

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

加速器科学研究施設・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ッ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、2016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ニアック実証器（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、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	特別助教
東 直	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	准教授
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	准教授
阿達 正浩	助教
塩屋 達郎	シニアフェロー

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。また、光源第3グループに協力して、新たな真空排気系の開発を行っている。

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

2016年度の運転期間中に生じた不具合は、PF-BTの冷却水ストレーナの詰まり、小型電源制御系の誤動作の再発である。BTのストレーナは長らく清掃されておらず、粘土状の汚れがびっしり詰まっている状態であった。問題が発生した電磁石のストレーナについては、ワイヤブラシで綺麗に清掃した。念のために他の箇所についても順に対処を行う予定である。小型電源の制御系の誤動作については、クレートの交換、インターフェースボードの交換など順に対処してきたが、残念ながら再発してしまった。問題発生箇所を特定するために、電源ラック毎に直接ボードコンピュータを設置する形態に制御系を変更するように準備を進めている。2015年に発生したQFD電源の不安定性については、電源のモニターを設置して常時監視しているが、2016年度は全く起こらなかった。入射電磁石関係も特に大きなトラブルは無く運転は順調だった。ただ、夏期メンテナンス時にオイル漏れが判明したキッカー電磁石電源のゴムホースを全数交換した。

高周波加速(RF)システムに関しては、クライストロン用高圧電源、低電力RF制御系(ローレベル系)等について、通常の保守作業を行った。また、2016年度には次の老朽化対策を行った:(1)PF電源棟からPF光源棟まで(約250m)の高電圧送電ケーブルのうち2系統を高難燃ケーブルに置き換えた。これで4系統全てが高難燃ケーブルとなった。(2)クライストロンの収束コイル用電源のうち2系統分のオーバーホールを行った。(3)クライストロン用のヒーター電源ユニット1台を新型に置き換えた。(4)加速空洞に用いるイオンポンプ用電源4台を更新した。

PFリングの超伝導ウィグラーはすでに20年以上の稼働を誇っているが、最近再液化機の冷却システムのJoule-Thomson弁のつまりで運転を中断する頻度が増えてきた。毎年の定期保守だけでは再液化機の維持は難しいと判断し、2015年の夏期休止期間中に再液化機の更新を行った。超伝導ウィグラーは2011年の大地震の後遺症もあり、ビームダクトや断熱真空にリークが発生している。リークシーラーによる応急措置によって運転を維持してきたが、特に断熱真空に破断の危険があると判断し2016年12月まで一旦運転を休止した。2017年度の夏期休止期間中にビームダクトを更新し、2017年秋からの運転再開を目指して準備を進めている。

現在PFリングでは、セプタム電磁石チェンバーの真空内にある水冷パイプから長年の使用による腐食が原因と思われる真空リークが発生している。これも現状のリークシーラーによる応急措置での運転継続では腐食の進行による長期運転休止を招く危険があるので、2017年には上流の放射光アブゾーバの増強を行い、セプタムチェンバーの水冷を止めて腐食進行を防ぎ、次年度にはセプタム電磁石及

びビームダクトを更新して根本的な解決を図る計画である。更新時の設計においては入射点のアーチャを見直しことによってPFリングの入射効率を改善できる可能性がある。

高速軌道安定化システム(BPM及びGlobal Orbit Feedback)をはじめとする基本的な診断機器は、安定して可動している。ビーム電流が減少したときにビーム進行方向の不安定現象が発生し、ユーザーからみるとビームの強度変動となって観測されることがあった。マシンスタディを通して不安定現象を避けるためのフィルパターンを発見し、ユーザー運転に供している。今後は任意のフィルパターンに対応可能な四極モードフィードバックシステムの検討を行っている。より根本的に解決するためにはインピーダンス源の特定も並行して進める必要がある。

PFリングの基幹チャンネルについては、昨年度と同様に、維持・保守作業を行った。また、PFリング、PF-AR、cERL安全系の維持・保守作業を行った。

挿入光源関連では、2016年度のPFリングの運転において、挿入光源に起因するトラブルが7件発生している。ほとんどはID Serverに関連するもので、Gap操作ができなくなるトラブルだが、再起動や光源側制御からの操作で復旧している。それ以外のトラブルでは、Gap変更時と復旧時の軌道の変動がそれぞれ1件あった。また、PFリングとPF-AR共通の開発事項として、これまで新規に挿入光源が設置されるたびに個別に開発されてきた制御系を共通化する試みを開始した。これは将来的なPFリング制御系の更新作業や後継者への引継ぎを容易にすること、そしてKEK放射光の建設時の統一的な挿入光源制御系の構築への布石となることを念頭に置いている。さらに企業との共同研究により挿入光源の磁極を支える金属梁に磁場測定器を取り付けビーム軸方向に自在に動かせるようにすることで、リングに設置した状態で挿入光源の磁場分布を評価できる新しいタイプの磁場測定装置の開発も進めている。2016年度は小型のモデル・アンジュレータにこの磁場測定装置を組み込み、駆動試験を行った。次年度はこれにホール素子を組み込んで実際に磁場測定の試験を行う。また今後新規に製作される挿入光源にはあらかじめ取り付け可能な治具を組み込むことで、新型磁場測定装置が利用できるように開発を進めていく。

2. PF-ARの運転・維持・管理および開発

2016年5月10日から6月30日までビーム運転期間に、偏向電磁石電源で3回ほどインターロックが作動した。その内2回は6600Vラインの電圧の乱れによるものであった。残りの1回は室外に設置してある高調波フィルタの温度異常によるもので、急激な気温上昇と直射日光により筐体内部でインターロックが働いた状態になったようだ。ただ

