

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、2017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KEKB 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	特別准教授
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	前任技師・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
江口 柊	技術員

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

PF リングでは、再度真空リークしたセプタム電磁石（セプタム2）を温水冷却なしで保護するために、2017年夏にアブソーバをセプタムのすぐ上流に追加して軌道中心から水平15 mm離れた位置まで挿入した結果、蓄積ビームの物理アパーチャという面では問題なかったものの、入射の為のキッカーバンプの高さを下げる必要が生じた。秋の立ち上げ時に多少時間がかかったものの、そのバンプの高さで入射できるパラメータを見つけることはできたが、入射率優先で調整を行ったため、入射中のビーム振動が前期に比べて大きくなったという問題が測定系より指摘された。この問題を解決するために11月のマシンスタディの時間に高速BPM（Libera Brilliance+）を用いて入射中の蓄積ビーム振動を測定しながらキッカー電磁石の調整を行った結果、入射率と蓄積ビーム振動の抑制を両立するパラメータを探ることができた。2017年度の主なマシンスタディとしては、この入射パラメータの測定[1-1]の他に、真空封止アンジュレータのインピーダンスを評価してシミュレーションによる計算結果と比較するためのベータトロンチューンシフト測定が行われた[1-2]。

PF リングでは、高輝度化から約20年、直線部増強から約13年が経過し、電源故障が多発している。ステアリング電磁石電源の制御系が誤動作し、ビーム軌道が変動する不具合が多発していたが、2017年夏のシャットダウン中にVME制御系のクレート間接続モジュールをCPUに変更してラック毎に独立動作させる変更を行ったところ、問題が起こらなくなった。2018年2月14日には、偏向電磁石17番下流の垂直ステアリング電源が冷却FAN故障で停止、リング全体で垂直に大きく軌道が変動し、放射光によるガス放出で真空度が悪化するトラブルがあった。致命的な真空事故は避けられたが、2018年夏に電源FANの交換作業を行うための準備を進めている。また、2018年2月13日にQ8A電源、6月13日にQ9B電源が異常で停止、ビームダンプした。電源内部のIGBTスタックのコンデンサが劣化、破裂したこと原因であった。同時期の電源で同じ故障が多発することが懸念されたため、コンデンサを全台数分(1台9個で144個)調達する手配を行っている(2018年夏に納品予定)。

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、次の老朽化対策を行った：(1)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い、全数のオーバーホールが完了した。(2)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。(3)ローレベル系制御モジュールの一部を更新した。

2017年の夏期休止期間中にPFリングの超伝導ウィグラー

のビームダクトの交換作業を行い、電子ビーム路の真空ダクトと断熱真空に生じていた真空リークを解消し、2017年秋季の運転より超伝導ウィグラーの運転を再開した。

超伝導ウィグラーのビームダクトは2011年の大地震で溶接個所に真空リークが発生し、その後リークシーラーによる応急措置を施しながら運転を継続していた。また液体ヘリウムのクライオスタットの断熱真空も、放射線の影響によって腐食が進み真空リークが発生していた。ビームダクト、断熱真空のリーク共に地震で再発することも多く、リーク量が悪化する傾向も見られたので、2016年12月から冷却を取りやめ、超伝導ウィグラーの運転は中断をしていた。

ビームダクトと断熱真空の真空リークを解消するため、予備のビームダクトとの交換作業を行った。ビームダクトは常温に保たれており、クライオスタットの中心を通した後に、溶接によって断熱真空を封止し、また電子ビーム路の接続フランジを溶接する設計になっている。今回のダクト交換作業は超伝導ウィグラーを工場へ移送することなく、リングトンネル内ですべての作業を行った。交換作業中の様子を図1-1から図1-3に示す。

2017年秋季の運転より超伝導ウィグラーの運用を無事再開している。ビームダクト交換後の運転において、現場溶接を行った超伝導ウィグラー上流付近の真空圧力の下がり方が遅い傾向がみられている。特にハイブリッド運転時に圧力上昇が大きく、2017年11月のハイブリッド運転では蓄積電流値を通常の450 mAから430 mAに制限して運転を行った。

アンジュレータ#19(U#19)の更新にともない、直流ビーム電流モニター(DCCT)を新規製作する必要となった。構造設計にあたってはセラミックス部がビームにたいして悪影響を与えないよう、数値シミュレーションによってダクト形状の最適化をおこなった[1-3]。ビーム位置モニタ



図1-1 ビームダクト交換作業中の超伝導ウィグラー全景



図 1-2 交換用ビームダクトの挿入



図 1-3 現場溶接作業の様子

ーや軌道安定化システムの維持管理を行ってきたが、特にビーム位置モニター専用の計算機が停止するなど老朽化が深刻化しつつあるため次期システム更新へ向けて検討をすすめている。このほか光モニターについても例年通りの保守作業により安定稼働を実現している。加速器制御に関しては挿入光源の制御プログラムの更新や、電子ログシステムの新規開発を行った。電子ログは他の加速器やグループでも導入されるなど好評を博している。

昨年度と同様に、PF リングの基幹チャンネルの維持・保守作業ならびに PF リング安全系の維持・保守作業を行った。

それ以外に 2017 年度は、特に、2018 年度に行われる予定の PF BL-19 の挿入光源も含む全体改造に対応するため、BL-19 基幹チャンネルの改造に必要な機器の設計、製作、および様々な改造必要部品の購入を行い、2018 年度夏の改造のための準備を行った。実施した作業を列挙すると PF 光源棟基幹チャンネル保守作業（基本的には不具合のある箇所の交換作業）については、

