

2. 加速器第七研究系の活動

加速器研究施設 加速器第七研究系研究主幹 小林 幸則

2-1. 概要

加速器研究施設・加速器第七研究系は、放射光源加速器（PF リング、PF-AR、コンパクト ERL）の運転・維持・管理および放射光将来計画へ向けた光源加速器開発やビームダイナミクスの研究を行っている。本研究系は、7つのグループで構成され、2015年度は以下の表で示されるメンバーで活動を行ってきた。

光源第1グループは、主に PF リング、PF-AR およびエネルギー回収リアック実証器（コンパクト ERL）における軌道解析・ビーム力学の研究、電磁石および電磁石電源システムの維持・管理および開発を担当している。PF-AR のビーム輸送路については、KEKB-BT グループの協力を得て業務を行っている。また、KEK 放射光計画ではラティス設計やビーム力学及び電磁石設計などを精力的に進めており、EUV-FEL 光源計画でも全体のラティス設計とバンチ圧縮を含むビーム輸送のシミュレーション研究を行っている。

光源第2グループは、主に高周波加速（RF）システムを担当するとともに、光源加速器におけるビーム力学の研究を行っている。また、KEK 放射光計画の RF システムの検討も行っている。PF リングの RF システムの業務は光源第2グループが単独で担当し、PF-AR の RF システムの業務は光源第2グループと KEBB RF グループが共同で行っている。

光源第3グループは、PF リング、PF-AR およびコンパクト ERL の真空系を担当している。KEK 放射光計画の真空系の検討も進めている。PF-AR 直接入射路建設に備えたビームダクトの製造・設置も担当するとともに、PF リングの超伝導ウィグラーの維持・管理業務も担っている。

光源第4グループは、PF リング、PF-AR、コンパクト ERL のビーム診断およびビーム制御を担当している。各種ビーム診断装置の開発、ビーム軌道安定化システム開発、ビーム不安定現象の測定と抑制のためのフィードバックシステム開発などをおこなうとともに現システムの維持管理と高度化・高性能化を行っている。また、加速器制御と各種シミュレーションの基盤となる計算機システムの維持管理も行っている。

光源第5グループは、放射光による大パワーの熱負荷から全ての機器を保護し、安全に制御された放射光をビームラインに供給するため、基幹チャンネルシステムに関する研究開発と、安定運用を実現するための維持・改良を行なっている。さらに、光源加速器の放射線安全系に関する維持・改良および次期放射光源のための安全系システムの開発を行っている。

光源第6グループは、次世代の線形加速器型光源において鍵を握る高輝度大電流電子銃の実現に必要な、極高真空装置、500 kV 高圧電源、高出力ドライブレザー、高量子効率を持つカソードなどの各種装置の研究開発を行うと

加速器第七研究系	
小林 幸則	教授・研究主幹
光源第1グループ	
中村 典雄	教授・グループリーダー
原田 健太郎	准教授
高木 宏之	准教授
尾崎 俊幸	准教授
島田 美帆	研究機関講師
田中 オリガ	博士研究員
上田 明	専門技師
長橋 進也	技師
光源第2グループ	
坂中 章悟	教授・グループリーダー
山本 尚人	助教
高橋 毅	専門技師
光源第3グループ	
本田 融	教授・グループリーダー
谷本 育律	准教授
佐々木 洋征	助教
野上 隆史	技師
浅岡 聖二	シニアフェロー
光源第4グループ	
帯名 崇	准教授・グループリーダー
高井 良太	助教
多田野 幹人	専任技師・技術副主幹
下ヶ橋 秀典	技師
光源第5グループ	
宮内 洋司	准教授・グループリーダー
芳賀 開一	准教授
濁川 和幸	専門技師
佐藤 佳裕	技師
田原 俊央	技師
光源第6グループ	
宮島 司	准教授・グループリーダー
本田 洋介	助教
山本 将博	助教
金 秀光	特別助教
内山 隆司	技師
光源第7グループ	
加藤 龍好	教授・グループリーダー
土屋 公央	講師
阿達 正浩	助教
塩屋 達郎	専門技師

もに、コンパクト ERL を用いて大電流ビーム生成・輸送に関わるビーム力学の研究を行っている。

光源第7グループは、PF リングおよび PF-AR に設置された挿入光源の維持管理、新たな挿入光源の設計・開発、リングへの設置から運転モードの確立までを担っている。KEK 放射光計画の蓄積リングパラメータに基づいて、長直線部、短直線部に設置するアンジュレータの性能評価を行っている。また、ERL ベースの EUV-FEL 光源計画の長尺アンジュレータの設計と FEL 性能の評価を行っている。

2-2. 活動内容

1. PF リングの運転・維持・管理および開発

2015年度のPFリング運転期間中には、2015年4月に補正電磁石電源制御系の故障と16番直線部の四極電磁石冷却水のストレーナの詰まり、5月に四極電磁石電源Q8A故障（コネクタ接触不良）と四極電磁石電源QDAのアクティブフィルター異常、12月に四極電磁石電源QDBの冷却ファン故障、2016年2月に小型電源制御系の故障再発、QDB電源ファン異常及び四極電磁石電源QFDの不安定などの電磁石電源関係の不具合が起きた。原因が分かかったものについては修理を行ったが、原因が必ずしも特定されない故障も老朽化に伴って多くなってきている。補正電磁石電源制御系については既に製造停止のために修理や製造が不可能で、清掃やボード差し直し等で対処している。入射用パルス電磁石については、2015年12月19日にキッカー電磁石2の電源の充電用サイクロン(CX1159)の故障があり、予備品と交換した。また、2016年2月にはキッカー電磁石4の電源ON時に電圧が上がらず蓄積ビームを削る現象が時々起きたので、3月4日から入射毎の電源のON/OFFをやめてON状態を保つことで運転終了時まで対処した。運転停止後に原因を調査した結果、放電アーム用リミットスイッチの接点不良と判明したので修理することになった。この他に、キッカー電磁石電源のゴムホースからの少量のオイル漏れが夏期メンテナンス時に判明した。2016年夏のメンテナンス時に全ゴムホースを交換する。

