

◁放射光源シリーズ(1)▷

電子蓄積リングとは(1)

加藤政博 (分子科学研究所*)

1. はじめに

磁場中をほぼ光速で走る高エネルギーの電子が放出する電磁波、シンクロトロン放射光は、赤外線からX線にいたる広い波長領域において、指向性に優れた光源として様々な用途に用いられている。シンクロトロン放射光を発生するための装置、即ち、シンクロトロン放射光源の中核となるのは、高エネルギーの電子ビームを生成する粒子加速器である。本稿では、現在、放射光源用粒子加速器として最も広く用いられている電子蓄積リングについて、シンクロトロン放射光を利用する研究者や学生向けに解説する。電子蓄積リングとはどのようなものか、それはどのように動くのか、正確さや厳密さよりも直感的に理解しやすいことを目標に、なるべく平易な解説を試みるつもりである。

2. 電子蓄積リングの概要

電子蓄積リングとはどのようなものか、まず、幾つかの数字を挙げながらみていくことにしよう。

電子蓄積リングとは、その名の通り、高エネルギーの電子ビームを蓄積する装置である。電子が1ボルトの電位差で加速された場合に獲得するエネルギーは 1.6×10^{-19} ジュールであるが、これを1電子ボルトと呼ぶ。放射光光源用電子蓄積リングの典型的なビームエネルギーは数10億電子ボルトである。我が国の代表的な放射光施設に例をとれば、西播磨のSPring-8¹⁾が80億電子ボルト(8ギガ電子ボルト=8 GeV)、つくばのPhoton Factory²⁾が25億電子ボルト(2.5 GeV)、岡崎のUVSOR³⁾が7億5千万電子ボルト(0.75 GeV)、といった具合である。本稿では立ち入らないが、このように施設によって電子エネルギーが大きく異なるのは、発生しようとする光の波長(エネルギー)が異なるためである。波長の短い(エネルギーの高い)X線まで発生しようとする高い電子エネルギーが必要となる。

相対性理論によれば質量はエネルギーと等価である。電子の静止質量をエネルギーに換算すると約50万電子ボルト(500キロ電子ボルト=500 keV)に相当する。光源用電子蓄積リングを周回する電子の運動エネルギーはこれよりもはるかに高い。このような電子を、相対論的であるという。相対論的な電子はほぼ完全に光速で、即ち、毎秒約30万キロメートルの速さで走り、その質量は静止質量に

比べてはるかに重い。静止質量と運動中の質量の比をローレンツ因子と呼ぶが、例えば、Photon Factoryのローレンツ因子は約5000である。

一般に、電子のような荷電粒子が加速を受けると電磁波を放出するが、荷電粒子が相対論的である場合には、電磁波は粒子の進行方向に集中して放出される。その角度広がりにはローレンツ因子の逆数程度となる。シンクロトロン放射光もこのようにして放出される電磁波の一種である。例えばPhoton Factoryでは、ローレンツ因子は約5000であるから、シンクロトロン放射の典型的な角度広がりには $1/5000$ ラジアン、即ち50メートル先で1センチメートル広がる程度となる。シンクロトロン放射光の最も重要な特徴である指向性の高さは、それを放出する電子が極めて高エネルギーであることにその理由がある。

光速で運動する電子は、放って置くと、あっという間に遙か彼方に飛び去ってしまう。電子蓄積リングは、高エネルギーの電子を閉じた軌道上をぐるぐると周回するように導いてやることで、長時間蓄積する。電子が周回する軌道の長さ、即ち蓄積リングの周長は、例えばSPring-8が約1436 m、Photon Factoryが約190 m、UVSORが約50 mである。電子エネルギーが高いほど周長も長くなる傾向にある。電子はほぼ光速でこの軌道を周回するので、Photon Factoryであれば約0.6マイクロ秒で1周し、1秒間には約160万周する。

