

# 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

4～6月のPF、PF-AR、KEKBへの入射日程は以下の通りであった。

4月	4日	PF入射開始
4月	11日	PF-AR入射開始
4月	26日	PF、PF-AR運転停止
5月	7日	PF入射開始
5月	8日	PF-AR入射開始
6月	28日	PF-AR運転停止
7月	1日	入射器、KEKB、PF運転停止

PF、PF-ARへの入射は1mA/s前後を維持し総じて好調であった。4月1日～6月16日までの故障による入射遅延はPFが約45分、PF-ARが1時間4分であった。7月1日、入射器は、昨年9月3日の運転開始後、年末年始の9日間の短い休止を挟んで、10ヶ月の連続運転を終えた。PF-ARには3 GeV入射を試験したが、入射器としては特に問題なく対応できた。

### 2001年度入射器運転統計

KEKBが実験を開始した1999年度からの入射器の運転統計を整理したので報告する。下表で故障時間は全ての装置の延べ故障時間で、落雷停電時など同時に複数の装置が故障した場合にも重複して積算した。「トリップ」とは保護回路が働いて装置が短時間の停止後復帰することをいう。頻繁に発生する場合は重故障につながる場合もあるので注意しなければならないが、多くは一時的なもので直ちに再起動させる。トリップの約4分の3を占めるのは加速管など負荷側の放電によってクライストロンに高周波が反射してきた場合に、クライストロンへの高周波入力を停止

して高速に次の高周波出力パルスを停止するもので、予めセットされた時間（標準10秒）と手順に従って、高周波電源内の計算機が自動的に運転を再開させる。トリップの残りの4分の1は大きな放電による真空悪化やクライストロンや高周波電源側の放電などが発生した場合、高周波電源の高圧を停止するもので、より重度の原因であるため、KEKB制御室のオペレータが手で再起動させる。調子が思わしくない場合には入射器側のオペレータや職員が現場に走る。

KEKB実験開始で年間の運転時間は5000時間台から7000時間以上に増加した。又、装置にかかる負担も、加速電界が2倍以上、高周波源の電力が4倍に増え、パラメータの頻繁な切り替えや、制御の複雑化など、大幅に増加した。その結果、装置の故障率はそれまでの1%以下から1999年のKEKB実験開始後は7%以上に悪化した。下表のように、年々故障時間が減少し、加速管等での放電も少なくなってきた。

### KEKB入射

KEKとSLACの積分ルミノシティはそれぞれ、90/fb対94/fb（7月1日現在、いずれも実験データを取った分）で殆ど差はなくなった。4月以降もKEKBの性能向上は著しく、5月27日ピークルミノシティ7.35/nb/s、運転終了間際の6月23日24時間当りの積分ルミノシティ0.41/fbなど、記録更新が続いている。

昨年度から準備中の陽電子の「2バンチ入射」は4月23日～5月16日、6月18日～25日まで合計約1か月試行を行った。現在まだ「試行」としているのには理由がある。KEKBリングには約60cmおきに最大5120個/リングの電子（陽電子）バンチを蓄積することができる。これを、リングにバケツが5120個あるというが、現在もっとも良い性能を発揮できるのは4バケツおきにバンチを蓄積する場合である。ところが「2バンチ入射」をすると、入射器（2856 MHz）とリング（508.887 MHz）の加速周波数の同期をとるために、49バケツ間隔で第1バンチと第2バンチの2個のバンチが同時に入射される。従って例えば、4バケツ毎に蓄積しようとして、次から入射タイミングを4バケツずつずらしていったら、11回入射を繰り返したとき

		1999年度			2000年度			2001年度		
		故障	トリップ	計	故障	トリップ	計	故障	トリップ	計
運転予定時間	x (時間)			7,297			7,203			7,239
運転達成時間	y (時間)			6,529			6,602			6,854
総故障時間	x-y (時間)	537	231	768	466	135	601	310	75	385
故障回数	z	1,888	70,011	71,899	2,401	39,380	41,781	1,304	21,420	22,724
平均故障間隔	x/z (時間)	3.865	0.104	0.101	3.000	0.183	0.172	5.551	0.338	0.319
平均故障時間	(x-y)/z (時間)	0.284	0.003	0.011	0.194	0.003	0.014	0.238	0.004	0.017

第1バンチと最初に入射した第2バンチとの間隔が5バケツとなり、5バケツ間隔が生じる。このちょっとした蓄積パターンの違いが、電子（陽電子）バンチがリング内に誘起する電磁波のスペクトルの違いとなって、蓄積ビームのふるまいに影響を及ぼすのである。「2バンチ入射」を1か月試行した結果、2バンチ足しあわせた電荷量はリング入口で0.9 nCを超え、蓄積率も平均2.5 mA/s、最大3.4 mAを記録するなど、従来の1バンチ入射に比べ文字通りの2倍化が実現し、かつ安定な入射を行うことができた。1日当たりや1週間当りの積分ルミノシティの記録も「2バンチ入射」時に得られた。しかし、ピークルミノシティの面では、まだ正則な4バケツに比べ同等か数%低い値にとどまっており、スタディの途中である。

「2バンチ入射」と同時に注目されるのは実験中も入射を続けて陽電子蓄積ビームの寿命を補う「連続入射モード」である。これは1月に試行されたが、検出器に問題が生じて調査と対策を行っているところである。対策も進んでいるので秋に再び試行されるであろう。

## 2002年夏期保守予定

夏期保守が例年より早く、7月1日から始まった。特に大きな工事はなく、高周波電源の清掃・点検、クライストロン及び高周波窓の交換、電子銃保守、陽電子集束用パルスコイルの交換、電磁石電源及び真空機器の保守、トリガーモジュールの交換、計算機の保守など保守作業が目一杯控えている。8月16日から運転を再開し、高周波電源の調整や加速管等のコンディショニングの後、ビーム調整を行い、9月2日からのKEKB運転再開に備える。PF入射は9月24日、PF-AR入射は9月26日からの予定である。尚、入射器の立上げと一般公開が重なったため、今年の入射器の公開は残念ながら実施できない。

## PF光源研究系の状況

放射光源研究系主幹 小林正典

### PFリング：春の運転状況

3月18日（月）9:00にPFのユーザー運転を停止し、運転中に不具合が生じていたBL-27でラージバルブの交換作業が行われた。

4月1日（月）9時から立ち上げ、立ち上げ調整に引き続いてマシンスタディを行った。4月3日（水）に予備的光軸確認として軌道の調整を行い、続いて5日（金）9時から各ビームラインで恒例的光軸確認を行って春のユーザー運転に入った。軌道が大きくずれていることは無かった。入射効率は改善が進み1mA/sを保つことができていた。4月15日（月）から3.0GeVユーザー運転に備えて放射線サーベイを行い、16日（火）9時から3.0GeVでの光軸確認を行って3.0GeVユーザー運転を開始した。この時期に3.0GeVを行うのは、外気温が低く冷却系に余裕

があり軌道安定化に支障が出ない季節を選んだことによる。しかしながら今年は季節の移りが2～3週間早く、4月16日には日論みに反して電力警報が発令される事態となった。電力警報が発令されると運転中の加速器を停止することがありうるが、幸いなことにPFリングの運転を停止することは避けられた。4月26日（金）9時に4月の運転を停止した。連休後の5月7日（火）朝から再び運転を開始した。短期停止ということで特に立ち上げ調整は行っていない。6月10日には単バンチ運転に向けて調整を行い、春の単バンチユーザー運転を6月11日（火）のボーナス運転時から開始した。入射回数はこれまでと同様、一日三回入射としている。6月18日には単バンチ運転からマルチバンチ運転へ切り替え、7月1日（月）9時まで運転を行って夏のシャットダウンに入った。この間マシン自体の故障ではないが6月14日の11:42に震度4の地震があり、ビームダンプした。地震直後にリング内や電源棟の見回りを行ったが被害も無く、12:26に再入射することができた。

