

最近の研究から

PF-AR 高度化後のコミッショニング

宮島 司

物質構造科学研究所 放射光源研究系

PF-AR Upgrading Project and Commissioning

Tsukasa MIYAJIMA

PF Light Source Division, Institute of Materials Structure Science

1. はじめに

PF-AR (Photon Factory - Advanced Ring for Pulse X-rays) 高度化改造作業は PF-AR 高度化共同チームにより 2001 年 2 月 28 日から開始され、2001 年 12 月末に完了した。高度化改造作業は予定より遅れ気味で終了したが、同チームによるコミッショニングは予定通り 2002 年 1 月 8 日より開始された。入射器である線形加速器を占有してのコミッショニングは 6 日間行われ、1 月 13 日には 6.5GeV、ビーム電流 25mA でビームによる光焼き出し運転に入ることが出来た。その後、ビームによる真空系の焼き出し、性能向上のための Machine Study を継続して行い、現在では 6.5GeV 初期ビーム電流 40mA で定常的に運転出来る状態になっている。改造直前には、6.5GeV で 90min 程度であったビーム寿命が 3 月 18 日現在では 500min 程度 (4 月 26 日時点で 700min 程度) になっており、今回の改造により大幅に性能向上していることが示された。また、この調整期間にビームラインの光軸確認を行い、各ビームラインに合わせてビーム軌道調整が可能であることを確認できた。ビームモニター系の更新とステアリング電磁石の増強、制御系の更新により、改造前より光軸調整のためのビーム軌道の調整が容易かつ細かく行えるようになった。

本稿では、2002 年 1 月 8 日より行われた PF-AR のコミッショニングの経過と、高度化改造の成果について報告する。

2. PF-AR 高度化計画の概要

PF-AR 高度化計画の主な目的は、貯蔵ビームの長寿命化、貯蔵ビームの大電流化への準備、ビーム

軌道安定化、ビームラインの新設である [1-2]。また、PF-AR は建設されてから 20 年近くが経過しており、各コンポーネントの老朽化による信頼性の低下により、運転に支障をきたすことがあったため、これらの老朽化部分の改善も重要な課題となっている。これらの目的のために、今回の PF-AR 高度化計画では以下のような改造が行われた。

1. 真空系の全面入れ替え (ビーム長寿命化、大電流貯蔵の準備)
2. ビーム位置モニター (BPM) 電極の更新 (軌道安定化)
3. ステアリング電磁石の増強 (軌道安定化)
4. 制御系の入れ替え (老朽化している計算機からの脱却)
5. 高周波 (RF) 加速空洞の高次モードダンパー用ダミー負荷増強 (大電流化)
6. ビームライン増設
7. 放射線安全系の改造・改良
8. できる限り老朽低信頼性部の改善を行う

これらの改造作業は、2001 年 2 月 28 日のユーザー運転停止後から開始された。リングトンネル内では、電磁石位置調整作業、真空ダクト撤去、新ダクトの設置、ビームモニター設置、南棟放射線シールド設置などの作業が行われた。これらの作業と並行して、NW2 新ビームラインの建設、新北西実験棟の建設作業が進められた。新北西実験棟の建設では、リングトンネル上の土砂を取り除く等の土木工事が行われた。また、今回の改造では制御系が一新されるため、リング内での改造作業と共に制御系ソフトの開発も進められた。制御系ソフトの開発では、各機器と対応をとってのデバッグが必要であるが、

各機器はリング内に設置されているため、改造作業中にパワーを投入してのテストを行うことは出来ない。また、PF-AR コミッショニング時の入射器占有期間は7日間に限られていたため、ビームを使用してコミッショニングを行いながら制御ソフトのデバッグを行うことは非常に効率が悪く、また現実的ではなかった。このため、制御ソフトのデバッグを含めたビームなし模擬運転を2001年11月より行うことを予定していた。しかし、土木工事の遅れ等により、改造作業が予定より遅れて終了したため、11月より予定していたビームなしでの模擬運転も後ろにずれ込み12月より開始され、コミッショニング開始前日の2002年1月7日まで続けられた。

3. コミッショニング

コミッショニングは大まかに分けると、入射器である線形加速器を占有できる入射器占有期間(1月8日から14日)と、3月までの光軸確認を含めた調整期間の2つの期間に分かれる。入射器占有期間には、2.5GeVでの入射、6.5GeVへの加速、6.5GeVでの真空ダクトのビームによる焼き出し運転を確立することが目標であった。その後は、入射器を共有しているKEKB、PFが立ち上がるため、入射時間を分配しながらビームによる焼き出しとリング調整のためのMachine Studyを継続して行った。

