

解説

PF リング高輝度化の現状

加藤 政博, 堀 洋一郎

高エネルギー物理学研究所放射光光源研究系*

Present Status of the Brilliance Upgrade
Project at Photon Factory

Masahiro KATOH and Yoichiro HORI

National Laboratory for High Energy Physics

A brilliance upgrade project is now in progress at the Photon Factory storage ring. The beam emittance, which is now 130 nm-rad, will be reduced to 27 nm-rad by doubling the number of the quadrupoles in the FODO cells. This small emittance will result in ten times brighter synchrotron radiation from the existing insertion devices. The accelerator components necessary for the new lattice are now under fabrication or under testing. The reconstruction work of the ring will be started in Jan. '97 and be finished in Sept. The commissioning of the new lattice will be started in Oct. '97.

1. はじめに

現在世界各地で第3世代と呼ばれる放射光リングが建設され, 続々と稼働を始めている。また設計段階の計画もいくつかある(表1)。これら第3世代リングの特徴を一言で言うと, 高輝度放射光を得るために最適化された設計になっているということになる。即ち, 偏向電磁石よりもむしろ挿入型光源を主力の光源とし, それらを設置するための直線部(フリースペース)を多数有する。また, 挿入光源の高輝度という特徴を最大限引き出すために蓄積ビームの低エミッタンス化がはかられている。エミッタンスは小さいもので4 nm-rad程度, 大きいものでも20 nm-rad程度である。ビームエネルギーに関しては6 GeV以上の大型リングと1.5~2 GeVの中規模リングの

2つに分かれるが, 国内では現在建設中のSPring-8が前者に相当し, 東京大学や東北大学のVUV-SXリングの計画などが後者に相当する。

これら第3世代リングに対して, 高エネルギー物理学研究所放射光実験施設のフォトンファクトリ2.5 GeVストレージリング(PFリング)はいわゆる第2世代に属するリングである。すなわち放射光専用のリングであるが, 必ずしも高輝度放射光発生に最適化された設計にはなっていない。実際, 第3世代リングに比べてビームエミッタンスはおよそ一桁大きく, このため放射光輝度は一桁から二桁程度小さいものになっている。

PFリングは建設期以来の研究開発, 改良作業

* 高エネルギー物理学研究所放射光光源研究系
〒305 つくば市大穂 1-1
TEL 0298-64-5672 FAX 0298-64-2801
e-mail katohm@kekvox.kek.jp

Table 1. List of 3rd generation SR light sources (1-3 GeV).

| Name | Location | Status | Energy [GeV] | Emittance [nm-rad] | Circumf. [m] | Straight Sections |
|-----------------------------------|-------------|---------------------|--------------|--------------------|--------------|----------------------|
| <in operation/under construction> | | | | | | |
| ALS | USA | in operation | 1.5 | 4 | 197 | 6 m × 12 |
| ELETTRA | Italy | in operation | 2.0 | 7.2 | 259 | 5 m × 12 |
| SRRC | Taiwan | in operation | 1.3 | 19 | 120 | 6 m × 6 |
| PLS | Korea | in operation | 2.0 | 12 | 281 | 4.3 m × 12 |
| MAX II | Sweden | in operation | 1.5 | 8.8 | 90 | 3.2 m × 10 |
| BESSY II | Germany | under construction | 1.7 | 6 | 240 | 5.6 m × 16 |
| <dedicated to FEL> | | | | | | |
| Duke FEL | USA | in operation | 0.2-1.0 | 18 | 107 | 34 m × 2 |
| DELTA | Germany | under commisioning? | 0.5-1.5 | 5-50 | 115 | 20 m × 2 |
| <design/proposed> | | | | | | |
| SOLEIL | France | design/proposed | 2.15 | 4-30 | 320 | 4 m × 10, 10 m × 2 |
| U. Tokyo | Japan | design/proposed | 2.0 | 4.9 | 388 | 7 m × 12, 12.5 m × 4 |
| SLS | Switzerland | design/proposed | 1.5-2.1 | 1.6-3.2 | 252 | 7 m × 4, 17 m × 2 |
| Tohok U. | Japan | design/proposed | 1.5 | 7 | 187 | 5 m × 10, 15 m × 2 |
| PF | Japan | present | 2.5 | 130 | 187 | 5m × 2, 4m × 8 |
| | | new | | 27 | | |

の結果、マシンの信頼性、ビーム電流値、ビーム寿命等の点では世界的にも最高のレベルに達しているといえる。しかしながら、第3世代リングが本格的に稼働を始めた現在、特に放射光輝度という利用実験上極めて重要な点において、後れを取ってしまっている。国内でも第3世代光源の計画はあるが、硬X線リングである SPring-8 以外の計画については、スタートしてからでも光が出るまでに5年かかるといわれている。したがって PF リングは今後も VUV-SX 領域における国内での主要な放射光光源としての役割を積極的に果たしていかなくてはならないであろう。このためには光源としての性能の一層の向上をはかり最新の放射光光源に比肩しうるものに改良していく必要がある。

このような観点から、PF リングの高輝度化の可能性を検討した結果、電磁石配列の変更を含むある程度の規模の改造を行えば、PF リングの蓄積ビームを更に低エミッタンス化し、放射光輝度を第3世代リングのそれに匹敵するものにすることは可能であるとの結論に達した^{1,2)}。リング

改造の概要は以下のとおりである。

- リングの約1/3を占めるノーマルセル部の四極、六極電磁石の増設、増強を行なう。
- 偏向電磁石は移動せず既存のビームラインへの影響を最小限に留める。
- エミッタンスは最小で現在の約1/5の27 nm-rad まで小さくできる。
- 放射光輝度はすべてのビームラインで向上し最大で5~10倍になる。
- 改造のための運転停止は9ヵ月とする。

PF リング高輝度化改造に向けた準備作業は既に始まっている。'96年4月現在、必要な加速器コンポーネントの製造、性能試験は順調に進行している。リング改造は'97年1月から9月までの9ヵ月間の運転停止中に行なわれる。同年10月より立ち上げ運転を開始し早急に放射光利用実験を再開する。

今回のリング改造では、放射光輝度の向上という大きな目標に加えて、建設以来15年近くが経過しデザイン、パフォーマンスの両面で古びたものになりつつある加速器各部の見直しと必要に応

じた改造も合わせて行なわれる。これによりマシンの信頼性の向上を計るとともに、ビーム安定化など、総合的な光源性能の向上を目的とした各種システムの導入を予定している。その一方で放射光ビームラインの側でも光源の性能向上、内外の諸情勢の変化に対応したスクラップアンドビルトが進められる予定である³⁾。

