

## ◁放射光源シリーズ(3)▷

## 入射器・ビーム入射

米原博人 (JASRI/SPring-8 加速器部門\*)

## 1. 序論

放射光専用加速器システムは、線型加速器、ブースターシンクロトロンおよび放射光光源である蓄積リングから構成されることが多い。(フォトンファクトリ (PF/KEK) は線型加速器と蓄積リングから構成されている。) また、電子ビームではイオン化した分子を捕獲し、このイオンにより電子ビームが不安定になることから、一時期、このイオン捕獲効果を避ける為に陽電子ビームが必要とされた。陽電子ビームを用いた場合にも負電荷に帯電された微粒子により、似たような現象が起こる事が報告され、其の上、イオン捕獲を取り除くには、蓄積する電子ビームの間隔をあけることによる除去方法が実用化されている<sup>1)</sup>。

放射光用加速器であること、入射・出射時のビームの挙動は陽電子ビームでも電子ビームでも本質的な差はない、多段型加速器構成であるからビームの受け渡しを実行する為に入射・出射が必ず行われる…。このような事情から、本稿では、電子ビームを対象とし、SPring-8 加速器群の場合を例として解説する。

SPring-8 加速器群は、線型加速器 (リナック Linear Accelerator; 以下, “リナック” と略す) とブースターシンクロトロン (Booster Synchrotron, 以下, “ブースター” と略す) からなる入射器と放射光光源である蓄積リング (Storage Ring, 以下, “リング” と略す) から成る (Fig. 1 参照)。リングは電子ビームを長時間安定に蓄積し、放射光を利用者に供給する。放射光をどのような磁石で生成するかにより放射光スペクトルに違いがあるが、それぞれの実験に合った光分布に光学系を用いて切り出し、実験に供する。放射光利用者にとって供給される放射光は、実験を行う場所で安定して強度が高いことが要件であろう。電子ビームから発光点で放射された放射光は、可視光領域より波長が短い光は光学系で安定化することは困難であるため、発光点での電子ビームの傾き・位置を安定化することが重要である。特に放射光専用施設では、利用者は電子ビーム運転中に実験エリア付近に滞在し、エリア内に入ることが必要であるため、実験エリアが加速器と遮蔽体で区切られている。この結果、発光点から実験エリアまで光ビームの進む距離が長くなる。例えば SPring-8 の場合、遮蔽体の外に出るまで 30 m 程度、光学系などを入れると実験エリアまでさらに 30 m 程度必要になり、照射ターゲットの幅が 10 mm とすると、発光点では  $10 \text{ mm} \div 60 \text{ m} =$

$1.7 \times 10^{-4}$  radian, つまり 0.17 mrad 以下に電子ビーム軌道の方向変動を一定にしないと放射光がターゲットに当たらなくなる。(実際にはビームも有限な大きさを持ち、放射光がターゲットに当たる/当たらないというのではなく、ターゲット上で放射光強度の変動となる。) 放射光利用実験装置はリング全周に亘って配置され、同時に利用されるので、このような電子ビーム軌道の安定化は全周に亘り必要となる。このビーム安定化は、速い現象として電子ビームのリングにおけるビーム不安定性などの他、リング自身の電子ビーム軌道の長期間安定度、つまり、電源のリップル・ドリフトのような加速器の各要素機器の電源性能による影響、日照による建物の伸縮あるいは潮汐による加速器要素機器の配列に及ぼす影響などがある。速い現象は加速器学として非常に興味深いものであり積極的に検証・解決され続けており、近年、日周変動のような遅い現象も注目され検討が進んでいる。勿論、変動を抑制する電子ビーム制御技術も確立されてきており、必要に応じて外力を加えて変動を抑制することが可能であるが、そのような変動を起こす要因をできる限り除くことが大切であろう。その意味で、リングで運転を行う電子ビームのエネルギーまで加速できるブースターは重要である。このブースターにより、リングの電源類 (入射に関する磁石設備は別にして) は常に一定の出力で運転することになり、大きな出力変動に伴う熱的な変動要因を抑制することができる。電子ビーム軌道は連続して監視・補正されるため、ビーム入射により軌道が変動することがない。また、定格エネルギーによるリングへの入射ができることから、減少した電子ビーム分だけ追加入射を行うことができ、トップアップ運転の実現を可能にする。

SPring-8 線型加速器は、入射器として使用しない時間を、別途電子ビームを用いた利用を行うことを考え、最大エネルギー 1.2 GeV まで加速できる (通常運転では、1 GeV でブースターに入射する)。

## 2. 線型加速器 (リナック)

リナックは大きく分けて、前段加速部および主加速部から成る。前段加速部は電子銃のカソード部で生成した電子群を高電界 (熱電子型電子銃で ~200 kV, RF 電子銃で数 MV) により加速を行う。ここで電子群は電子ビームに成形され、ビームとしての性能を与えられる。この電子ビー

\* JASRI/SPring-8 加速器部門 〒679-5198 兵庫県佐用郡三日月町光都 1-1-1  
TEL: 0791-58-0851 FAX: 0791-58-0850 E-mail: yonehara@spring8.or.jp

