

## 話 題

## PF リングの直線部改造とコミッショニング

本田 融<sup>\*1</sup>・小林 幸則<sup>\*2</sup>

## Reconstruction and Commissioning of PF Ring for the Straight-sections Upgrade Project

Tohru HONDA<sup>\*1</sup> and Yukinori KOBAYASHI<sup>\*2</sup>

## 1. PF リング直線部増強計画の概要と経緯

KEK の放射光科学研究施設 (Photon Factory: PF) では蓄積エネルギー 2.5 GeV の PF リングと蓄積エネルギー 6.5 GeV の PF-AR の 2 つの放射光源リングが稼動している. このうち PF リングでは 2005 年 3 月 1 日から 9 月 20 日までの約 7 ヶ月間運転を休止して周長 187 m の蓄積リングの約 3 分の 2 に及ぶ範囲で四極電磁石と真空ダクトをすべて更新する大改造を行った. 9 月 21 日より約 1 か月間のコミッショニング期間を設け, 立上調整とビームによる真空焼き出しを行った後, スケジュール通り 10 月 18 日よりユーザー運転が再開された. ユーザー運転を継続しながらビーム蓄積による焼き出しによってリングの真空は順調に回復を続けている. 現在は真空の改善に対応して蓄積寿命が延びている段階で, 11 月末の時点で蓄積寿命は 450 mA において 20 時間を越えるまで回復し, 1 日 2 回入射モードで運転が行われている.

今回の改造の主な目的は挿入光源を設置できる直線部を増設することと既存直線部の長さを大幅に延長することであり, 挿入光源ビームラインの新設と更新を行う PF の直線部増強計画の根幹を成す改造である<sup>1)</sup>.

図 1 に示したように PF リングは東西に FODO セルからなるアーク部を持つ楕円形のリングで, 建設当初から直線部は南北に 5 か所ずつの合計 10 か所設けられていた. 挿入光源設置に利用できる直線部は入射用 1 か所と高周波加速空洞用 2 か所を除く 7 か所であった. 改造前はすべての直線部に超伝導ウィグラーやアンジュレータ, マルチポールウィグラーなど種々の挿入光源が設置され実験に供されてきた. 直線部増

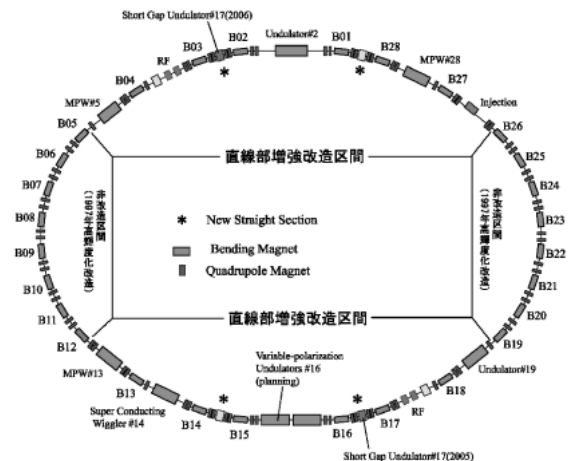


図 1 PF リング直線部増強の改造範囲.

強計画の一環として 2003 年にビームラインと共に新設された MPW#5 を例外として他の挿入光源はみな 1990 年以前に設置され永年継続して利用されてきたものである.

2000 年以降 PF-AR においてもアンジュレータビームラインの新設が進められているが, PF リングにおいても構造生物実験ラインをはじめとする新規アンジュレータビームラインの建設や既存アンジュレータの更新計画推進が急務となっていた.

PF リングでは 1997 年にアーク部の FODO セルにおいて四極電磁石と六極電磁石の数を倍増し, 真空ダクトを更新する高輝度化改造を行った. 高輝度化改造で四極電磁石のボア径はオリジナルの 110 mm から 80 mm まで縮小された. 直線部の四極電磁石はボア径 110 mm の旧タイプのまま残されていたが, ボア

<sup>\*1</sup> 高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所 放射光源研究系  
Photon Factory, Institute of Materials Structure Science, KEK, High Energy Accelerator Research Organization  
(E-mail: tohru.honda@kek.jp)

<sup>\*2</sup> 高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所 放射光源研究系  
Photon Factory, Institute of Materials Structure Science, KEK, High Energy Accelerator Research Organization