PFリングのRFシステムは、単セル加速空洞4台、180kWクライストロン4本等で構成され、加速電圧1.7MVを発生できる。建設から34年が経過しRFシステムにも老朽化した部分が多くあるが、運転経費で手当てできる範囲内で老朽化対策を進めている。2015年度は、主に次の改善を行った：(a) 40kV、8Aの高電圧をPF電源棟からPF光源棟へ送電するための高電圧ケーブルの半数2本を更新し、高難燃ケーブルに置き換えた。(b) 制御系で用いられている古いCAMAC規格のアナログ・デジタル変換器を最新のプログラム・ロジック・コントローラを用いた機器に更新し、EPICSから直接制御する方式とした。(c) 立体回路系で使用中の古い水冷80kWダミーロード2本を新品に更新した。(d) 古い電動モータを使用したクライストロン用ヒーター電源ユニットを、交流安定化電源と制御ユニットの組み合わせに置き換えるための試作品を1台製作した。(e) 低電力高周波制御系（ローレベル系）で古い自動利得制御（AGC）用RFアンプ3台を新品に交換した。その他、例年行っている保守作業として、クライストロン用高圧電源4台の保守点検とローレベル系の保守点検を行った。その結果、PFの運転期間中（4/13～4/24、5/7～6/30、10/13～12/21、2/15～3/14）、RFシステムは特に大きな故障なく運転できた。

2015年2月にPFリングで2台のアンジュレータU#13

とU#28を更新する作業が行われた。それに伴って、旧2台、新2台合わせて計4台のアンジュレータをPFリング・トンネルと外を結ぶシールドから出し入れする必要が発生し、これらのアンジュレータを出し入れする通路を確保するためにBL-27基幹チャンネル上流部の3.6m超高真空配管切り離し作業を行った。使用されてきたアンジュレータ旧U#13と旧#28についてはPF-ARへ搬出を行ったが、PFリングからの搬出を行うために放射線サーベイが必要となった。サーベイについての放射線科学センターとの事前折衝については光源第五グループで行い道筋がついた段階で、アンジュレータを担当する光源第七グループへ引き継いだ。またこのPF運転停止期間中に、BL-27以外にBL-12、BL-2、BL-1基幹チャンネルで以下の保守作業を行った。BL-12基幹チャンネルのオールメタル・ゲートバルブに真空リークが見つかったため交換作業を行い、故障していた高速バルブ（FCV）の撤去作業と排気速度の低下したビームシャッターのイオンポンプ、真空封止能力が著しく低下したゲートバルブ（LV）、超高真空ゲージ、チタン・ゲッターポンプの交換作業を行った。BL-2基幹チャンネルにおいては、ゲートバルブ（LV）の閉状態の信号が出なくなる問題が停止期間中見付き、調査を行ったところ、信号系配線のハンダ不良箇所が見つかり、ハンダ付けをやり直したところ問題は解消した。BL-1基幹チャンネルにおいては、超高真空ゲージ、チタン・ゲッターポンプの交換作業を行った。2015年夏のPF運転停止期間中には、フィラメントの超高真空ゲージ、チタン・ゲッターポンプの交換作業をBL-18、BL-19、BL-20基幹チャンネルで行った。また、PFのパトライト及び運転表示灯内蛍光灯交換作業を行った。

PFリングでは長直線部改造により延長された直線部を最大限に生かすために、電子物性用アンジュレータの更新が徐々に行われてきた。これまでに5台の可変偏光アンジュレータ（EPU）が建設されて、運用が始まっている。これらのEPUの内、2015年度はU#13とU#28の2台がPFリングに設置された。U#13は周期長76mmを持つAPPLE-II型EPUであり、目標光子エネルギー範囲は50eVから1.5keVまでであり、高エネルギー領域はアンジュレータの高次光を使ってカバーする。U#28は、光子エネルギー30eVまでの低エネルギーVUV光を利用するために周期長160mmを持った6列型EPUである。U#13とU#28は、設計と建設は2013年度に並行して行われ、2014年内に実施した磁場調整・磁場測定の後、2015年2月に同時にPFリングへ設置された。U#13とU#28のユーザー運転に向けた調整スタディも並行して実施され、優先順位が高い偏光モードから順次利用可能となった。その結果2015年の秋季運転からは、2台のEPUともに全ての偏光モードでの利用実験が順調に開始された。

2. PF-AR の運転・維持・管理および開発

PF-AR の電磁石・電源の 2015 年度の運転は極めて順調であった。ただ、ビーム入射後の 6.5GeV 加速時に偏向電磁石電源が変電所の無効コンデンサのタップ切り替えのサージノイズでインターロックによってダウンして、入射のやり直しなどの時間的ロスが生じた。これは、変電所との取り合いの問題で、所内の電力の使用状況に関係すると思われる。PF-AR 直接入射路が完成すれば、トップアップ運転が PF-AR でも実現するので、近い将来はこの問題はなくなる。AR リングの電磁石電源についてはかなりの部分は更新されてきたが [2-1]、AR 西棟四極電磁石電源 8 台やインターロックシステムなど更新されていないものもまだ残されている。そのために電源の保守を行う一方で、電磁石のインターロック回路の更新などの老朽化対策の一部を与えられた予算の範囲内で少しずつ進めている。

PF-AR の RF システムは、APS 型加速空洞 6 台、1.2 MW クライストロン 2 本等で構成され、加速電圧 16 MV を発生できる。RF システムは旧トリスタン（電子陽電子衝突器）の技術で作られており、特に高周波源は KEKB RF システムと共通性がある。このため、KEKB RF グループと共同で維持・運転・改善の業務を行っている。担当者約 9 名での AR-RF 打合せを定期的に関き、短期・長期に行うべき作業についての議論、予算要望すべき事項の整理、運転状況に関する情報共有を行っている。これに基づき、今後必要となる老朽化対策を検討し、運転経費で手当できる範囲で老朽化対策は着実に進めている。2015 年度に行った主な改良点は：(a) 立体回路系に用いている古い水冷ダミーロードを更新するため、改良型の 50 kW 間接水冷ダミーロードを製作した。(b) APS 型加速空洞を放射光照射から守るための可動放射光マスク 1 台が不調になったため、モータおよびドライバーを交換した。(c) 加速空洞の入力カップラー風冷用ブローワーを更新するため全数 6 台の新品を製作した。その他例年行っている保守作業として、(A) クライストロン用冷却系等の保守作業、(B) クライストロン用高圧電源 2 台の清掃と保守点検、(C) サーキュレータ水循環用ポンプやクライストロンの蒸発冷却用に屋上に設置したエアフィンクーラーの保守、(D) APS 型加速空洞用チューナー駆動系の点検、(E) ローレベル系と制御系の保守点検、等を行った。これらの結果、PF-AR の運転期間中（5/11～6/30、10/19～12/21、2/17～3/14）RF システムは大きな故障なく順調に運転できた。

PF-AR においては、2015 年度は主に施設関係の改修作業を行った。具体的には、PF-AR 南実験棟たてどい改修工事、PF-AR 東・西実験棟便所壁改修工事、PF-AR トンネル内の不用品処分および物品整理と清掃作業を行った。

PF と PF-AR 両方に関係する事項としては、電子加速器放射線打ち合わせへの参加およびそれに付随する PF と PF-AR の放射線に関する事項への放射線科学センターとの日常的な協力を努めている。