- (5 月) BL-20: ラージバルブ, チタン昇華ポンプ, 真空計の交換 BL-16: チタン昇華ポンプ, 真空計交換
- (6 月) BL-28: ノープルポンプ, チタン昇華ポンプ, 真空計交換 BL-3: チタン昇華ポンプ, 真空計交換

- (7 月) BL-3, BL-16, BL-20, BL-28 基幹チャンネルの超高真空立ち上げのためのベーキング作業
 - (8 月) BL-5: チタン昇華ポンプ, 真空計交換 BL-9: チタン昇華ポンプ, 真空計交換
 - (9 月) BL-5, BL-9 基幹チャンネルの超高真空立ち上げのためのベーキング作業
- である。

また、2018 年度に行われる予定の PF BL-19 の挿入光源も含む全体改造に対応するため、BL-19 基幹チャンネルの改造に必要な水冷固定マスク、ビームシャッター、真空配管の設計を行い、製作を行った。完成した機器については真空リークテストし問題ないことを確認後、超高真空立ち上げのためベーキングを行った。その他、基幹チャンネルの改造に必要な機器の購入も行った。

さらに、現有リボルバーアンジュレーター (R#19) の真空ダクトには 2 本の電子ビームストッパーが設置されており、2018 年度に行われる新規アンジュレーター (U#19) の設置が行われると、新規 U#19 の真空ダクトは非常に狭いものになるために電子ビームストッパーの設置が不可能となる。そのため、PF リングの別の箇所に電子ビームストッパー 2 本設置する必要がある、新規真空チャンバー付電子ビームストッパー 2 本の設計および製作を行い、改造に向けての準備を行った。

2017 年度の PF リングの運転における挿入光源関連のトラブルは 12 件発生している。その内訳は ID サーバーに起因して gap や mode の変更ができなくなったものが 4 件、絶対値エンコーダの故障に起因するものが 2 件、mode 変更 (LVS->LHR) に伴う Life の急落が 2 件、R#19 の回転面検出用リミッタの動作不良と gap 変更不可が各 1 件、アラームまたは異常のようにみえたが結果的に異常なしと判断されたものが 2 件であった。昨年度から、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、将来光源の建設時の統一的な挿入光源制御系の構築を目指して、ID 制御系を共通化する試みを開始している。これに基づいて開発されたプログラムを夏季停止期間中に ID サーバーに導入した。ID サーバーに起因するトラブルの 4 件は、この新しいプログラムが原因である。いずれも立ち上げ時の予備光軸確認中に発生し、プログラムの修正で復帰している。これ以降、同種のトラブルは発生していない。

それ以外のトラブルでは、11 月にホール素子較正用電磁石からの冷却水漏れが発生している。夜間に PF エネルギーセンターから M7C 系に 1.5 ton の純水が補給され、朝、連絡を受けた担当者が見回り点検をしたが原因を特定できなかった。その後、正午前後に再度 0.6 ton の純水が補給されたことから、再点検を行ったところ、ホール素子較正用電磁石の給水側分岐継手が破損して、そこから冷却水が漏れているのが発見された。ただちに元バルブを閉じてこれに対応した。床面にあふれた冷却水は一度地下貯水槽に流し込み、後日放射線レベルを測定して安全を確認したのち、一般排水として処理された。冷却水漏れの原因は、過

去に冷却水バルブを閉じたまま電磁石に通電したことがあり、その対策として冷却水を流しっぱなしにしていたことにより、ロータリー機能付き分岐継手の最も薄い金属可動部（真鍮製）が摩耗して破断したことによる。対策として非通電時は冷却水のバルブを常時閉とし、電磁石電源側に冷却水量のインターロックを儲けることを検討している。今期の挿入光源開発としてはBL19用のU#19の更新を進めている[1-4]。これまでID19として東大物性研から管理移管されたR#19が設置されていたが、老朽化と長年にわたる放射線環境下での使用により磁石を固定している接着剤が剥離し、一部の磁石が脱落していた。そのため、脱落防止の治具をつけたうえで、四面ある磁石面のうち一面のみの利用に制限されてきた。新たに導入されるU#19は、周期長68mm、周期数55のAPPLE-II型の磁石配置を採用した可変偏光アンジュレータである。U#19の目標光子エネルギーは様々な偏光状態の下で100eVから2keVであり、軟X線領域のX線散乱、X線スペクトロスコピー、STXM実験に利用される予定である。図1-4に、楕円偏光モード（ $B_y/B_x=2$ ）時のU#19のスペクトル（計算値）を示す。このU#19アンジュレータの基本構造は前回導入されたU#13と同じであるが、アンジュレータ長の伸長と最大磁場強度の増加により、磁極面間の吸引力はU#13の1.5倍に増加している。そのため構造計算を繰り返し、この吸引力の増大に耐えられるようにフレームの強化が図られている。図1-5は、磁場測定中のU#19の写真である。

また、昨年度から企業との共同研究により簡易磁場測定装置の開発を進めている[1-5]。これまでの磁場測定装置では石定盤などの堅牢な下部構造の上にリニアステージを設置することで、その直進性を確保してきた。我々のアイデアは磁石を取り付けている荷重梁（ビーム）に直接リニアステージを取り付けることで、放射光リングに設置後の挿入光源や、真空ダクト内に取り付けられた挿入光源の磁場評価を可能にするものである。昨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んで動作試験を行った。2017年度は新規に製作したU#19に設計段階で

