

加速器の基礎

2013年3月

一般社団法人 日本電機工業会

加速器特別委員会

1. はじめに

加速器とは、「電気を持った電子や陽子、または原子から電子をはぎ取ったイオンなどを荷電粒子といい、そのような荷電粒子を電磁力によって加速する装置」をいいます。加速器は、物質や生命の謎を解き明かすとともに、新材料の開発、農作物の品種改良、医療への利用など、わたくしたちの身近な分野で社会に役立っています。以下に、加速器とはどのような原理で動作するものかを説明していきます。

2. 基本法則

次に示す2つが加速器の動作原理の基本となります。

①荷電粒子を加速するには電場で行う。

加速器の基本原理は、「電極間の電場で荷電粒子にエネルギーを与える」ことです。

電場 E から電荷 q の荷電粒子に働く力 F は次式で与えられます。

$$F = q \cdot E \quad (1)$$

荷電粒子の質量を m 、加速度 a とすると、

$$F = q \cdot E = m \cdot a \quad (2)$$

が成立し、これより加速度 a は、

$$a = \frac{q \cdot E}{m} \quad (3)$$

の関係を得ます。

荷電粒子の速度を v 、電荷量を q 、価数 e とし、電圧 V で加速した場合、荷電粒子のエネルギーの釣り合いから、(4)式を得ます。

$$qeV = \frac{1}{2}mv^2 \quad (4)$$

これより、荷電粒子の速度 v は次のようになります。

$$v = \sqrt{\frac{2qeV}{m}} \quad (5)$$

加速器の歴史は有効な電場を得るための高電圧発生技術の発展の歴史といえます。

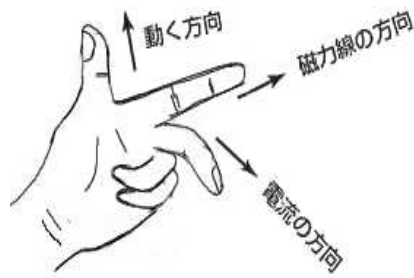
②荷電粒子の方向を変え、軌道を制御するには磁場で行う。

加速器の原理を考える上で、①とともに重要なのが、磁場の作用です。

質量 m 、電荷 q の荷電粒子が、速度 v で磁束密度 B の磁場の中を、磁場に直角に運動するとき、荷電粒子に働く力は次式で与えられます。

$$F = q \cdot v \cdot B \quad (6)$$

この力 F はローレンツ力と呼ばれています。各成分の方向はフレミングの左手の法則の方向となります。



【図1 フレミング左手の法則】

磁場による力は荷電粒子の運動方向と垂直であるため、磁場では電場の作用と異なり、荷電粒子のエネルギーは変化しません。しかし、荷電粒子の方向を変えたり、軌道を制御したり、あるいは光のレンズのように、荷電粒子を集束させたりします。

一定の磁場 B の中、このローレンツ力と遠心力がつりあうと、荷電粒子の運動は円運動となります。

$$q \cdot v \cdot B = \frac{m \cdot v^2}{r} \quad (7)$$

これより、円運動の半径 r は、

$$r = \frac{m \cdot v}{q \cdot B} \quad (8)$$

また、円運動の角速度 ω 、周波数 f は

$$\omega = \frac{q \cdot B}{m} \quad f = \frac{q \cdot B}{2\pi \cdot m} \quad (9)$$

となり、サイクロトロン周期、及びサイクロトロン周波数と呼ばれています。

3. 加速器の種類

表1に代表的な加速器の種類とその特徴をまとめています。

【表1 加速器の種類】

加速器の種類	加速粒子	加速電場	荷電粒子軌道	応用例
コッククロフト・ウォルトン回路	電子、陽子、イオン	静電場	直線	工業材料の改質装置 表面分析装置
バンデグラーフ型加速器	電子、陽子、イオン	静電場	直線	
サイクロトロン	陽子、イオン	高周波	螺旋	粒子線治療
シンクロトロン	電子、陽子、イオン	高周波	円	粒子線治療
線形加速器	電子、陽子、イオン	高周波	直線	高エネルギーX線発生 放射線治療用