参考文献

[2-1] 尾崎俊幸，長橋進也，第 11 回日本加速器学会年会プロシーディングス，青森，pp.685-687，2014 年。

3. コンパクト ERL の運転・維持・管理および開発

(1) バンチ圧縮用六極電磁石

コンパクト ERL (cERL) のバンチ圧縮・伸長用の六極電磁石は、2014 年と 2015 年に 2 台ずつ、計 4 台が製作され、2015 年 11 月に 2 つのアーク部の共通架台上に 2 台ずつ設置された。いずれもコア長 10 cm、主コイル 100 ターンの空冷式で、最大電流 10 A 時の実効磁場勾配（積分磁場勾配をコア長で割ったもの）は 226 T/m² である [3-1]。バンチ圧縮は、主加速空洞の off-crest 加速と第 1 アーク部の縦方向の分散によって実現するが、アーク部の四極電磁石で 1 次分散を調整し、六極電磁石で 2 次分散を補正する。これらによって 100 fs 以下の超短バンチを生成でき、5 THz までのコヒーレント光が発生可能になる [3-2]。第 2 アークではロスなく効率の良いエネルギー回収を行うように 1 次、2 次分散の調整によって逆にバンチを伸長させる。六極電磁石の各磁極には補正コイルが取り付けられており、それによって最大電流 10A 時に実効磁場勾配 0.4 T/m の歪四極磁場を発生できるようになっている。この歪四極磁場で誤差磁場や環境磁場による垂直方向の分散関数やビームプロファイルの傾きなどを補正する。図 3-1 は設置された六極電磁石である。2016 年 2～3 月期の運転でバンチ圧縮スタディを本格的に開始して、バンチ圧縮やそれに伴うコヒーレント THz 光の発生を確認できた [3-3]。また、六極電磁石の補正コイルによる歪四極磁場を使って水平・垂直の分散を補正することにも成功した。



図 3-1 第 1 アーク部に設置されたバンチ圧縮用の六極電磁石(黄色)

(2) ラスタリング用電磁石システム

2016年2～3月の1 mA 大電流運転に伴って主ダンプの熱負荷を低減するためのラスタリング運転を行った。ラスタリング用にダンプラインに設置された高速制御可能な水平・垂直ステアリング電磁石を使用した。この水平・垂直ステアリング電磁石は窓枠型の電磁石に4つのコイルを巻いたもので、ヨークは積層鋼板で作られている。2チャンネルの任意波形発生装置を使って2つの高速電磁石電源に制御信号を送って水平・垂直ステアリング電磁石を制御する。主ダンプの熱負荷を低減するために、ビームが主ダンプでビームサイズよりも格段に大きな円の内側をほぼ一様に埋めるような制御信号パターンを任意波形発生装置で発生させる。図3-2上に水平・垂直ステアリング電磁石を、図3-2下にはラスタリング中の主ダンプ直前のスクリーンモニターで記録したビーム位置のプロットを示す。このラスタリングによってCW運転でダンプ付近の真空度が改善し、熱負荷が低減されることを確認できた [3-4]。10 mAを目指す今後のcERL運転には必要不可欠なシステムで、ラスタリング無しではCW大電流運転ができないようにインターロックに組み込むことになる。

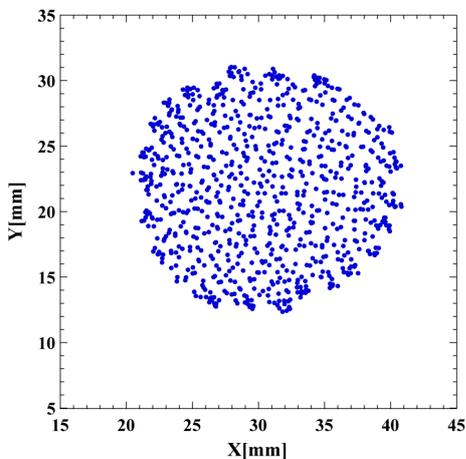
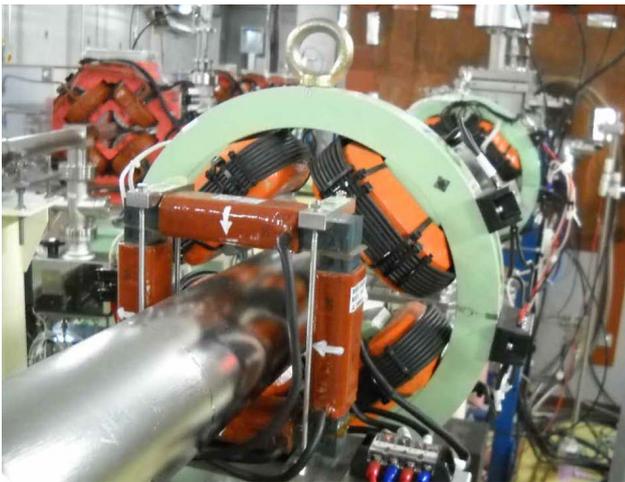


図3-2 ダンプラインに設置されたラスタリング用の高速ステアリング電磁石(上)とラスタリング中に主ダンプ前スクリーンモニターで計測されたビーム位置のプロット(下)

(3) ビーム調整・ビームダイナミクス

2015年5-6月の運転では、cERL周回部のビーム調整では電磁石の標準化を可能な限り実施し、電磁石のヒステリシスや残留磁場の影響を極力除いた。その結果、励磁電流から正確にビームの収束力を計算できるようになり、ビーム軌道やオプティクス再現性が改善した。偏向電磁石、四極電磁石、ステアリング電磁石の磁場測定結果とビーム応答を高い精度で比較するとともに、Q scan法によってエミッタンスやベータatron関数などのオプティクスを評価した [3-5]。レーザー逆コンプトン散乱の実験のためのビーム調整も実施した。2016年2-3月の運転では、バンチ圧縮のスタディを本格的に開始した。これは、主加速空洞のoff-crestで加速し、アイソクロナス(等時性)の条件を外したアークでバンチ長を変える手法で、設計通りに短いバンチが得られていることを確認した [3-3]。また、ビームロスの原因になっているビームハローのスタディも行い、ハローの系統的な測定やコリメータの効果などを調査するとともに、シミュレーションとの比較も進めた [3-6]。