4月から6月にかけて機器の不調が起こっている。BL-28挿入光源のインターロックが動作したが、運転中のためリング内に立ち入り現物チェックをすることができず、一時BL-28のみビームライン利用を中断することにした。不具合となったBL-28のリミットスイッチ交換を連休の停止中に行い、連休明けからは再び使用可能とした。BL-11ではチャンネルの制御に10数年使われているマイクロコントローラーが故障した。すでに新型を開発してあったので（BL-6を利用して）テストを行ったが、結果は良好と判断されて同形式の新型を量産することにした。RFのA2系窓冷却水ポンプが不調になり、交換して対応した。軌道補正用ワークステーションのハードディスクに故障が起こりCOD補正が一時できなくなり、交換して対応した。挿入光源のギャップ変更がユーザー側からできないという不調がBL-19、BL-2、BL-13で頻発した。実験ホールとリング制御室とを結ぶネットワーク不調も原因の可能性はある。

### PF-ARリング：春の運転状況

PF-ARはPFリングと同じく3月18日に運転を停止して保守を行った。4月11日（木）朝9時からリング内パトロールを行い10時から立ち上げて今年度の運転を開始し、当日深夜には40mAストレージすることができた。15日にはCODを調整して基準軌道を定め、4月26日（金）朝9:00まで運転を続けた。この間電磁石電源のトラブル、ダミーロードのトラブルなどが起こった。ビーム運転による放射光照射で真空度の改善が進み、終了間際のビーム寿命はおよそ700分となった。入射は40mAまで確実にこなすようになった。

5月の連休をPFリングと同じく停止し、5月9日（木）から運転を再開した。通常は6.5GeVのビームエネルギーで運転しているが、医学臨床応用5.0GeV運転のマシンスタディを進め、安定運転に必要な条件をつかんだ。それを受けて、6月20日（木）にはPF-AR高度化改造後初の医

学臨床応用が行われた。当初二人の患者さんが予定されていたが病院側の都合で一人だけとなった。高度化以前のPF-ARではビーム寿命が短く、医学臨床応用の途中で再入射ということがあるため、PF光源研究系ならびに加速器研究施設スタッフにはかなりの緊張があった。しかし、PF-AR高度化によってリング全体の性能改善が進み、安定した軌道で、40～30mA、十分なビーム寿命と云う条件を満たすことができるようになり、途中入射の可能性が小さくなって制御室スタッフは極端な緊張をしなくても済むようになった。医学臨床応用の結果説明会が運転終了後の7月2日午後に加速器スタッフとPFスタッフ向けに開かれた。ビーム電流がさらに高い50mA程度あることが望まれている。

図1に6月の典型的な運転の様子を示す。横軸は時間(一日分)で、縦軸はビーム電流である。一日当たり5～6回の入射となっている。改造前は一日あたり11～12回の入射となっていた。5月の連休以前の運転では、ダストトラップによると推定されている「予期せぬビーム寿命の減少」が頻発していたために、ビーム寿命が長くなってきたにもかかわらず途中入射を行わざるを得ないことが起こり、入射回数を5～6回に留めるといふわけにはいかなかった。しかし、運転を続けるに伴い徐々にこの「予期せぬビーム寿命の減少」が起こる頻度は減ってきている。次の入射直前のビーム電流は30mA以上あり、ビーム寿命もおおよそ1050分前後と延びている。したがってビーム電流 $I_b$ とビーム寿命 $\tau$ の積 $I_b \tau$ の値は35A·minとなっており、改造前の7A·minの5倍となった。この変化を図2に示す。ビーム電流で規格化した真空度は最近ではほぼ横ばいになっている。理由は、高度化改造で手を入れることができなかった高周波加速空洞部(2ヶ所)と古い挿入光源部の真空度が高いままのためである。

PF-ARは以上のように信頼性を含めた性能が高まっている。AR高度化プロジェクトは成功と云ってよい。

マシンスタディとして3.0GeV入射をテストした。これまでは2.5GeV入射としているが、ビーム電流が35mA近くまで増えたときにビーム不安定が起ってビームを失うことが多く、当面の目標である初期電流40mAにすることができないことが起こっていた。ビーム不安定を回避する方法として3.0GeV入射とすることを6月10日に試みた。3.0GeV入射とすることで最大65mAにまで入射できた。また、このビームを6.5GeVまで加速することが試みられた。しかしながら初めての高電流のためかなりのガス放出があり、真空度が悪化した。このためビーム寿命が短く、加速中にビーム電流は52mAに減ってしまった。秋の立ち上げ時のマシンスタディを利用して時間をまとめて確保し、高いビーム電流による真空焼きだしを進めれば、6.5GeVでのストレージ電流を40mA以上としたユーザー運転に道が開かれるものと期待している。現実問題として高電流ストレージとユーザー運転に立ちはだかる課題はPF-ARの冷却能力である。エネルギー交換用冷却塔の増設、リング内冷却水配管の増強などを進めないと60mAを長時

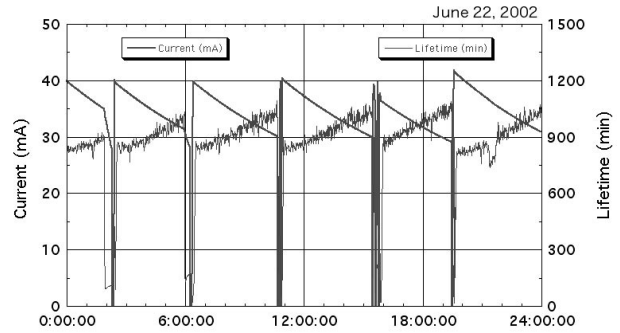


図1 ビーム電流およびビーム寿命

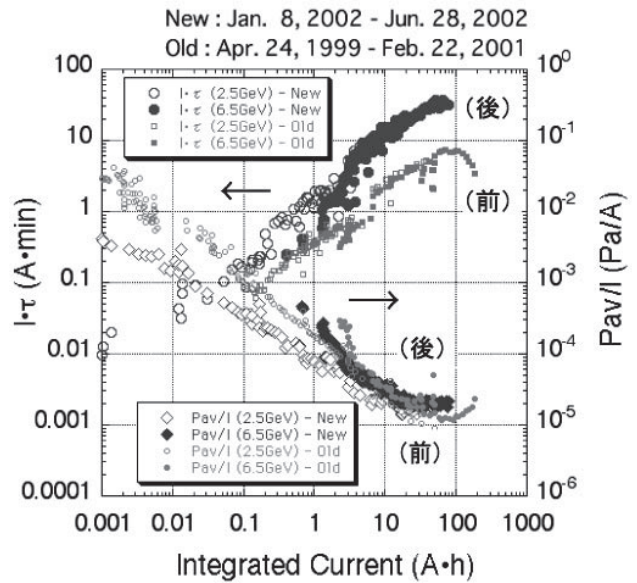


図2 ビーム寿命と真空の改善(濃い色は改造後、薄い色は改造前)

間安定にストレージすることは難しい。秋のマシンスタディ時に、3.0GeV入射、高電流ストレージに加え、4極電磁石の「位相を進める」調整によるエミッタンス改善を試みることにしている。

利用側とマシン側の共同の「運転反省会とマシンスタディ報告会」を運転の終了した7月10日に開いた。

**直線部増強計画**

直線部増強計画をPFが進めていることは、先の号においても説明している。この計画を実現するために、関連した主題で概算要求を出している。また、競争的経費にもPFは応募しているが、残念なことにリング直線部の改造費用を得るにいたっていない。しかしながら、PFシンポジウムにおいて説明したように当初の計画である2004年春からの改造を目指して、できるところから改造準備を進めている。改造の一部として基幹チャンネル-1、-5、-15の更新をこの夏の作業として行う。来春3月にはさらに基幹チャンネル-2、-3、-4、-13の更新を行いたいと考え、計画を進めている。