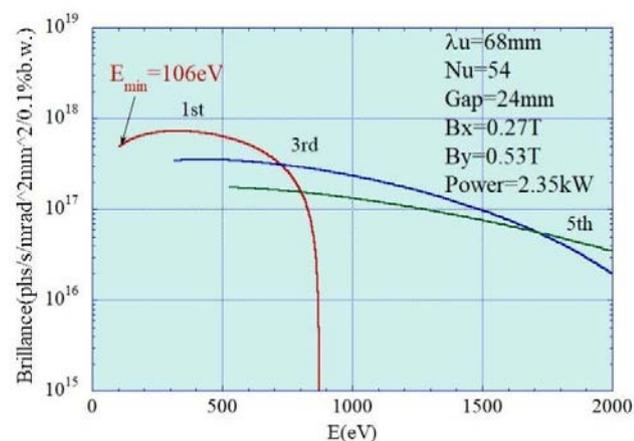


図1-4 楕円偏光モード（ $B_y/B_x=2$ ）で最小gap（24mm）時のU#19のスペクトル（計算値）



図1-5 磁場測定中のU#19

この機構を組み込み、従来の磁場測定装置との比較評価を開始した。これまでに行われたプレリミナリーな測定結果では、従来の磁場測定装置に比べて遜色のない良好な結果を得ている。

これと並行して真空封止アンジュレータ（SGU#1, #3, #15, #17）用の温度監視ロガーの更新を行った。これまで挿入光源制御と温度監視は同じ GPIB-Ethernet 変換を通して行われていた。しかし、挿入光源制御と温度監視では通信頻度が大きく異なる。2つの通信系を分離することで、制御系の更新作業やトラブル発生時の障害切り分けを容易にすることを目指している。

参考文献

- [1-1] K. Hirano, K. Harada, N. Higashi, S. Nagahashi, A. Ueda, T. Obina, R. Takai, H. Takaki, Y. Kobayashi, "Beam Based Measurement of Injection Parameters at KEK-PF", Proceedings of IPAC2018, Vancouver, May, 2018, pp.4152-4154.
- [1-2] O. Tanaka, N. Nakamura, T. Obina, K. Tsuchiya, R. Takai, S. Sakanaka, N. Yamamoto, R. Kato, M. Adachi, "Impedance Evaluation of In-Vacuum Undulator at KEK Photon Factory", Proceedings of IPAC2018, Vancouver, May, 2018, pp.3200-3203.
- [1-3] 高井 良太, 帯名 崇, 谷本 育律, 本田 融, 野上 隆史, "PF リング用 DCCT ダクトの設計", 第15回日本加速器学会年会プロシーディングス THP087, 長岡, 2018年8月
- [1-4] 土屋 公央, 阿達 正浩, 塩屋 達郎, 江口 柊, 加藤 龍好, "PF リングにおける可変偏光アンジュレータ: U#19の建設", 第15回日本加速器学会年会プロシーディングス THP024, 長岡, 2018年8月
- [1-5] M. Adachi, K. Tsuchiya, T. Shioya, R. Kato, "Development of Compact Magnetic Field Measurement System Available for In-Vacuum Undulators", Proceedings of IPAC2017, Copenhagen, Denmark, May 2017, pp.1449-1451

2. PF-AR の運転・維持・管理および開発

PF-AR は、PF-AR 直接入射路の建設を終え、2017 年 4 月よりユーザー運転を再開した。2017 年 2 月から 3 月に行われたコミッションングでは順調に入射・蓄積できたものの、60 mA 付近でのビーム寿命の低下や寿命急落の頻発、光軸調整の問題など、課題も残されていた。まず、60 mA 付近でのビーム寿命の低下や寿命急落の頻発は、フィードバック用ストリップラインキッカーの真空悪化により、2012 年秋に最大蓄積電流値を 55 mA や 50 mA まで下げていたものを、PF-AR 直接入射路の完成を受けて 60 mA へ戻したことが原因だと考えられた。最大蓄積電流値を 55 mA まで下げたところ、ビーム寿命も伸び、寿命急落の頻度も減少させることができた。4 月 21 日以降は、原因不明のビームロスが発生していたが、キッカー電磁石の暴発によるものと原因を特定した 11 月 27 日以降、ユーザー運転中はキッカー電磁石電源を OFF にすることで対応した。光軸調整の問題は、電磁石のアライメントの崩れやビーム光学系の歪みなどが原因と思われたが、2017 年夏の定期期間中に BPM (Libera) の保守を行うことによって解決したことから、COD が正しく計測できていなかったことが原因と考えている。

PF-AR のマシンスタディは、運転時間の減少から日数が限られていたため、全てトップアップ運転の準備に充てられた。4 月 27 日のマシンスタディでは、真空封止アンジュレータのギャップを閉めた状態で入射を行った。全ての挿入光源で入射効率の低下がみられたが、ID-NW14-2 を除き、最大でも 3 割程度の低下であった。ID-NW14-2 については、蓄積電流値が上がると入射効率が極端に低下し、48 mA 付近で入射が滞ってしまう現象がみられたが、秋以降の運転ではこのような現象は起きていないことから、PF-AR 直接入射路で入れ替えた真空ダクトの焼き出しが進んでいなかったことによるビームサイズの増大や、COD が正しく計測できていなかったことにより蓄積ビームがアンジュレータのギャップに近づいていたことが原因だったと思われる。12 月 7 日のマシンスタディでは、真空封止アンジュレータのギャップを閉めた状態で MBS を開けたまま入射し、各ビームラインでの放射線量を測定した。いずれのビームラインでも放射線量が管理区域の基準値以下であることが確認できたため、以降の積み上げ入射では、MBS を開けたまま入射できるようになった。NW2 と NW14 では、ビームライン光学系のセットアップの都合上、真空封止アンジュレータのギャップを最小値まで閉めることができなかったため、入射時のみギャップ制限を設けていたが、2 月 6 日に最小ギャップで放射線量を測定し、ギャップ制限も解除された。