径をさらに縮小（70 mm）した四極電磁石を用いてラティスを再構築することによって既存直線部を延長できるだけでなく新たな直線部を4か所作り出せることを提案し、この新ラティスを実現するために蓄積リングの改造が行われることになった。

図1に示した改造区間では偏向電磁石と既存の挿入光源を除くすべての加速器コンポーネントの更新と配置換えが行われた。各直線部の延長については表1にまとめたとおりである。たとえば南北の長直線部の自由空間は約5 m から約9 m へ大幅に延長され、また今までまったく自由空間のなかった4つの場所に1.4 m の短直線部が作り出された。この短直線部を利用して真空封止型短周期アンジュレータを光源とするビームラインが新設される。2005年の蓄積リング改造と同時にB16-B17間に短周期アンジュレータ一号機が設置され、また2006年度にはB02-B03間に同二号機が設置され、それぞれ従来の偏向電磁石ビームラインから新規のアンジュレータビームラインへの更新が行われる。また最長直線部のひとつであるB15-B16間では自由空間の大幅延長を生かした円偏光スイッチングデバイスの導入計画が進行中である。

今回の直線部改造は蓄積リング自体にとっても少々古びてきた加速器コンポーネントを一新するという重要なメリットがある。四極電磁石本体の更新のみならず旧電磁石電源の更新とファミリー数の増加に対応し

表1 既存直線部の延長と増設された4本の短直線部

Section	Before Upgrade	After Upgrade	Insertion Devices
B01-B02 B15-B16	5.0 m	8.9 m	Undulator#02 Variable-polarization U (planning)
B03-B04 B13-B14 B17-B18 B27-B28	4.3 m	5.4 m	RF cavities Super Conducting Wiggler RF cavities Elliptical U/MPW#28
B04-B05 B18-B19	3.5 m	5.3 m	MPW#5 U#19 (revolver)
B12-B13 B26-B27	4.3 m	5.4 m	U/MPW#13 injection
B02-B03	0 m	1.4 m	Short Gap Undulator#03 (2006)
B14-B15 B16-B17			Short Gap Undulator#17 (2005)
B28-B01			

た増強が行われた。補正電磁石もまたリング全周にわたって更新された。直線部では1982年の開業当時の設計であった真空ダクトも一新され、特にRFシールドの増強には特段の配慮がなされた。ビームダクトと一体で直線部のビーム位置モニタも更新、増設し測定精度、分解能の向上が図られている。

放射光取り出しポートとビームラインの間をつなぐ基幹チャンネル部も直線部改造に関わるすべてのビームラインで更新が必要となり、新規挿入光源の設置に対応した放射光マスクやフィルターの設計が行われると同時に、偏向電磁石に近づいた四極電磁石とビームラインの干渉に対応する改造が行われた。

以下の節に、直線部改造後の新しいラティスとオプティクス、リング改造作業の実際、また最後にリング立上調整運転の状況を紹介する。

## 2. 直線部改造の新ラティスとオプティクス

### 2.1 ラティスの改造

PFリングでは、1987年と1997年に低エミッタンス化を目的とした2度のラティス改造が行われている。1987年の改造は小規模なもので4台の四極電磁石の追加増強であった。この改造で開業当初400 nradであった水平エミッタンスが130 nradまで下った<sup>2,3)</sup>。前節で触れたとおり1997年の改造は、リング東西に位置するアーク部の全面的な改造で、改造範囲はリングの約1/3周に及んだ。図2にPFリングの高輝度化改造後のラティスを示す。偏向電磁石B05からB12までの区間とB19からB25までの区間がこの時の改造の対象であった。ここはもともと基本セル構造がB-QD-B-QFのシングルレットFODOセルで構成された区間であった。そのセル構造をB-QF-QD-B-QF-QDのようにダブルレットFODOセルに変



