

資料紹介

中性子治療・陽子治療に必要な核データ

---- IAEA-TECDOC-992 (1997) と ICRU 報告案 (1998) ----

(株)データ工学

喜多尾憲助

kitaoken@aol.com

身体内部にあるガン組織をねらって、体外から放射線を照射すると、どうしても放射線は正常な組織を通過しなければならない。又ガンが常にゆで卵の黄身と白身のように、正常な組織から明瞭に区分されているとは限らず、境界などでは互いに入り組んだ状態になっていることもあり、ガンの新たな増殖を押さえるには正常な組織をも巻き込んで照射しなければならない。ガン治療の究極目標は、正常な細胞に障害を残すことなく、器官がもつ正常な機能を損なうことなく、ガンを消滅させることである。先般の核データ研究会で紹介されたような内臓の動きに同期させて照射するという技術も、ホウ素捕獲治療用加速器の提案も、その目標に沿ったものである。

中性子(速中性子)治療は中性子がターゲットであるガン組織構成元素の原子核と衝突したときに生ずる荷電粒子、とくに陽子がエネルギー吸収に寄与する。それならばはじめから陽子(又はその他の荷電粒子)を使えば良いではないか、ビームハンドリングの点からも荷電粒子がよい。とはいうものの中中性子はもはや必要なし、ということにはならない。なぜか? 核データよりも、そっちの話のほうに興味があるという向きもあろうが、残念ながら、それはこの稿の目的ではない。ただ放射線治療というものは、ベクレルが発見されたばかりのラジウムを自分の腕につけ、放射線による生物効果を試して以来、営々と蓄積された技術の上に成立っている。そして今日医療施設に広く普及しているコバルトや直線加速器による光子治療を抜きにしてはそれを語ることはできない、ということだけを指摘しておく。

さて、IAEA-TECDOC-992 (タイトル: 中性子治療に必要な核データの現状と将来) の目次は次のようになっている。なおこの資料は核データセンターが所蔵している (資料番号 14409)。

1. 中性子治療に必要な核データ。(2.5 頁)
2. 中性子治療の現状と成果。(25 頁, 図版 8 枚, 文献数 69)
3. 吸収線量決定のためのプロトコル。(16 頁, 図版 5 枚, 文献数 49)
4. 中性子治療用 ${}^9\text{Be}(p,n)$ 中性子源反応。(10.5 頁, 図版 10 枚, 文献数 16)

5. コリメータと遮へい。(9.5 頁, 図版 2 枚, 文献数 70)

6. カーマ係数。(18.5 頁, 図版 13 枚, 文献数 29)

7. 吸収線量と線質。(11 頁, 図版 9 枚, 文献数 41)

この資料の第 1 章はいわば序文と要約である。第 3 章から (第 5 章を除き) 7 章までは、中性子のドシメトリに割かれている。ドシメトリ, すなわち吸収線量は, 治療効果のパラメータである。資料は言う。「臨床上及び放射線生物学上の根拠に基づき, 中性子について臨床ドシメトリで要求される正確さは, 少なくとも光子の臨床ドシメトリと同様な正確さでなければならない。それは一般的に $\pm 3.5\%$ である。」

臨床目的での中性子ドシメトリは (壁材も封入気体も) 「組織等価」の電離箱によって行われる。中性子断面積の複雑なエネルギー依存及び核種依存は, 真の組織等価電離箱の作成を不可能にしている。しかし正確なドシメトリのためには, 中性子相互作用のマイクロ断面積, 生成荷電粒子スペクトル, 及びカーマ, すなわち荷電粒子に移される全運動エネルギーの値が, 組織・臓器及び検出器を構成する物質のすべての原子核について知らなければならない。本資料は「実際には, これらの量の不確かさは, とくに 15MeV 以上の中性子エネルギーについてかなり大きい」と指摘し, いくつかの元素に対するカーマの測定値と評価値とを比較してみせている。

中性子治療の照射に先立つ行われる治療計画では, 身体に入射した中性子の輸送問題を解かなければならない。本報告では, 輸送計算プログラムをいくつか(MCNP, LAHET など)と, 評価済み断面積データ・ライブラリの名前だけを載せ, 僅かなコメントをつけているのみである。断面積及び放出粒子スペクトルについても GNASH, ALICE などのプログラムを列挙するだけである。

最後の章では, いわゆる線質の問題が取り上げられている。吸収線量が同じでも引き起こす生物効果が異なる場合があることは, 読者もすでにご存知のことであろう。

前後するが, 本資料の第 3 章は線量決定における統一したプロトコル設定の重要性をとりあげる。米国とヨーロッパで別個に作ったプロトコルに従って求めた吸収線量には, 8%の差が生じたとの報告は指摘している。別々の施設で行われた治療経験の交換と蓄積は, 今後の中性子治療の適応についての判断, 治療計画における吸収線量, 分割照射方式などの最適化に役立つが, そのためにも統一したプロトコルによる吸収線量の普遍性が保証されなければならない。

IAEA の TECDOC が中性子治療の現状を紹介し, 治療ビームの輸送, ドシメトリに必要な核データやカーマ係数について, 現状をおさらいしたものであるのに対し, 本稿で取り上げたもう一つの資料, ICRU (国際放射線単位測定委員会) 報告案は, それをもう一歩進めて, 核データとして, これこれを使うよう勧告している。本報告に載せた断面積データと軽放出

