

施設だより

物質構造科学研究所副所長 松下 正

2005年を迎えて、初めての施設だよりになります。いよいよ、今年は2.5 GeV リングの直線部増強のための改造が3月から実施されます。PFは、この3月で初めて放射光の発生を確認してから23年になりますが、常に施設の性能を上げる努力を行い物質科学、生命科学分野のユーザーの皆様にとって、必要とされる施設であるべく努めていきたいと思っています。

今回は、共同利用施設、とくに加速器を利用に供している共同利用施設において運営上生じる問題について、考えさせられることがありましたので、それについて述べさせていただきます。

ひとつは、安全の問題です。2004年の9月に、米国スタンフォードのSLAC (Stanford Linear Accelerator Center) で、配線作業中の作業員が電気事故で重症な火傷を負うということが起こりました。幸い一命はとりとめ、入院後回復に向かいましたが、SLACのdirectorは、この事故の後すぐにSLACの加速器の運転をすべて停止することを命じ安全に関する対策が確認されるまでの運転再開を禁止しました。このため、事故現場となっていない放射光用リングであるSPEAR3の運転も止められ11月、12月、1月のユーザー実験はすべてキャンセルされました。SLACを管轄する立場の米国エネルギー省(DOE)もこの問題に関して調査を行い再発防止の方策をもとめました。このためにDOEから任命された委員会メンバーがSLACを訪問して、多くの質問等をしていったこと、SLACとして安全確保のために講じた方策に関するレポートをDOEに提出することが求められたこと、などがあったと聞いています。SPEAR3の運転は1月中旬から再開し、2月にはユーザー利用が始められるようになったようですが、DOEへの報告のための書類を作る作業に大変な労力を要したそうです。

さてKEKで事故が起こった場合にどういうことになるかを考えてみます。紙面が限られているので、ここでは加速器あるいは放射光実験ホールのような放射線管理区域において火災が起きた場合について述べます。もちろん消防署への連絡、消火活動を行うなどの対策がとられるように定められていますが、ユーザーの方々にとって影響がでるのは、例えば火災が放射光施設ではなくKEK内の他の加速器において起きたとしても放射光用加速器の運転も停止されることです。逆に放射光施設内の放射線管理区域(実験ホールを含む)で火災が起きても、KEKBなど他の加速器の運転も停止することが定められています。加速器の運転再開は、文部科学省の放射線規制室に事故報告した後、その判断を仰がなければ行うことができません。安全の基本的考え方は、もちろん人間の安全を第一とするものでありますが、事故が起きた場合にはKEK内の他の施設も含め

て共同利用実験にも大きな影響がでます。放射光実験では、電気炉、ヒーター、化学薬品、ガス、大電力を要する機器の使用など、火災の原因になる可能性があるものを扱う場合があります。ユーザーの方々にも、自分の身を守るということも含めて実験前に安全についてもう一度思い出してから実験を初めていただけたらと思います。

二つ目は、共同利用施設での成果という問題です。加速器、ビームラインのような大型の施設、機器を多数のユーザーの利用に供している放射施設では、量的にはユーザーによる研究成果を論文にするものが大半になります(もちろん、施設スタッフも研究者として論文を発表することが求められるのは当然ですが)。ちなみに、PFでは現在、施設スタッフのうち研究者は、約60名であるのに対し、ユーザーは大学院生も含めて2900名程(平成16年)です。ユーザーの皆様がPFを利用してどのような研究成果を挙げているかを把握し、それを世の中にアピールしてゆくことは、施設の今後にとって極めて重要なことです。PFでの実験に基づいて研究成果を論文として発表したら、PFにそのことをお知らせいただくようお願いしていますが、論文発表後1年も2年も経ってから報告いただくという例が後を絶ちません。このようなことがあるとPFでの論文発表数のデータをまとめると常に直近では発表論文数が減っているように見えるグラフしか描けないため、事実を反映しないものとなりネガティブな印象を与えることになります。せっかく論文を発表したならいろいろなところにアピールするという意味でも、是非PFにそれを早く(遅くとも3ヶ月以内ぐらいに)お知らせ下さい。PFのホームページでは、PFでの研究成果をトピックスとして分かり易く示すことも行っていますが、その材料としてもユーザーの方々の研究成果を施設として把握しておきたいと思っています。法人化した後の大学共同利用研究所はますます大学の研究者にとって役に立つ存在であることを示すことが必要な状況になりつつありますが、ユーザーの方々に成果をあげていただくこと、それを研究者の間だけでなく一般の国民にも分かり易く知らせることも、これからは重要になってくると思います。現在、PFではユーザーの方々が出版した論文の登録をいかに速やかに行ってもらえるようにするかについて検討を始めています。議論の中では、それまでの論文の発表状況をもっと共同利用実験課題の審査に反映すべきだという意見もでています。これまでも実験課題申請書には、その実験課題に関してのそれまでの業績を書いて頂く欄がありますが、そこをもっと充実すること、論文発表状況をもっと審査に反映させること、などが可能性として議論されています。大変挑戦的な研究テーマでは簡単に論文がでない場合がある、論文の数ばかりでなく質の評価をどのように取り入れるのか、などの点に注意は必要ですが、やはり何らかの方法でそれまでの論文発表状況をこれまで以上に課題審査に反映させる方策を考えるべきだと思います。今後、共同利用実験課題審査委員会、研究所の運営会議でも議論いただこうと考えています。

現 状

入射器の現状

電子・陽電子入射器
 加速器第三研究系主幹 榎本收志

概況

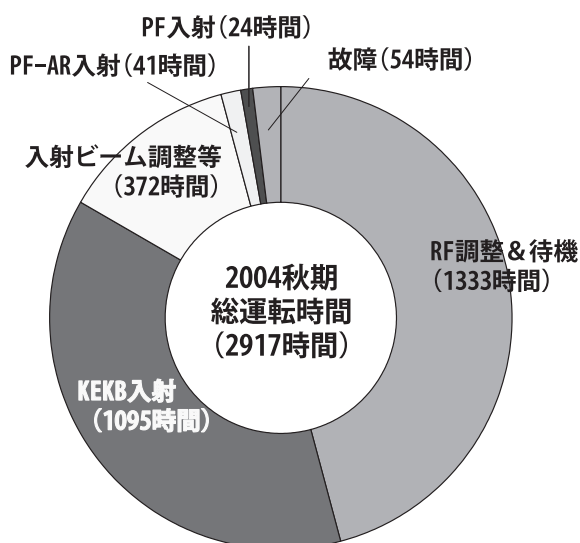
昨秋 9～12月の入射器運転日程及び年始の予定は以下の通りである。

- 8月19日 入射器運転開始
- (9月9日 KEKB への入射開始)
- 9月21日 PF への入射開始
- 10月13日 PF-AR への入射開始
- 12月20日 全電子加速器運転停止
- 1月5日 入射器運転開始
- (1月11日 KEKB への入射開始)
- 1月17日 PF への入射開始
- 1月19日 PF-AR への入射開始

