

KEK 放射光計画 —蓄積リング—

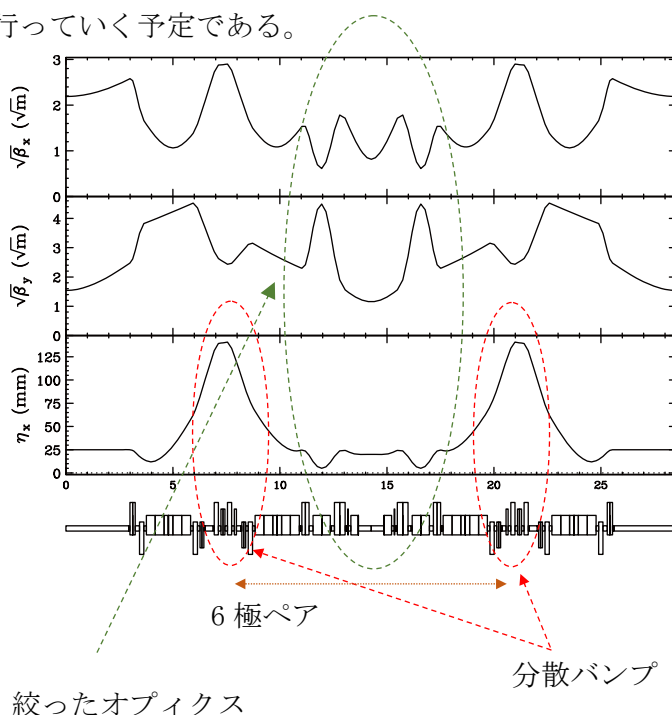
原田健太郎
KEK 加速器

HBMA (Hybrid Multi Bend Achromat)型ラティスの登場により、2010年代に入って蓄積リング型光源の性能が大幅に向上した。現在、MAX IV、ESRF II、Sirius など、電子ビームのエミッタンスが 1nm-rad を切る蓄積リング型放射光源が世界各地に計画、建設され、すでに運転を開始した施設もある。ここでは、エネルギー3GeV、周長約 570m、自然エミッタンス 132.5pm-rad の蓄積リングの設計について発表を行う。リングには 5.6m 直線部が 20 本(うち 1 本は入射用に最適化)、1.2m 直線部が 20 本あり、40 台近い挿入光源が設置可能である。IBS (Intra Beam Scattering、バンチ内散乱)の効果を考慮すると、蓄積電流 500mA では水平エミッタンスは 314.7 pm-rad (垂直はカップリング 2.6%を仮定し、8.2pm-rad) まで増大する。IBS の影響は、高次高調波空洞でバンチ長を伸ばして抑制することを考えている。また、3GeV の ERL 計画と比較すると、高輝度・高光束の観点からは性能はほぼ同等となる。

ESRF を中心に開発された HBMA (Hybrid Multi Bend Achromat)型ラティスの特徴は、複数の機能結合型偏向電磁石と分散関数バンプの導入にある。低エミッタンス実現の為に複数の機能結合型偏向電磁石で絞ったオプティクスを作る一方、大きな色収差補正を効率的に行う為に、分散関数の大きな部分を作ってそこに 6 極電磁石を設置する。ESRF の場合、さらに 6 極同士をペアにして非線形力を打ち消すという、KEKB と同じ工夫が採用されており、今回のデザインでもそれを踏襲している。

入射やタウシェック寿命のために広いダイナミックアパーチャが必要であるが、現在の PF リングと同程度の電磁石の誤差 (据付 50mm、磁場強さ 0.05%、傾き 0.1mrad) を入れても、COD 補正によって入射蓄積に必要なダイナミックアパーチャを確保 (入射点で約 1cm、運動量 2.5%) することができている。ハードウェア的にも十分現実的であり、現在、詳細検討を進めている最中である。また、光源性能とダイナミックアパーチャのさらなる向上の為、オプティクスやラティスの最適化は引き続き行っていく予定である。

3GeV 周長 570.7m
HBMA 型ラティス 20 セル
RF 500.1MHz、2MV
ハーモニック数 952
バケットハイト 4%
エネルギー損失 0.30MeV/rev
自然エミッタンス 132.5pm-rad
500mA (IBS 効果ありで)
水平エミッタンス 314.7pm-rad
垂直エミッタンス 8.2pm-rad
エネルギー広がり 7.9×10^{-4}
バンチ長 4.2mm
タウシェック寿命 約 2 時間

