

2. 加速器第六研究系（光源）

2-1. 概要

加速器研究施設 加速器第六研究系研究主幹 小林 幸則

加速器研究施設は、加速器の産業・医療応用を推進するため、応用超伝導加速器センターを新設するとともに7研究系を6研究系へ改組した。改組図を図に示す。この改組に伴って、加速器第七研究系は、加速器第六研究系に名称変更された。ただし、所掌業務はそのまま引き継がれ、改組は2019年4月1日より施行となった。

名称は変更され加速器第六研究系となったが、引き続き放射光源加速器（PF リング、PF-AR）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うとともに、今年度から応用超伝導加速器センター（CASA）の管理下におかれたエネルギー回収型リニアック（Energy Recovery Linac, ERL）の小型実証機（コンパクト ERL）の運転・維持および開発に協力している。本研究系は、7つのグループで構成され、2019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、将来光源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、将来光源計画の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2グループには、2019年4月1日付けで内藤大地助教が着任した。

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、またPF リングの超伝導ウィグラーの維持・管理業務を担っている。U#19 新設にともないNEG コーティングを施したアンジュレータチャンバーの製造・設置を行った。またPF リングの入射部の改良や超伝導ウィグラーの更新計画を進めている。

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

加速器第六研究系	
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
満田 史織	准教授
下崎 義人	准教授
島田 美帆	研究機関講師
田中 オリガ	特別助教
東 直	特別助教
尾崎 俊幸	非常勤研究員
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
内藤 大地	助教
高橋 毅	前任技師
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
山本 将博	准教授
佐々木 洋征	助教
金 秀光	助教
野上 隆史	技師
内山 隆司	技師
光源第4グループ	
帯名 崇	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	特別准教授
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	
加藤 龍好	教授・グループリーダー
本田 洋介	助教
光源第7グループ	
土屋 公央	准教授・グループリーダー
阿達 正浩	助教
江口 柊	技術員
塩屋 達郎	シニアフェロー

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、将来光源のための開発研究として、コンパクト ERL において、これまでにない大強度のテラヘルツ光源開発、および高繰り返し高平均出力の中赤外自由電子レーザー（FEL）の開発研究を行っている。また、次世代半導体微細加工用として期待されている ERL をベースにした極端紫外線（EUV）領域の自由電子レーザー（EUV-FEL）の設計研究に取り組んでいる。

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。将来光源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。

