20MeV以下のエネルギーの中性子線の出力線量評価の全不確定度は±5%であり、物理学的パラメータのうちで、Wとカーマ比の不確定度が最も大きい。20MeV以上のエネルギーの中性子に対するカーマ比の精度はよくないが、将来、60MeV以上の陽子を用いた(P+Be)中性子線治療が期待されているので、この領域の中性子線のカーマ比の精度をあげる必要がある。

又、低エネルギー γ 線源を用いた密封小線源治療及びCより重い重イオン治療が期待されているので、これらの線源あるいは装置の開発が必要であると同時に、これらの放射線の線量測定に必要な原子、分子及び核データの収集が重要となる。

参考文献

- 1) Perez, C.A. : The critical need for accurate treatment planning and quality control in radiation therapy. *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 2, 815-818, 1977
- 2) Herring, D.F. and Compton, D.M.J. : The degree of precision required in the radiation dose delivered in cancer radiotherapy. *Brit. J. Radiol. Special Report No.5*, 51-58, 1971
- 3) ICRU Report 24 : Determination of observed dose in a patient irradiated by beams of x or gamma rays in radiotherapy procedures. 1976
- 4) Stewart, J.R., Hicks, J.A., Boone, M.L.M. and Simpson, L.D. : Computed tomography in radiation therapy. *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 4, 313-324, 1978
- 5) ICRU Report 31 : Average energy required to produce an ion pair. 1979
- 6) NACP. Procedures in external radiation therapy dosimetry with electron and photon beams with maximum energies between 1 and 50 MeV. *Acta Radiol. Oncol.* 19, 58-79, 1980
- 7) Berger, M.J. and Seltzer, S.M. : Stopping powers and ranges of electrons and positrons. *NBSIR 82-2550*, NBS, 1982
- 8) Hubbel, J.H. : Photon mass attenuation and mass energy-absorption coefficients for H, C, N, O, Ar and seven mixtures from 0.1 keV to 20 MeV. *Radiat. Res.* 70, 58-81, 1977
- 9) HPA : Revised code of practice for the dosimetry of 2 to 25 MV x-ray, and of caesium-137 and cobalt-60 gamma-ray beams. *Phys. Med. Biol.* 28, 1097-1104, 1983
- 10) ICRU Report 21 : Radiation dosimetry : Electrons with initial energies between 1 and 50 MeV. 1972
- 11) Broerse, J.J. and Mijnheer, B.J. : Accuracy and precision of observed dose measurements for neutron therapy. *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 8, 2049-2056, 1982
- 12) ICRU Report 26 : Neutron dosimetry for biology and medicine. 1977
- 13) ICRU Report 14 : Radiation dosimetry : X rays and gamma rays with maximum photon energies between 0.6 and 50 MeV. 1969
- 14) 川島勝弘：私信
- 15) ICRU Report 30 : Quantitative concepts and dosimetry in radiobiology, 1979

- 16) Bewley, D.K. : Practical problems in neutron dosimetry. Int. J.
Radiat. Oncol. Biol. Phys. 8, 2057-2059, 1982

Table 2.6.1 米国における癌制御失敗例の分布 (Perez, 1977¹⁾)

	局所再発のみ	局所再発と遠隔転移	遠隔転移のみ
結腸（直腸）癌	35%	35%	30%
乳癌	10	25	65
肺癌	15	25	25
前立腺癌	15	65	20
子宮癌	10	50	30
口腔・咽頭・喉頭癌	40	45	15
膀胱癌	50	25	25
リンパ腫-骨髓腫	20	20	60
白血病	-	-	70

各種報告論文より抽出

Table 2.6.2 400kV以下X線の水及び各種γ線源の筋肉に対するR-rad換算係数

X線の半価層 (mmAl)	f(水)	核種	f(筋肉)*
0.5	0.89	²²⁶ Ra	0.961
1.0	0.88		
2.0	0.87	⁶⁰ Co	0.961
4.0	0.87		
6.0	0.88	¹³⁷ Cs	0.961
8.0	0.89		
		¹⁹⁸ Au	0.961
(mmCu)			
0.5	0.89	¹⁹² Ir	0.961
1.0	0.91		
1.5	0.93	¹²⁵ I	0.920
2.0	0.94		
3.0	0.95		
4.0	0.96		

* W=33.85 eV/イオン対

Table 2.6.3 各種X, γ 線に対するC_λ(HPA, 1983)⁹⁾

X・γ線の線質	C_{λ}	旧値(1969)	新値(1983)
セシウム-137	0.95	0.95 ₅	
2 MV	0.95	0.95 ₀	
コバルト-60	0.95	0.95 ₁	
4 MV	0.94	0.95 ₂	
6 MV	0.94	0.95 ₀	
8 MV	0.93	0.94 ₆	
10 MV	0.93	0.94 ₃	
12 MV	0.92	0.94 ₀	
14 MV	0.92	0.93 ₈	
16 MV	0.91	0.93 ₃	
18 MV	0.91	0.93 ₁	
20 MV	0.90	0.92 ₇	
25 MV	0.90	0.91 ₉	
30 MV	0.89	0.91 ₄	
35 MV	0.88	0.90 ₈	

Table 2. 6. 4 電子線のラド変換係数 C_E
(ICRU Report 21, 1972¹⁰⁾)

水中の深さ (cm)	電子の入射エネルギー E_0 (MeV)						
	5	10	15	20	25	30	35
1	0.922	0.877	0.843	0.823	0.808	0.795	0.784
2	0.893	0.858	0.835	0.819	0.806	0.795	0.786
3	0.915	0.871	0.848	0.830	0.816	0.804	0.794
4	0.947	0.886	0.859	0.840	0.824	0.812	0.801
5	0.963	0.901	0.871	0.847	0.831	0.819	0.809
6	0.933	0.885	0.856	0.839	0.825	0.815	0.806
7	0.965	0.902	0.867	0.846	0.832	0.821	0.812
8	0.941	0.882	0.854	0.839	0.827	0.816	0.808
9	0.959	0.898	0.865	0.847	0.832	0.820	0.814
10	0.926	0.917	0.878	0.856	0.840	0.827	0.819
11	0.946	0.890	0.866	0.848	0.834	0.823	
12	0.939	0.906	0.879	0.857	0.841	0.829	
13	0.926	0.890	0.867	0.848	0.835		
14	0.959	0.907	0.877	0.857	0.842		
15	0.933	0.924	0.890	0.866	0.849		
16	0.954	0.903	0.876	0.857			
17	0.929	0.919	0.887	0.864			
18	0.940	0.900	0.874				
19	0.936	0.915	0.883				
20	0.955	0.895					
21	0.943	0.908					
22	0.921	0.924					
23	0.945						
24	0.918						

Table 2.6.5 ^{60}Co γ 線の照射線量校正に基づく30MVX線の水中における吸収線量評価の不確定度

物理学的パラメータ	不確定度%
1. 線量計のよみ M	0.2
2. 校正定数 $N_{x,c}$ と大気補正	2.0
3. W の値	1.0
4. 質量エネルギー吸収係数の比 A_w	0.2
5. $\beta = D/K(1-g)$	0.1
6. A_{wall}	0.5
7. ^{60}Co γ と30MVXのBragg-Gray条件の不一致	1.0
8. 質量阻止能比, $(S_{m,g})_t/(S_{m,g})_c$	2.0
平不確定度 (自乗和の平方根)	3.3

Table 2.6.6 中性子線場における組織中の全吸収線量評価の不確定度 (Broerse ら¹¹⁾)

物理学的パラメータ	不確定度%
1. 組織等価電離箱のよみ R_T	0.2
2. 大気補正係数 $(\pi k_R)_T$	0.3
3. 置換補正係数 d_T	0.5
4. 校正定数・擾乱補正係数・ R -rad 換算係数 $N_c \cdot (\pi k_A)_c \cdot (f_t)_c$	1.2
5. W 値 W_N/W_C	4.0
6. 質量阻止能比 $r_N/(S_{m,g})_c$	2.0
7. カーマ比 $(K_t/K_m)_N$	2.6~9.7*
8. 質量エネルギー吸収係数の比 $[(\mu_{en}/\rho)_t/(\mu_{en}/\rho)_m]_c$	0.1
全不確定度 (自乗和の平方根)	5.4~10.8*

* Bewley (1980)によると、低い方の値は $d(16)$ +Be 中性子、
高い方の値は $P(66)$ +Be 中性子に対して適用される。

Table 2.6.7 各種気体に対する電子, α 粒子, 陽子および中性子の W (eV)
(ICRU Report 31, 1979⁵⁾)

粒 子	Ar	N ₂	CO ₂	空 気	組織等価 ガス
α 粒 子	26.4	36.4	34.2	35.1	31.0
陽 子	26.66	36.68	34.37	35.18	30.03
電 子	26.4±0.5	34.8±0.2	33.0±0.7	33.85±0.15	29.2*
中 性 子	—	—	—	35*	31±1.5

α : 5.3 MeV, p : 1.8 MeV, n : 1~14 MeV

* ICRU Report 30, 1979⁽⁵⁾

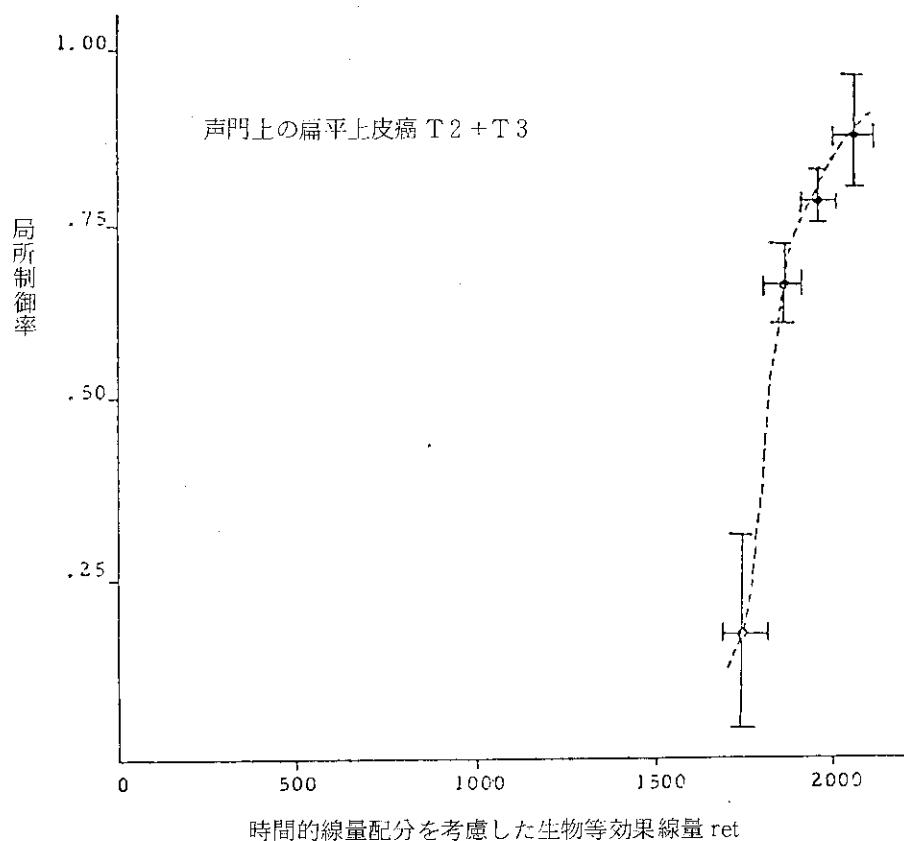


Fig. 2.6.1 声門上のT₂ + T₃期扁平上皮癌の局所制御と
生物等効果線量 retとの関係 (Herringら²⁾)

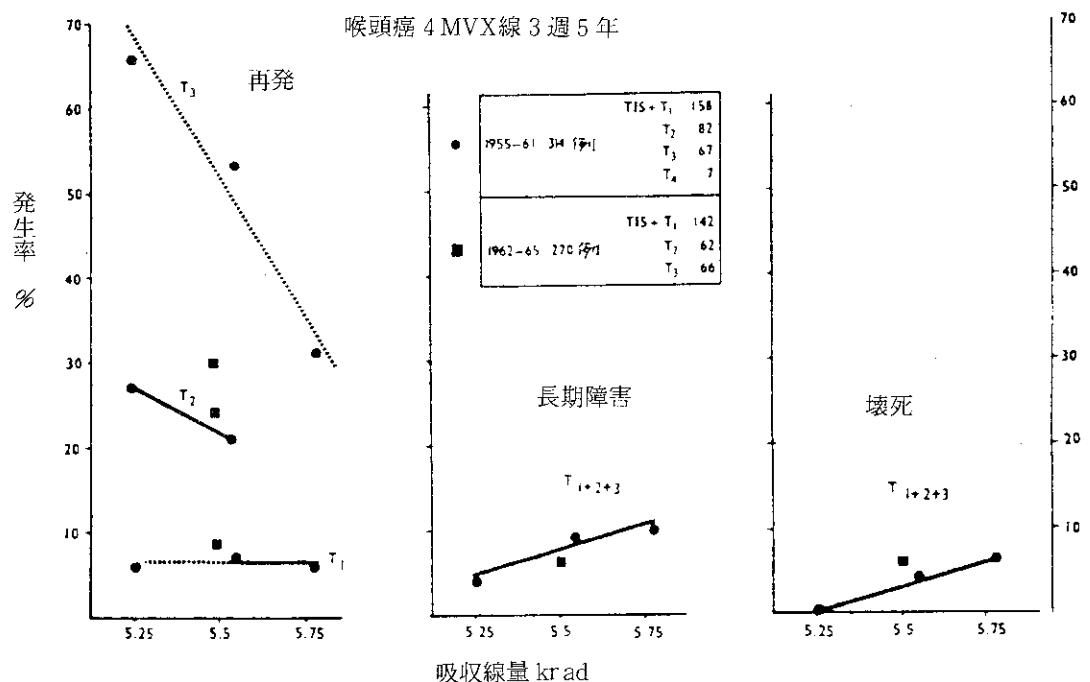


Fig. 2.6.2 喉頭癌の放射線治療における再発及び障害発生率と線量の関係
(Stewart ら, 1975³⁾)

