

## トピックス

## PF-AR の高度化とその成果

春日俊夫\*, 河田 洋

高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所\*

## PF-AR Upgrading Project

Toshio KASUGA and Hiroshi KAWATA

Institute of Materials Structure Science, High Energy Accelerator Research Organization

## Abstract

The upgrading project of the dedicated pulse X-ray source PF-AR has been completed by the end of the 2001 fiscal year. Machine commissioning exclusively using the injector linac was successfully accomplished in the beginning of January 2002. After fine tuning of the machine and cleaning of the vacuum system with the beam from the middle of January to the middle of March, routine operation for users has begun in April. The historical details, commissioning and results of the project are reported.

## 1. はじめに

PF-AR 高度化の作業は2001年2月28日から12月末にかけて行われた。入射用の線形加速器を専有してのコミッションニングは2002年1月8日から1週間にわたり行われた。その後3月18日までビームによる真空系の焼きだし、マシンパラメータの設定、マシンスタディ等を行い、4月からユーザーのための運転を開始している。ここでは、PF-AR 高度化計画の経緯・概要、コミッションニング経過、高度化の結果等を報告する。

末尾に、加速器を専門としない方のために注釈を入れた。本文中に注 a) 等で示している。

## 2. 歴史的経緯

AR は素粒子物理学実験用の電子・陽電子衝突リング TRISTAN の入射用ブースターシンクロトロンとして1984年に建設されたが、TRISTAN への入射時以外は放射光発生用蓄積リングとしても利用出来るよう考慮されており、1986年から放射光テスト実験が、1987年からは共同利用実験が開始された。この間、AR を利用して数多くの重要な成果が得られたが、AR の基本設計はブースターシンクロトロンであったため、放射光発生用蓄積リングとしての性能は、とうてい満足出来るものではなかった。TRISTAN を利用した実験が終了し、1994年に KEKB 計画がスタートしたが、この計画ではブースターシンクロトロンを使用せず、増強された線形加速器から直接電子を入射するため、AR を放射光専用リングに転用する可能性が出てきた。

一方1996年当時、放射光実験施設（現物質構造科学研究所放射光研究施設、以後両者共 PF と略記）では2.5 GeV の電子ストレージリング（PF リング）の高輝度化計画が進行中（マシンをシャットダウンしての作業は同年12月より）であった。高輝度化後の PF 次期計画として AR

の放射光専用リングとしての高性能化が提案され、同年4月に第一回の AR 高度化検討会が開催された。以後数次にわたる会合で、幾つかの加速器案、利用案を検討してきた。この検討会を継続しながら、PF 放射光源研究系のメンバーが AR の放射光リングとしての性能向上・改良、運転法の開発（通常の運転自体は、加速器研究施設のメンバーと業務委託の運転員が行う）への関与を開始した。この中には、放射線シールド壁増強、加速高周波空洞の冷却水温度調整装置のグレードアップ、単バンチ純化装置の開発なども含まれる。これらの作業内容は常時打ち合わせを行い、記録を残してきた。このことはあとで述べるように、高度化作業後のコミッションニングが比較的短時間で完了したことに寄与したものと思われる。この期間の運転状況は、実に悲惨なものであった。AR 各部の老朽化による、特に真空系、高周波加速系のトラブルに伴う突然のビームロスやビーム寿命の低下、ビーム位置モニター（BPM）系の信頼性欠如によるビーム位置の制御不能、未解明のビーム不安定現象により所定の値まで電流を蓄積出来ないなどのトラブルに悩まされ続けた。ユーザーの方々に多大なご迷惑をかけ、またビーム寿命が短いため入射頻度が多く、KEKB の運転にも影響を与えた時期である。これらの事情により、1999年に高エネルギー加速器研究機構内の措置で AR の改修を行うことが決定され、同年12月に補正予算が通り本格的な高度化作業が開始された。なお、AR を放射光専用化するにあたって PF-AR (Photon Factory Advanced Ring) と改称することとなった。

## 3. 高度化計画の概要

先にも述べたように、高度化検討会において幾つかの加速器案が検討された。その中には、電磁石配置を一新するものも含まれていたが、既存トンネルのサイズや形状の制

\* 高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所 〒305-0801 つくば市大穂 1-1  
TEL: 0298-64-5666 FAX: 0298-64-2801 E-mail: kasugat@post.kek.jp