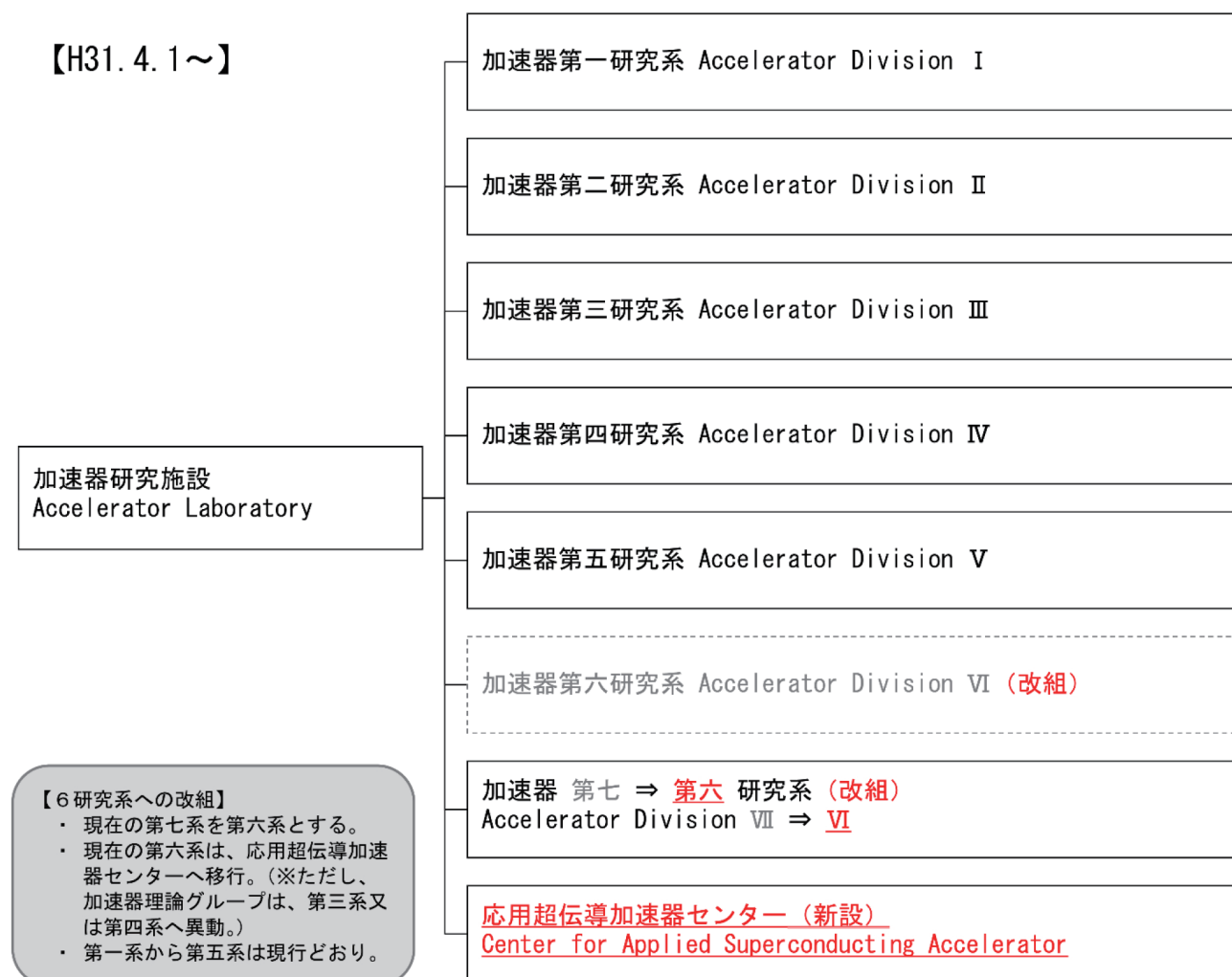


図 加速器研究施設の改組図。応用超伝導加速器センターが新設され、7研究系が6研究系体制となる。

2-2. 活動内容

1. PF リングの運転・維持・管理および開発

(1-1) 電磁石・電源

2018 年に PF リングの 6 極電磁石電源 1 台の制御基盤が焼損し、修理不可能となったことを受け、電源 2 台が新規製造された。AR 直接入射路で採用されたのと同じ設計で、整流はサイリスタ方式、制御は電源に内蔵した PLC を直接制御ネットワークに接続して行う方式である。2019 年春のシャットダウン中に 2 台の新電源を QD, QDA 電源として設置する工事を行い、5 月の運転より利用を開始した。

BL-16 のスイッチング電源が頻繁に応答しなくなる対策として、任意波形発生器のネットワークを制御ネットから切り離し、サブネット化する変更を行った。6 月の運転以降、応答しなくなる不具合は解消された。リングのネットワークに接続される機器が増えてきており、ネットワークトラフィックの増大が不具合を引き起こしたと思われる。

2019 年 6 月に Q8A 電源のコンデンサが破裂し、電源故障となった。修理中、筐体内部のブスバーの絶縁不良が起き、結局、予備品として確保していた旧 QFD 電源に負荷ケーブルを接続変更して運転を継続した。夏の停止期間中に対策と修理は間に合わず、秋の運転からは同様に予備電源として確保していた SFF 電源に再度接続し、運転を行った。旧 QFD 電源から旧 SFF 電源に接続を変更した理由は、電源棟内の電源配置から、旧 QFD 電源の方が利用時に短いケーブルで済み、全体の予備電源としては適していたため、そちらを解放して全体の予備電源として再度確保しておきたかったからである。

コンデンサの破裂はここ数年多発しており、交換の準備を行っていた。2019 年度末のシャットダウン中に、Q8A 電源の修理と復帰、Q3, Q4, 破裂交換済みの電源を除く全ての IGBT 電源に対し、コンデンサの交換作業を行った。PF リングの電磁石コイルの冷却水配管は、16 番直線部上流の Q152 電磁石が最も下流になっている。最下流が最も詰まりやすいのだが、ここ数年、半年に 1 回清掃しないと

水量が有意に減少し、運転できなくなるという現象が続いている。また、冷却水インターロックを検知するインターロックボックスが、基板上の抵抗が 80℃ 程度まで温度上昇する設計になっており、今までに数台、焼損し、改善修理（回路の設計変更と部品の交換）を行っている。2020 年 2 月の運転でも、Q281 電磁石のインターロックボックスの抵抗が焼損し、改善修理済みの予備品に置き換える作業を行った。インターロックボックスは加熱する抵抗以外にも内部の電源回路の経年劣化も問題となっており、予算があれば全数の改善もしくは交換修理を行いたい。

(1-2) PF セプトラム 2 更新に伴う入射部改造計画

PF リング入射部にはリニアックからのビーム輸送路側で 2 台の真空封止パルスセプトラム電磁石が使われている。これら電磁石本体は、PF リング直線部増強改造時（2005 年）に前年の 2004 年より磁場強度を増強したものとして更新されたが、電磁石本体を格納する真空容器と水冷配管は 1998 年建設期から継続して使用されている。2 台の内、下流側のビーム合流点に設置されている 1 台のセプトラム電磁石 2（Sep2）は、2015 年 4 月に長年にわたる運用の経年劣化により真空容器内の水冷配管から漏水があり、ユーザー運転の中断を余儀なくされた。リーク補修材などを使用し応急処置を進めたが断続的な漏水が発生したため、2017 年には水冷配管を閉止し、蓄積リング偏向電磁石からの放射光入熱による温度上昇を防ぐためにビーム合流点上流側の蓄積リングに蓄積ビーム軌道から 15 mm の深さまで挿入した放射光を遮るアブゾーバーを設置した（図 1-1）。これにより、ユーザー運転の中断は回避されることになったが、アブゾーバーにより入射ビームの一部が欠損し、4 台のポンプキッカーを使った設計通りのビーム入射が難しくなり入射効率は 30% 以下まで悪化する結果となった。安定した放射光供給の弊害となっており、光源加速器としては致命的な事態である。