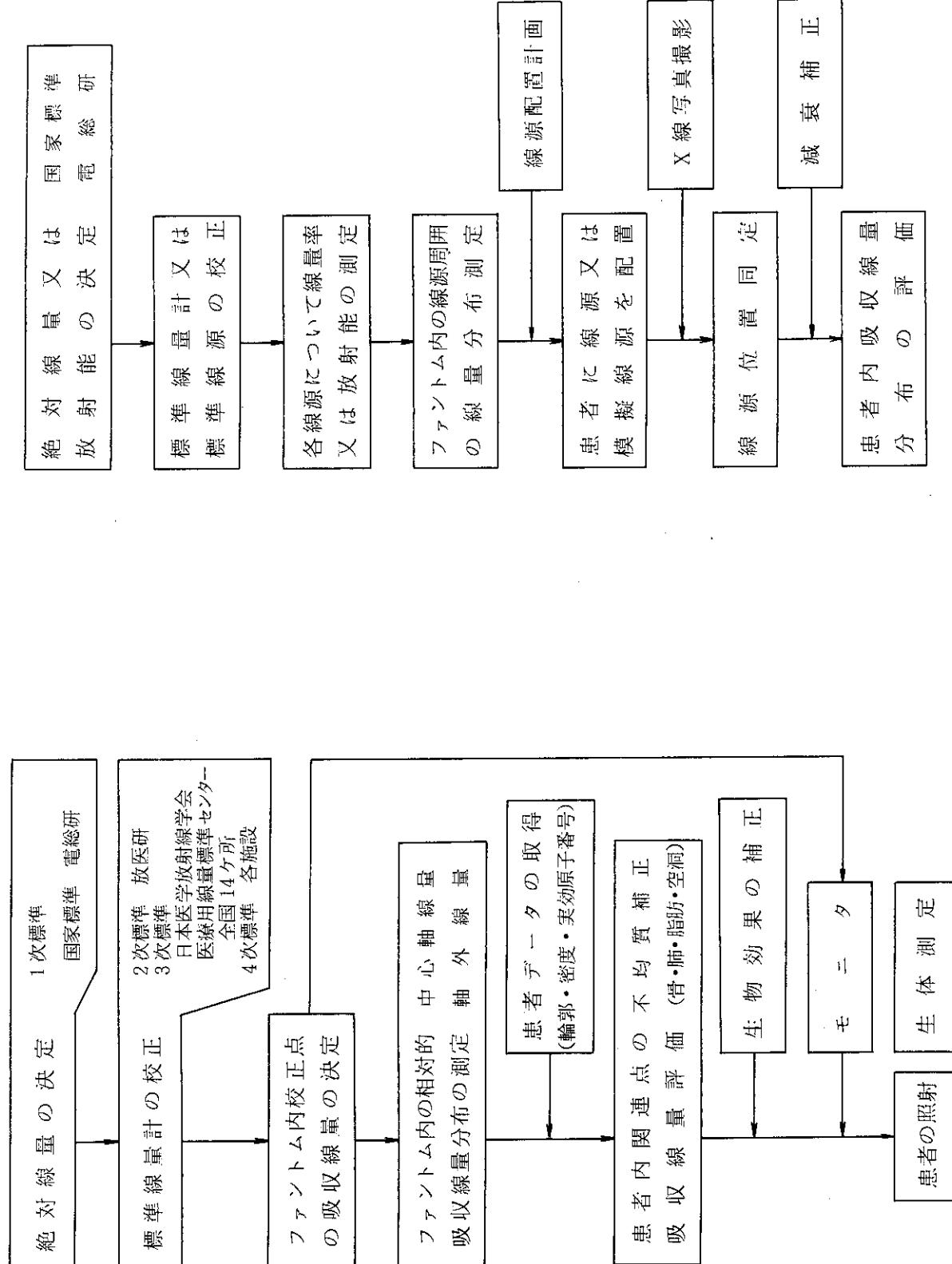


Fig. 2.6.4 密封小線源治療における線量測定

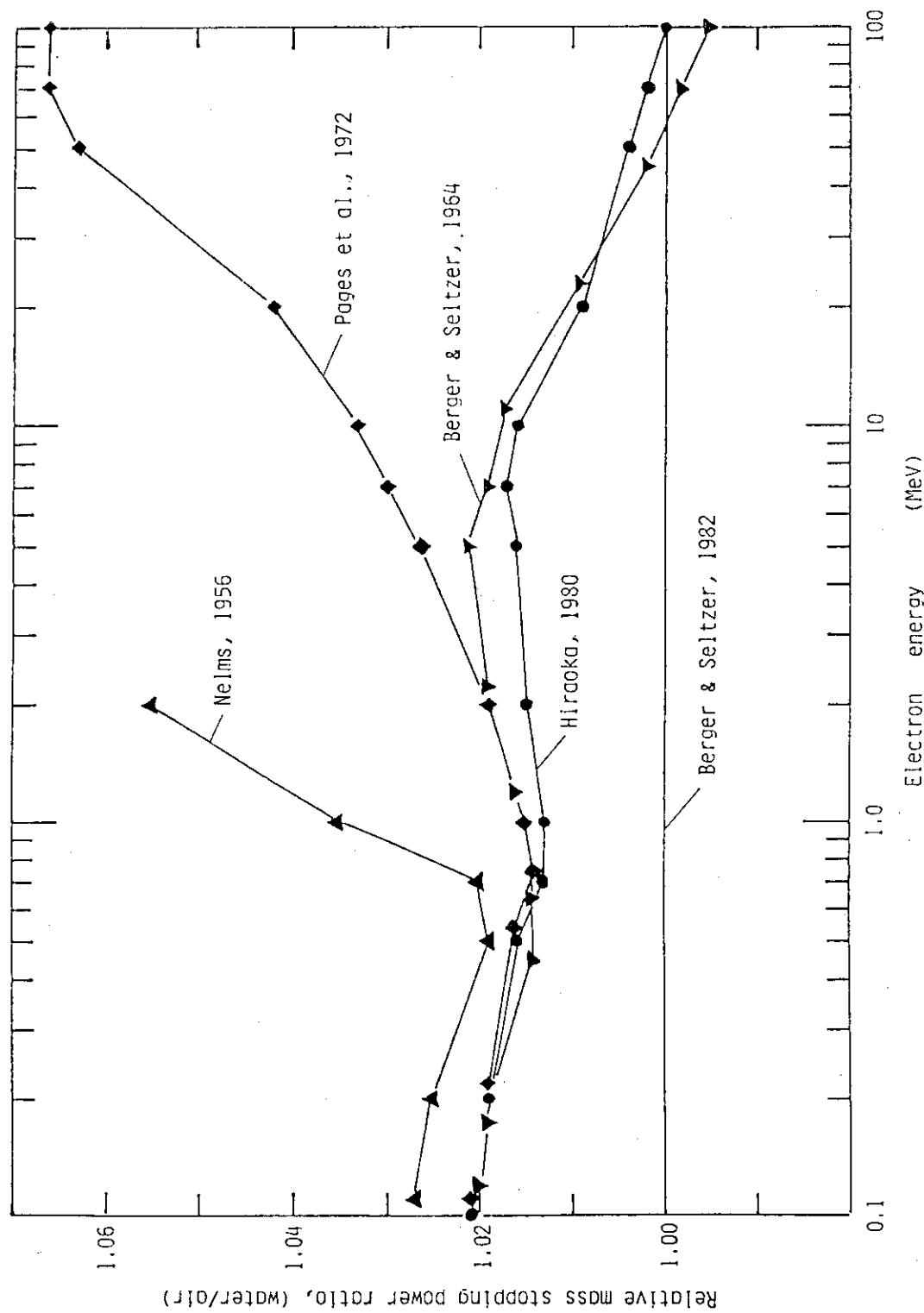
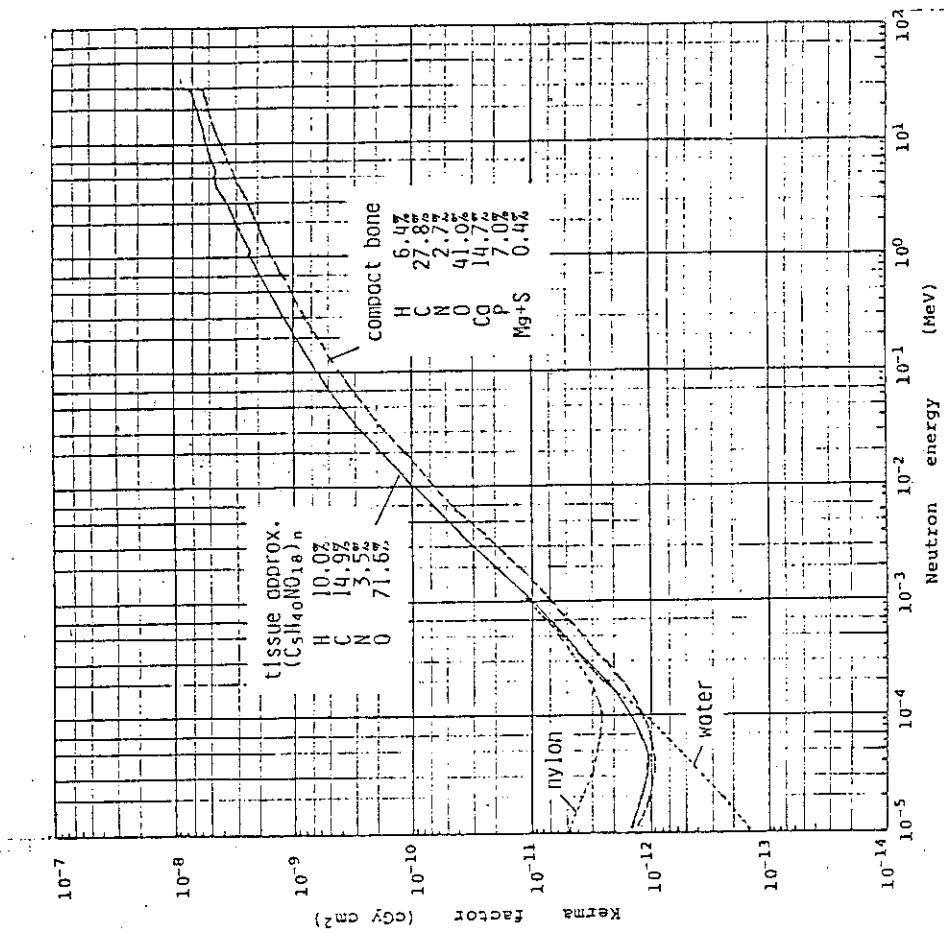
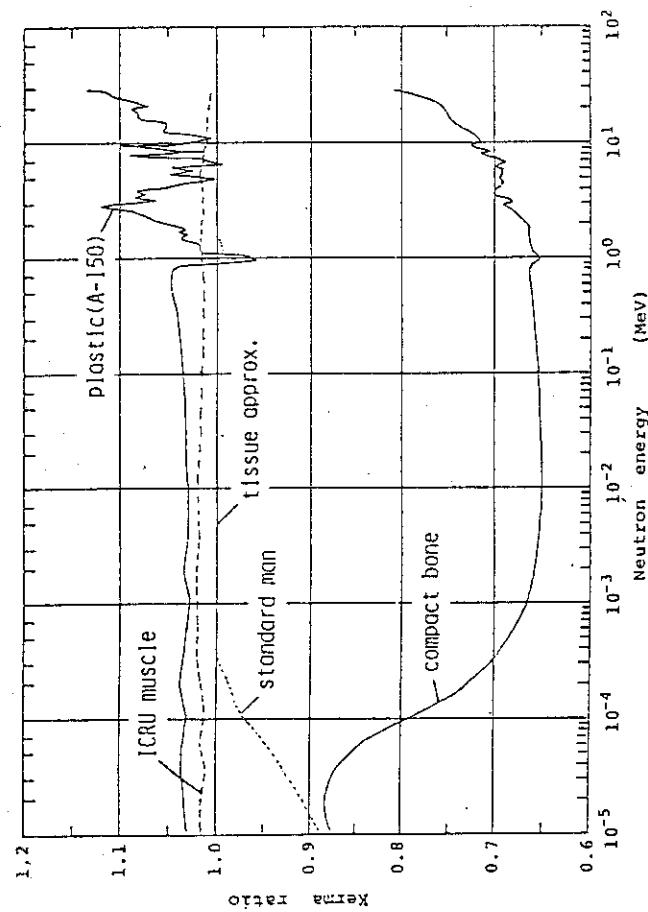


Fig. 2.6.5 Berger & Selfzer (1982)による質量阻止能比(水／空気)と他の著者による
質量阻止能比の比較(川島¹⁴)



— 77 —



3. 調査の概要

3.1 英国における医学生物学データ活動について

放医研 白貝 彰宏

biomedical physics の分野で必要な原子・原子核データソースの収集活動は UKNDC の下にある Biomedical Subcommitteeにおいて 1974 年から行なわれてきている。Fig. 3.1.1 に示すように UKNDC は INDC と密接な連携を保っている。Subcommittee は 1977 年にはしいデータの List を示すとともに、1979 年にそれまでの活動のまとめを報告¹⁾している。その後の活動についてはまだまとまった報告はなされていない²⁾ ようなので、ここでは 1979 年の報告の概要を述べ、主な引用文献を分野別に示すとともに、最後に UKNDC に報告された Request List を示すこととする。なお参考文献 1) に引用されている文献は全て the British Library Lending Division (Boston Spa, Wetherby, Yorkshire) で入手できる。

(イ) Radionuclide Decay Schemes

biomedical user 用としては次の 4 つが上げられる。

Dillmann, L.T.; von der Lage, F.C., 1975, Radionuclide Decay Schemes and Nuclear Parameters for Use in Radiation-Dose Estimation, NM/MIRD Pamphlet 10, (Society of Nuclear Medicine, 475 Park Avenue South, New York, NY 10016, U.S.A.).

Martin, M.J.; Blichert-Toft, P.H., 1970, Radioactive Atoms, Auger-Electrons, α , β , γ and X-Ray Data, Nucl. Data Table A8, Nos. 1 and 2.

Martin, M.J. (Ed.), 1976, Nuclear Decay Data for Selected Radionuclides, ORNL-5114 (Oak Ridge National Laboratory, Tennessee, U.S.A.).

ICRP, 1980-1982, Limits for Intakes of Radionuclides by Workers, Publication 30 (Oxford: Pergamon)

次のものはヨーロッパでの要求に応じたものである。英国では UKNDC の subcommittee で Legrand, J.; Perolat, J.; Lagoutine, F.; Le Gallic, Y., 1975, Table des Radionuclides II, Laboratoire de Metrologie des Rayonnements Ionisants, (LMRI), Saclay, France).

ある the Chemical Nuclear Data Committee で取り組んでいるが、まだ ORNL の核データプロジェクトのようなデータソースに寄与するというよりもむしろそれを利用しているというのが現状であろう。ORNL の Nuclear Data Group の「評価済み核構造データファイル (ENSDF)」を使っている。

(ロ) Neutron Activation Analysis

中性子線源の多様性から、生物学的に興味のある元素に対する断面積データも広いエネルギー領域にわたって必要とされる。

Erdtmann, G; Soyka, W., 1973, Die γ -Linien der Radionuclide, 2nd edn, Jul-1003-AC (Kernforschungsanlage Julich, 517 Julich 1, F.R.G).
Erdtmann, G; Soyka, W., 1974, A Table of the γ Rays of All Known Radionuclides, Nucl. Instrm. Meth. 121, 197-201 (Summary of Previous Items).