電子蓄積リングを周回する電子の量(ビーム強度)は、通常、電流値として表現される。光源用電子蓄積リングの場合、数100ミリアンペアというのが典型的な値である。電流値とは、ある場所を単位時間あたりに通過する電荷量である。電子1個のもつ電荷(1.6×10^{-19} クーロン)に蓄積リング中の総電子数をかけ、さらに、単位時間あたりの周回数、つまり電子が毎秒何回リングを周回するか、をかけてやれば電子ビームの強度が電流値として計算できる。例えばPhoton Factoryの平均的なビーム強度はおおよそ300ミリアンペア(0.3アンペア)であるが、この場合、上の計算方法から逆に総電子数を見積もってみると、答えは約1兆個(1×10^{12} 個)となる。

3. 電子蓄積リングの構成

実際の電子蓄積リングがどのように構成されているかを見てみよう。放射光源用電子蓄積リングを模式的に書いた

* 分子科学研究所 〒444-8585 愛知県岡崎市明大寺町字西郷中38
TEL: 0564-55-7206 FAX: 0564-54-7079 E-mail: mkatoh@ims.ac.jp

ものを **Fig. 1** に示す。先に述べたように、リングにも様々な大きさのものがあるが、その基本構成に大きな違いはない。

電子蓄積リングには、電子を閉じた軌道上を周回するように導いてやる装置が必要である。この役割を果たすのが偏向電磁石 (Bending Magnet : **Fig. 1** 参照) である。閉じた軌道が置かれている平面を軌道面と呼ぶことにすると、偏向電磁石はこの軌道面に垂直な方向に磁場を発生する。偏向電磁石には、通常、鉄を心材とした常伝導電磁石が用いられ、その磁場強度は1テスラ (=1万ガウス) 程度である。

電子は偏向電磁石の磁場中でローレンツ力と呼ばれる力を受ける。**Fig. 2** に示すように、軌道面上を進んでくる電子はその進行方向に垂直な向きに力を受け、円弧を描きながら運動する。この円弧の半径を偏向半径と呼ぶ。磁場の強さが同じであれば、エネルギーの高い電子ほど重く曲げられにくいことから、偏向半径は大きくなる。例えば SPring-8 の偏向半径は約40 m, Photon Factory では約8 m, UVSOR では約2 m である。

偏向電磁石中で電子は円弧を描いて進み、偏向電磁石を出るとまっすぐに進む。そしてまた次の偏向電磁石では円弧を描いて進む。これを繰り返しながら閉じた軌道上を周回する。**Fig. 1** の例では偏向電磁石の数は8台になって

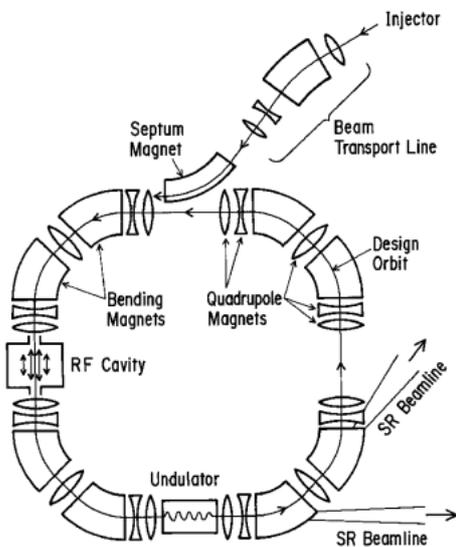


Figure 1. Schematic drawing of an electron storage ring for synchrotron light source.

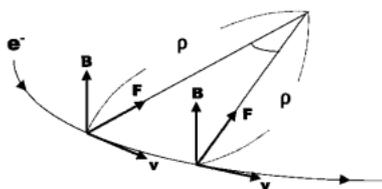


Figure 2. Electron motion in uniform magnetic field. B is the magnetic field, v the electron velocity, F the Lorentz force, ρ the bending radius.