PF-AR の電磁石は、ビーム運転中にトラブルはなく、順調であった。停止後に、偏向電磁石に接続しているブスバーの水路のゴムホースから水漏れリークが 4 件あり、正月の停止期間に、全数 (50 本) を交換した。偏向電磁石電源の出力端の電流モニタ・システムを高精度化した。ビーム変動などの相関を調べている。

4 月～5 月と 11 月の PF-AR のユーザー運転中に加速用高周波 (RF) のインターロックによる停止 (トリップ) を伴うビームダンプが頻発した。原因を調査するために、RF トリップ時に RF インターロック信号、空洞からの反射 RF の波形、およびボタン電極からのビーム信号 (高速検波器で検波) を記録し、データを分析した。その結果、ビーム電流が無くなってから約 300 ~ 500 マイクロ秒後に RF トリップが発生している事が判明し、ビームダンプの原因は RF システム以外にある可能性が高いことがわかった。その後の調査で、ビームダンプと同期してキッカー電磁石電源の充電電流が流れていることが観測され、ビームダンプの原因がキッカーの暴発によるものと判明した。キッカー暴発時のキッカー波形を図 2-1 に示す。まず K1 が暴発しその後 1 μ sec 程度後に K1 のノイズにより K2 及び K3 が誘発されている。このようにキッカー電磁石がトリガー無しに暴発する事象があると蓄積ビームが削られて放射光利用実験に支障をきたすため、この現象を起こさないようにするための調査が続けられている。

PF-AR の RF システムについては例年通り、大電力高周波源、空洞系、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) 東直線部の空洞用のターボ分子ポンプ 1 台とコールドカソードゲージ 8 台を更新した。(2) PF-AR 東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。(3) クライストロン用ドライブアンプの電源部 2 台を更新した。PF-AR 東棟と西棟に 1 台ずつ設置されているクライストロン用高圧電源については、4 月に制御盤内のプログラマブル・ロジックコントローラ (PLC) の CPU ユニットが故障し、9 月にプログラムを書き込んだ ROM が故障した。この 2 件の故障については、数少ない予備品と交換し復旧したが、同様の故障が続発すると RF システムの運転が停止する危機的な状況となった。このため、2018 年度に PLC とその制御用ソフトウェアを

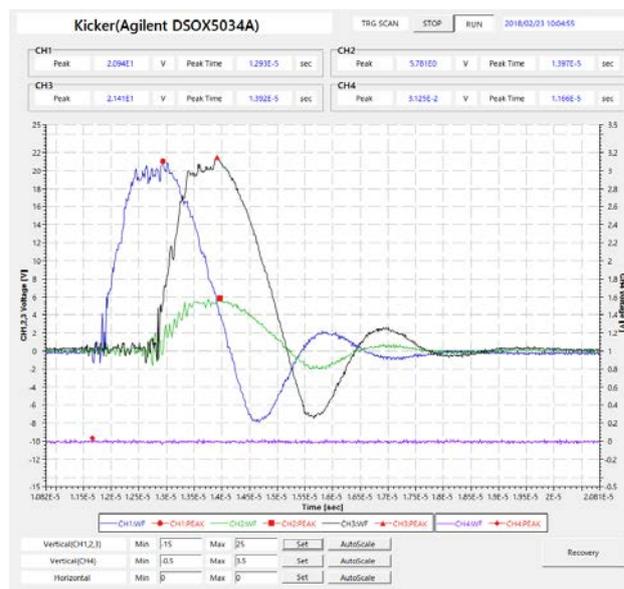


図 2-1 暴発時のキッカー電流波形。K1 が暴発しその後 1 μ sec 程度後に K1 のノイズにより K2 及び K3 が誘発されている。

更新する計画を立て、その調達の準備を2017年度に行った。

例年通りビーム位置モニター（BPM）やフィードバックシステムについての維持管理を行った。BPM回路のうちいくつか不具合が生じてた部分は予備品との交換を行うことで対処している。6.5 GeV 入射になって以降、ビーム不安定を抑制するためのフィードバックが不要となったため停止していたが、今後トップアップ入射を行うにあたっては入射振動を短時間に抑制する目的に有効であるため、振動検出回路を整備した。このほか、ビーム輸送ライン（Beam Transportline, BT）のビーム位置検出器の回路数が不足していたため、市販の高精度回路4式を導入するとともに、並行して測定精度を維持しつつ安価な測定システムを自主製作し評価を行ってきた。2018年度には量産して全ての位置モニターを同時測定することを実現する予定である。

PF-AR リングへ6.5 GeV のフルエネルギー入射が可能となったため、2017年夏の停止期間中に、真空封止アンジュレータのGapを閉めた状態でMBSを開けたまま入射できるモード（Top-up モード）の追加を行った。運転モードの制御は、古いVxWorks配下のCAMACを使用して行っていたことから、EPICSが動作可能な横河製PLCとSoft IOCを組み合わせた新しいものへと変更し、作業性の向上を図った。また、入射やChannel Permit等のインターロックを管理しているOMRON製PLCのロジックも変更した。この変更の際には、ビームラインインターロックのロジックを変更する必要があるため、ビームラインインターロックグループと綿密な擦り合わせを行い、ロジックの矛盾が起きない様に配慮した。

