

## PF リング直線部増強—リング改造と立上げ状況

谷本育律 高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所 〒305-0801 茨城県つくば市大徳 1-1  
 宮内洋司 高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所 〒305-0801 茨城県つくば市大徳 1-1  
 本田 融 高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所 〒305-0801 茨城県つくば市大徳 1-1  
 小林幸則 高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所 〒305-0801 茨城県つくば市大徳 1-1

**要旨** PF リングでは挿入光源ビームラインの増設やスクラップアンドビルドを推進する直線部増強計画が進められている。2005年度にこの計画の根幹をなす、直線部のラティス変更を伴う蓄積リングの改造が行われた。この改造により既存の挿入光源設置スペースが拡張され、また4つの直線部が新しく造り出された。改造の範囲はリングの約3分の2におよび、真空ダクトとビームライン基幹チャンネルも全面的に更新された。新しくできた直線部は約1.4 mの短直線部であるが、この短い直線部を用いて短周期アンジュレータを光源とするX線ビームラインの建設が可能となる。すでにリング改造と同時に一台目の短周期アンジュレータが設置され運用を開始している。リングのコミッションは2005年10月18日に予定通り完了し、ユーザー運転を再開している。立上げ後の真空ダクトの潤れに伴うビーム寿命の回復も順調に推移している。

### 1. 直線部増強計画の概要

フォトン・ファクトリーの2.5 GeV 電子蓄積リング (PF リング) では1982年に放射光専用加速器として運転を開始して以来、たゆまぬ性能向上が続けられて来た。1987年と1997年の2度にわたるラティス改造<sup>1,2)</sup>によりビームエミッタンスが460 nm rad から36 nm rad まで改善された。特に1997年の高輝度化改造はリングの東西にあるアーク部で四極電磁石と六極電磁石の数を倍増する大きな改造であった。蓄積電流値も当初の3倍の450 mA まで増えた結果、偏向電磁石からの放射光輝度は当初の2桁以上にまで向上している。第3世代光源が主流の現在、PF リングの国際競争力をさらに高めるためPF リング直線部増強計画が立案された<sup>3)</sup>。

直線部増強計画のためのリング改造は、既存直線部を大幅に延長して現有の挿入光源の更新の選択肢を拡大することと短直線部を新たに4か所作り出しX線源となりうる短周期アンジュレータの設置を可能にすることが目的である。

改造前のPF リングには南北5か所ずつ計10か所の直線区間が設けられており、そのうち2か所がRF 空洞用、1か所が電子ビーム入射用として利用され、残りの7か所にさまざまな挿入光源が設置されていた。挿入光源用の新たな直線スペースを創出するために、Fig. 1に示した範囲の南北直線部において四極電磁石を更新してラティス変更を行った。高磁場勾配を持ち全長の短い新しい四極電磁石を偏向電磁石にできるだけ近づけて配置することで、短直

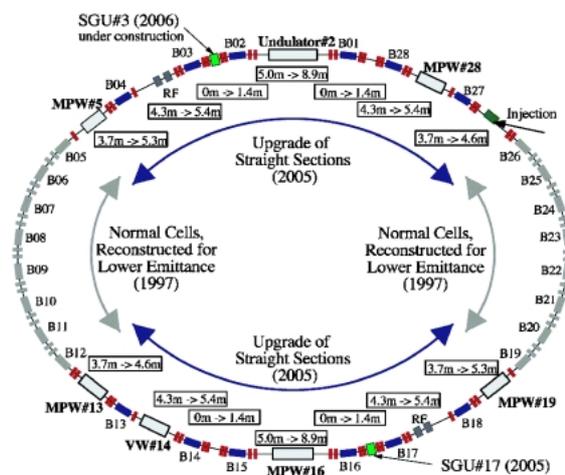


Fig. 1 Reconstructed regions in the PF ring straight-sections upgrade project.

線部の新設と直線部の大幅な延長を図った。これに伴って直線部にあるすべての真空ダクトと基幹チャンネルも新規に製作し更新された。

Fig. 2は改造を終えたリングのMPW (Multi-pole Wiggler) #5と周辺部の写真である。MPW#5と手前の四極電磁石のダブレットとの間に約1.5 mのフリースペースができています。他の直線部でも同様にフリースペースが確保されており、各セクションの延長された長さをTable 1にまとめてある。新設された4つの短直線部に加えて、2か所のRF空洞の直線部にも1.5 m程度のフリースペースがあ



Fig. 2 Photograph around the MPW#5 after the ring reconstruction. A 1.5 m free space is created between the MPW#5 and a new pair of quadrupole magnets.

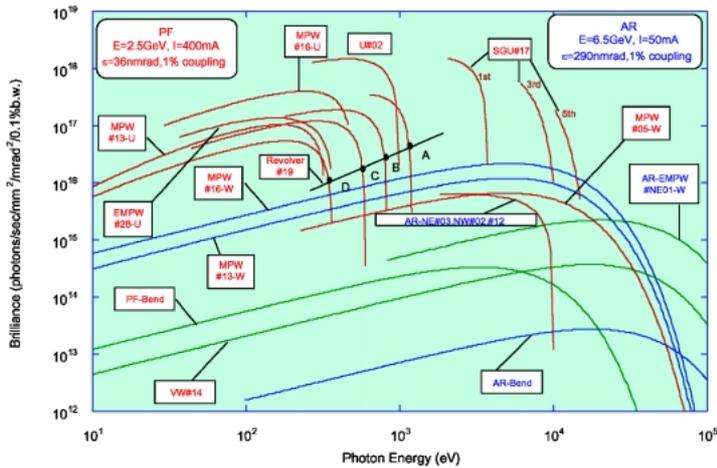


Fig. 3 Synchrotron radiation spectra of the short-gap undulator (SGU#17) compared with those of other existing beamlines.