し、いずれも短時間で復帰できた。2017年2月6日から3月10日までの運転期間では、事前点検ではいくつか問題が生じたが、実際のビーム運転では順調であった。

PF-ARのRFシステムについては例年通り、クライストロン系、クライストロン冷却系、クライストロン用高圧電源、立体回路系、空洞チューナー駆動系、ローレベル系の保守作業を行った。また、次の老朽化対策を進めた：(1) 傷みの見つかったAR東棟のマジックTを交換した。(2) 30 kW ダミーロード1台を更新した。(3) AR西棟のクライストロン冷却系動力盤内のブレーカーを更新した。(4) 加速空洞の入力カップラーの空冷用ブロワー6台を更新した。(5) 東棟のHOMロード用流量計8台を更新した。(6) リング改造作業のため西直線部のAPS型加速空洞2台が気開放された機会に、コールドカソード真空ゲージ(CCG)4個と粗排気用ターボ分子ポンプ1台を更新した。今後の老朽化対策としては、クライストロン用高圧電源の制御盤(2台)の更新が重要である。現在の制御盤には、既に製造中止されたPLCが用いられており、故障した場合には長期の運転休止の恐れもあるため、これらの制御盤を更新するための予算を各方面に要望している。

2016年度のPF-AR運転では挿入光源に起因するトラブルが1件発生している。Gap操作ができなくなるトラブルであったが、ID Serverの再起動により復旧している。

3. コンパクト ERL の運転・維持・管理および開発

コンパクト ERL は、次世代放射光源に向けた ERL 加速器の実証機として開発が進められてきたが、2016年6月に策定された KEK Project Implementation Plan (KEK-PIP) に基づいて、その開発目的を放射光利用から産業利用および放射光長期計画 (CW-FEL 等) に向けた基礎開発に転換することになった。産業利用としては、最先端の半導体製造法である極端紫外 (EUV) 光を用いたリソグラフィー用の大出力光源を開発することが一つの大きな目標となる。これまでのリソグラフィー用光源では不可能な出力 10 kW 以上の EUV 光源を目指して、ERL と自由電子レーザー (FEL) を組み合わせた加速器による方法の検討と、それに向けたビーム性能開発を開始した。

(1) 加速器運転・コミッショニング・マシンスタディ

コンパクト ERL は 2013 年から最大ビーム電流 $1 \mu\text{A}$ での加速器運転を開始し、毎年最大ビーム電流を 10 倍に増強しながらコミッショニングを進め、2016 年に平均 1 mA の電子ビームのエネルギー回収運転に成功し、また平均 10 mA に増強する目途も付いた状態である。これまでのビーム運転におけるバンチ電荷は 7.7 pC であったが、ERL を用いた EUV-FEL 光源や CW-FEL 光源では、従来よりも高いバンチ電荷が要求される。2017 年 3 月のコンパクト ERL の運転では、まずは EUV-FEL 光源用のビーム性能をターゲットとして最大バンチ電荷を 60 pC に増強し、短バンチ長かつ低エミッタンスのビームを実証することを目標として加速器運転を行った。17 日間のビーム運転期間中

に、高バンチ電荷ビームの生成・加速試験、入射器診断ラインでのビーム性能評価 (エミッタンス・バンチ長測定)、周回部におけるバンチ圧縮試験および THz 光によるバンチ長診断試験、ビームハローに関する試験を行った。

(2) 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、コンパクト ERL で使用している電子銃 (1号機、JAEA (2016年4月より量子科学技術研究開発機構 (QST)) 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2012年にJAEAからKEKに移設されたあとは、絶縁体のトラブルのため設計電圧より低い 390 kV の電圧で運転されてきた。設計電圧である 500 kV まで電圧を上げるために、2015年7月に絶縁管を増設し、高電圧印加試験を継続して実施し、2017年3月のコンパクト ERL 総合運転では 450 kV の電圧で安定なビーム運転を行うことができた。高電圧印加試験では、2000回以上に及ぶ放電現象を解析した結果、放電開始電圧と放電停止電圧との関係から、安定に電圧印加できる条件を示すことができ、これらの成果は Applied Physics Letters 誌に掲載された [3-1]。2号機の開発では、最大引き出しビーム電流を 100 nA から $1 \mu\text{A}$ に増強するために、2016年7月に電子銃下流に接続されたビームライン周辺に放射線遮蔽の増強を行い、2017年3月に機構内の放射線施設検査に合格することができた。

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、QST 等と協力しながら開発研究を進めている。さらなるカソード寿命の向上を目指したマルチアルカリカソードの開発では、広島大学で成膜されたカソードを2017年1月に真空輸送容器を用いて KEK まで輸送し量子効率を測定する試験を行った。電子銃1号機でカソードの量子効率測定を実施したところ、量子効率はゼロであり、輸送中に劣化していることが判明した。この対策のために2017年中に輸送中の条件 (真空圧力、加速度) をロギングする装置を追加して再度輸送試験を行う予定である。

(3) 高バンチ電荷生成、加速、輸送試験

2017年2月から3月にかけて、EUV-FEL 光源のビーム性能を目標として、コンパクト ERL の総合運転を実施した。最大バンチ電荷は 60 pC まで引き上げられ、この電荷で短バンチ長かつ低エミッタンスビームの生成・加速・輸送試験を行った。今回が大バンチ電荷での最初の試験となるため、まずは電子銃・入射器における低エミッタンスビーム生成に焦点を絞り、入射器のエネルギーを 2.9 MeV から 5.1 MeV へ引き上げた。この場合、冷凍能力の関係で周回部のエネルギーを 20 MeV から 17 MeV へ引き下げる必要がある。このため今回の運転ではエネルギー回収は行わないこととし、周回部の長直線部まで輸送しそこでビ