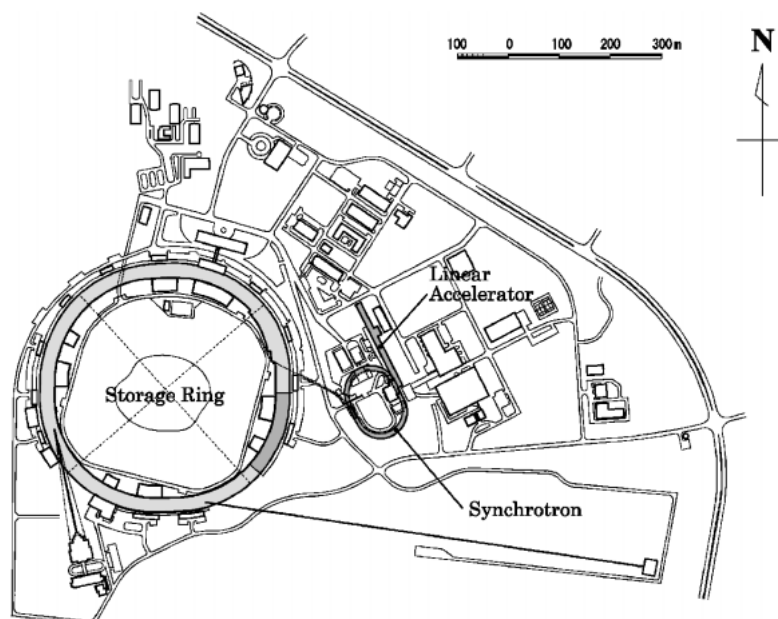


Figure 1. SPring-8 Accelerator Complex.

Arrangement of the SPring-8 accelerators is shown with those of the accelerator-buildings, in which these accelerators are installed. The floor level of the injector, the Linac and Booster, is 9 m lower than that of the storage ring. After being accelerated by the booster, the electron beam is transported to the ring through the underground beam transport-line. The beam goes up to the beam level of the ring and is injected into the ring from the inside. This transport line does not interfere with photon beam lines and experimental equipments which are placed at all around outside of the ring. This arrangement of the ring and injector is typical for SR facilities, such as UVSOR, and in some cases the injector is installed in the inside of the storage ring, as in ESRF. (This picture is offered by the SPring-8 Public Relations Division)

ムは加速管により、高周波加速を受け、所定のエネルギーにまで加速される。Fig. 2に、SPring-8 リナックの電子銃、加速管及び電子ビームの横方向への発散を防ぐため4極電磁石、監視・計測のため各種ビームモニタ装置の配置を、Table 1に、ビームパラメータと主要構成機器一覧表を示す。

SPring-8ではその使用目的に合わせ、従来型の熱電子銃を用いており、電子銃から引き出された電子ビームは進行方向の長さ（パルス長はしばしば時間で表すので併記する）は、300 m (1  $\mu$ s), 12 m (40 ns), 30 cm (1 ns) が選択できるようになっている。このうち、1  $\mu$ s パルス長は加速器群の初期調整中に使用されたが、現在は使用していない。いずれのパルス長を選んでもリナック加速周波数 (2,856 MHz; 波長は105 mm であり、時間で表すと350 ps) に比較すると長いため、バンチング部のRF空洞 (2,856 MHz) で集群される (バンチング)。電子ビームのバンチングの様子を加速周波数の上に示したものが、Fig. 3である<sup>2)</sup>。Fig. 3では、電子銃から30 cm (1 ns) 長の電子ビームを取り出した場合を示している。このバンチングは効率良く加速することが目的ではなく、中心位相にその前後に分布した電子を集めることが目的であるので、加速高周波の電場強度は加速管入り口までに効率良くバンチングされるように設定する。この加速高周波の中心位相に集められた電子は、主加速部の加速高周波で効率良く加速

Table 1 Parameters of the beam and rf system of the SPring-8 linac

Beam parameter		
Pulse width	40 ns	1 ns
Peak current	140 mA	2 A
Beam energy (maximum)	1.2 GeV	
Energy spread	$\pm 0.9\%$	$\pm 0.3\%$
Emittance x (90%)	65 $\pi$ nm $\cdot$ rad	31 $\pi$ nm $\cdot$ rad
Emittance y (90%)	43 $\pi$ nm $\cdot$ rad	58 $\pi$ nm $\cdot$ rad
Pre-buncher		
Type	Standing wave	
Operation frequency	2,856 MHz	
Shunt impedance	24 M $\Omega$ /m	
Unloaded Q	6,400	
Input power (usual operation)	7 kW	
Buncher		
Type	Standing wave	
Operation frequency	2,856 MHz	
Number of cells	13	
Shunt impedance	103 M $\Omega$ /m	
Unloaded Q	13,400	
Input power (usual operation)	3 MW	
Accelerating structure		
Type	Travelling wave	
Electric field distribution	Constant gradient	
Total number	25	
Operation frequency	2,856 MHz	
Phase shift/cell	$2\pi/3$	
Number of cells	81	
Shunt impedance	54 M $\Omega$ /m	
Unloaded Q	13,500	
Effective length	2.88 m	
Filling time	610 ns	
Input power (usual operation)	35 MW	