PF/AR への秋期入射運転は大きなトラブルがなく順調に入射を続けられた。

運転統計

秋期の入射器運転は 2,917 時間であった。このうち、PF への入射時間は 23 時間 30 分、PF-AR への入射時間は 40 時間 37 分であった。この間の入射器故障は 54 時間（運転時間の 1.8%）、故障による入射遅延時間は PF 入射で合計 1 時間 22 分（入射時間の 5.8%）、AR 入射で合計 9 分（同 0.4%）であった。前回は報告したが、PF 入射に関する担当者間の打合せを昨年から続け、入射改善に取り組んできた。その結果、昨年度の同時期（一昨年の秋）に比べて、PF 入射時間は 49 時間から 23.5 時間に、PF-AR 入射時間は 72.5 時間から 40.6 時間に短縮される成果があった。低速陽電子実験用テストリニアックの運転も順調に行なわれ



ている。

昨秋は日本列島をいくつもの大きな災害が襲った。大型台風（22号（10/9）、23号（10/20））による被害が心配されたが、入射器トンネル等への漏水があっただけで、今年度実施した排水改善工事の効果で水溜まりが大幅に減少した。また、中越地震（10/23）ではインターロックでクライストロンが7台トリップしただけで被害はなかった。11月の定期保守時、陽電子収束用直流ソレノイドコイルの冷却水の漏水（1秒に1滴程度）を発見、排水の応急処置を施した。年末の止水作業で完全に止めることはできなかったが、年始のチェックでも特に悪化の兆候はない。夏期の運転停止時に再修理の予定である。年始の入射器立上げ時、真空ゲージ破損があり真空リークした。しかし、ゲートバルブが高速に遮断し、真空ポンプが停止するような真空悪化は#5-3～#5-6の4ユニットに留まった。ゲージ交換、真空立上げにより、翌日午後運転を再開した。

4リング同時入射の検討

昨年1月から試行されたKEKBの連続入射モードの成功により、KEKBのルミノシティが飛躍的に向上し、10月10日、300fb⁻¹を達成した。現在、340fb⁻¹を越えてライバルであるPEP-IIに100fb⁻¹近い大きな差をつけている。一方で、PF/PF-ARとKEKB間の入射ビーム切換え時間が長いことにより、KEKB連続入射がPF、PF-ARへの入射への支障になったり、逆に、KEKBの運転への支障になる弊害が生じている。また、すでにSPing-8では放射光リングでの連続入射を実現しており、PFの連続入射やPF-ARの入射改善が強く望まれている。この問題を解決するためには、入射ビーム切り換えの高速化をはかることが必要である。昨年5月末、関係する6研究系（放射光科学第1、第2、物理第1、放射光源、加速器第2、第3）の主幹が相談し入射に関する検討会議を開始することを申し合わせ、早速5月下旬から、PF、KEKB、入射器の加速器関係者が集まり作業を始めた。昨年未までに、ビームスタディやビームスイッチヤードの検討が進み、H17年度中に入射路の改造を実施することを決断し、予算要求を行った。

現在予定している改造計画では、夏期シャットダウン中にビーム輸送路を改造し切換えを高速化する（Phase-I）。引き続き、H17年度中にPF入射ビームもKEKB同様入射器最上流のA1電子銃から出せるように改造する（Phase-II）。Phase-Iにより、PF⇔KEKB間の電子ビームの切り換え時間が現在の10分前後から4分程度になり、Phase-IIの完成により10秒程度まで大幅に短縮される。更にその後、高速な陽電子ビーム切り換え（Phase-III）が実現できれば、パルス毎にビームを分配する最終的な同時入射が可能になる。

Cバンドによるエネルギー増強

入射器では一昨年からの、現在用いているSバンド（2856MHz）の2倍の周波数であるCバンド（5712MHz）の高周波を用いた加速ユニットを開発し、電力を（大幅に）

PF 光源研究系の現状

放射光源研究系主幹 春日俊夫

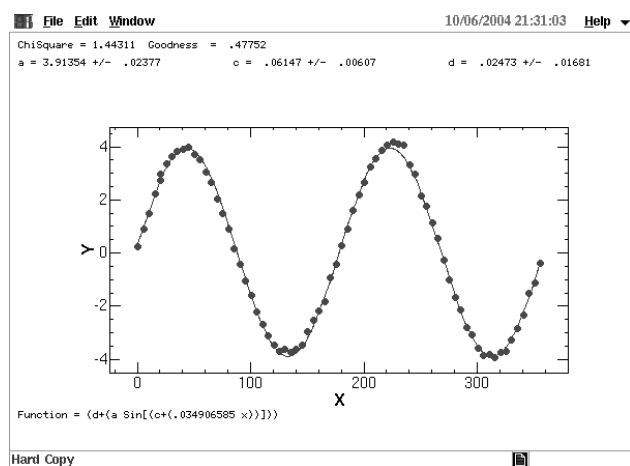
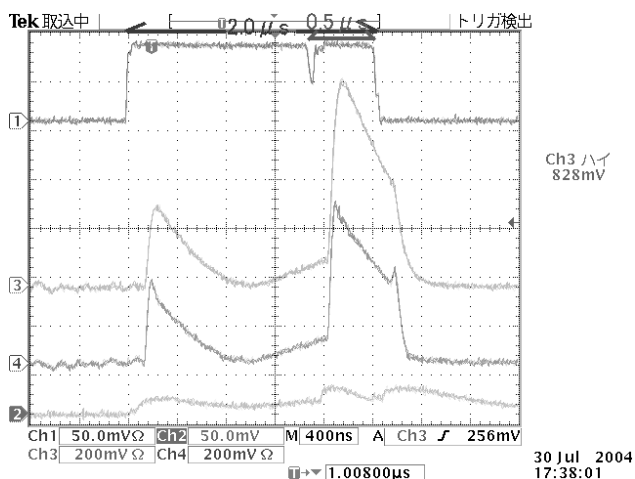


図 (上) パルス圧縮前後の高周波波形。上から順に、パルス圧縮器入力(パルス幅2マイクロ秒)、パルス圧縮器出力、加速管入力、加速管からの反射の各波形を示す。パルス後端の0.5マイクロ秒でピーク電力が増幅されていることがわかる。(下) 高周波の位相(横軸)を変えながら加速エネルギー(縦軸)を測定した結果を示す。加速電場長96.2cmの加速管で約42MV/mが得られた。