いる。偏向電磁石1台で電子の進行方向を45度曲げ、8台で合計360度曲げる。偏向電磁石の数はリングによって様々である。例えば SPring-8 では88台、従って1台あたりの曲げ角は約4度にすぎない。Photon Factory では28台、1台あたりの曲げ角は約13度、UVSOR では **Fig. 1** の例と同じく8台である。

偏向電磁石の働きにより電子ビームは閉じた軌道上を周回するが、周回を続けるうちに、様々な原因によりビームはどんどん発散してしまう。これを防ぐための装置が四極電磁石である。四極電磁石はその名の通り、N極を2つ、S極を2つの合計4つの極を持つ磁石である。偏向電磁石と同じく、通常、鉄心の常伝導磁石が用いられる。**Fig. 1** においては四極電磁石を凹レンズ凸レンズのような表し方をしているが、実際、四極電磁石は電子ビームに対してレンズのような作用を及ぼす。広がっていくビームを凸レンズで収束し、収束されたものを今度は凹レンズで発散させる。これらを交互にうまく配置することで、安定に電子ビームを蓄積する。

リングを周回する電子は偏向電磁石の磁場中でシンクロトロン放射光を放出する。シンクロトロン放射光は、電子の描く円弧状の軌道の接線方向に放出される。これを取り出して実験ステーションまで導くのが放射光ビームライン (SR Beamline : **Fig. 1** 参照) の役割である。**Fig. 1** では放射光ビームラインは2本しか示していないが、実際には電子蓄積リングを取り巻くように数10本のビームラインを設ける。電子蓄積リングは大型で高価な装置であるが、多数のビームラインにおいてそれぞれが独立した多数の実験を同時進行の形で行えるため経済性が高い。これは電子蓄積リングが光源用加速器として優れている点の一つである。

最近の放射光リングでは、シンクロトロン放射光を発生する装置として、偏向電磁石に加えて、ウィグラー (Wiggler) やアンジュレータ (Undulator : **Fig. 1** 参照) などの挿入光源が多く用いられている。挿入光源はその名の通り、偏向電磁石と偏向電磁石の間の軌道が直線状になっている部分 (直線部と呼ばれる) に挿入して使用される (**Fig. 1** 参照)。挿入光源も、磁場により電子を偏向しシンクロトロン放射光を生成することは偏向電磁石と同じである。ただしその磁場は周期的に向きが反転するようになっている。そのような磁場の中では電子は蛇行しながら進み、蛇行のたびにシンクロトロン放射する。放射光は重畳され、直線部の延長線上に集中して放出される。このようにして、偏向電磁石に比べてより密度の高い放射光を生成できる。また、偏向電磁石からの放射光が直線偏光であり白色光であるのに対して、挿入光源を用いると、単色性や円偏光など、偏向電磁石では得られない特長のある光を生成することもできる。

シンクロトロン放射光を放出することで、リングを周回する電子はそのエネルギーをどんどん失っていく。例えば

Photon Factory では25億電子ボルトの電子がリングを1周する間に約40万電子ボルト (400 keV) のエネルギーを失う。もとのエネルギーを1周あたりのエネルギー損失で割ってやれば、何周くらいするとエネルギーの大半を失うかを見積もることができる。答えはおよそ6000周。前節で述べたようにリングを1周するのに要する時間は0.6マイクロ秒であるから、6000周は約4ミリ秒に相当し、まさにあっという間にエネルギーを失ってしまうことがわかる。

このシンクロトロン放射で失われるエネルギーを補給してやるための装置が高周波加速空洞 (RF Cavity ; Fig. 1 参照) である。高周波加速空洞は内部に高周波の電磁場を閉じ込めた金属製の空洞であり、軌道上に軌道と平行な向きに電場を発生するようになっている。空洞を通過する電子はこの電場によって加速されエネルギーを補給される。ただし電場は高周波で振動している。つまり電場の向きが周期的に変わる。電子がエネルギーを補給してもらうためには電場が電子を加速してくれる向きになっているときに空洞を通過しなくてはならない。電場の振動周期は、通常、数億ヘルツ程度に設定される。例えば SPring-8 や Photon Factory では約5億ヘルツ (500メガヘルツ)、UVSOR では約9000万ヘルツ (90メガヘルツ) である。後で述べることになるが、この高周波加速によって、電子ビームは一つながりの紐のような形をとることはできず、幾つかの塊に分かれてリングを周回するようになる。シンクロトロン放射光の重要な性質である、パルス的である、ということの原因がここにある。