ーム性能を診断することとした。

大バンチ電荷ビーム生成では、GaAs カソードに照射するレーザー出力を上昇させどこまでバンチ電荷を生成できるかを試験した。このときの GaAs カソードの量子効率 は 3% 程度であり、レーザーパルス長を伸ばすための結晶を入れない状態では、レーザー出力 50% で 60 pC の電荷を生成することができた。下流へのビーム輸送のために、レーザーパルス長を伸ばすための結晶を入れた状態では、カソードに照射されるレーザー出力が 1/3 程度になり、最大バンチ電荷は 40 pC に制限された。このため、今回の試験では、最大バンチ電荷 40 pC でビーム性能試験を実施した。

大バンチ電荷生成試験のあとは、入射器診断ラインにビームを輸送し、バンチ長・エミッタンス測定を行った。今回の運転から加速空洞の位相調整法を改良しており、その結果、測定されたバンチ長はほぼ設計通りの値に調整でき、進行方向ビームダイナミクスをほぼ設計通りに制御できるようになった [3-2]。一方、エミッタンス測定では、設計値 $0.6 \pi \text{mm mrad}$ (バンチ電荷 40 pC) に対して [3-2]、測定結果は $0.9 - 2.4 \pi \text{mm mrad}$ となり、横方向ビームダイナミクス制御の改良が必要であることが確認された [3-3]。エミッタンスの悪化は、電子銃近傍の低エネルギー領域におけるプロファイルの歪み、入射器空洞加速電磁場のモデルからのずれの 2 つに起因すると推測しており、これらの改善が次の課題となる。

入射器診断ラインでビーム性能評価を実施したあと、高バンチ電荷ビームを周回部まで輸送し、エミッタンス測定を実施した。周回オプティクスが十分調整されておらず、主空洞下流でエミッタンスが急激に悪化することが観測された。高バンチ電荷に対応したオプティクス調整法を確立することが次の課題となる。

(4) バンチ圧縮運転

2017 年 3 月の運転では、バンチ圧縮運転が短い時間ながらも行われた。これは、主超伝導空洞による off-crest 加速によってバンチ縦方向に運動量依存性を持たせた後に第 1 アークの電磁石列 [3-4] でバンチ長を圧縮させるもので、この短バンチビームから THz 領域のコヒーレント光を発生できる [3-5]。バンチ圧縮は、短波長自由電子レーザーにも必要な技術課題である。今回の運転では、第 1 アーク部の四極電磁石と六極電磁石の調整によって約 250 fs までのバンチ圧縮を実現できた。

(5) ビームハローの研究

ビームロスの原因になるビームハローに関するスタディも行った。今回の運転では大バンチ電荷でのビームハロー測定とシミュレーションを新たに開始した。また、以前測定した低バンチ電荷でのハロー測定データはハロー形成・成長のシミュレーションと詳細に比較され、垂直方向のハローはフォトカソードの時間応答などに起因するバンチの縦方向テールが入射空洞で横方向キックを受けた結果であることが示唆された [3-6]。今後のビームロス削減に向け

て貴重な情報になる。

(6) THz 研究

THz 検出のためスクリーンモニター及び真空ダクトの改造、各種機器の制御プログラム改造などを行った。また、新規開発中の THz 検出用チャンバー製作にあたっても協力している。

参考文献

- [3-1] Masahiro Yamamoto, and Nobuyuki Nishimori, “High voltage threshold for stable operation in a dc electron gun”, Appl. Phys. Lett. **109**, 014103 (2016).
- [3-2] T. Miyajima, Y. Honda, M. Shimada, R. Takai, T. Obina, K. Harada, M. Yamamoto, N. Nakamura, K. Umemori, E. Kako, T. Miura, R. Kato, T. Hotei, R. Nagai, R. Hajima, Proceedings of IPAC2017, Copenhagen, Denmark, pp. 890-893.
- [3-3] T. Hotei, T. Miyajima, M. Shimada, N. Nakamura, R. Kato, Proceedings of IPAC2017, Copenhagen, Denmark, pp. 898-901.
- [3-4] A. Ueda, K. Harada, S. Nagahashi, T. Kume, M. Shimada, T. Miyajima, N. Nakamura, K. Endo, “DESIGN AND FABRICATION OF THE COMPACT-ERL MAGNETS”, Proceedings of IPAC2016, Busan, Korea, pp. 1111-1114.
- [3-5] M. Shimada, N. Nakamura, T. Miyajima, Y. Honda, T. Obina, R. Takai, A. Ueda, K. Harada, “BUNCH COMPRESSION AT THE RECIRCULATION LOOP OF COMPACT ERL”, Proceedings of IPAC2016, Busan, Korea, pp. 3008-3010.
- [3-6] O. Tanaka, N. Nakamura, M. Shimada, T. Miyajima, T. Obina, R. Takai, “SIMULATION STUDY OF THE BEAM HALO FORMATION FOR BEAM LOSS ESTIMATION AND MITIGATION AT KEK COMPACT ERL”, Proceedings of IPAC2016, Busan, Korea, pp. 1843-1846.

