

SRI '97 特集

放射光加速器技術開発の動向

木原 元央

高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設*

Development of Synchrotron Radiation Storage Ring

Motohiro KIHARA

Accelerator Laboratory, KEK

Many third generation light sources have been commissioned for these ten years, and soundness of the principal design concepts has been well recognized through the experiences at these facilities. Also technological developments concerning the third generation light sources have been remarkable. With the emittance and the current of the beams becoming far beyond the previous level, the requirements of stability to the beams have become much more stringent. In this report, we summarize the present status of light sources, operational and projected, and review the developments and the future prospects of the synchrotron radiation storage ring in view of accelerator physics and technology.

1. はじめに

放射光科学は、高エネルギー物理用加速器に共生した第一世代放射光に始まり、放射光専用リングによる第二世代放射光で飛躍的發展をとげた。いままた、第三世代放射光の時代に入り、地域的にも拡大の過程にある。物質科学、生命科学の研究の手段として、放射光への期待は大きい。

放射光利用研究の高度化に伴ってますます光源に高輝度、大強度が要求され、したがって、光源用加速器には低エミッタンス、多バンチ、大電流の電子ビームの蓄積が求められる。低エミッタンス化にともない、ビーム軌道の安定性への要求も厳しくなり、また、大電流に不可避のビーム不安定性をも克服しなければならない。

これまで蓄積された運転経験と理論的研究の結果、光源加速器設計の指針はほぼ確立されたといってもよい。しかし、新しい計画のたびごとに課せられる要求に応える必要から、放射光加速器は常に加速器技術の最前線に位置しているといえる。

本稿では、はじめに、新しい放射光計画の概要をまとめ、つづいて、現在の放射光加速器の技術開発の動向について概観する。

2. 新しい放射光施設計画

世界中で多数の放射光源が稼働している。一部には高エネルギー加速器からの転用によるものもあるものの、多くは第二世代放射光施設と、10年以上まえから建設が始まった第三世代放射光施設である。稼働中の第三世代放射光施設には、アジアでは、SRRC (台湾)、PLS (韓国)、SPring-8、アメリカでは、ALS、APS、ヨーロッパでは、ESRF (仏)、ELETTRA (伊)、MAXII (スエーデン) がある。

新しい放射光施設計画も依然活発であり、表1に示すように、建設中を含めて10以上の計画がある。

さらに、特徴的な放射光リングとして、工業的応用を目指して建設中のもの (ANKA (カールスルーエ)), ストレージリング FEL を目的としたもの (デューク大 (米)、ドルトムント大 (独)) がある。

また、第二世代放射光リングのいくつかにおいて、エミッタンスを改善する計画が進んでいることも特筆に値する。PF では5カ年計画で高輝度化計画が実施され、1997年にビーム試験が始まった。本稿執筆の段階で、エミッタンス30 nm \cdot radまで実現している。また、SSRL のSPEARでも近くエミッタンス改善計画が進む公算が強い。

* 高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設 〒305-0801 つくば市大穂 1-1
TEL 0298-64-5676 FAX 0298-64-7529 e-mail motohiro.kihara@kek.jp

Table 1. New Light Source Projects (in construction or planning phase)

Country	Facility name	Energy (GeV)	Emitance (nm·rad)	Stage
China	SSRF (Shanghai)	2.2	4.3	planning
France	SOLEIL	2.15	2-30	planning
Germany	BESSY II (Berlin)	0.9-1.9	5	construction
	ANKA (Karlsruhe)	2.5	39	construction
India	INDUS-2 (CAT)	2.0	45	construction
Japan	New Subaru (HIT)	1.0-1.5	30	construction
	VSX (U.Tokyo)	2.0	4.8	planning
	Tohoku U.	1.5	7.3	planning
Spain	LSB (Barcelona)	2.5	8.5	planning
Switzerland	SLS (PSI)	2.4	2.5	construction
Thailand	Siam Photon (SIT)	1.2	72	construction
UK	DIAMOND	3.0	14	planning