直線部4-5に蛋白の構造解析に有効な挿入光源を設置できるようにするため、4極電磁石の配置を変更し、それに



伴う真空ダクトの改造を進めている。費用は研究施設内予算のやりくりであるため、計画している範囲・量に比べ実行できる範囲が少ないのが現状である。ダクト製造に先だって必要なベローズやビーム位置モニターの製造を考えなくてはならない。

### 将来計画

2003年度以降の機構の新しい体制と独立行政法人化について「施設だより」に報告がなされている。放射光科学、中性子科学、中間子科学を受け持つ物構研の将来展望と計画についての議論が急速に進むと考えられる。

予算に関する状況を少し説明する。大型ハドロン計画（統合計画）での中性子源と施設については原研側で、また中性子実験装置については KEK 側で予算を確保する努力をすることになっている。予定では 2007 年までにこれら実験装置についても予算が獲得でき、順次完成となることが望まれている。また、中間子についてはすべて KEK で予算要求をしていくことになっている。一方、放射光については「リング型第三代高輝度光源として X 線領域では SPring-8 がその役割を担い、VUV-SX 領域では光源が無い」と文科省は理解していると伝えられている。文科省の理解と X 線領域のユーザーが 80% 以上であるという PF 利用の現実・将来展望との間には乖離がある。以上のような予算要求環境の中で放射光科学の将来計画を策定し、広く理解を得て R & D を進め、建設実現に向けて努力していくことになる。ハドロン関連の動きにもよるが、2007 年に新光源建設開始となれば喜ばしい。研究所内だけではなくユーザーコミュニティにも多種・多数の意見があるが、早急に整理し、基本計画を骨太にしなければならない。詳しくは野村主幹による「PF の将来計画について」を参照していただきたい。

現機構運営協議会の下に設けられた「つくばキャンパス将来構想委員会」での議論も進み、PF 放射光も他の研究所に続いてヒアリングを受けた。これまで PF 内部で活動してきた「PF-II 検討世話人会」も以上のような動きを考慮して、PF-II の検討に加え ERL での科学・加速器の可能性・将来性についても議論・検討を行っている。この議論・検討をベースにしてヒアリングに臨み、ERL ベースの新光源による新しい放射光科学とその光源加速器について説明がなされた。また、物構研運営協議会の下に設けられた「放射光将来計画検討ワーキンググループ」の活動予定については「施設だより」に記されている。

## 物質科学第一・第二研究系の現状

物質科学第一研究系主幹 野村昌治

### 運転・共同利用実験

バルブの障害のため BL-27 は 1 月末から閉鎖をしていましたが、春の停止期間中に交換作業を行い、4 月からは

運用を再開しました。平成 14 年度第一期（4～7 月）の運転はゴールデンウィーク中の短期停止を含みながら、4 月 1 日から 7 月 1 日に亘り行われました。幸い大きな障害もなく、無事運転を終えることが出来ました。この間 BBS を閉めずに手動バルブを操作して disturb となる事象が目立ちました。また、機器に接続されていない配管を循環水に接続したため洪水が発生したこともありました。電気配線、配管類には接続先を明示する名札を付ける等して同種の事故を防ぐようお願いします。

5 月には気温の上昇とともに電力注意報、電力警報が頻繁に出る状況となりましたが、陽子加速器が 5 月末で停止したため 6 月以降は発令されていません。機構は大きな電力を使用するため、需要を予測し、最大使用電力を東京電力との間で定め、これを超過するとペナルティを支払うこととなります。注意報、警報が発令された場合は、実験に直接必要のない計測機器、人の居ない部屋の照明、空調等を切って節電に努めてください。

停止期間中には放射線安全の鍵となる全てのシャッターの点検を行い、またインターロックの総合動作試験を 9 月 19 日に行った上、9 月 24 日より運転を再開する予定です。また、来年建設予定の BL-5 の現地測量等が行われています。

### PF-AR 関係

PF-AR は 4 月 11 日から 6 月 28 日の間運転を行いました。リングの改造の効果として、寿命の増大に依る入射間隔の増大（約 2 時間 → 約 5 時間）、電子軌道の安定化が達成されています。詳しくは光源研究系の報告を参照して下さい。

この間 6 月 20 日には心血管系検査の臨床応用が改造後初めて行われました。これは筑波大学と物質構造科学研究所の共同プロジェクトとして改造前より行われてきたものです。PF-AR の改造により加速器の電子ビームの寿命が大幅に伸びたこと、電子ビーム軌道の制御が高精度で行なえるようになったこと及び撮影システムの改良により、より高精度の臨床診断が可能になりました。

また、昨年度建設した NW2 ビームラインの立ち上げも順調に進んでいます。NW2 の立ち上げを行ってきた河田、森両氏の記事がありますので、詳細はそちらを参照して下さい。3 月に竣工した PF-AR 北西棟には秋からの立ち上げを目指して NW12 ラインの設置、準備室等の整備が進められています。

### 第 14 回放射光共同利用実験審査委員会 (PF-PAC)

7 月 3、4 日の両日に亘り実験課題審査部会で G 型、P 型申請の審査が行われた後、4 日午後から PF-PAC が開催されました。ここでは 161 件の G 型、G 型から P 型への変更を含め 9 件の P 型、2 件のフォトンファクトリー研究会が採択されました。審査結果の詳細は別稿を参照して下さい。

いくつか議論となった点を紹介します。一つは主にタンパク質の構造解析に関するもので、従来は解析に耐える

結晶が申請時に準備されていることが重視されていましたが、タンパク質構造解析の短時間化が進んでいること、G型課題の有効期間が2年であることを考慮し、次回以降は課題の有効期間内に申請された研究が実施出来ると判断される準備状況であれば良いのではという意見が出されました。この件については他分科の状況も調べ、早急に結論を出すこととなりました。二つ目は継続的な申請で過去の研究成果が明瞭でないものです。「申請に係わるこれまでの研究成果」欄に過去の課題の成果、論文リスト等を記して下さい。紙面が不足する場合は過度にならない範囲で別紙を添付して頂いて結構です。三番目は物質開発研究に関するもので、全体的な研究目的、研究の重要性は記されているが、放射光を使って何を何処まで明らかにしようとしているのか読み取れない申請の扱いについてです。この様な用途があることは理解しますが、PFは単なる放射光提供機関ではなく放射光を用いて高い学問的成果を上げることを目的としていますので、是非この点を明解に記して下さい。

#### 共同利用の成果

共同利用実験の成果として報文等が出版された場合はPF出版データベースに登録をし、別刷りをお送り頂くようお願いしています ([http://pfwww.kek.jp/users\\_info/users\\_guide/pubdb.html](http://pfwww.kek.jp/users_info/users_guide/pubdb.html) 参照)。

最近では年間大凡500報が報告されています。各ステーションで行われている研究内容、実験方法やステーションで利用出来るビームタイムも異なりますので一概に比較することは適当ではありませんが、1997～2001年の5年間の報文数を見ると、ステーションにより1から250報まで分布し、平均として年間約7報が報告されています。諸外国の施設ではESRF、SSRLとMAXが10報を越えていますが、SRS (Daresbury) やAPSと同程度の数字です。

表に世界の主な放射光施設のステーション数と報文数をまとめてみました。これを見て頂いても分かるように、PFは世界的に見てもステーション数の多い施設となっています。一方、表には記しませんが、職員数はMAXに次いで少ない施設となっています。