図2 高輝度化改造（1997年）後のPFリングのラティス。

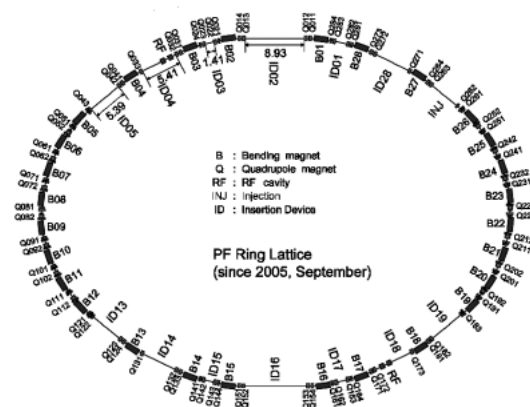


図3 直線部改造（2005年）後のPFリングのラティス。

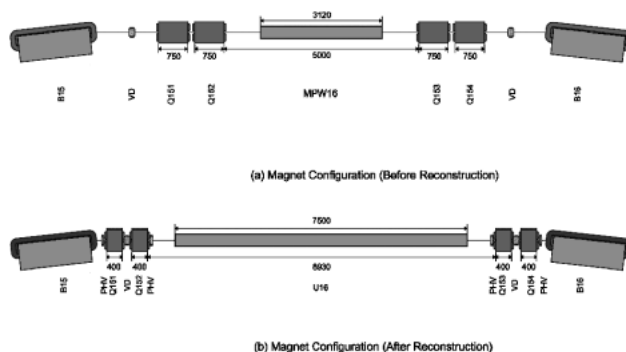


図4 B15-B16間の長直線部の延長。(a)改造前の電磁石配置と既存MPW, (b)改造後の電磁石配置と設置可能な長尺アンジュレータの例。

更し、偏向電磁石はそのまま、四極電磁石および六極電磁石を薄型高磁場勾配のものに置き換えることによって、ラティス改造を実施した。その結果、水平エミッタンスはさらに小さくなり、改造前に比べて1/4、運転当初に比べて1/10以下の36 nmradが実現された<sup>4,5)</sup>。

今回の直線部改造では、高輝度化改造の対象外であった直線部、B12からB19までの区間とB26からB05までの区間のラティスを変更した。改造の範囲はリングの約2/3周到り1997年の改造を上回る規模の大改造となった。ラティス改造のポイントは以下の2つである。

- 偏向電磁石本体はそのまま使用し、設置場所も変更しない。
- 改造範囲の四極電磁石はすべて薄型高磁場勾配型のものに置き換え、さらに設置場所を偏向電磁石に近づける。

今回の改造は、リングの低エミッタンス化による高輝度化を目的としたものではなく、従来なかった場所に短い直線部を4ヶ所作り出し、さらに既存の直線部10ヶ所を1.5 mから最大4 mほど長くするという改造で、挿入光源の増設・増強により、利用できる光の高輝度化を図るという改造計画である。改造後のラティスを図3に示す。偏向電磁石をそのまま残すことで、放射光の発光点が従来と変わらないことからビームライン側の大きな改造の必要はなく、リング側の改造だけで、新たな挿入光源設置場所が確保され、また既存の直線部にはより長尺の挿入光源を設置することが可能になる。

## 2.2 ラティス変更の具体例

### • B15-B16間の例

この区間はPFリングでもっとも長い直線部を持つ

区間の一つである。図4に改造前後のラティスを示す。ここでは偏向電磁石間では11 m以上あるものの、四極電磁石と放射光ビームラインフロントエンドと干渉を避けるため四極電磁石を偏向電磁石から約1.7 m離して設置していること、四極電磁石の磁石長が0.75 mのものを4台使用していることから、挿入光源として使用できる有効な直線部の長さ（内側四極電磁石間の長さ）は5.0 mとなっている（図4a）。この場所を図4bのように改造する。四極電磁石の中心磁場勾配を高くし、磁石長が短くても積分磁場勾配が十分な電磁石のものに替え、さらに基幹チャンネルのビームダクトとの干渉を避けるような鉄心構造を取り入れ、偏向電磁石にぎりぎりまで近づけて設置する。四極電磁石の磁石長が0.4 mのものを4台、偏向電磁石からの距離を0.4 mとすることで、有効な直線部の長さが約8.9 mとなり、従来に比べて4 mほど長い直線部となる。

### • B16-B17間

図5に示したようにこの区間には従来までは挿入光源の設置できる自由空間は存在せず、磁石長1.0 mが1台、0.5 mのものが2台で構成された四極電磁石のトリプレットが設置されていた（図5a）。この四極電磁石を0.3 mの磁石長のものに置き換え2組のダブレットとし、それぞれを偏向電磁石に0.35 mまで近づけて設置することで、中心部に約1.4 mと短いながらも新たな直線部が作り出される（図5b）。この区間と対称な場所がリングには4か所存在する（図1参照）ので、その結果4か所の新しい直線部が生まれることになる。改造後のリング全体の四極電磁石数は、この4か所につき1個ずつ（4個）の増加で合計78個となっている。