この状況を改善すべく、2018 年に真空外 Sep2 電磁石の製作を完了させ、2019 年度には 2020 年度の夏の加速器長

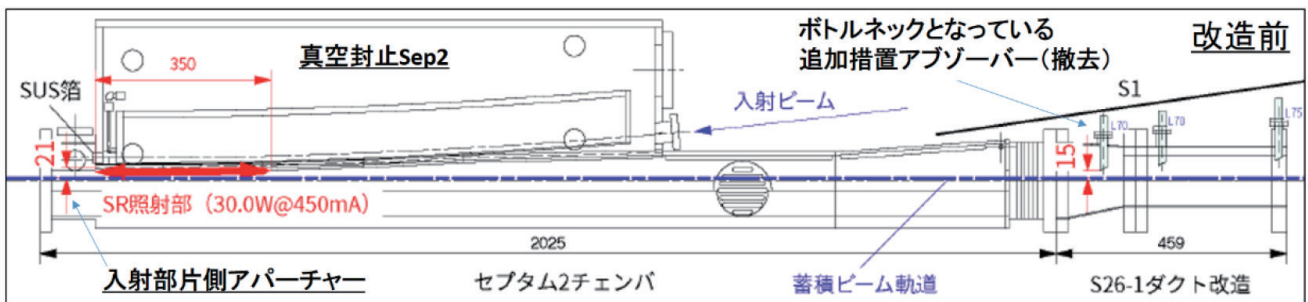


図 1-1 改造前入射部全体俯瞰図

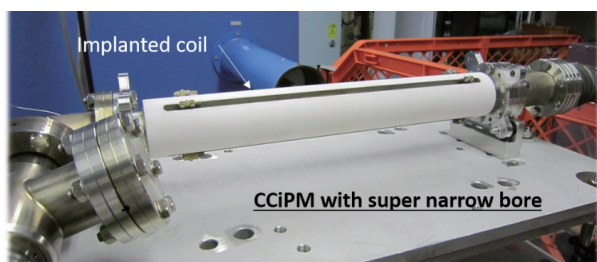


図 1-3 超小口径型 CCI PM D30-D の外観（真空排気設備接続）

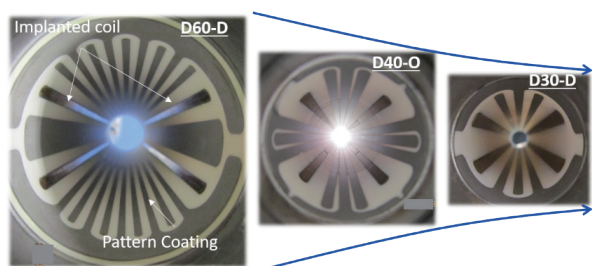


図 1-4 CCI PM の超小口径化モデルと内面コーティング

幅広い技術展開が見込まれている。

CCI PM は 2018 年に建設がされた PF-BT ダンプ点の試験路を使い、その磁場性能や加速器耐久性能の実際のビーム試験実証が進められている。2019 年度は直径 60 mm のダイポール型（D60-D）が設置され、ビームで実証された磁場性能は計算値と 1% で合致した結果を得た。技術開発としては直径が 30 mm のダイポール型（D30-D）の超小口径モデルの製作が完了し、オフラインでの性能試験が進められた（図 1-3）。2020 年度は D60-D に替わり D30-D が試験路へ設置され、ビーム実証試験が進められる。これらの CCI PM は、高速キッカーへの適用を見込んだダイポール型である。同時に、多極入射技術のための直径 40 mm の八極型（D40-O）も開発が進められ、製作に成功している（図 1-4）。このモデルは多極入射技術のビーム実証試験のため、現パルス六極電磁石に代わり PF リングに設置されることが予定されている。オフラインテストでの性能が十分に検証された後、2020 年度以降に、CCI PM を使った多極入射技術のビーム検証へと進められる予定である。

様々な高度な技術が CCI PM には盛り込まれ複合的に一体化されているが、それらの技術は個別に展開することが可能となっている。その 1 つとして CCI PM に利用されるセラミックスチャンバーの内面コーティング技術を、パル

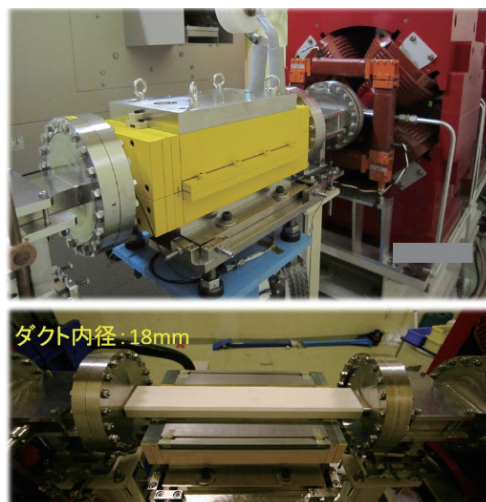


図 1-5 PF リングに設置している PSM

ス六極電磁石（PSM）（図 1-5）のセラミックスダクトの内面コーティングの改善技術として展開された。CCI PM ではコーティングで生じる渦電流による不整磁場を抑制する為、円筒内を均一のコーティングでなく櫛歯型のコーティング形状で実装する技術が開発されている。櫛歯形状のコーティングは大きなループの渦電流生成を阻害するだけでなく、櫛歯同志の対面が容量性インピーダンスを持つことで、ダクトが有すべきビーム鏡像電流である壁電流の導電性を確保することも出来る。パルス六極電磁石は本来ならば蓄積ビーム軌道が磁場のゼロとなる磁石中心に置かれることで蓄積ビームを無摂動で入射を可能にするはずであるが、セラミックスダクト内面の均一コーティングが渦電流を生成し、蓄積ビーム軌道を揺らす不整磁場となっていることが解明されつつある。この現象が、パルス六極電磁石による入射技術の確立を難しくしている要因となっている。この対策として、CCI PM の渦電流を抑制したコーティング技術がこのパルス六極電磁石のセラミックスダクトに実装することが計画された。2019 年度は、実装する形状の渦電流の観点から、そしてビームインピーダンス観点から最適化がシミュレーションで検討され、その最適値を実現できる精密なパターンコーティング技術の開発に成功した（図 1-6）。新たなコーティングを実装されたダクトはその真空的（真空到達度が 3×10^{-8} Pa）、電氣的（櫛歯間の $2 \times 10^{10} \Omega$ の絶縁がとれていること）に健全性が確認されており、2020 年度に既設のダクトとの入れ替え、ビーム実証試験が行われる予定である。