4. PF-AR 直接入射路建設から運転

(1) 建設とコミッショニング

2012 年から設計を始めた PF-AR 直接入射路計画は、2017 年 2 月までに全ての建設作業を終え、同年 3 月までにコミッショニングを完了した [4-1]。完成した PF-AR 直接入射路を図 4-1 に示す。この入射路は、2013 年に建設された専用の PF-AR 直接入射路トンネル (新トンネル) を通っているものの、LINAC の第 3 スイッチヤード (SY3) では PF リングの入射路や LINAC のダンプリーン、新トンネルよりも下流では KEKB の入射路と交差するなど、構造的にも運転スケジュール的にも複数の加速器と関わりを持っている。また、建設コストを削減するため、旧 PF-AR 入射路で使用していた偏向電磁石 24 台と四極電磁石 11 台を PF-AR 直接入射路でも再利用する設計となって

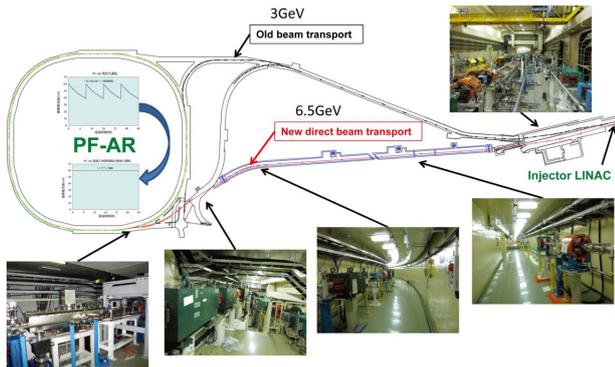


図 4-1 完成した PF-AR 直接入射路

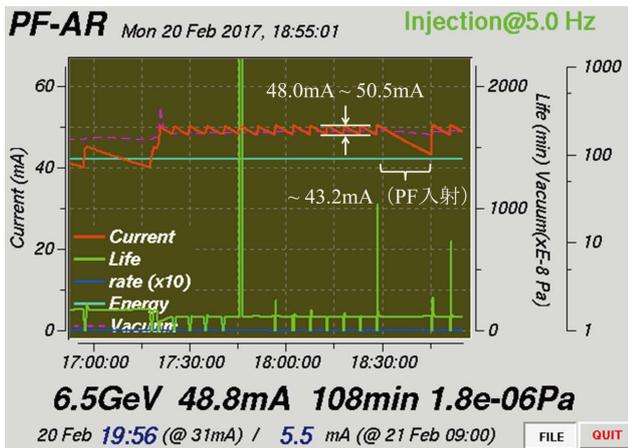


図 4-2 50 mA での継ぎ足し入射に成功したときの 2 時間の電流値の推移。18:30 過ぎに PF リングへの入射で入射を中断したため、寿命により電流値が 43.2 mA まで減少している。

いる。2016 年 6 月末までは、LINAC、PF リング、PF-AR の運転が行われていたことから、加速器の運転と並行して実施可能な新トンネルの電力ケーブルの配線と電源室の整理を行った。残りの大半の作業は、2016 年 6 月末の全電子加速器停止と共に始められ、ここから約 7 ヶ月半の間に、PF-AR 直接入射路の建設と並行して、旧 PF-AR 入射路の解体と再利用電磁石の搬出、交差する PF 入射路の改造、各機器の動作確認まで行った。

2017 年 2 月 13 日より、PF-AR 直接入射路のコミッショニングを開始した。スクリーンモニターで電子ビームを確認しながら電磁石の微調整を行ったところ、初日の午後 8 時 20 分には蓄積リングのビーム位置モニター (BPM) で電子ビームを確認することができた。翌日には、蓄積リングの BPM でビームが周回していることが確認できたため、RF パワーを投入して調整を進めたところ、午後 2 時 49 分に電子ビームが蓄積リングへ蓄積できたことを確認した。その後も入射路の電磁石の調整、パルス電磁石のタイミングの調整、ビームエネルギーや入射位相調整を続けたところ、80% 以上の入射効率を達成し、2 月 20 日の午後 5 時 20 分頃には、PF-AR 直接入射路建設前の初期ビーム電流である 50 mA での継ぎ足し入射に成功した (図 4-2)。

PF-AR でトップアップ運転を開始するためには、いくつかの課題を解決する必要があるが、50 mA での継ぎ足し入射を行いながら、約 3 日半の真空焼き出しを行っただけでも、将来のトップアップ運転に期待が持てるだけの運転パターンを得ることができた。3 月 1 日には、原子力規制庁の施設検査を受け、無事合格した。その後は、2017 年 4 月から再開するユーザー運転に向けて各種調整を行い、コミッショニングを完了した。

(2) PF-AR リング用新入射電磁石

2016 年の夏に PF-AR 直接入射路の工事に伴い、新たに 6.5 GeV 対応のキッカー及びセプタム電磁石を設置した。この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 台設置された [4-2, 3]。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 12.5 pulse per second である。セプタム電磁石はパルス幅 100 μsec 、最大電流 8000 A であり、これにより 6.5 GeV 電子ビームを 3° 偏向する。これらは渦電流シールドを持つパッシブタイプの構造を持ち、入射点側のセプタム II は、セプタム開口部からの漏れ磁場の影響を防ぐために、セプタム板を 40 mm 延長している。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 3 台を使用してパルスポンプを構成する。キッカー電磁石は、フェライトコアを持つウィンドウフレーム型の電磁石であり、セラミックダクトの外側に設



図 4-3 設置された 2 つのセプタム電磁石 (SI, SII)。SI は真空チャンバー内に組み込まれている。

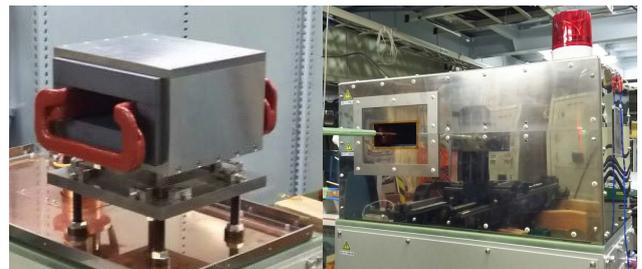


図 4-4 キッカー電磁石単体 (左) とシールドボックスに入れてサーチャコイルで磁場測定が行われているキッカー電磁石 (右)