入射器占有期間のコミッショニングでは次のことを行った。

1. ビームトランスポート (BT) 系の調整
2. 入射パルス電磁石 (セプタム電磁石、キッカー電磁石) の調整
3. 高周波加速空洞をオフにした状態でビームを周回させる
4. 高周波加速空洞をオンにしてビームをリングに蓄積、2.5GeV オプティクス調整、モニター系の調整
5. 6.5GeV への加速調整
6. 大電流蓄積調整

これらの調整では、入射が頻繁になるため入射器占有期間で行わなければならない、限られた時間で効率良く調整する必要があった。次に、この入射器占有期間のコミッショニングの経過を示す。

3-1. 1月8日 (火)

9:00 より各コンポーネントの立ち上げを行い、線形加速器調整の後、10:30 より入射を開始した。始めに BT の調整を行い、12:30 にセプタム電磁石

直前までビームが通るようになった。入射点直前までビームが来ているのを確認した後、セプタム電磁石、キッカー電磁石をオンにし、ビームをリングへ導いた。

ビームがリングを周回することを確認するために、高周波加速空洞をオフにしたまま入射を行った(この状態では、ビームは放射光発生によりエネルギーを失うため、数百ターンすると失われてしまう)。セプタム電磁石、キッカー電磁石をオンにすると、入射点から約 30m 先に設置されている Current Transformer (CT) で1ターン目のビーム信号を観測することができた。しかし、2ターン目以降が観測されず、CT より先の部分でビームが失われていることがわかった。BT の再調整、入射 DC バンプの調整を行ったあと、リングの北直線部手前にある水平、垂直方向のステアリング電磁石を調整したところ、北直線部の BPM でビーム信号を確認することができた(つまり、リングの半周までビームが回っていることを確認できた)。さらにステアリング電磁石の調整を続けたところ、18:04 に CT で2ターン目以降の信号を確認できるようになった。高周波加速空洞をオンにし調整すると、ビームをリングに蓄積することができた。セプタム電磁石、キッカー電磁石を調整することにより、蓄積ビーム電流は 2mA 付近まで上昇した。24:15 以降は約 1.1mA(2.5GeV) でビームによる焼き出しを行った。

リング型加速器では、一度ビームがリングに蓄積されれば、そのビームにより COD (Closed Orbit Distortion) 測定や betatron tune 測定などが可能となりリングの状態を知ることが出来る。しかし、ビームがない状態ではそれらを知ることが出来ないため、リングの状態がわからず調整は困難となる。このため、立ち上げの最初はリングにビームを周回させることが非常に重要となる。立ち上げ初日も、リングの状態が全くわからない状態であったので、ビームがリングに蓄積されるまでの調整に時間が掛かった。

3-2. 1月9日 (水)

9:00 よりコミッショニング作業を再開した。COD 測定、tune 測定を行うために、約 1mA 蓄積して BPM エレクトロニクス調整、tune 測定系の調整を行った。BPM エレクトロニクス調整後、水平方向の2つのステアリングを用いて水平方向の COD 補正を行い、正しく補正出来ることを確認した。モ

ニター系の調整終了後、12:24 より入射を開始し DC パンプの調整を行うが、ビームが全く入らなくなった。入射点下流の CT で見ても 1 ターン目のビームも観測出来なかった。キッカー電磁石を調整することにより、CT でビームを確認出来るようになった。14:24 に RF 空洞を西から東に切替え、入射位相の調整、入射器のエネルギー調整を行った結果、ビーム電流 0.1mA 蓄積できた。

PF-AR は基本的にシングルバンチで運転されるが、tune 測定を行うためにはある程度のビーム電流が必要となるので、15:19 より電流値を増やすために多バンチ入射を行った。しかし、ビーム電流がシングルバンチより大幅に増加するというにはならなかった。キッカー電磁石を調整すると 5 バンチで 0.8mA 蓄積でき、tune を測定することが可能となった。水平方向の tune が整数に近かったため、アーク部の四極電磁石 (QF, QD) により tune が整数から離れる方向に調整した。

23:09 より六極電磁石とリングのエネルギーを調整した結果、蓄積ビーム電流が 10mA を越えるようになった。この時のクロマチシティは、 $\xi_x = +8.7$ 、 $\xi_y = +1.8$ であった。23:55 以降は、10mA - 9mA (2.5GeV) のビーム電流で、焼き出しを行った。