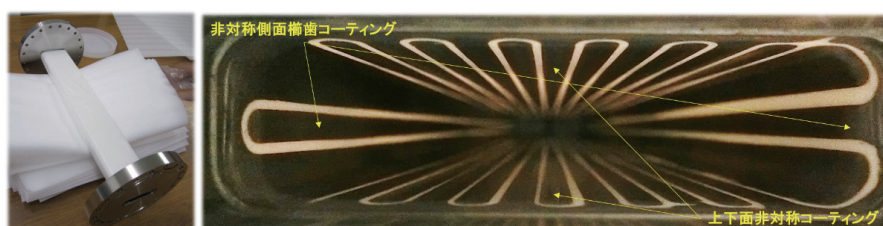


図 1-6 パルス六極電磁石用の新たなコーティングが施された新ダクト

(1-4) 高周波加速 (RF) システム

高周波加速 (RF) システムに関しては、2019 年 2 月に不調が発生したクライストロン用高压電源 (B1 ステーション) の調査を 4 月の運転停止中に行った。その結果、出力電圧を制御するサイリスタ盤に組み込まれた部品 (可変抵抗器) の故障が原因であると判明し、当該部品を交換して復旧した。これにより、5 月の PF 運転より RF 系を通常の 4 台運転に復帰させた。その後 6 月 15 日と 6 月 18 日に、クライストロン用高压電源のうち 1 台ないし 2 台が同時に「変圧整流器二次過電流」インターロックの動作によりダウンするトラブルが発生した。調査の結果、高压電源に不具合は見られず、高压電源を再立ち上げて復旧した。後日、トラブルの原因は、約 300 メートル離れた場所に設置されている KEKB ダンピングリングの高压電源のクローバ回路 (クライストロンを保護するため、放電時に高压電源の電流を分流させる回路) が動作した事による受電電圧の変動によるものと判明した。対策として、変圧整流器二次過電流インターロックの設定値の確認と再調整を 7 月の PF 停止中に実施した。

夏季停止期間には、例年の保守作業である (1) クライストロン用直流高压電源 4 台の保守点検、(2) 高周波を制御する為のローレベル回路系の点検、を実施した。また高周波加速系では、冷却水配管のフランジに石綿含有ガスケットを多数使用しており、その除去・交換作業を着実に進めている。

マシンスタディに関しては、ビーム電流が高い時に発生する事が知られているビーム不安定性である静的ロビンソン不安定性 (static Robinson instability) の実験的研究を進めた。蓄積された電子バンチが縦方向に一斉に振動する振動数 (コヒーレント・シンクロトロン振動数) がビーム電流に応じて変化する様子を測定し、理論的予測と比較を行った結果を加速器学会年会で発表した [1-1]。

(1-5) 真空システム

2019 年度はアンジュレータ U#19 の新設に伴って、PF リングとして初となる NEG コーティングダクト (アルミ合金製) を導入し、 10^{-8} Pa 台のリング真空圧力を運転開始後すみやかに達成できることを実証した。U#19 ビームダクトの NEG コーティングはイタリアのメーカーに外注したが、将来的に必要となる小口径ビームダクトの内面コーティング、さらに実用上重要と考える曲がったビームダクトや枝分かれしたビームダクトの内面全体に効率よく均一なコーティングをする技術を目指して、独自の NEG コーティング研究開発用設備の整備を進めている。設備の外観を図 1-7 に示す。この図に示すように、一般に NEG コーティングにはダクトの外部にソレノイドコイルをかぶせて一様な磁場を印加することで均一な放電を維持する同軸のマグネトロンスパッタが用いられる。ビームダクトの口径が極端に小さくなると、放電を維持するために強磁場が必要である。また、不均一な放電が発生しやすくなり、製膜に偏りが生じるなどの困難な問題に直面する。ソレノイ

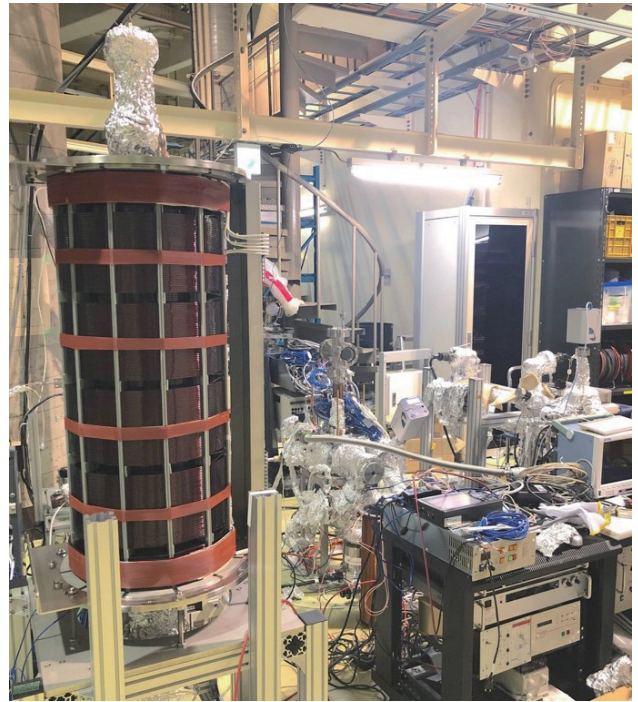


図 1-7 NEG コーティング研究開発用設備

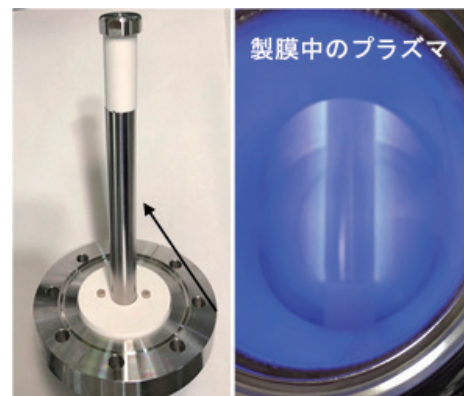


図 1-8 永久磁石を内蔵したスパッタターゲット

ドコイルを設計自作するなどして、上記の様な課題への挑戦を進めている。さらに、曲がったダクトや枝分かれをしたダクトなど、真っ直ぐな同軸構造では対応出来ないビームダクトへのコーティングを目指して、スパッタリングターゲットの内側に永久磁石を内蔵する方式のスパッタターゲットの開発も行っている (図 1-8)。発生する磁場の強さやプラズマの状態をシミュレーションによって解析するとともに、試作したスパッタターゲットを用いて製膜した NEG コーティングの性能試験を行っている。将来的には、ビームダクトの曲線あるいは枝分かれ構造に形を合わせたスパッタターゲットを製作し、コーティングを行う計画である。