3. 光源加速器技術の開発動向

3.1 ノンゼロ分散系

これまで、ほとんどの光源加速器では、achromatic bend をベースとしたラティスが用いられており、長直線部では分散関数がゼロである。しかし、長直線部の分散関数に課せられたこの条件をはずすと、エミッタンスがファクター2あるいは3程度、低くできることが知られている。MAX-II では当初設計からこの考え方を取り入れている。また、既存のリングでも、光学パラメーターを変更することによって、ノンゼロ分散系とし、エミッタンスの改善を狙う試みがなされている。たとえば、ESRF では、当初エミッタンス7 nm·rad から4 nm·rad を実現し、ELETTRA でもほぼ同程度の改善を実現している。今後建設される新しい計画において、ノンゼロ分散系を採用するところがでてくる。

わが国では、磯山悟郎がエミッタンス可変のラティスとして、ノンゼロ分散系を取り入れた実際のリングの設計例を発表している¹⁾。

3.2 鉛直方向の低エミッタンス化

リングの設計のときに採用される目安の一つに、鉛直方向のエミッタンスを垂直方向エミッタンスの10%程度に仮定するというのがある。精度よくできた実際の加速器では、実際上、補正なしでも2~3%程度の値を実現できる。高輝度光源の場合には、鉛直方向に低エミッタンスを実現することが重要で、多くの光源加速器で改善が試みられている。NSLS では、水平エミッタンスに対して0.1%を実現しており、したがって、絶対値にして0.1 nm·rad を実現している。また、最近では、ESRF においては、水平エミッタンス4 nm·rad に対して鉛直エミッタンス0.04 nm·rad (結合比1%) を実現した。将来、水平エミッタンス3 nm·rad、結合比0.3%、したがって、鉛直方向に0.01 nm·rad という極めて低エミッタンスをめざす計画

である。

鉛直方向と垂直方向のエミッタンスの比を改善するには、ベータトロン振動のx-y結合と誤差によって鉛直方向へ派生する分散関数の両方を補正する必要がある。ベータトロン振動の結合は、ベータトロン振動数平面の動作点の最適化と動作点近傍の結合共鳴の補正によって行われる。他方、誤差によって派生する鉛直方向の分散関数は、四極電磁石、六極電磁石の位置で存在する閉軌道の誤差、閉軌道を補正するために導入される補正用の偏向磁界によって発生される。したがって、鉛直方向の低エミッタンスを実現するためには、閉軌道の補正と分散関数の補正とは同時一体で行う必要がある。実際の経験から、結合比0.1%をめざすためには、分散関数は0.5 cm(rms)程度に補正されている必要があるというのが目安である。

ここで問題にしている低エミッタンスでは、それを測定すること自体が重要な研究課題である。普通、エミッタンスは放射光を用いたビームサイズ測定から求められるが、ビームサイズは10ミクロンのオーダーとなる低エミッタンス領域においては、回折の影響を避けるために、普通はX線を使うことになり、ESRFでは、X線ピンホールカメラによって、90ミクロンのビームサイズを測定した。この方法によってこれ以上に小さなビームサイズを測定することには、いろいろ問題がある。

その後、PFの三橋利行は一層進んだ方法を開発し、立命館大のリングの鉛直方向のビームサイズとして17ミクロンを測定した²⁾。この研究は、10ミクロンのオーダーのビームサイズの測定を可能にしたという点において画期的な研究であった。軸対称性磁場をもつリングの鉛直方向のビームサイズがこのように小さい値になっているということも大きな驚きであった。三橋の計測装置は、その後KEKのリニアコライダー試験装置ATFにも導入され、鉛直方向のビームサイズとして25ミクロンを測定した。また、SLACにおけるダンピングリングにも直ちに導入されたと聞く。