約は大きく、要求される光子エネルギーから決まっていた電子エネルギー6-6.5 GeVを犠牲にしない限りエミッタンスを大幅に改善することは困難であった。入射用線形加速器はKEKB用に8 GeVまで増強されたにもかかわらず、PF-ARへの電子入射路の電磁石及び入射用セプタムやキッカーの制約により、2.5 GeV-3 GeVの電子を入射し、所定のエネルギーまで加速しなければならない。所定のエネルギーでの入射(full energy入射)も検討したが、改造に要する費用の点から断念した。PF-ARは常時純度の高い単バンチで運転することが特徴の一つである。低エネルギーで入射を行うため、入射直後の単バンチ純度が高いとしても、何もせずに低エネルギー状態を長時間持続すると純度は悪化する<sup>(注a)</sup>。不純度を $10^{-7}$ ないし $10^{-8}$ 以下とするためには、入射時の純度悪化を防ぐ対策を必要とする。

ARは基本的にはブースターシンクロトロンとして設計されているために、放射光用ストレージリングとしての真空系はそもそも弱体であった。そのうえ、真空ポンプ類は老朽化により排気能力が低下し、フィードスルーは各所で故障を起こし有効なポンプ数自体も減少していた。おまけに各所で真空漏れ事故が多発した。真空系はアルミ合金製のものに放射線を防ぐために鉛シートを巻き付けてあったため、トラブル時に鉛シート除去が必要となり対応に梃摺った。真空系は一部手直しで済むものではなく、幾つかのモニター及びビーム操作用電極が入ったチェンバーを除き、全面的に作り直すと共にポンプの排気能力を増強することとした。真空ダクトは放射線の漏れだしを防ぐと共に冷却の容易化のために無酸素銅製とした。蓄積電流は加速空洞を全面的に交換しなければ、7-80 mAに制限される。空洞の交換は費用の点から将来の課題とした。ただし、高次モードダンパー用ダミー負荷は増強した。なお、現時点での真空系の冷却水の能力は60 mA程度が限界である。現状では各部の能力に見合った貯蔵電流で運転する他はない。従来の四極電磁石、六極電磁石の中にはヨークが新設ビームラインと干渉するものがあつた。干渉を避けるため四極電磁石を4台(新ビームラインの対称点の磁石も含む)、六極電磁石を5台新造した。なお2台の六極電磁石は取り外した。また、ビーム不安定現象の対策として2.5 GeV PFで用いていた4台の八極電磁石を新たに組み込み、ビーム位置制御の自由度を上げるためステアリング磁石を増強した。前述のように、BPM系の信頼性欠如により、ビーム位置測定が正確であることを前提とするビーム位置制御に困難を来していた。これは、主に真空系に植えられたBPM電極のフィードスルーの接触不良に起因するものであり、交換以外に対応策が無かつた。真空系更新を機に電極の交換を行った。なお、電極からの信号を処理し、ビーム位置を算出するためのエレクトロニクスもかなり古くなっているが、交換部品が完備していることと、旧TRISTAN主リング用のエレクトロニクスが小改造で使えるため、更新は見送った。制御系はTRISTAN用の計

算機を使用してきたが、老朽化とメンテナンスに困難を来してきたために、KEKBと共通のシステムに入れ替えを行った。ARは電子・陽電子の衝突実験が行えるよう、南及び北の直線部は実験ホール内を通過している。この部分は、建物の放射線シールドの機能が弱体のため、加速器のビームダクトや各コンポーネントを直接鉛板、コンクリート、ポリエチレン等で覆っていた。また入射点直後のリングトンネルと南実験ホールの間には、入射ビームからこぼれ落ちた電子による放射線を防ぐための厚さ1 mに達するコンクリート=ブロックが詰め込んであり、リング内の通行の障害となっていた。これらの従来からのシールド材を撤去して南北のリング直線部をコンクリート壁で囲い、天井は機器搬入搬出時に取り外し可能なコンクリートブロックで覆うことにした。

これらの改造点をまとめる。

1. 真空系の全面入れ替え
2. BPM電極の更新
3. 一部四極・六極電磁石の交換、八極電磁石の組み込み
4. ステアリング電磁石の増強
5. 制御系の入れ替え
6. 高周波加速空洞の高次モードダンパー用ダミー負荷増強
7. 実験室の増強とビームライン増設
8. 放射線シールドの増強
9. 放射線安全系の改良
10. 老朽化部の対策