(4) 加速器運転・コミッションング・マシンスタディ

2015年度は2つの期間(5/27～6/26, 2/15～3/31)に運転を行った。第1期(5/27～6/26)の運転では、電子ビームの低エミッタンス化、電磁石の標準化等による運転条件の再現性向上、テラヘルツ光を用いたバンチ長モニターの試験、ビームの大電流化に向けたビーム損失の低減などのマシンスタディを行った。夏から翌年冬にかけての停止期間中(6/27～2/14)には、平均ビーム電流を1 mAに増強するための放射線変更申請を行い、そのための追加遮蔽の設置工事を行った。また、光陰極DC電子銃の印加電圧を400 kVから500 kVに上げて性能向上を図るための改造作業を行った。ビーム電流を増加するにあたっては機器保護のための高速での異常検出とビーム停止機構が不可欠となるため、ビームロスモニターの増設と高速インターロック系を開発して設置した。変更申請の承認を得た後、第2期(2/15～3/31)の運転でビーム電流約1 mAのエネルギ回収運転を成功させ [3-7,8]、施設検査にも合格した。また、バンチ圧縮、エミッタンス低減、大電流でのレーザーコンプトン散乱(LCS)等のマシンスタディも行った。

(5) LCS ビームラインとLCS フォトン実験室の建設

cERLの南直線部において電子ビームとコンプトン散乱したレーザー光子は電子ビームの進行方向にX線として進む。このX線を加速器室外に導くためのビームラインが建設され、ビームシャッターと放射線遮蔽体が設けられた。また、加速器室南東隅にはこれを検出するためのLCS実験室が厚さ50 cmのコンクリートブロックで作られた。

(6) 新たな運転モードに対応する放射線遮蔽の増強

LCS実験の実施に伴いいくつかの放射線遮蔽の増強を行った。まず、フォトン実験室へX線を導くための貫通孔が開けられ、LCS実験時におけるその遮蔽としてビーム

シャッターの上下流に鉛遮蔽体が設置された。また、ビーム衝突点へレーザー光を導くための貫通孔と、衝突点ハッチの空調用貫通孔への遮蔽も設けられた。さらに、cERLの第2アークコリメータからLCS実験室を遮蔽するための鉛壁も設けられた。

(7) インターロックシステムの構築

cERLの安全な運転を行うために、PPS (Personnel Protect System)・MMS (Machine Mode System)等のインターロックシステムを構築しており、PPSの構築・管理運用と、加速器室入室のためのパーソナルキーシステムの構築・管理運用を行っている [3-9]。

2014年夏より始まったLCS用ビームラインの建設に伴い、インターロックシステムを設けて安全に実験出来るように整備する必要が出てきた。ビームラインが一つだけという事もあり、当初はcERL加速器のPPS等のインターロックシステムの一部としてビームラインのインターロックシステムを構築するという案もあったが、将来的な事も考えて、PF-ARと同様の機能を有するビームライン単独でのインターロックシステムとして構築を行った。この際、このビームラインの構築はPF/PF-ARのビームラインインターロックシステム担当者の協力を受けながら加速器で行った。また、PF-ARのビームライン用インターロックシステムとは下記の点で違いを持っている。

- PF-ARのビームラインインターロックシステムにある集中管理システムはビームラインが一つだけあることからビームラインのインターロックシステムと一体化して運用している。
- ビームライン用インターロックシステムのメインコントローラーは加速器の制御室に設置し、実験室側にあるコントローラーからビームシャッターを開け閉めするために必要な許可信号等を加速器の運転当番が出せる様になっている。
- 実験室のドア開閉等に使用されているインターロックシステムについては簡易版のものを使用している。

また、PPSにも小変更を行いLCS用ビームラインとの信号のやり取りが出来るようにし、それぞれのインターロックに関する情報のやり取りが行えるようになっている。これらのシステムは2014年度末までに完成し、2015年にかけて運用を行っている [3-10]。これらの準備のもと、2015年1月から運転が開始され、調整の後2月には原子力規制庁による完成検査に合格した。その後、次の段階となる電流量1 mAでの運転に向けた、ビーム損失の見積もりおよびそれに伴う加速器室内の追加遮蔽対策の検討が進められている。

(8) 高輝度大電流電子銃の開発

高輝度大電流電子銃は、ERLやCW-FELの次世代の線形加速器型光源の鍵を握る装置の一つであり、cERLで

使用している電子銃(1号機、日本原子力研究開発機構(JAEA)が中心になって開発)と、AR南棟の試験エリアで開発している電子銃(2号機)の2台を用いて開発を進めている。1号機はcERLのビーム試験開始時から使用されており、390 kVの電圧で極めて安定に電子ビームを生成・加速できることを実証している。設計目標である500 kVに加速電圧を上昇させるために、2015年夏に電子銃の絶縁管の増設作業を実施した。2016年3月のcERLのビーム試験において、390 kVから450 kVに電圧を上げ、安定なビーム生成・加速を実証することができた。今後電子銃の電圧印加試験を継続し、500 kVでのビーム生成試験を目指している。2号機の開発では、高電圧印加試験を実施したあとに極低電流のビーム引き出し試験を開始している。2015年からは電流増強に向けた放射線遮蔽の増強作業を行っている。

電子を生成するためのカソードの開発については、名古屋大学、広島大学、JAEA等と協力しながら開発研究を進めている。コンパクトERLの運転においては、GaAs半導体の表面に負の電気親和性をもたせたカソードを使用しており、平均0.9 mAのビーム生成を実証し、課題であるカソード寿命に関する試験を進めることができた。また、さらなるカソード寿命の向上を目指して、新たな材質としてマルチアルカリカソードの開発を行っている。カソード材質の開発は広島大学が中心となって進めており、開発されたカソードをcERLにインストールして試験を行うことを目指している。KEKでは広島大学で作製されたマルチアルカリカソードを性能劣化させずにKEKまで移送するための真空輸送容器の開発を行い、2016年に移送試験を行う予定である。

参考文献

- [3-1] A. Ueda, K. Harada, S. Nagahashi, T. Kume, M. Shimada, T. Miyajima, N. Nakamura and K. Endo, Proc. of IPAC2016, Busan, Korea, pp.1111-1114 (2016).
- [3-2] N. Nakamura, M. Shimada, T. Miyajima, K. Harada, O. A. Tanaka and S. Sakanaka, Proc. of IPAC2015, Richmond, VA, USA, pp.1591-1593 (2015).
- [3-3] M. Shimada, N. Nakamura, T. Miyajima, Y. Honda, T. Obina, R. Takai and A. Ueda, K. Harada, Proc. of IPAC2016, Busan, Korea, pp.3008-3010 (2016).
- [3-4] 原田健太郎, 中村典雄, 帯名崇, 島田美帆, 宮島司, 本田洋介, 野上隆史, 谷本育律, 本田融, 高井良太, “cERLのラストリングシステム”, 第13回日本加速器学会年会, 千葉, 2016年8月8-10日, MOP079.
- [3-5] 島田美帆, 中村典雄, 高井良太, 上田明, 宮島司, 本田洋介, 帯名崇, 原田健太郎, 第12回日本加速器学会年会プロシーディングス, 敦賀, pp.971-974, 2015年.
- [3-6] O. Tanaka, N. Nakamura, M. Shimada, T. Miyajima, T. Obina and R. Takai, Proc. of IPAC2016, Busan, Korea, pp.1843-1846 (2016).