増やすことなく、単位長さ当りの加速エネルギーを2倍化する性能改善を行なっている。一昨年は高周波電源と1m加速管1本を開発したが、昨年は、大電力高周波パルス圧縮器 SKIP (Super KEKB injector rf pulse compressor) を開発し、夏期保守中に#4-4 Cバンド加速ユニットに組み込んだ。高周波パルス圧縮器は上図に示すように、2マイクロ秒の大電力高周波パルスを圧縮し、パルス後端0.5マイクロ秒の部分のピーク電力を増幅する装置である。昨年秋から年末にかけての試験で、この装置を使って、ほぼ目標(約42 MV/m)の加速利得が得られることを実証した。

新年の抱負

2005年は入射切換え速度の改善、Cバンド加速ユニット(1クライストロン+パルス増幅器+4本の1m加速管)の完成によるエネルギー2倍化の実証、結晶標的の実用化による陽電子電流改善などの課題に取り組む予定である。

PF

今年度後期の運転は概ね順調に推移している。10月26日から11月1日朝まで単バンチ運転を行い、12月14日から20日朝までは3 GeV 運転を行い、同日より冬季の休止期間に入った。1月17日より運転を再開し、20日よりユーザーランを開始し、今年度は2月28日に運転を終了して直線部増強の作業に入る予定である。直線部増強作業の状況については別項(p7)を参照のこと。

前号で報告したように、入射率は大きく改善されたが、通常の運転時に入射率の低下が頻発した。PFのRF位相と入射器から送られてくるタイミング信号との間でRF位相にして数10度から約100度のずれが生じることが原因であった。これはタイミングモジュールの不調によるものであり、今期2月末までの運転は、位相調整により対処する予定である。なお、同じ原因により単バンチ運転時に純度が悪化するという現象が起こった。

現在入射用線形加速器はPF、PF-AR、KEKBの電子・陽電子両リングの計四台の電子系蓄積リングに入射を行っている。KEKBが連続入射を行っているため、PFあるいはPF-ARのマシスタディ時に問題が生じてきた。PFあるいはPF-ARが通常ユーザーランの場合は定時入射が行われるためさしたる問題は生じないが、概ね月曜日に行われるPF、PF-ARのマシスタディ時には、頻繁入射あるいは不定期入射が必要となることがある。この場合KEKBとの入射時刻の調整が必要となる。従来はマシスタディの担当者としてKEKBの担当者間の調整に委ねられてきたが、調整が困難となる場面が生じてきた。この問題を解決するためにPF光源系とKEKBの加速器グループの代表者がマシスタディの内容を検討し、前もって入射頻度等の調整を行うこととした。

上記の問題を根本的に解決するために4リング同時入射の可能性を検討している。すなわち、入射用線形加速器は50Hzで運転を行うことが可能である。この各々のパルス毎に4リングの要請に応じ、電子・陽電子の切り替え及びエネルギーの切り替えを行い、かつ必要に応じてパルス電磁石等で行き先を切り替えることができれば、実質的に4リングに同時に入射することができる。これらのことは、原理的には可能であるので、実現性の検討が行われた。第一段階では、電子ビームのエネルギー及び行き先の切り替えを短時間で切り替え可能なようにする。この改良後には、PFに約20分おきにビームを入射することができるようになる。20分間でのビームロス率は0.4%程度なので、この頻度で入射を行えば蓄積電流をほぼ一定に保つことができる(詳しくはp8「PF頻繁入射」の項参照)。

PF-AR

PF-AR の運転状況は前号に引き続き幾つかのトラブルを報告しなければならない。10月27日の18時からの入射後東直線部の第二空洞 HOM ダンパー（加速空洞内にビームによって誘起されるビーム不安定現象を引き起こす可能性のある高次－higher order mode－の電磁場を吸収する装置）のケーブルの焼損が起こった。昨年春の真空リーク事故（Vol.21No.1 参照）と似た事例なので肝を冷やした。11月4日には全電磁石電源のインターロックが動作しビームを落とした。これは、インターロックを司る回路の電源の故障が原因であった。さらに、秋期の台風や長雨の影響でケーブルピットの水没や、建物の漏水が多発した。直接ビームダンプに繋がることはなかったが、このための調査や設備関係の点検のため、運転スケジュールに影響が出た。

12月に入って入射中や加速中にビームロスを起こすことが頻発した。不安定現象対策用のフィードバック装置のゲイン調整、八極電磁石、加速電圧を微調して何とか凌いだ。12月20日の運転停止後の調査によると同フィードバック装置のビーム不安定運動を修正するための装置に電力を供給するケーブルの焼損によるものであることが判明した。ダメージはフィードスルーにまで及んでおり、真空事故を起こさなかったことは不幸中の幸いであった。このように、PF-AR は細かいトラブルが多発している。信頼性の低そうな装置の洗い出しを行い先手を打って対策を行う必要がある。

冬季の運転停止時に、真空路を大気開放しての作業が幾つか行われた。東直線部の第4空洞のカップラー交換、同第3空洞の HOM ダンパーのフィードスルー交換、前記フィードバック装置のフィードスルー交換、北棟近辺の真空系チェックのためである。このように多くの場所で真空路を大気開放したため、1月19日の運転再開後はビームによる焼きだし時間を十分にとる必要があり、ユーザーランは24日朝から開始する予定である。PF-AR の今年度の運転は3月14日朝に終了する。

PF の項で先ほど“4リング”同時入射について述べた。残念ながら PF-AR は 6.5 GeV 電子輸送路建設の困難さ等から、現時点では検討から取り残された恰好となっている。現実的な解決法の検討を開始した。

放射光科学第一・第二研究系の現状

放射光科学第二研究系主幹 河田 洋

運転・共同利用実験

平成16年度第二期（9～12月）のユーザー運転は、PF 2.5 GeV リングは9月28日～12月20日の運転を予定通り終了し、1月17日から2月28日の第三期運転を行って

います。一方、PF-AR は夏の停止時に NW14 ビームラインの挿入光源を導入するための RF キャビティー移設作業及びその立ち上げ作業が行われましたが、その際の真空系大気開放の結果、10月22日から予定していたユーザー運転は、真空の焼き出しが十分ではないためビーム焼きだし運転を兼ねたボーナス運転扱いとし、正式なユーザー運転開始は10月25日となりました。また、運転開始当初、ライフタイムも依然十分ではなく、残念ながら1日3回・定時入射で運転せざるを得ませんでした。冬季の停止時にも、必要な幾つかの真空作業が行われましたので（光源系現状報告参照）、1月以降も当初1日3回入射となっていました。2月より1日2回入射となりました。また、PF 2.5 GeV リングに関しましては、かねてからお知らせしております様に、PF 直線部増強計画のリング内改造作業のため、2月28日から9月中旬まで長期運転停止といたします。どうぞご理解下さい。