前述のように、これらの改造以外に2001年時点で既に終了していた作業もある。PF-ARの入射路は途中までKEKBの入射路と共通であり、両者が分かれたあとのKEKB入射路はPF-ARの近くを通過している。KEKB入射中にPF-ARリング室内で作業が出来ることと、PF-ARがビーム蓄積中にKEKB入射路での作業が出来ることを保証するために、放射線シールドを増強した。これによりKEKBとPF-ARの運転スケジュール決定の自由度が増した。加速空洞の温度制御のために冷却塔を用いたため、6-7月は空洞の温度を約30°C以下で制御することが困難であった。この期間の運転を可能とするため、冷凍機を導入し、かつ個々の空洞の温度を独立に設定できるように冷却水温度調節系を改良した。PF-ARは単バンチ運転が特徴にもかかわらず、実験で要求される単バンチ純度を実現できないことがあつた。2.5 GeV時にREKO法<sup>(注b)</sup>と呼ばれる方法を用いて単バンチの純化を行っている。従来はチェーンがバンチの電流に依存することを利用してきた。所定のバンチ(単バンチ)の電流は所定外のバンチ(不純バンチ)の電流よりずっと大きいので、所定外バンチのチェーンに同調を取ったRFKOでこれを除去することが出来る。しかしながら、種々の要因によりチェーンが変動し、純化不良が起こった。現在は、所定バンチが通過

するときに RFKO をオフしそれ以外には RFKO をオンとして、所定外のバンチを除去する方法を用いている。この場合、RFKO の信号の周波数変調を行い、所定外のバンチのチューンを確実に通過すると共に、非線形振動のもとのペータートロン振動の成長が確実に起こるようにしている。この方法により、不純度を $10^{-7}$ 以下とすることが容易にできるようになった。なお、単バンチ純度は、SR の光子計数法を用いて測定している。入射・純化後の純度を2.5 GeV で測定できるよう(従来は6.5 GeV での純度しか測定できなかった)放射線安全系の変更を行った。これらの改良と北実験ホールのシールド壁建設と新ビームラインのための実験フロアの建設は今回の高度化作業の前に既に終了している。

#### 4. 高度化計画の進行

真空系の製造が1999年から開始された。BPM 電極が組み込まれた真空ダクトは納入後直ちに、BPM のオフセットの測定が行われた。同時期に新型四極電磁石と六極電磁石の製造が行われた。

高度化のための改造作業は2001年2月28日のユーザー運転停止後直ちに開始された。手始めに改造作業をスムーズにするため、リングトンネルと南実験ホール間のシールドの撤去が行われた。新造機器の搬入は主に北の実験ホールの天井シールドブロックを取り外して行われた。リングトンネル内では、電磁石位置調整作業、旧真空ダクト撤去作業、新ダクトの組み込み、南実験ホール内のシールド壁建設の作業が行われた。新真空ダクトの偏向電磁石への組み込みの様子を Fig. 1 に示す。制御系が一新されたため、リング内作業と同時に制御系ソフトの開発も同時に行われた。後述するように、これらの作業と並行してNW2 ビームラインの建設、北西実験棟の建設が開始された。北西実験棟新設のため土砂を除去したところ、リングトンネル該当部では約6 mm 浮き上がり、約6 mm 外側にふくらんだ。この結果、建物完成後の電磁石系の再測量を余儀なくされた。測量結果によれば、建物完成後の土砂の埋め戻しにより浮き上がりは解消したが、外側へのふくらみは元に戻らなかった。現在、電磁石の再移動は最小限に止め、電子軌道は当該場所で外側にふくらんだ状態にしてある。2001年11月末より、新制御ソフトを用いての模擬運転を予定していたが、この再測量が年末まで続いたことにより、電磁石や高周波系にパワーを投入した状態でのテストは年末年始に行うことを余儀なくされた。

#### 5. コミッショニング経過

高エネルギー加速器研究機構の電子・陽電子線形加速器は多くのストレージリングに電子や陽電子を供給している。KEKB の高エネルギーリングと低エネルギーリング、2.5 GeV PF 及び PF-AR である。このため線形加速器を専有しての PF-AR のコミッショニング期間は2002年1月8

日から14日までの7日間と限定されていた。当初、コミッショニングは2グループの交代で行うことを考えていたが、コミッショニングを担当するメンバーの人数は限られており、加速器を構成する各部の専門家を複数確保することが困難であったので、単一グループで作業を行い、深夜は業務委託の運転員にビームによる真空系の焼きだし運転をお願いすることとした。幸いにして、第一日目に2.5 GeV での入射が可能になったため、2.5 GeV で低電流(約1 mA)ながら最初の深夜から焼き出しを行うことが出来た。