IAEA, 1974, Handbook of Nuclear Activation Cross Sections, Technical Reports Series No. 156, STI/DOC/156 (Vienna: IAEA).

Mughabghab, S.F.; Garber, D.I., 1973, Neutron Cross Sections: Resonance Parameter, BNL-325 (3rd edition) vol.1 (Brookhaven National Laboratory, Upton, Long Island, NY 11973, U.S.A).

(iv) Excitation Functions

大量な原著がある。McGowan らの一連の報告は原著への詳細なガイドとなっている。Keller らのものが最も便利である。

Keller, K.A. et al., 1973, Excitation Functions for Charged Particle Induced Nuclear Reaction, in Landolt-Bornstein Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology, Group I, Nuclear and Particle Physics. Vol.5. Part a, b, c, (Berlin: Springer Verlag).

McGowan, F. K.; Milner, W. T., 1975, Reaction List for Particle-Induced Reactions, 1973-74, At. Data Nucl. Data Tables, 15 ,189.

Way, K. (Ed.), 1973, Charged-Particle Reaction List 1948-71, in Atomic and Nuclear Data Reprints, Vol 2 (New York: Academic Press).

Includes:

McGowan, F. K.; Milner, W. T.; Kim, H. J.; Hyatt, Wanda, 1969, Reaction List for Charged-Particle-Induced Nuclear Reactions. Part A: Z=3 to Z=27 (Li to Co), Nucl. Data Tables, A7, 1.

McGowan, F. K.; Milner, W. T., 1969, Reaction List for Charged-Particle-Induced Nuclear Reactions. Part B: Z=38 to Z=99 (Li to Es), Nucl. Data Tables, A7, 1.

McGowan, F. K.; Milner, W. T., 1970, Reaction List for Charged-Particle-Induced Nuclear Reactions. Z=1 to Z=98 (H to Cf), May 1969-June 1970, Nucl. Data Tables, A8, 199.

McGowan, F. K.; Milner, W. T., 1971, Reaction List for Charged-Particle-Induced Nuclear Reactions. Part I: Z=1 to Z=98 (H to Cf),

July 1970 to June 1971, Part II: Coulomb Excitation; 1956-June
1971, Nucl. Data Tables, A9, 469.

McGowan, F. K.; Milner, W. T., 1972, Reaction List for Charged-
Particle-Induced Nuclear Reactions. 1971-1972, Nucl. Data Tables,
A11, 1.

McGowan, F. K.; Milner, W. T., 1973, Reaction List for Charged-
Particle-Induced Nuclear Reactions. 1972-1973, Nucl. Data Tables,
A12, 499.

(=) Kerma Factors for Neutrons

ICRU 26 が包括的である。30 MeV 以上では Alsmiller らや Bassel らのものがある。
Alsmiller, J.R.; Barish, J., 1977, Neutron Kerma Factors for H, C, N, O
and Tissue in the Energy Range of 20 ~ 70 MeV, Health Phys. 33,
98-100.

ICRU, 1977, Neutron Dosimetry in Biology and Medicine, ICRU Report No.
26 (ICRU Publications, P.O. Box 30165, Washington, DC 20014 U.S.A.).

Bassel, R.H.; Herling, G.H., 1977, Energy Transfer to Hydrogen by
Neutrons from 30 to 100 MeV, Radiat. Res. 69, 210-212.

(ホ) W 値

a) 電子と光子 : ICRU 31 が最新のものであろう。非常に低いエネルギーの電子については未解決で Cole や Combecher の測定がある。

b) 中性子からの 2 次荷電粒子 : ICRU 31 に要約されている。

Cole, A., 1969, Absorption of 20-eV to 50,000-eV Electron Beams in Air
and Plastic, Radiat. Res. 38, 7.

Combecher, D., 1978, W-values of Low Energy Electrons for Several Gases,
in Proc. 3rd Symp. on Neutron Dosimetry in Biology and Medicine,
Neuherberg/Munchen, May 1977, FUR-5848, (Luxembourg: CEC) pp.
97-106.

ICRU, 1979, Average Energy Required to Produce an Ion Pair, ICRU Report
No.31.

(ヘ) 光子の相互作用

評価済み核データファイル ENDF/B photon interaction library は the Neutron
Data Compilation Centre (CCDN; Saclay) で入手できる。Table 3.1.1 に biomedical
field で役立つ compilations が示してある。1 組のデータを勧告するとすれば、1 KeV 以上
では Storm - Israel のものが最も役立つ。化合物に対しては mixture rule を適用する。

10 KeV ~ 100 MeV の光子に対する (μ_{en}/ρ) と (μ_{att}/ρ) が ICRP 標準人の 69 の

臓器・組織別に White らにより計算されている。 a complete listing が磁気テープの形で the Radiation and Shielding Information Centre (RSIC ; ORNL) にある。

Hubbell, J. H., 1969, National Standard Reference Data System, NSRDS-NBS

29 (National Bureau of Standards, Washington, DC, U.S.A.).

Hubbell, J. H.; McMaster, W. H., Ker Del Grande, N.; Malliett, J. H,

1974, X-Ray Cross Sections and Attenuation Coefficient, in International Tables for X-Ray Crystallography, Vol. IV, ed J. A. Ibors and W. G. Hamilton (Birmingham, U.K.: Kynoch Press) p. 47.

ICRU, 1970, Radiation Dosimetry: X-Rays Generated at Potentials of 5 to 150 kV, ICRU Report No. 17 (ICRU Publications, P.O. Box 30165, Washington, DC 20014 U.S.A.).

Storm, E.; Israel, H.I., 1970, Photon Cross Sections from 1 keV to 100 MeV for Elements Z=1 to Z=100, Nucl. Data Table A7, 565.

Veigele, W.J., 1973, Photon Cross Sections from 0.1 keV to 1 MeV for Elements Z=1 to Z=94, At. Data Table 5, 51.

White, D.R.; Fitzgerald, M., 1975, Calculated Attenuation and Energy Absorption Coefficients for ICRP Reference Man (1975) Organs and Tissues, Health Phys. 33, 73-81.

(ト) Penetration and Dosimetry of Electrons

a) エネルギー損失: ICRU 21 は Berger - Seltzer の値を採用している。

b) エネルギー付与の空間分布: 単色エネルギーの電子に対する Spencer の計算に基づいた β 核種からの吸収線量分布が Cross や Berger により求められている。

Berger, M.J., 1971, Distribution of Absorbed Dose around Point Sources of Electrons and Beta Particles in Water and Other Media, J. Nucl. Med. 12, Suppl. No. 5, 5.

Cross, W.G., 1967, Tables of Beta Dose Distributions, AECL-2793 (Chalk River, Ont.: Atomic Energy of Canada Ltd).

Cross, W.G., 1968, Variation of Beta Dose Attenuation in Different Media, Phys. Med. Biol. 13, 611-618.

Spencer, L.V., 1959, Energy Dissipation by Fast Electrons, NBS Monograph No. 1 (Washington, DC: National Bureau of Standards).

Berger, M.J.; Seltzer, S.M., 1964, Tables of Energy Losses and Ranges of Electrons and Positrons, in *Studies in Penetration of Charged Particles in Matter*, Nuclear Science Series Report NO. 39, National

Academy of Science-National Research Council Publication 1133
(Washington, DC; NAS).

ICRU, 1972, Radiation Dosimetry: Electrons with Initial Energies between
1 and 50 MeV, Report No. 21 (ICRU Publications, P.O. Box 30165
Washington, DC 20014, U.S.A.).

(チ) 陽子, α 粒子, 重イオンのエネルギー損失

陽子に関しては Andersen らのもの, α 粒子に関しては Ziegler ら, He イオンより重い荷電粒子では Northcliffe らのものが包括的である。しかしこれらは電子阻止能に限られている。低エネルギーの重イオンでは核弹性散乱が有意になる。核阻止能を考慮したものには Lindhard らや Oldenburg ら, Dennis のものがある。

Andersen, H.H.; Ziegler, J.F., 1977, Hydrogen Stopping Powers and Ranges
in All Elements, Volume 3 of *The Stopping Powers and Range of Ions
in Matter*, (Pergamon Press, New York).

Ziegler, J.F.; Chu, W.K., 1974, Stopping Cross Sections and Backscatter-
ing Factors for ${}^4\text{He}$ Ions in Matter, $Z=1-92$, $E({}^4\text{He})=400-4000$ keV, At.
Data Nucl. Data Table 13, 463.

Dennis, J.A.; 1971, Energy Loss Characteristics of Heavy Ions in Nitro-
gen, Carbon Dioxide, Oxygen, Hydrocarbon Gases, and Tradescantia
Tissue, AERE-M2346 (Harwell: AERE).

Lindhard, J.; Scharff, M.; Schiott, H.E., 1963, Range Concepts and Heavy
Ion Ranges, Note on Atomic Collisions. II., K. Dan. Vidensk. Selsk.
Mat. Fys. Medd., 33, No. 14.

Northcliffe, L.C., 1963, Passage of Heavy Ions through Matter, Ann. Rev.
Nucl. Sci., 13, 67.

Northcliffe, L.C.; Schilling, R.F., 1970, Range and Stopping Power
Tables for Heavy Ions, Nucl. Data Tables, A7, 233.

Oldenberg, U.; Booz, J., 1972, Mass Stopping Power and Path Length of
Neutron Produced Reciols in Tissue and Tissue Equivalent Materials,
EUR 4786 (Luxembourg: CEC).

参考文献

- 1) P. D. Holt Phys. Med. Biol. 24 (1979) 1.
- 2) P. D. Holt (Secretary, Biomedical Sub-Committee) からの私信 (21 Feb. 1984)

[資料]

U. K. NDC Biomedical Subcommittee Request List (追記にある ICRP 30 は
supplements も含めて 1 ~ 3 部全て刊行された)

U.K.N.D.C. Bio-Medical Sub-committee

Request List

1. Excitation functions for the production of isotopes of C, N, O, Na, Mg, P, S, Cl, K, Ca and I and also Fe⁵², Rh⁸¹ and Tl²⁰¹ by bombardment of suitable targets with protons, deuterons, helium-3 and helium-4 ions of energies up to 500 MeV.

Application is the economic production of isotopes for use in medical diagnostic techniques. Suitable isotopes should have half-lives in the range from a few minutes to a few days and emit photon radiation in the energy region 100 to 500 keV.

2. Differential cross-sections for the production of prompt gamma rays by neutron interactions with C¹², N¹⁴, O¹⁶, P³¹ and Ca⁴⁰. Cross-sections for the neutron energy range 5 to 50 MeV are required, to an accuracy of $\pm 10\%$, with the range 8 to 15 MeV of particular importance.

Application is in medical diagnostic techniques using in-vivo activation analysis by neutron radiation.

3. Energy and angular distribution of charged particles produced by non-elastic neutron reactions with C¹², N¹⁴, O¹⁶, P³¹ and Ca⁴⁰. The neutron energy range required is 5 to 50 MeV with emphasis on range 8 to 15 MeV. Accuracies of differential cross-sections of $\pm 10\%$ would be adequate.

Applications are to the dosimetry of neutron radiations used for cancer therapy and radiobiology, and fundamental investigations of the physical bases of radiation action on living tissues.

4. Stopping powers of protons in the energy range 0.01-10 MeV, alpha particles in the range 0.01-8 MeV and C, N and O ions in the range 0.01-2 MeV, in gases containing H, C, N and O and solids containing these elements together with Ca and P. Measurements for different phases of the same stopping material are important. Of first importance are stopping powers for protons and helium ions to accuracies of $\pm 3\%$.

Applications are to the dosimetry of neutron radiation using ionization methods in cancer therapy and radiobiology, the internal dosimetry of actinide elements in radiological protection, and for fundamental investigations of the physical bases of radiation action in living tissues.

5. Values of the average energy, W , required to produce an ion pair by protons in the energy range 0.01-15 MeV, alpha particles in the range 0.01-8 MeV, and C, N and O ions in the range 0.01-2 MeV in CH_4 , C_2H_4 , C_2H_2 , CO_2 , Ar and tissue-equivalent gas (64.4% CH_4 , 32.4% CO_2 and 3.2% N_2 by volume). The accuracy of measurement should be better than $\pm 3\%$.

Application is to the dosimetry of neutron radiation by ionization methods in cancer therapy and in fundamental radiobiological studies.

6. Measurements of the angular- and energy- distributions of electrons as a function of distance from a monoenergetic point source (10 keV to 3 MeV) in homogeneous media containing H, C, N, O, Ca and P. Also measurements of the changes in the distributions at interfaces. Accuracies of $\pm 5\%$ are required.

Application is to the confirmation of computer calculations of these distributions, which are used for the internal dosimetry of beta emitters in cancer therapy and radiological protection.

7. Experimental values of stopping powers, penetration and range of electrons with energies in the range 0.1 to 10 keV in tissue like material. Accuracies of $\pm 10\%$ are required.

Applications are to the calculations of dose distributions about internal beta emitters, and the calculations of track structure about ions in studies of the physical bases of radiation action in living tissues.

8. Experimental values of photon attenuation coefficients for photons in the energy range 0.1 keV to 10 keV in tissue like materials including bone to an accuracy of $\pm 5\%$, and in the energy range 10 keV to 200 keV to an accuracy of $\pm 2\%$.

Applications are in diagnostic radiography, in the detection of internal isotopes in radiological protection, and for the dosimetry of fundamental studies in radiobiology.

NOTE

This request list has not referred to isotope decay schemes although these are an important item of data for biomedical work. The reason is that W S Snyder of Oak Ridge National Laboratory is compiling data on all decay schemes with half-lives greater than 10 minutes for the International

Commission on Radiological Protection, and this compilation is expected to be published during the next 12 months; also the National Physical Laboratory (on behalf of the International Committee on Radionuclide Metrology) is conducting a survey, using questionnaires, to ascertain the data needs in this field. It did not seem worth while assembling a request list of decay schemes until the Sub-committee has had an opportunity of studying these two pieces of work.

7 February 1977

Additional note

The Subcommittee has not yet produced its request list of radionuclide decay schemes. The compilation of decay schemes assembled by the late Dr W S Snyder of Oak Ridge National Laboratory has been completed and is the source material for ICRP Publication 30 (Limits for Intakes of Radionuclides by Workers), Part 1 of which has been published. Part 2 is in press, but Part 3 and the decay scheme compilation itself have not yet been published.