2. 高輝度化計画の概要

2.1 PF リングの現状と高輝度化の可能性について

PF リングは電磁石配列が周期的な構造をしたノーマルセル部と呼ばれる部分とそれ以外のイン

サーション部と呼ばれる場所からなる (図1)。インサーション部には計10箇所直線部 (フリースペース) が設けられており挿入光源の設置などに使用されている。ノーマルセル部は極性が互いに反対の2種類の四極電磁石が偏向電磁石の間に一個ずつ交互に設置された FODO セルと呼ばれる基本構造の繰り返しからなっている。PF リングのエミッタンスはこのノーマルセル部のビームオプティクスで決まっていると考えてよい。大雑把に言って四極電磁石の磁場強度を強くするほどエミッタンスは小さくなるが、どこまでも小さくなるわけではなく最小エミッタンスを得るある最適な強さが存在する。PF リングでは1986年

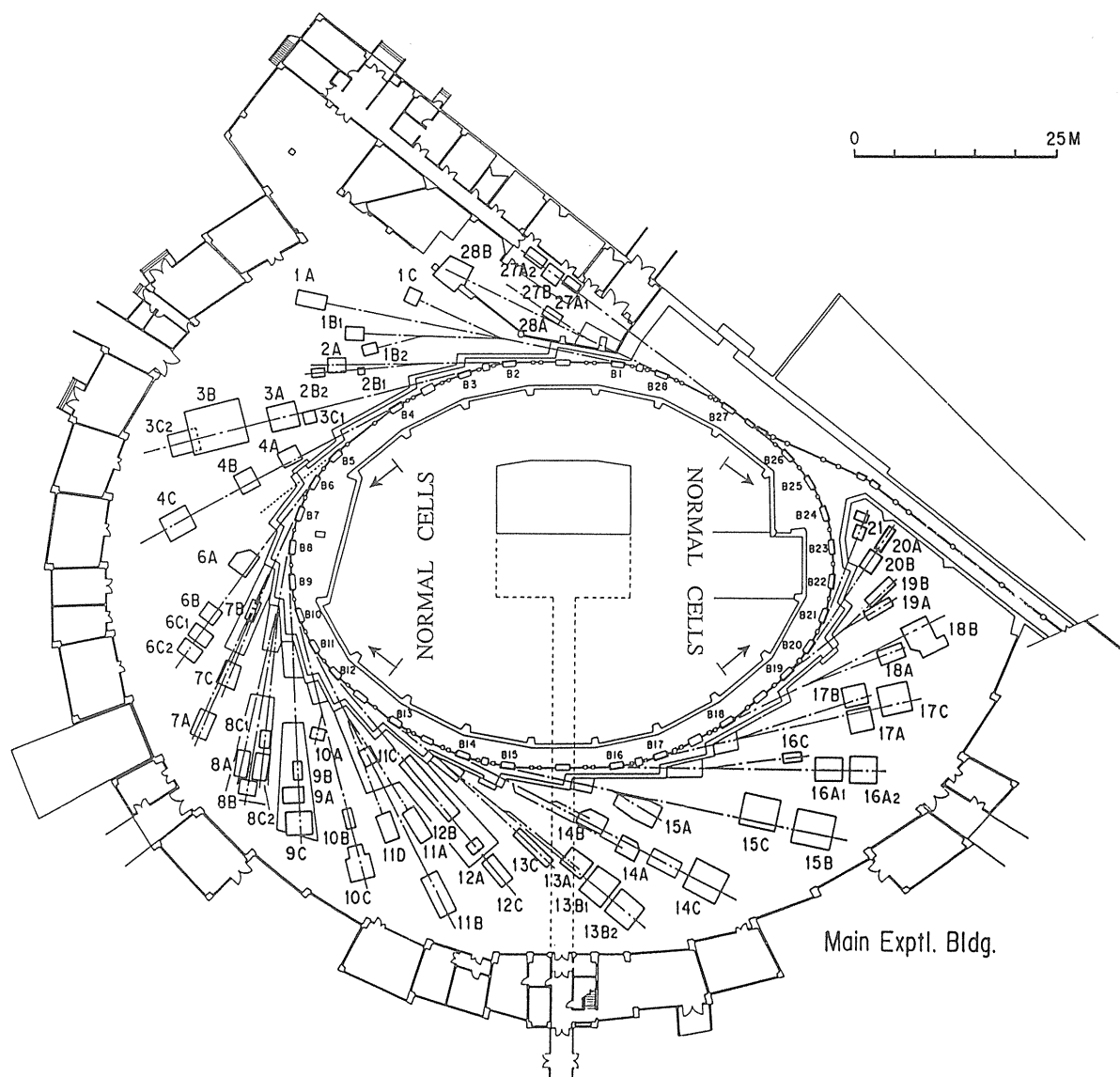


Figure 1. Plan view of the Photon Factory.

に一度低エミッタンス化を行い、エミッタンスを460 nm-rad から130 nm-rad まで小さくした(図3a, 図3b⁴⁾)。このときに四極電磁石の磁場強度は現在の電磁石配列のもとでエミッタンスが最小になるように最適化されている。従って、更にエミッタンスを小さくするには、電源増強等による単なる四極電磁石の磁場強度の変更ではなく、四極電磁石の移動・追加等、ある程度の規模のリングの改造を行なうことが必要となる。

2.2 低エミッタンスオプティクス

現在既に多数のビームラインが建設され稼働しているPFリングの改造を考える場合、偏向電磁石の移動を伴う改造は現実的ではない。偏向電磁石の移動はリングの軌道の形状の変更を意味し、結果として軌道の接線上に建設されている既設ビームラインの移設が必要になるなど、実験ホール側も含めた非常に大規模な改造になってしまう。

偏向電磁石を移動しないという制限のもとでエミッタンスを効果的に小さくできるノーマルセル

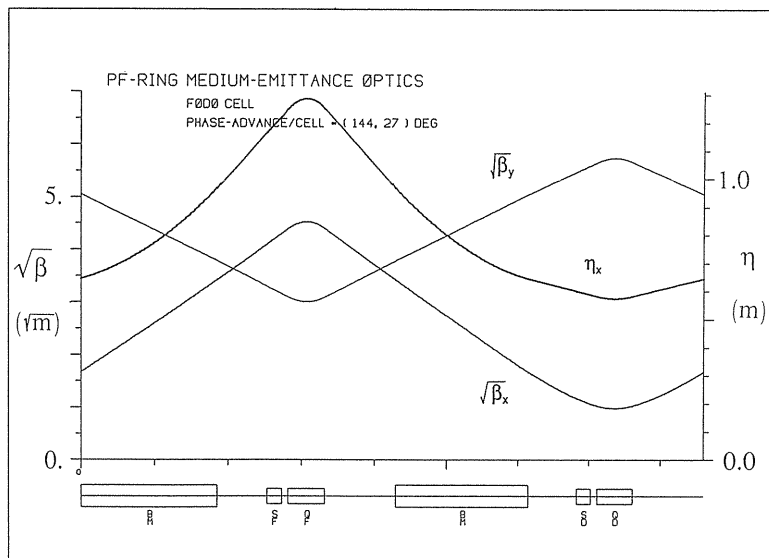


Figure 2a. Beam optics of the present normal cells.