コミッショニング初日1月8日は9:00から作業を開始し、12:30には線形加速器からリング直前のセプタム電磁石までビームを導くことが出来た。加速高周波(RF)オフの状態で入射用電磁石(セプタム電磁石、キッカー電磁石)を動作させ、入射点から約30 m 下流の電流トランス(CT)、約半周先のBPM、約3/4周先のプロファイルモニターでビームを確認しながら、ステアリング磁石の調整を行ったところ18:04にCTで2周目のビームを確認することが出来た。この状態でRFをオンとしたところ、ビームをリングに蓄積することが出来た。各部の調整によりビーム電流は2 mA まで蓄積することが出来るようになり、前述のように深夜は約1 mA (2.5 GeV) で焼きだし運転を行った。9日の午前中は約1 mA のビームを蓄積してBPM系、チューン測定装置の調整を行った。チューン調整および、リングのエネルギーを調整した結果23:00頃蓄積電流が10 mA を超えるようになった。この日は船頭が多くてARが山を登りかけた。10日はクロマテシィ<sup>注①)</sup>の補正、横方向ダンパー<sup>注②)</sup>の調整、八極電磁石の励磁、加速空洞の電圧等の調整により蓄積電流を17 mA とすることが出来た。18:28より2.5 GeV で2 mA を蓄積後6.5 GeV までの加速テストを行ったが加速開始直後にビームを落としてしまい、当日は加速を断念し深夜は16-17 mA (2.5 GeV) での焼き出しを行った。11日はビームを入射後少しずつエネルギーをあげながらチューンを測定した。この測定値を用いて、電磁石のトラッキングデータ<sup>注③)</sup>の修正を行った。これを繰り返すことにより、13:25に6.5 GeV まで加速できるようになった。12日は前日に引き続き電磁石のトラッキング=データの修正を行い、昼頃には20 mA のビームを1分間で6.5 GeV まで加速できるようになった。午後には、入射電流を増加させることに専念し夕方には41.7 mA まで蓄積することが可能になった。13日はRF調整、クロマテシィ調整、6.5 GeV でのビーム位置調整を行った。夕方からは初期電流25 mA (6.5 GeV)、15分周期での焼きだし運転に入ることが出来た。入射器専有での7日間のコミッショニング期間に6.5 GeV での焼きだし運転を確立する必要があったが、1日を余して目標を達成することが出来た。線形加速器を専有してのコミッショニング後、3月18日までビームによる真空系焼き出しを続けながら、マシンスタディ、営業運転のための



Figure 1. Installation of a vacuum duct for a bending section.

マシンパラメータの設定作業を行った。

このように比較的スムーズに、コミッショニングが進行した。この理由として、

1. 各機器の制御ソフトの基本的な部分はコミッショニング時に完成していた。(多くの方が年末年始を返上して対応した。)
2. KEBKの制御ソフトの資産が利用できた。
3. 各種ビーム診断装置が初期の段階から動いた。
4. 数年間運転法改良に携わり、コミッショニンググループがPF-ARの素性(の悪さ)をよく理解していた。

が挙げられる。

## 6. PF-AR 高度化の結果

真空系を全面的交換した結果、ビーム寿命は大幅に延びた。Figure 2 にコミッショニング開始時から6月28日までの真空系の平均圧力と  $I\tau$  積(ビーム電流  $I$  とそのときのビーム寿命  $\tau$  の積)の改善の様子を示す。ここで横軸に積算ビーム電流値をとっている。この図から分かるように、6.5 GeV 40 mA のビーム寿命は約1000分に達している。なお、図中に高度化前1999年4月から2001年2月にかけての値も示してある。改造直前には真空度、 $I\tau$  積共に悪化をたどり、臨終が近かったことを示している。改造後の真空系はビーム電流100 mA にも対応できる。ただし現状では、真空系冷却水系の能力の制限によりビーム電流は60 mA 程度に制限される。なお、現在の営業運転時の6.5 GeV でのビーム電流の初期値は約43 mA である。BPM電極の更新により軌道測定信頼性が向上した。ビーム位置の測定値を用いて、軌道の自動調整の試験を行った。現在のところ、ビームライン側からの自動調整の要求は無いので、ユーザー運転時に軌道自動調整は行っていない。さらに、ステアリング磁石を増強しているため、軌道の調整は格段に行いやすくなっている。制御系が更新された結果、コミッショニングがスムーズに行えたことは前述のと