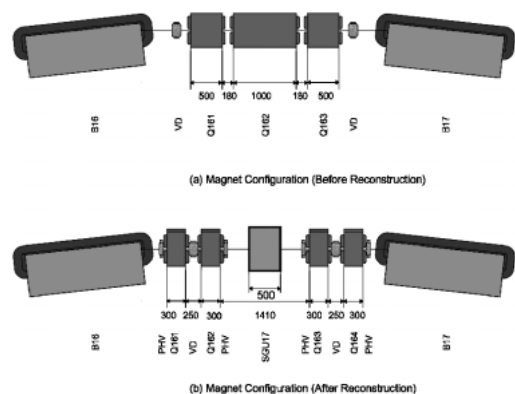


図5 B16-B17 間に新設される短直線部. (a)改造前の電磁石配置, (b)改造後の電磁石配置と設置可能な短周期アンジュレータの例.

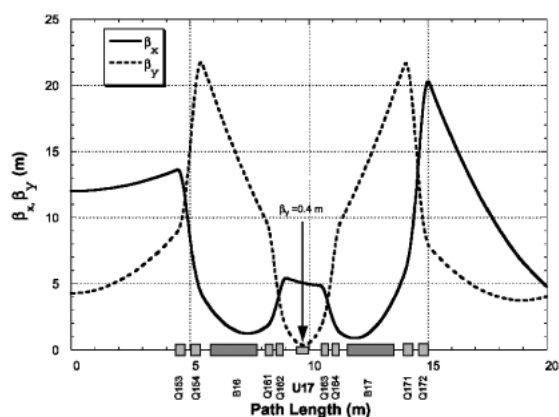


図6 短周期アンジュレータ設置に最適化した新しい短直線部周辺のオプティクス.

### 2.3 改造後のオプティクス

改造後の直線部における光学関数は、改造前と大きく変化しないよう調整を行った。ただし新設される4か所の短直線部に関しては、真空封止型の短周期アンジュレータ設置を想定しており、最小ギャップは4.5 mm 以下を可能にする。そのために垂直方向のベータ関数を0.4 m 程度まで絞った。改造後の短直線部におけるベータ関数を図6に示す。他の直線部における垂直ベータ関数は10 m 以下になるように、またリング全体では水平・垂直ともにその値が30 m 以下となるように四極電磁石のパラメータを最適化した。水平エミッタンスは、改造後も主としてアーク部の基本セルであるFODOセルの水平方向位相進度で決まっており、FODO1セルあたり $100^{\circ}\sim 105^{\circ}$ にすると、水平エミッタンスは36 nmrاد $\sim 27$  nmrاد程度となる。基本セルの位相進度が $105^{\circ}$ の場合におけるリング全体の光学関数を図7に示す。

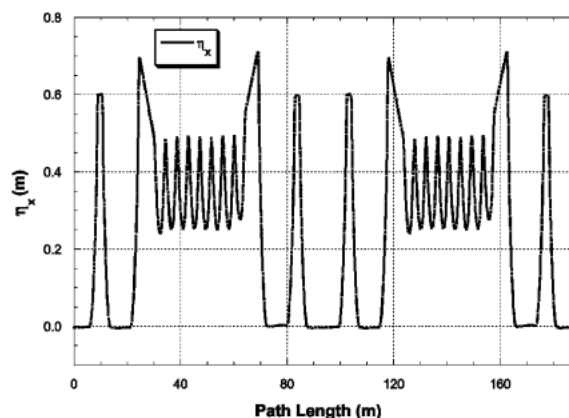
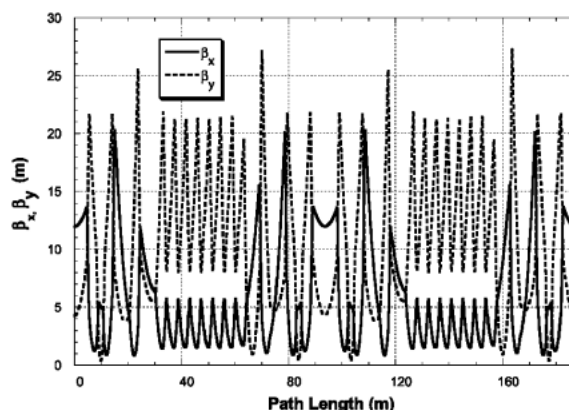


図7 直線部改造後のオプティクス, アーク部の基本セルの水平方向位相進度が $105^{\circ}$ のとき.