- [3-7] S. Sakanaka, K. Haga, Y. Honda, H. Matsumura, T. Miyajima, T. Nogami, T. Obina, H. Sagehashi, S. Shimada and M. Yamamoto, "Measurement and Control of Beam Losses under High-Average-Current Operation of the Compact ERL at KEK", in Proceedings of the 7th International Particle Accelerator Conference (IPAC'16), Busan, Korea, May 8-13, 2016, TUPOW038.
- [3-8] 坂中章悟 他, "コンパクト ERL におけるビーム電流約 1 mA の運転", 第 13 回日本加速器学会年会, 千葉, 2016 年 8 月 8-10 日, WEOM15.
- [3-9] 濁川和幸, 長橋進也, 第 11 回日本加速器学会年会プロシーディングス, 青森, p.1254 -1258, 2014.
- [3-10] 濁川和幸, 小菅隆, et al., 第 12 回日本加速器学会年会プロシーディングス, 敦賀, p.1290 -1293, 2015.

4. PF-AR 直接入射路計画

現在の PF-AR のビーム入射路（現入射路）は、図 4-1 に示すように KEKB のビーム輸送路（KEKB-BT）と共有区間を持っており、PF-AR への入射時には KEKB-BT の一部区間を PF-AR 入射用に最適化した上で 3 GeV の電子を入射している。従って、PF-AR への入射時には、KEKB への入射を止めて LINAC を 20 分程度専有して行うことになる。しかしながら、現在アップグレード中の SuperKEKB では、蓄積ビームの寿命が 10 分程度と短くなるため、今までのように LINAC を専有しての入射が難しくなり、PF-AR も 50 Hz で高速スイッチングされたビームを使って入射する必要が出てきた。そこで、3 GeV の電子

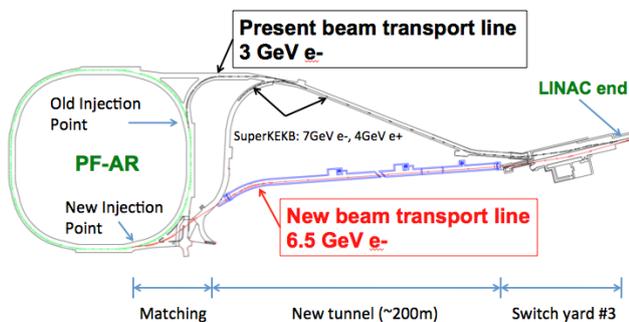


図 4-1 PF-AR 新ビーム輸送路（赤線）

を入射していた現入射路の使用をやめ、6.5GeV の電子ビームを PF-AR に直接入射するための新しいビーム入射路（PF-AR 直接入射路：図 4-1 の赤線）を建設しようという計画が現在進行中である [4-1] [4-2]。これにより、今後は 3 GeV で入射した後に 6.5 GeV まで加速する必要がなくなり、6.5 GeV でのフルエネルギー入射によって将来的にはトップアップ運転も可能となる。PF-AR 直接入射路建設は順調に進んでおり、トンネル建設は 2013 年に、設備工事は 2014 年に完了した。また、2015 年夏からは新規製作分の電磁石架台の設置作業および第 3 スイッチヤード（SY3）の電力ケーブルの配線が完了した。PF-AR 直接入射路に使用する電磁石は、PF-AR の現入射路で使用している電磁石（偏向電磁石 24 台、四極電磁石 18 台）を基本的には再利用するが、6.5 GeV に入射エネルギーを上げるために、入射点付近の四極電磁石については新規製作した。SY3 に設置する偏向電磁石の内の 2 台及び新入射点に設置する DC セプタムも新たに製作した。今後の予定として、現入射路から PF-AR 直接輸送路への電磁石の移設を 2016 年の 7 月初めから 12 月末までに行う。また、PF への入射については SY3 内のみ改造となるため、SY3 および入射器運転時に立ち入り禁止となるトンネル上流部については 9 月末までに設置作業を行う。これによって PF は 2016 年秋のユーザー運転が可能となる。

現在のキッカー及びセプタム電源システムには、3 GeV 入射用であり PF-AR 直接入射路用に 6.5 GeV の入射には使用できないために新規に 6.5 GeV 用のシステムを製作する必要がある。そのためのキッカー電源システム及びセプタム電源システムを製作した。新規のセプタム電磁石は、AR 直接入射路最終段に 2 台設置され、キッカー電磁石は蓄積リングの新入射点近くに 3 台設置される。キッカー及びセプタム電磁石は、どちらもパルス動作をし、最大繰返しは 5Hz である。セプタム電磁石はパルス幅 100 μ sec, 最大電流 8000 A であり、これにより 6.5 GeV の電子ビーム

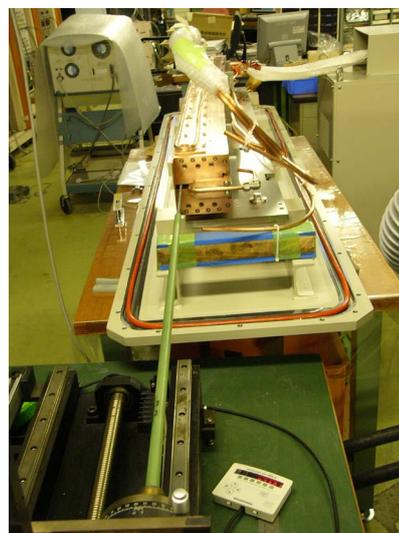


図 4-2 セプタム電磁石の磁場測定。セプタム電磁石（奥）の Gap 内にサーチコイルを挿入して、磁場を測定している。

を3°偏向する。キッカー電磁石は、パルス幅2.4 μsec、最大電流3500 Aである。これにより蓄積電子を1.6 mrad偏向し、計3台を使用してパルスポンプを構成する。これらの電磁石の磁場測定を行うために、PF地下機械室内にテストベンチを設置した。現在、セプタム電磁石3台についてビーム軌道内の励磁曲線や磁場分布及びもれ磁場の測定を行っている。図4-2は、磁場測定中のセプタム電磁石である。

参考文献

- [4-1] 高木宏之 他, 第11回日本加速器学会年会プロシーデングス, 青森, pp.990-994, 2014年.
 [4-2] 長橋進也 他, “PF-AR 直接入射路の建設”, 第13回日本加速器学会年会, 千葉, 2016年8月8-10日, MOP075.