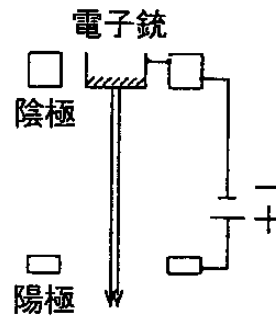
○電場の与え方によって、次のように大別されます。

- ・ 静電場を与える方法
- ・ 高周波電場を与える方法

①静電場による加速器

- ・ コッククロフト・ウォルトン回路
- ・ バンデグラフ型加速器

があります。しかしながら、静電場による加速器は絶縁耐圧による限界があります。



【図1 静電加速器】

次の例に考えて見ます。

電子を電圧 $V=1$ (V) で加速した場合を考えて見ます。

(5)式に、電子の静止質量 $=9.11 \times 10^{-31}$ (kg)、電子の電荷 $=1.60 \times 10^{-19}$ (C) を代入すると、

$$v = 5.93 \times 10^5 (m/s)$$

となります。

②高周波電場による加速器

- ・ 線形加速器
- ・ サイクロトロン加速器
- ・ シンクロトロン加速器

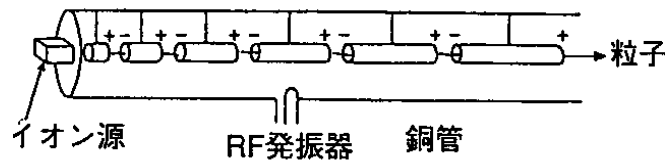
があります。

3-1 線形加速器

加速空洞を多数直線状に配置し、隣合った空洞間に異なった符号になるように高周波電圧を印加して加速する装置です。

特徴としては、次の通りです；

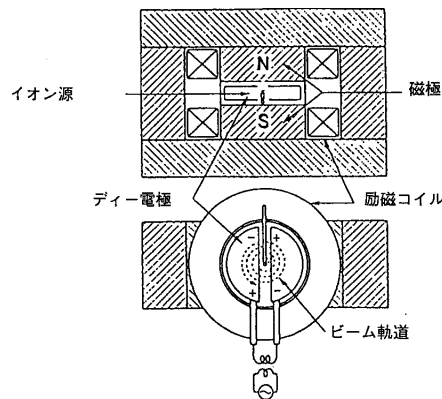
- ・ 高周波加速：荷電粒子の進行に加速の位相を合わせる
- ・ 荷電粒子の通過に同期させて交流電圧を印加する
- ・ 加速ギャップに粒子が来た時に常に加速になる電場を与える
- ・ 高エネルギーを得るためには加速器が長くなり、またエネルギー一分だけの構造物が必要となる。



【図2 線形加速器】

3-2 サイクロトロン

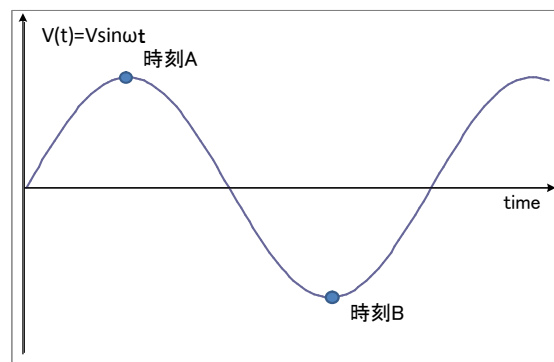
磁場による荷電粒子の周回運動を利用して、多重回加速させ高エネルギーを得るようにした加速器です。ディー(形状が D に似ているためこのように呼ばれています)と呼ばれる電極間に高周波電場を印加することにより、荷電粒子を加速する加速器です。高周波電場周波数と荷電粒子の周回周波数を一致させることが基本となります。