(1-6) ビーム診断システム

ビーム診断に関して、ユーザー運転に影響を与えるような深刻なトラブルはなく運用を継続できた。一方で、ビー

ム位置モニター専用の計算機が原因不明で停止するなど老朽化が深刻化しつつある。全システムを更新する予算は無いため、段階的な更新をすることを決断した。まずはもっとも深刻な DSP で構築している高速フィードバック信号処理部分について、従来の VME 計算機から、PCI Express ベースのシステムに移行を進める方針として、2019 年度にはハードウェアの調達およびテストベンチの構築を行った。ひきつづき 2020 年度に信号処理部分の更新を完成すべく開発を継続する。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。加速器制御に関連しては、ユーザーの利便性を高めるため、前年度より導入をはじめた Archiver Appliance (AA) に関連したプログラム開発を進めている。特に Web からのデータ取り出しを有効におこなう Grafana プラグイン開発を KEKB 制御グループと協力しながら行っている。

(1-7) 基幹チャンネルシステムおよび安全システム

(1)PF 基幹チャンネル保守作業（基本的には不具合のある箇所との交換作業）

BL-13, BL-14 では、BA ゲージ, TSP の交換など、小規模の真空作業を行った。BL-4 基幹チャンネルで $\phi 356$ 大型ゲートバルブの交換を含む大規模な真空作業を行った。旧ゲートバルブは ANELVA 製（現 Canon-ANELVA）で、圧空式超高真空仕様の大型バルブである。設置後 30 年以上経過し、開閉時の衝撃音が徐々に大きくなっていった。空気圧での調整も試みたが、開閉スピードは多少変化するものの衝撃音には変化がなかった。また、ベークの繰り返しにより筐体に歪みが生じており、オーバーホールや修理もできない状態だったため故障予防措置として VAT 社製の大型バルブに入れ替えることを決断した。新しいゲートバルブ本体の重量が 50 kg を超えるため、設置時はクレーンで仮固定しながらの作業となった。ゲートバルブに接続する両側の ICF フランジは、ベークの繰り返しにより歪みが生じていたため接続部からの小さなリークを止めるのに作業は難航したが、最終的にトルクの増し締めで止めることができた。ガasketには、大きなトルクでの増締めが可能な 3 mm 厚の銅を使用している。

(2) 安全系

PF リングと PF-AR, cERL の PPS (Personal Protection System) を中心とした加速器のインターロックの構築と運用を行い、加速器を安全に運転できるようにする事を担っている。インターロックについては定期的な保守点検を行って報告書を作成し、また、将来を見越したインターロックシステムの構築のために必要なネットワークや各コンポーネント、ソフトウェア等の技術的研究開発も行っている。

(3) インターンシップの受け入れ

9/4 にインターンシップで 4 名の学生を受け入れた。テーマは「真空」で、午前中は KEKB で講義を行い、午後から PF 光源棟にて実習を行った。実習は TSP のヘッドの交換、真空装置への組み込みを行い、粗排気で排気しリークチェックをするところまで体験してもらった。

(1-8) 挿入光源システム

2019 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 5 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 2 件 (ID16-2, ID02), 補正電磁石電源の通信エラーするものが 1 件 (ID19), 測定器側からのみ操作出来ない事例が 1 件 (ID16-1), MMI 表示エラーが 1 件 (ID15) であった。また、これまで継続して行ってきた PF の ID 制御システムのソフトウェア更新が完了した。これまでの 12 台の挿入光源用に開発されたそれぞれ独立した制御ソフトウェアの内、共有化可能な部分をまとめ、コントローラユニット外部コマンドの共通化を行うことで、同一のフレームワークに IOC 制御プログラムを構築した。これと同時に IOC サーバーの更新を行い、ハードウェアの共通化を行っている。これによって、今後の ID 制御系のメンテナンス性が向上することが期待される。

参考文献

[1-1] 山口孝明, 坂中章悟, 山本尚人, “PF リングにおける static Robinson instability のスタディ”, 第 16 回日本加速器学会年会プロシーディングス, 2019 年 7 月 31 日～8 月 3 日, 京都, pp. 1042-1046.

(2) PF-AR の運転・維持・管理および開発

(2-1) PF-AR 運転・マシンスタディ

PF-AR (AR) の加速器運転では 2018 年度から 2020 年度にかけて 3 カ年にわたる運転目標の計画を立案している。2018 年度は 6.5 GeV の蓄積ビームエネルギーでのフルトップアップ運転の実現, 2019 年度は省エネ対応のためユーザー運転期間の一部期間を 5 GeV にエネルギーを下げたトップアップ運転の PF 運転との共存, 2020 年度はユーザー運転時間を確保するための加速器立ち上げ調整の短縮化・合理化である。この目標計画に基づき, 2018 年度は 2017 年度にリニアックと PF-AR リングが直接輸送路でつながったことにより PF 運転と共存した AR の 6.5 GeV のフルトップアップ運転の定常化がなされた。また, 2019 年度当初から 5 GeV のトップアップ運転が正式に運用開始されたことを受けて, 2019 年度は 5 GeV 運転のための加速器調整の最適化, 5 GeV のトップアップ運転を PF のトップアップ運転と共存させる運転スキームを確立させ, 定常化させることが目標とされた。