3-3. 1月10日(木)

10:00 より横方向 (水平、垂直方向) フィードバックダンパーの調整を行った。14:50 よりクロマチシティ補正、セプタム電磁石の調整、フィードバックダンパーのゲイン調整を行ったところ、11.4 mA まで蓄積できるようになった。16:15 より八極電磁石を励磁すると 14mA まで蓄積できるようになった。以後八極電磁石を 2A 通電したままの状態、入射を行うこととした。高周波加速空洞の入射時電圧を大幅に下げると、17mA まで蓄積できた。ビーム電流値が上がるとともに、高周波空洞付近の真空ダクトで温度上昇が見られたため、一度ビームを落してリングに入室し、温度上昇部の調査を行った。調査の結果、空洞付近の形状変換部のダクトが発熱していることがわかった。18:28 より 2.5GeV で 2mA 蓄積した状態から加速テストを行ったが、加速開始直後にビームを落してしまい、6.5GeV まで加速することはできなかった。23:25 より 16 - 17mA (2.5GeV) のビーム電流で焼き出しを行った。

3-4. 1月11日(金)

10:00 よりコミッショニング作業を再開した。前

日の加速テストで加速中にビームを落していたので、少しずつエネルギーを上げながら tune 測定を行い、加速調整を行った。tune 測定の結果、エネルギーの上昇とともに水平、垂直方向両方の tune がずれていくことがわかった。この加速時の tune のずれを四極電磁石 (QF, QD) により補正するように、電磁石のトラッキングデータの修正を行った。これを繰り返すことにより、11:17 には 5.9GeV まで、13:25 には 6.5GeV まで加速できるようになった。この時の加速は、少しずつエネルギーを上げていく準静的な加速であったので、次に加速時間の短縮を行うための調整を開始した。tune 測定とトラッキングデータ修正を行うことにより、16:14 には 4min で 6.5GeV まで加速できるようになった。18:27 より、16 - 17mA (2.5GeV) でビームによる焼き出しを行った。

3-5. 1月12日(土)

9:00 より前日に引続き、加速時の電磁石トラッキングデータの修正を行った。9:47 には、6.5GeV/2min 加速可能となり、11:42 には、ビーム電流 20mA で 6.5GeV/1min 加速可能となった。加速調整の後、焼き出し時のビーム電流確保のため、2.5GeV での初期電流値を上げる調整を開始した。クロマチシティ調整、RF 入射時電圧調整、RF 入射位相調整を行い、18:17 に 2.5GeV で 41.7mA までビームを蓄積することができた。その後、入射効率を見ながらリングのエネルギー調整を行い、入射時のエネルギーを最適な値に調整した。18:47 より、34 - 35mA (2.5GeV) でビームによる焼き出しを行った。

3-6. 1月13日(日)

9:00 より入射調整を開始した。RF 入射時電圧、RF 周波数、クロマチシティを調整し、高ビーム電流を蓄積できるようなパラメーターを探した。13:00 より 6.5GeV で COD 補正テストを行い、6.5GeV で補正可能であることを確認した。その後ビーム焼き出し運転用の調整を行い、17:00 より、6.5GeV 初期ビーム電流 25mA、15min 周期でのビームによる焼き出し運転に入ることができた。

入射器占有期間のコミッショニングの目標は、6.5GeV でのビームによる焼き出し運転を確立することであったので、当初予定していた目標をほぼ達成することができたといえる。

入射器占有期間のビーム電流の変化を Fig. 1 に、

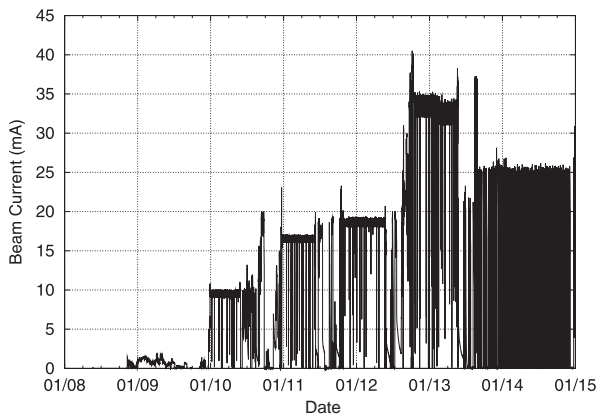


Figure 1. History of the stored beam current at the PF-AR during the commissioning.