表によると、1999年と比較して2000年の報文が減少している施設はSRSとPFだけです。SRSは多くのステーションが閉鎖された影響とも考えられます。一方、経験では報文出版後、PF出版データベースに登録されるまでに長時日を要しています。しかし、現在は情報化時代であり、この様に誰でも世界の施設の報文を検索する事が出来ます。上表のデータが一人歩きすれば、「PFのアクティビティは低下している」と誤認される恐れがあります。放射光の様な大型の施設を世の中に認めて頂き、今後更なる発展を続けるためには分かり易い形で、研究の成果を世の中にアピールすることが重要です。研究の成果を報文として世に公表するだけでなく、そのデータを施設に速やかに伝えることは実験者にとって最低限の義務であると認識して下さい。また、もしこれが登録の遅れではなく、正しいデー

タであるならば今後真剣な検討が必要となります。次号が出版される頃までには2000年の報文数が500報を越えていることを期待しています。

また、素晴らしい研究成果を種々の方法で世の中に理解して頂くことはPFにとっても、放射光コミュニティにとっても重要なことです。良い成果が出た時はご一報下さい。

表：各放射光施設のステーション数と報文数。主にweb情報であり、webに情報のないものについては年報等を用いた。年報を用いた場合の出版年ではなく、年報の出版前年の報文として数えてある。

施設名	ステーション数	報文数	
		1999年	2000年
PF	70	519	413
SPring-8	43	213	323
UVSOR	21	65	73
SRS	49	382	264
ESRF	43	487	490
SSRL	28	345	362
APS	42	321	463
ALS	38	342	338
MAX	18	-	244

#### おねがい

今年度は予算が削減される中、直線部増強のための作業を続けていることもあり、極めて財政的に厳しい状況にあります。厳しい予算の中でもPFが世界の中で競争力を持つための投資、とりわけビームラインより上流側への投資や将来計画に繋がる技術開発のための投資は継続したいと考えています。従前より、フィルム類、ガasket、文房具等実験に必要な消耗品類は各実験グループでご負担頂くようお願いしておりますが、一層のご協力をお願いします。

共同利用実験終了時には利用記録の提出をお願いしています。この利用記録は関係するステーション担当者が見て各々対応する他に、他の職員及び懇談会の利用幹事も読み、予算的制約の中、重要性の高いもの、実現し易いものから手を打つようにしています。今期目立ったのは携帯電話の電波の再輻射です。技術的検討は行いますが、そう容易ではないと予想されます。当面は、(<http://pfwww.kek.jp/toyoshima/tel/keitai.html>)を参考に機種選定をして頂くか、ステーションか機構内PHS(前号参照)の連絡先を案内して頂くのが早道でしょう。また、自転車に独占する方も居るようです。これまで全ての自転車が出払ったことはありませんので、皆さんが使う毎に返却して頂ければ今の台数で不足することはないはずですが、多くのユーザーが快適に研究活動を行えるようご協力をお願いします。

## その他

シングルバンチ運転中の6月10～12日にかけて機構と総合研究大学院大学の夏期実習が約70名の参加の下、開催されました。詳細は澤氏の記事をご参照下さい。

今年的一般公開はKEKBの運転再開を早めるため9月1日に開催されます。実験ホールだけでなく、普段は見られない加速器等も見学出来ますので、関心のある方は見学にいらして下さい。

## PFの将来計画について

物質科学第一研究系 野村昌治

### 1. はじめに

PFリングは放射光黎明期の1970年代に計画、建設され、1982年から運転を続けてきた第二世代放射光源ですが、二度に亘る高輝度化を行い、エミッタンスを当初の300nmradから36nmradまで下げることが出来ました。また、設計当初から挿入光源を設置する直線部が用意されている優れたデザインであったこともあり、現在進行中の直線部増強計画が完成すると既存の直線部が長くなり、長い挿入光源を設置出来るとともに短直線部にはミニポールアンジュレーターを設置出来るようになります[1, 2]。

多くの研究分野で高輝度の放射光を供給できるアンジュレーターの利用が必要とされていますが、この様な改造を行っても自ずと限界はあり、SLS(スイス)をはじめとする新第三世代光源以上の輝度や挿入光源数を実現することは出来ません。動的な構造解析等を目的としたサブピコ秒のパルス状光源、数十nm程度のナノビームによる局所解析も求められていますが、現状のPFでは実現不能です。この様な状況の中、我国における放射光利用研究の更なる発展と従来の放射光源では実現不可能な高輝度、極短パルス、高コヒーレンス利用を目指して将来計画を検討してきましたが、概要が出来つつありますので紹介します。

### 2. KEBの状況

KEKは日本原子力研究所と協力して2006年度までの計画で大強度陽子加速器施設の建設を東海村で進めています。完成後は物構研の内の中性子、中間子関係の実験は東海で行われることとなります。一方、つくば地区では現在のKEKBのルミノシティを一桁上げるsuper KEKB計画やリニアコライダーのJLC等が検討されています。また加速器研究施設からは図1に示すタイプのEnergy Recovery Linac(ERL)のテスト機の提案もなされています。

この様な状況の中、機構運営協議会の下に「つくば地区における研究の進め方を中心とした高エネルギー加速器研究機構の将来構想について審議する」つくばキャンパス将来構想委員会が設置され、6月の委員会では以下に示すPFの将来構想を提案しました。PFの提案している計画も機構の将来計画の一環として議論されています。

### 3. PFの将来計画検討の流れ

高輝度化後の運転が安定した1999年春の第16回PFシンポジウムで広範囲の利用実験者に高品質の放射光を供給する4GeV、2A、 $\epsilon_x=14\text{nmrad}$ の電子蓄積リングPF-II[3]が提案されました。同時に高輝度、高コヒーレンス光を目指す10GeV、ピーク電流3000A、 $\epsilon_x=0.05\text{nmrad}$ のリニアックに100m級のアンジュレーターを設置した自由電子レーザー(FEL)も提案されました。FELには電子ビームをダンプする前にアーク部に設置した挿入光源から放射光を取り出す案も紹介されました。リングについては「直線部長が短い」、「常識的すぎる」等の意見も出される一方、FELについては「多くのユーザーが利用する環境ではない」という意見が出されました。

同年末の第17回PFシンポジウムでは更に詰めた案が提案されると共に、PF懇談会で各ユーザーグループに対して行ったアンケートの報告が行われました。それによると「FELは夢の光源だが、蓄積リングがなくなっては困る」というのが大勢でした。

2000年末の第18回PFシンポジウムではPF-IIの直線部長を長くし、エミッタンスを9nmradとしたPF-IIAが提案されました。

これらの議論を積み重ねた上で2002年春の第19回PFシンポジウムでは、今後とも広汎な放射光利用研究を支えるとともに先進的な放射光・放射光利用研究を開発することが出来る放射光施設としてERLと蓄積リングを組み合わせた案が提案されました。PFシンポジウムの報告については各「PFシンポジウム報告」を参照して下さい。

### 4. 蓄積リングとERL、FEL

21世紀に入り欧州を中心に真空封止アンジュレーター技術を活用した2.5～3.5GeV程度の高輝度リングが建設されています。これらの光源ではVUVから硬X線までの広いエネルギーの放射光を利用した実験が予定されています。その代表例はスイスのSLSで、2000年末から運転を開始しています。SLSではギャップの小さいミニポールアンジュレーターが常用されるとともに、頻繁に入射して蓄積電流値を一定に保つtop-up運転がなされています。同様な考え方で仏国のSOLEIL、英国のDIAMOND等が建設されています。これら従来の放射光源は全て電子蓄積リングを用いていました。