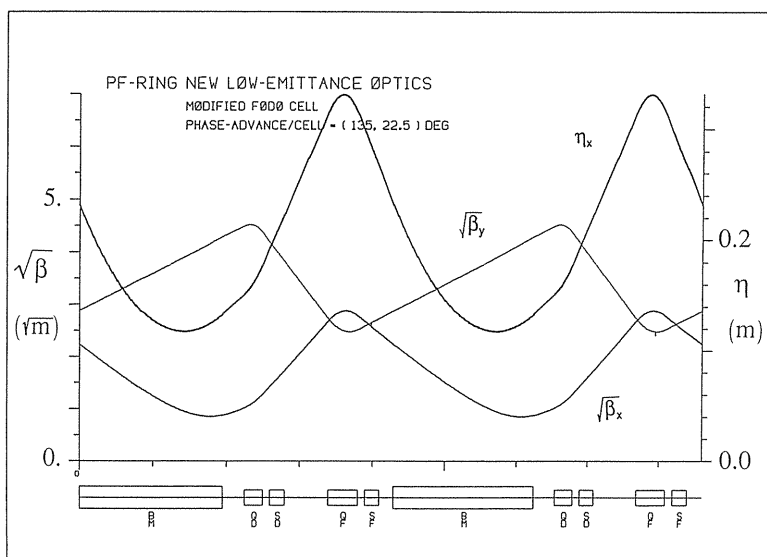


Figure 2b. Beam optics of the new normal cells.

改造案として、これまで偏向電磁石間に1個ずつ配置されていた四極電磁石を2個に増やすことを考えた⁵⁾。改造後のオプティクスは図2のようになる。一般にビームエミッタンスを小さくするには偏向電磁石中でのエネルギー分散関数を小

さくすることが重要であるが、この改造により分散関数が効果的に小さくなっていることがわかる。この改造セルを基本にしてリング一周のオプティクスを計算した結果(図3c), 最小で約27 nm-rad と、現在の値(130 nm-rad)の約1/5の

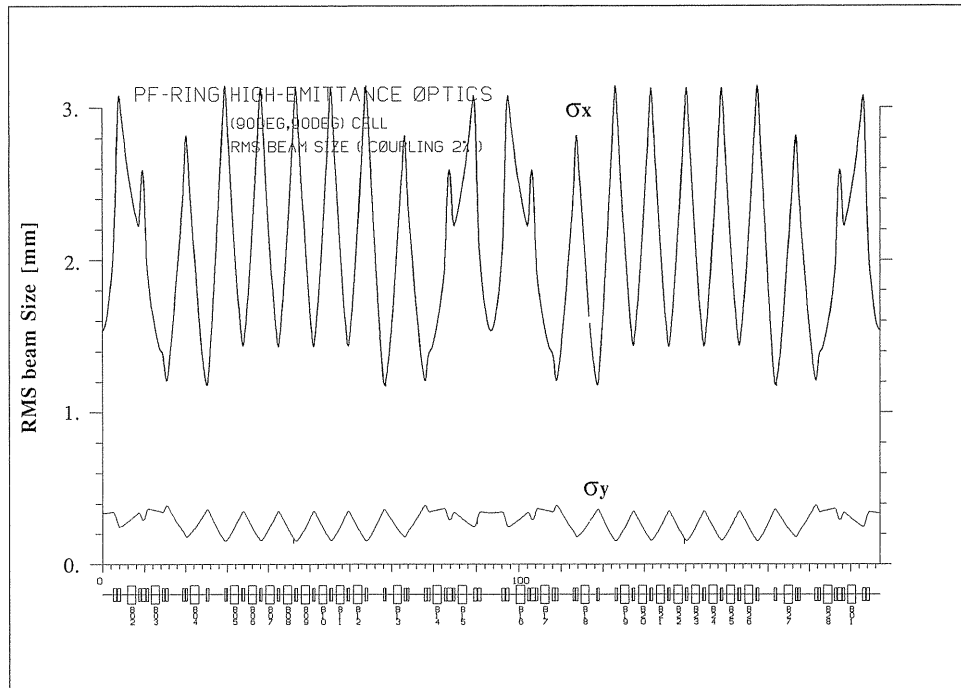


Figure 3a. RMS beam size of the high emittance optics (1982-1986).

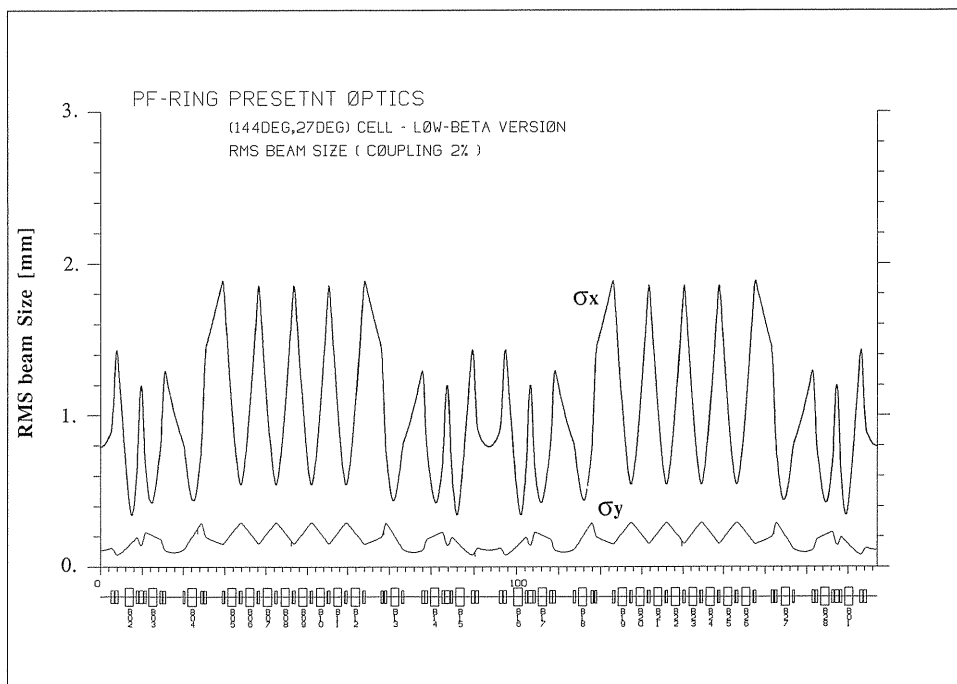


Figure 3b. RMS beam size of the present optics (1986-1996).