5. KEK 放射光計画

PFリングは1978年に建設開始, 1983年にユーザー共同利用が開始された。その後, 1996年にはエミッタンスを大幅に下げる高輝度化改造が行われ, 2005年には真空封止短周期挿入光源を導入し, 10 keV領域のアンジュレータ光を利用可能にした直線部増強改造が行われた。建設されてから既に30年以上が経過し, 老朽化が著しくなっている上に, 性能としても時代遅れになりつつある。そこで, 将来計画として, 最先端の極低エミッタンス蓄積リングを設計することになった。

2010年代に登場し, 従来の第3世代光源よりも1桁以上小さいエミッタンス, 2桁近い輝度の向上(現在のPFと比較すると約4桁の向上)を可能にした, HMBA (Hybrid Multi Bend Achromat) 型ラティスを採用する [5-1,2]。エネルギー3 GeV, 周長約570 m, 自然エミッタンスは132.5 pm-radである。リングには5.6 m直線部が20本(うち1本は入射用に最適化), 1.2 m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500 mA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, 8.2 pm-rad)まで増大する。主なパラメータを表5-1に, 光源の輝度を図5-1に示す。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, 3 GeVのERL計画と比較

表5-1 リングのパラメータ

エネルギー	E [GeV]	3 GeV		
ラティスの型		HMBA (Hybrid Multi-Bend Achromat)		
長周期数	N_s	20		
周長	C [m]	570.721		
1.2 m 短直線部数		20		
5.6 m 長直線部数		20		
セル数		20		
RF 周波数	f_{RF} [MHz]	500.0735096		
ハーモニック数	h	952		
RF 電圧	V_{RF} [MV]	2		
Bucket height	%	3.98		
Energy loss	MeV/rev	0.2984335		
モーメントムコンパクト	α	2.1893×10^{-4}		
ベータatronチューン	ν_x, ν_y	48.58, 17.62		
damping turns x,y,z	[turns]	15364, 20105, 11887		
damping time x,y,z	[ms]	29.25, 38.28, 22.63		
beam current	[mA]	0	200	500
hor. emittance	[pmrad]	132.51	230.5	314.74
ver. emittance	[pmrad]		8.1	8.2
y/x	[%]		3.5	2.6
Touschek lifetime (2.8% mom. acc 200s _x)	[h]	-	2.9	1.8
Energy spread	$\times 10^{-4}$	6.42	7.24	8.22
Bunch length	mm	2.73	3.08	4.18

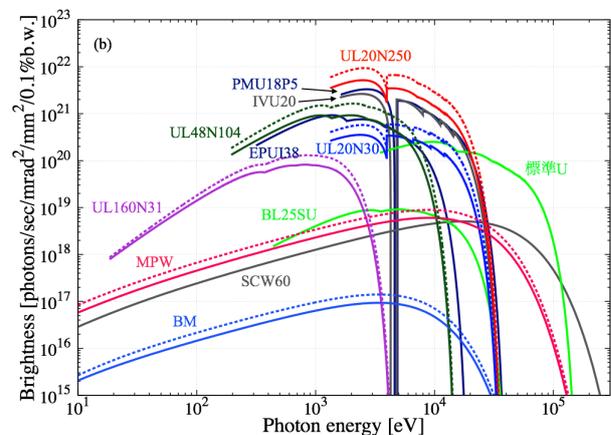
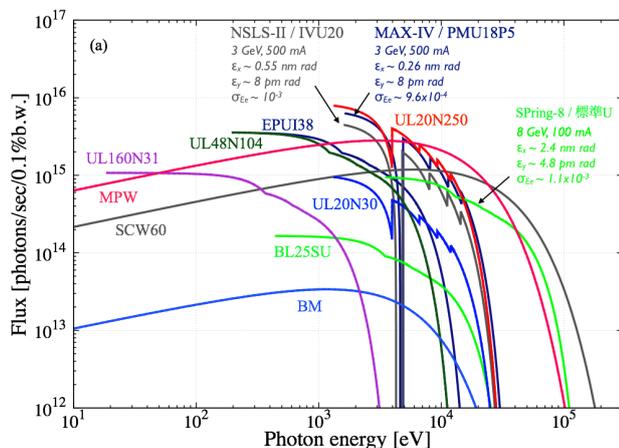


図5-1 最新の3 GeVリングであるNSLS-IIおよびMAX-IVと比較した全光束スペクトル(a)および輝度スペクトル(b)。実線はIBSあり, 破線はIBSなしの場合。

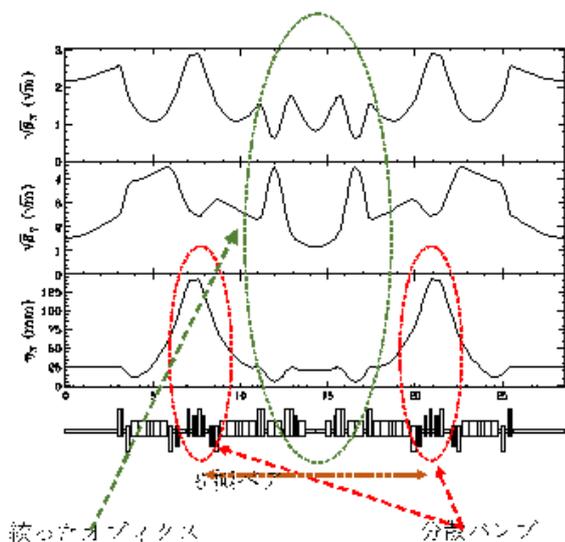


図 5-2 ノーマルセルのオプティクス

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 HMBA (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パンプの導入にある。ノーマルセルのオプティクスを図 5-2 に示す。低エミッタンス実現のため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ために、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 Touschek 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 (据付誤差 50 μm , 磁場強さ 0.05%, 傾き 0.1 mrad) を考えても、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 (入射点で約 1 cm, 運動量 2.5%) を確保することができた。現在、ハードウェアの検討、光源性能とダイナミックアパーチャのさらなる向上のためのオプティクスやラティスの最適化を引き続き行っている。また、狭いアパーチャを持つ真空ダクトや真空封止アンジュレータの銅シートおよび NEG