前号で一部報告しましたように、この秋の運転で、高分解能角度分解光電子分光実験を念頭に置いたアンジュレータービームライン：BL-28 の光学系の立ち上げが行われ、その結果、分解能：3 meV@60 eV、フラックス： 10^{12} 光子/秒、試料上での集光サイズ： $0.15 \times 0.05 \text{ mm}^2$ のビームラインの性能が秋のマシントimeで確認できました。この性能は第3世代の放射光源で得られている性能にほぼ匹敵し、PF 直線部増強によるビームラインのグレードアップがこの分野に非常に有用である事を示しています。現在、高分解能光電子分光装置の立ち上げが東京大学大学院・藤森教授の協力のもとに急ピッチで進められており、2月末までに特色ある実験成果を上げるべく関係者一丸となって努力しておりますので、皆様、ご期待頂くとともに、今後の発展に関してご協力下さい。一方、BL-14 は直線部増強に伴う基幹部改造に適合させるとともにブランチ間の放射光の取り合い変更を目的に改造しました。秋のマシントimeで各ビームラインとも順調に立ち上がり、光導入初頭に確認された BL-14C での縦幅増大は、利用研究として現実に分離型 X 線干渉系を用いて 40 mm の X 線位相イメージング用の視野を確保することに成功しております。今後、分離型干渉計の更なる大型化を図ることで視野の増大が期待され、本格的な利用研究が行われることが期待されます。

1月7日に、佐賀県鳥栖市で開催されました第19回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウムで PF 懇談会拡大運営委員会が行われ、松下副所長がこの1年のビームライン整備状況、今後の PF 直線部増強整備・運転予定、そして将来計画の検討状況を報告し、ユーザーの方々の意見を聞く機会がありました。PF 直線部増強計画は PF 2.5 GeV リングを第3世代放射光光源に準ずる光源に改造し、VUV から X 線に至るまでの高度化した研究を展開する計画ですので、ユーザーの皆さんの多くの協力をお願いする次第です。一方、将来計画に関しても多くの質問・コメントをいただきました。本 PF ニュースにその進展状況を示しておりますので、詳細はそちら（次頁）をご覧ください。PF 直線部増強計画、将来計画に関しまして、3月17、

18日のPFシンポジウムでユーザーの皆様とより深く意見の交換を図りたいと思っております。どうぞ奮ってPFシンポジウムへ参加頂き、活発な意見交換が出来ればと思っております。

1月18日、19日にPF-PACが開催されました。今回は、PFの半年間の停止が予定されていることから、S2型課題を含めて90件の申請に留まりました。その中で、85件が条件付を含めて採択となり、5件が不採択となっております。詳細は小林克己氏の報告を参照下さい（p39）。又、PACの中の研究計画検討部会で、2件のビームライン建設提案（BL-17とNW10）、およびビームラインアクティビティの移設（BL-17→BL-18B）、NW10建設に伴うBL-10B閉鎖の提案が正式に承認されました。

ビームライン整備の詳細

直線部増強計画で新たに生成される短直線部にミニポールアンジュレーターを挿入し、10 μ mオーダーの微小蛋白結晶の構造解析、および低エネルギーX線を利用した蛋白質構造解析を目的とした構造生物学ビームラインが若槻教授の獲得した先端計測の予算を用いてBL-17に建設されることとなり、その設計、及び一部の発注作業が五十嵐助手を中心にして急ピッチで行われています。それに伴い、現在協定研究のもとにベンディング・ビームラインであるBL-17A、Cで展開されている富士通研究所のアクティビティはBL-18Bへ移設することを同時進行で進められています。2月末のPFリングの停止時から9月の運転再開までの間に、現在のBL-17ビームラインの撤去、BL-18Bへの移転、そして、BL-17ミニポールアンジュレータービームラインの設置作業を終え、秋のマシントimeからそれぞれのビームラインへの光導入を予定しております。一方、そのほかの直線部増強によって整備すべきビームラインに関して平成18年度の概算要求をしていくと同時に、たとえ概算要求が認められなくとも、競争的資金、及び内部資金の両方でBL-16ビームラインの更新計画（VUV・SX可変偏光ビームラインへの変更と既存マルチポールウイグラービームラインで展開している構造物性ビームラインのミニポールアンジュレータービームラインへの移設）を次の目標として検討が進められています。

一方、PF-ARでは腰原ERATO非平衡ダイナミクスプロジェクトの単バンチを利用したサブナノ秒時間分解X線回折実験が、既存のNW2ビームラインを用いて実験装置回りの開発が軌道に乗りつつあります。そして本格実験を予定しているNW14ビームラインも順調に建設が進行し、この冬の停止時に光学ハッチが完成し、いよいよ分光器等の設置作業が行われる状況となり、今年秋の光導入に向けて直実に整備が進められています。また、前々号にNW10ビームラインの整備（朝倉清高・北海道大学触媒化学研究センター・教授が獲得した「新規金属硫化物脱硫触媒の機能と構造解明」の基盤研究S・科研費をその予算の一部として）をする事を報告していました。昨年末に開かれたPF研究会「硬X線を用いたダイナミック構造解析の可能

性」の議論を踏まえて、「高エネルギーXAFS・AXSビームライン」として、8~42 keVのエネルギー領域をカバーする2次元ミラー集光ビームラインでXAFSとAXSのアクティビティを展開すると同時に、高速掃引XAFSの機能を有するビームラインとしてその概念設計が急ピッチで進められています。2006年4月に共用開始する予定です。

PF 将来計画検討の状況

放射光科学第二研究系 河田 洋

はじめに

過去の将来計画検討の歴史を紐解くことは必ずしも本意ではありませんが、PFの将来計画検討に関しまして若干迷走の感を持っておられるユーザーの方もおられると思いますので、この2年間の将来計画検討の経緯をはじめに紹介致します。2年前の2002年度にPF将来計画を検討するに当たり、基本的な将来構想として、「**普遍的な放射光利用ツールとしての側面と短パルス光、空間的コヒーレンス光そしてナノビーム利用という先端的放射光光源の両立**」を掲げて、具体的なハードウェアの形態としてERLの検討をおこない、其の検討結果を検討報告書としてまとめました。その検討は、VSX高輝度光源計画は別に実現されるものという境界条件のもとで行なっておりました。しかし、2003年に小間所長を新しい物質構造科学研究所所長としてむかえ、大学法人化等の状況変化があり、「一大学法人で全国大学共同利用をベースとしたVSX高輝度光源計画の実現は困難なのではないか」との観測のもと、大学共同利用機関法人となる予定であるKEK-PFがVSX高輝度光源計画を受け入れる場合を想定した上でのハードウェアの検討が急遽行なわれ、2.7~2.8 GeVリング構想が検討されました。しかし、当初期待していた補正予算が、2003年には実施されないこととなり、この将来構想の早期スタートはむずかしい状況となりました。一方、KEKでは現在1500億円規模のJ-PARCのプロジェクトを進めており、この将来構想をこの数年のうちにKEKの概算要求により実現する可能性は極めて低いこと、また、PF直線部増強計画のリング改造の目的が立ち、直線部のビームライン整備（VUV・SX専用アンジュレータービームライン化）を進めることによってV・SXのアクティビティの活発な活動を維持するための当面の打開策が現在計画として進めることが出来得るとの認識から、J-PARCの建設完了後に予算要求を行い、完成を10年後と想定した時の放射光光源の将来計画の立案が2004年度から所内で開始されました。この一年間をかけて所内スタッフの間での意見交換を進め、2年前に設定された「**普遍的な放射光利用ツールとしての高輝度光源の側面と、短パルス光、空間的コヒーレンス光そしてナノビーム利用という先端的放射光光源の両立**」をPF将来構想の基本目標とする事で