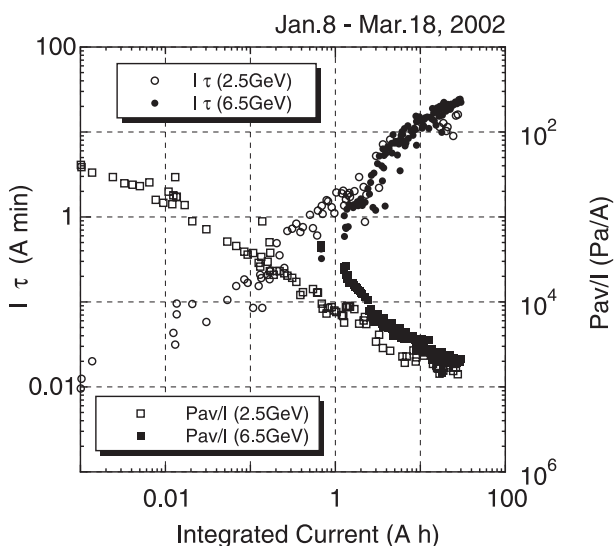


Figure 2. Product $I\tau$ and average pressure after PF-AR Upgrading Project. (the symbol I is the stored beam current and τ is the beam lifetime).

また 3 月末までの真空度の変化を Fig. 2 に示す。コミッショニングが進むにしたがい、ビーム電流も着実に上がっていることがわかる。

4. Machine Study

入射器占有期間後から 3 月の運転停止までの間は、ビームによる焼き出しを進めるとともに、リングの性能向上およびユーザー運転準備のための Machine Study を行った。また、入射器占有期間のコミッショニング終了後からビーム寿命の急落が頻発していたため、寿命急落の調査も重要な課題となった。3 月の運転停止までの Machine Study では、主に次に示すことを行った。

4-1. ビーム寿命急落の調査

6.5GeV でのビームによる焼き出し運転に入っ

た直後より、ビーム寿命の急落が発生した。発生頻度は 1 月 25 日の時点でほぼ毎回のランでビーム寿命の急落が発生していた。ビームによる焼き出しを継続した結果、3 月 3 日には真空度が良くなるとともにビーム寿命の急落も大幅に改善された。ビーム寿命急落はダストトラップが主な原因ではないかと考えられる。

現在でも依然としてビーム寿命の急落は 1 回の入射に対して 3 割程度の確率で発生しているが、運転日数の増加にともなって改善している傾向が見られるため、寿命急落は今後のビームによる焼き出しによりさらに発生頻度が下がっていくものと考えられる。

4-2. オプティクス調整

ユーザー運転は基本的に 6.5GeV で行われるので、このエネルギーでのオプティクス調整が必要である。設計値に電磁石のパラメーターをセットしても、現実のオプティクスと設計値にずれが生じる場合がある。リングのオプティクスを知るために、次の 2 つの測定を行った。1 つ目は高周波加速空洞の周波数を変更して COD を測定する分散関数の測定、2 つ目はステアリング電磁石を 1 つずつ励磁してシングルキックを発生させその時の COD を測定するステアリングの応答関数測定である。これらの測定結果よりオプティクスが計算され、このデータをもとにして補正を行った。オプティクス補正前と後の分散関数を Fig. 3 に示す。補正前は北直線部付近（グラフの中心付近）に分散が生じているが、補正後は設計通りその部分の分散をほぼ 0 にすることができた。

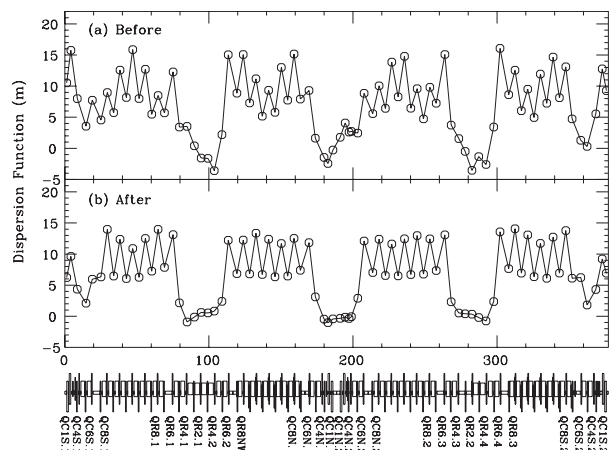


Figure 3. The horizontal dispersion functions before and after optics correction.