蓄積リングの技術はほぼ確立していますが、その利点は効率性の高さにあります。電子ビームは周回するため、周回する電荷は小さくても平均電流値は大きくなります。周長を300mと仮定しても、電子は1秒間に $10^6$ 回周回します。しかし、如何に小さなエミッタンスの電子ビームを入射しても電子がリングの中を数千回周回する内に平衡状態に達し、そのエミッタンスはリングに依って決まってしまう。このため、エミッタンスで数nmrad、ビームサイズで数十 $\mu\text{m}$ 、パルス長で数十ps程度が限界となっています。また水平方向のエミッタンス $\epsilon_x$ は鉛直方向のエミッタンス $\epsilon_y$ と比較して2桁程度大きくなり、横長の



光源となります。

一方、リニアックを使うとエミッタンスは電子銃で決まり、加速とともにエネルギーに反比例して下がります。このため数十 pm-rad 程度の低エミッタンスの電子ビームを得ることが可能となります。蓄積リングと異なり  $\epsilon_x$  と  $\epsilon_y$  の関係は調整可能で、直径数  $\mu\text{m}$  の丸い電子ビームを作ることも可能です。また、100fs オーダーの極短パルス光を得ることも可能となります。

その極限を狙ったものが FEL であり、ドイツ DESY の TESLA Test Facility[4]、米国 SLAC の LCLS[5] が進行中です。これらの光源では従来より 10 桁高いピーク輝度、5~6 桁高い平均輝度、高いコヒーレンスの放射光が得られます。一方、FEL から得られるピーク光輝度は高過ぎて多くの場合放射線損傷が深刻な問題となること、パルスの繰り返し周波数は低いこと、SASE を利用すると時間的・場所的に安定な光源とならないこと、同時に利用出来るポート数が限定されること等の難点もあり、多くの放射光利用実験者から見た時これらの光源は既存の第三世代放射光源と相補的に利用するものであって、スーパーセットとはならないと考えられます。また、巨大なエネルギーを一度に失うため、放射線や電力の問題も深刻になります。

ERL の基本形を図 1 に示します。高輝度の電子銃から放出された電子は超伝導リニアックで加速され (CHESS の提案では 5~7GeV、100mA [6])、放射光を出しながら周回し、加速時とは逆位相で超伝導リニアックに入って減速します。減速時に回収されたエネルギーは別の電子の加速に利用されます。即ち蓄積リングでは電子そのものを再利用しているのに対して ERL ではエネルギーを再利用してエネルギー効率を改善しているとも捉えられます。減速によってダンプする電子のエネルギーが下がるため、放射線の問題を軽減出来ます。幸いなことに超伝導リニアックの技術に関して KEK は世界のトップレベルにあります。

この様な ERL から得られる光の特徴を定性的にまとめると、

- a) 低いエミッタンスが実現出来るため輝度とコヒーレンスを上げられる；

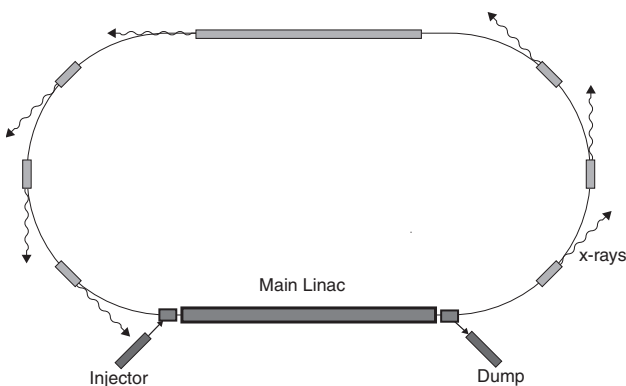


図 1. Energy Recovery Linac の構成図。Injector から入射された電子は Main Linac で加速され、一周して放射光を放出した後、再び Main Linac で減速されて Dump する。この時回収したエネルギーは別の電子の加速に使われる。

- b) サブピコ秒のパルスを用いて時間分解実験を行える；
- c) 丸い小さな電子ビームが得られ、縮小光学系を用いることによって 50nm  $\phi$  のビームも期待出来る；
- d) 時間的に強度が一定な光源である；
- e) 電子銃技術の進歩に伴い、電子銃を交換するだけでエミッタンスを低減出来る；

となります。この ERL を建設するためには高輝度で安定して機能する電子銃の開発、特に大電流に耐えるものの開発が必要です。また放射線安全を確保するために、大電流運転時に安定にエネルギーを回収する技術を確認することも重要です (6GeV  $\times$  100mA = 600MW !)。放射光利用実験者のアイディアがこの様なエミッターの開発のブレークスルーとなるかもしれません。

### 5. 計画内容、マシン

既に概要は PF シンポジウムで報告されていますが、図 2 に示す様な概念となっています。計画は二期計画として提案しています。

まず第一期では外周を蓄積リングとして利用実験に供し、内部の Multi-turn Accelerator Recuperator Source (MARS) はリングへの 4GeV の入射器として機能すると同時に ERL 光源として使用します。外周は蓄積リングですので、KEK の加速器技術を使えば既存の技術のブラッシュアップで実現可能ですし、大電流の入射器は必要とされません。

MARS は Kulipanov 博士による命名 [7] ですが、高コストの超伝導リニアックの加速エネルギーを抑えることでコストダウンする代わりに繰り返し加速するものです。また、超長尺のアンジュレーターを使うことによって電流が小さいことを補おうとするものです。ここでは 1GeV のリニアックを想定していますので、1、2、3、4GeV の電子ビームラインに設置された数十 m 級の超長尺アンジュレーターからの放射光を利用でき、利用できる放射光のエネルギー範囲を広げるといふ御利益もあります。

この様な運転を行いながら、MARS の大電流化の開発、

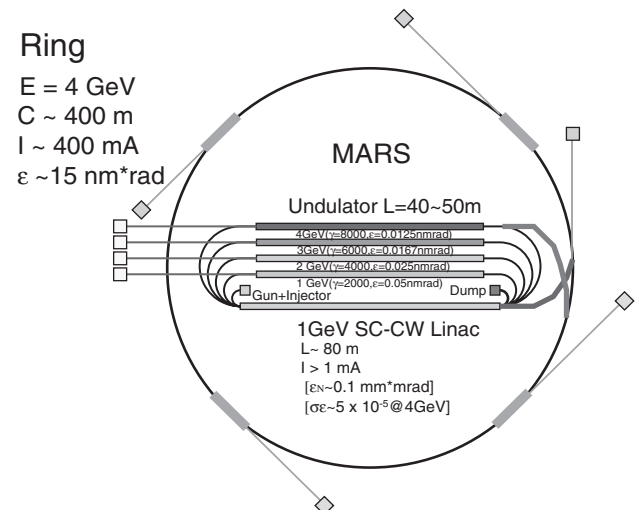


図 2. PF の提案する新光源施設の概念。内部は MARS 構造となっている。詳細は本文参照。

試験を行い、技術が確立した時点で内部の MARS と外周のリングを一体的な ERL として運転する第二期へ移行する案です。この時点では MARS 部分では大電流化による輝度の増大、外周部ではエミッタンスの減少による高輝度化、極短バンチ化が期待されます。

第一期に得られる光の特性をまとめます [8]。まず、外周の蓄積リングでは 4GeV、 $\epsilon_x=15\text{nm}\cdot\text{rad}$ 、カップリング 1% の光源で、蓄積電流 400mA を想定します。この蓄積リングへ周期長 8cm (アンジュレーター全長 4.5m)、4cm (同 4.5m)、2cm (同 2m) のアンジュレーターを設置した時に得られる放射光の輝度スペクトルを図 3 に示します。この光源でも数百 eV 域では現在の PF より一桁改善して SLS 並、10keV 付近では三桁近くの輝度が改善して、SLS 以上、SPring-8 に準ずる輝度が期待されます。