ほぼ意見の集約を見るに至りました。一方、それを実現するハードウェアとして、2年前に検討した ERL は勿論上げられます。しかし、技術的な検討に関して高輝度・高出力電子銃の開発、又 VUV から X線までのアクティブイターを担うという観点からの最適化等々の技術的な検討が必要です。それとは別にもう一つスーパー・ストレージ・リングという概念の可能性が新たに浮上してきております。これは第3世代リングをベースに短パルス光、空間的コヒーレント X線を取り出すオプションを備えたハードウェアです。しかし、これに関しましても、そのコヒーレント X線発生に関しての技術的検討が必要です。今後の予定は、2005 年度をかけて、それぞれのハードウェアの検討を進め、2006 年度にそれらの選択を行ない、次期の中期目標に将来計画を確実に実現する計画書を 2007 年度末に作成するスケジュールを現在考えております。以下、其の検討の現状をお知らせ致しますので、今後の将来計画検討・作成そして推進にぜひご協力下さい。

現在状況の把握

現在、PF 2.5 GeV リングと PF-AR 6.5 GeV リングを放射光光源とする実験施設では、約 700 件の研究課題が展開され、共同利用者数は年間約 2700 人に達しています。第3世代 X線放射光源である SPring-8 が稼動をはじめた7年前からもこれらの数には減少傾向は見られていません。このことは SPring-8 が稼動した現在においても競争力を失っていないことを示しています。その理由は、以下の様に分析しています。幾つかの新しい方法論、新しい測定装置研究におきましては光の先端性を必要としますが、放射光利用の大部分では、すでに確立した手法（ツール）を用いて対象となる試料そのものに先端性がある研究テーマであり、必ずしも放射光源の性能の先端性のみが研究の成否を決定するものではない事があげられます。従って、そのような研究テーマが現在盛んに PF 及び PF-AR で展開されています。そして、現在 PF において進められている PF 2.5 GeV リングの直線部増強計画は、PF リングに設置する挿入光源を性能、数共に増強し、VUV・SX から X線に至るまでの放射光において、第3世代放射光光源にほぼ匹敵する光源を実現することが出来、種々の物質科学研究に対し、今後 10 年間程度に亘って競争力のある実験環境を提供し続けるための改造計画と位置付けられます。

将来展望

それでは 10 年後から稼動し始め、その後少なくとも 20 年程度稼動し続ける PF の将来計画放射光光源ではどのような研究が行われる事が予想されるのでしょうか？ 先ず大前提として、放射光科学は物質科学、生命科学、医学等々の広範な研究領域をカバーしており、そのスペクトル領域は VUV, SX, X線に至る領域をカバーすると同時に、実験ステーションも現状程度を必要とされます。すなわち普遍的な研究ツールとしての役割は必ず満たすものが必要である。しかしそれだけでは十分ではなく、更なる先端性と

して以下のキーワードも必要になると予想されます。

- 1) 試料は益々微小化（マイクロメートルから数 10 ナノメートル） → **更なる高輝度化**
- 2) より詳細な電子状態解明
→ **更なる高輝度化**
- 3) 結晶ではない試料の構造決定
→ **コヒーレント X線が不可欠
(両方向のエミッタンス ~10 pmrad)**
- 4) 非平衡状態の解明（高速現象の解明とその応用）
→ **短時間パルス放射光が不可欠
(サブピコ秒以下)**

具体的な研究テーマとして

- 1) に関しては、一例としてナノ磁性体の根本的な理解のためのナノスケール局所的なスピン構造の解明や、巨大磁気抵抗物質、高温超伝導体で間接的に観測されている、ミクロ相分離やストライプ構造の直接的な電荷、スピン、軌道に関する測定。微小結晶、試料での状態分析が可能となり、極端条件化（高圧、磁場、電場、光子場等）の物質科学研究の発展。
 - 2) に関しては、一例として、光電子分光法によってより詳細な励起状態の解明、金属・絶縁体転移等の解明、X線非弾性散乱による蛋白質のフォノンモード測定から、その機能の解明、光電子分光法では困難な高圧下、もしくは高磁場下等の極端条件化での物質の電子状態解明。
 - 3) に関しては、その究極は結晶成長が困難な蛋白質の構造をコヒーレント X線を用いて解明、同様に、結晶成長が困難なカーボンナノチューブ内の吸着分子・原子の構造解明という、通常の第3世代放射光光源では全く展開できなかった研究の展開。
 - 4) に関しては、次世代の高速通信技術を切り開く可能性を秘めている高速光誘起相転移現象の解明、蛋白質の光反応の構造、電子状態の解明という、新しい研究分野の創生。
- 等々が上げられます。

どのようなハードウェアが考えられるか

このような条件を満たす新しい放射光光源として以下の二つの可能性が考えられます。一つは線形加速器をベースにした ERL であり、他方はエミッタンスが 1 nmrad で、エネルギー 3 GeV クラスの第3世代放射光光源をベースにし、その長直線部に特別の電磁石とソレノイド磁場を導入することで局所的に水平・垂直方向のエミッタンスを結合し、両方向のエミッタンスを ~10 pmrad の値を実現しコヒーレント X線を発生すること、また特殊キャビティー、もしくはレーザーライジング技術を導入して短パルス光を実現するように設計したリング（仮に現在スーパー・ストレージ・リングと呼んでいる）が考えられます。それぞ

	第3世代放射光光源	スーパー・ストレージ・リング	ERL	FEL
普遍的な研究ツール	◎ (最大電流は～500 mA)	◎ (最大電流は～500 mA)	○ (最大電流値は～100 mA)	× (多くの実験を同時に行う事は困難)
高輝度性(ナノビーム)	△	○	○	◎
空間コヒーレント特性	× 0.1%	○ 15~20%	○ 15~20%	◎ 100%
短パルス特性	×	○ 100 フェムト秒～サブピコ秒	○ 100 フェムト秒～サブピコ秒	◎ ～100 フェムト秒
開発要素の有無	無し	有り コヒーレントX線発生技術及び短パルス光発生技術	有り 高輝度・高電流電子源及び超伝導キャビティー技術	有り 高輝度・高電流電子源及び試料の強電界場による損傷