3.3 電子軌道の安定性

安定な放射光の強度を得るために要求される電子ビームの位置の安定性は、ビームサイズの10%以下が目安である。低エミッタンスリングでは、鉛直方向には5ミクロン以下の安定性が要求されることを意味する。

軌道補正は、リング全体を包括的に補正するやり方と、放射光の発生点の位置を局所的に補正するやり方が併用される。全体補正の場合には、上に述べたように、軌道の位置と鉛直方向の分散関数の補正とを同時に行う必要がある。補正の繰り返し速度は、0.1 Hz から10 Hz 以上という程度である。速いデジタル信号処理回路の発達によって、100 Hz 程度の補正も可能になっているが、実際に工夫が必要とされるのは精度の向上や補正アルゴリズムの方である。

局所補正は、最終的な光位置の安定性の確保に必須の技術であるが、全体補正との協調の問題への考慮が常に必要になる。たとえば、ELETTRA では、局所補正によってリング周長が変わらないようにするため、5 台の補正電磁石を使用するという配慮をしている。また、他の光源点との干渉は、実際上は、常にユーザの不平を引き起こす難しい問題である。

3.4 ラティス・モデリング

上に述べたような軌道の補正や結合係数の補正を効率的に行うばかりでなく、リングにおいて予想される種々の現象を予見するためにも、計算機上に現実のパラメーターに即した加速器を再構築することは非常に有用である。電磁石のパラメーターなどは、事前に磁場測定されるが、実際の運転パラメーターは、隣接の電磁石の影響や据えつけ誤差の影響など、種々の影響を受けるので、現実にビームを用いて特性を明らかにする必要がある。このようなビームレスポンス測定を基礎にラティス・モデリングを行うことが最新の加速器施設では標準の技術になりつつある。これが可能になったのは、精密なビーム計測技術の進歩、大容量記憶装置をもった高速計算機技術の発達によるところが大きい。

3.5 挿入光源のミニギャップ化

挿入光源のミニギャップ化は、もちろん、短周期化を目指すとする。

NSLS では、磁極間隙 6 mm で周期長 16 mm のアンジュレーターと磁極間隙 3.3 mm で周期長 11 mm のアンジュレーターを開発した。彼らは、3 mm のフルアパーチャで、十分長いビーム寿命を達成している。ESRF では、内径 15 mm の現在の真空チェンバーを、将来 10 mm に変えようと計画している。また、APS では現在の真空チェンバーの内径は 8 mm であるが、テストのために内径 5 mm のチェンバーを挿入する計画である。

このように狭い内径をもつリングでは、真空によるビーム寿命を確保するために、高真空の確保とベータ関数の最適化が必要になる。また、ビームが感ずるインピーダンスを最小化するため、ESRF では SUS のチェンバーの表面を導電性物質で覆うなどの工夫を考えている。

3.6 回折限界ビームの試み

現存するいくつかのリングでは、自然エミッタンスが極めて小さく、また鉛直方向への結合を入念に補正することによって、鉛直方向には回折限界に近づいている。ESRF では近い将来、0.01 nm・rad という極めて低エミッタンスを実現するであろう。すでに現在でも、電子ビームのエミッタンスの形状を光固有のエミッタンスの形状に合わせないと輝度の低下をきたすというところまできており、マッチングをとるために、挿入光源の位置でベータト

ロン関数値を小さな値に選んでいる。

ESRF では、さらに進んで、回折限界ビームの実現をめざす試みに着手している。計算によれば、エネルギー 1 GeV、結合係数 100% と選ぶと、アンジュレーターの一次光に対して回折限界が達成できる。しかし、よく知られているとおり、蓄積電流を増していくと、ビーム内粒子散乱によってエミッタンスの増大が起こることが知られており、10 mA 程度ですでにその効果が顕著になると推定されている。現在までの実験では、1 mA 程度のところで縦方向の結合パンチ不安定性が起こってそれ以上のビーム蓄積ができていない。これはエネルギーを下げたためであって、今後ビーム不安定性の抑制を行うなどして、実験を続けていく予定と聞く。