電子源として電流値 1mA、規格化エミッタンス 0.1mm-mrad を想定すると、MARS 部で 4GeV まで加速した場合、エミッタンスは 0.026nmrad となります。これは第三世代蓄積リングの 200 分の 1 です。周期長 4cm、全長 50m の超長尺アンジュレーターを用いた時の輝度は  $10^{21}\text{ph}/\text{sec}/\text{mm}^2/\text{mrad}^2/0.1\%BW$  と SLS や SPring-8 の一〜二桁上を達成できます (図 4)。これ以外のエネルギー部のスペクトルについては PF シンポジウムの報告 [8] を参照下さい。MARS 部では 100fs オーダーのバンチ長の光が得られ、その周波数は 1.3GHz 程度が予定されます。

6. 放射光利用実験・共同利用

放射光利用研究は学問分野も、研究の中での位置付けも、利用方法も極めて多岐に亘ります。将来計画においてもそれぞれの研究分野の特性に合わせた計画を立てる必要があります。多くの研究分野にとってはスケジュール通り安定に動く高輝度光源が望ましいでしょう。しかし、放射光利用研究は当初の予想を超えた展開を示しています。例えば、PF や ESRF が出来た頃マイクロビームはごく限られた研究者の研究対象でしたが、今や第三世代光源施設では多くの研究にルーチン的に利用されています。偏光の制御にしても然りです。従って、目先の利益だけでなくその先も読む必要があります。

将来計画を考えるには当たっては光源の性能だけでなく、総合的に高度な研究を行える環境を整備することも重要です。実際、放射光利用実験の進展に伴い、更に研究対象に適した実験環境が求められてきています。従来の放射光研究施設では「まず光あれ」的な考えでしたが、物質を対象とした研究を行う場合にはその場での物質の合成、評価が出来る環境 (例えば非密封 RI が使える、特殊材料ガスを安全に使える、バイオハザード対応の設備が備わっている、クリーンルーム環境下で実験出来る、放射光以外の分析機器を利用出来る等) も光の性質と同様に重要になります。また、現状の PF ではビームライン間の空間が狭く、実験装置設計の制約となったり、実験ステーションの近くに十分な試料調製・評価環境が用意出来ない等の改善を要する点もあります。これらの点は建屋を設計する時点

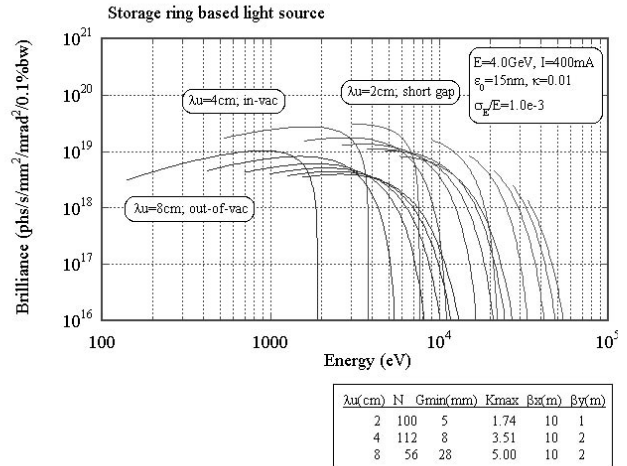


図 3. 蓄積リング部に設置したアンジュレーターから得られるスペクトル。

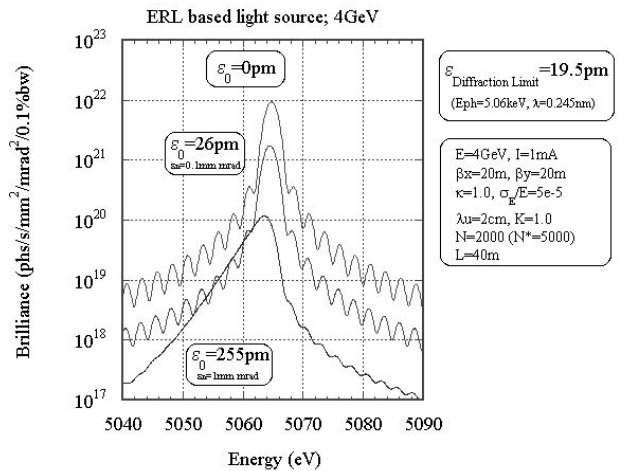


図 4. 4GeV の ERL に周期長 4cm、周期数 1250 のアンジュレーターを設置した時に得られる放射光のスペクトル (K=1)。

で考慮しておく必要があり、この面からも特徴のある研究を行う可能性を広げることが出来ると期待しています。

また、大規模な共同利用を少人数で支援するためには効率的に活動出来る様に予め建屋を設計する事も非常に重要になります。

物構研運営協議会の下に放射光研究施設の将来計画に関する検討ワーキンググループが活動をはじめました。このワーキンググループの下にユーザー、PF 職員、加速器研究施設職員で構成されるグループを作り光源の設計、得られる放射光の特性を生かす研究、その研究を実現するための技術等について集中的に検討を行います。本稿に示した加速器の構成・配置や得られる光のスペクトルはユーザーの方々に検討を進めて頂く参考として示したもので、今後の議論や学問的、技術的検討の進展に伴い変化することをお断りしておきます。

本稿にはこの光を使ってどういった研究が可能となるかについては敢えて記しませんでした。これらについては、10月3〜4日に開催される「フェムト秒パルス放射光源の開発と新しいサイエンスの展開」、10月31日から11月1日に開催される「X線位相利用計測における最近の



展開)、11月14～15日に開催される「放射光マイクロビームと利用研究の展開」等の研究会や上記の検討グループに参加して詰めて頂くようお願いします。

#### 参考文献

- [1] 小林幸則、Photon Factory News, **18** (2) 17 (2000).
- [2] 野村昌治、Photon Factory News, **19** (3) 8 (2001).
- [3] 加藤政博、土屋公夫、Photon Factory News, **17** (1) 20 (1999).
- [4] <http://www.desy.de/~wroblewt/scifel/scifel.html>.
- [5] <http://www-ssrl.slac.stanford.edu/lcls/>.
- [6] <http://erl.chess.cornell.edu/>
- [7] G. N. Kulipanov, A. N. Skrinsky and N. A. Vinokurov, Nucl. Instrum. and Methods, **A467-468**, 16 (2001).
- [8] 小林幸則、山本樹、第19回PFシンポジウム報告、p.51(2002).  
<http://pfwww.kek.jp/pf-sympo/19/contents.html>

## PF-AR NW2 ビームラインの立ち上げ状況

物質科学第二研究系 河田 洋、森 文晴

PF-ARは光源研究系の報告にありますように、その高度化の改造が順調に達成され利用研究にとって良い環境が整ってきております。そのような中、昨年度建設したNW2ビームラインの各ビームラインコンポーネントの立ち上げをこの4月11日から6月28日までの運転時に行ないました。

NW2アンジュレーター放射光の光導入は2月4日に行ない、無事にフロントエンドを通り、実験ハッチに導かれました。その後、光軸の調整、スリットの調整等を行ない、4月から本格的な分光器の立ち上げを行なってきました。ビームラインの全体構成は約21m地点に液体窒素冷却式の二結晶分光器、約25m地点に湾曲円筒面による2次元集光X線ミラー、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30m地点に実験ハッチとなっています。また、ビームラインの光源は基本的には周期長40mmの真空封止型アンジュレーターですが、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で行なえるように10keV程度の3次光において1keV程度のバンド幅が取れるようなテーパモードを有しています。この4月から6月の間に行なった立ち上げ項目は「液体窒素冷却式二結晶分光器の立ち上げ」「アンジュレーターのスペクトル測定とテーパモードの確認」「集光ミラーシステムの立ち上げ」です。以下順にそれらの結果及び現状を報告致します。