れのマシンおよび一般の第3世代放射光光源そしてFELにおける大前提となる汎用性、及び前頁のキーワードの実現性を表にすると上記の様になります。

表に示すように大前提である普遍的研究ツールに関してFELは困難であり、現在KEKでは次期計画としてスーパー・ストレージ・リングおよびERLの可能性の検討を開始しつつあります。ERLに関しては2年前にそのハードウェアの検討がなされていますが、依然その実現には多くの技術的問題を解決する必要があります。また、前者の第3世代放射光リングをベースにコヒーレントX線を発生させるアイデア、短パルス光を取り出すアイデアは最近浮上したものであり、現在精力的にその問題点の整理が行われつつあるところです。

利用研究の検討

利用研究に関しては、PF将来計画の基本構想が2年前に検討を行なったERLを念頭においた基本構想と殆ど違いが無く、先端的特色からのアプローチの検討に関しては2年前の検討報告書に更のこの2年間の進展を追加すること考えています。一方、研究分野からのアプローチの検討に関しては、2年前の検討報告書では唯一構造生物学を取上げていましたが、現在、各研究分野の将来構想、そして実験手法からのアプローチの将来展望の検討を所内スタッフ中心に始めています。その幾つかの内容は3月17,18日に予定しているPFシンポジウムの将来計画のセッションで報告しますので、ユーザーの方々も多数参加頂き、活発な議論をお願い致します。

PF リング直線部増強計画の改造日程

放射光源研究系 本田 融

PF 2.5 GeV リングの直線部増強のためのリング改造本番がいよいよ迫ってきました。前号のPFニュースでお伝えしたとおり、2月28日朝9時をもってユーザー運転を終えて約6か月間で改造作業を行います。再立ち上げ開始は9月20日、そしてユーザー運転再開は10月12日が予定されています。

PFリングの四極電磁石や偏向電磁石はすべて上下に2分割できるように製作されています。運転停止後すぐにBL-13からBL-18までと、BL-27からBL-4の範囲にある電磁石をすべて分割してビームダクトを撤去することから改造作業が始まります。今回の改造では偏向電磁石と既存の挿入光源は一切その位置を変えません、リングトンネル北側にある搬入口を使って四極電磁石の運搬を能率よく行うためにMPW#28は一時的にリングから切り離して退避させることになっています。

真空ダクトの撤去が終了したら、次に該当部分の四極電磁石を架台ごと撤去します。今回撤去する四極電磁石はほとんどが1982年にPFリングが初めて放射光を発生したときからずっと使い続けてきたものです。撤去される四極電磁石のボア径が110 mmであるのに対して、新しい四極電磁石のボア径は70 mmと大幅に小さくなります。ちなみに1997年の高輝度化改造時に設置したノーマルセル部の四極電磁石のボア径は80 mmです。ボア径を小さくすることで今までよりも大幅に全長の短い電磁石でより強い収束力が出るように設計されています。四極電磁石の撤去後、リングトンネルの床面にベースプレートを設置し直し、その上に新しい四極電磁石を固定していきます。直線部には原則として四極電磁石がダブレットで配置されています。2台の四極電磁石を同一の架台上に載せてアライメントを済ませた状態でリング内に運び込んで設置していきます。

電磁石をすべて設置しリング全体のアライメントを行った後、またすべての電磁石を上下に分割した状態でビーム

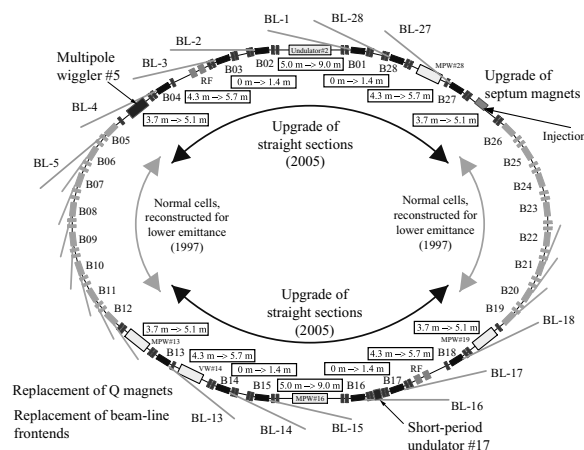


図1 PF リング直線部増強計画の改造範囲

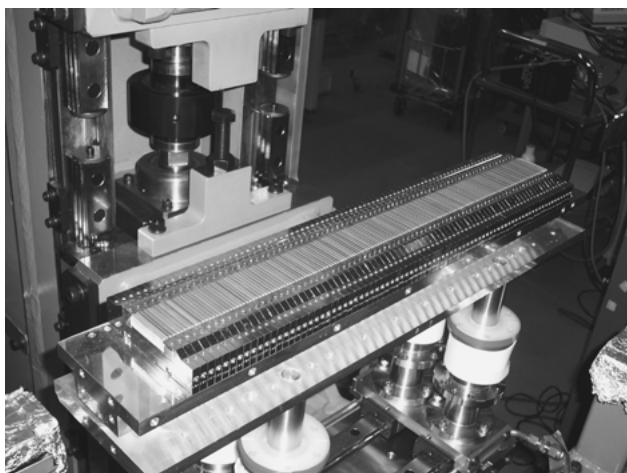


図2 周期長 12mm の短周期アンジュレータの下側磁石列

ダクトの設置が行われます。長尺のビームダクトの運び込みは6月上旬には完了し、6月中にはリング全体の真空がつながることを目標として工程を組んでいます。

今回の改造では四極電磁石電源についても1982年の営業開始以来使い続けてきたものをすべて更新することになりました。全部で15台の電源が電源棟に新たに設置されます。7月から8月にかけてはリング内の作業に加えて、電磁石電源の立ち上げ調整や電磁石制御系の更新、通電テストが予定されています。

またBL-17の光源としてあらたにできる短直線部に短周期アンジュレータの第一号機が設置されます。現在周期長12mmと16mmの2種類の磁石列について設計、製作と最小4.5mmのギャップに対応した磁場測定、調整方法の確立を目指した試験を行っています。BL-17にはこのうち16mmの磁石列を用いたアンジュレータが設置されることになっています。

9月20日の立ち上げ開始後約3週の調整、真空焼き出し運転を予定しています。順調に立ち上がればこの期間に100Ahから200Ahの積分電流値を稼ぐことができ、結果として10月12日のユーザー運転開始時はビーム寿命が100Aminから200Amin程度に回復していると推定されます。1997年の高輝度化後は約半年の運転期間で500Amin程度すなわち、400mAで1200min(20h)まで寿命が延びています。今回の改造は8年前の改造よりも多くのダクトが更新され、またボア径の大幅な減少によってビームダクトに細い部分が増えるので寿命回復には不利な要素もありますが、高周波加速の変調によって寿命を延ばす方式も確立されているので、高輝度化改造後と同程度の寿命回復ができると期待しています。