コーティングなどによる抵抗性インピーダンスによる発熱や多バンチビーム不安定性の影響についても評価を進めている [5-3]。

高周波加速システムについては、まず PF リングで現在使用中と同型の加速空洞を 4 台使用する場合について、RF システムの規模を見積った。挿入光源を含むと合計 RF 電力は約 500 kW, 加速電圧約 2 MV 程度になる。次に、PF 型空洞を用いた場合に、空洞内の高次モードによるバンチ結合型ビーム不安定性の評価を行った。ビームの周回周波数は、PF での 1.6 MHz から新リングでは約 575 kHz に下がるため、現在の PF 方式ではビーム不安定性を避けるのが難しくなる傾向があり、一部の高次モードについてビーム不安定性が避けられない恐れがある事がわかった。このため PF 型空洞はバックアッププランとして考え、高次モードの減衰性能に優れた加速空洞の検討を今後行ってゆく方針とした。また、加速周波数の 2 ~ 4 倍の周波数の高調波電圧を加えてバンチ長を延ばす方式は、バンチ内散乱によるビーム寿命低下 (Touschek lifetime) やエミッタンス増大の改善に有望である。このための高調波 RF システムの検討も進めている [5-4]。これらの結果を、次期放射光源の概念設計報告書 (CDR) [5-5] の高周波システムの章にまとめた。

KEK 放射光計画における蓄積リングは、1 本の入射セルと 19 本のノーマルセルにより構成され、各ノーマルセルは 5.6 m の長直線部および 1 m の短直線部を有する極低エミッタンスリングである。表 5-2 には、蓄積電流 500 mA で想定される Intra Beam Scattering (IBS) によるエミッタンスの増大を考慮した場合 (IBS あり) と、高調波加速空洞による IBS の抑制などを想定して IBS を考慮しない場合 (IBS なし)、それぞれの場合の各光源点でのビームサイズを示す。表 5-3 に、広いスペクトル領域をカバーすることを念頭に想定される標準的な光源装置を示す。これらのパラメータから計算される各光源装置の全光束スペクトルおよび輝度スペクトルを図 5-1 に示す。図 5-1 には、SPring-8 [5-6, 7] の標準アンジュレータ ($\lambda=32$ mm, $Nu=140$) および BL25SU ($\lambda=120$ mm, $Nu=12\times 2$), 最新の 3 GeV リングである MAX-IV [5-8] の PMU18P5 ($\lambda=18.5$ mm, $Nu=205$) および EPUI38 ($\lambda=38$ mm, Nu

表 5-2 光源点における電子ビームサイズおよび角度発散

v03_68)	IBS あり			IBS なし		
	偏向部	短直線部	長直線部	偏向部	短直線部	長直線部
電子エネルギー E [GeV]	3			3		
蓄積電流 I [mA]	500			500		
エネルギー拡が σ_E/E	7.9E-04			6.4E-04		
水平サイズ σ_x [μm]	12	21	44	7.8	16	30
水平角度発散 σ'_x [μrad]	29	22	8.1	19	14	5.3
垂直サイズ σ_y [μm]	13	3.3	4.4	13	3.3	4.3
垂直角度発散 σ'_y [μrad]	0.8	2.5	1.9	0.8	2.4	1.8

表 5-3 KEK 放射光計画で想定する標準的な光源装置

	BM	MPW	UL20N30 (短直線部)	UL20N250	UL48N104	UL160N31
周期長 λ_u [mm]		120	20	20	48	160
周期数 N_u		42	30	250	104	31
磁石列長 L [m]		5.0	0.6	5.0	5.0	5.0
最小 Gap[mm]		12	4	4	12	12
(最大) 磁場 $B_{(max)}$ [T]	0.68	1.80	1.13	1.13	0.9	0.5
最大 K 値 K_{max}		20.2	2.1	2.1	4.0	7.5
臨界エネルギー E_{pc} [keV]	4.1	10.8				
1 次エネルギー $E_{p1}(K_{max})$ [keV]			1.3	1.3	0.2	0.02
出力 [kW]	0.039 [kW/mrad]	46.5	2.2	18.2	11.5	3.5

=103) と NSLS-II [5-9] の IVU20 ($\lambda_u = 20$ mm, $N_u = 148$) および SCW60 ($\lambda_u = 60$ mm, $N_u = 17$, $B = 3.5$ T) をともに示す。

図 5-1 から、KEK 放射光計画では光エネルギー 20 keV 程度以下の領域において、SPring-8 の標準アンジュレータに比べて高い光束および輝度が得られることがわかる。また、最新の 3 GeV リングである MAX-IV や NSLS-II に比べてより低いエミッタンスを実現可能であることから、同等の性能を持つ挿入光源を使うことで、より高い輝度が得られることがわかる（例えば、UL20N250, PMU18P5, IVU20）。

KEK 放射光計画の偏向部光源 BM は PF リングや PF-AR リングに比べて低い臨界エネルギーを有するため、硬 X 線領域の光を補償するためのウィグラーの設置を検討している。図 5-1 には、現在 PF リングで稼働中の多極ウィグラー MPW05 の磁気回路から推定した白色 X 線光源 MPW を示した。なお、NSLS-II ではさらに高いエネルギー領域まで広がる SCW60 などでも検討されている。

参考文献

- [5-1] K. Harada, T. Honda, Y. Kobayashi, N. Nakamura, K. Oide, H. Sakai, S. Sakanaka and N. Funamori, Proc. of IPAC2016, Busan, Korea, pp.3251-3253 (2016).
- [5-2] 原田健太郎, 小林幸則, 中村典雄, 生出勝宣, 第 12 回日本加速器学会年会プロシーディングス, 敦賀, pp.1013-1015, 2015 年.
- [5-3] 中村典雄, “HMBA 型 3GeV 放射光源における抵抗性インピーダンスの影響”, 第 13 回日本加速器学会年会, 千葉, 2016 年 8 月 8-10 日, TUP073.
- [5-4] 山本尚人 他, “高輝度光源に向けたバンチ伸張方法の検討”, 第 13 回日本加速器学会年会, 千葉, 2016 年 8 月 8-10 日, TUP013.
- [5-5] KEK-LS CDR Accelerator; http://www2.kek.jp/imss/notice/assets/2016/06/08/KEKLS_CDR_Accelerator_160608.pdf
- [5-6] SPring-8-II Conceptual Design Report, RIKEN SPring-8

Center, (November, 2014).

- [5-7] http://www.spring8.or.jp/ja/about_us/whats_sp8/facilities/bl/light_source_optics/sources/insertion_device/intro_insertion_devices/
- [5-8] Detailed Design Report on the MAX IV Facility, MAX IV Facility, First edition (August, 2010) (<https://www.maxlab.lu.se/node/1136>).
- [5-9] NSLS-II Source Properties and Floor Layout (April 12, 2010)(<https://www.bnl.gov/ps/docs/pdf/SourceProperties.pdf>).