置されている。図 4-3 にセプトム電磁石、図 4-4 にキッカー電磁石を示す。これらの電磁石は 2017 年 2 月から始まった AR 直接入射路のコミッショニングより順調に動作している。

(3) PF-AR 空洞保護用可動マスク

PF-AR の加速空洞の上流には、加速空洞を放射光の照射から守るための可動マスクが設置されている。改造前(2016 年 6 月まで)の運転では、ビームエネルギー 3 GeV での入射時には可動マスクをフルオープンにして入射に必要な広い口径(アパーチャー)を確保し、6.5 GeV に加速された後に可動マスクを閉じ、空洞を放射光照射から守る手順で運転していた。改造後の 2017 年 2 月からは、PF-AR にフルエネルギー(6.5 GeV)のビームが入射されるため、可動マスクを閉じたままでビームが入射できるかが重要であった。PF-AR 立ち上げチームが様々な調整を行った結果、可動マスクを閉じた条件(ビームとマスクまでの距離が、東側空洞 17 mm、西側空洞 20 mm の位置)でも、入射ビームをほぼ損失する事なく入射する事ができた。

(4) 新 AR-BT ラインの設置作業

(1) 第 3 スイッチヤードの AR-BT 建設

- ・ 準備作業：AR-BT は既存の PF-BT と 2 回交差する設計になっているため、まず PF-BT ラインの解体作業を行った。また、PF ラインで干渉する可能性のあるモニターの移設も行なった
- ・ 真空ダクトと支持架台：第 3 スイッチヤードに AR-BT を建設するため、ビームダクト、変換フランジ付きダクト、架台類の製作、設置を行った。架台に関しては、設置場所の環境が悪く、既存の水冷配管やケーブルピットを跨ぐような特殊な物が多かった。最上流部はアンカーの打設ができないため、PF-BT に使用していた既存の架台をそのまま使い、上部を拡張して 2 つの BT を支えている。第 2 スイッチヤードの最下流にあるダンプ室では、ビームダンプ移動のためのレールが干渉するため、ダクトの一部を側壁に固定する方法で設置した。また、ダンプ室に搬入するマグネットは、クレーンが届かないため、あらかじめビームダクトを挟み込んだ状態で搬入している。AR-BT と PF-BT が交差する部分は、BDS チェンバーと X 平面交差ダクトという特殊な形状のダクトを製作し設置した
- ・ モニター・排気系：スクリーンモニター、BPM、CT、電荷制限器を ARBT ラインに設置した。イオンポンプ、粗排気を設置した。

(2) KEKB-BT ラインの天井架台の製作、設置

AR-BT は KEKB-BT において、LER、HER と交差し、高さ 4 m の位置で設置する必要があったため、天井から吊り下ろすタイプのアルミ製架台を 5 台製作し、AR-BT を据え付ける作業を行った

(3) ビームストッパーの製作、設置

放射線安全の観点から AR-BT 上流部トンネルにビームストッパーが必要になり、製作、設置を行った。

(4) 共同溝のダクト設置

AR-BT 上流トンネルと下流トンネルの間に共同溝があり、ビームダクトがそこを貫通するように設置を行った。共同溝は一般区域から放射線管理区域に変更されている。

(5) PF-AR 直接入射路・遮蔽関係

- ・ 入射器第三スイッチヤード -AR 直接入射路上流間貫通孔遮蔽：鉛を使用し、全長 600 mm の長さで遮蔽を行った。
- ・ SuperKEKB 入射路 -AR トンネル間貫通孔遮蔽：鉛を使用し、全長 500 mm の長さで遮蔽を行った。
- ・ 新 AR 入射点上部遮蔽：AR リングへの新入射点上部にコンクリートと鉛を使用し、幅 1200 mm・長さ 2100 mm・厚さ 250 mm の遮蔽を行った。
- ・ 新 AR 入射点側面遮蔽：AR リングへの新入射点のリング外側側面に鉛を使用した、高さ 300 mm・長さ 3000 mm・厚み 100 mm の遮蔽壁を壁の下面が床面から 1400 mm の位置なるように設置を行った。
- ・ AR トンネル -PFAR 西実験棟間ケーブル用貫通孔遮蔽：AR リングの新入射点付近にある PF-AR 西実験棟との間のケーブル用貫通孔にポリエチレンビーンズを使用した遮蔽を行った。
- ・ 各種遮蔽の撤去：旧入射点や旧入射路等に設置したあった遮蔽を再検討し、撤去可能なものについては撤去作業を行った。
- ・ その他：新入射点近辺の地上部に土盛りの設置、周辺監視区域用フェンスの設置なども行った。

以上の遮蔽作業を行い、直線加速装置入射路(PF-AR 入射路)の施設検査を 2017 年 3 月 1 日に実施し、2017 年 3 月 6 日付で無事合格した。

参考文献

- [4-1] A. Higashi, et al., "CONSTRUCTION AND COMMISSIONING OF DIRECT BEAM TRANSPORT LINE FOR PF-AR", Proceedings of IPAC2017, Copenhagen, Denmark, 2017, pp. 2678-2680.
- [4-2] A. Ueda, S. Asaoka, T. Honda, S. Nagahashi, N. Nakamura, T. Nogami, H. Takaki, T. Uchiyama, "CONSTRUCTION OF THE NEW SEPTUM MAGNET SYSTEMS FOR PF-ADVANCED RING" Proceedings of IPAC2017, Copenhagen, Denmark, 2017, pp. 3398-3400.
- [4-3] A. Ueda, S. Asaoka, T. Honda, S. Nagahashi, N. Nakamura, T. Nogami, H. Takaki, T. Uchiyama, "CONSTRUCTION OF THE NEW KICKER MAGNET SYSTEMS FOR PF-ADVANCED RING" Proceedings of IPAC2017, Copenhagen, Denmark, 2017, pp. 3401-3403.