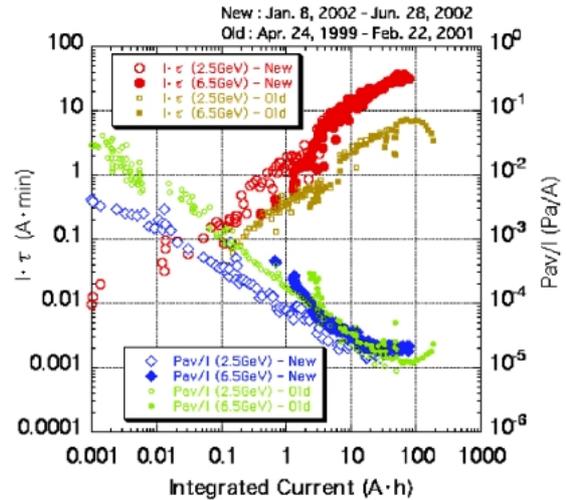


Figure 2. The history of the average vacuum pressure and the  $I\tau$  (beam current and lifetime) product before/after the project.

おりである。さらに、運転が容易化されたことと、運転状況にかかわるパラメータが記録されるようになったため過去のデータを容易にチェック出来るようになった。各種ビーム診断装置が整備されたことと相まって、マシンスタディが容易となった。高度化後も幾つかのビーム運動学上の問題点を抱えている。いままでは、ビーム診断装置が完備しておらず手を拱いていたが、今後はこれらの解明に取りかかる必要がある。

PF-ARの大部分のユーザー運転は6.5 GeVで行っている。1996年から行われている冠状動脈造影法の臨床応用時には、5 GeVで運転をする必要がある。高度化以前は6.5 GeV 運転と5 GeV 運転は独立の運転モードとして設定されており、両モードの切り換えが必要であり、この切り換えがトラブルの原因であった。高度化後は、5 GeVでの利用後6.5 GeVを経由して2.5 GeVの入射エネルギーに戻すようにしたため、5 GeV、6.5 GeV 運転に差異は無く、モード切り換の必要がない。ビーム寿命が長くなっていることと相まって6月20日に行われた高度化後最初の臨床応用はスムーズに進行した。

現時点の運転上の課題は、頻度は少なくなったとはいえ、未だに寿命急落現象が起こることである。これは、所定の電流(現在は約43 mA)まで入射蓄積・加速を行ってユーザーランに入るが、ユーザーランの途中で突然ビーム寿命が短くなることである。寿命は元の値近くまで回復することもあれば、短時間内にビーム電流が零近くまで落ちてしまうこともある。この現象の真の原因は不明であり、それ故対策も手つかずである。2.5 GeVでの入射時に、ビーム電流が約35 mAに達すると急激に入射率(単位時間内のリング内ビーム電流の増加)が悪くなり、ほとんど零となってしまう。この領域を過ぎ37-8 mAに達すると再び入射率が向上を始める。この現象の原因も未解明であ

るが、運転上のノウハウで凌いでいる。この現象は、通常の運転時に不必要で厄介な操作を持ち込んでいる。これも出来る限り根本的な解決を図りたい。ただし、後述のように近い将来入射エネルギーを2.5 GeV から 3 GeV に変更したい。この場合、35 mA での滞り問題は解消するかもしれない。そのほかにも、PF-AR 運転上の細々した多くの問題が残されているし、ユーザー側の光源性能に対する多くの要望もある。これらは、マシンスタディを続け地道に解決していく他は無い。

## 7. ビームライン及び実験ホールの高度化

ビームライン関係では、この高度化作業の一環として、時分割 XAFS 及び大強度 XAFS を目的とした NW2 ビームライン、タンパク質構造解析を目的とした NW12 ビームライン、の 2 本の X 線アンジュレータービームラインが建設されている。(NW2 ビームラインは、2002年2月にファーストビームを観測し、NW12 ビームラインは2002年10月に観測する予定である。) また、NW12 ビームラインを設置する新しい北西棟実験室が建設された。一方、北東実験棟内の既存部ビームラインも、大電流化の備えて、アプゾーパーの更新作業等が行われた。Figure 3 は現状の PF-AR の平面図を示す。以下それぞれの状況を紹介する。

### 【北西実験棟】

Figure 3 に示すように、北西実験棟は北棟と西棟の間の部分に建設されている。この実験棟の設計では既存の北東実験棟での反省を極力活かしたものとなっている。図で明らかなように実験ホールを広く取り、また実験フロアレベルの側面に、検出器調整室、データ解析室、ストックルーム、試料準備室と低温室、そして真空機器調整室の準備室を配置してある。また一階部には、ユーザー控え