PF 頻繁入射

放射光源研究系 三橋利行

2004年の1月より、KEKBは連続入射モード(KEKBは高エネルギー物理学用の電子、陽電子衝突型加速器であるので、放射光ビームラインはなく、シャッターを開けたまま入射するTop-up入射ではなく連続入射と称している)で運転を始めた。この際、PFおよびPF-ARにおける運転の入射は通常、定時であることもあり、KEKBの連続入射と問題なく並立していたが、通常の運転以外のマシンスタディーにおいて、特に連続入射が必要なスタディーとKEKBの連続入射運転とが並立できなくなってしまう。KEKBにおいてはSLACのBファクトリーと熾烈な国際競争のもとで実験がなされており、PFおよびPF-ARのマシンスタディーで連続入射を長時間妨げられるとルミノシティの減少を招きかねない。さりとて一方でPFおよびPF-ARにおける加速器関連の研究開発も、そのアクティビティを落とすわけにはいかないというジレンマに立ち至ってしまった。この事態を受け、物構研、素核研および加速器研究施設の6主幹により話し合いが持たれ、線形加速器よりビームの供給を受ける4台のリング(PF, PF-AR, KEKB-LER, KEKB-HER)への同時入射(ここで言うところの同時入射は線形加速器のビームの1パルスと同時に4つに分けるのではなく、PF入射モード、PF-AR入射モード、KEKB入射モードをいちいち切り替えることなくビームパルス毎に振り分けて入射を行おうという意味である)を線形加速器アップグレードプロジェクトの一環として推進することが合意された。これを受けて、線形加速器アップグレードプロジェクトミーティング(IUC)において2004年5月より具体的な検討が始められた。このようにもともとはPF、PF-ARのマシンスタディーとKEKBの連続入射運転とを円滑に並立するために始まった同時入射プロジェクトであるが、このプロジェクトが実現すると、PFにほぼいつでも入射することができるようになる

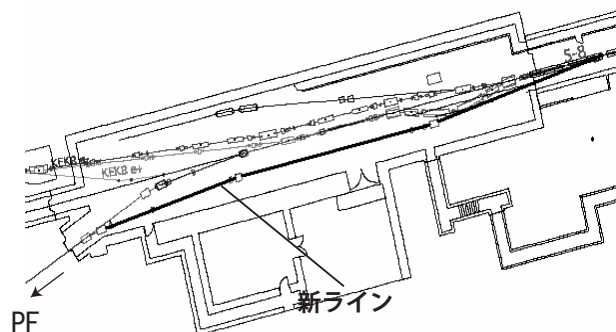


図1 第3スイッチヤードに建設されるPF用新ビームトランスポートライン。線形加速器の終端の5セクターにある5-8加速管を外してその部分にPFへビームを取り出すパルス偏向電磁石(2005年秋から2006年夏季停止前まではDC偏向電磁石が置かれる)が設置される。新ラインはPFBTトンネル入り口付近で現在のラインに合流する。

ので、マシンスタディー用の入射以外にもユーザー運転において Top-up 入射が可能になる。Top-up 入射による運転は、既にいくつかのファシリティにおいて開始され、大きな効果が上がっていることが報告されており、世界の各地で新たに建設中のファシリティにおいても Top-up 入射による運転が盛り込まれている。この時期に PF において Top-up 入射ができる環境が整うのはタイムリーであり、この 4 リング同時入射プロジェクトは単にマシンスタディーを円滑に行うという意味をはるかに超えて、ユーザー運転での Top-up 入射が可能となるという重要な意味を持っている。そこで、IUC における検討に PF における Top-up 入射が加えられ、また PF 側でも Top-up 入射をするための問題点の検討が始められた。そして、IUC における半年にわたる検討の結果、以下のように 3 段階のフェーズに分けて 3 リング (PF, LER, HER) 同時入射を実現することが決定された。

フェーズ 1 PF 用のビームトランスポートラインを線形加速器の最終端にある 5 セクターのエンドで新たに分岐し、KEKB のビームトランスポートラインを通らずに独立のものとする。図 1 に第 3 スイッチヤードにおける新たなビームトランスポートラインの配置の概略を示す。ビームトランスポートライン分岐用の電磁石はパルス電磁石に置き換えられ、線形加速器のビームパルスを PF ビームトランスポートラインに蹴り出すことが出来るようになる。また線形加速器の終端部の電子収束系の設計を PF と KEBK で共通にし、切り替え時間を短縮する。この段階では電子ビームは従来通り、PF, PF-AR 専用の電子銃を用いるので、電子銃の切り替えが残るが、このフェーズが完成すると KEBK の LER, HER の入射が終わるごとに (最短で約 20 分ごと) PF にビームを入射することが可能になる。

フェーズ 2 線形加速器で加速されるビームを KEBK 用の A1 電子銃から出し、パルス毎に RF の位相を振って、ビームのエネルギーを変更できる、マルチエネルギー運転が出来るようにする。これにより、パルス毎のマルチエネルギー高速スイッチングが可能となり、モードを切り替えることが不要となる。KEKB の陽電子入射モードを除く電子入射モードのときに PF への連続的な入射が可能となる。

フェーズ 3 陽電子生成用のターゲットを然るべき方法でバイパスして、電子、陽電子の同時加速を行う。これにより、陽電子加速時においても PF に電子ビームを連続して入射できるようになる。

この計画の実現へのタイムテーブルは、すでにフェーズ 1 までが具体的に決まり、2005 年夏に新 PF ビームトランスポートラインを第 3 スイッチヤードに建設することが決定された。必要となる電磁石は現在の PF トランスポートラインの電磁石の移設、およびトリスタン時代のトランスポートラインに設置されていたものを使用すること、ま

た、真空ダクト、モニターなどについては新たに製作することが決まり、すでに具体的な設計作業に入っている。秋以降の運転では新しく架け替えられたトランスポートラインによって運転される予定である。初段に設置されるパルス偏向電磁石については 2005 年夏には間に合わないので、2006 年夏の設置の計画で PF と加速器から合同設計チームが作られ設計作業が開始された。タイムテーブル通りに計画が進めば、2006 年秋より KEBK の LER, HER の入射が終わるごとに (最短で約 20 分ごと) PF リングにビームを入射することが可能になる。

これらの検討結果を受けつつ、PF リングサイドでも Top-up 入射をするための問題点の検討が平行して始まった。主な問題点と検討の様子は以下のものである。

1. 線形加速器からのビームのエネルギー分散はリングのエネルギーアクセプタンスより大きいのでこれをどうするか。

この問題に関しては新設するビームトランスポートラインにコリメーターを挿入することにより、ビームのエネルギー分散を制限することで対応することが出来るので、新たなビームトランスポートラインにコリメーターを追加することが決定された。

2. 入射用のキッカー電磁石によるパルスバンプにエラーがあると蓄積ビームをパルスの揺るが、これをどこまで小さく出来るか。またマルチバンチ運転時に、バンプ内にある 6 極電磁石による非線形なキックをどうするか。

