

第2章 荷電粒子の加速法

2.1 加速粒子の種類と性質

荷電粒子の電氣的加速は非常に広い質量範囲に対して適用される。これらの粒子は電子、陽子、単原子イオンまたはそのクラスター（質量が 10^{-10} g、すなわち最も重い元素を9桁も上回る質量をもつマイクロ粒子とマクロ粒子）などの核種である。しかし、イオンの質量が増加すれば、加速効率を決める電荷質量比（ q/m ）は悪くなる。したがって、 U イオンより重い粒子を加速する加速器はまだ発達の初期段階にある。

医生物学用加速器で最も普通に使用される基本粒子を表2.1に示す。以下にこれらの粒子の性質を詳細に述べる。

電子は記号 e または e^- で表される。電子は電荷 $e = 1.602 \times 10^{-19}C$ をもつ安定粒子である。電子は主に自由電子として大量に得られるため、最も頻繁に加速される粒子である。また、大きな q/m 比をもつ電子は直接電子線治療または制動放射に変換後、光子線治療に間接的に使用される。放射線治療の他に、加速電子ビームは放射線殺菌や別種の放射線生物学的処理にしばしば採用される。

電子は加速器で加速される最も軽い荷電粒子である（表2.1）。次に軽い粒子である陽子より約1836倍も軽い。電子ボルト（ eV ）で表した電子の静止質量は約511keVである。

陽子は記号 p で表される。陽子は質量約 $1.67 \times 10^{-27}kg$ （静止質量938MeVに相当する）をもつ水素原子の原子核である。原子質量単位で表した陽子の質量は1.007276uである。現在 ^{12}C の質量の $1/12$ が標準単位原子質量 u 、 $1u = 1.660057 \times 10^{-27}kg$ 、である。陽子は正の単位電荷をもち、核子と呼ばれる基本粒子のひとつに分類される。利用頻度に関する限り、陽子は粒子加速技術において電子に次いで多い。医生物学の目的では、陽子は直接放射線治療に使用されるか、または変換されて間接的に中間子線治療や中性子線治療に使用される。さらに陽子は医療用放射性同位元素の生産に最もよく利用されている。

重陽子は記号 d で表される。重陽子は重水素の原子核である。すなわち、質量数 $A = 2$ の水素の同位元素で、その電荷と符号はともに陽子と同じである。重陽子は、主に医療の目的に使用される放射性核種の生産における核反応のように、多くの核反応に対し大きな反応断面積もつため、加速される粒子である。さらに多くの重陽子反応は放射線治療に利用

表2.1 医生物学用加速器で加速される粒子の基本パラメータ

粒子	静止質量 kg	静止エネルギー MeV	電荷 $\times 10^{-19}C$
電子	9.110×10^{-31}	0.511	- 1.602
陽子	1.673×10^{-27}	938.3	+ 1.602
重陽子	3.342×10^{-27}	1877	+ 1.602
粒子	6.664×10^{-27}	3733	+ 3.204

される重要な速中性子線源である。

アルファ粒子は記号 α で表される。粒子はヘリウム原子 ^4He の原子核である。粒子の質量は陽子の約4倍で、静止質量は約 $6.644 \times 10^{-27}\text{kg}$ または約3,733MeVである。粒子は単位電荷の2倍に等しい正電荷をもつ。

重イオンは原子番号2以上の元素のイオンである。今日の荷電粒子加速技術は周期律表でUまでのすべての元素のイオンを加速することが可能であるが、放射線治療の応用で特に重要なのはArイオンを含む軽い元素のイオンだけである(第5.1.3.1節, 図5.19)。実際は、「軽イオン」または「軽イオン加速器」という言葉はいつも同じ意味とは限らない。「軽イオン」という言葉の意味するものは重イオンの中でも軽いイオンである。

通常の状態では、原子は電氣的に中性である。原子は同数の電子と陽子を原子核の外と内にもつ。他の粒子と衝突するような十分強い相互作用を受けると、原子は1個またはそれ以上の電子を失う。そうなればもはや電氣的に中性ではなくなり、失った電子の数に等しい正電荷を帯びる。このような変化を受けた原子は正イオンである。例えば、もし炭素の中性原子 $^{12}_6\text{C}$ に電子ビームをぶつければ、炭素原子は2つの電子を失い、その結果 $^{12}_6\text{C}^{2+}$ が作られる。これは電荷 $q = +2$ をもつイオン化された正の炭素原子である。

イオンの質量はその構成要素(核子)の和で決定され、結合エネルギーおよび中性子と陽子の質量差が無視できるとき質量は次式で与えられる。

$$m_j \approx (Z + N)m_n = Am_n \quad (2.1)$$

ここで Z は原子番号、 $N = A - Z$ は原子核の中の中性子の数、 A は質量数、そして m_n は核子の質量である。

粒子の相対速度、相対論的質量：加速粒子ビームの最も有用なパラメータは運動エネルギー E_k である。粒子の速度は光速 c に対する相対速度によって表わされる。

$$\beta = \frac{v}{c} \quad (2.2)$$

ここで β は相対速度、 v は粒子の速度である。静止質量 m_0 をもつ粒子の運動エネルギー E_k と相対速度 β の間には次式の関係がある。

$$E_k = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \beta^2}} - m_0 c^2 \quad (2.3)$$