### 3. リング改造作業

2004年度のユーザー運転を2月末で切り上げ、2005年3月から6か月半の工程を組んで蓄積リングの改造作業が行われた。リングの改造範囲は既に図1に示したとおり全体の約3分の2に及ぶ北と南の直線部である。

まず改造期間の初めの1か月で当該範囲にある加速器コンポーネントの撤去が行われた。リングトンネル内に残されたのは偏向電磁石本体、既存の挿入光源本体と高周波加速空洞のみであった。図8は2005年4月初旬、ちょうど撤去が完了したところに撮影した南の長直線部周辺の写真である。B15-B16間にあるマルチポールウィングラ(MPW)#16を挟んでその上下流2台ずつの偏向電磁石が写っている。既存の挿入光源の真空チャンバーはそのまま残されたが、その他の真空ダクトは偏向電磁石部も含めてすべて撤去された。写真の中で偏向電磁石とMPWの左横に一本ずつ立っている丸いポストはリングのアライメントに用いられるターゲットポストである。



図8 偏向電磁石と挿入光源のみを残して、電磁石や真空ダクトがすべて撤去されたリングトンネル内。一番手前は偏向電磁石 B14，写真奥に見えるのが MPW#16。



図9 搬入作業中の短周期アンジュレータ#17，写真右側にみえる2組のダブルレット四極電磁石の間隙に設置される。アンジュレータ真空容器のビーム方向の全長は約1 m，真空中に納められた磁石列は周期長が16 mm，全長約500 mmである。

新ラティスでは直線部の四極電磁石は原則としてダブルレットとなるが，その設置場所は従来よりも偏向電磁石側に大きく移動する。作業としては，まずリング床面に四極電磁石の架台を載せて固定するためのベースプレートを施工した後，四極電磁石の搬入，設置が行われた。2つ一組の四極電磁石が一台の架台上に載せられており，架台上での相互位置の精密アライメントはあらかじめ完了した状態で運び込まれた。約50台の四極電磁石の設置，仮アライメントは約1か月を要し4月末には完了した。

5月には真空ダクトの搬入設置と電磁石への電源ケーブルや冷却水配管の接続，6月には電磁石の精密アライメント，短周期アンジュレータの搬入，設置等が行われた。真空ダクトの約半数はリング搬入前にベーキングをベンチで行ったが，約半数はこのプリベーキングを行わずに設置された。リングトンネル内に設置されてからのベーキングは新アンジュレータのビームダクトも含めて行っていない。一方放射光ビームを導く基幹チャンネル部はすべてのラインでリングトンネル内設置後にベーキングを行っている。

図9は搬入作業中の短周期アンジュレータ#17の写真である。このアンジュレータはPFリングとしてははじめての真空封止型であり，周期長16 mmで磁石長は約500 mm，真空ダクトの全長が約1 mと非常にコンパクトな挿入光源である。BL17には3次光で得られる10 keV付近のエックス線を利用する構造生物の実験ラインがリング改造と並行して建設された。

7月以降真空ダクトの接続作業，補正電磁石の設置作業等が引き続き行われ，リング全周の真空ダクトがつながったのは7月末であった。8月には放射光アプ

ゾバーの冷却水配管等真空関連作業の仕上げやビーム診断機器の配線作業，新しい電磁石と電源の通電テストが行われ9月の立上に備えた。

図10と図11に比較のため，それぞれ同じアングルで撮影した改造前と改造後のアンジュレータ#2付近の写真を載せた。写真中央やや右側に写っているアンジュレータの下流側から2台の円筒型の四極電磁石が撤去され，薄型の四極電磁石に入れ替わった結果，約2 mの自由空間がアンジュレータのすぐ下流に出来上がった様子が見える。現在はその自由空間を利用してストリップライン電極やビームスタディー用RF四極電磁石が設置されている。