4-3. 大電流蓄積調整

1月12日にビーム電流が40mAを超えることができたが、その後は40mAを超えることが困難であった。スペクトラムアナライザでこの時のビーム信号を観測したところ、ビーム進行方向（縦方向）のシンクロトロン振動が強く見られビーム不安定性が起きていることが観測された。このビーム不安定性が電流値を制限していると考え、振動を抑制するために縦方向フィードバックについての Machine Study を行った。縦方向フィードバックの調整、入射時 RF 電圧の調整を行うことにより、47mA まで蓄積できるようになった。ただし、フィードバックをオンの状態のまま加速すると、加速開始直後にビームをロスするため、適切なタイミングでフィードバックをオフにする必要があった。このタイミングを調整した結果、6.5GeV で 43mA のビームを蓄積することができた。

4-4. ビームラインの光軸調整

1月29日に AR-NE1、NE5 の光軸確認を行った。リング側で軌道を決めた後、ビームラインで光軸を確認すると、AR-NE1 では垂直方向-3.6mm、水平方向-1.3mm、AR-NE5 では垂直方向+8.0mm であった。このずれをリングの軌道にローカルバンプを立てることによって調整した。ローカルバンプの変化と光軸の動きの対応を調べると、その動きはコンシステントになっていることが確認できた。また改造前とは異なり、他のビームラインに大きな影響を与えることなく各ビームライン毎に光軸調整ができるようになった。

3月1日に全てのビームラインでの光軸確認を行った。AR-NE1、NE3、NE5、NW2 ビームラインで光軸調整を行い、リングの基準軌道を設定することができた。ただし、NE3 ビームラインでのローカルバンプの値が 0.28mrad と大きすぎるため、夏季運転停止期間までの暫定的な基準軌道とすることになった。

4-5. 加速時のトラッキングデータの調整

入射器占有期間に 6.5GeV への加速を 1min で行えるようになっていたが、まだ加速時の tune のずれが大きかったため、tune を測定しながらの加速テストを行いトラッキングデータの補正を行った。補正前と補正後の加速中の tune のずれを Fig. 4 に示す。補正により加速中の tune のずれを小さくなっていることがわかる。また、今後の Machine Study で加

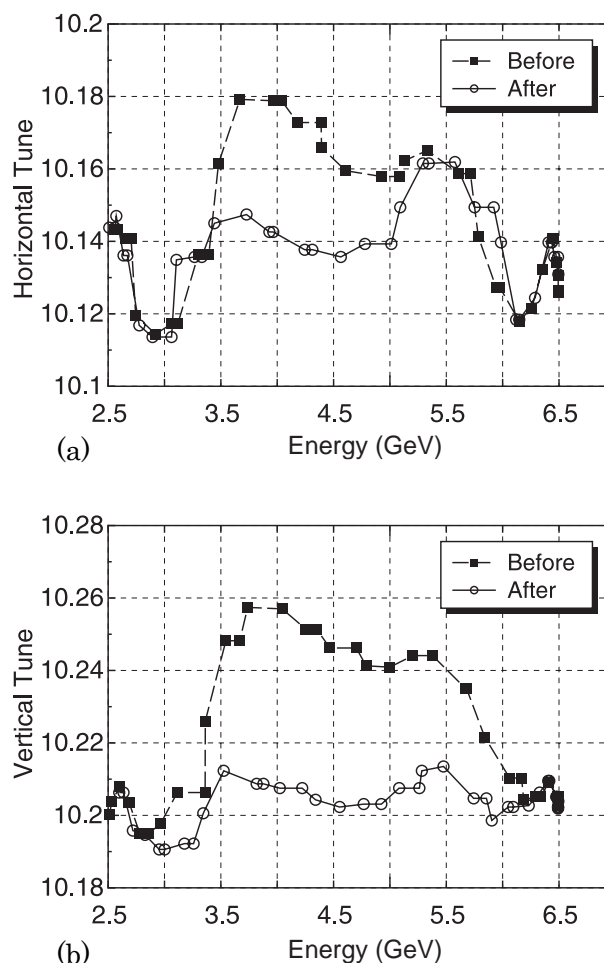


Figure 4. Horizontal and vertical betatron tune shift during acceleration from 2.5GeV to 6.5GeV before and after the tune correction. (a) Horizontal betatron tune shift. (b) Vertical betatron tune shift.