28 December 1979

Table 3.1.1 Photon interaction data

Author	Date	Basis	Attenuation coefficients			Energy absorption coefficients		
			Elements	Compounds/ mixtures	Energy range	Elements	Compounds/ mixtures	Energy range
Hubbell	1969	Theor.	23	13	0.01 MeV-100 GeV	13	2	0.01-10 MeV
ICRU	1970	Theor./Expt.	12	9	1-150 keV	12	9	1-150 keV
Storm and Israel	1970	Theor.	1-100	—	0.001-100 MeV	1-100	—	0.001-100 MeV
Veirelde	1973	Theor./Expt.	1-9 \pm	—	0.1 keV-1 MeV	1-9 \pm	—	0.1 keV-1 MeV
Hubbell <i>et al.</i>	1974	Theor./Expt.	1-9 \pm	—	K and L X-rays	—	—	—
White and Fitzgerald	1977	Theor.	—	69	10 keV-100 MeV	—	—	10 keV-100 MeV

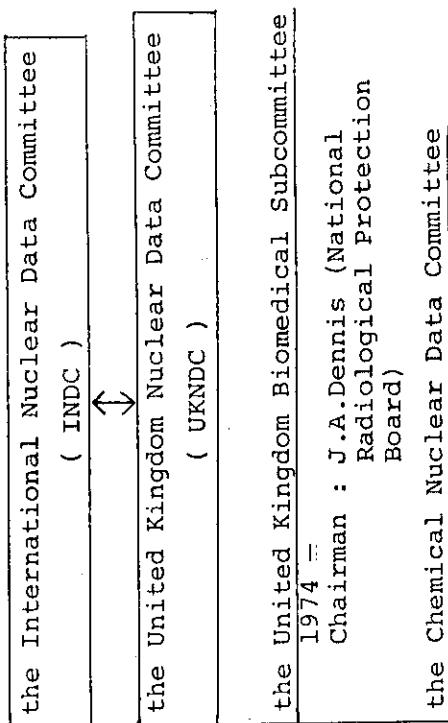


Fig. 3.1.1 The relationship among some committees.

3.2 ICRU のデータ活動について

放射線医学総合研究所 平岡 武

はじめに

国際放射線単位測定委員会（ICRU）は(1) 放射線と放射能の量とその単位、(2) 放射線医学や放射線生物学へこれらの量の測定や応用に関する適当な方法、(3) これらの応用で必要となる信頼できる物理データーに対して国際的に認められ得る勧告を行うことを主たる活動の目的としている。放射線の医学利用は増え拡大されつつあり、ICRUの役割はより重要さを増している。ここでは ICRU の歴史を簡単にふり返り ICRU の活動をレビューしてみることにする。

歴 史

ICRU の歴史は 1925 年に始まるが、当時放射線の利用はほとんど医学に応用されていたため、この委員会は放射線医学の領域に於て誕生した。この年 1 回の国際放射線医学会議（ICR）がロンドンで開催され、この会議の基に国際的に認められた X 線の量と単位を討論する委員会として設置された。ドイツ、フランスでは既に X 線の量としてレントゲン単位がそれぞれ異なった定義で提唱されていたが、国際的に統一された単位はこの会議に於ては同意に致らず、1928 年第 2 回 ICR（ストックホルム）大会に於て初めて X 線の量と単位が採択された。最初 ICRU は国際 X 線単位委員会という名称から出発した。Table 3.2.1 に ICRU の名称の変遷を示す。名称の変化を見てもわかる様に X 線単位の成立に始まったこの委員会も、放射線医学全体にわたる単位を勧告する必要に迫られ、また加速器の医学利用により広範な線源に対する単位やその量の測定方法を勧告する委員会となつた。現在では医学のみならず放射線全般の単位制定とその量の測定方法と、またそれらに付随した問題点の解明に関する委員会へと発展した。

ICRU リポート

放射線の単位の制定から始まつた ICRU 活動も現在 12 のプログラムの問題点の解明に努力が払われている。Table 3.2.2 に現在のプログラムが示してある。放射線医学は治療、診断、核医学に大きく分類されており、それらに関連した放射線物理学、放射線生物学、放射線化学と言った分野が取り上げられている。以前は Values of Factor -W, S, etc. であった項が最近 Critical Data に名称が変更され、ICRU で必要とする諸々のデーターを取り上げて行く姿勢が見受けられる。

Table 3.2.3 に今まで出版された ICRU リポートの一覧を示す。リポート No. 2 には始めてレントゲン単位が ICR によって採択されたことが報告されているが、No. 3 以後は ICRU によってこれらの単位が勧告されている。No. 7 までは放射線の量と単位、またそれらの測定法や放射線の線質について簡単に触れてある。1956 年からは測定という言葉が名称に加えられ、No. 8 や No. 9 では単位や測定法、線質の問題が詳細に述べてある。No. 10 は a～f までのリポートがあり ICRU の細分化された分野のリポートが出版される様になった。初期のリポートは一般のジャーナルに

掲載されたが、その後 NBS のハンドブックとして出版された。No. 11 からは ICRU 独自でリポートを出版する様になり現在に至っている。

データー活動

ICRU の母体機関が ICR であることから、ICRU の活動は放射線医学で必要とする物理領域の問題を特に重点的に取扱って来た。従って現在の放射線物理学と言う学問体系の中心的役割を ICRU は成していると言える。癌治療法のうち放射線治療法が主体的に発展した中で、ICRU も当然放射線治療に関連した物理的問題を中心に発展してきた。ICRU 発足当初の活動は放射線の量とその単位の制定のみに心血がそそがれたが、これらの量や単位の一定の確立と共にいかにこれらの量を正確に評価し、また照射するかに重点が置かれた。患者の癌腫瘍組織にいかに正確に多くの線量を照射し、正常組織にはいかに少ない線量の照射を行うかが放射線治療の基本の一つとされているため、これらを達成するための手段としてのリポートが Table 3.2.3 にも示す様に出版されてきた。放射線の種類、照射野、照射方法、患者の病巣データー、患者の固定等を適当に選定することによりその時点での最適な照射が可能となり、そのためには多くの正確なデーターをあらかじめ知る必要がある。Table 3.2.4 に今まで ICRU リポートで取扱われたデーターを示す。表には量、線源および場、測定、放射線治療と言った 4 つの項目に分けてデーターを示してあるが、これは單なる目安であり他の項目に属する場合も多々ある。この様に多くのデーターが ICRU 活動に於て必要となる。例えば X 線に対する单の組織中の吸収線量と電離箱線量計で求める場合には、検出器や組織の W 値、質量エネルギー吸収係数、質量衝突阻止能といったデーターがわかれれば求められる (Table 3.2.4)。所ガンの値から実際の患者の腫瘍の空間的な線量分布を求めるためには、深部量百分率、組織空中線量比、照射野係数、等価照射野、散乱係数、等線量曲線、軸外線量比、不均質補正係数と言った様な多くのデーターを用いてはじめて評価できる。一般にこれらの係数はエネルギーの関数であることは勿論であるが、線源・表面間距離、照射野、装置の違いと言った関数となるため、一般的な正確な値を求めるることはかなりむずかしい。従って ICRU では単純な物理量のデーターとこれら物理量の組合せによって生ずるデーターとに分けている。後者に属するデーターは普遍的なデーターは公表されており、その他のは一般化する様な努力が払われている。前者に属するデーターは今までカーマ率、LET、W 値と言ったリポートが独立に公表されたが、電子線や陽電子線に対する阻止能のリポートが現在印刷中である。

おわりに

ICRU で取扱われるデーターは放射線医学の物理領域に属することが主であるため、放射線と物質との相互作用に関する非常に基礎的な係数から患者の線量分布と言った非常に複雑なデーターを含んでいる。ICRU では腫瘍線量は 5 % 以下の精度で評価しなければならないとしているが、複雑な人体組織の任意の場所にある腫瘍に対して全てこの基準を満足させるためには多くの努力を払わなければ達成できない。線量評価の精度は使用する各データーの不確定度の和として表わされるため、少しでも信頼度の高いデーターを必要とする。ICRU で現在公表しているデーターは物質、線質、エネルギー等についてかなり限られたものであり、国際機関としてより

一般化された信頼のおける多くのデータの公表が望まれる。

最後にこのレビューは ICRU リポートや元 ICRU 委員の津屋旭氏の ICRU 報告等を参考に行なったことを付け加える。

Table 3.2.1 Alteration for the name of the ICRU

1925	International X-Ray Unit Committee
1934	International Committee for Radiological Units
1950	International Commission on Radiological Units
1956	International Commission on Radiological Units and Measurements
1968	International Commission on Radiation Units and Measurements

Table 3.2.2 Current program of the ICRU

Radiation Therapy
Radiation Diagnosis
Nuclear Medicine
Radiobiology
Radioactivity
Radiation Physics-X Rays, Gamma Rays and Electrons
Radiation Physics-Neutrons and Heavy Particles
Radiation Protection
Radiation Chemistry
Critical Data
Theoretical Aspects
Quantities and Units

Table 3.2.3 The ICRU report.

1	Discussion on International Units and Standards for X-ray Work, B. J. Radiol. 23, 64 (1927)
2	International X-ray Unit of Intensity, B. J. Radiol. (new series) 1, 363 (1928)
3	Report of Committee on Standardization of X-ray Measurements, Radiology 22, 289 (1934)
4	Recommendations of the International Committee for Radiological Units, Radiology 23, 580 (1934)
5	Recommendations of the International Committee for Radiological Units, Radiology 29, 634 (1937)
6	Report of International Commission on Radiological Protection and International Commission on Radiological Units, NBS Handbook 47, Washington, D.C. (1951)
7	Recommendations of the International Commission for Radiological Units, Radiology 62, 106 (1954)
8	Report of International Commission on Radiological Units and Measurements (ICRU) 1956, NBS Handbook 62, Washington, D.C. (1957)
9	Report of International Commission on Radiological Units and Measurements (ICRU) 1959, NBS Handbook 78, Washington, D.C. (1961)
10a	Radiation Quantities and Units, NBS Handbook 84, Washington, D.C. (1962)
10b	Physical Aspects of Irradiation, NBS Handbook 85, Washington, D.C. (1962)
10c	Radioactivity, NBS Handbook 86, Washington, D.C. (1962)
10d	Clinical Dosimetry, NBS Handbook 87, Washington, D.C. (1962)
10e	Radiobiological Dosimetry, NBS Handbook 88, Washington, D.C. (1962)
10f	Methods of Evaluating Radiological Equipment and Materials, NBS Handbook 89, Washington, D.C. (1962)
11	Radiation Quantities and Units (1968)
12	Certification of Standardized Radioactive Sources (1968)
13	Neutron Fluence, Neutron Spectra and Kerma (1969)
14	Radiation Dosimetry: X Rays and Gamma Rays with Maximum Photon Energies between 0.6 and 50 MeV (1969)
15	Cameras for Image Intensifier Fluorography (1969)
16	Linear Energy Transfer (1970)
17	Radiation Dosimetry: X Rays Generated at Potentials of 5 to 150 kV (1970)
18	Specification of High Activity Gamma Ray Sources (1970)
19	Radiation Quantities and Units (1971)
20	Radiation Protection Instrumentation and Its Application (1971)
21	Radiation Dosimetry: Electrons with Initial Energies Between 1 and 50 MeV (1972)
22	Measurement of Low-Level Radioactivity (1972)
23	Measurement of Absorbed Dose in a Phantom Irradiated by a Single Beam of X or Gamma Rays (1973)
24	Determination of Absorbed Dose in a Patient Irradiated by Beams of X or Gamma Rays in Radiotherapy Procedures (1976)
25	Conceptual Basis for the Determination of Dose Equivalent (1976)
26	Neutron Dosimetry for Biology and Medicine (1977)
27	An International Neutron Dosimetry Intercomparison (1978)
28	Basic Aspects of High Energy Particle Interactions and Radiation Dosimetry (1978)
29	Dose Specifications for Reporting External Beam Therapy with Photons and Electrons (1978)
30	Quantitative Concepts and Dosimetry in Radiobiology (1979)
31	Average Energy Required to Produce an Ion Pair (1979)
32	Methods of Assessment of Absorbed Dose in Clinical Use of Radionuclides (1979)
33	Radiation Quantities and Units (1980)
34	Dosimetry of Pulsed Radiation (1982)
35	Stopping Powers for Electrons and Positrons (in press)

Table 3.2.4 Data appeared in the ICRU report.

(a) Quantity
Quantities and units
Mass attenuation coefficient
Mass energy absorption coefficient
Mass energy transfer coefficient
Mass collision stopping power (e, p, d, α, μ)
Mass angular scattering power (e)
Linear energy transfer (e)
Radiation chemical yield ($X, \gamma, e, p, \alpha, n, {}^3H$)
Mean energy expended per ion pair (e, p, α, n)
Kerma factor
Air kerma-rate constant
Absorbed fraction
Quality factor
Relative biological effectiveness
(b) Source and Field
Source ($X, \gamma, \beta, e, \alpha, p, n$)
Primary spectrum (X, γ, e, n)
Slowing-down spectrum (e)
Range (e, p, α)
Compton recoil electron cross section
Neutron yield
Radioactive nuclide (half life, emitted particle, energy, decay, ...)
Half value layer
Filter
(c) Measurement
Radiation detector (ion chamber, calorimeter, chemical, TLD, Film, threshold, resonance, ...)
Ion collection efficiency
Cavity size (displacement, perturbation, resolving power, pressure, ...)
f-factor
Conversion coefficient; F
C_λ, C_E
Charged particle build-up
Reference point
Calibration point
Field factor
(d) Radiotherapy
Elemental composition (biological tissue, ...)
Tissue equivalent material (bolus, phantom)
Patient data (organ shape, volume, composition, density, body conturs, body inhomogenities, ...)
Percentage depth dose (X, γ, e, n)
Isodose chart (single, combined, rotation, wedge field, ...)
Back scatter factor
Equivalent square (equivalent diameter)
Tissue air ratio
Tissue phantom ratio

3.3 その他の調査事項

本ワーキンググループにおいて実施したその他の調査事項とその概要は下記のとおりである。

(1) 核構造に関するデータ

原研の核データセンタが保有している核構造、特に本ワーキンググループにとって関心の深い崩壊に関するデータの内容、出力形式等について、原研・核データセンタ田村努氏が説明し質問・討論を行った。

(2) 核反応に関するデータ

原研の核データセンタが保有している核反応、特に中性子核データ及び荷電粒子核反応データの種類、内容及び利用方法について、原研・核データセンタ浅見哲夫氏が説明し、質問・討論を行った。

(3) IAEAにおける医学用核データ活動

IAEAでは核データを、診断用 RI 関係を治療用放射線関係に大別して取扱っており、これらに係るコンサルタントミーティングの現状と将来について、IAEA の岡本浩一氏が説明し、質問・討論を行った。