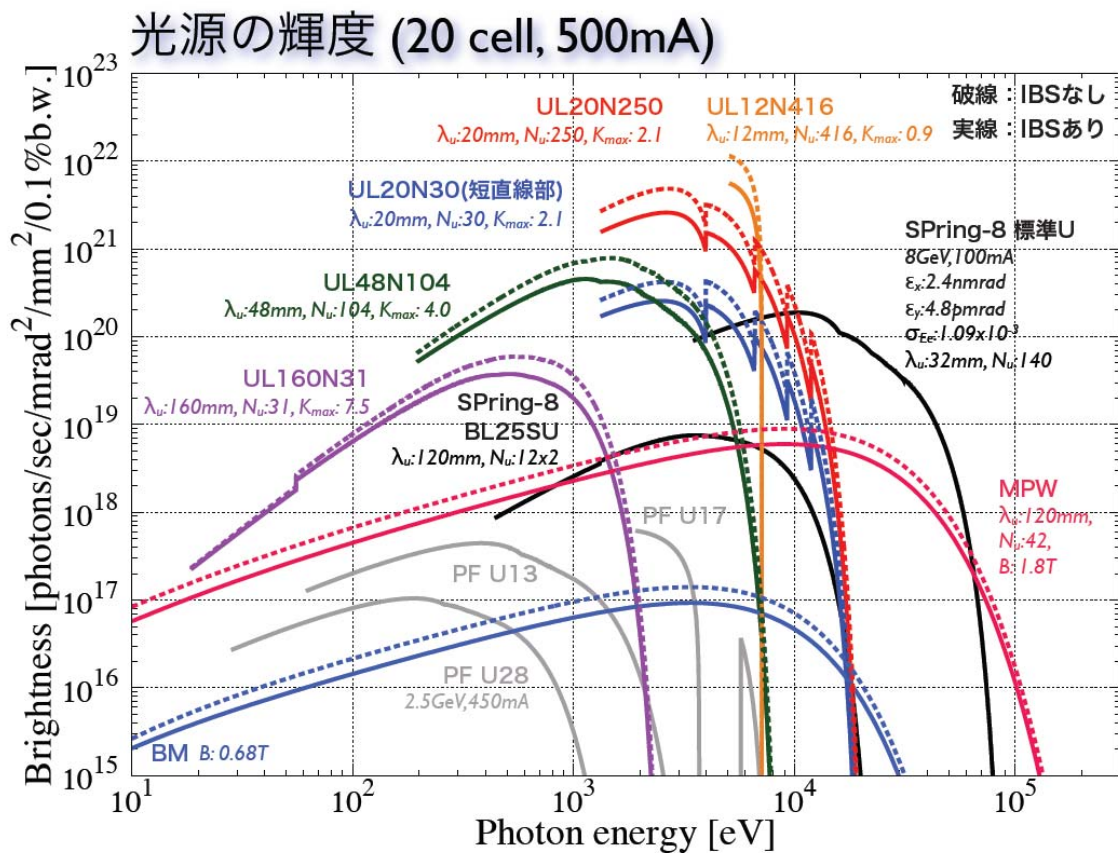


KEK 放射光計画 ー挿入光源ー

Insertion device

土屋 公央、阿達 正浩・KEK 加速器

現在検討されている 3GeV 電子蓄積リング案では、電子バンチ内散乱の効果も考慮してもエミッタンスは約 0.3nmrad であり、PF リングのエミッタンス 36nmrad と比較して百分の1以下となることが期待される。このような極小エミッタンスビームからの放射光輝度は PF と比べて格段に高まり、代表的なアンジュレータの輝度は千倍以上となる。特に光子エネルギー10keV 以下の領域では、世界最高水準の輝度が得られる。この 3GeV リング案では周長 570mのうち、5.6m 直線部が 20 本、1.2m 直線部が 20 本あり、合計 40 台近い挿入光源が設置可能である。ここでは、この 3 GeV リング案に適した挿入光源の検討状況と特徴を報告する。



KEK 放射光計画ービームライン Beamline

五十嵐 教之・KEK-放射光

現在放射光科学研究施設では、次期光源として、3GeV クラスの高輝度放射光リングの設計、検討を進めている。鉛直方向についてはほぼ回折限界（軟X線領域では完全に回折限界）に達する光源性能を有し、この光源からの高輝度放射光を利用することにより、ナノメートルの空間分解能で局所構造を、ミリ電子ボルトのエネルギー分解能で電子状態を決定できるようになることが期待されている。本講演では、次期光源からの高輝度放射光利用を支えるインフラ設備、ビームライン設計の例とビーム性能の見積もり、そしてそのビーム性能を実現するために必要な要素技術開発について紹介したい。