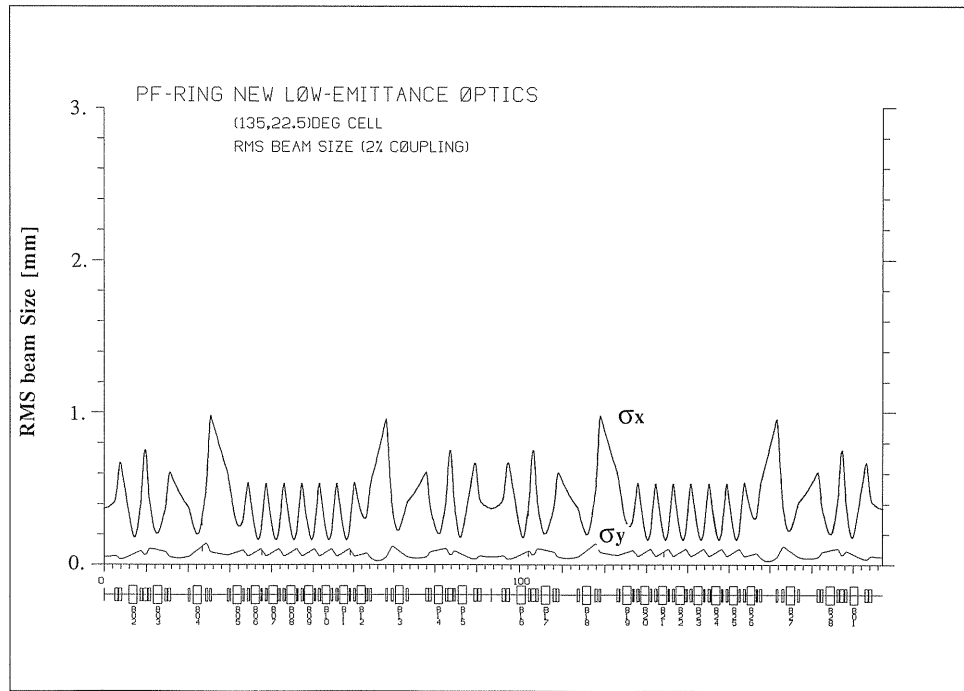


Figure. 3c. RMS beam size of the new low emittance optics (1997-).

エミッタンスが得られることがわかった (表 2)。

新しいラティスでは、エミッタンスは、目的に応じて、最小の27 nm-rad から、現在の値程度まで、さまざまな値に変えることができるようになっている。これに加えて、電源極性の切り替え程度の簡単な作業で現行のオプティクスでの運転も

可能になるよう設計してある。リング改造作業後のマシン立ち上げや焼き出し運転は実績のある現行オプティクスで行なう予定である。また、利用実験もこのオプティクスで早急に再開する。新オプティクスの立ち上げは利用実験と平行してマシンスタディの時間に行ない、可能になり次第利用

Table 2. Summary of the beam parameters.

| | high-ε | medium-ε | low-ε (90 deg) | low-ε (105 deg) | low-ε (135 deg) |
|-----------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Emittance [nm-rad] | 460 | 130 | 45 | 36 | 27 |
| Energy Spread | 7.3×10^{-4} | 7.3×10^{-4} | 7.3×10^{-4} | 7.3×10^{-4} | 7.3×10^{-4} |
| Momentum Compaction Factor | 0.040 | 0.016 | 0.0079 | 0.0061 | 0.0043 |
| Betatron Tunes (H, V) | (5.40, 4.20) | (8.44, 3.30) | (9.15, 4.20) | (9.85, 4.20) | (10.85, 4.20) |
| Natural Chromaticity (H, V) | (-6.5, -5.1) | (-11.8, -11.7) | (-12.2, -10.4) | (-12.5, -12.3) | (-16.1, -13.5) |
| RF Voltage (MV) | 3.3 | 1.7 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |
| Synchrotron Tune | 0.051 | 0.023 | 0.015 | 0.013 | 0.011 |
| RMS Bunch Length (cm) | 1.70 | 1.52 | 1.14 | 1.00 | 0.84 |
| Damping Time (T, L) (msec) | (7.8, 3.9) | (7.8, 3.9) | (7.8, 3.9) | (7.8, 3.9) | (7.8, 3.9) |

注) high-ε : 1986年低エミッタンス化以前のオプティクス
 medium-ε : 現在のオプティクス
 new low-ε : リング改造後の新しい低エミッタンスオプティクス
 ノーマルセルあたりの水平方向の位相進行は90度, 105度, 135度の3通り

実験に導入する。これにより利用実験の中断を短くできると考えている。

低エミッタンスリングでは一般的にビームの色収差を補正するための六極電磁石強度が強くなるため、この非線形力により、ビームの運動が安定になる範囲、すなわち、ダイナミックアパーチャが非常に小さくなる。このことを考慮し、改造後の高輝度オプティクスとして最小エミッタンスのもの以外に少しエミッタンスの大きなラティス (36 nm-rad, 45 nm-rad) を用意してある (表2)。計算機シミュレーションの結果、エミッタンスが小さくなるほどダイナミックアパーチャはどんどん小さくなることがわかっている。特に最小エミッタンスのラティスでは物理的なアパーチャよりもせまく、ビームの入射蓄積が難しくなる可能性

もある⁵⁾。このために、まず、エミッタンスの大きなラティスで新ラティスの立ち上げを行ない、ラティスの性質を調べ、その経験を踏まえつつ段階的にエミッタンスを小さくしていくことを考えている。

2.3 リング改造作業の実際

この低エミッタンス化のためにリングの電磁石系、真空系を中心に大きな改造が行なわれる。また老朽化が進みつつあるリング各部の必要に応じた改造も合わせて行なわれる。改造前後のノーマルセル部の機器配置を図4に示す。