今回撤去された直線部の四極電磁石はPFリングの建設当初から使い続けてきたものであった。四極電磁石のボア径が110 mmから70 mmに縮小されたことに対応して四極電磁石部の真空ダクト(Qダクト)のアーチャーは垂直方向で従来の70 mmから38 mmまで縮小されることになった。ちなみに1997年に改造したアーク部では四極電磁石のボア径は80 mmで，対応するQダクトの垂直アーチャーは53 mmである。PFリングのQダクトの断面形状は扁平な八角形をしており，古いQダクトと同一断面形状を持つビーム位置モニタ(BPM)は上下面に2電極と斜面に4電極を持つ6電極タイプであった。今回のBPMはQダクトと一体で製作されたが，小口径化を機にすべて上面下面に2電極を持つ4電極タイプに更新した。アーク部と同様に四極電磁石と一対一対応してBPMを取り付けた結果，その数も改造前の65個から77個に増加した。



図10 アンジュレータ#2 (写真中央やや右) とその周辺部, 直線部改造前の様子.



図11 アンジュレータ#2 (写真中央やや右) とその周辺部, 直線部改造後の様子.

1997年のアーク部改造では放射光ビームの取り出し角度に変更はなかったので偏向電磁石部のビームダクト (Bダクト) は新規製作せず, 改造Qダクトとの接続部分で現場溶接によるフランジの付け替えが行われた. 今回は新しい直線部の増設に伴い将来的にビームの取り出し角度が変更になるビームラインがあることや, 撤去するビームダクトに放射化があった場合の対応を単純にするため再使用や追加工は一切せず, B27からB04およびB13からB18の偏向電磁石に対応する12台のBダクトをあらたに製作した.

BL27からBL05までの7本とBL13からBL19までの7本, 合計で14本の直線部ビームラインのうち偏向電磁石を光源とするビームラインが改造前は7本あった. 今回の改造でそのうち4本の光源部に短直線部ができ短周期アンジュレータのビームラインへ

の転換が可能となった. 延長された加速空洞の直線部にも全長の短い短周期アンジュレータを共存させればあと2本のビームラインがアンジュレータビームラインとなり得る. ほとんどの場合このような光源の転換は放射光の取出し角度の変更を伴う. Bダクトの放射光取出しポートおよび放射光ビームラインと干渉する四極電磁石の形状は将来の取り出し角度の変更とビームラインの付け替えに対応できるように設計されている.

古い真空ダクトには未だRFシールドを持たないベローズや発熱の原因となるフランジ間の隙間が一部に残存していたが, 改造区間では新しく設計されたビームダクトの部分ばかりでなく, そのまま使用し続けることになった既存挿入光源などの既存ビームダクトとの接続フランジ部分でも隙間や段差を解消するRFシールドの強化が徹底して行われた. ビームダクト内面は従来に比べ格段に滑らかになったはずである. 立上後の観測ではバンチ長の伸びが始まるバンチ電流値が改造前よりも大分大きくなったことがわかっており, インピーダンスやビーム不安定性の様子がどのように変わったか今後の詳しい解析が待たれる.

#### 4. リングのコミッションング

リング改造作業を終えて9月21日よりコミッションングが開始された. 入射器 (LINAC) 終端部から蓄積リングまでのビーム輸送ラインでは夏季停止期間を利用して将来のトップアップ運転を目指した経路変更の改造が行なわれていた. ビーム輸送ラインのビーム通しが立上初日に完了した後, 改造作業中の復帰ミスからビーム軌道上に挿入されたままになっていた実験用ミラーの発見と撤去にやや手間取ったため, 初めてのビーム蓄積を確認するのに3日ほどを要した. ビーム蓄積が確認された後は, 入射パラメータやベータatronチューン, CODなどの補正を重ねながら, 放射光による真空悪化が徐々に回復するのを待って日ごとに蓄積電流値が増加して行った. 図12に示したとおり改造前の標準的な蓄積電流値である450 mAを達成するのに約5日間を要した. ただしこの時点では真空の回復もまだ十分ではなくビーム寿命は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.