5. KEK 放射光計画

2016 年度に KEK 放射光計画の CDR (Conceptual Design Report) が公開され、また、2017 年 4 月の MAC (Machine Advisory Committee) に向けて準備が行われた。また、2016 年 6～7 月に ESRF より Simone Liuzzo 氏を招聘し、ラティス及びビームダイナミクスの検討を一緒に行って頂いた。

現 CDR 案においては、RF パラメータの検討中に、挿入光源によるエミッタンス増大の効果が大きいことが分かった。これは、直線部に分散関数が残っており、また、 β 関数が小さいことが原因である。特に、短直線部に真空封止挿入光源を設置すると、エミッタンスが最悪のケースで約 2 倍以上になる。他にも、CDR 案は運動量方向のアパーチャが狭く、タウシェック寿命が 2 時間程度短いこと、直線部の分散関数が実効エミッタンスの悪化に繋がっていること、ハードウェアとして短直線部にもう少し長さの余裕が欲しいこと、などの問題点が既に分かっていた。それらを解決する改善案として、Simone 氏より現案の短直線部に 4 極電磁石を 2 台追加した改善案が提案され、それをベースに現行ラティスの改善を進めているところであり、既知の問題点については、既に改善されている [5-1]。

狭いアパーチャを持つ真空ダクトや多数の設置が予定される真空封止アンジュレータの銅シート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計算を行った。アパーチャが狭くコンダクタンスが悪いダクトのために NEG コーティングが検討されているが、そのインピーダンスへの影響についても評価した。その結果、ダクトの抵抗性インピーダンスによる横方向の多バンチビーム不安定性を抑制するために、減衰率 10000 s^{-1} 以上のフィードバックキッカーが必要であることや NEG コーティングは $1 \mu\text{m}$ 程度以下であれば大きな問題にならないことが確認できた [5-2]。

ビームの軌道変動や安定性にも影響する光源施設の建屋基礎構造の検討を設計会社と行い、床構造(床梁構造とマットスラブ構造)の比較、床の上部建屋基礎部との分離・一体化方法の比較、杭基礎や地盤改良の比較などについて報告書にまとめた。また、建屋内の加速器や放射光ビームライン等の配置、機械・電気設備の仕様・配置、機器搬入方法などの検討も行った。さらに、同じサイト内にある PF 実験ホールでの振動実験を行い、建物外部の交通振動の地盤から建屋への伝播特性や建屋内の設備機器等の加振特性を評価した。これらは、光源建屋の振動解析や評価を行うための基礎データとして利用する予定である。

超低エミッタンスのビームを目指す KEK 放射光計画では、1 つのバンチ内にある電子同士が散乱する事 (Intrabeam Scattering; IBS) でビームエミッタンスが増大する現象が問題である。大まかに、IBS によるエミッタンス増大率はバンチの長さに反比例するため、バンチを伸ばすことでエミッタンス増大を緩和することができる。このため、加速用高周波(周波数 500 MHz)の 3 倍 (1.5 GHz) の高調波空洞を導入し、バンチを伸ばす予定である。ただし、蓄積

された電子ビームには一部にバンチギャップ(電子が入っていない空バケットの列)を導入すると、その影響でバンチをうまく伸ばす事ができないとの論文が出ており、その対策が必要である。光源第 2 グループでは、恵郷氏らにより最近提案された TM020 モード空洞 [5-3] を高調波空洞に応用することにより、バンチギャップがある場合でも有効