【図3 サイクロトロン加速器】

サイクロトロンによる加速原理をもう少し詳しくみてみます。

加速電極に(7)式で与えられる周波数の高周波電圧を印加します。図3のように時刻Aで空隙を通過したとします。このとき電圧 V により加速されます。半周まわって再び空隙に達したとき(時刻B)、高周波電圧の位相は 180° 反転しており、荷電粒子は再び電圧 V により加速されます。こうして、加速されるにしたがって、軌道半径は大きくなっていきます。



【図4 サイクロトロンの原理】

※『加速器科学(パリティ物理学コース)』を元に作成

特徴としては次の通りです；

- ・エネルギーを上げるには磁石を大きくするしかない
- ・エネルギーが上がると、1周する時間があわなくなる(質量が一定とみなせなくなります)という限界があります。相対論的な考え方が無視できないエネルギーになると、周回する

周波数 ω は質量に反比例するので、荷電粒子は加速間隙に遅れて到着するようになり、荷電粒子が受ける加速電圧はピーク値からずれてきて、加速量が減少してきます。

3-3 シンクロトロン

シンクロトロンは、サイクロトロンと異なり、磁場をエネルギーの増加に合わせて時間とともに変化させ、軌道半径を一定に保ちながら加速させる装置です。

図5にシンクロトロンの構成例を示します。荷電粒子軌道に沿って、機能の異なる電磁石を配置しています。

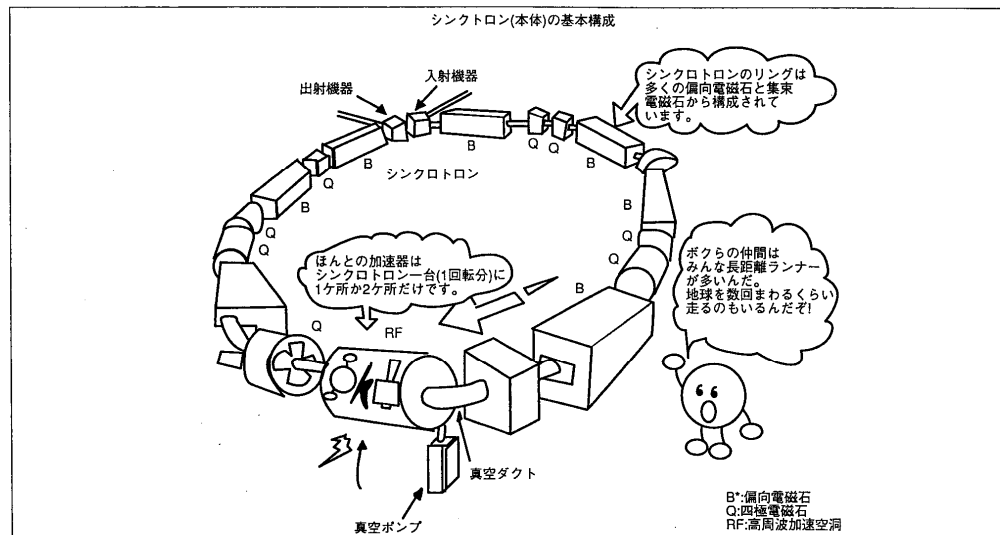
・偏向電磁石:ビームを曲げる

荷電粒子の速度に合わせて強くして、同じ半径の円運動を保つように調整します

・四重極電磁石:ビームの収束

更に、高周波の加速空洞を配置し、この部分で荷電粒子を加速します。

ここで、荷電粒子の速度が大きくなるにしたがって、周期が短くなります。それゆえ、円周に配置された加速空洞の高周波電場の周波数は、荷電粒子の速度に同調して増加させていきます。シンクロトロン(synchrotron)の名前の由来はここからきています。