室、管理室、トイレ、化学準備室、機械室(液体窒素ベッセル等)を配置した。本北西実験棟は2002年3月末に竣工検査が無事に終了し、現在すでにNW12ビームラインの設置が終了している。

### 【NW2 ビームライン：時分割 XAFS 及び大強度 XAFS】

本ビームラインの挿入光源は周期長40 mm の真空封止型アンジュレーターでオプションとしてテーパード・アンジュレーターの機能を有する。その理由は、本ビームラインの重要な実験テーマである時分割 XAFS 実験を D-XAFS で行えるように10 keV 程度の3次光において1keV 程度のバンド幅が取れるようにするためである。ビームラインの全体構成は約21 m 地点に液体窒素冷却式の二結晶分光器、約25 m 地点に湾曲円筒面による2次元集光ミラー、その後ろに高次光除去ミラーと縦方向集光用の両方の機能を有するミラーシステムがあり、約30 m 地点に実験ハッチとなっている。本ビームラインの建設は、結果的には足掛5年の年月を要したこととなる。NW2 アンジュレーター放射光の光導入は2002年2月4日に行なわれた。その後、光軸の調整、スリット調整等を行ない、4月から本格的なビームラインコンポーネントの立ち上げを行ってきている。二結晶分光器は、基本的に PF の BL4C, 14C, 15B, 18C に導入されているタイプの二結晶分光器をベースにし、それを液体窒素での冷却が可能になるように改造したものである。すなわち、定位置出射が必要となる第2結晶の並進操作を結晶自身が持っている完全性を利用し、機械的な並進操作を除き、その代わりに長い結晶(約200 mm)を用いている事が大きな特徴である。一方、液体窒素循環システムは SPring-8 の望月博士のご尽力によって開発されたシステム<sup>1)</sup>を導入した。このシステムは約175 W 程度の冷却効率を有する冷凍機を2台、液体窒素循環システム内に設置し、約330 W 以内の放射

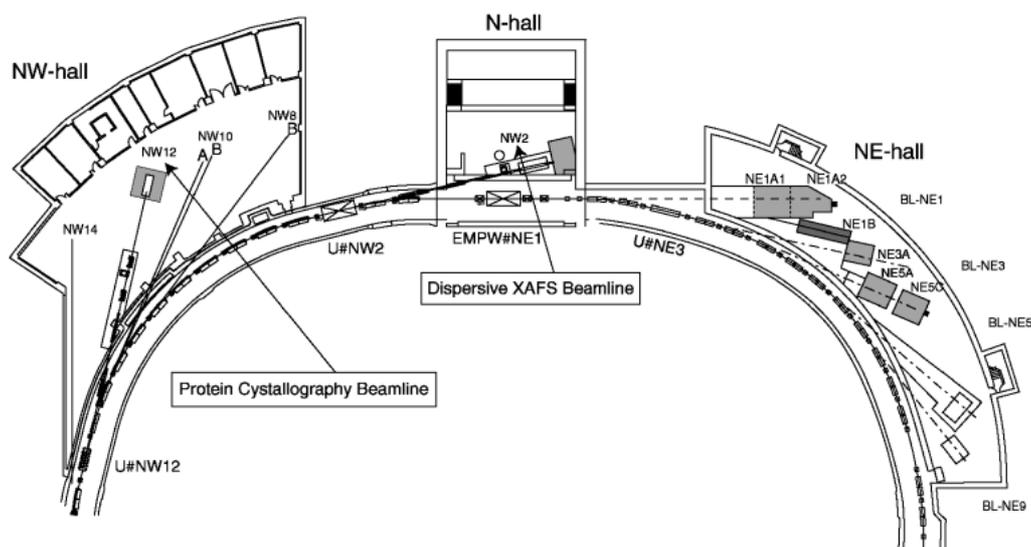


Figure 3. Plan view of the beamlines in the PF-AR North-East, North, and North-West experimental halls.