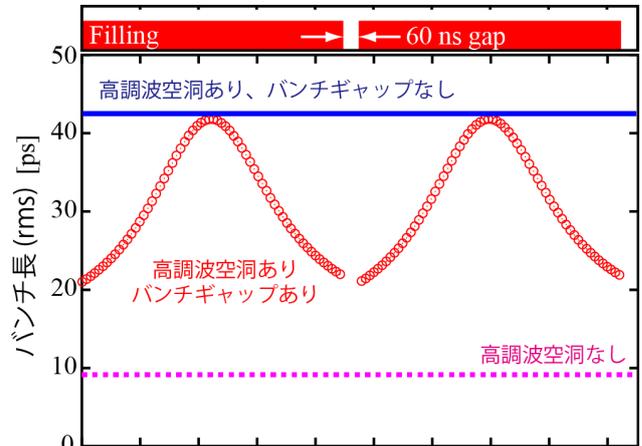


図 5-1 TM020 型高調波空洞を用いた場合のバンチ長の電子バンチ番号依存性

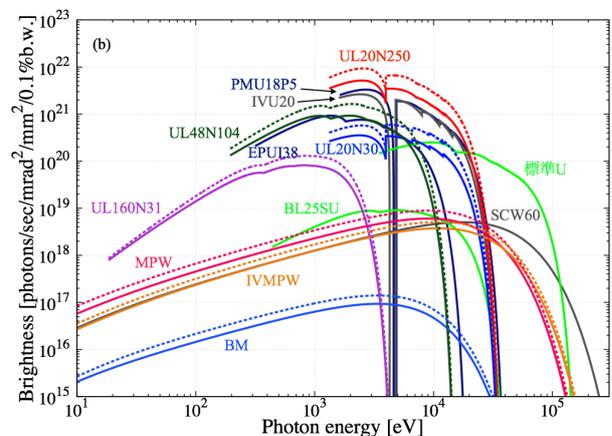
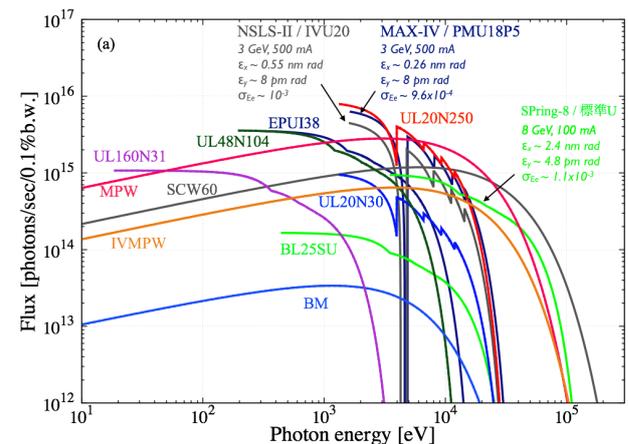


図 5-2 最新の 3 GeV リングである NLS-II および MAX-IV と比較した全光束スペクトル (a) および輝度スペクトル (b)。実線は IBS あり、破線は IBS なしの場合。

表 5-1 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		
エネルギー拡がり 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 5-2 KEK 放射光計画で想定する標準的な光源装置

	BM	MPW	IVMPW (短直線部)	UL20N30 (短直線部)	UL20N250	UL48N104	UL160N31
周期長 λ_u [mm]		120	60	20	20	48	160
周期数 N_u		42	10	30	250	104	31
磁石列長 L [m]		5.0	0.6	0.6	5.0	5.0	5.0
最小 Gap [mm]		12	4	4	4	12	12
(最大) 磁場 $B_{(\text{max})}$ [T]	0.68	1.8	2.4	1.13	1.13	0.9	0.5
最大 K 値 K_{max}		20.2	13.4	2.1	2.1	4.0	7.5
臨界エネルギー E_{pc} [keV]	4.1	10.8	13.2				
1 次エネルギー $E_{\text{pl}}(K_{\text{max}})$ [keV]				1.3	1.3	0.2	0.02
出力 [kW]	0.039 [kW/mrad]	46.5	9.8	2.2	18.2	11.5	3.5

にバンチを伸ばすことができる方法を検討している [5-4]。このため、リングにおけるバンチ伸長をシミュレーションする為のソフトウェアを開発し、これを用いて有効なバンチ伸長方法を検討した。その結果、TM020 型高調波空洞を用いれば、バンチ長を平均で約 3.3 倍程度伸ばすことが出来る見通しを得た (図 5-1) [5-5]。また、このための高調波空洞としては、加速に用いる電場がほぼゼロの場所に高次モードカップラーを配置し、ビームに悪影響を及ぼす寄生モード共鳴を減衰させる方式を検討しており、電磁場シミュレーションソフトを用いて寄生モードの減衰性能を調べている。高周波源については、半導体アンプを用いた 500 MHz 大電力高周波源の開発を進めており、これに向けた小型試作機 (出力約 1 kW) を製作した。今後性能試験を進める。

表 5-1 に示す KEK 放射光リングの光源点におけるビームパラメータを用いて、表 5-2 示す光源装置によって得られる全光束および輝度スペクトルを計算した結果を図 5-2 に示す。2016 年度、光源第 7 グループでは、KEK 放射光リングの短直線部に設置する真空封止型多極ウィグラー (IVMPW) を設計し、開発を開始した。

IVMPW は、昨年度提案した多極ウィグラー (MPW) で懸念される 46.5 kW もの放射損失を 9.8 kW へと約 1/5 に低減することで RF への負荷を抑制しながら (表 5-2)、図

5-2 に示すように HX 領域で MPW と同等の輝度を得ることを目標として新たに設計した挿入光源である。2016 年度はこの IVMPW の 2 周期磁気回路モデルを試作し、実機で必要とされる 2.4 T (テスラ) の磁場が設計通り発生できることを確認した。

参考文献

- [5-1] K. Harada, N. Higashi, S. Nagahashi, N. Nakamura, S. Sakanaka, A. Ueda, S. M. Luizzo, "DQBA LATTICE OPTION FOR THE KEK-LS PROJECT", Proceedings of IPAC2017, Copenhagen, Denmark, 2017, pp. 2675-2677.
- [5-2] N. Nakamura, "RESISTIVE-WALL IMPEDANCE EFFECTS FOR THE NEW KEK LIGHT SOURCE", Proceedings of IPAC2017, Copenhagen, Denmark, 2017, pp. 3095-3097.
- [5-3] 恵郷博文, 渡辺順子, 木村諭, 佐藤潔和, 第 11 回日本加速器学会年会プロシーディングス, 青森, pp. 237-241, 2014 年。
- [5-4] N. Yamamoto, S. Sakanaka, and T. Takahashi, "Simulation Study of Normal-Conducting Double RF System for the 3-GeV KEK Light Source Project", in Proceedings of IPAC2017, Copenhagen, Denmark, 2017,

pp. 4176-4179.

- [5-5] T. Takahashi, S. Sakanaka, and N. Yamamoto, "Design Study of Damped Accelerating Cavity based on the TM020-mode and HOM Couplers for the KEK Light Source Project", in Proceedings of IPAC2017, Copenhagen, Denmark, 2017, pp. 4172-4175.