ビームを閉じた軌道上を周回するように導く偏向電磁石、ビームの発散を防ぐための四極電磁石、シンクロトロン放射により失われたエネルギーを補給するための高周波加速空洞、これら3つの働きにより電子ビームはリングを安定に周回する。次に重要となってくるのは電子ビームがその進行を妨げられることなく長時間周回を続けることである。このためには軌道上に電子の進行を妨げる邪魔者があってはならない。空気も例外ではない。電子ビームの軌道はビームダクトと呼ばれる内径数 cm のパイプ状の金属性容器に包まれている。ビームダクトには真空ポンプが備えられ、その内部は 10^{-7} から 10^{-8} パスカ (1兆~10兆分の1気圧) という超高真空に保たれている。

ビーム軌道上は超高真空に保たれているとはいえ完全な真空ではない。ごくわずかであるが残留ガス分子が存在する。運悪くこれらと衝突した電子は、大きく進行方向を曲げられ、ビームダクトに衝突して失われてしまう。電子が失われていく原因はこれ以外にも、一緒に周回している電子同士の衝突など、幾つかある。これらの結果、蓄積されている電子数は時間とともに少しずつ減少していく。電子数が減少していく典型的な時間、即ちビーム寿命は、電子蓄積リングによって様々であるが、短いものでも数時間、長いものでは100時間近くに達する。

高エネルギーの電子がビームダクトなどに衝突すると放射線を発生する。電子蓄積リングでは一度生成した高エネルギー電子を、エネルギーを補給しながら何時間も蓄積し光発生に使い続けるため、電子の損失が少なく、放射線の発生が少ない。これも電子蓄積リングが光源用加速器として優れている理由の一つである。とはいえ、電子は少しずつではあるが確実に失われ放射線を発生する。このため、一般に電子蓄積リングは分厚い放射線遮蔽壁で囲まれている。

電子が次第に失われビーム電流値が下がってくると、ビームの放出するシンクロトロン放射光もその強度が下がってくる。電子を補給してやる必要があるが、電子蓄積リング自身は電子ビームを作り出す機能は持っていない。電子ビームはあらかじめ他の装置で生成し運んでくる。電子ビームを生成するための装置を入射器 (Injector : Fig. 1 参照)、入射器から電子蓄積リングまでビームを運ぶための通路をビーム輸送路 (Beam Transport Line : Fig. 1 参照) と呼ぶ。入射器としては、線形加速器、マイクロトロン、シンクロトロンなどの電子加速器を、単体で、もしくは幾つか組み合わせて利用する。ビーム輸送路は、電子蓄積リングと同じく、偏向電磁石や四極電磁石、ビームダクトなどで構成される。

以上、電子蓄積リングの主要な構成要素について説明してきたが、これら以外にも数多くの装置が備えられている。様々な種類の電磁石、ビームの位置や強度を計測する装置、加速器全体を安全に効率良く運転するための制御システム、安全管理システムなどである。電磁石や高周波加速空洞を駆動するための電源、これらに電力を供給するための電気設備、冷却水を必要とする装置のための冷却水循環設備、さらにいえば電子蓄積リングやビームラインを収納する建物も必要不可欠な構成要素である。電源変動や冷却水の温度変動、建物の微小変形が光源性能に直結する場合も多い。放射光源はこれらがすべて一体となったものとして考える必要がある。

4. おわりに

今回は「電子蓄積リングとは」(その1)として、電子蓄積リングの概要を幾つか数字を挙げながら説明し、その機器構成とそれぞれの構成要素の役割について解説した。次回は、「電子蓄積リング」(その2)として、電子蓄積リングを周回する電子ビームの性質について解説する予定である。読者 (特に放射光ユーザー) の皆さん、この「放射光源シリーズ」で扱って欲しいテーマをお近くの編集委員までお寄せ下さい。

参考文献

- 1) <http://www.spring8.or.jp>
- 2) <http://pfwww.kek.jp>
- 3) <http://www.uvsor.ims.ac.jp/>