6. ERL ベースの EUV-FEL 光源計画

次世代の半導体リソグラフィでは 13.5 nm の平均高出力 EUV 光源を必要としている。その候補として、KEK, JAEA, 東芝は共同で ERL をベースとした EUV-FEL 光源を提案している [6-1]。これはコンパクト ERL の設計を基本としながらも、入射器エネルギーを 2 倍の 10 MeV, 周回エネルギーを 800 MeV まで増強し、周回電流値としては実現可能性の高い 10 mA に抑えた設計となっている。この計画では、直線部に複数のアンジュレータユニットで構成される全長 100 m 級の単一通過型 FEL 装置を設置することで、平均 EUV 出力 10 kW 以上を目指している。この光源の設計では、500 kV 光陰極電子銃で実現される高輝度電子ビームを、その低エミッタンスを維持したまま、加速、バンチ圧縮し、さらに FEL 光を発生させた後、デバンチング、減速・エネルギー回収までを行うもので、より現実的なシミュレーションが必要とされる。そこで、バンチ圧縮後の電子ビームの位相空間分布を直接取り込んだ FEL シミュレーションを行った。その結果、平均電流値 10 mA に対して EUV 光源として必要とされる平均出力 10 kW を上回る 12 kW が得られることがわかった。また、FEL 発生後の電子の位相空間分布を用いたシミュレーションにより、エネルギー回収が可能であることが示された [6-2, 3]。

参考文献

- [6-1] Norio Nakamura, Proc. of 2015 International Workshop on EUV Lithography, Makena Beach & Golf Resort, Maui, Hawaii, June 15-19, 2015 (<http://www.euvlitho.com/2015/Proceedings%202015%20EUVL%20Workshop.pdf>)
- [6-2] Ryukou Kato, Proc. of 2016 International Workshop on EUV Lithography, CXRO, LBNL, Berkeley, CA, June 13-16, 2016 (<http://www.euvlitho.com/2016/2016%20EUVL%20Workshop%20Proceedings.pdf>)
- [6-3] 中村典雄, 加藤龍好, 宮島司, “ERL を用いた高出力 EUV-FEL 光源のシミュレーション研究”, 第 13 回日本加速器学会年会, 千葉, 2016 年 8 月 8-10 日, TUP074.

2-3. 今後の展望

光源第1グループでは、PFリングとPF-ARの電磁石システムにおいて引き続き老朽化対策と性能向上に努めるとともに、現在進められているPF-AR直接入射路と関連する装置の建設を2016年度中に完了させてそのビームコミッショニングを行っていく。KEK放射光計画ではリングのラティスとオブティクスの改善を図り、それに基づいたビームダイナミクスや電磁石の設計も進めて行く。また、シンクロトロン入射器のラティス設計や変形・振動に関連する建屋の基礎構造の検討も行う。コンパクトERL関係では引き続き電磁石の維持管理と（運転時間が与えられれば）ビーム運転を行い、バンチ圧縮やビームハローなどの性能向上に直結するビームビームダイナミクスの研究を行う。EUV-FEL光源計画では、S2E（Start-to-End）シミュレーションとバンチ圧縮方法の改善を進める。

光源第2グループでは、PFリングとPF-ARのRFシステムについては、引き続き運転経費で可能な範囲で老朽化対策と性能向上に努める。また適当な時期に、PF-ARクライストロン用高圧電源の制御盤更新や、ローレベル系・制御系の更新を計画している。KEK放射光計画については、計算機シミュレーションにより加速空洞と高調波空洞の概念設計を進め、次の低電力空洞モデルでの高周波特性（特に高次モード特性）の測定に進む準備を行う。コンパクトERLについては、2015年度末で運転が一旦終了した事から、今までの研究成果を論文で報告する準備中である。

光源第3グループでは、PFリングとPF-ARの真空システムの高度化を進めていくと同時に、KEK放射光計画実現に向けて低エミッタンスリングの真空系の設計、開発を推進する。2016年度はPF-AR直接入射路とPF-ARの新入射点の建設を完成させる。さらに、PFリングで老朽化がみられる超伝導ウィグラーは、新規開発、更新を目指し、ビームラインと協力し検討を進める予定である。

光源第4グループでは、PF-AR直接入射路のビーム診断システムを構築する。並行して各種の制御ソフトウェア開発をすすめることで円滑なコミッショニングを実現する。また、PFリング、PF-AR、コンパクトERLでの既存ハードウェアの高性能化・老朽化対策を進め、特にPFリングでのビーム位置測定と高速軌道安定化システムの更新に向けての開発をすすめる予定である。これはKEK放射光計画における診断装置に直結する共通の技術である。

光源第5グループでは、PFリング、PF-AR、コンパクトERLでの定常的な活動に加えて、2016年夏から冬にかけてPF-AR直接入射路関係の整備のために、新たに放射線遮蔽を行なう必要のある箇所があるため、その遮蔽の設計および設置にかかる様々な作業が必要となる。また直接入射路に関連して設置されるシャッターや配管、架台等の設計、設置作業も行う予定である。関係者との密接な協力のもとで、円滑に整備を行いたいと考えている。

光源第6グループでは、ERLベースのEUV-FEL光源や高繰り返しX線FEL光源（CW-FEL）等の次世代の線形加速器型光源で鍵となる高輝度大電流電子銃の開発を継続するとともに、KEK放射光計画の実現に向けて重要となる装置開発を他のグループと協力しながら行う予定である。高輝度電子銃開発では、東芝、JAEA（2016年4月からQST）と協力しながらERLベースのEUV-FEL光源で要求される平均10 mAの電子ビーム生成に向けた試験を目指すとともに、カソード寿命を評価するための試験を継続する予定である。また、PFの長期計画としてCW-FEL光源の調査・研究を行っていく。KEK放射光計画に対しては、高輝度電子銃開発で培ってきた極高真空技術を活かして、真空装置を担当する第3グループと協力して真空装置開発を進めていく。これまでに、真空チェンバー内壁に排気作用をもたせるコーティング（NEGコーティング）開発で協力を進めてきている。また、今後は他の装置開発においても協力していく予定である。

光源第7グループでは、PFリングおよびPF-ARに設置された挿入光源では、引き続きその維持管理を行っていくとともに、各ビームラインの担当者・ユーザーと協力して、老朽化した挿入光源の更新を進めていく。また、KEK放射光計画では、今後、高出力光源であるMPWをはじめとするすべての光源に関して、本計画で目指すサイエンスからの要請、蓄積ビームのエミッタンスへの影響、RFへの負荷、ビームライン等への熱負荷などを総合的に検討しながらパラメータの選定を行っていく。ERLベースのEUV-FEL光源計画は、KEK、JAEA、東芝の共同研究体制から、10企業、1コンソーシアム、7大学、3研究機関を含んだEUV-FEL光源産業化研究会に発展した。今後はこの新たな枠組みを基盤として、EUV-FEL光源計画を国内外の企業に周知していくとともに、設計・開発段階からプロトタイプ機の建設段階に移行する努力を開始する。