2017年度のPF-ARリングの運転における挿入光源関連のトラブルは6件発生している。その内訳はID全体の表示パネルのなかで特定のIDのgap値が表示されず空白になるトラブルが4件、gap変更ができなくなるトラブルが1件、補正電磁石の故障が1件であった。補正電磁石の故障以外はすべてIOCリポートで復帰している。

3. コンパクト ERL の運転・維持・管理および開発

2016年6月に策定されたKEK Project Implementation Plan(KEK-PIP)に基づき、コンパクト ERL (cERL) では産業利用および放射光長期計画 (CW-FEL 等) に向けた基礎開発を行っている。産業利用として、ERL と自由電子レーザー (FEL) を組み合わせた加速器による極端紫外 (EUV) 光を用いたリソグラフィ光源の検討を進めており、その際に要求されるビーム性能を実証するために、コンパクト ERL を用いたビーム性能開発試験を行った。また、新しい原理に基づく光源の実証試験として、共振器型回折放射による広帯域テラヘルツ自由電子レーザーの発振試験を行った。さらに、RI 製造や電子ビーム照射等の新たな産業利用に向けたコンパクト ERL の利用検討も行っている。

コンパクト ERL における要素開発・コミショニングの達成度と得られた知見について評価・アドバイスを受けるために、2017年10月27日に国内の有識者によるcERL

評価専門委員会を開催した [3-1]。評価専門委員会では、(1) cERL の各加速器要素技術の達成度と得られた知見に関して、(2) cERL の運転・コミショニングの達成度と得られた知見に関して、(3) 将来展望の妥当性とその他の可能性に関して評価とアドバイス、の3つの項目に対して評価・アドバイスを受けた [3-2]。また、評価専門委員会に向けて、2017年9月までの成果をまとめた「コンパクト ERL 成果報告書」を編集し、KEK-Report として出版した [3-3]。

(1) 加速器運転・コミショニング・マシンスタディ

コンパクト ERL は2017年3月末まで、最大40 pC の高バンチ電荷ビームに対するビーム性能向上および制御法確立に向けて、ビーム診断・周回輸送・バンチ圧縮試験を行っていたが、2017年4月以降は運転予算を確保できないため、当面超伝導空洞を冷却・使用しない運転条件において電子銃単独運転のみを行うこととなった。電子銃単独運転は月に1回程度の頻度で行なわれ、500 keV 領域におけるビーム輸送試験や電子銃加速電圧上昇に向けた電子銃のコンディショニング運転を行った。その後2018年3月に超伝導加速空洞の冷却・使用を含めたコンパクト ERL 全体でのビーム運転が決定し、11日間に渡って最大60 pC バンチ電荷におけるビーム輸送試験、ビーム診断試験を行うことができた。2018年3月のビーム運転では、空間電荷効果の支配的な高バンチ電荷に対する輸送条件の改善を図るとともに、共振器型回折放射による広帯域テラヘルツ自由電子レーザーの発振試験を行った。

(2) 高輝度大電流電子銃の開発

2017年3月に実施したコンパクト ERL のビーム試験では、電子銃電極間の放電によるトラブルを避けるために、電子銃加速電圧を設計電圧500 kV よりも低い450 kV に制限していた。2017年度は加速電圧500 kV の実現に向けた試験を行った。2017年4月以降に高電圧印加に向けたコンディショニング運転を継続した結果、安定な運転電圧と密接な関係がある放電停止電圧の上昇を確認し、加速電圧500 kV 印加可能な条件に到達することができた。6月29日に実施した電子銃単独運転では、JAEA (現 QST) からコンパクト ERL に電子銃を移設してから初めて加速電圧500 kV における電子ビーム引き出しに成功した。この後は、月に1回程度のペースで電子銃単独運転を継続し、高バンチ電荷引き出し試験と空間電荷効果が支配的な領域におけるビーム輸送試験を行った。2018年3月まで加速電圧500 kV において、無放電の状態を累計153時間以上維持することができ、極めて安定に加速電圧500 kV で安定に電子ビームを供給できることを実証した。また、より高いバンチ電荷生成に向けた試験を実施し、200 pC を超える電子ビーム生成可能なことを実証することができた。

(3) 高バンチ電荷生成、加速、輸送試験

産業利用の一つとして EUV-FEL 光源開発は重要なテーマの一つであり、60 pC という空間電荷効果の支配的な高

バンチ電荷ビームに対して、低エミッタンスと短バンチ長を実現することが重要となる。2017年度は電子銃近傍の低エネルギー領域における空間電荷効果の理解とその影響の補償法確立に向けた電子銃単独運転と、超伝導加速空洞による加速・減速まで含めた周回運転を実施した。

高バンチ電荷ビーム生成では、光陰極に照射する励起レーザー出力を増強し、電子銃単独運転においてこれまでのバンチ電荷よりもさらに高い200 pCを超える電子ビームを生成することに成功した。200 pCというバンチ電荷はCW-FELで要求される電荷量に近く、CW-FELに向けた開発として一つの重要な結果を得ることができた。ただし、光陰極表面における空間電荷効果による引き出し電流の制限や、輸送途中のビームサイズの発散等の理解に向けて、今後もビーム試験を継続していく必要がある。