図2.1は異なる粒子の相対速度の運動エネルギー依存性を示す。左側の最初の曲線は最も軽い粒子の電子に相当する。電位差のある電場の中で粒子が得る加速度は質量に反比例するので、電子は非常に速く光速と同じくらいの速度になる。例えば、わずか10kVの電位差またはエネルギー10keVに対して電子の速度は光速の19.5%であるが、100kVの電位差では c の54.8%である。電子の特性曲線 $\beta = f(E_k)$ は電子加速器の放射線治療の応用において注目すべき特別のエネルギー領域があることを示している。大部分の電子加速器では、電子速度の光速からの差は10%以内である。このような電子は相対論的電子と呼ばれる。相対論的粒子の質量はよく知られた次の関係式で与えられる。

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad (2.4)$$

非相対論的領域では電子の相対速度は非常に小さく、 $\beta \ll 1$ であるので無視できる。そ

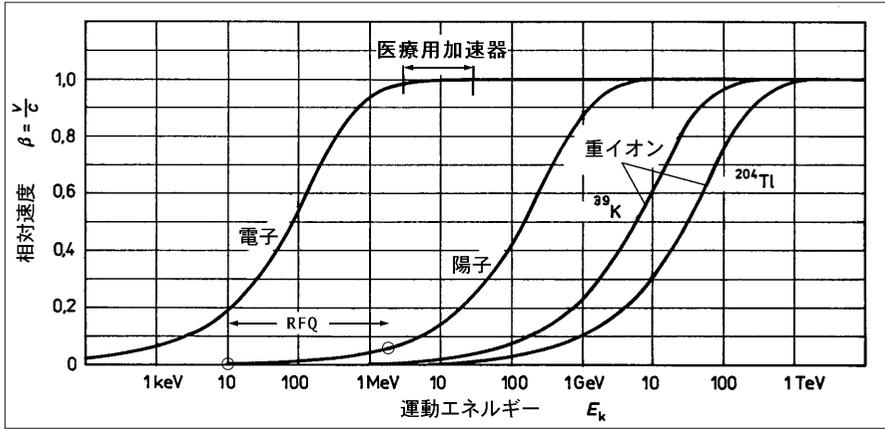


図2.1 電子，陽子，³⁹Kおよび²⁰⁴Tlイオンの相対速度 $\beta = v/c$ の運動エネルギー依存性

表2.2 運動エネルギー E_k に対する電子と陽子の相対速度 と相対論的質量
(E_t は電子の全エネルギー)

運動エネルギー E_k	電 子			陽 子	
	全エネルギー E_t [Mev]	相対速度 $\beta = v/c$	静止質量に対する相対論的質量の比	相対速度 $\beta = v/c$	静止質量に対する相対論的質量の比
10keV	0.521	0.1950	1.020	0.0046	1.0000
100keV	0.611	0.5483	1.196	0.0147	1.0001
200keV	0.711	0.6954	1.392	0.0208	1.0002
500keV	0.811	0.8629	1.979	0.0326	1.0005
1MeV	1.511	0.9411	2.957	0.0465	1.0011
2MeV	2.511	0.9791	4.916	0.0657	1.0021
5MeV	5.511	0.9957	10.79	0.1026	1.0053
10MeV	10.511	0.998817	20.58	0.1451	1.0107
20MeV	20.511	0.999689	40.16	0.2033	1.0212
50MeV	50.511	0.999949	99.01	0.3141	1.0533
100MeV	100.511	0.999987	192.31	0.4283	1.1066

のため質量の相対論的増加はない。しかし粒子の速度 v が光速 c と同程度になれば、式(2.4)の γ は重要になる。この状況を表2.2に示す。この表は最も軽い粒子の電子と、イオンを代表して陽子の相対速度と質量の相対論的増加を示したものである。100keVの電子では相対速度は54.8%、質量の増加は19.6%である。この電子は静止している電子より19.6%だけ重いことを意味している。電子のエネルギーが1MeVになれば、電子の相対速度は光速の94.1%になり、質量は静止電子の3倍になる。5MeV電子の速度は光速より0.5%だけ遅く、相対論的質量は電子の静止質量 m_0 の約10倍である。

数 MeV の運動エネルギーをもつ電子は光速に近い速度になるので (図2.1), それ以上加

表2.3 各種の荷電粒子の医生物学への応用と代表的エネルギー範囲

粒子	エネルギー範囲	応用
電子	6 ~ 25MeV 2 ~ 10MeV 数100MeV ~ 数GeV	通常の電子線および光子線治療 放射線殺菌, 低温殺菌, 食品保存 血管造影と分析のための放射光発生
陽子	2 ~ 100MeV 70 ~ 250MeV ~ 500MeV 数10MeV 2 ~ 70MeV	医療用放射性同位元素の生産 通常陽子線治療 治験的治療における中間子発生 治験的治療における中性子発生 分析
重陽子	7 ~ 20MeV 5 ~ 20MeV	医療用放射性同位元素の生産 分析
重イオン	70 ~ 700MeV/核子	治験的放射線治療