る。空洞のある直線部も勘定に入れると挿入光源が設置可能な直線部はビーム入射点を除く13か所に増えたことになる。これらすべての直線部に挿入光源が設置されれば、PF リングは偏向電磁石主体のリングから挿入光源主体のリングとなり、第3世代光源に匹敵する性能を有することとなる。

リングの改造作業は2005年3月から9月までの約7か月間の運転休止期間を設けて完了した<sup>4)</sup>。四極電磁石更新とオプティクス変更に対応するために四極電磁石電源も更新し増設された。その他セプトム電磁石の増強、補正電磁石の更新、増設などが実施された。ハードウェアの改造にあわせて加速器の制御システムも大幅に改良され、制御ネットワークのGigabit化や2006年度から始まるTop-Up入射へのインターロックシステムの対応、またネットワーク分散型の制御システムであるEPICS (Experimental Physics and Industrial Control System) の本格的な導入などが行われた。

4か所の短直線部では垂直方向のベータ関数が0.4 mまで絞り込まれ、ギャップの狭い短周期アンジュレータの設置に最適化されている。2005年のリング改造時にはBL-17に一台目の短周期アンジュレータ(SGU#17)が設置され、すでに構造生物ビームラインとして運用されている。Fig. 3にSGU#17で得られる放射光スペクトルを既存の挿入光源のスペクトルと比較してプロットした。短周期アンジュレータを用いることによって、PFでは今まで利用できなかった高輝度のX線領域のスペクトルが得られることがわかる。2006年にはBL-3に二台目の短周期アンジュレータを設置し、構造物性

Table 1 Parameters of the straight-sections and the beamlines

BL	直線部の長さ		現状の光源 (直線部の用途)	中心角度 (度)	水平光取出角 (mrad)	垂直光取出角 (mrad)
	改造前	改造後				
BL02	5.0 m	8.9 m	Undulator#02	0	±0.88	±0.8
BL16			Polarization Switching (計画中)	0	±1.8	±0.6
BL04	4.3 m	5.4 m	Bending (RF cavities)	2.5	±18	±1.8
BL14			Super Conducting Wiggler	0	±0.58	-2.3, +5.1
BL18			Bending (RF cavities)	2.5	±13	±1.8
BL28			Elliptical U/MPW#28	0	±2.2	±1.0
BL05	3.5 m	5.3 m	MPW#5	0	±1.7	±1.2
BL19			U#19	0	±2.1	±0.75
BL13	4.3 m	5.4 m	U/MPW#13	0	±3	±1
BL27			Bending (injection)	1.2	±8.5	±0.9
BL03	0 m	1.4 m	Short Gap Undulator#03	0	-0.5, +18.5	±1.8
BL15			Bending	2.5	±13.8	±1.5
BL17			Short Gap Undulator#17	0	±2.4	±1.4
BL01			Bending	2.5	±18	±1.8

ビームラインを建設する準備を進めている。

既存直線部の利用計画も何本か具体化しつつある。5 m から 9 m へと大幅に延長された BL-16 の長直線部には 2 台の円偏光アンジュレータをタンデムに配置し、電子軌道を交流的に振ることで偏光度を変える高速スイッチング可変偏光アンジュレータの設置が予定されている。

## 2. 真空系の改造

### 2.1 真空ビームダクトの改造

PF リングのビームダクトは、偏向電磁石部に設置される幅広型の B ダクトと、その上下流の四極電磁石部に設置される直線型の Q ダクト、および Q ダクトと挿入機器等を繋ぐ接続管の 3 種類に分けられる。Fig. 4 に改造後の典型的な B ダクトと Q ダクトの構成を示す。今回、南北直線部領域にあるビームダクトが、既存の挿入光源、高周波空洞、セプタム電磁石などを除いてすべて更新された。

直線部領域の B ダクト 12 台に関しては、放射光取出しポートが新しい放射光ラインに対応したものとなり、放射光を切り分けてビームラインに導出するクロッチアプソーバも各ビームラインの仕様に合わせて更新された。

一方、Q ダクトは直線部四極電磁石のポア径が 110 mm から 70 mm にコンパクト化されたことにより、それに対応してスリム化された。Fig. 5 に PF リングの Q ダクト断面形状の推移を示す。新 Q ダクトのコンダクタンスは、建設当時のダクトの約 5 分の 1、1997 年の高輝度化改造時のダクトの半分程度となっている。ビーム位置モニターは Q ダクトと一体で製作され、Q ダクトにボタン電極を溶接した段階でテストベンチにて全数電気的中心の校正が行われた。ビームダクトのインピーダンスを低減するために ICF タイプのフランジ接続部において、フランジ面に RF コンタクトチップを取り付けてギャップを平滑化する処置を徹底して施した。

ビームダクトの材質は、ステンレス製の形状変換部、ペローズ、フランジなどの一部を除いて、改造前と同様、熱伝導性や加工性に優れたアルミ合金とした。放射光の吸収方法も改造前とほぼ同様で、アルミダクトの側面に放射光を直射させる部分には冷却水チャンネルを設け、ステンレス部は上流側にマスクを配置して放射光が照射されない構造とした。熱負荷が最も大きいのはクロッチアプソーバであり、上記のマスクなども含めて、2.5 GeV、800 mA のビームからの放射光熱負荷を条件として熱解析を行った。この場合、偏向電磁石からの放射光パワー密度は 51 W/mrad に及ぶ。入熱条件の厳しいマスクやクロッチアプソーバは、従来の無酸素銅に代えて高温域での耐性に優れたアルミナ分散強化銅を採用し、温度上昇と発生応力を許容値以下に抑えた。

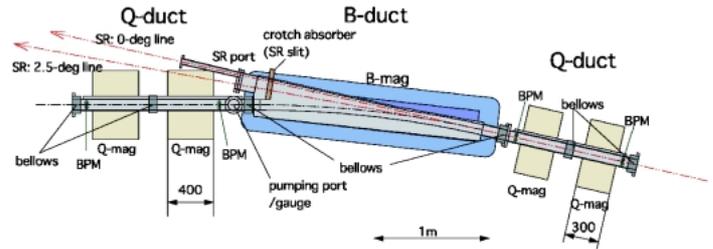


Fig. 4 Typical composition of the vacuum chambers after the reconstruction.