パワーに対して第1結晶を液体窒素温度に保つことが出来るものである。現時点で最大熱負荷(300 W)をこの結晶分光器に与えても、高次反射のロッキングカーブの幅は1秒未満を保っており、全く熱負荷に依る歪みは観察されていない。また、定位置出射に関しても分光器を5~23 keVまで動かした時に発生する最大変移量は縦・横方向ともに0.1 mm以内であり、一般のXAFS測定における1 keV程度のエネルギー変化においては、0.01 mm以内を保証するところまで調整されている。二結晶分光器が立ちあがったところでアンジュレーターの種類なK値における放射光スペクトルを測定し、続いてテーパモードでの3次光のスペクトル変化を確認した。定量的な議論は別紙に譲るが、通常のアンジュレーターモード(K=1.5)では、その放射光スペクトルの3次光のピークが約14 keVの時に半値幅は約300 eV程度であるものが、テーパモードを導入することによって、3次光のピークがなだらかとなり、ピーク幅は約1 keV広がることを確認している。このことは十分にD-XAFS実験が可能であることを示している。先に述べた様に本ビームラインには、二次元集光用のロジウムコート湾曲円筒ミラーを導入している。**Figure 4**はその集光特性を示すもので、レイトレースの結果と実験結果を並べて表示している。図から明らかなように、その集光サイズは横方向約0.45 mm、縦方向約0.15 mm程度であり、レイトレースの結果と良い一致を示して

いる。この集光条件での試料上での光子数は、現在の平均的な蓄積電流値である35 mAで適当なK値を選ぶことにより、10~20 keVの領域で約 $3\sim 4 \times 10^{12}$ 光子/秒である。このことは十分に大強度XAFS実験が可能であることを示している。また、D-XAFSの為に縦方向だけの集光を単色X線でテストし、約70ミクロン程度の集光値を得ており、時分割XAFS実験が行える環境が整いつつある。

#### 【NW12ビームライン：タンパク質構造解析】

本ビームラインの挿入光源も周期長40 mmの真空封止型アンジュレーターでオプションとしてテーパード・アンジュレーター機能を有するものである。MAD法を念頭に置き、エネルギー分解能の向上を計るために、光学系は縦方向平行化ミラー、液体窒素結晶冷却式の二結晶分光器、集光ミラーとなっている。2002年8月現在でほぼビームラインコンポーネントはすべて設置され、9月末からの運転再開時にビームラインへの光導入を予定している。

#### 【既存ビームラインの状況】

既存部のビームラインのNE1ではフロントエンドのアップグラーの更新作業、NE3ではインターロックシステムの更新作業、NE5でもフロントエンドの改造作業が行われ、2002年4月から営業運転が再開された。各ビームラインともに軌道の安定性、寿命の増大はユーザーにとってのメリットは高い。また、リング改造後、縦方向エミッタンスのカップリングが減少した効果と考えられるが、磁

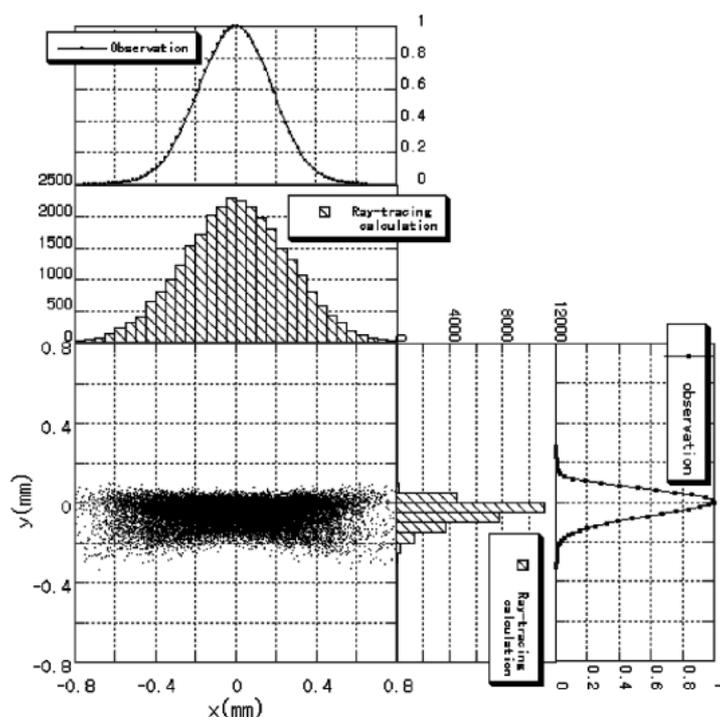


Figure 4. Comparison between focusing performance obtained by a ray-tracing calculation and that obtained experimentally at NW2 beamline.

Experimentally obtained focused beam sizes in horizontal and vertical directions are 0.45 mm and 0.15 mm, respectively, and these are reasonable from the ray-tracing calculation.