6. ERL ベースの EUV-FEL 光源計画

次世代の半導体露光技術である EUV リソグラフィーでは、200 W 以上の 13.5 nm の EUV 光源としてレーザープラズマ光源が開発されている一方、将来要求される 1 kW クラスの出力を複数台の露光装置に同時に供給できる ERL を用いた FEL が将来の EUV 光源として期待されている。そのため、コンパクト ERL の技術や資産を最大限利用できる利点を活かして、ERL の産業応用を目的とした EUV-FEL 光源の設計を行ってきた。2016 年度は、第 1 アーク部を 2 セル TBA に変えて 3 セル DBA のラティスを使用し、バンチ圧縮時のコヒーレント放射光のビームへの影響を抑えてバンチ圧縮後のピーク電流と水平エミッタンスを改善することに成功した。また、電子銃からダンプライン前までの S2E (Start-to-End) シミュレーションを行って設計した光源を評価した結果、平均電流 10 mA で 14 kW 以上の EUV-FEL 出力が得られることや FEL 発振後もビームは損失なく輸送されてエネルギー回収を行うことが確認できた [6-1]。

参考文献

- [6-1] N. Nakamura, R. Kato, T. Miyajima, M. Shimada, T. Hotei, R. Hajima, "S2E SIMULATION OF AN ERL-BASED HIGH-POWER EUV-FEL SOURCE FOR LITHOGRAPHY", Proceedings of IPAC2017, Copenhagen, Denmark, 2017, pp. 894-897.

7. 他の加速器への協力

(1) iBNCT 加速器コミッショニングへの協力

iBNCT 加速器は、東海村にある「いばらき中性子医療研究センター」の BNCT (ホウ素中性子捕獲療法) 用の陽子線形加速器である。2016 年 4 月から加速器第七研究系として、iBNCT 加速器のビームコミッショニングへの協力を開始した。iBNCT 加速器での課題は、加速器を構成する機器の安定化、ビーム電流の増強、調整手順を確立することであり、これまでにコンパクト ERL で開発してきた制御系、ビーム診断・調整の手法を活かして、これらの課題に取り組んだ。コンパクト ERL で開発してきた様々な制御プログラムを活用することにより、ビーム診断・ビーム制御の精度を向上させることができた。また、高周波加速空洞の立ち上げ手順の改善を行い、加速器の安定化、立ち上げ時間の短縮を図ることができた。これらの開発の結果、陽子ビームの電流増強、運転の安定化をある程度達成することができ、2016 年 12 月に放射線施設検査に合格することができた。

2-3. 今後の展望

光源第1グループでは、完成したPF-AR直接入射路を使ったPF-ARのトップアップ運転の早期実現を目指す。また、PF-ARの低エミッタンス化についても関連するスタディを行ってその実現を図る。PFリングとPF-ARの電磁石システムにおいては引き続き老朽化対策と性能向上に努め、コンパクトERLでも電磁石システムの運転・維持・管理とビーム性能の向上を目指す。KEK放射光計画ではリングオプティクス改善、電磁石の詳細設計、入射器の設計検討などを進め、ビームダイナミクスに基づいたリングの性能評価も行う。EUV-FEL光源計画では、高出力化や産業化などに向けた光源の設計・検討を引き続き行う。

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、引き続き運転経費で可能な老朽化対策と性能向上に努める。ただしPF-ARクライストロン用高圧電源の制御盤については早期に更新が必要であり、このための予算を各方面に要望している。またPFリング、PF-ARともローレベル系・制御系についても、適当な時期に更新が必要である。次期放射光リングについては、計算機シミュレーションによる加速空洞と高調波空洞の概念設計を継続する。シミュレーションでの目処が付き次第、低電力モデルによる高周波特性の確認を行う予定である。また、半導体アンプを用いた500MHz大電力高周波源の開発も段階的に進める予定である。

光源第3グループでは、将来の光源リングに不可欠な真空排気方式としてNEGコーティングの技術開発に積極的に取り組んでいる。NEGコーティングはCERNで開発され、LHCで実用化された真空技術であるが、特に口径の小さい放射光源加速器の真空排気に有用であり、先端的な光源での導入と、将来光源を見据えた技術開発が各国で活発に行われている。我々はCERNより正式にライセンスを取得し、CERNの真空グループと連携して、技術の習得とコーティング設備の開発を積極的に行っている。CRRNからはNEGに限らず様々なコーティングを施したビームダクトがKEKに持ち込まれ、PFリングにおいて放射光照射に伴うガス放出測定の実験取得を行っている。またKEKB加速器の有するTiNコーティング設備をNEGコーティングに応用する共同開発研究も企画している。既存のリングにおいても新規ビームダクトの製作時にはNEGコーティングを導入し、この技術の有用性の実証を進めていく計画である。

光源第4グループでは、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。また、PFリングでの進行方向4極不安定の抑制など、さらなるビーム安定化に向けてデジタル信

号処理回路や進行方向キッカー等の研究開発を進める。

光源第5グループでは、PF-AR直接入射路が完成し、6.5 GeV直接入射運転が開始された。しかし最終目標であるところであるARのトップアップ運転がまだ行われていない。ARトップアップ運転に向けて必要とされるインターロック改修、およびMBSを開けたままでの入射時の放射線サーベイなどクリアすべきハードルはまだある。関係者との密接な協力のもとで、円滑な整備実施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、QST、広島大学と協力しながらERLベースのEUV-FEL光源で要求される平均10mA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、新規光源として真空封止型MPWの開発や新しいタイプの磁場測定装置の開発を継続していく。同時にすべての挿入光源に関して、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光源計画では、EUV-FEL光源産業化研究会の枠組みの中で推進していくとともに、その第一段階として、現有のコンパクトERLのエネルギーとビーム電流を増強し、直線部にアンジュレータを設置することで単一通過型FELによる高平均出力光源としての実証実験を目指す。