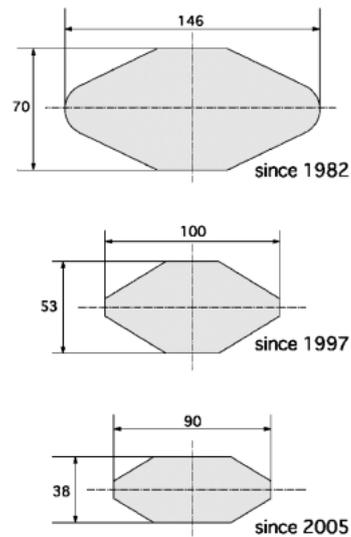


Fig. 5 Cross-sections of the vacuum chamber for the quadrupole magnets shifted with the upgrade projects.

ビームダクトの脱ガス処理に関しては、これまでの PF 高輝度化改造 (1997 年) や PF-AR 高度化改造 (2001 年) の場合と同様に放射光照射による光焼出しを主とし、ダクト設置後の現場ベーキングは実施しなかった<sup>5,6)</sup>。また、今回の改造ではコミッショニング開始までに約 2 か月の準備排気期間が確保できたこともあり、南直線部のダクトに対してのみプリベークを行い、運転開始後の南北直線部の圧力変化を比較して、運転初期のガス放出率に対するプリベークの効果を評価することとした。

### 2.2 真空排気系の改造

直線部改造前の 2.5 GeV、450 mA 蓄積時の平均圧力は約  $2 \times 10^{-8}$  Pa であり、その時点でのビーム寿命は 60 時間以上であった。すなわち、毎朝 9 時に 450 mA までビームを入射し、翌朝 9 時の段階で 320 mA 以上残っているという長寿命を実現していた。改造前と同等なビーム寿命を実現するためには、当然のことながら改造前と同等な排気性能が要求される。ところが今回の改造では、四極電磁石のコンパクト化によりダクトのコンダクタンスが小さくな

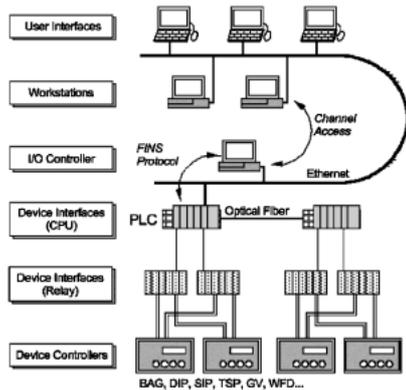


Fig. 6 Block diagram of the vacuum control system based on the EPICS/PLC.

り、さらに四極電磁石の移設によって排気ポートの配置に制約を受けることとなった。このため、直線部の実効排気速度は改造前よりも低下した。それに対して、偏向部においては、偏向磁場を利用する分布型イオンポンプ (DIP) を B ダクトの更新に伴って全28台中12台更新し、ポンプセルと印加電圧を変更して排気速度を1台あたり約100 l/s から約180 l/s へ改善させた。長い直線部やガス負荷の比較的大きいクロッチアプソーバ下流部を排気するための真空ポンプには、改造前と同様に、スパッタイオンポンプ (SIP) とチタンサブレーションポンプ (TSP) を設置した。これらの構成において、ビーム軌道に沿った圧力分布を1次元有限要素法シミュレーションにより計算し、排気系の健全性を確認した (詳細は第4章参照)。

### 2.3 圧力測定と真空制御システム

PF リングには全周にわたって約50台の B-A ゲージが設置され、リング内圧力の監視や圧力異常時のインターロックに利用されている。今回の改造では、フィラメントの長寿命化を図るため、すべての B-A ゲージに対してフィラメント材をタングステンからトリアコートイリジウムへ変更し、ゲージコントローラも全数更新した。また、すべての B-A ゲージに対してインストール前にテストベンチにおいて圧力校正を実施した。

真空制御システムも操作性、信頼性およびメンテナンス性を向上させるため、本改造に先行して2004年夏に PLC (Programmable Logic Controller) と EPICS をベースとするシステムに更新した<sup>7)</sup>。Fig. 6 に真空制御システムのブロック図を示す。EPICS は图中的「Workstations」層と「I/O Controllers」層上で構築されたソフトウェア群である。リングの地下に分散して配置されている真空機器のコントローラ (「Device Controllers」層) は、EPICS とのインターフェイスである PLC (「Device Interfaces (CPU)」層) を介して、X 端末 (「User Interfaces」層) 上で制御される。

真空インターロックシステムは PLC 内のシーケンスプログラムによって構築されており、例えば真空リークなどにより設定値を超える圧力になった場合は、該当する区間の両端のゲートバルブが閉まり被害の拡大を防止するようになっている。またビーム蓄積中にこのような真空異常や真空系冷却水の流量異常が発生すれば、瞬時にビームストップを挿入してビームダンプし、機器を保護する。