リニアックからの AR-BT 直接入射路はリニアック最下流の分岐点で PF リングと AR リングへとビームを分配するパルスベンドを開始点とし, PF への輸送路と交差する DC ベンドを経由し AR リングへ輸送される。この交叉点では DC ベンドは AR 用 6.5 GeV 電子ビームエネルギーと PF 用 2.5 GeV 電子エネルギーのビームの曲げ角を同時に成立させるように最適化されている。このため, 現状のままでは 5 GeV ビームエネルギーでのトップアップ運転は DC ベンドで PF リングのトップアップ運転との共存が

難しく、5 GeV ビームエネルギーでのトップアップ運転の実現のために、DC ベンドの曲げ角を一定時間ずつ 2.5 GeV エネルギー用、5 GeV エネルギー用に切り替える新たな運転スキームを確立した。この「トップアップ時間配分法」では、PF リングでの電子ビーム寿命が AR リングへトップアップ入射の継続を許されるだけ十分に長いことが前提となっているため、PF リングで通常のマルチバンチモード運転（ビーム寿命：~24hrs）であるときに 5 GeV 運転期間が対応するようにスケジュールの工夫がなされている。PF リングのハイブリッドモード運転でのビーム寿命は ~10hrs と短いので、6.5 GeV 運転期間に対応させている。AR リングでの蓄積電流値の減少幅の許容値が PF リングよりも厳しくないことを考慮し、2019 年度の上期、5 月からのユーザー運転では、PF リングへ 3 分、AR リングへ 30 秒の時間を配分した。2019 年度の下期、10 月からの運転では、リニアックからのビーム入射不調の場合のリニアック側オペレーターによる調整時間や、リニアックでの 20 MeV 程度のビームエネルギーの変位量にたいして自動補正にかかる時間を考慮し、配分時間の見直しが図られた結果、PF リングへ 2 分、AR リングへ 1 分 30 秒の運用を開始し、PF リング、AR リングへそれぞれ、0.2%、0.8% 以下の電流値の変動で 5 GeV エネルギーと 2.5 GeV エネルギーのトップアップ運転の共存に成功している。上期の電流値変動量が PF と AR で 0.1%、1.1% と下期よりも AR 側で安定度がやや低かったが、十分にユーザー側の要求に応える運転が出来たと考えている。これにより AR リング 5 GeV エネルギーのトップアップ運転と PF リングトップアップ運転との共存のスキームが確立された。

AR 運転の蓄積電流値は、2019 年度の上期においては前年度から続く RF の HOM カプラーケーブルの不良によるケーブルの発熱が問題となっており、予防保全的に 55 mA での運転を開始した。5 月 17 日のユーザー運転開始から 5 月 19 日には、その発熱があらためて顕在化し、熱損で劣化したケーブルを交換後 50 mA に制限した運転を継続している。HOM カプラーケーブルの発熱の原因は、AR-BT 直接入射路の完成により定常的にトップアップ運転が行われるようになり、蓄積電流値が高い値で維持できるようになったためと推察されている。発熱を抑制するためには蓄積ビーム電流値を低く抑えざるを得なかったが、ユーザー側からは問題ないとの了解を得ることができた。その夏に HOM カプラーケーブルの全数交換が行われ、発熱による熱損で劣化したケーブルは一新された。その後の下期の運転では、発熱の問題を再発させないために蓄積ビーム電流値を 50 mA とすることをユーザー側と申し合わせて、順調に運転を継続することができた。

加速器の立ち上げ調整では、いくつかの新たな試みがなされている。1 つ目は、実ビーム運転を使った加速器の暖機運転である。6.5 GeV のビームエネルギー運転で最適化された AR リングは 5 GeV ビームエネルギーでのビーム蓄積調整が難しい側面があった。そのため、立ち上げ調整に入る前に加速器トンネル内の暖機を兼ねて 1 日の電磁石

通電を行っている。実際に、6.5 GeV のエネルギーでビームを蓄積して加速器の運転調整をしながら加速器の冷却水を始めとするあらゆる機器装置の暖機をした後に、5 GeV 運転調整へと移行することで温度ドリフトを緩和した円滑な加速器調整へとつなげている。この事前の暖機を兼ねた 6.5 GeV ビームエネルギーでのパラメーター調整は、5 GeV エネルギーから 6.5 GeV エネルギーでのユーザー運転への切り替えの合理化へもつなげられる有効策となっている。2 つ目は、高い入射効率を維持するためにリニアックからのビーム輸送路におけるディスパージョン点でのビーム位置モニターでのデータを統計的に蓄積したヒストグラムによる監視を開始している。統計的にデータを蓄積することで、突然のエネルギー変位や長期的なドリフトの傾向を監視することができ、緩やかなドリフトに対しては手動での補正をかけていくことが可能になっている。10 月の運転から、このビーム位置モニターを使ったりリニアックのエネルギーフィードバックの運用が開始されたことにより、突然のエネルギー変位や長期的なドリフトによる入射不調が減少した。3 つ目は、運転中も含め、季節変動に起因するリング全体の温度変動による RF 周波数・周長補正に応じた入射位相ドリフトの補正である。春→夏、秋→冬など夏季の加速器長期停止期間を挟んだこれらの運転期間は、外気温の影響を受ける温度ドリフトが顕著であるため、入射位相の調整が時々必要である。この調整量を AR リングの立ち上げ調整中にパラメーターとして取得しておき、RF 周波数の自動補正幅のトレンドに応じた入射位相値を自動的に算出し、その指示値に従って時々（2~3 日に 1 回程度）に手動で的確に予想される入射位相へと調整することが可能となった。これにより高い入射効率をユーザー運転期間全般に渡り維持することができている。