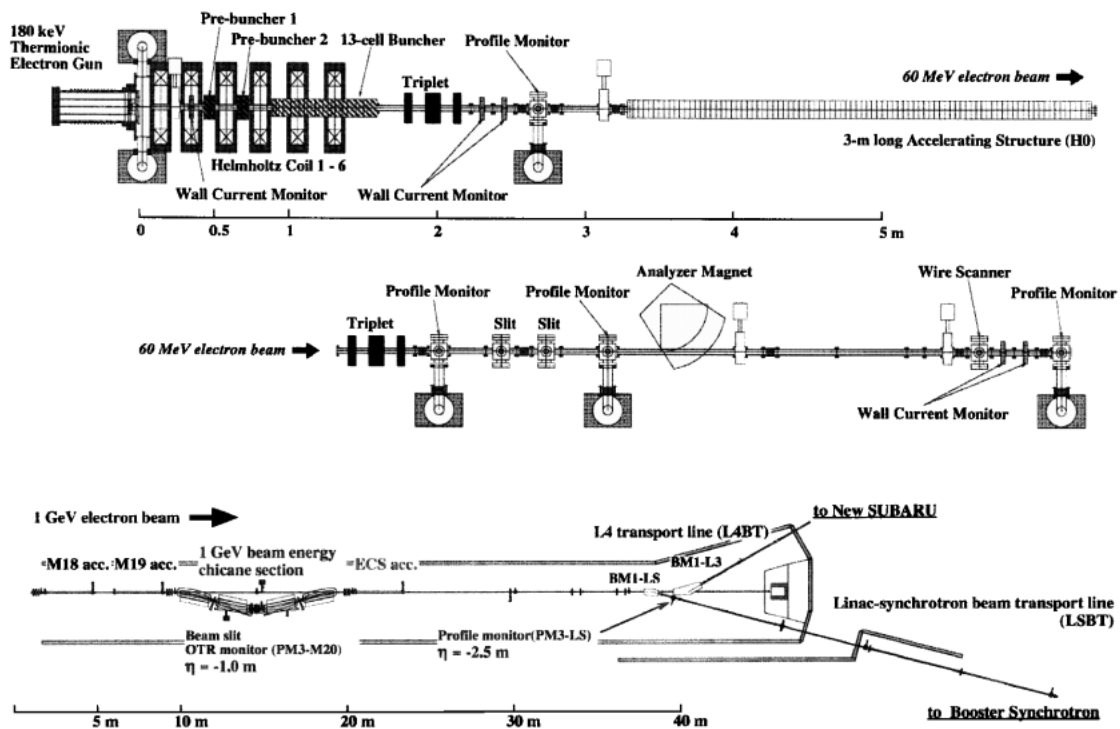


Figure 2. Outlook of the SPring-8 Linear Accelerator.

These drawings show the electron gun, magnets, accelerating tube, beam monitors and vacuum pipes. The power supplies, power-lines, RF wave-guides, water-cooling and vacuum-pumping equipments are eliminated to see the composition of the linac easily. By the same reason, most of the accelerating tubes and focusing magnets of the main accelerating section, which are placed alternatively, is omitted in this figure. The upper part of this figure shows the electron gun, bunching section, in which the electrons are produced and formed into the electron beam, and the first accelerating-tube of the accelerating section. The middle one shows the next components after the upper one, and focusing magnets and beam monitors are placed. The lower one shows the last stage of the linac and the energy compression system ECS (ECS is explained in Fig. 4). In the lower-right direction, there is the SPring-8 booster synchrotron. (The figure is offered by T. Asaka from Ref. 2.)

するため加速電場の最大となる位相に受け渡される。加速管は全部で25本使用され、一台の加速管は81セルの加速空洞から構成され、電子ビームが通過する時間と高周波加速電場の位相変化は $\pm 0.5^\circ$ 以下の精度で製作されている。加速管25本で電子ビームを1 GeVまで加速するので、1本当たりのエネルギー印加は $1 \text{ GeV} \div 25 \text{ 本} = 40 \text{ MeV}$ となり、加速電場としては、40 MV相当である。加速管2本毎にクライストロン1台から高周波電力が印加されるため、各々のクライストロン間の位相を正確に合わせなくてはならない。例えば、連続する2台のクライストロン間の位相が $10^\circ$  ( $2.92 \text{ mm}$ ,  $350 \text{ ps} \times 10^\circ \div 360^\circ = 9.72 \text{ ps}$ )ずれていた場合、 $40 \text{ MV} \times 2 \text{ 本} \times \sin(90^\circ - 10^\circ) = 79 \text{ MV}$ であるから79 MeVのエネルギー利得となるため、正しい位相で加速された場合に得られる80 MeVと比較すると1%程度のエネルギー損失となる。実際に電子ビームのバンチ長は6 mm (20 ps)程度であり、同一の加速管を通過した電子のバンチ内でこの程度のエネルギー幅を生じ、クライストロン間の位相差の変動により同程度のエネルギー変動を生じる。

大電流ビームの場合、リナックにより加速された電子ビームは1%以上のエネルギー幅を持つと述べたが、エネルギー圧縮システム (Energy Compression System; 以下, “ECS” と略す) を用いてエネルギー幅を減少させている。Fig. 4に示すように、電子ビームが偏向電磁石を通過するとエネルギーの高い部分は曲げられにくく、エネルギーの低い部分よりも行路が短くなり、エネルギーの高い部分が先に、低い部分が電子ビーム分布の後方に来るため、分布が回転したようになる。この電子ビームの分布の中心が加速高周波位相の0度付近に来るように加速管で加速すると、エネルギーの高い部分は減速され、低い部分は加速されるので、電子ビームのエネルギー幅は減少する。図に示すように、バンチ長はECSに入る前より長くなるが、ECS以降は加速管で加速しないし、ブースターで電子ビームを受け取れる時間幅は1 nsあるので、受け渡しのタイミングが合っていればビーム損失にならない。