## 3. ビームライン基幹チャンネルの改造

### 3.1 基幹チャンネルの設計

四極電磁石はダブルレットとして偏向電磁石に隣接して設置された。Fig. 4 に示したように改造後のビームラインは挿入光源用の 0 度ラインの場合一つ目の四極電磁石をかすめ、偏向電磁石用の 2.5 度ラインの場合一つ目の四極電磁石のヨークの中をすり抜け、二つ目の四極電磁石をかすめて通るような位置関係になった。このため基幹チャンネルの構成部品を四極電磁石との干渉を避けて 1 m 以上下流へ後退することになり、直線部改造範囲のビームラインすべて (計13本) についてほとんど新設に近い改造を行った。

基幹チャンネル部の全長は 4 m から 5 m 程度である。限られたスペースにゲートバルブ、水冷マスク、放射光アプソーバ、ビームシャッター、光ビーム位置モニタなどを収容し、またマルチポールウィグラーや X 線アンジュレータラインではグラファイトフィルタ、Be 窓アセンブリも必要となる。改造前の基幹チャンネルにはリーク事故から蓄積リングの真空を保護する目的で FCV (Fast Closing Valve) と ADL (Acoustic Delay Line) が設けられていた。基幹部の全長を短縮する必要が生じた今回の改造では、コストパフォーマンスの問題や低い事故率を勘案して FCV と ADL を割愛した。しかし真空保護の役目を少しでも基幹チャンネルに持たせるために、従来のような丸管ではなく角管の真空配管を採用して真空コンダクタンスが極力小さくなるよう工夫した。さらに一部のラインでは、ビームシャッターのシャッターブロックを従来の厚さ 400 mm のステンレスから厚さ 250 mm のタングステンに変更することで省スペースを図った。

1997年の PF リング高輝度化改造時もリングの改造範囲にあるすべての基幹チャンネルで今回同様全面的な改造が行われた。この時の改造はアーク部であり、偏向電磁石を光源とするビームラインのみであった。したがって基幹チャンネルは全ラインほぼ同一の仕様、単一モデルで対応可能であった。しかし今回は挿入光源ビームラインが多数あり、また光取出しパラメータも Table 1 に示したとおり様々であり、下流ビームラインの改変の有無も様々であった。したがって基幹チャンネルの設計はビームラインごとに個別の対応を必要とした。基幹チャンネルの改造にはリング本体の改造に先駆けて2002年度から着手し、4年度に

わたって定期の運転休止期間を利用して順次進めることで対応した。

### 3.2 アンジュレータビームラインの基幹チャンネル

挿入光源ラインの基幹チャンネルの設計では、高い熱負荷と上下流の偏向電磁石の光と挿入光源自体の光が混在する状況に十分配慮してアブソーバを設計しなければならない。水冷銅ブロックのアブソーバが入射角86度の斜入射で受光するようにして高い熱負荷に対応している。同タイプのアブソーバは1997年の高輝度化改造時以来採用しているが、斜入射による銅表面での反射率増大のため、水冷銅ブロックとその下に設置した水冷反射板を多重反射した光が周辺へ漏れ出し、アブソーバブロックのステンレス製真空チャンバーが過熱（最大150°C）したり、チタンサブリーメーションポンプが光電効果でチャージアップしてポンプコントローラが損傷するなどの問題を経験した。そこで今回は多重反射光を周辺に漏らさない大きな「コ」の字型水冷反射板覆いを取り付けた新型アブソーバを開発した。

Fig. 7 は新旧アブソーバの内部構造の比較である。旧型は

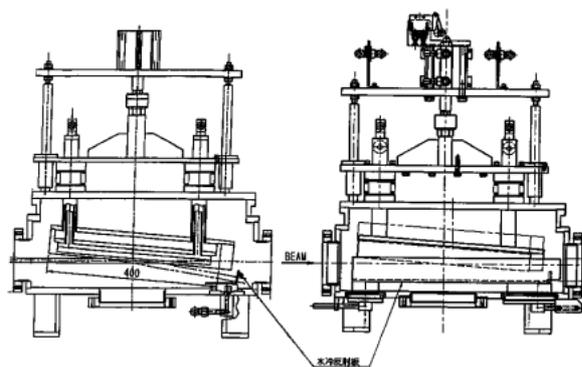


Fig. 7 Schematic drawing of the absorber assemblies for the insertion device beamlines. Right figure shows the improved type including the water-cooled Cu plate which thoroughly covers the absorber, while left one shows the conventional type.

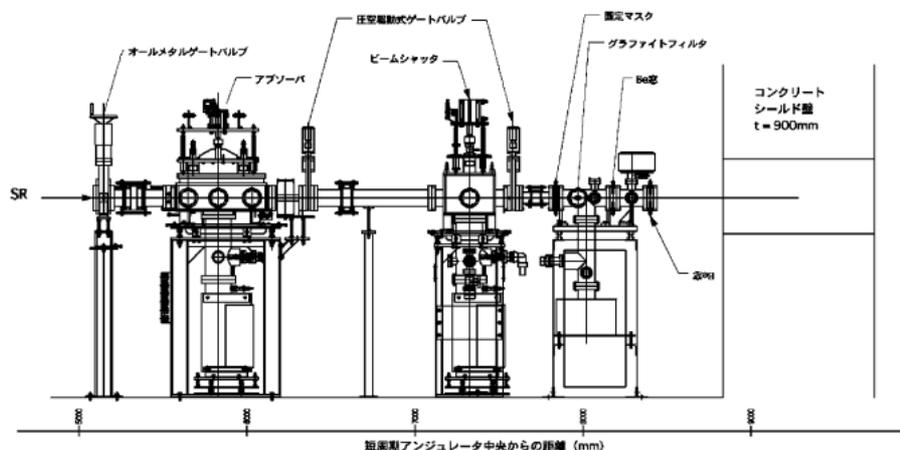


Fig. 8 Newly constructed front-end for the short gap undulator beamline (BL-17).