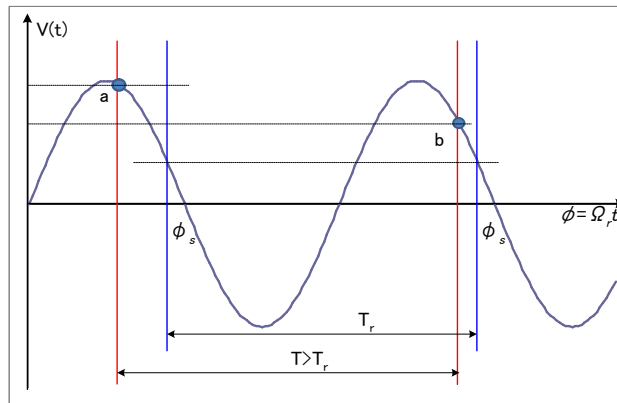


【図5 シンクロトロン加速器】

<位相安定の原理>

シンクロトロン加速器では荷電粒子が加速器に入ってから取り出されるまでの間に、サイクロトロンとは異なって非常に大きい回数を周回します。すべての荷電粒子が全く理想的な条件であることは考えられない中、このような高周波による多数回の繰り返し加速が可能なのだろうか？ この疑問に答えたのが、位相安定の原理と呼ばれるものです。

高周波電圧と同期した同期粒子の位相を ϕ_s 、その周期を T_r とするとき、この ϕ_s が $\pi/2$ と π の間にあるものとします。このとき、 ϕ_s より位相が進んでいる図5に示す a 点の場合、加速空隙で受けるエネルギーは同期した粒子より大きいため、周期が長くなり、次の周期では図5に示す b 点に至り、同期位相に近づきます。こうして、同期位相より遅れた場合は、逆に同期粒子よりも加速されます。結局、同期位相を中心にして振動することがわかります。このように、高周波を用いた加速において、位相やエネルギーの振動が安定になる条件を示したのが、位相安定の原理です。この原理がシンクロトロン加速器の開発への道を開きました。



【図6 位相安定の原理】

※『加速器科学(パリティ物理学コース)』を元に作成

<放射光>

電子をシンクロトロン加速器で加速すると、円運動の接線方向に電磁波を放射します。この電磁波は放射光と呼ばれています。放射光は白色光(すべての波長を含んだ電磁波)または準単色光で、分光器と組み合わせることによって、赤外線から X 線領域までの広い領域にわたって波長可変の高輝度単色光源として利用でき、物質に含まれる元素の特定、タンパク質の構造解析等に 응용されています。

■Q&A

Q1. 加速器は放射性廃棄物を出さないのですか？

A. 加速器は電子やイオンなどのビームを直接発生させるので、ウランなどの放射性物質は使用しません。但し、一部の加速器ではビームを停止させるターゲット部分が放射化するので、装置を廃却する時には放射性廃棄物となりますが、量は非常に少ないです。

Q2. 加速器はどんなところにあるの？

A. 加速器はコンクリートで遮蔽された重厚な建物の中に置かれ、放射線が漏れ出ないように管理されています。尚、比較的低エネルギーの装置は装置筐体で遮蔽しているので、コンクリート遮蔽室は不要です。

以上

【参考文献】

- ・ 亀井 亨、木原 元央『加速器科学(パリティ物理学コース)』1993年
- ・ 原俊雄「高校物理教育に活かす粒子加速器技術」(『物理教育』54巻4号)2006年
- ・ 鈴木史郎「加速器の原理と応用」
(http://www-hep.phys.saga-u.ac.jp/~suzuki/misc/accelerator_05.pdf#search=%E3%83%BB%E5%8A%A0%E9%80%9F%E5%99%A8%E3%81%AE%E5%8E%9F%E7%90%86%E3%81%A8%E5%BF%9C%E7%94%A8+++E4%BD%90%E8%B3%80%E5%A4%A7%E5%AD%A6+%E9%88%B4%E6%9C%A8%E5%A3%AB%E9%83%8E) 2005年