核 ($A \leq 4$) と反跳粒子 ($A > 4$) のスペクトル, 及び弾性散乱角分布は唯一かつ包括的情報であり, 実験値との一致も良いことを強調している。この報告は ICRU が, はやりの言葉で言えばグローバルスタンダードとして提案したものといえよう。かねがね, 核データ活動の一つとして, ユーザー向けのデータブックを作ろうではないか, という話がある。この報告はそのような資料を作るさいの雛型として参考になるものである。

この報告案は, 昨 1998 年に開かれた ICRU の総会(千葉)で議論された文書(タイトル: 中性子及び陽子治療ならびに放射線防護向け核データ)で, 以下のような構成になっている。報告作成委員会の主査は M.B.Chadwick (LLNL) である。

1. 序文 (12 頁)
2. 定義 (8 頁)
3. 中性子源と陽子源 (23 頁, 図版 17 枚)
4. 実験データ (20 頁, 図版 6 枚)
5. 中性子-陽子散乱 (9 頁, 図版 2 枚)
6. 評価と計算の手法 (18 頁)
7. 評価と測定の比較 (27 頁, 図版 39 枚)
8. 勧告の要約 (3 頁)

付録 A ENDF 情報

付録 B データ表

付録 C 中性子データ

付録 D 陽子データ

参考・引用文献 (文献数 448)

なお筆者が入手したコピーには付録の部分がなかったもので, 詳細はわからない。付録 C 及び D はコンパクト・ディスクに収められるようである。なお ICRU 報告の類は日本アイソトープ協会出版課を通して入手することができる。

第 1 章は目的とテーマの範囲, 対象元素, 既刊資料の概要が書かれている。中性子データは 100MeV まで (現在治療で使われる中性子エネルギーの上限は 70MeV である)。陽子は 250MeV まで, ただし弾性外 (non-elastic) 断面積は 300MeV までが収められている。この報告に載っている評価済み断面積とカーマ係数は ENDF から, 又これに載っていないデータは GNASH による。対象元素は水素, 炭素, 酸素はじめ, Si, Ca, N, P, またコリメータや遮へいなどの材料として Al, Fe, Cu, W, Pb が選ばれている。(遮へい材として Bi も必要と思われるが載っていない)

報告ではカーマ係数の英語として kerma coefficient を kerma factor の代わりに使う。factor は無次元の比例係数, つまり同じ次元の二つの量の比を表すのに使い, coefficient は次元をもつ係数に使うという国際規格 (ISO 規格) に従っている。又この報告では, 炉物理屋

にはなじみの薄い中性子フルエンスという用語が使われている。

Be+p 及び Be+d 中性子源からの中性子スペクトル、角分布が掲げられているのは第 3 章である。エネルギースペクトルの計算値は LAHET による。陽子治療に使うビームは、腫瘍の大きさにあわせて適当な厚さの物質 (degrader という) を通過させてビーム・エネルギーを変え、腫瘍全体に必要な吸収線量が与えられるようにする。このようにして得られる陽子ビームのエネルギー分布は、2つのガウス関数をたたみこんだ LAHET が良く合うという文献を引用している。

第 4 章には、中性子に対する実験断面積を、20MeV 以下と 20MeV 以上に分けて取り上げる。20MeV までは 14MeV 中性子源による実験データが豊富であり、カーマ係数なども良く測定されているからであろう。この章ではマイクロ断面積から得られたカーマ係数、又 C, N, O, Mg, Al, Si, Fe, Zr, A-150 プラスチックに対する積分測定からのカーマ係数も表示されている。

第 6 章は Hauser-Feshbach 及び前平衡の理論を用いた計算, Intranuclear Cascade model の計算, ENDF 評価について概観し、この報告で使われた計算方法が示される。又モデル計算を最適化するための実験データの使い方や原子核モデルの説明もある。カーマ係数の計算も 20MeV 以上とそれ以下に分けて示される。

第 7 章では、中性子及び陽子断面積、中性子カーマ係数及びカーマ比について、実験と計算とを比較する。又治療ビームについて PEREGRINE と MCNPX による積分計算と実験の比較が示されている。

評価断面積における不確かさについて、仮定されるモデルパラメータ (例えば準位密度、透過係数など) の不確かさからもたらされるものと、モデルが与える近似の程度からもたらされるものがある、としている。評価値の不確かさについて、中性子全断面積は 2% 以下、中性子及び陽子の全弾性外及び弾性散乱断面積について 5-10%、中性子及び陽子に対し角度積分した放出スペクトルで 20-30%、重陽子や α 粒子についてはしばしばこれより大きい、とする。二重微分放出スペクトルは、前方つまり断面積の大きいところで 20-40% である。身体に高エネルギー陽子を入射させると、核反応によって放射性核種が生成する。したがって PET (陽電子放射形コンピュータ断層撮影) 技術を使うと陽子治療ビームの位置決めを利用することができる。こうした放射性核種の生成断面積はかなり正確である。しかし 1 mb 程度になると不確かさは 5-10 倍になるという。なお核種生成断面積の評価が現在 IAEA の CRP (協力研究プログラム) のもとで進められている (INDC(NDC)-371 (1997))。GNASH は 160MeV までの入射エネルギーに対し、もっとも正確な値を与える。又カーマ係数については、水素の場合 10MeV 以下で 1%、10-100MeV で 1-2%、炭素でそれぞれ 5% と 10%、酸素で 5% と 15-20% とされている。

第 8 章は、この報告の中で勧告した内容の要約である。