(4) 中性子一次標準の現状

マンガンバス法による中性子放出率の絶対測定、黒鉛パイアル、Au 箔による熱中性子フルーエンスの標準、陽子反跳型検出器、随伴 α 粒子法による単色速中性子のフルーエンスの標準、フルーエンス標準と断面積及び中性子標準に関する国際比較のこれまでの結果と今後の計画等について、電子技術総合研究所、道川太一氏が説明し、質問・討論を行った。

(4) X線一次標準の現状

X線の照射線量の標準供給の範囲と現状、X線の実効エネルギーと管電圧との比（線質指標）をパラメータにした場合のX線標準場の種々の特性、free air chamber による照射線量の絶対測定の現状、国際比較による標準維持の現状、線量計校正における誤差要因、エネルギー依存性、方向依存性及び線量依存性等について、電子技術総合研究所松本健氏が説明し、質問・討論を行った。

(5) γ 線照射線量標準の現状

照射線量の絶対測定、特に比較的エネルギーの高い γ 線の照射線量を空洞電離箱を用いて測定する場合の、一般再結合損失による補正、湿度に対する補正及び平均質量阻止能比の見直し等について、電子技術総合研究所加藤朗氏が説明し、質問・討論を行った。

(6) 阻止能等のデータを調査する対象物質

検討の結果、下記の物質について調査することとした。

A-150 TISSUE-EQUIVALENT PLASTIC^a

ADIPOSE TISSUE (ICRP)^b

AIR, DAY (NEAR SEA LEVEL)^c

ALUMINUM OXIDE, Al_2O_3

AMBER, $\text{C}_{10}\text{H}_{16}$ O

ANTHRACENE, $\text{C}_{14}\text{H}_{10}$

B-100 BONE-EQUIVALENT PLASTIC^d

BAKELITE, $(\text{C}_{43}\text{H}_{38}\text{O}_7)_n$

BARIUM SULFATE, BaSO_4

BERYLLIUM OXIDE, BeO

BISMUTH GERMANIUM OXIDE, $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$

BLOOD (ICRP)^b

BONE, COMPACT (ICRU)^e

BONE, CORTICAL (ICRP)^b

BORON CARBIDE, B_4C

BRAIN (ICRP)^b

BRASS

C-552 AIR-EQUIVALENT PLASTIC^f

CADMIUM TELLURIDE, CdTe

CALCIUM CARBONATE, CaCO_3

CALCIUM FLUORIDE, CaF_2

CALCIUM SULFATE, CaSO_4

CALCIUM TUNGSTATE, CaWO_4

CARBON DIOXIDE, CO_2

CARBON OXIDE, CO_2

CELLULOSE ACETATE, CELLOPHANE, $(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)_n$

CELLULOSE ACETATE BUTYRATE, $(\text{C}_{15}\text{H}_{22}\text{O}_8)_n$

CELLULOSE NITRATE, $C_6H_{7.7}O_{9.6}N_{2.3}$

CERIC SULFATE DOSIMETER SOLUTING^g

CESIUM IODIDE, CsI

CONCRETE, PORTLAND^h

ETHANE, C_2H_6

ETHYL ALCOHOL, C_2H_5OH

ETHYLENE, C_2H_4

EYE LENS (ICRP)^b

FERROUS OXIDE, FeO

FERROUS SULFATE DOSIMETER SOLUTIONⁱ

GALLIUM ARSENIDE, GaAs

GEL IN PHOTOGRAPHIC EMULSION^j

GLASS, BOROSILICATE ("PYREX", CORNING 7740)^k

GLASS, LEAD^z

GLASS, PLATE^m

GLUCOSE, DEXTROSE, $C_6H_{12}O_6 \cdot H_2O$

GLYCEROL, $C_3H_5(OH)_3$

GYPSUM, PLASTER OF PARIS, $CaSO_4 \cdot 2H_2O$

HW

"KAPTON" POLYIMIDE FILM, $(C_{22}H_{10}N_2O_5)_n$

LITHIUM CARBONATE, Li_2CO_3

LITHIUM FLUORIDE, LiF

LITHIUM TETRABORATE, $Li_2B_4O_7$

LUNG (ICRP)^b

M3 WAXⁿ

MAGNESIUM CARBONATE, $MgCO_3$

MAGNESIUM OXIDE, MgO

MALLORY 2000

MAGNESIUM TETRABORATE, MgB_4O_7 MERCURIC IODIDE, HgI_2 METHANE, CH_4 METHANOL, CH_3OH MIX D WAX^OMS20 TISSUE SUBSTITUTE^PMUSCLE, SKELETAL (ICRP)^bMUSCLE, STRIATED (ICRU)^eMUSCLE-EQUIVALENT LIQUID, WITH SUCROSE^qMUSCLE-EQUIVALENT LIQUID, WITHOUT SUCROSE^rNAPTHALENE, $C_{10}H_8$ NYLON, DU POINT "ELVAMIDE 8062M"^sNYLON, TYPE 6 AND TYPE 6/6, $(C_6H_{11}ON)_n$ NYLON, TYPE 6/10, $(C_8H_{15}ON)_n$ NYLON, TYPE 11 ("RILSAN"), $(C_{11}H_{21}ON)_n$ PARAFFIN WAX, $C_{25}H_{52}$ PHOTOGRAPHIC EMULSION^jPLASTIC SCINTILLATOR (VINYL TOLUENE BASED)^tPLUTONIUM DIOXIDE, PuO_2 POLYCARBONATE,^u "MAKROLON", $(C_{16}H_{14}O_3)_n$ POLYETHYLENE, $(C_2H_4)_n$ POLYETHYLENE TEREPHTHALATE,^v "MYLAR" $(C_{10}H_8O_4)_n$ POLYMETHYL METHACRYLATE,^w $(C_5H_8O_2)_n$ POLYOXYMETHYLENE, $(CH_2O)_n$ POLYPROPYLENE, $(C_3H_6)_n$ POLYSTYRENE,^x $(C_8H_8)_n$

POLYTETRAFLUOROETHYLENE, ^Y "TEFLON", $(C_2F_4)_n$

POLYTRIFLUOROCHLOROETHYLENE, ^Z $(C_2F_3Cl)_n$

POLYVINYL ACETATE, $(C_4H_6O_2)_n$

POLYVINYL ALCOHOL, $(C_2H_3OH)_n$

POLYVINYL CHLORIDE, $(C_2H_3Cl)_n$

POLYVINYLDENE CHLORIDE, SARAN, $(C_2H_2Cl_2)_n$

POTASSIUM IODIDE, KI

PROPANE, C_3H_8

PROPANE, LIQUID, C_3H_8

RUBBER, BUTYL, $(C_4H_8)_n$

RUBBER, NATURAL, $(C_5H_8)_n$

RUBBER, NEOPRENE, $(C_4H_5Cl)_n$

SCINTILLATOR (Pilot B)

" (KI)

" (Toluene)

SILICON DIOXIDE, SiO_2

SILVER BROMIDE, AgBr

SILVER HALIDES IN PHOTOGRAPHIC EMULSION^j

SKIN (ICRP)^b

SODIUM CHLORIDE

SODIUM IODIDE, NaI

STEEL

STILBENE, $C_{14}H_{12}$

SUCROSE, $C_{12}H_{22}O_{11}$

TERPHENYL, $C_{18}H_{16}$

TESTES (ICRP)^b

TISSUE, SOFT (ICRP)^b

TISSUE, SOFT (ICRU FOUR-COMPONENT)^{aa}

TISSUE-EQUIVALENT GAS (METHANE BASED)^{bb}

TISSUE-EQUIVALENT GAS (PROPANE BASED)^{cc}

TITANIUM DIOXIDE, TiO₂

TOLUENE, C₇H₈

URANIUM OXIDE, UO₂

UREA, CO(NH₂)₂

WATER, LIQUID, H₂O

WATER VAPOR, H₂O

4. 文献リスト一覧表

放医研 喜多尾憲助

このリストは、放射線医学、放射線生物学及び放射線防護の分野におけるドシメトリに関する文献をまとめたものである。

利用上の便を考えて、個々の生データが記載されているものよりは、それらをまとめた、いわばデータ集に重点をおいた。上記分野の人達で、データの評価やデータの研究ないし測定にも関心をもつ方々にはもの足りないかも知れない。

なお、核崩壊データや各種核断面積データの整備の現状については、本ワーキンググループ会合で原研の田村・浅見の両氏から紹介していただいたが、その内容は本報告書に載せなかった。その代り、これら核データについては、リストに若干のコメントを加えておく。核データに限らず毎年数多くのデータが測定され、又、データ集が発表されている。当然のことながら、常に最新の、信頼できるデータを使用することが望ましい。

又、本リストを作成するに当って、

- 1) Lorenz, A. : Compilations and Evaluations of Nuclear Structure and Decay Data, Issue No.5, INDC(NDS)-112/LNQ (1980).
- 2) Cumulated Index, 1965-1982, Atomic Data and Nuclear Data Tables, 23, 661 (1983).
- 3) Holt, P.D. : Sources of Atomic and Nuclear Data for Biomedical Purposes, Phys. Med. Biol., 24, 1 (1979).

などを参考にした。

文献中、Journalの名称は、次に示すもの以外は慣習にしたがった。

ADNDT Atomic Data and Nuclear Data Table

NDT Nuclear Data Table

AD Atomic Data

NDS Nuclear Data Sheets

なお、このリストを作成するに当って、次の文献を利用した。

- 1) Cumulated Subject Index, with many new categories, ADNDT, 27 627-639 (1982)
- 2) Lorenz, A. (Compiler), Compilations and Evaluations of Nuclear Structure and Decay Data, Issue No.5, INDC(NDS)-112/LNQ (1980)

又、利用の便を考えて、次のような分類にわけて掲載してある。

Z. 一般

A. 放射性崩壊に関するもの

- A 1. 基礎データ
- A 2. 選ばれた放射性核種の崩壊データ
- A 3. α 線, γ 線標準
- A 4. β 線, γ 線スペクトル
- A 5. 放射性核種の半減期, 比放射能
- A 6. 放射線量率定数
- A 7. 内部転換係数

B. 核断面積

- B 1. 荷電粒子核反応断面積
- B 2. 中性子反応断面積, 放射化断面積

C. 原子分子過程が関係するもの

- C 1. X線エネルギー, 遷移確率
- C 2. 制動放射
- C 3. オージュ電子
- C 4. 内殻電離
- C 5. 陽電子相互作用
- C 6. イオン電荷状態
- C 7. 光子断面積, 吸収係数, 減弱係数
- C 8. 電子(ベータ粒子も含む)の透過, 吸収, 阻止能
- C 9. 陽子, 重陽子, 重粒子の阻止能, 飛能
- C10. W値(電子)
- C11. W値(中性子)
- C12. カーマ(中性子)

Z. 一般

- 1) 日本アイソトープ協会編, アイソトープ手帳, 第5版(1980)
- 2) 団野皓文編: 放射線データブック(1983)
- 3) Brodsky, A.B. (Ed.), CRC Handbook of Radiation Measurement and Protection, Section A., Vol.1 and 2, CRC Press (1978)
- 4) Gray, D.E., American Institute of Physics Handbook, McGraw-Hill ()
- 5) Padikal, T.N. (Ed.), Medical Physics Data Book, NBS Handbook 138, U.S. Dep't Commerce (1982)

A. 放射性崩壊に関するもの

A 1. 基礎データ

1. Martin, M.J. (Editor-in Chief); Tuli, J.K (Editor): Nuclear Data Sheets. (Periodical).
2. Fiarman, S.; Hanna, S.S.: Energy Levels of Light Nuclei A=3, Nucl. Phys. A251, 1 (1975).
3. Fiarman, S.; Hanna, S.S.: Energy Levels of Light Nuclei A=4, Nucl. Phys. A206, 1 (1973).
4. Ajzenberg-Selove, F.: Energy Levels of Light Nuclei A=5-10, Nucl. Phys. A413, 1 (1984).
5. Ajzenberg-Selove, F.; Busch, C.L.: Energy Levels of Light Nuclei A=11-12, Nucl. Phys. A336, 1 (1980).
6. Ajzenberg-Selove, F.: Energy Levels of Light Nuclei A=13-15, Nucl. Phys. A360, 1 (1981).
7. Ajzenberg-Selove, F.: Energy Levels of Light Nuclei A=16-17, Nucl. Phys. A375, 1 (1982).
8. Ajzenberg-Selove, F.: Energy Levels of Light Nuclei A=18-20, Nucl. Phys. A392, 1 (1983), Erratum Nucl. Phys. A413, 168 (1984).
9. Endt, P.M.; van der Luen, C.: Energy Levels of Light Nuclei A=21-44 (VI), Nucl. Phys. A320, 1 (1979).

これらの文献は、実験データを一定の評価基準にもとづいて集大成した基本的な原子核構造データ集である。文献(2)～(9)では質量数3から44までの核種が取上げられ、45より大きい質量数の核種は文献(1)に掲載されている。記載形式は、文献(1)と文献(2)～(9)とではかなり違う。文献(1)は、米国核データセンター（National Nuclear Data Center, Brookhaven National Laboratory）によって、国際的核データバンクのために作成されている評価ずみ核構造データファイル（Evaluated Nuclear Structure Data File, ENSDF）の直接出力である。このファイルには多数の原子核データを収集、評価し、その時点で最も信頼性のあるデータだけを採用し、利用者は、その選択に迷うことはない。文献(2)～(9)はどちらかといえば、原子核構造の研究者向きに出来ている。ENSDFには、質量数A=3から44までのデータも集録されているので、放射性崩壊データのみを利用するならば、ENSDFの出力を利用した方がよい。ENSDFの質量数毎に編集され、その改訂周期は4年が目標になっている。このファイルから直接データを得たいと思われる方は原研核データセンタ（電話02928-5-5481）に問い合わせられたい。

10. Lederer, C.M.; Shirley, V.S. (Ed.): Table of Isotopes (Seventh ed.), Wiley-Interscience, New York (1978).

もっとも包括的な核種の崩壊データ集である。Nuclear Data Sheetsが分冊式であるのに1冊にまとめられているのがうれしい。放射性崩壊データの計測に関するデータ類も付録にまとめられていて便利である。

1940年に、米国の Livingood と Seaborg によって第1集が、Review of Modern Physics誌に掲載されて以来、七度版を改めたが、当初わずかに17頁だったものが、1978年の第7版では本文だけで1500頁余にも膨れ上ってしまった。しかし、この種の体裁のものはこれが限度のようで、8版は発行せず、ハンドブック形式のものに変えて行く予定といわれるが、まだその詳細は発表されていない。何時発行されるかも判らない。

11. ICRP: Radionuclide Transformations, Energy and Intensity of Emissions, ICRP Pub.38, Annals of the ICRP, 11-13 (1983).