リング建屋については、光源及びビームラインの床を独立させ、床自体に十分な堅牢性を持たせることで、環境変動に影響されない設計を検討している。ビームライン光学素子も小型化、堅牢化を進めるとともに、光学ハッチあるいは恒温ハッチにより環境安定化を図る。インコヒーレント振動成分となるポンプや電源、空調等の振動減についても全体として切り離す設計とする。

ビームラインについては、5m のアンジュレータを利用した場合の軟 X 線ビームライン(1keV 周辺)、X 線ビームライン(10keV 周辺)の光学系の例をいくつか紹介したい。軟 X 線領域(1keV 周辺)では、標準的なビームライン設計と、100nm 集光あるいは数 10nm 集光のビームライン、10 ミリ電子ボルトのエネルギー分解能を達成するための設計や、コヒーレンス利用についての見積もりを報告する。X 線領域(10keV 周辺)では、コヒーレンス利用ビームライン、全反射光学系を用いた 50nm 集光あるいは数 10nm のビームライン、 10^{-6} オーダーの高エネルギー分解能ビームラインの光学系とビーム性能を報告する。これまでのところ 5m のアンジュレータについて、代表的な 1keV、10keV のビーム性能しか見積もられておらず、今後 0.6m のアンジュレータや MPW、及びベンドビームラインの性能についても見積もりを進める予定である。

上記のようなコヒーレンス利用やナノビーム利用、ミリ電子ボルトのエネルギー分解能のビーム利用等を実現するためには、光学素子自体の高性能化、設計最適化、より緻密な空間コントロールが重要である。現在各要素技術について検討を進めているところであり、必要な光学素子の表面性能や、光学素子の熱歪みの見積もり及び必要な熱負荷対策についても簡単に紹介したい。

ユーザー利用プログラム User program

雨宮健太・KEK物構研

KEK 放射光は、最先端の学術研究と人材育成を最重視しながら、大学・企業等の研究者の様々なニーズに応える使いやすい先端的ビームを供給し、多種多様な放射光利用研究を推進することを通じて社会に貢献することを目指している。KEK 放射光のミッションを整理すると以下のようになると考えられる。

- (1) 学術研究:放射光科学を牽引する国際的中核拠点として、国内外の優れた研究者を結集し、先端的放射光利用研究を推進する。
- (2) 人材育成:放射光利用研究および放射光利用教育プログラムを通して、基礎研究から応用研究まで、高度な研究活動を行うことのできる人材を育成する。
- (3) 社会貢献:基礎科学の展開に源を発する形での応用分野の画期的な変化の種を生み出すべく、イノベーションを育むことのできる場を提供する。更に、放射光利用研究による成果を様々な形で社会に公開し還元することで、持続可能な社会の構築のための役割を果たし、日本社会、更には広く世界からの信頼と負託に応える。

これらのミッションを遂行するために、全ての研究者(企業を含む)に開かれた新しい共同利用を展開すべく、多様なユーザー利用プログラムを検討している。課題の内容(実験手法のフロンティアを開拓するもの、先端的ビームをハイスループットで利用するもの、放射光の普及を目指したトレーニング利用、など)、成果公開の有無、課題申請と採択の時期、審査の方法、測定・解析の支援や請負、利用料金の有無、など様々な観点から、現在検討中の案を紹介し、意見交換を行いたい。

PF リングと PF-AR の運転報告 Operational Status of the PF-ring and PF-AR

高井 良太
KEK 加速器第七研究系

PF リングと PF-AR は、大学共同利用施設として我が国の放射光科学や産業利用、人材育成等に大きく貢献してきたフォトンファクトリー(PF)を支える蓄積リング型放射光源である。昨年度は運転経費削減と電気代高騰の影響を受けて年間のユーザー運転時間が 2000 時間程度にまで落ち込む事態となったが、今年度はユーザーコミュニティからの強い働きかけもあり、およそ 3000 時間の運転時間を確保することができた。どちらのリングも継続的なメンテナンスによって非常に低い故障率を誇っており、今年度の運転も概ね順調であった。

PF リングでは、ここ数年をかけて挿入光源の更新計画を順次進めており、今年度は U#13 と U#28 のインストールが完了し、運用を開始した。このように大規模なリングコンポーネントの変更があると、ビームとそれを取り巻く環境の相互作用で生じる電磁場の様子が変わり、蓄積ビームが不安定化する条件にも変化が生じる。実際、昨年度はビーム不安定の影響でハイブリッド運転時の蓄積電流を 400 mA に制限せざるを得なかったが、上記の更新を終えた今年度は定格の 450 mA を安定に蓄積することができた。高電荷のシングルバンチに起因するダクトの発熱量も以前より緩和され、より健全な状態で運転可能となった。その一方で、年代物の真空ダクトや電磁石電源に起因するトラブルが年々増加傾向にあり、パフォーマンスの維持にはリング各所の老朽化対策が重要となっている。2016 年 2 月から開始された SuperKEKB の立ち上げに協力するため、今年度冬期と来年度春期の運転は蓄積モードで行われる。