2019 年度は、機器の故障率が少なく運転ができたことも含め、直接入射路の完成によるトップアップ運転の恩恵を最大に生かした 1 年となった。蓄積電流値を一定に保つことが出来るため、加速器機器装置を含め、リング全体が安定した温度を保持しており、加速器の安定度が飛躍的に増している。蓄積電流値の定時入射モードで運転をしていた過去のこれまで不可解な制御の難しいビーム挙動などが一掃されている。今後、より立ち上げ調整の合理化などを図ることでユーザー運転時間の確保などに貢献をしていく予定である。

マシンスタディでは、運転で得られている 5 GeV ビーム寿命が本来あるべき値となっているのかどうかを検証するための 6.5 GeV エネルギーと 5 GeV エネルギーでのビームパラメーター及び応答関数の取得や、2 台のパルスセプタムと 3 台のバンピッカーの入射部パラメーターの最適化を 5 GeV エネルギーでの入射効率改善の可能性の模索を主眼として行った。5 GeV でのビーム寿命は加速器リング設計上のパラメーターと相違ないことをバンチ長、RF 電圧との相関、真空度からの換算で確認がされている。これにより、現状の入射効率は最適化されていると考えられる。入射部については、バンピッカー 3 台の内 1 台を暴

発問題のために利用していないために正規の入射となっていないことやバンプキッカー波形のひずみが大きいことによるバンプ閉軌道の生成の難しさなどが明らかになって来ている。今後、これらの課題は何らかの対策を講じて解決を進めて行く予定である。

(2-2) 電磁石・電源

PF-AR 電源は、30 年超の運用を続ける 8 台の Q 電源を除き、更新から 10 年を経過する電源が散見されるようになってきている。そのため、計画的な保守を進めるフェーズとなっており、2019 年度はその 5 カ年計画の 1 カ年目に該当した。PF-AR で偏向電磁石すべてを直列励磁している唯一の偏向電磁石電源は保守点検を無事に終え、電源の健全性に問題がないことが確認され、運転電流値の 8 時間連続通電安定度として設計仕様以下の 47 ppm を得た。電源性能は劣化せずに高い安定度を保持していることが確認された。この電磁石電源は予備機がないことから故障時には長期のユーザー運転の停止が想定されるために、今後 3 カ年に渡り重点的な保守が行われる。製作から 37 年が経つ 8 台の Q 電磁石電源は老朽化が著しいために毎年の保守の対象電源となっているが、不具合が見つかっておらず順調に運転を継続している。しかしながら主要部品の廃番や代替の機種がないなどの問題を抱えており、薄氷を渡るような運用が続いている。製作から 6 年以上が経過している計画保守に該当した電源は、点検の結果によると製作当時の性能仕様を維持していて問題がない。総数が 149 台に達する補正電磁石電源は製作から 19 年が経過しており、前年度から半期に 2 台程度ずつ継続的に故障が見つかるようになってきている。故障の症状は様々であるが、経年劣化による原因が大半であるため、主要な経年劣化部品の交換作業をリング 1/4 周分ずつ進めている。

電磁石の機器保護を担うインターロックシステムの配線設備が放射線量の高い設置環境によることもあって劣化が進んでおり、配線設備再構築を進めている。現設備を生かしつつ並行して整備することで、六極電磁石、四極電磁石、偏向電磁石の順に設備の移行を図る計画となっている。2018 年度に六極電磁石、2019 年度の運転を通じて四極電磁石のインターロックシステムの試験運用が完了した。

運転全期を通じて、偏向、四極、六極電磁石の大型電源の故障はなく、故障が散見した小型のステアリング電源については運転前に故障が発覚して事前に予備電源との交換の対応がとられており、電源故障を起因とするような加速器運転の中断はない。また、電磁石の故障事象もなく、安定した光供給がなされた。

(2-3) 高周波加速 (RF) システム

PF-AR では、ビームを加速するために 6 台の APS (Alternating Periodic Structure) 加速空洞を使用している。各 APS 空洞は 11 個の加速セルを持ち、各加速セルには高次モード結合器 (HOM カップラー) という一種のアンテナが取り付けられている。HOM カップラーを用いて、ビー

ムが誘起する高次の共振モード (Higher Order Mode; HOM と略称) の電磁場を引き出すことにより、ビーム不安定性を緩和する。引き出された高次モードの電磁波は、約 80 cm の長さの同軸ケーブル (HOM ケーブル) を通じて 3 kW ダミーロードに導かれ、そこで消費される。PF-AR では、HOM カップラー、HOM ケーブル、3 kW ダミーロードをそれぞれ 70 個使用しており、高次モード伝送系だけでも規模が大きい。

PF-AR のビーム運転中に HOM ケーブルが異常に発熱し、運転を中断して交換が必要になった事例が 2018 年以降に 4 件発生した。これらのトラブルの主な原因は、HOM ケーブルおよび関連部品のポリエチレン絶縁体が経年および放射線照射により劣化した為だと考えられた。このため、2019 年 7 月～10 月中旬の PF-AR 停止期間中に次の更新作業を行った: (1) HOM ケーブル 70 本の更新、(2) 3 kW ダミーロード 70 台のオーバーホール、(3) HOM カップラーのポリエチレン絶縁体の更新、(4) HOM ケーブル用温度スイッチと温度センサーの増設、(5) 温度データ収集システムの更新。このように更新された HOM ケーブル系は、2019 年 10 月下旬からの PF-AR の運転で使用され、順調に稼働している。更新が完了した HOM ケーブルおよび関連装置を図 2-1 に示す。この HOM ケーブル系の更新について、2020 年度加速器学会年会で発表した [2-1]。