早くから出版の計画が報じられていたが、このほどまとめられた。放射性核種の利用者にはかなり役に立ちそうである。

12. Lagoutine, F; Coursol, N.; Legrand, J.: Table de Radionucleides I, Laboratoire de Metrologie des Rayonnements Ionisants, CEA- BNM, Saclay (1974).

13. Legrand, J.; Perolat, J.; Lagoutine, F.; Le Gallic, Y.: Table de Radionucleides II, Laboratoire de Metrologie des Rayonnements Ionisants, CEA-BNM, Saclay (1976).

14. Lagoutine, F.; Coursol, N.; Legrand, J.: Table de Radionucleides III, Laboratoire de Metrologie des Rayonnements Ionisants, CEA-BNM, Saclay (1983).

収録されている核種の数は多くはないが、見やすい。 γ 線スペクトルが載っていたり、放射能減衰表がつけられているのが特色。

15. Rues, U.; Westmeier, W.: Catalog of Gamma Rays from Radio-active Decay, Part I, ADNDT 29, 13 (1983).

16. Rues, U.; Westmeier, W.: Catalog of Gamma Rays from Radio-active Decay, Part II, ADNDT 29, 194 (1983).

Part Iは、1982年6月までに発表されたデータを基に、放射性崩壊で放出される γ 線及びX線(54 eV. Li のL・X線以上)をエネルギー値の順に低い方から並べたもの。不純物などを調べるのに便利。Part IIは、核種毎に並べたもの。

A 2. 選ばれた放射性核種の崩壊データ

17. Martin, M.J.; Blichert-Toft, P.H.: Radioactive Atoms, Auger-Electrons, α , β , γ and X-Ray Data, NDT A8, 1 (1970).
18. Dillmann, L.T.; von der Lage, F.C.: Radionuclide Decay Schemes and Nuclear Parameters for Use in Radiation-Dose Estimation, NM/MIRD Pamphlet 10, Society of Nuclear Medicine, New York (1975).
19. Kocher, D.C.: Nuclear Decay Data for Radionuclides Occurring in Routine Releases from Nuclear Fuel Cycle Facilities, ORNL/NUREG/TM-102, Oak Ridge National Laboratory (1977).
20. Martin, M.J. (Ed.): Nuclear Decay Data for Selected Radionuclides (as of July 1978), Appendix to NCPP Report No.58, National Council on Radiation Protection and Measurements, Washington D.C. (1978).

これらは、いずれも文献(1)の注で紹介した ENSDF の出力プログラム MEDLIST によって編集したもの。放出強度の弱いもの（1崩壊当たり 0.0001 以下）のものは切り捨てられている。又内部被曝計算用として便利なように平衡放射定数がついている。文献(16), (17) にとり上げられている核種の数はそう多くないが、文献(18) と (19) を参照すればかなりの核種をカバーすることができる。又、MEDLIST は原研の核データセンタでも使えるから、特定の核種のデータに关心のある向きは、同センタに問い合わせると最新の ENSDF からデータを得られるだろう。

A 3. α 線, γ 線標準

21. Rytz, A.: New Catalogue of Recommended Alpha Energy and Intensity Values, ADNDT 23, 507 (1979).
22. Helmer, R.G.; van Assche, P.H.M.; van der Luen, C.: Recommended Standards for Gamma-Ray Energy Calibration, ADNDT 24, 39 (1979).
23. Yoshizawa, Y.; Horiguchi, T.; Yamada, M.: Gamma-Ray Intensity Standards, Appendix in the Chart of the Nuclides, NEANDC(J)-70/U, INDC(KAP)-57/L, Japan Atomic Energy Research Institute (1980).
の放出核種である超アクチニウム元素の核データの整備は、IAEA (国際原子力機関) のもとで、国際協力によって 1978 年以来進められてきたが、それも 1982 年に終了したはずである。勧告値などを掲載した内部資料が出ている。早い機会にその成果が公表されることを望みたい。
文献 (21), (22) は γ 線標準である。 γ 線標準として使えそうな核種の崩壊の精密な測定や、これまでに標準として示されている核種からの γ 線の精密なデータは毎年かなりの数が発表され

ている。しかし、整理された形というものであれば、まずこの2つを示しておく。文献(22)は、現在改訂作業が進められている。近く最新の数値に接することが出来よう。

A 4. β 線, γ 線スペクトル

24. Cross, W.G.; Ing, H.; Freedman, N.: A Short Atlas of Beta-Ray Spectra, Phys. Med. Biol. 28, 1251 (1983).
25. Heath, R.L.: Scintillation Spectrometry, Gamma-Ray Spectrum Catalogue, IDD-16880-2, Idaho Operations Office, USAEC (1964).
26. Heath, R.L.: Gamma-Ray Spectrum Catalogue for Ge(Li) and Si(Li) Spectrometry, ANCR-1000, Aerojet Nuclear Co., Idaho Falls, USA (1974).
27. Vylov, Ts. et al: Spektren der Strahlung Radioaktiver Nuklide, gemessen mit Halbleiterdetektoren, ZFK-399, Zentralinst. Kernforsch. Rossendorf, DDR (1980).

放射性核種からの β 線スペクトルは、局所的な放射線被曝の研究に重要である。文献(23)は最近発表されたもので、計算による約100核種のスペクトルが与えられている。線量計算のうえからは数値化された表が望ましい。

γ 線スペクトルがまとめられて、いつでも眺められるというのは、まことに便利である。文献(25)は(n, γ)反応で作られた核種を中心にGe(Li), Si(Li)検出器で測定されたスペクトルを掲げている。文献(26)は被碎反応などで作られたものも含め、約190核種の崩壊に伴なう γ 線スペクトルが示されているが、どちらかといえば、重い核種に重点が置かれ、内部転換電子のスペクトルも載っている。なお、現在英語版も準備中。

A 5. 放射性核種の半減期、比放射能

28. Goldstein, G.; Reynolds, S.A.: Specific Activities and Half-Lives of Common Radionuclides, NDT A1, 435 (1966).
29. Large, N.R.: Bullock, R.J.: A Table of Radioactive Nuclides Arranged in Ascending Order of Half-Life, NDT A7, 437 (1970).

放射化分析を行なうような場合、文献(28)のようなものは便利だが、新らしい正確な半減期値を調べようとするならば、NDSやENSDFで当たるべきだろう。

A 6. 照射線量率定数

30. Gusev, N.G.; Dmitriev, P.P.: Quantum Radiation of Radioactive Nuclides, A Data, Handbook, Pergamon Press (1979).

31. 日本アイソトープ協会編, アイソトープ手帳 第5版, 丸善 (1980).

文献(30)で取り上げられている核種の数はきわめて多い。1本1本の γ 線に対して、数値が与えられている。文献(31)はX線領域まで含めて計算してあるのが特長。

A 7. 内部転換係数

32. Hager, R.S.; Seltzer, E.C.: Internal Conversion Tables, Part I;

K-, L-, M-Shell Conversion Coefficients for Z=103, NDT A4, 1
(1968).

33. Band, I.M.; Trzhaskovskaya, M.B.; Listengarten, M.A. : Internal Internal Conversion Coefficients for Atomic Numbers Z \leq 30, ADNDT 18, 433 (1976).

34. Rosel, F.; Fries, H.M.; Alder, K.; Pauli, H.C.: Internal Conversion Coefficients for all Atomic Shells. Part I: ICC Values for Z=30-67, ADNDT 21, 91 (1978).

35. Rosel, F.; Fries, H.M.; Alder, K.; Pauli, H.C.: Internal Conversion Coefficients for All Atomic Shells. Part II: ICC Values for Z=68-104, ADNDT 21, 292 (1978).

36. Dragoun, O.; Brabec, V.: Contributions of (M + N + ...) Shells to Total Internal Conversion Coefficients for Transition Energies above 500 keV, ADNDT 15, 49 (1975).

37. Trusov, V.F.: Internal Conversion Coefficients for High-Energy Transitions, NDT 10, 477 (1972).

B. 核断面積

B 1. 荷電粒子核反応断面積

1. Keller, K.A. et al.: Excitation Functions for Charged Particle Induced Nuclear Reaction, in Landolt-Bornstein Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology, New SERIES.,

Group I, Nuclear and Particle Physics. Vol.5. Part a, b, c,
Springer Verlag (1969).

2. Kim, H.J.; Milner, W.T.; McGown, F.K.: Nuclear Cross Sections for Charged-Particle-Induced Reactions: Li, Be, B, NDT A1, 203 (1966).
3. Kim, H.J.; Milner, W.T.; McGown, F.K.: Nuclear Cross Sections for Charged-Particle-Induced Reactions: C, NDT A1, 203 (1966).
4. Melkanoff, M.A.; Sawada, T.; Cindro, N.: Deuteron Absorption Coefficient and Reaction Cross Sections Calculated With Optical Model Potentials, NDT A2, 263 (1966).
5. Kim, H.J.; Milner, W.T.; McGown, F.K.: Nuclear Cross Sections for Charged-Particle-Induced Reactions: N and O, NDT A3, 123 (1967).
6. Blann, M.; Bisplinghoff, J.: Code ALICE/Livermore 82, UCID-1961, Lawrence Livermore National Laboratory, Univ. Calif. (1982)

荷電粒子核反応については、上にかかげた文献のほか、本報告書“英国におけるデータ活動について”（白員）のなかで紹介している。McGowan らによる核種別、核反応別リストがある。このリストは 1973 年までであるが、その後のリストは、ADNDT 15, 189 (1975), ADNDT 18, 1 (1976) に載っている（1976 年 1 月まで）。それ以降のリストは NDS の Recent references (Periodical) を参照されたい。なお文献(41)はコンピュータ・コードであるが、最近よく使われている。

B 2. 中性子反応断面積、放射化断面積

7. Mughabghhab, S.F.; Garber, D.I.: Neutron Cross Sections: Resonance Parameter, BNL-325 (3rd edition) vol.1, Brookhaven National Laboratory (1973).
8. Seelmann-Eggebert, W.; Pfennig, G; Munzel, H.; Kiewe-Nebenius, H.: Karlsruher Nuklidkarte, 5. Auflage, Kernforsch. Karlsruhe GmbH (1981).
9. Lone, M.A.; Leavitt, R.A.; Harrison, D.A.: Prompt Gamma Rays from Thermal-Neutron Capture, ADNDT 26, 511 (1981).

中性子の断面積でまとめたのはあまりない。文献(45), (46)も文献(44)の引用である。

10. Kinsey, R.: Evaluated Nuclear Data File (ENDF/B), BNL-NCS-17541
 (ENDF-201), 2nd ed., Brookhaven National Laboratory (1975).

各国とも、独自の中性子断面積データを収集し、評価し、もっとも信頼性のあるデータ・セットの作成に努力している。文献(42)は米国のあるが、わが国にも JENDL-1 がある。どちらも利用する場合には、原研核データセンタに問い合わせられたい。こうしたセットではなく、1つひとつの文献を見たいと思われる方は、次の文献集を参照するとよい。

11. CINDA-A, 1935-1976, The Index to the Literature and Computer Files
 on Macroscopic Neutron Data, vol.1 ($Z \leq 50$), vol.2 ($Z > 50$),
 IAEA, Vienna (1979).

C. 原子分子過程が関係するもの

原子分子レベルでの現象、とくに阻止能などについては、検討の概要、調査の概要で各委員がリストアップし解説を加えてあるので、ここではリストのみをかかげる。

C 1. X 線エネルギー、転移確率

1. Bearden, J.A.; Burr, A.F.: X-Ray Atomic Energy Levels, Rev. Mod. Phys., 39, 125 (1967).
2. Sevier, K.D.: Atomic Electron Binding Energies, ADNDT 24, 323 (1979).
3. Porter, F.T.; Freedman, M.S.: Recommended Atomic Electron Binding Energies, 1s to 6p_{3/2} for the Heavy Elements, Z=84 to 103, J. Phys. Chem. Ref. Data 7, No.4 (1978).
4. Parente, F.; Chen, M.H.; Crasemann, B.; Mark, H.: L X-Ray Satellite Energies, ADNDT 26, 383 (1981).
5. Beardrn, J.A.: X-Ray Wavelengths, Rev. Mod. Phys. 39, 78 (1967).
6. Matthews, D.L.; Johnson, B.M.; Moore, C.F.: Calculated K Auger-Electron and K X-Ray Transition Energies for the Multiply Ionized Neon Atom, ADNDT 15, 41 (1975).
7. Nelson, G.C.; Saunders, B.G.; Salem S.I.: K X-Ray Transition Probabilities, AD 1, 377 (1970).
8. Salem, S.I.; Schultz, C.W.: L X-Ray Transition Probabilities, AD 3, 215 (1971).

9. Salem, S.I.; Panossian, S.L.; Krause, R.A.: Experimental K and L Relative X-Ray Emission Rates, ADNDT 14, 91 (1974).
10. Manson, S.T.; Kennedy D.J.: X-Ray Emission Rates in the Hartree-Slater Approximation, ADNDT 14, 111 (1974).
11. Scofield, J.H.: Relativistic Hartree-Slater Values for K and L X-Ray Emission Rates, ADNDT 14, 121 (1974).
12. Salem, S.I.; Lee, P.L.: Experimental Widths of K and L X-Ray Lines, ADNDT 18, 233 (1976).
13. Fricke, B.; Soff, G.: Dirac-Fock-Slater Calculations for the Elements Z=100, Fermium, to Z=173, ADNDT 19, 83 (1977).
14. Carlson T.A.; Nestor, C.W.Jr.: Calculation of K and L X-Rays for Elements of Z=95 to 130, ADNDT 19, 83 (1977).
15. Doyle B.L.; Chambers, W.F.; Christensen, T.M.; Hall, J.M.; Pepper, G.H.: Sin θ Settings for X-Ray Spectrometers, ADNDT 24, 373 (1979).
16. Bambynek et al.: X-Ray Fluorescence Yields, Auger and Coster-Kronig Transition Probabilities, Rev. Mod. Phys. 44, 716 (1972).
その他、文献(82), (83)を見よ。

C 2. 制動放射

17. Pages, L.; Bertel, E.; Joffre, H.; Sklavenitis, L.: Energy Loss, Range, and Bremsstrahlung Yield for 10-keV to 100 MeV Electrons in Various Elements and Chemical Compounds, AD 4, 1 (1972).
18. Pratt, R.H et al.: Bremsstrahlung Energy Spectra from Electrons of Kinetic Energy $1 \text{ keV} \leq T_1 \leq 2000 \text{ keV}$ Incident on Neutral Atoms $2 \leq Z \leq 92$, ADNDT 20, 175 (1977), Erratum 26, 477 (1981).
19. Bowen, T. et al.: LPM Bremsstrahlung and Pair Production Probabilities in Lead and Water, ADNDT 24, 495 (1979).
20. Koch, H.W.; Motz, J.W.: Bremsstrahlung Cross Section Formulas and Related Data, Rev. Mod. Phys. 31, 920 (1959).