ビーム加速においては、電子銃の加速電圧500 kVに引き上げることに成功し、2018年3月の周回運転では極めて安定に500 keVの電子ビームを供給し続けられることを実証した。加速電圧の上昇は、空間電荷効果を弱めることに繋がり、ビーム品質維持に大きく貢献する。また、超伝導加速空洞による加速・減速を含めた周回運転では、超伝導加速空洞性能の大きな劣化はなく安定して17 MeVビームの周回運転を継続することができた。周回運転を続けることは、現実のビーム運転環境下における超伝導加速空洞の長期性能評価に繋がり、より大規模な超伝導加速器を作る上での重要な知見となる。

(4) バンチ圧縮運転

ERLなど線形加速器ベースの放射光源では100fs以下のバンチ長を目指している。このような短いバンチ長では、PFリングのようにストリークカメラでは分解能が足りないため、異なる手法の検出・測定系が必要となる。コンパクトERLでは、電子バンチが金属を通過するときに放射するテラヘルツ領域のコヒーレント偏移放射を用いてバンチ圧縮の調整とバンチ長測定を試みた[3-4]。検出には狭帯域のダイオード検出器をそのまま使い、広帯域のダイオード検出器やボロメータをマイケルソン干渉計と組み合わせた。バンチ長はバンチ圧縮と呼ばれる手法で短くすることができる。この手法では、オフクレスト加速で進行方向の電子バンチ分布のエネルギーの勾配を与え、その下流のアーケ部の四極・六極電磁石でオプティクスを変える。230-500 GHzの狭帯域検出器でテラヘルツ光の測定を行いながら、その強度が大きくなる条件が最もバンチ長が短くなっているオプティクスとみなした。バンチ分布が理想的なガウシアン分布であると仮定すると、干渉計のスペクトルから解析的にバンチ長を推定することができる。2017年3月の時点では250 fsであった。

(5) 周回部エミッタンス測定

入射診断部の60 pC運転の後、周回部では四極電磁石を用いたQ scan法を用いてエミッタンス測定を20 pC, 40 pC, 60 pCの電荷量で実施した。測定箇所は3か所、

主加速空洞上流、主加速空洞下流(アーケ手前)、アーケ通過後の南側直線部である。入射部と同様に電荷量が大きくなるにつれ、エミッタンスが大きくなる。また、測定箇所依存性があり、主加速空洞通過後に水平方向のエミッタンス増加が目立った。また、アーケ通過によってもエミッタンスの増加がみられた。周回電子エネルギー20 MeVでは空間電荷効果によるエミッタンス増加が大きいと考えられ、原因調査中である。

(6) ビーム診断系維持管理

スクリーンモニター、BPMおよびロスモニターなど、基本的なシステムは大きなトラブルもなく順調に稼働している。2017年度はさまざまな測定や制御を行うためのソフトウェア開発や測定の高精度化・高速化を実現するソフトウェアなど数多くのソフトウェア開発を行った。

参考文献

- [3-1] コンパクト ERL 評価専門委員会, http://pfwww.kek.jp/ERLoffice/hyouka_2017.html
- [3-2] 「ERL 評価専門委員会報告」, http://pfwww.kek.jp/ERLoffice/suishin/hyoka/hyouka_report_2017.pdf
- [3-3] 中村典雄, 加藤龍好, 宮島司, 島田美帆編集, 「コンパクト ERL 成果報告書」, KEK Report 2017-5, March 2018.
- [3-4] Y. Honda, M. Shimada, T. Miyajima, T. Hotei, N. Nakamura, R. Kato, T. Obina, R. Takai, K. Harada, and A. Ueda, “Beam tuning and bunch length measurement in the bunch compression operation at the cERL”, *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research A* **875** (2017) 156-164.

4. PF-AR 直接入射路建設から運転

第3スイッチヤードでPF-AR BTラインの磁気シールドの作成、設置(6月~8月)を行った。AR-BTラインで、ECSマグネットのON, OFFによる漏れ磁場の影響を防ぐため、恒久的な磁気シールドの設置を行なった。ホール素子による簡易的な磁場測定の結果、漏れ磁場は1/10以下まで抑えることができた。

5. KEK放射光計画(KEK-LS計画)

KEK-LS計画に必要な電磁石について機械設計を含む概念設計を行った。KEK-LS計画では、進行方向に磁場勾配のあるLongitudinal Gradient(LG)電磁石(2種類)、機能結合型偏向電磁石、及び四極電磁石、六極電磁石が配置される。このDQBAラティスに必要な電磁石について機械設計を含む概念設計を行った。特にLG電磁石は、コイルを多段に巻いて磁場勾配を作るコイル型及び磁極のギャップを多段にすることにより磁場勾配を作る階段型の2種類について検討を行った。図5.1にLG電磁石(階段型)の設計例を示す。