3.7 極短パンチビームの生成

放射光利用の観点からも、また加速器物理の観点からも、極短パンチビームの実現は、回折限界ビームの試みと同じように、極めて興味ある究極的な放射光源技術の開発目標である。

理論上、短パンチビームの生成には、加速高周波の電圧を高くするか、低アルファ化を図るか、二通りの方向があるが、興味があるのは後者の場合である。

これまですでに、短パンチビーム生成の実験は、BESSY I, NSLS UV, UVSOR, SPEAR, SUPER-ACO, ESRF, ALS などで行われてきた。低アルファを実現するには、リングの四極電磁石による一次項の調整のほか、六極電磁石による二次項の補正も必要である。これまでの実験によれば、低蓄積電流においては、理論の予想する短いパンチ長が実現できることが示された。

しかし、電流値が増えるにしたがって、パンチ長は、アルファの値に無関係に、電流とともにある関係にしたがって増大する。これは、ビーム自身が真空チェンバー内に誘起する電磁場がパンチに対して縦方向の発散力として働き、パンチを引き延ばすからである。これを抑えるには誘起電磁場の原因となっているリングのインピーダンスを低くしなければならないが、現実問題としては、これは相当に困難な問題である。この意味で、リングにおける極短パンチビームの生成は、いささか困難な課題のように思われる。

3.8 結合パンチ不安定性の抑制

多パンチ、大電流ビームの実現は、放射光源ばかりでなく、B ファクトリーやファイ・ファクトリーでも基本的な要求である。表 2 に、代表的な B ファクトリーと放射光源のパラメーターの比較を示す。

このような多パンチ系では、結合パンチ不安定性が蓄積電流の到達可能値を決定することが多い。結合パンチ不安定性の原因は、加速空洞の高次モード (HOM) が主であるが、ビーム軌道周辺に存在する電子やイオンも結合パン

Table 2. Comparison of the currents between the B-factories and light sources

	PEP-II (LER)	KEKB (LER)	ALS	ESRF
Energy (GeV)	3.1	3.5	1.5	5.0
Beam current (A)	2.14	2.6	0.4	0.2

チ不安定性の原因になり得る。

3.8.1 空洞の HOM 対策

空洞の HOM による不安定性に対応する対策には、二つの方法がある。

第一の方法は、空洞の冷却水の温度を変えるかチューナーを調整するかして、HOM の共振周波数をビーム不安定条件からはずすことである。この方法は PF において実用化したというべきものであるが、原理が簡単で運転も容易であるので、多くの放射光リングで用いられている。しかし、チューニングがリングのベータトロンの振動数やシンクロトロン振動数に依存するという問題があるほか、ビームの周回周波数が低い大型リングでは共鳴条件が密に存在するために適さない。

HOM に対する最も根本的な対策は、HOM 減衰空洞の採用である。もし、加速空洞内に発生する HOM の電力を空洞外に取り出すことができれば、誘起電磁場の増大を抑制できる。たとえ残留してもその強度が弱ければ、のちに述べるフィードバックシステムによって不安定性を押さえ込むことが可能になる。このような空洞は HOM が低いインピーダンスとなるので、厳密な意味ではないが、HOM-free cavity と呼ばれる。

HOM 減衰空洞の考えが生まれたのは15年以上前になるが、とくに最近、PEP-II, KEKB, DAFNE のような B ファクトリーやファイ・ファクトリーの開発が進むなかで急速に発達した。いろいろなタイプの HOM 減衰の方式が生まれ、それらは常伝導、超伝導を利用したものに分かれる。いずれの方式もすでに技術的に確立されているが、KEKB や CESR (コーネル大) で開発されている超伝導減衰空洞は、放射光源リングへの適用の可能性があるように思われる。超伝導空洞の利点は、単一空洞で約 2 MV の電圧が可能であることで、これは常伝導の単一空洞あたりの標準的な値 0.5 MV に比べて相当高い³⁾。