下の水冷反射板の側面部が無く、さらに水冷反射板の奥行き方向が短かった。水冷反射板の形状改善によって上記のような問題は解消された。

Fig. 8 に今回の改造で新しく設置された短周期アンジュレータビームライン (BL-17) の基幹チャンネルの構成を示す。このビームラインは10 keV 領域の X 線を利用する構造生物ビームラインである。通常アンジュレータ用基幹チャンネルの構成に加えて最下流にグラファイトフィルタ、Be 窓アセンブリを配置した。鉛直方向の開口寸法は約0.3 mrad, Be 窓のところで4.4 mm に固定した。グラファイトと Be の温度上昇を許容範囲に抑えるために、開口をアンジュレータ光の広がりに対して可能な限り絞って冷却効率を上げている。約6 keV 付近の低エネルギー側の X 線も同時に利用できるように、グラファイトフィルタの厚さを極力薄くした。厚さ0.1 mm のグラファイトを2枚用いて合計0.2 mm としている。可動スリットを用いないで開口角を最小限に固定しており精密なアライメントが必要となる。運転開始後に電子軌道、アンジュレータギャップの調整、ビームラインでの光軸測定を行った結果をフィードバックして最終的なアライメントの微調整を行った。

## 4. 蓄積リングの立上げ状況

### 4.1 コミッショニング

約7ヶ月にわたるリングの改造作業を終え、2005年9月20日よりコミッショニングが開始された。コミッショニングの目標は、ビーム寿命以外のパラメータは基本的に改造前と同じ状態に戻し、2.5 GeV マルチバンチ運転によるユーザー運転を早期に再開することであった。そのために与えられた期間は約1ヶ月で、その間に入射調整、オプティクスおよび光軸の確立、挿入光源のフリーチューニングの確立、さらには蓄積電流値450 mA で1日3回入射が許容できるビーム寿命約8時間を実現しなければならなかった。その他にも、新たに導入した横方向ビーム不安

定性を抑制するためのバンチ毎フィードバックの立上げ、短周期アンジュレータ (SGU#17) ビームラインへの光導入を行うことなどが想定されていた。コミッショニングのスケジュールは、これらが達成できるように、ビームによる各コンポーネントの調整の時間や光焼出しに必要な時間を割り出し、シフト (8時間) 単位で組まれていた。

初日9月20日は入射路のビーム調整に費やし、本格的にリングへの入射が開始され

たのは夜8時30分ごろになってからであった。結局、この日は4ターン程度回っただけで終わった。2日目、3日目、4日目も引き続き入射調整が行われたが、なかなか蓄積することできず、60ターンまわすのが精一杯であった。4日目の午後に、セプタム、キッカーなどの入射パラメータやビームエネルギー、入射位相、軌道、ベータトロンチューン、RF周波数などさまざまなパラメータを調整したが60ターン以上は回らないこと、垂直方向に軌道を振るとそれほどアパーチャが狭くないアンジュレータ2番(U#02)付近で顕著にビームロスが生じること、さらにその周辺の放射線レベルが異常に高いことなどから、U#02付近の真空ダクト内に何か障害物があるかもしれないという判断を下し、真空を破って中を調べてみることにした。その結果、停止期間中に誤って圧空配管が外されたため、実験用ミラーが挿入されたままになっていることが判明した。後でわかったことだが、そのミラーの上下にはダクトとの間にわずかな隙間(1~2mm)があり、入射ビームはその隙間を掻い潜って回っていたことになる。PFリングには、壁電流モニター、シングルパスモニターやゲートカメラ等により周回ごとにビーム電流、位置およびプロファイルが確認できるビーム診断系があることによって、障害物がある中でこれらのモニターを見ながらパラメータを調整し、60ターンまでビームを回すことができたということになる(逆に60ターンも回ったため、障害物があることは想定外であり、様々な情報を集めるまで時間を要して真空を破る決断が遅れてしまった)。

コミッショニング開始から5日目の9月24日12時ごろ、真空作業が終了し、ビーム入射再開となった。障害が取り除かれた後は、入射ビームはスムーズにリングを周回し始め、16時53分にビームの蓄積に成功した。Fig. 9に、蓄積に成功する前後の壁電流モニターの様子を示す。ビームを蓄積した後は、入射パラメータの最適化、COD、ベータトロンチューンなどの補正を行い、入射率を増やす調整を行うとともに、放射光による真空悪化が徐々に回復するのを待ちながら電流を積み上げていった。そして、9月30日に目標である蓄積電流値450 mAに到達した。日ごとに最大蓄積電流値が伸びていく様子をFig. 10に示す。450 mAを達成した時点ではビーム寿命は30分足らずで、しかもイオン捕獲によると思われるビーム不安定性が非常に強く観測されていた。本格的なビーム調整はこの時点から行われたが、約4日半の遅れを取り戻すようスケジュールを見直し、まずビーム不安定性を抑制するための横方向パンチ毎フィードバックの立上げ、軌道・オプティクス最適化、超伝導ウィグラーの立上げ、軌道フィードバックの立上げを精力的にこなしていった。また、夜間のシフトは最大蓄積電流値を500 mAまで上げて光焼出し運転を続け、積分電流値の確保に努めた。