100 pm-rad程度の超低エミッタンスビームを目指す次世

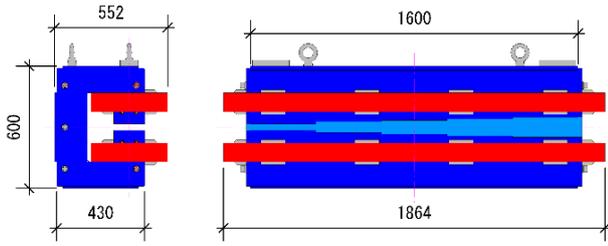


図 5-1 LG 電磁石（階段型）。磁極のギャップが階段状に変化し縦方向の磁場勾配を作っている。

放射光源の計画が世界各地で進められており、KEK でもその設計研究が進められている。次世代放射光源においては、蓄積された電子の集団（バンチ）の中での電子同士の散乱，“Intrabeam scattering (IBS)”，によるエミッタンス増大が大きな問題である。この IBS によるエミッタンス増大を緩和するためには、高調波空洞を導入して電子のバンチ長を伸ばす方法が有望である。ただし、バンチにギャップがある場合には、高調波空洞における過渡的ビーム負荷の効果により高調波電圧が変動し、期待されたバンチ伸長が得られない事がある。我々は、バンチギャップがあるケースで高調波空洞を導入する場合に、次のような手段により有効にバンチを伸張できる事を理論およびシミュレーションにより示した：(1) 高調波空洞の加速モードとして高次の TM₀₂₀ 共振モードを用いる、(2) 高調波空洞を駆動する高周波源の電力・位相を変調して高調波電圧の変動を補正する、(3) 専用のキッカー空洞を設置して高調波電圧の変動を補正する。これらの研究結果を論文 [5-1] で発表し、そのうちキッカー空洞を用いた電圧補償の部分をさらに検討した結果を国際ワークショップで発表した [5-2]。これらの研究については、スイスの Paul Scherrer Institute (PSI) から共同研究の提案があるなど、高い評価を得た。上に述べた目的で使用する高調波空洞としては、ビーム不安定性を起こす恐れのある寄生モード共鳴を十分に減衰させた「高次モード減衰型空洞」が必要である。KEK においては、SPring-8-II 用加速空洞についての先行研究 [5-3] を参考に、周波数 1.5 GHz の高次モード減衰型高調波空洞の設計検討を進めている。2017 年度には、図 5-2 に示した 2 つの高次モード減衰方式について、シミュレーション

による高次モードの評価を進め、その中間結果を国際会議で発表した [5-4]。

将来光源では高調波空洞によってシンクロトン周波数が大きく下がる可能性があり、これによって進行方向のビーム不安定が懸念されている。既存のマシンではフィードバックによって抑制しているが新リングではこの方式のままでは十分な減衰時間が確保できないと予想されており、諸外国の加速器でも問題視されている。RF グループと共同し、スイスの Paul Scherrer Institute (PSI) から共同研究のテーマの 1 つとして検討を進めている。

参考文献

- [5-1] Naoto Yamamoto, Takeshi Takahashi, and Shogo Sakanaka, “Reduction and compensation of the transient beam loading effect in a double rf system of synchrotron light sources”, *Phys. Rev. Acc. Beams* 21, 012001 (2018); <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevAccelBeams.21.012001>
- [5-2] N. Yamamoto, S. Sakanaka, T. Takahashi, “Compensation of Transient RF Voltage in a Double RF System Using a Kicker Cavity”, talk at the 60th ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop on Future Light Sources, Shanghai, China, Mar. 5-9, 2018, presentation ID: TUA1WB02; http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/fls2018/talks/tua1wb02_talk.pdf
- [5-3] 恵郷博文, 渡辺順子, 木村諭, 佐藤潔和, “SPring-8-II 高次モード減衰型高周波加速空洞の開発”, 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 ; https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2014/proceedings/PDF/MOOL/MOOL14.pdf
- [5-4] N. Yamamoto, S. Sakanaka, T. Takahashi, “Simulation study of parasitic-mode damping methods for a 1.5-GHz TM₀₂₀-mode harmonic cavity”, *Proceedings of the 9th International Particle Accelerator Conference (IPAC2018)*, April 29 – May 4, 2018, Vancouver, Canada, pp. 2822-2825; <http://epaper.kek.jp/ipac2018/papers/wepml055.pdf>

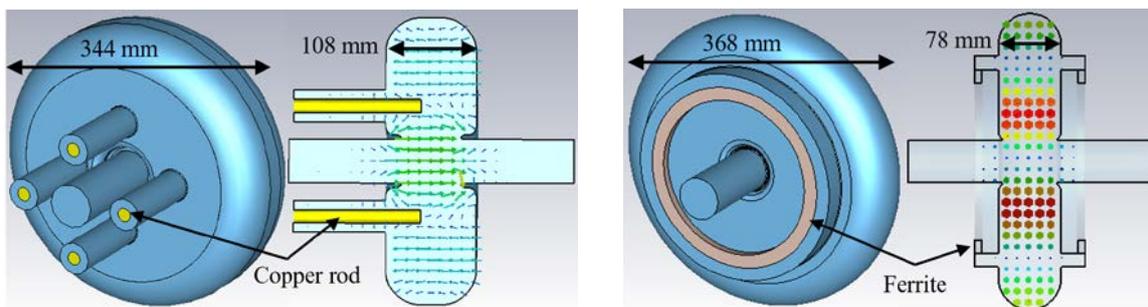


図 5-2 検討を進めている高調波空洞 [5-4]。有害な寄生モードを減衰させる方式として、高次モード結合器を用いる方式（左図）と円環状スロットを用いる方式（右図）、の 2 方式を検討中である。