バンプエラーに関する研究は、既に入射グループにより入射バンプ内に SR モニターを設置するなどして進められているものであるが、さらに Top-up 入射をにらんで 6 極電磁石の非線形なキックも含めて、バンプエラーを小さくする検討を進める。

3. PF リングには挿入光源用に狭いダクトが多数設置されているが、入射されたビームのエミッタンスに対してアパーチャーは十分にあるか。

線形加速器で測定された 2.5 GeV ビームのエミッタンスは 160 nmrad で、リング側で測定された 175 nmrad とよく一致している。このビームが入射されてリングを回るとして、現在設置されている全ての挿入光源の場所での入射ビームの大きさを検討した結果、真空ダクトの大きさとしては十分なアクセプタンスがあることが判明した。近々設置される予定のミニポールアンジュレーターの場合でもベータ関数が小さく絞られていることもあって、ダクトは入射ビームの 10σ よりも広いことが判明した。

4. 現在蓄積モードで、イオントラッピングに起因するビーム不安定を、8 極電磁石を励磁して抑えており、このまま入射するとビームをロスする恐れがある。

この問題については、8 極電磁石のかわりに横方向フィードバックシステムを構築して不安定性を押さえる必要がある。この 1 月のマシンスタディーにて SPring-8 の中村剛氏の協力を得てテストを行い、不安

定性が押さえられることを確認した。

5. 現在ビーム寿命を延ばすためにかけているフェーズモジュレーションにより同時に抑えられている縦方向の不安定性をどうするか。

この問題については3と同様に、縦方向フィードバックシステムを構築して不安定性を押さえる必要があるが、既に検討を始めている。

6. シャッターを開けたままで入射するのでインターロックの改造が必要である。

シャッターのみならず、線形加速器、KEKB との運転モード、Top-up のためのマシンスタディーとも絡むので、放射線科学センターを交えて打ち合わせが始まっている。

2005年1月からの運転において、Top-up のためのマシンスタディーが開始され、上に揚げた以外にもビームロスによる放射線の問題などについての検討が開始される。全てが順調に行けば、フェーズ1が完了する2006年秋からは、KEKB の LER, HER の入射が終わるごとに（最短で約20分ごと）PF 頻繁入射運転が可能になる。頻繁入射が出来るようになると寿命が短いのが気にならなくなる可能性があるため、現在寿命を引き伸ばすためにかけているフェーズモジュレーションをどうするかが問題ではあるが、仮にフェーズモジュレーションをかけっぱなしで運転すると、450 mA での寿命は63時間程度であるので、ビームは20分間で約1.7 mA 程度減衰する。これを20分毎の頻繁入射で補うと、リング電流の変動は0.4%に抑えられる。2分間ぐらいで、この1.7 mA を入射するので、5 Hz 程度で入射したとすると、入射のスピードは約15 $\mu\text{A}/\text{sec}$ 程度である。従って、入射中は放射光の強度が、約 $3 \times 10^5/\text{sec}$ の割合で増加する。フェーズモジュレーションがないと寿命は約半分程度となるのでリング電流の変動は0.8%程度に悪化すると思われるが、その代わりに、ビームサイズが小さくなるので、光源点でのリングのオペティクスパラメータにもよるが、放射光の輝度が2倍程度は増加することが期待される。蛇足ではあるが、エミッタンスを小さくして、ビーム輝度を2倍大きくしようとする、エミッタンスを4倍小さくする必要があるため、これを思うとフェーズモジュレーションをかけないでTop-up 運転する意味は大きいかもしれない。フェーズモジュレーションは積極的にビームをゆすっているため、電子ビーム位置モニターの測定にバラつきを導入している。このことは、ビーム位置安定化のためのフィードバックに積極的な外乱を入れているようなもので、結果としてフィードバックシステムのスピードを制限する最大の原因になっている。光源系としては頻繁入射が実現した後は、出来るだけフェーズモジュレーションを切って運転をしたいと考えている。

ところで、このシナリオにはPF-AR について何も含まれていない。当初4リング同時入射ということで、PF-AR についても可能性が検討されたが、現在のままではPF-AR のビームトランスポートラインをKEKB のビームトランスポートラインから分離独立させることが容易でない。ま

た、フルエネルギー入射も現在の配置では不可能なので、当面は4リング同時入射から3リング同時入射へ変更された。PF-AR については引き続きビームの高速スイッチングの可能性について検討が続けられている。

ビームライン BL-17 の建設について

構造生物学研究センター 五十嵐教之

現在放射光科学研究施設では、BL-17 に新しい構造生物学研究用ビームラインを建設するべく準備を進めている。BL-17 は直線部増強計画で新たに作られる短直線部の一つであり、ミニポール（ミニギャップ）アンジュレータを設置することができる。ミニポールアンジュレータは科学技術振興調整費で製作済みであり、直線部増強工事に合わせて設置する予定である。BL-17 ではミニポールアンジュレータから得られる高輝度放射光を利用して、超微小結晶（ミクロンサイズ）の構造解析研究と低エネルギーX線（6.5 keV 付近）を利用した構造解析研究の二つにターゲットを絞った実験を行なう。光学的な検討や光線追跡計算を基に、図に示すレイアウトを採用する。

リング壁直後にスリットを置き、0.1 mrad までビームを絞り、二結晶分光器で分光後、Rh コート K-B ミラーシステムで集光する。水平集光ミラーは集光率が6:1 と高いため、非対称集光ミラーベンダーを採用し、非球面を実現して収差を低減する。

建設は以下のメンバーを中心に行ない、2005年秋の光導入を目指す。その後ビームライン調整、コミッショニングを経て、2006年前半での共同利用開始を目標に作業を進めていく。建設期間中はご不便をお掛けしますが、ご協力のほどよろしくお願ひします。

責任者	五十嵐教之
監修	岩住俊明（河田洋主幹）
基幹部, 光源	前澤秀樹, 山本樹, 浅岡聖二, 宮内洋司
ビームライン	構造生物 G, 渡邊信久（北大理）, 平野馨一, 若林裕助, 小山篤, 岡本涉
実験装置	構造生物 G, 渡邊信久（北大理）

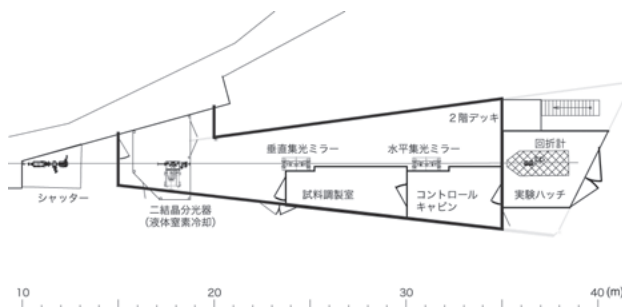


図 BL-17 ビームライン案