最近 PF の高輝度化計画において開発された新しい減衰空洞も特記すべき成果を納めている⁴⁾。東大物性研との共同研究で開発されたこの減衰空洞は、常伝導の単一空洞の両端に高い周波数の HOM を逃がすように径の大きなビームパイプをとりつけ、その先に SiC でできた高周波吸収体を取り付けたものである。1996年の秋の運転では、PF の 4 台の空洞のうち 2 台を新型減衰空洞に置き換えて 773 mA まで問題なくビームを蓄積でき、1997年秋からは、全数を新型空洞に取り替え、通常運転において 400 mA の蓄積を問題なく実施している。結合不安定性の問題

は起きていない。

3.8.2 ニビーム不安定性

多バンチモードで運転されている放射光源リングでは、必ず部分蓄積法 (partial fill) がとられる。この部分蓄積法は、イオン捕獲効果を避けることができるほか、鉛直方向へのビーム不安定現象を抑えるのにも役立っている。また、空洞の HOM による縦方向の結合不安定性を部分的に抑えるのにも有効である。ここで部分的というのは、100 Hz 程度の繰り返しで不安定の増大と減衰を繰り返す弛緩発振現象が残存するためである。この弛緩発振はバンチ列に存在する空白部分のために空洞電圧に変調がかかり、バンチ列中に生ずるシンクロトロン振動数の広がりによってランダウ減衰が起こるからであると理解されている。ともかく、部分蓄積法は、結合バンチ不安定を抑える簡単で有効な方法である。

しかし、最近になって、部分蓄積法では抑えきれない、新しいビーム不安定性の存在がはっきりしてきた。一つは陽電子ビーム蓄積中に観測される光電子不安定性 (photoelectron instability) であり、もう一つは、電子ビーム蓄積中に起こる、高速ビーム・イオン不安定性 (fast beam-ion instability) である。

光電子不安定性 (PEI) は1996年に PF ではじめて実験的に特定された⁵⁾。すでに10年以上前、PF で陽電子ビーム蓄積をはじめたとき以来、鉛直方向に十数 mA という低い電流の閾値をもち、部分蓄積法でもこれを解消できないビーム不安定性があることが知られていた。PF では、八極電磁石を導入してベータトロンの振動のランダウ減衰によってこの不安定性を抑えてきた。しかし、長いあいだ原因が特定できなかったが、ビーム位置信号の周波数解析などから、これは陽電子ビームと周辺の電子とで引き起こされるニビーム不安定性であると結論された。真空チャンバーの中には、放射光によって生成される光電子が無数に存在する。観測によれば、バンチとバンチのあいだに一定距離以上の空白のバンチをおくと不安定性が起こらない。このことから、陽電子バンチと電子雲の相互作用の減衰時間は約 10 ns 程度であることが示された。

高速ビーム・イオン不安定性 (FBII) は、1955年に初めて理論的に予言され、1996年に ALS, KEK-AR において観測された。しかし、ESRF では観測されていないという。

イオンは電子ビームによる残留ガスのイオン化から作られる。電子のバンチ列の先頭にある電子によって生成されたイオンが、バンチ列の後部の電子に影響を及ぼす。観測によれば、不安定振動の振幅はバンチ列の先頭から 40 ないし 50 バンチのあたりから増大をはじめめる。計算機によるシミュレーションでも同じような結果が得られる。この不安定現象の増大率を抑えるには、真空をよくすることが本質的である。

3.8.3 多バンチ・フィードバックシステム (ダンパー)

減衰空洞と相補的なシステムで、あらゆる結合バンチモードを減衰できるのが多バンチ・フィードバックシステムである。このダンピングシステムには、モード別フィードバック方式とバンチ別フィードバック方式とがある。