運転当初は、クライストロン冷却水の温度調整機能が不十分であり、また、各クライストロン電源に与える加速周波数信号伝送路の安定性の悪さなどがあり、電子ビームの

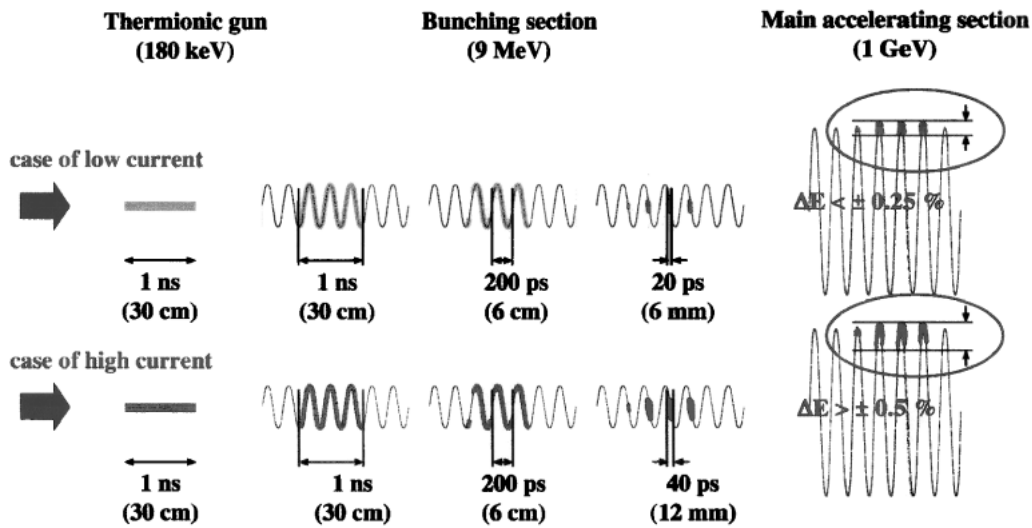


Figure 3. Beam Bunching.

This figure shows the beam bunching-process at the bunching section of the linac. Electrons are drawn by points. The upper half is in the case of lower-current electron-beam, and the lower half is in that of higher-current electron-beam. In each case, the electrons are extracted from the themionic-electron gun as an electron-train of 1-ns pulse length (bold line), collected around a suitable phase of the accelerating frequency in the bunching section and at the last stage of this section the electron beam is packed in narrower phase as a fine micro-bunch distributed within 1-ns length. The right-hand side column show the energy spreads of the 1-GeV electron-beams. (This figure is offered by T. Asaka.)

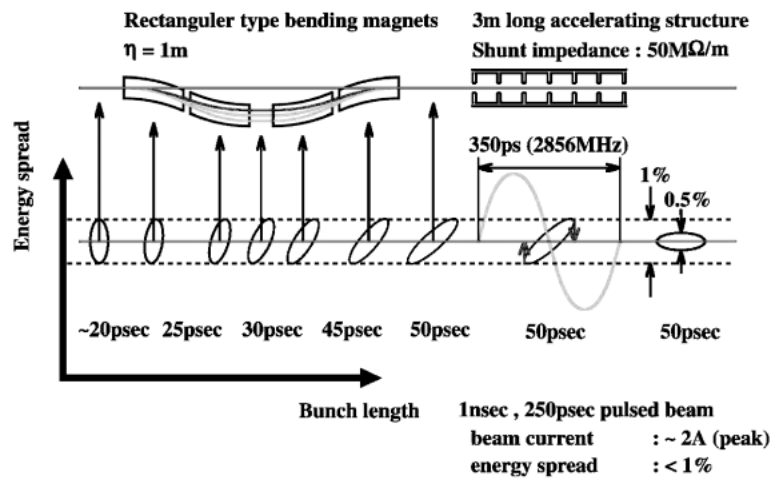


Figure 4. Energy Compression System (ECS).

ECS is composed of a Chicane section (4 bending magnets) and one accelerating tube. At first, lower-energy part of the electron beam is bent stronger than higher part of the beam and runs through the outer course in the Chicane, and higher-energy part of the beam is contrariwise transported along the inner course. After the Chicane section, higher-energy electrons of the beam are located at the lead phase of the micro-bunch and lower-energy ones are gathered at the follow phase. The center phase of the beam bunch coincides with the zero-crossing phase of the accelerating frequency, the lead part (with higher-energy) of the electron bunch is suppressed and the follow part obtains a bit of the beam energy. The energy distribution of the beam is expected to be improved after ECS. (This figure is offered by T. Asaka.)

中心エネルギーが1%以上変動していたが、各部の安定化を行うことにより0.03%程度に、さらに、ECSの設置により、5%程度のエネルギー幅を、0.5%程度まで改善することができ、現在では1サイクル(4週間)に亘る運転期間に、ほぼ無調整でブースタに入射が実施されている。

### 3. ブースターシンクロトロン

ブースターシンクロトロン(ブースタ)は、リングへ入射するビームエネルギーを所定の値まで上げることをその目的としており、加速原理はリングと同じである(いずれも加速器分類上は、“シンクロトロン”である)ので、原理などの詳しい解説は、同シリーズの第一、二回目「電子