#### <液体窒素冷却式二結晶分光器の立ち上げ>

二結晶分光器の詳細は別紙で紹介したいと思いますが、基本的にPFにBL-4C、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

Si(111)とSi(333)のRocking Curve  
( $\theta=10^\circ$ )

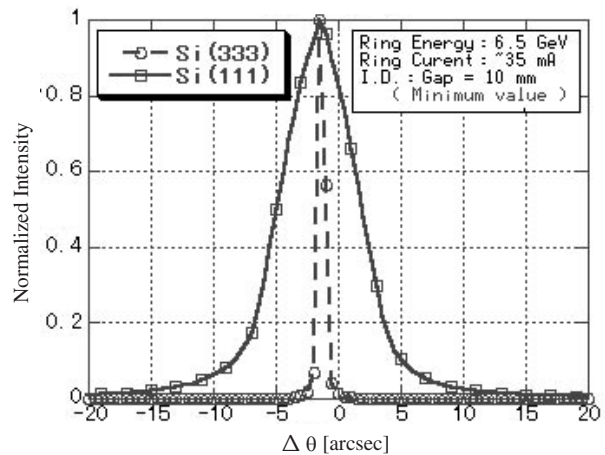


図1. ブラッグ角が $10^\circ$ の時のSi(111) (11.39 keV)とSi(333)のロッキングカーブ。第一結晶にかかる全熱負荷は約300Wであるが、熱変形は全く見られない。

冷却が可能になるように改造したものです。即ち、定位置出射が必要となる第二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200mm)を用いている事が大きな特徴です。それ以外にも経済性、安定性の観点から結晶の調整軸を最小化している事もその特徴です。一方、液体窒素循環システムはSPring-8石川哲也博士が率いる光学系開発グループの下、主に望月哲朗博士のご尽力によって開発されたシステムを導入させていただきました。このシステムは約175W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330W以内の放射パワーに対して第1結晶を液体窒素温度に保つことが出来るものです。

図1はアンジュレーター光の熱負荷による第一結晶の熱変形の度合いを確認する為に最小ギャップ(10mm)である $K=3.0$ の時の二結晶分光器におけるロッキングカーブを示しています。この時の第1結晶における放射パワーは約300Wです。高い熱負荷の状態での測定ですが、Si(111)による基本反射(11.39 keV)、Si(333)による高次反射のロッキングカーブで示すように、高次反射のロッキングカーブの幅は1秒以内を保っており、全く熱負荷に依る歪みは観察されていません。また、定位置出射に関しても分光器を5～23keV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0.1mm以内であり、一般のXAFS測定における1keV程度のエネルギー変化においては、0.01mm以内を保証するところまで調整されています。

#### <アンジュレーターのスペクトル測定とテーパモードの確認>

二結晶分光器が立ち上がったところでアンジュレーターの種々のK値における放射光スペクトルを測定しました。図2は、後で述べる集光ミラーを導入した後の実験ハッチ内で集光したX線強度をPINダイオードで測定し、それを光子数に換算した放射光の強度スペクトルです。従って、現在、実験ハッチ内でどの程度光子数が利用できるかが分かります。一方、アンジュレーターから出射した放射光

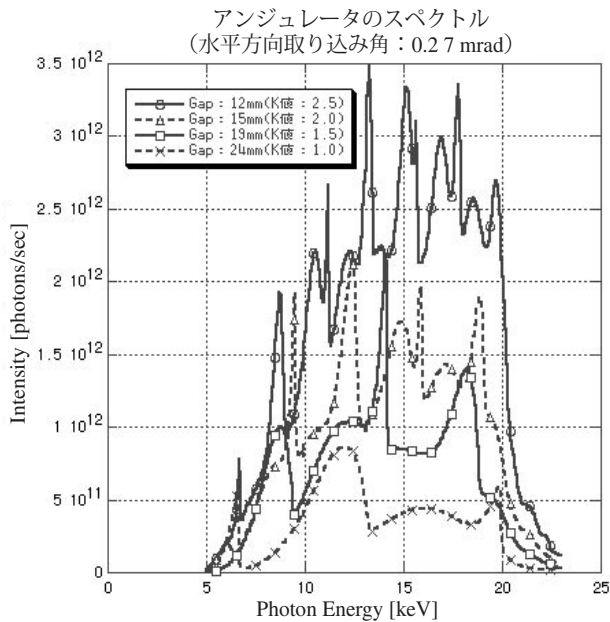


図2. NW2 ビームラインアンジュレータの種々の K 値における放射光スペクトル。縦軸は、二結晶分光器+2次元集光ミラーを導入したときに得られる集光 X 線ビームの単位時間あたりの光子数。

Taper を入れた時のスペクトルの変化  
GAP: 19 mm (K 値: 1.5)

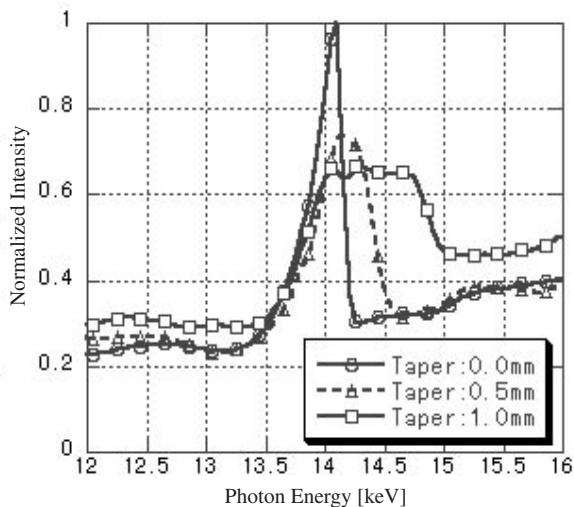


図3. K = 1.5 における 3 次光スペクトルのテーパモードの依存性。テーパ=0 mmでは半幅が 300 eV 程度の広がりであるが、テーパ=1 mmでは 1 keV に広がっている。

スペクトルを求めるには、この測定結果から、結晶の反射率、ミラーの反射率、グラフィット、ベリリウム窓の吸収等の補正を考慮する必要があり、それらは今後行なう予定です。図2に示しますように、実用範囲にある X 線のエネルギーは約 5 ~ 20keV であり、またその強度は 15keV 程度で  $3.5 \times 10^{12}$  光子 / 秒程度です。

図3はテーパモード時のスペクトル変化を示しています。テーパ=0 mmの時のスペクトルは 3 次光のピークが約 14keV で、半幅は約 300 eV 程度です。テーパ=1 mmの時のスペクトルは、3 次光のピークがなだらかとなり、ピーク幅は約 1 keV に及んでいます。このことは十分に D-XAFS 実験が可能である事を示しており、今後更に詳細

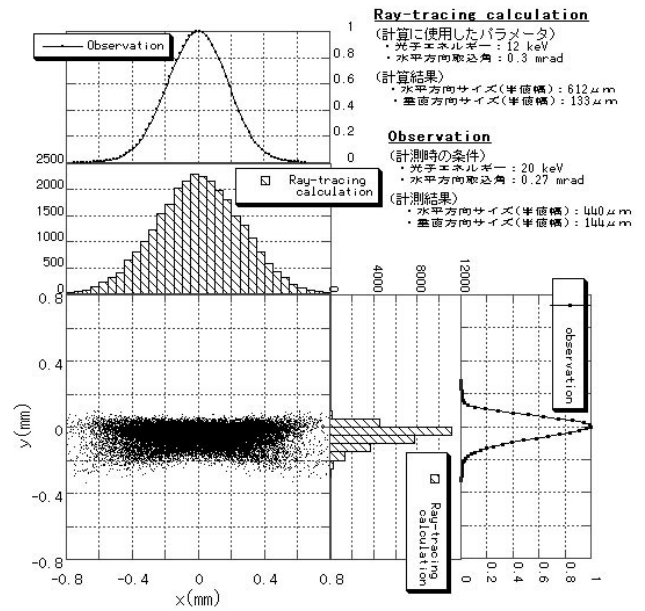


図4. 湾曲円筒ミラーによる 2 次元集光特性。縦方向: 0.15 mm、横方向: 0.45 mm を実測値として得ており、これらの値はレイトレースの結果と良く一致している。