PF-AR では、夏期の停止期間中にリング西部に設置してあったストリップラインキッカーを撤去し、新しく製作した新キッカーをリング南西部にインストールした。この新キッカーは、ビームの振動を検知してそれを積極的に減衰させるためのフィードバックダンパーシステムの一部で、構造上不具合が多かった旧キッカーを根本から設計し直したものである。その後の秋期運転で正常に動作することが確認されたが、キッカー電極からのアウトガス等の影響でビーム寿命の改善が芳しくなく、当面は1日4回の定時入射を必要とした。安定な入射や加速を実現するための多角的なマシンスタディも進行中である。現在建設が進められている直接入射路とリングを接続するため、来年度秋期の運転は行われず、続く冬期から新入射路を用いた 6.5 GeV 入射による運転が再開される予定となっている。

フォトンファクトリーにおける産業利用 Industrial Use of Synchrotron Light at the Photon Factory

木村正雄

KEK-物質構造科学研究所-放射光（産業利用促進 G）

産業界の方がフォトンファクトリー(PF)を利用するための制度を表 1 に示す。学術貢献を目的とする共同利用は大学・公的機関の利用が主であるが、企業でも科研費に応募できる機関は応募可能である。利用料は無償であるが課題審査で採択される必要があり、また成果は公開となる。一方、施設利用は成果占有・非公開が可能であり、守秘を重視する場合に好適な制度である。有償となるが、実験の安全性やビームタイム配分に支障が無ければ審査は軽微であり、スポット的な利用にも向いている。トライアルユース(TU)は文科省補助事業に基づいて実施され(2007-2015FY)、新規の産業利用を対象として利用料を無償にすることで利用拡大を図ってきた。

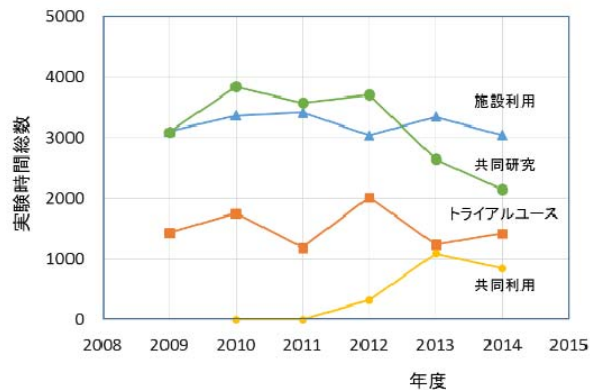


図1 産業利用の制度別延べ実験時間数

表1 フォトンファクトリーにおける産業利用の形態 (2015年12月現在)

制度	利用料	有効期間	応募/年	成果の取扱	備考
共同利用	無償	2年(基本)	2回	公開	応募資格に制限有り
施設利用	有償	—	随時	成果占有 非公開可	標準性能 BL: 27,300円/時 高性能 BL: 53,550円/時
共同研究	有償	半年~複数年	随時	公開	有償
トライアルユース	無償	最長1年	3回	公開	公開延期制度有り

このような制度のもと、PFは毎年約60社の企業にご利用頂いている。利用制度別の実験時間数を図1に示す。近年、施設利用は安定した利用実績があり、ビームタイムで8%程度が産業利用となっている。(2014年度は電力料金高騰や厳しい予算等を理由としてPFのユーザータイムが前年比約4割減となった年)。産業利用の分野別利用度を図2に示す。

イノベーション貢献、新研究分野のシーズ開拓、人材育成、の3つの観点から、PFでの産業利用の充実は重要と考えている。補助事業によるTUは今年度で終了となり、次年度からの新制度については発表当日でご説明する予定である。PFの産業利用サイト <http://pfwww.kek.jp/innovationPF/>

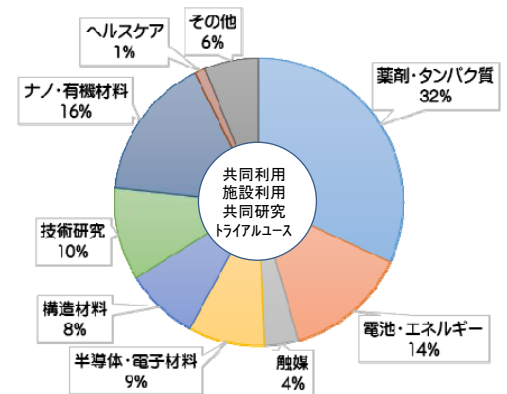


図2 実験時間数で評価した産業利用の分野別利用度 (2013年度)