21. Kissel, L.; Quarles,; Pratt, R.H.: Shape Functions for Atomic-Field Bremsstrahlung from Electrons of Kinetic Energy 1-500 keV on Selected Neutral Atoms $1 \leq Z \leq 92$, ADNDT 28, 381 (1983).
22. Bernhardi, K.; Haug, H.; Wiesemann, K.: Differential Bremsstrahlung Cross Sections of Electrons with Unscreened Nuclei of Low Atomic Numbers, ADNDT 28, 461 (1983).

C 3. オージュ電子

23. Walters, D.L.; Bhalla, C.P.: Nonrelativistic K-Shell Auger Rates and Matrix Elements for $4 \leq A \leq 54$, AD 3, 301 (1971).
24. Cogldan, W.A.; Clausing, R.E.: Auger Catalog: Calculated Transition Energies Listed by Energy and Element, AD 5, 317 (1973).
25. Cogldan, W.A.; Clausing, R.E.: Directory to Auger Electron Data-1973, AD 5, 471 (1973).
26. Chen, M.H. et al.: Theoretical L-Shell Coster-Kronig Energies $11 \leq Z \leq 103$, ADNDT 19, 97 (1977).
27. Larkins, F.P.: Semiempirical Auger-Electron Energies for Elements $10 \leq Z \leq 100$, ADNDT 20, 311 (1979), Erratum 23, 587 (1979) Functions, and Photon Scattering Cross Sections, J. Phys. Σ Chem.
28. Chen, M.H.; Crasemann, B.; Mark, H.: Relativistic Radiationless Transition Probabilities for Atomic K- and L-Shells, ADNDT 24, 13 (1979).
29. Gardner, R.K.; Gray, T.J.: Cross Sections for K-Shell Ionization, X-Ray Production, or Auger Electron Production by Electron Impact, ADNDT 21, 515 (1978), Erratum 24, 281 (1979).
30. Hardt, T.L.; Watson, R.L.: Cross Sections for L-Shell X-ray and Auger Electron Production by Heavy Ion, ADNDT 17, 107 (1976).

C 4. 内殻電離

31. Khandelwal, G.S.; Choi, B.H.; Merzbacher, E.: Tables for Born Approximation Calculations of K- and L-Subshell Ionization by Protons and Other Charged Particles, AD 1, 103 (1969), Erratum AD 5, 315 (1973).
32. Choi, B-H.; Merzbacher, E.; Khandelwal, G.S.: Tables for Born Approximation Calculations of L-Subshell Ionization by Simple Heavy Charged Particles, AD 5, 291 (1973).
33. Rutledge, C.H.; Watson, R.L.: Cross Sections for K-Shell Ionization by ^1H , ^2H , ^3He and ^4He Ion Impact, ADNDT 12, 12, 195 (1973).
34. McGuire, J.H.: Predictions of Multiple K- and L-Shell Ionization by Alpha-Particle Impact on Atoms with Z=10-100, ADNDT 12, 195 (1973).
35. Hansteen, M.; Johnsen, O.M.; Kocbach, L.: Predictions of Inner-Shell Coulomb Ionization by Heavy Charged Particles, ADNDT 15, 305 (1973).
36. Rice, R.; Basbas, G.; McDaniel, F.D.: Extended Tables for Plane-Wave Born-Approximation Calculations of Direct Coulomb Ionization of the K-Shell by Heavy Charged Particles, ADNDT 20, 503 (1977).
37. Benka, O.; Kropf, A.: Tables for Plane-Wave Born-Approximation Calculation of K-and L-Shell Ionization by Protons, ADNDT 22, 219 (1978).
38. Johnson, D.E.; Basbas, G.; McDaniel, F.D.: Nonrelativistic Plane-Wave Born-Approximation Calculations of Direct Coulomb M-Subshell Ionizationl by Charged Particles, ADNDT 24, 1 (1979).
39. Paul, H.: K-Shell Ionization by Light Ions: A Graphical Comparison of Cross Sections, ADNDT 24, 243 (1979).

その他、文献(82), (83)を見よ。

C 5. 陽電子相互作用

40. Singru, R.M.; Lal, K.B.; Tao, S.J.: Positron-Annihilation Data Tables, ADNDT 17, 271 (1976).
41. Azuelos, G.; Kitching, J.E.: The Probability of Positron-Annihilation-in-Flight for Allowed Beta Decay, ADNDT 17, 103 (1976).
42. Singru, R.M.; Lal, K.B.; Tao, S.J.; Lambrecht, R.M.: Positron-Annihilation Data Tables, ADNDT 20, 475 (1977).

なお、衝突阻止能については、Seltzer, Bergenの評価(文献())がある。

C 6. イオンの電荷状態

43. Betz, H.D.: Charge States and Charge-Changing Cross Sections of Fast Heavy Ions Penetrating through Gaseous and Solid Media, Rev. Mod. Phys. 44, 465 (1972).
44. Datz, S. et al.: Charge States of 15-140 MeV Bromine Ions and 15-162-MeV Iodine Ions in Solid and Gaseous Media, AD 2, 273 (1971).
45. Wittkower, A.B.; Betz, H.D.: Equilibrium-Charge-State Distributions of Energetic Ions ($Z > 2$) in Gaseous and Solid Media, AD 5, 113 (1973).
46. Tawara, H.: Cross Sections for Charge Transfer of Hydrogen Beams in Gases and Vapors in the Energy Range 10 eV-10 keV, ADNDT 22, 491 (1978).

C 7. 光子断面積、吸収係数、減衰係数

1. Storm, E.; Israel, H.I.: Photon Cross Sections from 1 keV to 100 MeV for Elements Z=1 to Z=100, NDT A7, 565 (1970).
2. Hudson, R.D.; Kieffer, L.J.: Compilation of Atomic Ultraviolet Photoabsorption Cross Sections for Wavelengths between 3000 and 10 Å, AD 2, 205 (1971).
3. Hubbell, J.H.: Survey of Photon-Attenuation-Coefficient Measurements to 10 eV to 100 GeV, AD 3, 241 (1971).

4. Veigele, W.J.: Photon Cross Sections from 0.1 keV to 1 MeV for Elements Z=1 to Z=94, AD 5, 51 (1973).
5. Ford, A.L.; Browne, J.C.: Rayleigh and Raman Cross Sections for the Hydrogen Molecule, AD 5, 305 (1973).
6. Brown, R.T.: Differential Cross Sections for Coherent Photon Scattering by Elements Z=2 through Z=26, ADNDT 15, 111 (1975).
7. Berman, B.L.: Atlas of Photoneutron Cross Sections Obtained with Monoenergetic Photons, ADNDT 15, 319 (1975).
8. Marr, G.V.; West, J.B.: Absolute Photoionizaton Cross-Section Tables for Helium, Neon, Argon, and Krypton in the VUV Spectral Regions, ADNDT 18, 497 (1976).
9. Flannery, M.R.; Tai, H.; Albritton, D.L.: Cross Sections for Photoionization of $H_2(X^2\Sigma_g^+, \nu_i=0-14)$ with the Formation of $H_2^+(X^2\Sigma_g^+, \nu_f=0-18)$, and Vibrational Overlaps and R_n -Centroids for the Associated Vibrational Transitions, ADNDT 20, 563 (1977).
10. West, J.B.; Morton, J.: Absolute Photoionizaton Cross-Section Tables for Xenon in the VUV and Soft X-Ray Regions, ADNDT 22, 103 (1978).
11. Montenegro, E.C.; Babbista, G.B.; Duarte, P.W.E.P.: K and L X-Ray Mass Attenuation Coefficients for Low-Z Materials, ADNDT 22, 131 (1978).
12. Kirby, K. et al.: Photoionization and Photoabsorption Cross Sections of He, O, N₂, and O₂ for Aeronomic Calculations, ADNDT 23, 63 (1978).
13. Band, I.M.; Kharitonov, Yu.I.; Trzhaskovskaya, M.: Photoionization Cross Sections and Photoelectron Angular Distributions for X-Ray Line Energies in the Range 0.132-4.509 keV. Targets: $1 \leq A \leq 100$, ADNDT 23, 443 (1979).

14. Hofsaess, D.: Photoionization Cross Sections Calculated by Scaled Thomas-Fermi Method ($h\nu \geq 50$ eV), ADNDT 24, 285 (1979).
15. Huang, K.-N.; Johnson, W.R.; Cheng, K.T.: Theoretical Photoionization Parameters for the Noble Gases Argon, Krypton, and Xenon, ADNDT 26, 33 (1981).
16. Hubbell, J.H. et al.: Atomic Form Factors, Incoherent Scattering Functions, and Photon Scattering Cross Sections, J. Phys. Chem. Ref. Data 4, 471 (1975).
17. Hubbell, J.H.: Present Status of Photon Cross Section Data 100 eV to 100 GeV, Natl. Bur. Stands. (U.S.), Spec. Publ. 461, pp. 268 (1977).
18. Hubbell, J.H.; Gimm, H.A.; Fverbø, I: Pair, Triplet, and Total Atomic Cross Section (and Mass Attenuation Coefficients) for 1 MeV - 100 GeV Photons in Elements Z = 1 to 100, J. Phys. Chem. Ref. Data 9, 1023 (1980).
19. Schaupp, D.; Schmacher, M.; Smend, F.; Rullhusen, P.; Hubbell, J. H.: Small-Angle Rayleigh Scattering of Photons at High Energies: Tabulations of Relativistic HFS Modified Atomic Form Factors, J. Phys. Chem. Ref. Data 12, 467 (1983).
20. Henke, B.L. et al.: Low Energy X-Ray Interaction Coefficients: Photoabsorption, Scattering, and Reflection, 100-2000 eV, ADNDT 27, 1 (1982).
21. Deslattes, R.D.: Estimations of X-Ray Attenuation Coefficients for the Elements and Their Compounds, Acta Cryst. A25, 89 (1969).
22. Lorentz, A.: Compilations and Evaluations of Data on the Interaction of Electromagnetic Radiation in Matter, INDC (NDS) -94/LN (Vienna:IAEA) (1978).
23. Plechaty, E.F.; Terrall, J.R.: An Integrated System for Production of Neutronics and Photonics Calculational Constants Photon

Cross Sections 1 keV to 100 MeV, UCRL-50400, Vol. 6 (Univ.of Calif.) (1968).

24. Simmons, G.L.; Hubbell, J.H.: Comparison of Photon Interaction Cross Section Data Sets. 1. Storm-Israel and ENDF/B, NBS-10 668 (National Bureau of Standards, Washington, DC, USA), (1971).
25. White, D.R.; Fitzgerald, M.: Calculated Attenuation and Energy Absorption Coefficients for ICRP Reference Man (1975) Organs and Tissues, Health Phys. 33, 73 (1977).
26. Hubbell, J.H.: Photon Cross Section, Attenuation Coefficients and Energy Absorption Coefficients from 10 keV to 100 GeV, NSRDS- NBS 29 (1969).
27. Hubbell, J.H.: Photon Mass Attenuation and Energy-Absorption Coefficients from 1 keV to 20 MeV, Int. J. Appl. Radiat. Isot. 33, 1269 (1968).
28. Berger, M.J.: Energy Deposition in Water by Photons from Point Isotropic Sources, NM/MIRD Pamphlet 2. (1968).

- C 8. 電子（ベータ粒子も含む）の透過・吸収・阻止能
 1. Berger, M.J.; Seltzer, S.M.: Stopping Powers and Ranges of Electrons and Positrons (2nd ed.), NBSIR 82-2550-A (USDOC; NBS: Washington, DC) (1982).
 2. Seltzer, S.M.; Berger, M.J.: Evaluation of the Collision Stopping Powers of Elements and Compounds for Electrons and Positrons, Int. J. Appl. Radiat. Isoto. 33, 1189 (1982).
 3. Berger, M.J.: Distribution of Absorbed Dose around Point Sources of Electrons and Beta Particles in Water and Other Media, J. Nucl. Med. 12, Suppl. No. 5, 5 (1971).
 4. Cross, W.G.: Tables of Beta Dose Distributions, AECL-2793 (1967).
 5. Cross, W.G.: Variation of Beta Dose Attenuation in Different Media, Phys. Med. Biol. 13, 611 (1968).

6. Spencer, L.V.: Energy Dissipation by Fast Electrons, NBS Monograph No. 1 (Washington, DC: National Bureau of Standards) (1959).
7. Berger, M.J.; Seltzer, S.M.: Table of Energy Losses and Ranges of Electrons and Positrons, in *Studies in Penetration of Charged Particles in Matter*, Nuclear Science Series Report NO. 39, National Academy of Science-National Research Council Publication 1133 (Washington, DC; NAS) (1964).
8. ICRU: Radiation Dosimetry: Electrons with Initial Energies between 1 and 50 MeV, Report No. 21 (ICRU Publications, P.O. Box 30165 Washington, DC, USA) (1972).
9. Nelms, A.T.: Energy Loss and Range of Electrons and Positrons, NBS Circular 577 (National Bureau of Standards, Washington, DC, USA) (1956).
10. Nelms, A.T.: Supplement to NBS Circular 577 (1956), (National Bureau of Standards, Washington, DC, USA) (1958).
11. Berger, M.J.; Seltzer, S.M.: Additional Stopping Power and Range Tables for Protons, Mesons, and Electrons. NASA SP-3016 (1966).
12. Berger, M.J.; Seltzer, S.M.; Domen, S.R.; Lampertj, P.J.; Stopping Power Ratios for Electrons Dosimetry with Ionization Chambers, IAEA-SM-193/39, 589 (1975).
13. Stopping Power Study Group: Stopping Powers for Use with Cavity Chambers, NBS Handbook 79, Washington, DC. (1961).
14. ICRU: Linear Energy Transfer, Report No. 16 (ICRU Publications, Washington, DC, USA) (1970).
15. Sugiyama, H.; Energy Loss and Range of Electrons below 10 keV, Jap. J. Appl. Phys. 15, 1779 (1976).
16. Nishidai, T.; Fundamental Studies on Electron Penetration in Radiotherapy, Nipp. Acta Radiol. 38, 238 (1979).

17. Ashley, J.C.; Tung, C.J.; Ritchie, R.H.: Electron Interaction Cross Sections in Al and Al₂O₃: Calculations of Mean Free Paths, Stopping Powers, and Electron Slowing-Down Spectra, IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-22 2533 (1975).
18. Ashley, J.C.; Tung, C.J.; Ritchie, R.H.; Anderson, V.E.: Calculations of Mean Free Paths and Stopping Powers of Low Energy Electrons (10 keV) in Solid Using a Statistical Model, IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-23 1833 (1976).
19. Ashley, J.C.: Inelastic Interactions of Low-Energy Electrons with Organic Solids: Simple Formulae for Mean Free Paths and Stopping Powers, IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-27 1454 (1980).
20. Nahum, A.E.: Water/Air Mass Stopping Power Ratios for Megavoltage Photons and Electron Beams, Phys. Med. Biol. 23, 24 (1978).