6. ERL ベースの EUV-FEL 光源計画

EUV-FEL 光源計画では、設計された ERL を用いた高出力 EUV-FEL 光源をもとに、主に半導体の EUV リソグラフィ用光源として産業化に向けた課題の洗い出しや検討が行われた。特に、高い稼働率の確保は高出力化とともに産業化に向けて必要不可欠な課題である。また、光源サイズのコンパクト化も半導体関係のコミュニティからの要望の1つである。高い稼働率の確保には、電子銃カソードの準備・交換作業の遠隔制御の導入、超伝導空洞のトリップ率の改善や電界放出のその場回復方法の開発、システムの冗長化などが重要になる。光源サイズのコンパクト化には、加速空洞の高加速勾配化や ERL の 2 重ループ構造化などの方法があり、前者は空洞やクライオモジュールの清浄な組み立て技術や窒素ドーピング技術の開発、後者は 2 重ループの設計研究とビーム品質への影響の評価が課題となる。この他、試験機や実機に向けてのステップとして EUV-FEL の POC (Proof of Concept) の実証試験も要望されている。産業化に向けた課題・検討は、2017 年 12 月 12 日に開催された第 2 回 EUV-FEL ワークショップでも発表および議論された [6-1]。

参考文献

[6-1] 第 2 回 EUV-FEL ワークショップ, 2017 年 12 月 12 日, 中央大学駿河台記念館; http://pfwww.kek.jp/PEARL/EUV-FEL_Workshop2/

7. 他の加速器への協力

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。2017 年度も引き続き iBNCT 加速器のビームコミッショニングと加速空洞のコンディショニング運転に協力した。

2-3. 今後の展望

光源第1グループでは、2018年度にPFリングの新しいセプタム2の製作を行って老朽化したセプタム2の更新作業を進めるとともに、PF-AR直接入射路を使ったPF-ARのトップアップ運転を実現する。また、トラブルが多発しているPFリングの電磁石電源の老朽化対策とPF-ARのキッカー電磁石の暴発対策を行う予定である。コンパクトERLでは、電子ビーム照射による核医学検査薬の原料であるモリブデン99の製造とアスファルトの長寿命化を試験するためのビームラインの設計・製作および運転を行う。PFリングのアーキ部改造によって低エミッタンス化を行うPF高度化計画では、オプティクスおよび入射スキームや電磁石などの設計検討を始める。EUV-FEL光源計画では、コンパクトERLを用いたEUV-FELのPOC実証試験について検討する。

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、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。また、PFリングのローレベル系については、最新のデジタルフィードバックを用いる方式に置き換えることで性能向上が期待できるため、その検討を進める。次世代放射光源のためのRFシステムの研究については、高調波空洞の開発研究、大電力半導体アンプシステムの開発研究等を着実に進めてゆく予定である。

光源第3グループでは、PFリング、PF-AR、cERLの改良、アップグレードに対応した真空システムの設計開発を行っている。2018年度から2019年度の直近の課題として、PFリングのBL#19用新アンジュレータ用ビームダクトへのNEGコーティングの採用、PFリング入射スキームの改良に伴うビームダクトの更新を予定している。NEGコーティングはPFのアップグレード計画や将来光源においても要となる真空排気技術であり、現行リングのビーム運転の記録はアップグレード、将来光源の設計で貴重な資料となる。入射点の改造では、セプタム電磁石の更新とともに入射口径の最適化を企画しており入射効率の改善を目的としている。

光源第4グループではPFリング、PF-AR、cERLの3つのビーム診断、制御に関して安定なユーザー運転実現に必要な保守と老朽化対策をおこないつつ、さらなる高度化を実現するための研究開発を継続する。このなかでもPFリングのビーム位置モニターの老朽化対策が喫緊の課題であるため低コスト化まで含めて開発を行う。cERLではバンチ時間方向の構造診断や極小ビームサイズの診断、ごく小さなロス検出など多くの研究課題がある。これらはERLに限らず将来光源で必ず必要になる診断技術であるため研究開発をおこなう。PF-ARのビーム輸送ラインの診断系を新たな回路で構築するため回路の試作段階から量産を2018年度中に実施したいと考えている。

光源第5グループでは、2018年度にはPF BL-19の大規

模改造が行われるため、そのための様々な準備を2017年度に行った。2018年度に行われる改造では、これまで準備してきたことを用いてスムーズに新規BL-19に移行できるように、新規電子ビームストッパー移設も含めて、齟齬がないよう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グループは、2017年度末まで「次期放射光源(ERL)の入射部におけるビームダイナミクスの研究を推進するとともに、ERLの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、500kV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」という研究目的の下に、国内外の研究グループと協力しながら研究開発を進めてきた。しかしながら、2016年度に策定された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を受けて、2018年度からグループ再編と研究目的の変更を行うことになった。2018年度からは、光源第6グループは放射光長期計画で重要となるFELのビームダイナミクスを目的として研究開発を進めていく。電子銃開発については、グループ・研究系を超えた横断的な協力体制のもと、放射光長期計画や超伝導加速器の産業利用に向けて開発を行っていく。

光源第7グループでは、引き続きPFリングおよびPF-ARに設置された挿入光源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。具体的には2017年度末に納入されたU#19の磁場調整を行いながら、新規開発した簡易磁場測定装置の性能評価をすすめる。また、夏季停止期間を利用してR#19の撤去とU#19のPFリングへのインストールを実施する予定である。将来光源計画では、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。ERLベースのEUV-FEL光源計画では、産業用量産型アンジュレータの設計を進めるとともに、高平均出力FELとしての性能評価を行う。またその第一段階として、現有のcERLの直線部にアンジュレータを設置した場合の単一通過型FELによる高平均出力光源としての実証実験を目指した検討を進めていく。