気コンプトン散乱実験を行っている NE1A1 ビームラインで135 keV の X 線における円偏光度が改造前の約2倍程度の増大が確認されている。そのような諸々の結果、すべてのビームラインにおいて、改造前では明確に解明できなかったいくつかの現象が、改造後の放射光を用いて解明されてきている。そして6月からは筑波大学との協定研究である医学臨床応用が再開されている。

## 8. 今後の予定

不安定現象が起こるビーム電流の閾値は電子エネルギーが大きければ大きいほど大きい。すなわち、不安定現象は入射時に問題となることが多く、入射エネルギーを高くすれば入射時の幾つかの問題は緩和される可能性がある。入射路の電磁石系や入射用電磁石及びそれらの電源は3 GeV 相当まで対応している。入射用線形加速器のエネルギーを3 GeV として入射試験を行った結果、3 GeV で約65 mA まで蓄積することが出来た。入射後加速を行い6.5 GeV で52 mA の電流を得ている。これが高度化後の6.5 GeV での最大電流である。3 GeV での入射を出来るだけ速やかに通常の営業運転に組み込みたい。現在、リングは6.5 GeV で約290 nm のエミッタンスで運転している。近い将来これを180 nm 程度まで向上させたい。

PF-AR を構成する機器の中にはこの高度化計画時にほとんど手をつけなかったものもあり、これらの中には老朽化により信頼性が低いものもある。事実コミッション中にも幾つかの機器のトラブルに見舞われた。これらをどのように改修していくかは課題として残っている。高度化開始時から次の項目は課題として残ることをアナウンスしてきた。

1. 入射路及び入射系の電磁石と電源
2. リング電磁石電源の交換
3. リング電磁石給電用のプスパー
4. 高周波系の根本的改修
5. 冷却設備及び空調設備
6. 放射線損傷を受けている各種ケーブル

これらは、高度化後の PF-AR の信頼性を決めるものであり、対策が求められている。ただし項目5は本研究機構施設部の尽力により改修が始まっている。

## 9. おわりに

PF-AR 高度化作業とコミッションはほぼ予定通りすすみ、4月よりユーザーランを開始している。高度化の目標は幾つかの項目を除き達成されたものと思っている。高度化は、本研究機構加速器研究施設と物質構造科学研究所放射光研究施設のメンバーにより構成された「PF-AR 高度化共同チーム」によって行われた。共同チーム及び支援をいただいた全ての方に感謝を致します。

### [注釈]

注 a: 蓄積されたビーム内の2個の電子間衝突により横方向の運動量が縦方向(ビームの進行方向)の運動量に変化し、一方の電子がエネルギーを得て他方はエネルギーを失いバケット(縦方向運動の位相空間内の安定領域)から飛び出すことがある。一方、放射減衰があるため後続のバケットには開口部があり前方バケットの上部までのびている。この開口部に前方のバケットをエネルギーを得て飛び出した電子が飛び込むとやがては後方バケットに捕獲される。すなわち、純度の高い単バンチを形成しても、後続のバケットに電子が漏れ出す。この現象は電子エネルギーが低いときに顕著で、6.5 GeV では要求される純度が $10^{-7}$ ないし $10^{-8}$ の場合問題とならない。

注 b: 電子は進行方向に垂直な方向(水平・鉛直両方向)にベータートロン振動と呼ばれる振動をしながらリングを周回している。リング一周あたりの振動の回数をチューン(通常 $\nu$ で表す)と呼んでいる。通常リングは、水平方向のベータートロン振動と鉛直方向のベータートロン振動が独立となるようマシンのパラメータを選ぶ。ところで、リングの一方所にビームを水平ないし鉛直方向に蹴ることの出来る電極を挿入しておきここにある周波数 $f$ の高周波を与えておく。ビームは回転周波数 $f_{rev}$ でこの与えられた信号を標本化するので、ビームが感じる信号のスペクトルは $f \pm n f_{rev}$ の周波数のところに表れる( $n$ は整数)。この周波数が $\nu f_{rev}$ と一致するとベータートロン振動は強制振動により、振幅が増大し、振幅がある値に達するとビームは失われる。これを RFKO (RF knockout) 法と呼んでいる。ベータートロン振動は非線形振動なので、ビームを蹴る周波数をスイープする必要がある。

注 c: チューンのエネルギー依存性をクロマテシティと呼んでいる。六極電磁石の励磁でクロマテシティを調節することができる。

注 d: ビームが加速空洞のような構造物を通過すると、その中に電磁場を残す。その電磁場によりビーム自身が影響を受け運動が不安定となることがある。ビームの不安定運動を検出し、その運動を抑制する方向に電極内に電磁場を発生させ不安定を制御する装置を(アクティブ)ダンパーと呼んでいる。

### 参考文献

- 1) T. Mochizuki et al.: Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A **467**-**468**, 647 (2001).