蓄積リングとは」を参照して頂きたい<sup>3)</sup>。本稿では、具体例として SPring-8 を取り上げる。

SPring-8 ブースターシンクロトロン (ブースタ) は、リナックで 1 GeV まで加速された電子ビームを受け取り、最大加速エネルギー 8 GeV までのリング運転エネルギーまで加速し、リングに供給する。ブースタは入射時、出射時はそれぞれ一定エネルギーで運転できるように、任意の加速パターンで運転できる。通常の運転パターンは、まず入射エネルギー 1 GeV に相当する期間が 150 ms 続き、この間にリナックから送られた電子ビームを捕獲し、その後加速期間が 350 ms あり、この間に電子ビームは 1 GeV から 8 GeV まで加速される。定格エネルギーまで加速された電子ビームは、ビーム出射期間 150 ms の間にブースタから取り出される。従って、ブースタは入射・加速・出射 (+入射準備) の繰り返しを約 1 秒間隔で繰り返す。ブースタの高周波加速設備は 2 台のクライストロンを持ち、各々 4 台ずつの加速空洞に加速高周波電力を供給している。電子ビームの加速エネルギーに応じてクライストロン出力を変更するのではなく、クライストロン間の位相を 150 度逆位相から同位相まで変化させることにより、合成した加速電場で加速エネルギーに応じた加速場を得ている。このため、クライストロンの出力変化に伴う出力電力の高周波位相の変化を制御することは不要であり、加速空洞は常に一定の高周波電力で運転されているため、熱的な安定が保ち易い (と思われる)。Table 2 にブースタのパラメータを示す。励磁パターンと蓄積された電子ビーム量を Fig. 5 に示す。加速器原理は、リングと同様であるが電子ビームのエネルギーを上げる、長時間安定に高品質の電子ビームを確保する必要は無いなどの点が異なっており、偏向電磁石の台数に比べ、四極電磁石・六極電磁石の台数が少なくなっている。台数の点はともかくとして、主要構成機器はリングと同種である。

#### 4. ビーム入射

前段 (本稿では、リナック) で加速された電子ビームをブースタに入射するには、On-Axis 入射と Off-Axis 入射が考えられるが、電子ビームは比較的強度が強い (電子の個数が多い) ので、On-Axis 入射方法をとる場合が多く、Fig. 6 の平面軌道に示すように、ブースタでも On-Axis 入射を行っている<sup>4)</sup>。ブースタのビーム周回軌道上に電磁石を設置し、入射ビームが持つブースタ周回軌道との交差角度の偏向を行う。既にビームが蓄積されている場合には、入射ビームを周回軌道に乗せる偏向を行うため、既に蓄積されていたビームに周回軌道に対して角度を付ける偏向を与えることになる (大抵の場合、この電子ビームは失われる)。入射ビームはブースタ周回軌道にそのまま乗ることになり、Fig. 6 の断面図に示すようにビームが蓄積される真空槽はビームの進行方向に対して垂直方向の拡がり確保する大きさがあればよい。(真空槽の大きさが本

Table 2 Parameters of The SPring-8 Booster Synchrotron

Injection energy	1 GeV
Maximum energy	8 GeV
Circumference	396.124 m
Repetition time	1 sec
Natural emittance (8 GeV)	230 nm·rad
Momentum spread (8 GeV)	$1.26 \times 10^{-3}$
Number of cells/periodicity	40/2
Nominal tune ( $\nu_x/\nu_y$ )	11.71/8.81
Natural chromaticity ( $\xi_x/\xi_y$ )	-14.4/-11.5
Ratio frequency	508.58 MHz
Harmonic number	672
Radiation loss (8 GeV)	12.27 MeV/turn

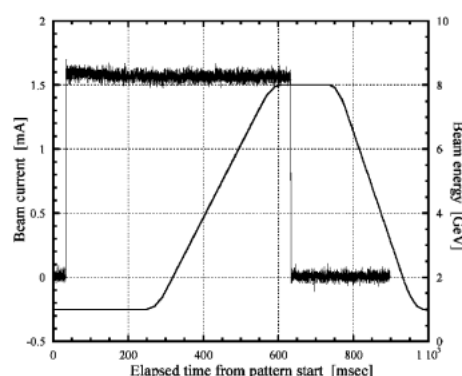


Figure 5. Energy Ramping and Beam Current of the SPring8 Booster-Synchrotron.

A ramping pattern of the electron-beam energy, induced by the excitation current-pattern of the bending magnets, is seen in a trapezoidal shape, and beam current in the booster, measured with the DCCT, is seen in a oblong shape (the line width is due to the measurement error). At 150 ms after the beam injection, the energy ramping is started and reached at the ejection energy (in this case, the ejection energy of 8 GeV) during 350 ms. In the period of the ejection energy (30 ms after arriving at the ejection energy), the beam is extracted from the booster.

質ではなく、真空槽を抱え込み、ラティスを構成する電磁石類の磁場の均一性が確保されている空間的拡がり確保することが大切。この拡がり常識的な範疇において狭ければ、電磁石の製作費が削減でき、当然、励磁に要する電源類の製作費も削減される。) 陽電子ビームを使用する場合 (陽電子ビームは、適当なエネルギーまで加速した電子ビームをターゲットに照射しビームに生成するため電流が低い) を考慮し、ブースタで 1 サイクルに加速する陽電子ビームの電流量を増加するため、周上の対称な 8 箇所のバンチにビームを順次 1/60 秒間隔で入射できるようにしており、ブースタ周回軌道上で入射ビームの角度変更を与えるパルス電磁石は励磁時間が 300 ns 以下にできるように分布常数型の電磁石を使用している<sup>5)</sup>。一方、リングでは、同じバンチにビーム (上で述べたように、陽電子ビームの場合も、電荷が反対である事を除けば、事情は同

## On-Axis Beam Injection Scheme

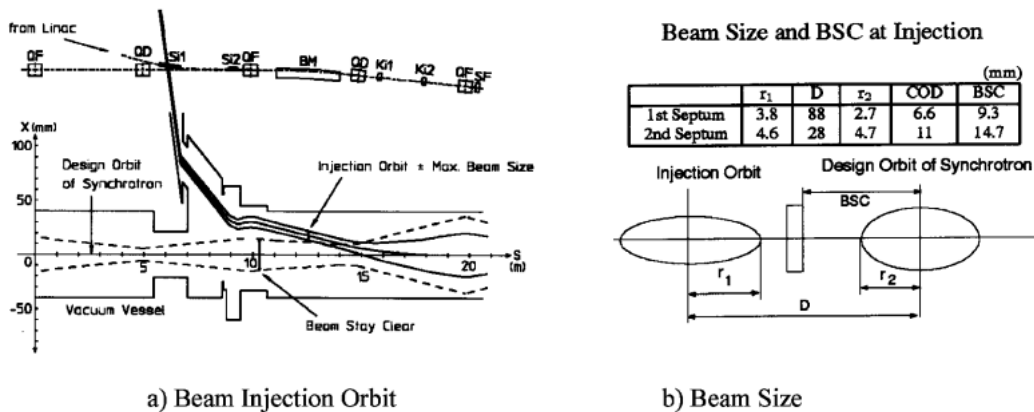


Figure 6. On-Axis Beam-Injection.