モード別フィードバック方式は、一定の周波数をもつ特定の不安定モードを選択的に減衰させるもので、縦方向のフィードバック系としては、NSLS-VUVとSUPER-ACOにおいて動作している。

バンチ別フィードバック方式は、各バンチの位置のずれを検出し、その信号をキッカーにフィードバックして位置のずれを減衰させる。UVSORでは、縦方向のフィードバックシステムを開発し、実際の運転に使用している⁶⁾。最近、ALSにおいて、縦方向と横方向、両方のフィードバックシステムが開発された。これによって、ビーム電流400 mAまで安定なビームを蓄積できている。また、台湾のSRRCのリングでも、横方向のシステムが動作中であり、縦方向のシステムの開発が進みつつある。ELETTRAでも1998年はじめに横方向のシステムのテストが予定されていると聞く。

わが国では、KEKBにおいて横方向のシステムの開発が進んでいる。将来、光源リングにおいても能動的ダンパーは標準的技術になっていくであろう。

3.9 トッピングアップ

トッピングアップは、蓄積ビーム電流をできるだけ一定に保つことを目的として頻繁にビーム入射することである。しかも、ユーザーのX線ビームシャッターを開けたまままでこれを行うというところにミソがある。トッピングアップの利点は、放射光強度をつねに最大値に保つとともに、X線光学系に対する熱負荷を一定に保つことによって光学素子の変形や特性変化を最小限に抑えることができ、また、光子検出器に不可避の計数の非線形効果を最小限に抑えられるということである。さらに、ビーム寿命のことを気にする必要がないとすると、極めて狭いギャップの真空チェンバーをリングに導入することも可能になるという魅力もある。

APSでは、計画の設計段階から、このトッピングアップ

の可能性を追求しており、最近、放射線の測定を行って有望な結果を得たと報告されている。

4. おわりに

これからの光源加速器にとってキーワードは、低エミッタンス、多バンチ、大電流である。これは高エネルギー物理用加速器における要求とも一致しており、したがって、その分野での技術動向にも注意深く目を見張っている必要がある。

本稿ではふれなかったが、1~2 GeVクラスの高輝度光源において、タウシェック効果のために寿命が短く、放射光利用の観点から不満があること、したがって、寿命をのばすための試みがなされていることを付記しておきたい。

最後に、本稿に関連する文献については、ここ数年のParticle Accelerator Conference, European Particle Accelerator Conference, International Conference on High Energy Accelerators, その他の topical conference やワークショップのプロシーディングスを参照していただきたい。全体的な動向をつかむことができる。

特に、わが国で行われた研究のいくつかについてだけ文献を載せることとした。

参考文献

- 1) G. Isoyama, Y. Miyahara, S. Asaoka, A. Mikuni, H. Nishimura and K. Soda: Nucl. Instr. Meth. **227**, 593 (1984).
- 2) T. Mitsuhashi, H. Iwasaki, Y. Yamamoto, T. Nakayama and D. Amano: To be published in Proc. 11th Symposium on Accelerator Science and Technology, October 21-23, 1997, Hyogo.
- 3) T. Furuya, K. Akai, K. Asano, E. Ezura, K. Hara, K. Hosoyama, A. Kabe, Y. Kojima, S. Mitsunobu, Y. Morita, H. Nakai, H. Nakanishi, T. Tajima, T. Takahashi, S. Yoshimoto, S. Zhao, Y. Ishii, Y. Kijima and T. Murai: To be published in Proc. 1997 Particle Accelerator Conference, May 12-16, 1997, Vancouver.
- 4) M. Izawa: To be published in Proc. 6th International Conference on Synchrotron Radiation Instrumentation, August 4-8, 1997, Himeji.
- 5) M. Izawa, T. Sato and T. Toyomasu: Phys. Rev. Lett. **74**, 5044 (1995).
- 6) T. Kasuga, M. Hasumoto, T. Kinoshita and H. Yonehara: Japan. J. Appl. Phys. **27**, 100 (1988).