速時間短縮のための調整を行っていく予定である。

4-6. 5.0GeV への加速調整

医学臨床応用へ向けての調整を2月18日より開始した。医学臨床応用は5.0GeVのエネルギーで行われるので、まず5.0GeVへビームを加速できなければならない。これまでの加速調整では6.5GeVへの加速のみを調整しており、5.0GeVでは新たに加速時の電磁石トラッキングデータを生成する必要がある。6.5GeVへの加速時に蓄積したtuneのデータより、5.0GeVへのトラッキングデータを生成し、2月22日に5.0GeVへの加速が可能となった。その後、5.0GeVのビームを用いて、6.5GeVと同様のステアリングの応答関数測定、分散関数の測定を行った。4月からのMachine Studyにより5.0GeV オプテ

イクス調整を行う予定である。

5. PF-AR 高度化計画の成果

ここでは、PF-AR 高度化計画の目標がどの程度達成されたかを、コミッショニングの成果とともに示す。

まずビームの長寿命化については、真空系の全面入れ換えにより 3 月 18 日現在 6.5GeV、40mA で 500min と目標に近づきつつあり、今後運転を続けることによりさらに改善を期待できる。次に大電流貯蔵については、現状で 6.5GeV、43mA で留まっており、今後ハードウェアの更新を含めた対策が必要である。軌道の安定化については、BPM 電極の更新により、軌道測定の信頼性が大幅に向上したことと、ステアリング電磁石の増強がなされたことにより、目標を達成できたといえる。老朽化による低信頼性部分改善については、コミッショニング中にも幾つかのコンポーネントでトラブルが発生し、老朽化対策の済んでいない部分の対策が必要であることが示された。制御系の入れ換えでは、老朽化している計算機が一新され、また制御ソフトも全面的に新しいものに更新された。特に制御ソフトを全面的に作り直したことが、コミッショニングをスムーズに進める上で多大な貢献をしたといえる。制御ソフトの開発にあたっては、KEKB で開発された資産を利用することが出来たため、短期間での開発が可能となった。

また、コミッショニングの初期より、ビーム診断装置である COD 測定、tune 測定、バンチ長モニター、光モニターと、横方向（水平、垂直方向）のフィードバック装置が動作したことにより、コミッショニングを比較的順調に進めることができた。

今後の運転上の課題として次のようなことが残っている。1 つめは入射の容易化で、現在幾つか特定の電流値で入射が困難になる箇所があり、また特定の電流でビームロスすることがわかっているので、これらを改善することが必要となる。2 つめは大電流の蓄積についてであるが、現状では 2.5GeV で 47mA、6.5GeV で 43mA で止まってしまっている。3 つめはビーム寿命の急落への対処であるが、原因はダストトラップではないかと考えられるが、きちんとした原因追求と対策が必要である。4 つめは COD のビーム電流値依存性の抑制で、軌道フィードバックによりこれを抑制することを検討している。5 つめは低エミッタンス化で、現状では 6.5GeV で 290nm・rad であるのでこれを 180nm・rad

まで小さくすることを目標とする。これらの運転上の課題については、今後の Machine Study により対応していく予定である。

今回の改造で行えなかったことには次のような項目がある。

1. 入射路および入射系の整備
2. RF 系の大電流化の抜本的改造
3. ラティスの変更
4. 老朽化による低信頼性の部分の改造

特に、非改造部の信頼性に不安が残り、入射路電磁石／電源、入射用パルス電源／高圧パルサー、電磁石電源、電磁石給電用ブスバー、電磁石流量リレー、高周波系、冷却設備／空調設備、各種ケーブル類の改造および補修が今後の重要な課題として残っている。

6. まとめ

以上のように、PF-AR 高度化改造作業後の立ち上げは比較的順調に進み、ユーザー運転への準備もほぼ完了することができた。高度化計画の目標としてあげられた項目も幾つかを除いて達成することができた。しかし、現在も建設当初から使用されている幾つかの機器でトラブルが発生しており、これらの機器への対策が重要な課題として残っている。また運転上でも幾つか課題が残されているので、より安定な光源となるために、今後の Machine Study により改善していく必要がある。

引用文献

- [1] PF Activity Report #17 Part A, 139 (2000)
- [2] PF Activity Report #18 Part A, 100 (2001)

著者紹介

宮島 司 Tsukasa MIYAJIMA

物質構造科学研究所 放射光源研究系 文部科学技官

〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

TEL: 0298-64-5651 FAX: 0298-64-2801

e-mail: tsukasa.miyajima@kek.jp

略歴：1999 年東京都立大学大学院理学研究科修士課程修了。1999 年高エネルギー加速器研究機構文部技官。

最近の研究：加速器物理、非線形ビームダイナミクス。