(1) 電磁石系

ノーマルセル部の四極電磁石、六極電磁石はその数を倍増し、また、磁場強度も現在のものに比

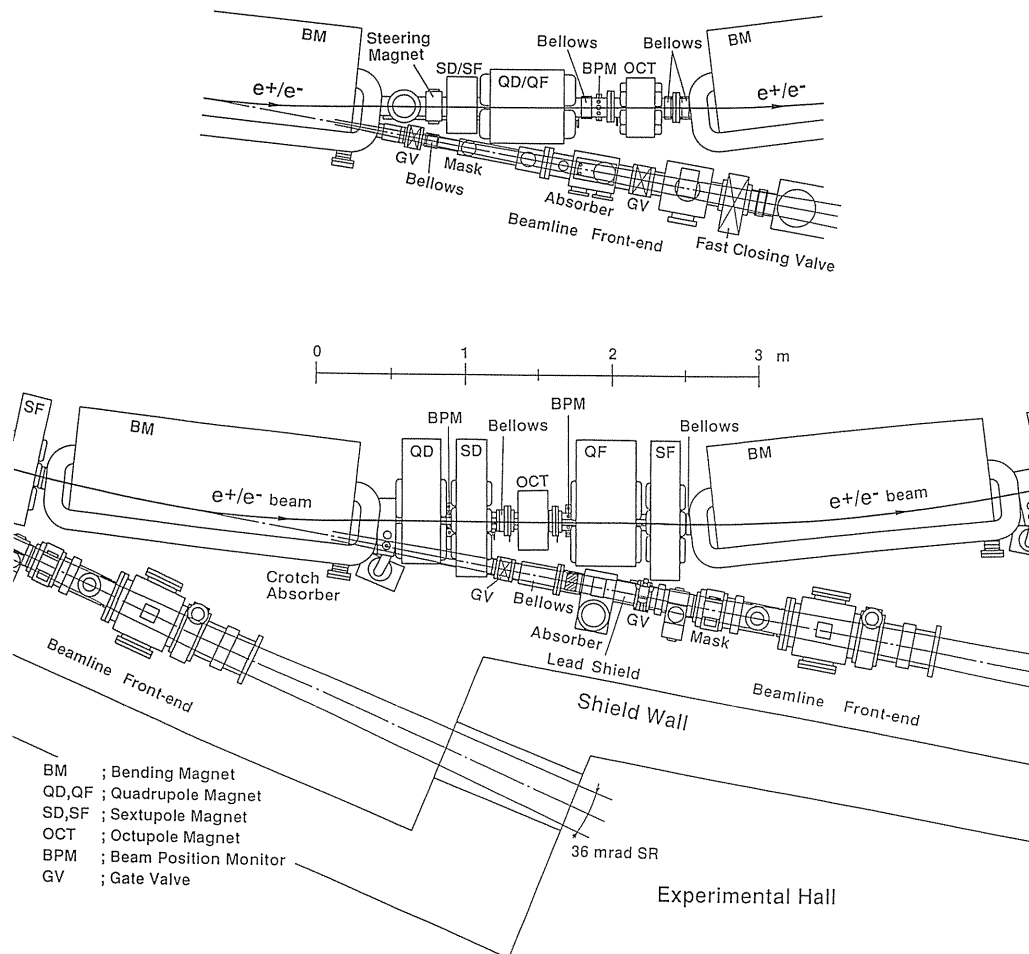


Figure 4. Accelerator components and SR beam at a normal cell, present (upper) and after reconstruction (lower).

べ大幅に増強したものに交換する。これらの電磁石は既存のビームラインへの光取り出しのためヨーク形状を工夫したものになる⁶⁾。また電源およびその制御系についても増強・新設を行なう。後述する軌道安定化システム増強のため、専用ステアリング電磁石の増設も合わせて行なう。

(2) 入射系

入射点付近のオプティクスの変更に対応して入射用パルス電磁石及び電源の増強を行なう⁷⁾。磁場強度の増強と同時に、これまで不可能であったシングルターン入射が可能になるように高速化される。これにより入射調整の自由度が大幅に増すことになる。

(3) 真空

ノーマルセル部の真空系は全面的な改造を行なう。新たに製作される電磁石の口径に合わせ四極電磁石用ビームダクトを小口径のものに交換するほか、電磁石の設置場所が変わることに対応した排気系の変更、ビーム位置検出器の移動・改造、ノーマルセル部偏向電磁石からの光取り出し口の形状変更等を行なう。電磁石間の限られたスペースに必要なコンポーネントを効率良く配置できるようデザインされている。また、実効排気速度を損なわないこと、ビーム位置検出器の高精度据付の容易さ、チャンバー内壁の凸凹の低減などに最大限配慮している。

(4) 高周波加速

現在リングには計4台の高周波加速空洞が設置されているが、これらは新たに開発された高次モード減衰型の空洞⁸⁾に順次交換される。これは低エミッタンス化後は特に重要となるビーム不安定性対策のためである。1台目の新型空洞はリング改造に先んじて'96年夏期運転停止中にリングに導入される予定である。

(5) ビームモニター

ビームモニター系については全面的な見直しが行なわれる。特に、ビーム位置モニターについては、後述する軌道安定化の高速高精度化にむけ

て、データ処理系を中心に全面的な改良が行なわれる。また、新しいラティスのコミッショニングの際に重要な役割を果たす入射ビームの周回毎の通過位置を測定できるようなシステムが開発導入される⁹⁾。各種ビームパラメータ測定系についても改良作業が進行中である。

(6) 加速器制御

加速器全体の制御系についても全面的な見直しが行なわれる。現在の小型計算機を中心としたシステムから、UNIX ワークステーション群を中心としたシステムに置き換えられる。各種ハードウェアに密着した部分の制御にはVMEシステムが導入される。新しいシステムへの移行は電磁石系など優先度の高いものから順次行なっていく予定である。

(7) 基幹チャンネル部

放射光基幹チャンネル部は、電磁石配列の変更に伴う放射光取出部の変更に対応して改造が加えられる。同時に、将来のビーム電流の増加による熱負荷の増大にも耐えられるよう改良が加えられる。また各ビームライン毎に光ビーム位置モニターを設置する方向で作業を進めており、これらからのデータは高精度の軌道安定化に利用される。

(8) アライメント

PFリングの電磁石は建設時に100ミクロンの精度で据え付けられた。その後建物の経年変形などにより2回再アライメントを行ったが、現在は既に目標精度を大きく上回る誤差を生じている。電磁石のアライメント精度は、特に低エミッタンスリングの場合、ビームの性能に直結するほか、コミッショニングの容易さを大きく左右する。このため、今回の改造時には改造対象部分のみでなくリング全周について再アライメントを行なう。また、加速器側のアライメントに合わせてビームライン側でも再アライメントを行なう。

(9) リング改造スケジュール

リング改造作業は、できる限り短期間で実施し、利用実験の中断を短くする必要がある。加速

器各コンポーネントの製作及び性能試験はリング改造作業開始前に全て終了する。また先行して改造作業を実施することが可能なものについてはこれを実施する。特に基幹チャンネル部についてはリング本体の改造と同時期に行なったのでは作業効率が悪くなることから、必要な全ての改造作業を事前に終了する。また高周波加速空洞についても一部先行して改造作業を行なう。

リング本体の改造作業は'97年1月から9月までの9か月間の運転停止期間中に集中して行なう。改造作業は旧電磁石の撤去と新電磁石の搬入据付、真空チャンバーの搬出と改造、再搬入と据付が中心になる。これらと平行して他の作業を効率良く行なう必要があり、作業スケジュールの詳細を事前に慎重に検討しておくことが重要であると認識している。