1-GeV electron-beam of the SPring-8 linac is injected to the booster-synchrotron with the on-axis injection scheme. The beam orbits of the injected and stored beams and beam sizes are shown. a) The arrangement of the magnets in the injection section and horizontal beam orbits are shown. The injection orbit is expressed with a solid line and the beam size of the injected beam in the booster is expressed with a broken line (Design orbit of the booster is set on the s-axis). b) Cross section of the beam sizes at the injection septum-magnet. When the beam energy is ramped, the beam size is decreased with the radiation damping.

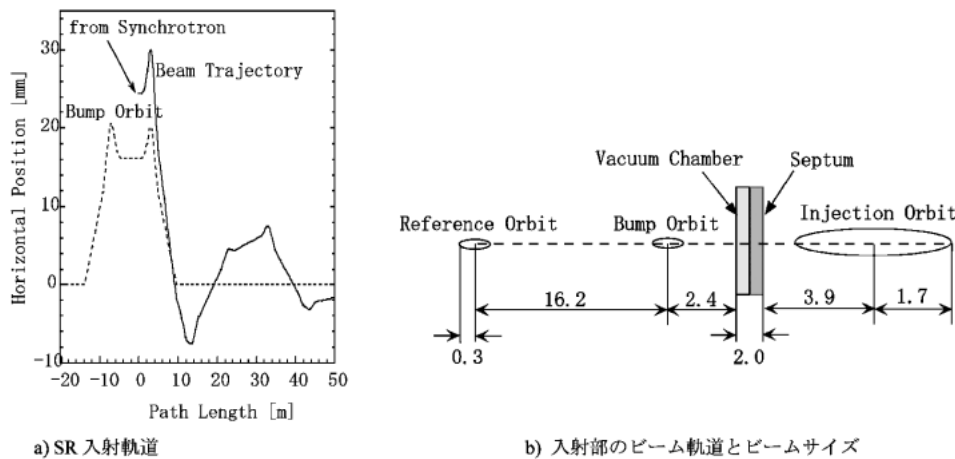


Figure 7. Off-Axis Beam-Injection.

An 8-GeV electron-beam of the SPring-8 booster synchrotron is stacked in the storage ring with the off-axis injection scheme. The beam orbits of the injected and stored beams and beam sizes are shown. a) The injection beam-orbit is shown by a solid line and the bump orbit is shown by a broken line (the reference orbit of the ring is assumed on the abscissa). b) Cross section of the beam positions and sizes in the tangential direction of the beam orbit at the injection septum-magnet. In this case, the bump orbit is kept away from the reference orbit by 16.2 mm (design value). Before the radiation damping (damping time; 8.3 ms), the injected beam in the storage ring is oscillating around the reference orbit with an oscillation amplitude determined from the distance between the bump orbit and the injection orbit (= 8.3 mm). On the opposite side of the reference orbit, a space with at least the same size is required. (This figure is offered by K. Soutome from Ref. 7.)

じなので、ビームは電子ビームの場合で話を進める)を追加しなくてはならないため、Off-Axis 入射を行う。Fig. 7 に示すように、既に蓄積されている電子ビームがあり、リングの蓄積ビーム周回軌道に入射ビームを軌道にのせるための外力(磁場)を加えることはできない。このため、周回軌道から横に離れた位置で電子ビームを周回軌道に平行に入射する<sup>6)</sup>。周回軌道は、この入射時に合わせ、入射位置に接近するように膨らんだ軌道(バンプ軌道)に変更される(ただし、バンプを大きくしすぎると既に蓄

積されている電子ビームの損失を招く)。通常、パルス電磁石4台で構成され、励磁期間中もバンプ軌道は閉じた軌道であることが必要なので、相似形に励磁される様にバンプ電磁石及び電源を製作する。図中でも入射区間の両側では、リングの周回軌道に戻っていることが示されている。入射された電子ビームが周回してきた時に、入射用電磁石にぶつからないようにビーム入射後、徐々に軌道を元の周回軌道に戻す。入射されたビームは周回軌道の周りを振動しながら周回し、放射減衰(SPring-8蓄積リング;

8.4 ms) により徐々に既に蓄積されていた電子ビームと一体になる。入射軌道と周回軌道の距離はできるだけ小さい方が望ましいが、蓄積ビームの大きさ、入射軌道を周回軌道と平行にする電磁石（セプタム電磁石を使用する）のコイルの厚さ、入射ビームの大きさに加え、入射ビームが周回軌道を中心に振動する振幅などを含むことのできる真空槽の大きさが必要になる（前述したように真空槽の大きさが本質ではなく、この大きさを抱え込むことのできる電磁石類の磁場の均一性が確保されることが重要である）。この二通りの入射方法をそれぞれ実際に SPring-8 のブースタ、リングで実行しており、ビームの大きさ、セプタム電磁石の大きさ（セプタム板の厚さ）から得られる必要なサイズも Fig. 6, 7 に示した。Off-Axis 入射を行う場合に、最初に電子ビームを通す時はバンチ軌道の設定に難しい点があり、バンチ軌道を大きくとることにより、入射用電磁石設備の確認を兼ねて On-Axis 入射を実施することが多い。On-Axis 入射を行っているにも関わらず、ブースタに電子ビームを蓄積するために必要とするサイズが大きくなっているのは、入射ビームが前段の加速器（リナック）のビーム性能を持っていることによる。また、表中に示した周回軌道の歪み（Closed Orbit Distortion/COD）の大きさは、設計時にラティス電磁石の設置精度・磁場分布精度などを想定した値を用いており、ビーム運転が実施され調整が進めばさらに小さくなる値である。