速しても速度の変化はわずかである。しかし, エネルギー E_k がさらに増加すれば, 相対論的質量もかなり増加する。

陽子は電子に比べて約2000倍も重く, 電子とは異なる振舞いをする(図2.1)。陽子は電子よりずっと大きな運動エネルギーで相対論的速度に達する。例えば, エネルギー5MeVの陽子は光速の10.3%に等しい相対速度をもち, 質量の相対論的増加は0.53%である(表2.2)。エネルギーが100MeVに達して初めて相対論的質量の増加は静止質量の10%になる。

図2.1に6~50MeVの放射線治療用電子加速器に特有なエネルギー範囲を示す。この範囲で最大エネルギーに加速された電子は実は相対論的電子である。この加速に特徴的なことは, 例えば2MeV(光速の約98%)の値を越えた後の速度変化は比較的小さい。この場合加速粒子はほぼ一定の速度をもつので, 加速構造においてある意味をもつ。構造が均一, すなわち同じ構造を繰り返す構成でよい。

同じく図2.1から陽子, 特に重イオンのような重粒子は6~50MeVのエネルギー範囲で電子とは全く異なる振舞いをする。電子より数桁高いエネルギーで相対論的になる。電子のような非常に軽い粒子に比べれば, 重粒子は相当ゆっくり高いエネルギーに達する。例えば, 典型的な医療用サイクロトロンで加速した10~60MeVの陽子は相対論的速度から比較的離れている。

応用とエネルギー範囲: 医生物学の手法における各種の荷電粒子の応用とそれらの代表的エネルギー範囲について表2.3にまとめる。

2.2 高電圧の線形加速法

2.2.1 基礎

静電加速器: 上の考察に従って, 荷電粒子の加速は一般に次のように表現される。

$$E_k = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \beta^2}} - m_0 c^2 = E [z(t)] dz \quad (2.5)$$

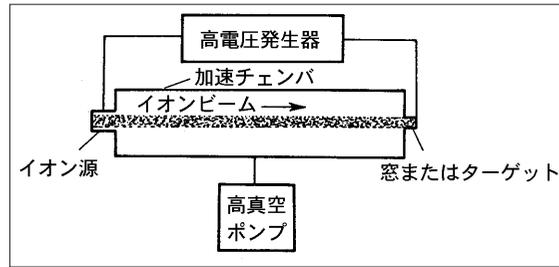


図2.2 1段の高電圧加速器の動作原理

ここで、 E は電場、 z は加速経路の長さ、他の記号は式 (2.3) に同じである。

加速を行う最も簡単な方法は2つの電極を使用して、その間に静電的な電位差を持たせることである。電極間隙にいる荷電粒子は同符号の電極に反発され、異符号の電極に引き寄せられる。粒子を効率的に加速するためには、電極間隙を真空にして、加速粒子がガス分子と衝突するまでの平均行程を電極間の距離よりずっと大きくしなければならない。

図2.2はこの条件に合う高電圧線形加速器の基本的な概略図である。イオン源、窓またはターゲットに伸びる加速管、高真空ポンプ、高電圧発生器から構成される。この加速器は1段構成 (single stage) である。最大粒子エネルギーは電圧発生器が供給する最大電圧に相当する。現在この構成で100kV ~ 30MVの電圧発生器がある。50MVの電圧発生器は開発中である。加速管には全電圧がかかるので、その寿命には限界がある。同様のことは比較的高い電圧の加速器についても成り立つ。

高電圧発生器から加速管に加えらる電圧が V ならば、電荷 q の粒子は次の運動エネルギーを得る。

$$E_k = qV \quad (2.6)$$

電子では $E_k = eV$ である。加速粒子が単位電荷をもてば、そのエネルギーはそれに加えらる電位差で一般に表現される。1eV (電子ボルト) は電子の電荷に等しい電荷をもつ粒子が電位差1Vの電場で加速されるとき得るエネルギーである。すなわち、 $1\text{eV} = 1.6 \times 10^{-19}\text{J}$ である。1eVは小さい単位であるので、荷電粒子の加速では一般に次の単位が使用される：

1キロ電子ボルト,	$1\text{keV} = 10^3\text{eV}$
1メガ電子ボルト,	$1\text{MeV} = 10^6\text{eV}$
1ギガ電子ボルト,	$1\text{GeV} = 10^9\text{eV}, (1\text{GeV} = 1.6 \times 10^{-10}\text{J})$
1テラ電子ボルト,	$1\text{TeV} = 10^{12}\text{eV}$

すでに述べたように、高電圧の技術はメガ電子ボルト (MeV) のオーダーのエネルギーを得るために使用される。数GeVオーダーの高いエネルギーは別の技術により達成できる (第2.7節)。

電子の代わりに重イオンを加速する場合は、加速チェンバに電位差 V が供給されているとき、核子1個当たりの運動エネルギー E_{kn} は、