改造作業終了後、'97年10月より運転を再開するが、当初は現行オプティクスで速やかにリングを立ち上げ、放射光による真空チャンバーの焼きだし運転を行い、リング真空度が実用的なレベルに回復し次第、ユーザー運転を再開する。低エミッタンスオプティクスはマシンスタディの時間を利用しつつ調整をすすめ、可能になり次第ユーザー運転に供することになる。

(10) 作業の現状

'96年4月現在必要な加速器コンポーネントの製作、性能試験は順調に進行している。'96年中に全ての作業を終えリング本体の改造に備える。先行して行なわれている作業のうち基幹チャンネル部については改造の必要なビームラインのほとんどについて作業は終了しており、残り1ラインについても今夏期停止中に作業を終了する。高周波加速空洞については今夏期停止中に4台の空洞中1台が新型空洞に交換される。

2.4 光源性能向上

今回の改造は放射光輝度の向上が目的であることは言うまでもないが、それ以外にも様々な面で

リングの性能向上がはかれる。

(1) 放射光輝度の向上

今回のリング改造の最大目的は、ビームエミッタンスの低減による放射光輝度の向上である。高輝度化によるリング各地点でのビームサイズの変化は図3に示してある。この低エミッタンス化が各ビームライン(表3)での放射光輝度向上にどのように結びつくかは、光源が偏向電磁石か挿入光源か、また、挿入光源でもウィグラカアンジュレータかで異なり、また波長領域によっても異なる。今回の高輝度化では全てのビームラインで5~10倍程度の改善が期待できるが、特にアンジュレータのビームラインでは約10倍の輝度の改善が期待できる。各ビームラインでの放射光輝度の向上の様子を図5に示す。

今回の改造で達成できるエミッタンスは27 nm-rad程度が最小であり、低エネルギー運転など特殊な運転を別にすれば、基本的にこれ以上の低エミッタンス化は不可能と考えてよい。ただし、ここでいうエミッタンスとは水平方向のエミッタンスのことである。一方でビームの垂直方向のエミッタンスも放射光輝度を考えるうえで重要である。水平方向のエミッタンスがラティス設計で決まるのに対し、垂直方向のそれは電磁石の据付誤差などの要因で決まり、軌道の調整次第でより小さくできる可能性がある。垂直方向のエミッタンスは適当なねじれ四極磁場を軌道上に発生させてやることで小さくできる。今回の高輝度化改造で導入される六極電磁石はその補正コイルを励磁してやることでねじれ四極磁場も発生できるように設計されており、これを利用して垂直方向のエミッタンス改善も試みる予定である。これにより更に輝度をあげられる可能性もある。

(2) 軌道安定性

1986年の低エミッタンス化の際には、ビーム軌道の一日周期での変動が顕著になり、この結果放射光光軸の変動が起こりユーザー実験に大きな影響がでた。これは光源棟建物の日照による熱変

Table 3. List of the SR beam lines at PF.

| Beamline | Affiliation | Source | Spectral range | Status |
|----------|-----------------------------|---|---|--------------------|
| BL-1 | NTT | bending magnet (B1) | VUV and soft X-ray | in operation |
| BL-2 | KEK-PF | 60-period permanent magnet undulator | Soft-X-ray | in operation |
| BL-3 | KEK-PF | bending magnet (B2 & B3) | VUV and X-ray | in operation |
| BL-4 | KEK-PF | bending magnet (B4) | X-ray | in operation |
| BL-5 | KEK-PF | permanent magnet wiggler/undulator (under design) | | under installation |
| BL-6 | KEK-PF | bending magnet (B6) | X-ray | in operation |
| BL-7 | University of Tokyo | bending magnet (B7) | UVU and X-ray | in operation |
| BL-8 | Hitachi Ltd. | bending magnet (B8) | UVU and X-ray | in operation |
| BL-9 | Nippon Electrical Co. (NEC) | bending magnet (B9) | VUV and X-ray | in operation |
| BL-10 | KEK-PF | bending magnet (B10) | X-ray | in operation |
| BL-11 | KEK-PF | bending magnet (B11) | VUV and soft X-ray | in operation |
| BL-12 | KEK-PF | bending magnet (B12) | UVU and soft X-ray | in operation |
| BL-13 | KEK-PF | 27-pole wiggler | Soft and hard X-ray | in operation |
| BL-14 | KEK-PF | superconducting vertical wiggler | Hard X-ray | in operation |
| BL-15 | KEK-PF | bending magnet (B15) | X-ray | in operation |
| BL-16 | KEK-PF | 53-pole permanent magnet wiggler/undulator | Soft and hard X-ray | in operation |
| BL-17 | Fujitsu Ltd. | bending magnet (B16 & B17) | VUV and X-ray | in operation |
| BL-18 | ISSP and KEK-PF | bending magnet (B18) | VUV | in operation |
| BL-19 | ISSP and KEK-PF | permanent magnet multi-undulator | VUV | in operation |
| BL-20 | KEK-PF | bending magnet (B20) | VUV and X-ray | in operation |
| BL-21 | KEK-PF | bending magnet (B21) | White, visible, and X-ray | in operation |
| BL-27 | KEK-PF | bending magnet (B27) | Soft X-ray and X-ray | in operation |
| BL-28 | KEK-PF | 25-pole permanent magnet wiggler/undulator | Circularly polarized VUV and soft X-ray | in operation |

形の結果、電磁石（特に四極電磁石）の位置変動が起こり、軌道の変動を引き起こしたものであった。このような軌道変動はそれ以前から存在した。しかし、低エミッタンス化に伴い四極電磁石の磁場勾配が大きくなったこと、さらに四極電磁石位置でのベータatron関数が大きくなったことで、3倍程度軌道変動が大きくなり問題が顕在化した。

この経験から、軌道安定化システムの開発が行

なわれ、現在順調に稼働している。またこれに加えて光源棟屋根に断熱工事を行い建物歪みそのものを抑えた。しかしながら、低エミッタンス化後はビーム性能の向上をフルに輝度向上に結び付けるためにも、現在よりもさらに高精度の安定化が要求されることになる。また、現在のシステムは一日周期の軌道変動を抑えることを目的として開発されたため分のオーダー以上の比較的早い時間変動には全く対応できてない。これを1 Hz以