コミッショニングの第3週目には、リングの光焼出しに加え、新ビームラインの光焼出しや調整も行われること

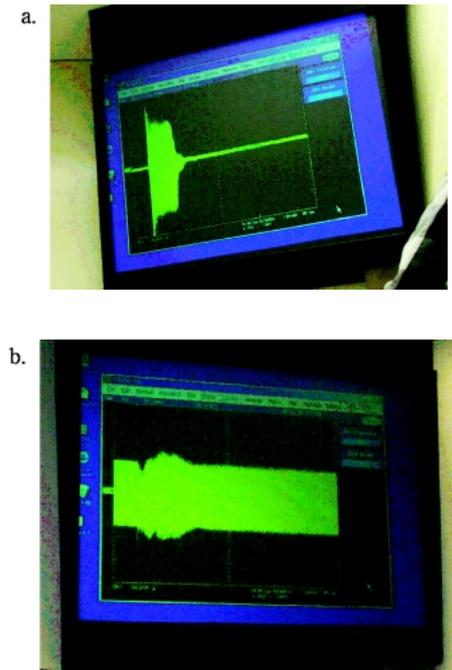


Fig. 9 Photographs of the wall current monitor; (a) shows the signals from the beam circulating until 100 turns just before the first storage, and (b) the signals just after the first storage at a current of about 1 mA.

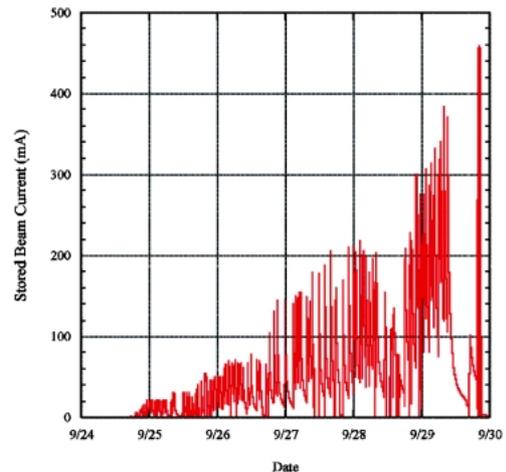


Fig. 10 Trend graph of the stored beam current from the first day of the commissioning to the day it reached 450 mA.

になっていた。それに先立って、リングでは基準となる軌道を定め、その軌道でいかにどうかをビームライン側で確認する時間を設けていた。まず10月7日に第1回目の光軸確認が行われた。その結果、多少調整が必要なビームラインがあったものの、まったく光が通らないというようなビームラインはなく、大きな問題がないことがわかった。今回の改造では、リング全周にわたり電磁石のアライメントを行ったこと、さらに直線部のビーム位置モニターは新規のものであったことから、大きく光軸のずれているビー

ムラインもあるのではと心配したが、杞憂であった。また、この週に短周期アンジュレータのギャップを閉じていくテストが行われた。オプティクス設計上想定した最小ギャップは4.5 mmであったが、この時点では基準となる軌道に何の調整をしなくても、4.1 mm までビーム寿命に影響を与えることなくギャップを閉じることができた。このことから、短直線部の垂直ベータ関数は設計どおり0.4 m程度と十分に絞られていることが確認された。コミッション最終週は、第2回目の光軸確認後、挿入光源のフリーチューニングのための軌道補正データの取得、ビームライン側の調整、そして光焼出しが続けられた。

#### 4.2 光焼出し状況

運転開始に先立ち、立上げ後の真空圧力の改善とビーム寿命の伸びをシミュレーションで予測した。真空ダクトを更新した場合、ダクト内壁の潤れた状態がリセットされるため、今回のように改造が広範囲にわたれば運転再開後の圧力は数桁も高くなり、ビーム寿命は大幅に短くなる。ユーザー運転を1日3回以下の入射頻度で開始するためには、約1か月のコミッション期間後のビーム寿命が、電流値とビーム寿命との積 ( $I \cdot \tau$ ) で200 A・min 以上まで回復している必要がある。1997年の高輝度化改造後はこの値を達成できたが、そのときの改造と比べて今回の改造では、改造範囲が約2倍であること、長い直線部では放射光の密度が小さいため光焼出しの進行が比較的緩やかであること、Qダクトの断面形状が縮小されてコンダクタンスが小さくなったこと、北半分のビームダクトに対してはプリベークを行わずにインストールしたこと、入射器を共有する他の加速器 (KEKB と PF-AR) が運転中であるため入射器を占有できないこと、などのようにマイナス要因が多い。逆にプラス要因としては、12台のDIPが更新されて偏向部の排気速度が改善したことと、1999年より加速用高周波に位相変調をかけて Touschek 寿命を伸ばした運転を行っていること<sup>8)</sup>、などが挙げられる。

これらの条件を数値化して、ビーム寿命予測のシミュレーションを行った。まず、運転開始後の何点かの代表的な時点での平均圧力を、ビーム軸に沿った一次元有限要素法による圧力分布から計算した。例として、積分電流値 100 A・h のときの南直線部の圧力分布計算結果を Fig. 11 に示す。このとき、ガス放出量の計算に用いるダクトの潤れの進行度合い、すなわち光照射量積分値 (Photon Dose) と光脱離係数  $\eta$  との関係は、これまでの運転で得られたデータを使用した。ただし、広範囲のダクトをプリベークせずにインストールしたのは今回の改造が初めてであったので、その区間の初期  $\eta$  については、プリベークをした場合の  $\eta$  に対して3パターン (等しい、3倍、10倍) を想定した。 $\eta$  とは、1光子照射当たり放出されるガス分子数 (molecules/photon) で定義された量であり、通常立上げ直後で  $10^{-1}$ – $10^{-2}$  程度、数年以上の運転時間を経て十分に