蓄積電流値が450 mAに到達した後に本格的なビーム調整が開始された. 横方向バンチパイバンチフィードバックの立上, COD補正, チューンやベータ関数および分散関数, クロマティシティー等の測定と調整, 超伝導ウィグラの立上, 軌道フィードバックの立

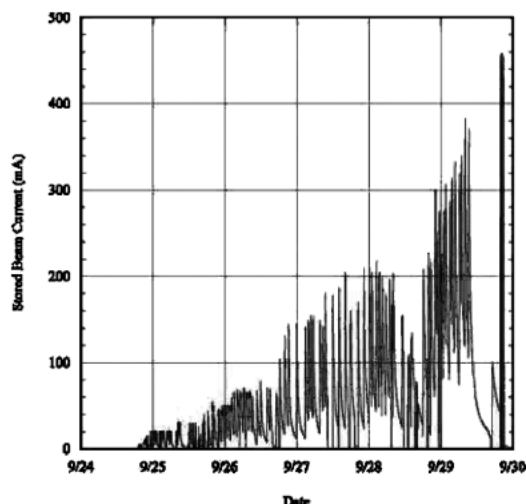


図12 ビーム蓄積成功直後5日間の蓄積電流値の増加。

上などが連日行われた。また夜間のシフトは最大蓄積電流値を500 mAまで上げて真空焼き出し運転が続けられた。

図13と図14に水平と垂直それぞれのCODのデータを示す。横軸はリング一周の軌道長で、アンジュレータ#2の中心を始点としてビーム進行方向にプロットしている。両グラフとも白丸がすべての補正電磁石をオフにしたときのCOD、黒丸がユーザー運転を行うための基準軌道として設定されたCODである。補正なしでは両方向にピークで4 mm程度のCODが観測された。基準軌道として設定したCODデータの零点からのばらつきの標準偏差は水平方向が0.35 mm、垂直方向が0.24 mmであった。

立上時に設定したオプティクスは、水平エミッタンスが36 nmrad、水平、垂直のチューンはそれぞれ9.60, 5.28であった。改造前は垂直方向のチューンの整数部が4であった点を除いて他の数値は全く同等である。水平エミッタンスにはなお50%程度の改善の余地があり、今後のマシンスタディーを通じてエミッタンスの改善を目指す予定である。

基準CODがほぼ定まった後に、短周期アンジュレータ#17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、ローカルにバンプを立てたりして軌道を調整すること無しに、想定された最小ギャップを達成することができた。初めてのテスト時に4.1 mm程度までビーム寿命等に全く影響を与えることなくギャップを閉じることが確認された。アンジュレータ#17の機構上の最小ギャップは3 mmであり、ビームラインでの光軸確認とつきあわせた中心軌道の精密探

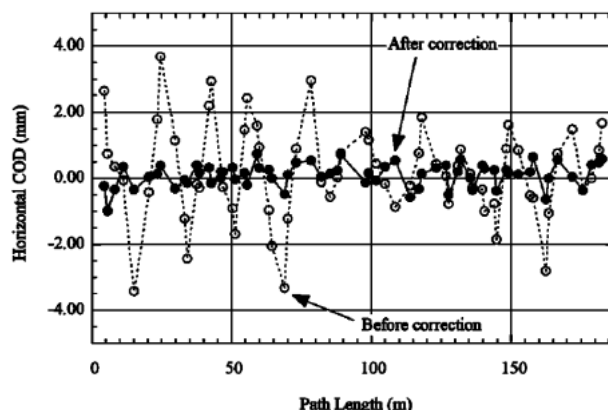


図13 補正電磁石をすべてオフしたときと補正後の水平方向COD。

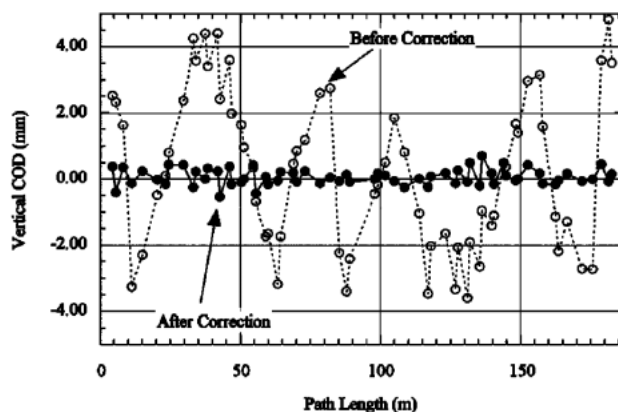


図14 補正電磁石をすべてオフしたときと補正後の垂直方向COD。

査や可能な最小ギャップの決定が今後行われる予定である。

10月に入って蓄積リングではフリーチューニングのための各挿入光源のギャップ変更時の軌道補正データの取得が、またビームライン側では改造後の光軸を確認してビームラインの調整をする作業が続けられ、スケジュール通り10月18日にユーザー運転再開に漕ぎ着けることができた。