ビーム入射時の進行方向と垂直方向の空間的な拡がりについて述べたが、次に時間的な点を考えてみる。リナックにしてもブースタ、リングにしても、高周波加速を行っており、電子ビームは加速周波数の位相上にバンチングされている。この時間的位置は、加速器間でビーム受け渡しを行う場合に、ビームを蓄積するバケットを決めることになり、また、入射用電磁石類（出射の場合も）をビームが通過するタイミングに合わせて励磁するために重要な情報となる。ビームが入るべきバケットの同定（Bucket Identification/BID）および各種機器を動作させるタイミング信号を、この加速周波数が時系列を決める最小単位と捉え、タイミング設備で生成する。このようなタイミング信号には、電子銃から電子ビームを発生する時刻から始まり、ブースタへのビーム入射及びリングへの出射、リングの入射に至る加速器システムのパルスあるいはパターン運転を行う機器の運転開始信号などが含まれる。加速周波数が同一の発信機から得られた周波数を基準としている場合は、周波数内の位相関係は保たれる（基準周波数の伝送路が温度などの影響で伸縮する、あるいは要素機器がドリフトを持つ場合などには位相関係が崩れる）ことが期待できるので問題は生じないが、通常、リナックとブースタ及びリングに使用する高周波源は周波数が異なる（周波数そのものの値より、一台の基準周波数発信機で発生された周波数を使用していることが大切であり、周波数自体は整数倍でも半・1/3・1/4…整数倍などでも問題はないと言える）。

SPring-8 でも、リナックは2,856 MHz、ブースタとリングは508 MHz（こちらは同種のクライストロンを使用しており、基準周波数発信機は同一の機器から周波数を分配して使用している）と全く位相関係が確保されていない。放射光利用実験では放射光発生間隔を実験に応じて調整することが必要な場合がある、あるいは前述したリングにおけるイオン捕獲効果を抑制するため特定のバンチにビームを入らなくしなくてはならないなど、ビーム入射位置を制御しなくてはならないため、リングに使用する加速高周波（508 MHz）を全タイミング設備の基準周波数とし、BID を管理している。この BID に基づいてブースタから定格エネルギーまで加速された電子ビームをリングに出射し、ブースタからリナックの電子銃に電子ビーム発生信号が発信される。特に、このタイミング設備の機能を活かし、ブースタで単バンチビームの成型を行っており、単バンチビームの純度を上げるため、リングから分配されている加速高周波の位相信号をそのまま使用し、RF ノックアウトと呼ばれる装置で隣接するバンチに入った電子ビームを削除している。単バンチビームは、リングの BID に従い、事前に設定されたリングのバンチ毎に入射することができ、タイミング設備が連続して機能している限り常に監視されており、現在実施されている4週間連続運転中にも継続されているので、損失電子ビーム分を追加入射することで必要な蓄積電流値を得ることが出来る（実際には、その途中でビーム研究期間があり、蓄積されたビームは廃棄され、利用者運転を再開する場合にビーム条件も更新される<sup>7)</sup>。通常の利用運転に供するために単バンチビーム成型した後、リングに蓄積された電子ビームの不純度を光子計測法で計測した標準的なデータを Fig. 8 に示す。多くの利用運転が単バンチビーム運転をベースに行われており、この時にも追加入射を行っている。現在得られているチャンピオンデータは、 $6 \times 10^{-10}$  以下（計測限界以下）

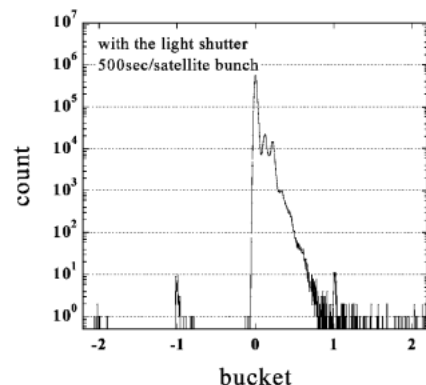


Figure 8. Impurity of the single bunch-beam. This figure shows the impurity data of the single-bunch beam-operation in normal user time observed by the photon counting method. Because the optical quenching ratio of the main bucket is about 1/200, the beam impurity of the both sides is estimated to be  $6 \sim 7 \times 10^{-8}$ . (This figure is offered by K. Tamura from Ref. 9.)