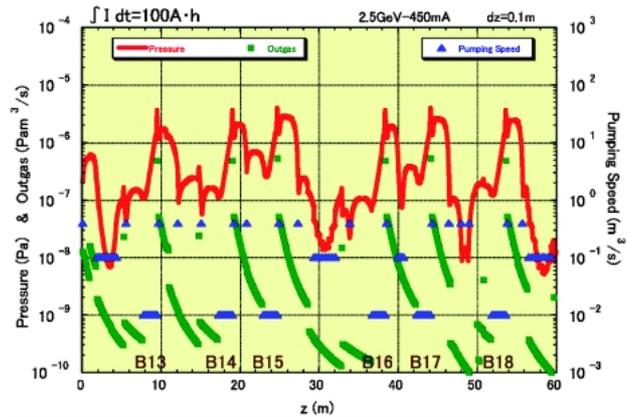
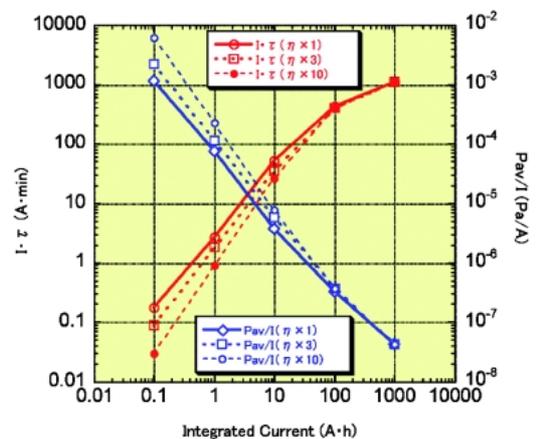
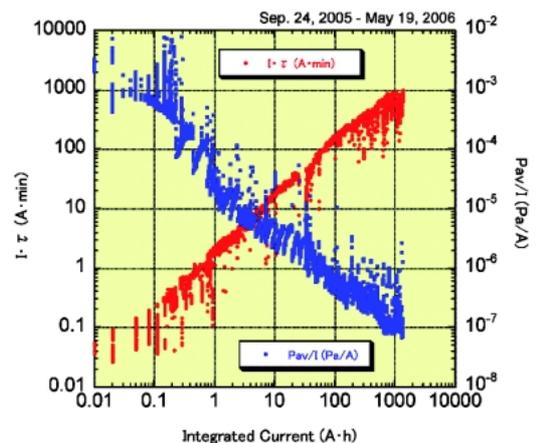


Fig. 11 Typical example of the calculated results on the pressure distributions. The red curve shows the pressure distribution at the integrated current of 100 A・h in the southern straight regions.



a. シミュレーションによる予測



b. 実際の立上げ状況

Fig. 12 Recovery of the beam lifetime and the average pressure after the reconstruction for the straight sections; (a) shows the prospected values from the simulation, and (b) the actually measured values during the operations.

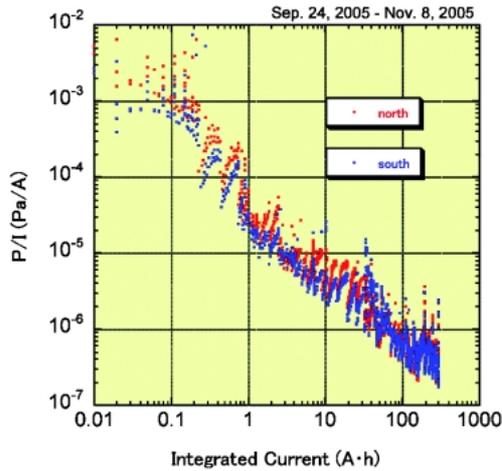


Fig. 13 Average pressures as a function of the integrated current. A red point shows the pressure in the southern straight regions, and a blue point in the northern straight regions.

潤れたダクトの場合は $10^{-7}$ 台に達する。

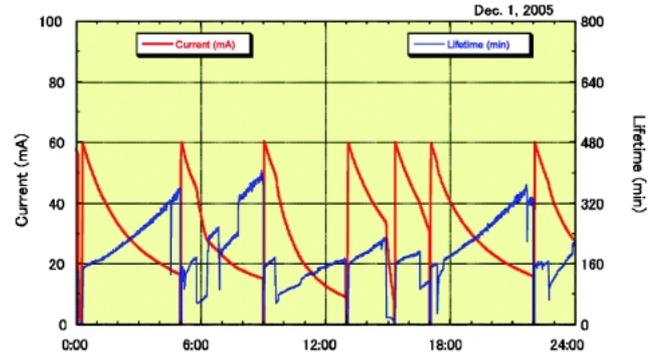
それぞれの時点での平均圧力を計算した後、平均圧力とビーム寿命との関係の実測データを用いてビーム寿命の伸びを予測した。その結果を Fig. 12a に示す。これにより、ユーザー運転開始（積分電流値100–200 A·h 程度）時に、目標とするビーム寿命（200 A·min 以上）を達成できる見通しを得た。

そして、実際の立上げでは約1か月のコミッションング期間中に積分電流値で約150 A·h を蓄積することができ、その時点でのビーム寿命は  $I \cdot \tau$  で約200 A·min であったので、2005年10月18日より1日3回入射でユーザー運転を再開した。さらに1か月後には  $I \cdot \tau$  が450 A·min を超え、11月22日より1日2回入射とした。2006年5月の時点で、 $I \cdot \tau$  は約950 A·min まで回復し、現在も真空ダクトの潤れとビーム寿命の伸びはともに進行している (Fig. 12b)。この進行の速さは、1997年の高輝度化改造後を上回るペースである。 $I \cdot \tau$  が1000 A·min を超えれば、1日1回入射の運転でも十分な平均放射光強度を供給できるようになる。