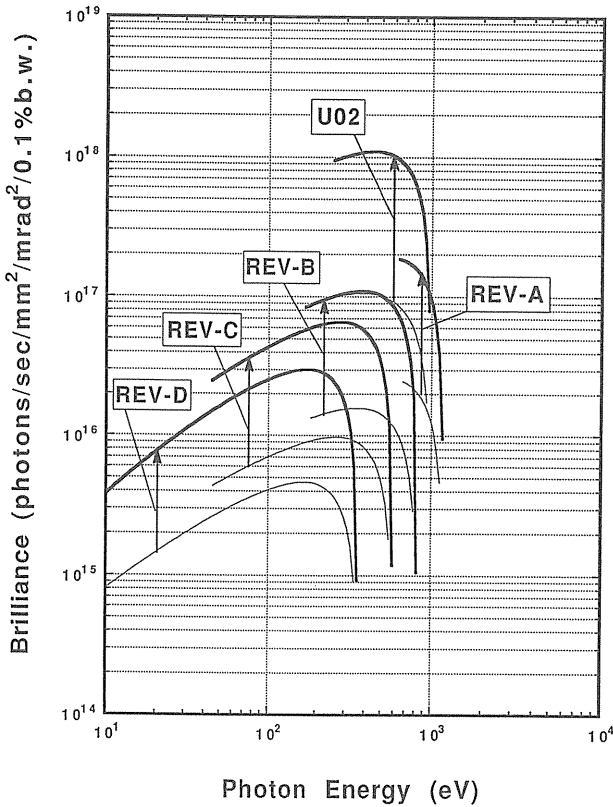


Figure 5a. Increase of brilliance at undulator beam lines, BL02 (U02) and BL19 (REV-A, B, C, D).

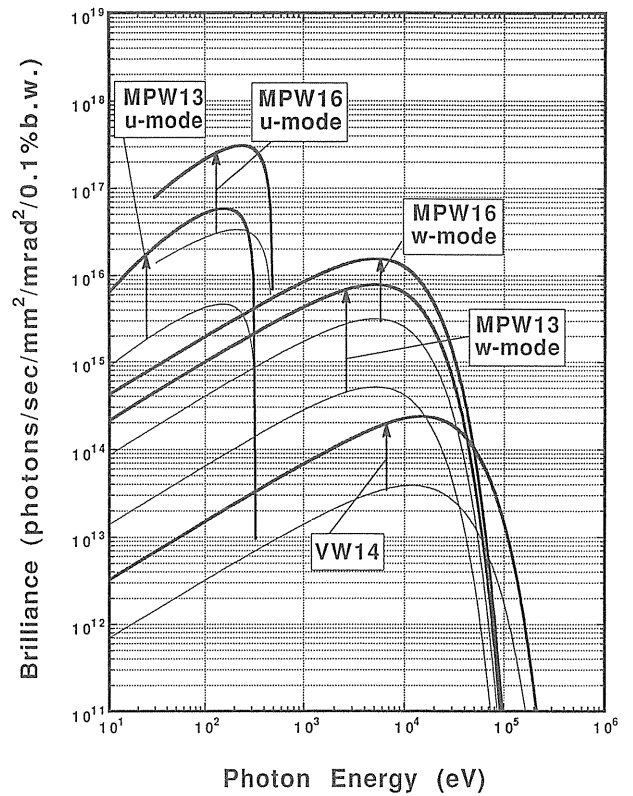


Figure 5b. Increase of brilliance at insertion device beam lines, BL13 (MPW#13), BL14 (VW#14) and BL16 (MPW#16).

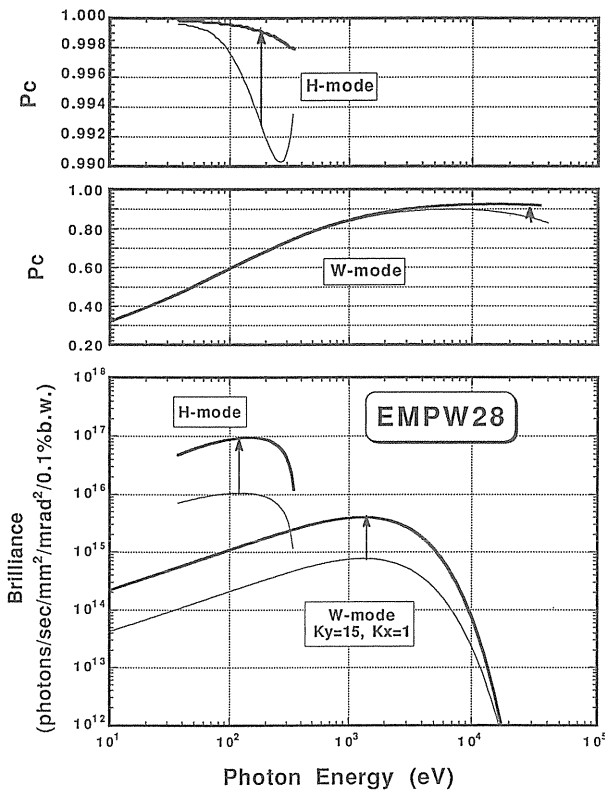


Figure 5c. Increase of brilliance at an insertion device beam line, BL28 (EMPW#28).

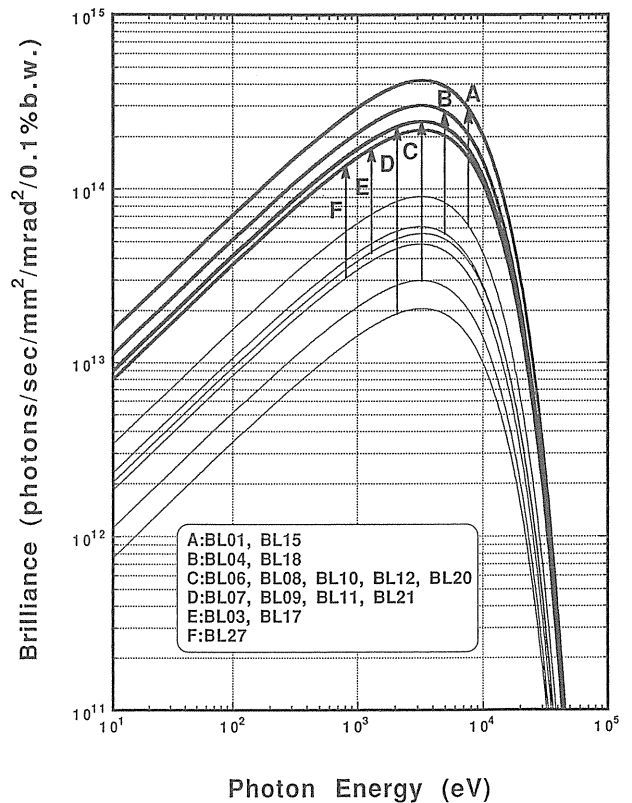


Figure 5d. Increase of brilliance at bending radiation beam lines.