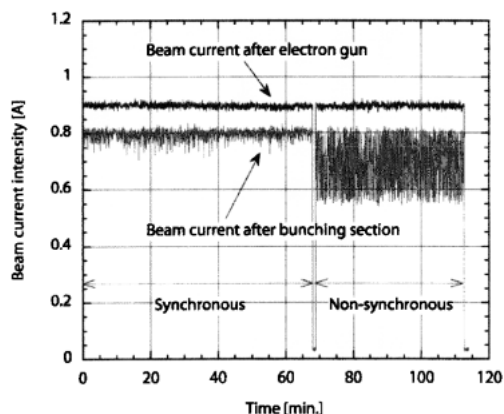


Figure 9. Stabilization of the electron beam-current due to synchronization of the two accelerating frequencies. This figure shows that the beam-intensity fluctuation is improved by the synchronization system of two accelerating frequencies. The upper line is the beam current observed at the point just after the electron gun and the lower line is the current observed at that after the bunching section. The current intensity of the gun is stable except for the period of exchanging the synchronization system at around 68 min. The synchronization system was operated during the “synchronous” period (left-hand side of this figure) and in the “non-synchronous” period the system was not activated (right-hand side). In the synchronous-period, the beam current is kept to be high level and the fluctuation width of the current is suppressed. Contrariwise, in “non-synchronous” period, the average current is decreased and the fluctuation width of the current is wider than that on the synchronous period. (This figure is offered by T. Asaka.)

である<sup>8)</sup>。

最近では、リナック (2,856 MHz) とブースタ及びリング (508 MHz) の加速周波数を同一の基準周波数から発生することにより、ビームの受け渡し時に加速周波数間の位相関係を確保することでビーム電流の損失を極力抑制し、単バンチビームの電流値もより安定化しようとする試みを実施された。この同調システムを起動した時とそうでない時 (Fig. 9) とで明らかにビーム電流値が安定している様子がわかるように、成功を取めている<sup>9,10)</sup>。

## 謝 辞

放射光学会誌編集委員から、放射光利用者、しかも比較的若い利用者 (加速器を利用しているが加速器の専門家ではない) に光源である加速器の解説シリーズを企画しており、そのうちの〈入射器・ビーム入射〉を解説するように依頼があった。光源である蓄積リングは、分子科学研究所 UVSOR の加藤氏が執筆されており、加速器の原理などはそちらに充分記載があり、さらに理解を深めたい方は、KEK で行われている OHO のテキストなどをご覧になることをお勧めします<sup>11)</sup>。

本稿の機会を与えていただき、関係各位に感謝しています。また、リナック関係の図・表は、安積隆夫、ブースタ関係は青木毅、深見健司、細田直康、リング関係は、早乙

女光一、高雄勝、田村和宏の各氏に御協力を頂いた。

## 参考文献

- 1) T. Kasuga et al: “Ion-Trapping Effect in UVSOR Storage Ring”, *Japanese Journal of Applied Physics* **24**, 1212 (1985).  
いろいろな加速器施設で実情に応じてイオン効果対策がとられ、最近では SPring-8 蓄積リングでもその効果が観測され、対策がとられている。例えば、  
M. Takao et al: “Observation of Ion Effects at the SPring-8 Storage Ring”, Proceedings of European Particle Accelerator Conference 2002, Paris, France.
- 2) T. Asaka et al: “Stabilization of the rf system at the SPring-8 linac”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* **488**, 26 (2002).
- 3) 加藤政博: 〈放射光源シリーズ(1)〉「電子蓄積リングとは(1)」, 放射光 **16**, p41 (2003).  
(同(2)は印刷中)
- 4) H. Yonehara et al: “DEVELOPMENT OF THE PULSE MAGNETS FOR THE BOOSTER SYNCHROTRON OF SPRING-8”, Proceedings of the 1995 Particle Accelerator Conference, May 1-5, 1995, Dallas, Texas.
- 5) Y. Sasaki et al: “Development of the Kicker Magnet for SPring-8”, Proceedings of the 9<sup>th</sup> Symposium on Accelerator Science and Technology, Tsukuba, Japan, (1993) 255.  
8-Pulse 入射については、N. Hosoda et al: “TIMING SYSTEM OF SPRING-8 BOOSTER SYNCHROTRON”, Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Conference on Accelerator & Large Experimental Physics Control Systems, 2001, San Jose, California, p. 148.
- 6) T. Bizen et al: private communication; “Conceptual Design of the Injection Section Chamber”, SP8 Annual Report 118 (1994).  
K. Kumagai and S. Matsui: private communication; “Magnetic Performance of Prototype Bump Magnet for the SPring-8 Storage Ring”, SP8 Annual Report (1995) 113.
- 7) 鈴木寛光 et al: private communication; “セバラルバンチ運転の状況 (マシンからの報告)” (in Japanese) SPring-8 利用者情報誌 **3**, 1 (1998).  
H. Suzuki et al: “Formation of a single-bunch beam in the booster Synchrotron at SPring-8”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* **444**, 515 (2000).  
N. Hosoda et al: “TIMING SYSTEM OF SPRING-8 BOOSTER SYNCHROTRON”, Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Conference on Accelerator & Large Experimental Physics Control Systems, 2001, San Jose, California, p. 148.  
Y. Ohashi et al: “PERFORMANCE OF THE REFERENCE AND TIMING SYSTEMS AT SPRING-8”, Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Conference on Accelerator & Large Experimental Physics Control Systems, 2001, San Jose, California.
- 8) K. Tamura: “Measurement of Single Bunch Impurity in SPring-8 Storage Ring using a Light Shutter System”, Proceedings of the 12<sup>th</sup> Symposium on Accelerator Science and Technology, Wako, Japan, 546 (1999).
- 9) Y. Kawashima et al: “New synchronization method of arbitrary different radio frequencies in accelerators”, *Physical Review Special Topics-ACCELERATORS AND BEAMS* **4**, 082001 (2001).
- 10) T. Asaka et al: “A universal technique for synchronizing linac and synchrotron rf’s for stable beam injection”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, Tobe published.
- 11) 例えば、第5回加速器セミナー “OHO ’88” 講義セミナー (1988年8月開催) など。