図15に立上直後から2005年11月末までの、積分電流値(単位: Ah)と蓄積電流値と寿命の積( $I\tau$ , 単位: A min)の回復の様子を示した。ちなみに改造直前は蓄積電流値450 mAで $I\tau$ が1800 A min程度、すなわち65時間程度の寿命を持って運転が行われていた。立上1か月後のユーザー運転開始時は積分電流値が約150 Ahで $I\tau$ は200 A min、450 mAにおいて約8時間まで寿命が回復しており、一日3回入射モードでの運転がしばらく続けられた。積分電流値は

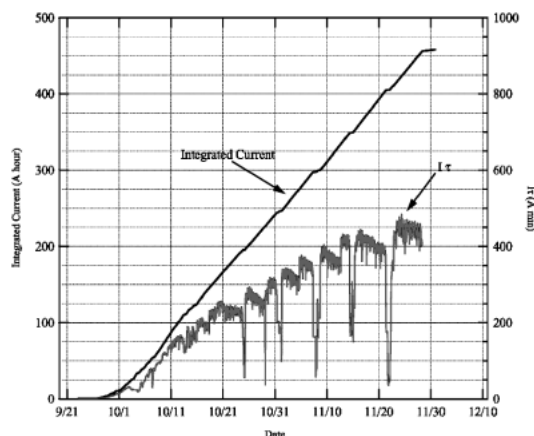


図15 2005年9月20日の立上以来の積分電流値と寿命 ( $I\tau$ ) の上昇曲線.

1日に約10 Ah ずつ蓄積して行き、寿命 ( $I\tau$ ) も焼き出しが進み真空が改善するにつれて着々と増加してきている。11月末の時点で  $I\tau$  が 400 A min を超え、12月末の短期運転停止までにはゆうに 600 A min を超えるまで回復すると予想される。既に11月の最終週には1日2回の入射モードに変更しており、順調な寿命の回復からして2006年年始の運転再開あたりから1日一回入射の運転モードに復帰できると予測される。

PF リングでは1999年以降、高周波加速にシンクロトロンチェーンの2倍の周波数で位相変調<sup>6)</sup>をかけて運転している。この変調は進行方向のビーム不安定性を抑制すると同時に蓄積寿命を最大で2倍程度まで伸ばす効果がある。位相変調の効果も手伝って、改造範囲が多めでしかもビームダクトの口径が相当細くなったにも関わらず、今回の立上以来の寿命回復は1997年の高輝度化改造後の同期間での回復を大きく上回っている。

## 5. まとめ

PF リングでは2005年3月から約7ヶ月運転を休止してリング直線部の四極電磁石と真空ダクトの更新を伴う大改造を行った。この改造の結果、挿入光源が設置できる直線部が4か所新設され既存直線部の長さもすべて延長された。新しい短直線部には短周期アンジュレータのビームラインが新設され、延長された直線部ではアンジュレータの更新計画が順々に進められていく予定である。

改造作業とリングのコミッショニングをスケジュール通りに完了し2005年10月よりユーザー運転を再開している。リング改造と並行して建設された短周期アンジュレータビームラインの立上も行われ、アンジュレータの最小ギャップの探索やビームラインでの光軸やスペクトルの測定が進められている。ユーザー運転を続けながらビームによる真空焼き出しは順調に進んでおり、1997年の高輝度化改造後を上回る速さでビーム寿命が回復している。

## 参考文献

- 1) S. Asaoka et al., New upgrade project for the Photon Factory Storage ring, AIP Conference Proceedings 705, p161 (2004).
- 2) Y. Kamiya and M. Kihara, KEK Internal Report 85-10 (1985).
- 3) Y. Kamiya, M. Katoh, I. Honjo, A. Araki and M. Kihara, Proc. of the IEEE Particle Accelerator Conference, Washington D.C., (1987), p455.
- 4) M. Katoh, and Y. Hori ed., KEK Report 92-20 (1992).
- 5) M. Katoh et al., J. Synchrotron Rad. 5, (1998), p366.
- 6) S. Sakanaka et al., Improvement in the beam performance by an RF phase modulation at the KEK Photon Factory storage ring, EPAC2000, Vienna, Austria, p690 (2000).