上、最終的には数10 Hz 程度までの早い時間変動にも対応できるように新たなシステムの開発を行っている¹⁰⁾。またグローバルな軌道安定化システムの高速高精度化に加えて、個々のビームラインに対する局所的なバンプ軌道を用いたフィードバックシステムの開発実用化も合わせて行なう予定である。

(3) ビーム寿命

現在のPFリングのビーム寿命はビーム電流300 mA 以上でも60時間を越えており、誇るべき性能の一つになっている。今回の高輝度化ではこの点についても改善が期待できるのであろうか。

ビーム損失を引き起こす要因は幾つかあるが、PFリングの場合は蓄積電子と残留ガスとの衝突散乱、バンチ内での電子同士の衝突散乱(Touschek効果)の二つが重要である。前者はリングの真空度に大きく依存するが、後者はバンチ内での電子密度に依存する。現在のPFリングの通常の運転状態(多バンチ運転)ではガス散乱がビーム損失の主要な過程となっている。また、近年ユーザー実験でも用いられるようになった単バンチ運転ではバンチ内電子密度が高いため、Touschek効果が主要な過程になる。それでは、低エミッタンス化後これらの過程の寄与はどのように変わるのだろうか。

まず、残留ガス散乱の効果であるが、リングの真空度は現在既に相当なレベルに達しており、高輝度化改造によっても大きく改善される見込みはない。従って基本的にはガス散乱の効果は現在とほぼ同じと考えてよい。一方、Touschek効果については、低エミッタンス化に伴いビームの断面積が小さくなることに加えバンチの長さも短くなることからバンチ内の粒子密度が高くなり、単バンチ運転はいうまでもなく多バンチ運転の際にもその寄与は無視できなくなる。このためガス散乱とTouschek散乱の双方の寄与を考慮したビーム寿命は現在よりも短くなってしまふことが予想される。ただし、計算によれば、40時間以上(ビー

ム電流300 mA)の寿命は達成可能と思われる。

Touschek効果は、低エミッタンス化がバンチ内粒子密度の増大をもたらすことから、1~2 GeV級の第三世代リングでは寿命を制限する最大の要因になっている。特に10 nm-rad以下の低エミッタンスを目指しているリングでは軒並み10時間以下の寿命となっている。これらに比べると、PFリングの場合は、エミッタンスが若干大きいこと、ビームのエネルギーが比較的高いことで救われている。

(4) ビーム安定性対策

ビーム不安定性にはさまざまな原因があるが、PFリングでは高周波加速空洞内部に発生される加速用基本モード以外の電磁場とビームとの相互作用により起きるものが最も注意を要する。このような不安定性はあるしきい値電流値以上になると発生し、利用者側からは、エミッタンスが増大したかのように見える。また放射光の強度変化として見える場合もある。低エミッタンスという特徴を最大限輝度向上に結び付けるためにも、ビーム不安定性対策はより一層重要になる。前述したように現在の高周波加速空洞は、不安定性の原因となる空洞内部の余分な高次モードを減衰させるような新型加速空洞に順次交換される。これに加えて、不安定性を積極的に抑制するためのフィードバックシステムの開発も行なっている。

3. まとめ

現在PFリングでは高輝度化改造に向けた準備作業が順調に進んでいる。'97年1月から9月までリングの運転を停止し改造作業を行う。リング改造後は現在のオプティクスで速やかに利用実験を再開し、これと平行してマシンスタディの時間などを利用して高輝度オプティクスの立ち上げを行う。高輝度オプティクスはマシンの調整ができ次第利用実験に導入される。

改造後のビームエミッタンスは最小で27 nm-radが達成できる見通しである。ちなみに14年前

のPFリング運転開始時のエミッタンスはデザイン値で460 nm-radであった。約10年前にオプティクスの変更を行いエミッタンスを約1/3まで小さくしたが、このとき以降エミッタンスは現在の値130 nm-radとなっている。今回の高輝度化が成功すればエミッタンスは現在の値のさらに約1/5の27 nm-radとなる。これは運転開始時と比較すると約1/15の値であり、これらの低エミッタンス化による輝度向上の合計は、アンジュレータのビームラインなどでは、二桁を越える。平均電流値の向上、軌道安定性の向上なども考慮すれば実効的な輝度の改善はさらに数倍されると考えてもよいであろう。このようなビーム性能向上を利用実験に最大限活かすためには、挿入型光源や放射光ビームラインについても全面的な見直しが必要であろう。

放射光ビームラインについてはリング高輝度化及び内外の諸情勢に対応してスクラップアンドビルトが行なわれる予定である。一方挿入光源については今回の改造対象には含まれていない。これまでPFリングは国内最大の放射光施設としてあらゆる放射光ユーザーの要求に答えられるように挿入光源の整備を進めてきた。しかし今後は国内外における第3世代リングの動向を考慮しつつ、ビーム性能を最大限活かされるよう最適な挿入光源を選択し順次置き換えていくことも必要であ

ろう。リング高輝度化に続くこれら一連の作業により、PFリングは次の10年間も主要な放射光施設としての役割を担っていくことができるであろう。

文献

- 1) 加藤政博, 堀洋一郎(編):「PFリング高輝度化計画デザインレポート」KEK-Report92-20 (1993).
- 2) M. Katoh, Y. Hori, N. Nakamura and H. Kobayakawa: Rev. Sci. Instrum. **66**(2) (1995).
- 3) 宮原恒昱(編): ワークショップ「PFリング高輝度化・ビームライン再構築に対応したVUV-SX領域における新しい研究の展望」報告集 (1994).
- 4) Y. Kamiya, M. Katoh, I. Honjo, A. Araki and M. Kihara: Proc. of IEEE Particle Accel. Conf. (1987).
- 5) M. Katoh, A. Araki, T. Kasuga, Y. Kobayashi and Y. Hori: Proc. of 4th European Particle Acc. Conf., (1994) p. 636.
- 6) Y. Kobayashi, M. Katoh and T. Kasuga: Proc. of 10th Symp. on Accel. Sci. and Teck., (1995) p. 121.
- 7) T. Mitsuhashi, M. Katoh and A. Ueda: Proc. of 10th Symp. on Accel. Sci. and Teck., (1995) p. 94.
- 8) T. Koseki, M. Izawa, S. Tokumoto, K. Shinoe, Y. Kamiya, T. Miura, K. Sato, T. Naba, Y. Ohonishi and S. Fujii: Proc. of 10th Symp. on Accel. Sci. and Teck., (1995) p. 239.
- 9) T. Honda: Proc. of 10th Symp. on Accel. Sci. and Teck., (1995) p. 168.
- 10) N. Nakamura, K. Haga, T. Honda, T. Kasuga, M. Katoh, Y. Kobayashi, M. Tadano and M. Yokoyama: Proc. of 1995 Particle Accelerator Conf. (1995).