C 9. 陽子, 重陽子, 重粒子の阻止能, 飛程

1. Andersen, H.H.; Ziegler, J.F.: Hydrogen Stopping Powers and Ranges in All Elements, Volume 3 of *The Stopping Powers and Range of Ions in Matter*, Pergamon Press, New York (1977).
2. Ziegler, J.F.: Stopping Cross Sections for Energetic Ions in All Elements, Volume 5 of *The Stopping Powers and Ranges of Ions in Matter*, Pergamon Press, New York (1977).
3. Ziegler, J.F.; Helium: Stopping Powers and Ranges in All Elemental Matter, Volume 4 of *The Stopping Powers and Ranges of Ions in Matter*, Pergamon Press, New York (1977).
4. Andersen, H.H.: Bibliography and Index of Experimental Range and Stopping Power Data, Volume 2 of *The Stopping Powers and Ranges of Ions in Matter*, Pergamon Press, New York (1977).
5. Littmark, U.; Ziegler, J.F.: Range Distributions for Energetic Ions in All Elements, Volume 6 of *The Stopping Powers and Ranges*

- of Ions in Matter*, Pergamon Press, New York (1980).
6. Janni, J.F.: Proton Range-Energy Tables, 1 keV-10 GeV, Energy Loss, Path Length, Time-of-Flight, Straggling, Multiple Scattering, and Nuclear Interaction Probability, Part 1. for 63 Compounds, ADNDT 27, 147 (1982), and Part 2. for 92 Elements, ibid 27, 341 (1982).
 7. Bichsel, H.; Tschalaer, C.: A Range-Energy Table for Heavy Particles in Silicon, NDT A3, 343 (1967).
 8. Northcliffe, L.C.; Schilling, R.F.: Range and Stopping Power Tables for Heavy Ions, NDT A7, 233 (1970).
 9. Ziegler, J.F.; Chu, W.K.: Stopping Cross Sections and Backscattering Factors for ${}^4\text{He}$ Ions in Matter, $Z=1-92$, $E({}^4\text{He})=400-4000$ keV, ADNDT 13, 463 (1974).
 10. Winsberg, L.: Ranges of Projectiles with $8 \leq Z \leq 20$ in Ti, Fe, Ni, Cu, Ag and Au for Energies of 0.0125 to 12.0 MeV/Nucleon, ADNDT 20, 389 (1977).
 11. Land, D.J.; Brennan, J.G.: Electronic Stopping Power of Low-Velocity Ions, Ions: C-Xe, Targets: H-Xe, ADNDT 22, 235 (1978).
 12. Barkas, W.H.; Berger, M.J.: Table of Energy Losses and Ranges of Heavy Charged Particles, in *Studies in Penetration of Charged Particles in Matter*, Nuclear Science Series Report No. 39, National Academy of Science-National Research Council Publication 1133 (Washington, DC; NAS) (1964).
 13. Whaling, W.: The Energy Loss of Charged Particles in Matter, Handbuch der Physik. 34, 193 (1958), Springer-Verlag.
 14. Thwaites, D.I.; Watt, D.E.: Stopping Power Ratios for Neutrons and Alpha Particles in Tissue Equivalent Media, 3rd Sympo. Neutron Dosimetry in Biology and Medicine, Neuherberg/Munchen, May 1977, pp.45 (1978).

15. Dennis, J.A.: Energy Loss Characteristics of Heavy Ions in Nitrogen, Carbon Dioxide, Oxygen, Hydrocarbon Gases, and Tradescantia Tissue, AERE-M2346 (1971).
16. Oldenberg, U.; Booz, J.: Mass Stopping Power and Path Length of Neutron Produced Reciols in Tissue and Tissue Equivalent Materials, EUR 4786 (1972).
17. Lindhard, J.; Scharff, M.; Schiott, H.E.: Range Concepts and Heavy Ion Ranges, Note on Atomic Collisions. II., K. Dan. Vidensk. Selsk. Mat. Fys. Medd., 33, No. 14 (1963).
18. Williamson, C.F.; Boujot, J.P.; Picard, J.: Tables of Range and Stopping Power of Chemical Elements for Charged Particles of Energy 0.5 to 500 MeV, CEA-R-3042 (1966).
19. Williamson, C.F.; Boujot, J.P.; Picard, J.: Erratum: Tables of Range and Stopping Power of Chemical Elements for Charged Particles of Energy 0.5 to 500 MeV, CEA-2189 (1962).
20. Williamson, C.F.; Boujot, J.P.: Tables of Range and Rate of Energy Loss of Chemical Elements for Charged Particles 0.5 to 150 MeV, CEA-2189 (1962).
21. Bichsel, H.: Stopping Power Data for Neutron and Pion Dosimetry with Ionization Chambers, Univ. of Washington, Internal Report 77, 5 (1977).
22. Steward, P.G. and Wallace, R.: Calculation of Stopping Power and Range-Energy Values for Any Heavy Ion in Nongaseous Media, UCRL-17314 (1966).
23. Wallace, R., Littor, G.M. and Steward, P.G.: Stopping Power, Range, and Terminal Ionization of Any Nucleus with 0.01 to 500 MeV/amu in Any Nongaseous Material, Including Nuclear Effects, UCRL-19391 (1969).

24. Steward, P.G.: Stopping Power and Range for Any Nucleus in the Specific Energy Interval 0.01- to 500-MeV/amu in Any Nongaseous Material (thesis), UCRL-18127 (1968).
25. Boring, J.W.; Johnson, R.E.: The Interaction of Heavy Ions with Matter, ORO-2911-17 (1976).
26. Ahlan, S.P.: Theoretical and Experimental Aspects of the Energy Loss of Relativistic Heavily Ionizing Particles, Rev. Mod. Phys., 52, 121-173 (1980).
27. ICRU: Basic Aspects of High Energy Particle Interactions and Radiation Dosimetry, ICRU Report 28, Washington, D.C. (1978).
28. Turner, J.E.: Stopping Powers and Ranges of Charged Particles ,CRC Handbook, Radiation Measurement and Protection, CRC Press, Inc., (1978).
29. Biersack, J.P.; Ernst, E.; Monge, A.; Roth, S.: Tables of Electronic and Nuclear Stopping Powers, and Energy Straggling for Low Energy Ions, HMI-B 175 (1975).
30. Inokuti, M.: Inelastic Collisions of Fast Charged Particles with Atoms and Molecules - The Bethe Theory Revisited, Rev. Mod. Phys. 43, 297 (1971).
31. Inokuti, M.; Itikawa, Y.; Turner, J.E.: Addenda: Inelastic Collisions of Fast Charged Particles with Atoms and Molecules - The Bethe Theory Revisited, Rev. Mod. Phys. 50, 23 (1978).

C 10. W値(電子)

1. Cole, A.: Absorption of 20-eV to 50,000-eV Electron Beams in Air and Plastic, Radiat. Res. 38, 7 (1969).
2. Combecher, D.: W-values of Low Energy Electrons for Several Gases, in Proc. 3rd Symp. on Neutron Dosimetry in Biology and Medicine, Neuherberg/Munchen, May 1977, FUR-5848, pp. 97-106 (1978).

3. Myers, I.I.: Ionization, in *Radiation Dosimetry*, Vol.1 Ed. Attix, F.H.; W.C.Roesch, W.C., Academic Press (1968).
4. ICRU: Average Energy Required to Produce an Ion Pair, ICRU Report No.31 (1979).
5. Combecher, D.: Measurement of W-Values of Low-Energy Electrons in Several Gases, Radiat. Res. 84, 189 (1980).
6. Smith, B.G.R.; Booz, J.: Experimental Results on W-Values and Transmission of Low Energy Electrons in Gases. in Proc. 6th Symp. on Microdosimetry, Brussels, May 1978, EUR-0604, pp.759-775, (1978).

C 11. W值(中性子)

7. Bewley, D.K.: Neutron Dosimetry in Biology and Medicine, in Proc. 2nd Symp. on Neutron Dosimetry in Biology and Medicine, Neuherberg/Munchen, September 1974, EUR-5273, pp.5 (1975).
8. Chemtob, M. et al.: Some Experimental Results on W-values for Heavy Particles, Phys. Med. Biol. 22, 208 (1977).
9. Delafield, H.J.; Harrison, K.G.: Ionization Measurements and the Derivation of \bar{W}_n in Acetylene and Carbon Dioxide Irradiated Irradiated with Neutrons, Phys. Med. Biol. 24, 271 (1979).
10. Dennis, J.A.: Computed Ionization and Kerma Values in Neutron Irradiated Gases, Phys. Med. Biol., 18, 379 (1973).
11. Goodman, L.J.: \bar{W}_n Computed from Recent Measurements of W for Charged Particles, in Proc. 3rd Symp. on Neutron Dosimetry in Biology and Medicine, Neuherberg/Munchen, May 1977, EUR-5848, pp. 61-74 (1978).
12. Larson, H.V.: 1958, Energy Loss per Ion Pair for Protons in Various Gases, Phys. Rev. 112, 1927 (1958).
13. Leonard, B.E.; Boring, J.W.: The Average Energy per Ion Pair W,

for Hydrogen and Oxygen Ions in a Tissue Equivalent Gas, Radiat. Res. 55, 1 (1973).

14. Macdonald, J.R.; Sidenius, G.: The Total Ionization in Methane of Ions with $1 < Z < 22$ at Energies from 10 to 120 keV, Phys. Lett. 29A, 543 (1969).

C 12. カーマ (中性子)

15. Caswell, R.S.; Coyne, J.J.; Randolph, M.L.: Kerma, Factors of Elements and Compounds for Neutron Energies below 30 MeV, Int. J. Appl. Radiat. Isot. 33, 1227 (1982).
16. Alsmiller, J.R.; Barish, J.: Neutron Kerma Factors for H, C, N, O and Tissue in the Energy Range of 20 - 70 MeV, Health Phys. 33, 98 (1977).
17. Bassel, R.H.; Herling, G.H.: Energy Transfer to Hydrogen by Neutrons from 30 to 100 MeV, Radiat. Res. 69, 210 (1977).
18. ICRU: Neutron Dosimetry in Biology and Medicine, Appendix to ICRU Report No. 26 (1977).
19. Caswell, R.S.; Coyne, J.J.: Interaction of Neutron and Secondary Charged Particle Spectra, Radiat. Res. 52, 448 (1972).
20. Dennis, J.A.: Computed Ionization and Kerma Values in Neutron Irradiated Gases, Phys. Med. Biol. 18, 379 (1973).

5. 59年度以降の計画

まえがき、及びWG会合の議題からわかるように、本WGの活動は、当面医学・生物学分野における放射線のドシメトリに関する基礎データを編集し、データブックとして発表することを目標にしている。この立場からデータの現状を調査し、又データのニーズについても、線量測定とその標準化の立場から検討されてきたが、次に述べるいくつかの項目については、まだほとんど議論されていない。すなわち、

- (1) 光子断面積、吸収係数、減弱係数、エネルギー転移係数など、光子と物質との相互作用に関するデータ。
 - (2) 半減期、放射線のエネルギーと放出強度、放射線量率定数（空気カーマ率定数）など、放射性核種の崩壊に関する核データ、および
 - (3) オージェ効果、制動放射、X線蛍光収率などのデータ、
- がそれである。

59年度以降は、これらのデータに重点を置いて、調査を進める予定である。このうち、崩壊核データについては、昭和58年度、及び昭和59年度（予定）において、日本原子力研究所の委託により放医研で調査が行なわれている。本WGでは、その調査報告の活用について検討することが予定されている。

データブックの作成に当っては、編集されたデータの質の程度を利用者が理解できるよう、生の測定データもつけ加える必要がある。どのような形でそれを実現するか、今後取り上げるべき問題のひとつと考えている。

さらに、データの利用についても、利用者がそれを引き出しやすい形、たとえば磁気テープなどの媒体に書き込まれていると、便利である。データ利用の計算機プログラムなど、データ利用方法、利用技術の開発についても検討する必要があろう。

付録 1. 医学用原子分子・原子核データワーキンググループ委員

グループリーダー 尾 内 能 夫 (癌 研)
伊 藤 彰 (東 大)
岩 波 康 茂 (北里大)
喜多尾 憲 助 (放医研)
白 貝 彰 宏 (放医研)
高 田 信 久 (電総研)
高 橋 旦 (理 研)
中 井 洋 太 (原 研)
沼宮内 強 雄 (原 研)
平 岡 武 (放医研)
龍 福 廣 (V I C)

付録2. ワーキンググループ会合と主要議事

第 1 回

昭和 57 年 8 月 30 日

原研本部

議 事

- 1) 経過報告
- 2) 今後の進め方について

第 2 回

昭和 57 年 12 月 16 日

原研、東海研究所

議 事

- 1) 英国における医学生物学データ活動
- 2) ICRU のデータ活動
- 3) 核構造に関するデータ

第 3 回

昭和 58 年 1 月 28 日

原研本部

議 事

- 1) 核反応に関するデータ
- 2) 低エネルギー電子の阻止能
- 3) 阻止能の "Mixture Effect"

第 4 回

昭和 58 年 2 月 8 日

原研本部

議 事

- 1) IAEA における医学用核データ活動
- 2) Low Energy Electron の水中における Track Simulation

第 5 回

昭和 58 年 3 月 23 日

原研本部

議 事

- 1) 荷電粒子の阻止能
- 2) Track 構造理論と微生物胞子に対する重イオンの致死効果

第 6 回

昭和 58 年 5 月 18 日

電子技術総合研究所

議 事

- 1) 中性子一次標準の現状
- 2) X 線一次標準の設定

第 7 回

昭和 58 年 6 月 22 日

原研本部

議 事

- 1) γ 線照射線量標準の設定
- 2) 医学用線量標準の現状

第 8 回

昭和 58 年 7 月 25 日

原研本部

議 事

- 1) 報告書の構成・内容の検討

第 9 回

昭和 58 年 9 月 26 日

原研本部

議 事

- 1) 報告書の構成・内容の検討

第 10 回

昭和 58 年 11 月 14 日

原研本部

議 事

- 1) 報告書の作成・内容の検討

第 11 回

昭和 59 年 1 月 23 日

癌 研

議 事

- 1) 吸収線量変換係数について
- 2) 報告書の構成・内容の検討

第 12 回

昭和 59 年 3 月 5 日

原研本部

議 事

1) 報告書原稿の検討