なスペクトル測定を行なうことを予定しております。

### <集光ミラーシステムの立ち上げ>

先に述べました様に本ビームラインには、2次元集光用のロジウムコート湾曲円筒ミラーを用意しています。図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ます。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ます。図2の光子数はこの集光サイズでのものですので、単位面積当たりの強度は PF の偏向電磁石ビームラインの約二桁上であり、PF のマルチポールウイグラービームラインと比較しても十分にそれに優る強度を有しています。また、D-XAFS の為の縦方向だけの集光を単色 X 線でテストし、約 70 ミクロン程度の値が得られています。来期には白色 X 線でのテストを開始する予定です。

### <今後の予定と皆様へのお願い>

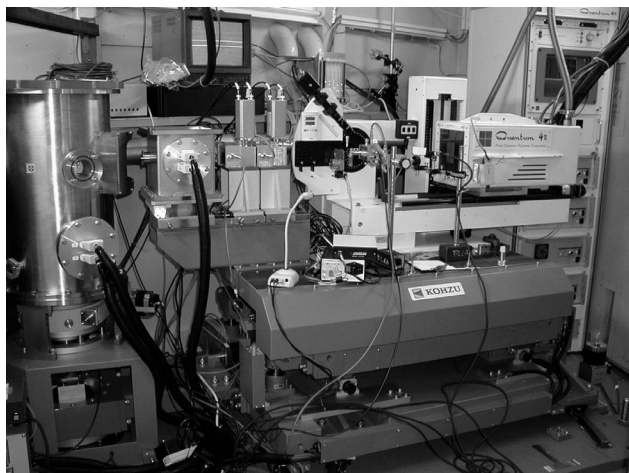
ここに紹介致しましたように NW2 ビームラインは一步一步ですが着実にその性能を上げてきております。本来の最終目的はパルス光を利用した時分割 XAFS を描いてありますが、そこに到達するには未だ暫く時間がかかるでしょう。その様な立ち上げ調整はこの秋からのマシンタイムに予定しております。しかし、紹介しました様に大強度利用実験に関しては集光ミラーを用いて出来る状態になってきています。勿論実験装置はまだ整備できていませんが、持ちこみの装置であれば十分対応できるでしょう。まだ正式にオープンできる状態ではありませんが、「一度使ってみたい」という希望を持っておられる方は遠慮せずに担当者までご連絡下さい。勿論 XAFS の実験にとらわれる必要はありません。

## BL-6A 更新計画について

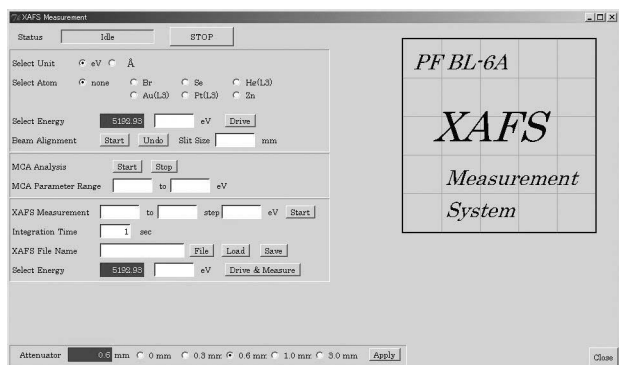
物質科学第二研究系 五十嵐教之、鈴木守、松垣直宏

現在タンパク質結晶構造解析ステーション、BL-6A の更新作業を進めています。平成 12 年度には CCD 自動データ収集システムを導入し (PF ニュース Vol.18, No.1, 2000、参照)、平成 13 年度にカメラ架台の更新を行いました (参考図 1)。ハードウェア調整作業の遅れのため、平成 14 年度前期までは波長固定で運用しており、ユーザーの方には大変ご迷惑をお掛けしておりますが、本年 4 月までの作業により、ようやく制御装置周辺の大きな問題は解決され、10 月からのビームタイムでは波長可変で運用する方針です。

カメラ架台には水平 1 枚振り分光装置が付属されており、分光器には非対称集光三角ベント分光器 (非対称角 7.5 度:最適波長 0.98 Å) あるいは回転傾斜集光型分光器 (現在製作中) の 2 種類を搭載できるようになっています。現在は非対称集光三角ベント分光器が設置されています。波長は 0.9 Å ~ 1.3 Å の範囲で選択することができますが、現在の非対称集光三角ベント分光器では長波長領域では集光度が低下しますのでご注意ください。今後この状況は、回転傾斜型分光器の導入により改善する方針です。波長変更や XAFS 測定は新規作成のソフト (参考図 2) により行えま



参考図 1



参考図 2

す。結晶からの蛍光シグナルはマルチチャンネルアナライザを使用して測定します。初めて使用する際にはスタッフにご相談下さい。現在は XAFS 測定にだいたい 30 分程度かかります。今後使用頻度の高い原子種については測定条件のデータベース化を行い、時間短縮を図る予定です。今後の予定としては、7 月に制御装置のバグ修正、秋以降に ADSC 社製測定ソフトウェアとのインタフェース作成作業、モータ駆動ゴニオメータヘッドの設置を行います。遅れている回転傾斜型分光器の導入は来年以降を予定しています。また、集光ミラーの更新は現在予算獲得を目指して努力を続けています。

## 低速陽電子施設

物質科学第一研究系 栗原俊一

2001 年冬期停止期間より開始された KEKB トンネルからの低速陽電子発生用加速器の移設にともない、電子陽電子入射器棟地階テストホール北端に低速陽電子線源を設置、ビームラインを実験ホールまで敷設し、3 月 25 日にビームライン終端で低速陽電子を検出した。陽電子ビームのエネルギーは 600eV、この時の専用加速器のビームパワーの制限から陽電子ビーム強度は約  $10^6 e^+/s$  が得られた。MCP モニターにより陽電子ビームのプロファイル (下図) を、線量計により強度分布を測定した。

現在、低速陽電子線源、ビームラインのリモート制御化を進めており、安全系の整備、2 次ビームラインとしての認可を待って、平成 15 年度には共同利用の開始を予定している。実験ステーションはポジトロニウム -TOF を考

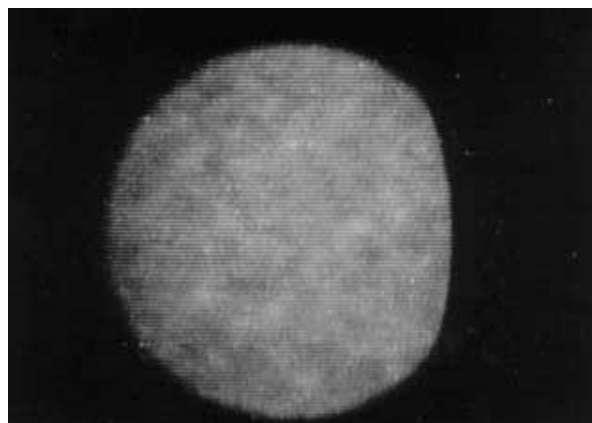


図: MCP-HIL3 の MCP モニター (ビームライン上流から 3 番目、有効径 10 mm) で観察した低速陽電子ビーム、ビームエネルギー 600eV、繰り返し 5Hz。