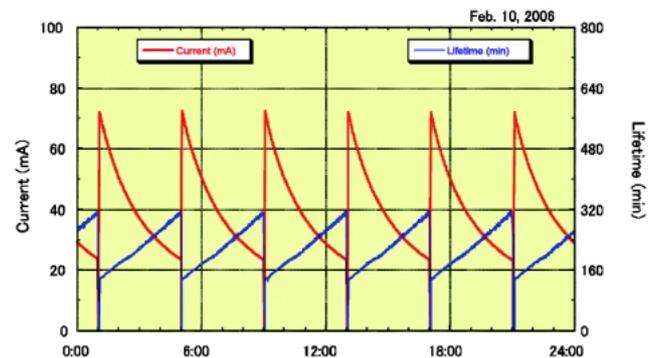
寿命回復予測のシミュレーション結果との比較では、プリベークのあり/なしで初期  $\eta$  の差が3倍以上の場合の計算結果と概ね一致した。事実、プリベークを行った区間（南直線部）と行わなかった区間（北直線部）のダクトの潤れの進行比較では、積分電流値が数10 A·h（平均 Photon Dose = 約  $1 \times 10^{24}$  photons/m）までにおいて2倍弱の差が見られた程度であり、それ以降有意な差は見られなくなった (Fig. 13)。

#### 4.3 シングルバンチ運転とビーム寿命急落現象

直線部改造後のシングルバンチ運転時において、マイクロダストのトラッピングによると考えられるビーム寿命急落現象の頻発が観測された (Fig. 14a)。改造前にはこのよ



a. 直線部 DIP ON (Dec.2005)



b. 直線部 DIP OFF (Feb.2006)

Fig. 14 Status of the stored beam current and the beam lifetime in the single-bunch operations; (a) and (b) show the status operated with new DIPs in December 2005, and without new DIPs in February 2006, respectively.

うな高い頻度で観測されたことがなく、ダスト源として今回更新されたDIPが疑われた。直線部に新規に導入した12台のDIPをOFFして運転したところ、寿命急落現象は全く発生しなくなった (Fig. 14b)。

DIPをOFFすると平均真空圧力は2割程度悪化するが、シングルバンチ運転時の寿命は Touschek 効果が支配的であるので、ビーム寿命はほとんど変化しない。改造後のバンチ長の電流値依存性の観測からすると、シングルバンチユーザー運転時のバンチ長は改造前の最大3分の1程度まで短くなっている。これは改造によるビームダクト内面の平滑化によってバンチ長の伸びが小さくなったためである。Touschek効果がさらに厳しくなった結果、シングルバンチ運転時のビーム寿命は  $I \cdot \tau$  で9 A·min 程度となり、改造前と比べて1/2–1/3程度に短くなった。

## 5. まとめ

PF リング直線部増強計画のためのリング改造作業が2005年3月から9月に行われた。四極電磁石や真空ダクトの更新により挿入光源設置スペースが増強され、また新しいビームラインにも対応できるように基幹部の改造も行われた。新設された短直線部と延長された直線部を利用し

---

て新しい挿入光源ビームラインの建設と企画が進められている。

改造によりリングの大半が更新された真空ダクトは、立上げ後の放射光照射による潤れも順調に進行し、それに伴ってビーム寿命も回復してきている。2006年5月時点でのビーム寿命は  $I \cdot \tau$  で約950 A $\cdot$ minであり、このペースは1997年の高輝度化改造後を上回っている。

## 参考文献

- 1) Y. Kamiya et al.: Proc. 1987 Particle Accelerator Conference, p. 455.
- 2) M. Katoh et al.: J. Synchrotron Radiat. 5, 366 (1998).
- 3) S. Asaoka et al.: AIP Conference Proceedings 705, 161 (2004).
- 4) T. Honda and Y. Kobayashi: J. Particle Accelerator Society of Japan 2, 494 (2005).
- 5) Y. Hori: Applied Surface Science 169-170, 724 (2001).
- 6) T. Uchiyama et al.: J. Vac. Soc. Jpn. 46, 193 (2003).
- 7) Y. Tanimoto et al.: Proc. 2005 Particle Accelerator Conference, p. 3061.
- 8) S. Sakanaka et al.: Phys. Rev. ST Accel. Beams 3, 050701 (2000).

---

# Status of PF-ring commissioning after the reconstruction for the straight-sections upgrade

<b>Yasunori TANIMOTO</b>	Institute of Materials Structure Science, High Energy Accelerator Research Organization, KEK, Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801 E-mail: yasunori.tanimoto@kek.jp
<b>Hiroshi MIYAUCHI</b>	Institute of Materials Structure Science, High Energy Accelerator Research Organization, KEK, Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801 E-mail: hiroshi.miyauchi@kek.jp
<b>Tohru HONDA</b>	Institute of Materials Structure Science, High Energy Accelerator Research Organization, KEK, Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801 E-mail: tohru.honda@kek.jp
<b>Yukinori KOBAYASHI</b>	Institute of Materials Structure Science, High Energy Accelerator Research Organization, KEK, Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801 E-mail: yukinori.kobayashi@kek.jp

**Abstract** The upgrade project of the straight sections at the PF-ring enables the reinforcement of insertion devices and their beamlines. As a main part of this project, a large-scale reconstruction of the storage ring was carried out from March to September in 2005. The lattice configuration was modified to create short straight sections of 1.4 m and to extend the existing straight sections. Optical functions of the short sections were optimized for short-gap mini-pole undulators as X-ray sources. The first mini-pole undulator SGU#17 has been operated for a protein crystallography. A recommissioning of the ring was conducted for about one month, and user experiments were restarted on 18th October 2005 according to schedule. The recovery of the beam lifetime due to the process of the vacuum scrubbing has been favorably progressed.