コンパクト ERL の運転状況 Operational Status of the compact ERL

坂中章悟・高エネルギー加速器研究機構

コンパクト ERL に関するこの 1 年間の進捗について報告する。要点は以下の通りである。

- ① 運転時間: 2015 年度は 5-6 月に約 5 週間の運転を行い、2-3 月に約 7 週間の運転を継続中である。冷凍機の運転時間は、各期とも約 2 週間長い。
- ② レーザーコンプトン散乱: 強度を上げる調整を進め、6.9keV の X 線を持続的に発生することに成功した。X 線のフラックスは、光源点から約 17m 下流の $\Phi 4.66\text{mm}$ の検出器上で約 1200 counts/s であった。幾つかのサンプルの X 線画像の撮影にも成功した。(核セキュリティ補助金および光・量子融合連携研究開発プログラムの成果)
- ③ 平均ビーム電流: 昨年 3 月までに $80\ \mu\text{A}$ (ビームエネルギー約 20MeV) を達成し、6 月の運転でビーム損失を低く抑える調整を行った。この結果をもとに、最大ビーム電流を 1mA に上げるための放射線変更申請を行い、今年 1 月に承認が下りた。今年 2 月から、ビーム電流約 $300\ \mu\text{A}$ で施設検査を受けることを目標に調整運転を行っている。施設検査後は、ビーム電流 1mA までの運転を予定している。
- ④ ビームエミッタンス: 周回部において、バンチ当たり 0.5pC の電荷で規格化エミッタンス $0.3\text{-}0.4\ \text{mm}\cdot\text{mrad}$ を達成した。バンチ電荷を 7.7pC まで上げた場合に低エミッタンスを保つためのスタディを進めている。
- ⑤ 入射器空洞の性能劣化と回復: 2013 年 2 月の使用開始以降、超伝導空洞内面からの電界放出が次第に増える性能劣化が観測された。特に加速電界が高い(約 7MV/m) 場合に問題であった。今年 2 月に高ピーク電界によるパルスエイジングを実施したところ、電界放出が著しく下がり、性能を回復させることに成功した。
- ⑥ バンチ圧縮の準備: バンチ長を 100fs (r.m.s.) まで圧縮することを目指したスタディを 3 月に予定している。この時に用いる 6 極電磁石を昨年秋に設置した。バンチ圧縮に成功すれば、大強度テラヘルツ光の発生が可能になると期待される。
- ⑦ 電子銃の改良: cERL の電子銃は電圧 390kV で使用しているが、これを 500kV まで上げるための改造を昨年 7 月から 12 月にかけて行った。改造後のコンディショニングで最高電圧 548kV までの印加に成功し、連続でも 490kV , 4 時間の電圧印加を行った。電子銃の高電圧化により、ビームの空間電荷効果によるエミッタンス増大を抑える効果が期待される。(JAEA と KEK の共同研究の成果)

cERL におけるテラヘルツ光源開発 Development of THz radiation source at cERL

本田洋介・KEK 加速器

KEK ではエネルギー回収型リニアック(ERL)の試験加速器として、コンパクト ERL(cERL)を建設し、2013 年よりコミッショニング運転を行っている。ERL は、線型加速器でありながら、エネルギー回収を行うことによって大平均電流でビームを周回させることが可能な加速器である。特に cERL では、バンチ圧縮の運転モードが計画されており、周回部でバンチ長 100fs 以下の短バンチビームを実現できる見込みである。放射波長と比較してバンチ長が短い場合、バンチ内の電子がコヒーレントに放射を発生し、バンチ電荷の 2 乗に比例した大強度の放射が得られる。cERL は、テラヘルツ領域のコヒーレント放射光源となり得る。

本年度は、短バンチの実現に必要な六極電磁石を新たに設置し、バンチ圧縮運転の試験を開始する段階である。まず、コヒーレント遷移放射(CTR)の測定を開始した。CTR は、ビームを標的に当てて発生する為、エネルギー回収とは両立しない。しかし、その強度とスペクトルを測定して、バンチ長を評価するなど、ビーム診断に有用である。バンチ圧縮の調整が確立した段階で、偏向電磁石からのコヒーレントシンクロトロン放射(CSR)の取り出しと利用に向けた整備が議論されるものと思われる。

本講演では、cERL のビームコミッショニングにおける、バンチ圧縮とコヒーレント放射の測定の状況を報告する。