また、停止期間中に高周波加速 (RF) システムに関する次の保守作業を実施した: (1) クライストロンの定期保守、(2) クライストロン用高圧電源の保守点検、(3) クライストロン冷却系の保守、(4) 立体回路系の 400kW ダミーロード 1 台の交換、(5) APS 空洞の周波数チューナー駆動部の保守、(6) ローレベル系の点検。

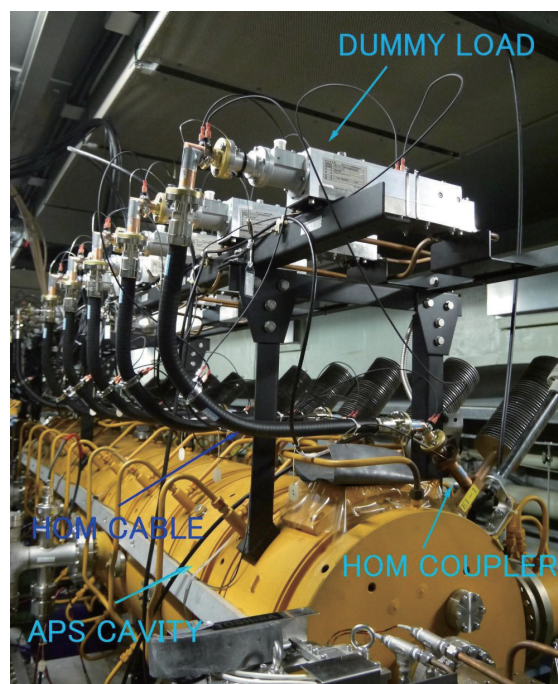


図 2-1 更新された高次モード引き出し用ケーブル系

(2-5) ビーム診断システム

ビーム診断に関しては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遅滞なく行っている。ビーム輸送ラインのビーム位置検出器について、2018 年度から我々のグループ独自で設計・製作した回路の量産をおこなって実運転に供している。バンチ純化システムもユーザーの要望に応じて調整を行い、必要な純度を確保できている。制御に関しても特に問題なく稼働している。

(2-6) 挿入光源システム

2019 年度の PF-AR リングにおける挿入光源の運転に関しては目立ったトラブルは発生しなかった。2020 年度は PF リングで先行しておこなってきた ID 制御システムの更新作業を踏まえて、AR の ID 制御系に対しても IOC サーバーとソフトウェアの更新を行なう予定である。(図 2-2) の写真上段に示す ID 制御用 IOC サーバーは、写真下段の小型で同型のマイクロサーバーに置き換わり、PF と同様に大幅に共通化された制御プログラムによる運転を開始した。

参考文献

- [2-1] 坂中章悟, 高橋毅, 山本尚人, 内藤大地, 渡邊謙, “放射光リング PF-AR 用加速空洞の高次モード引き出し用ケーブル系の更新”, 第 17 回日本加速器学会年会プロシーディングス, 2020 年 9 月 2 日～9 月 4 日, オンライン, 発表 ID: WEPP30.



図 2-2 更新された PF-AR の ID 制御サーバー (ラック下段)

(3) コンパクト ERL の運転・維持および開発

(3-1) コンパクト ERL の現状

エネルギー回収型リニアック (Energy Recovery Linac, ERL) の小型実証機として建設されたコンパクト ERL (cERL) は、2019 年度から応用超伝導加速器センター (CASA) の管理下におかれ、超伝導加速器技術・ERL 技術の産業応用を念頭に置いた運用を目指している。また、cERL の低エミッタンス、短バンチ、高繰り返しというビーム特性を生かし、穴あき導体標的を用いたコヒーレント回折放射 (CDR) の発生や共振器型回折放射 (R-CDR) の実証試験も行っている。

2019 年度は、民間資金の導入によって建設された照射部ビームライン (BL) を用いて、4 月に照射部 BL でのビーム調整と施設検査、6 月・10 月に核医学用検査用の RI 製造やアスファルトの長寿命化の基礎的な研究が行われた。また NEDO の競争的資金によって進められてきた中赤外自由電子レーザー (FEL) の開発は、2020 年 2 月に FEL システムを構成する 2 台のアンジュレータのうち 1 台の設置が完了し、3 月にアンジュレータ 1 台だけの光発生試験が行われた。2019 年度は前述のように年 4 回の運転が実施されたことにより、cERL の運転時間 (高圧印加, RF On 時間) は 1,100 時間を、Beam On 時間も 530 時間を超えて、建設以来最長となった。また、2017 年 3 月に開始した電子銃の 500 kV 運転は、2020 年 3 月に累計の高電圧保持時間で 1,000 時間を超えた。この間、電子銃の高電圧に起因するトラブルは発生しておらず、長期にわたる安定な運用が実現されている。

(3-2) 赤外 FEL プロジェクトの概要

KEK は昨年度より新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) からの競争的資金 [1] を得て、赤外 FEL プロジェクトを開始した。このプロジェクトの目的は、コンパクト ERL を用いて赤外 FEL を建設し、その FEL を産業用レーザーの開発に必要なレーザー加工データベースを構築するための光源として使用することである。また、この FEL は将来の EUV リソグラフィ用の ERL ベース FEL [2] のための実証機になることが期待されている。

このプロジェクトで建設する FEL システムでは、電子ビーム源として cERL を利用し、その南側直線部に 2 台のアンジュレータと光測定システムを設置する。このアンジュレータ周期長は 24 mm, K 値は最大 1.4 で、電子エネルギー 17.5 MeV のとき波長 20 μm の光を発生する。バンチ当たりの電荷量は 60 pC となるため、高ゲイン・シングルパス FEL でレーザー発振を実現するためには、バンチ圧縮が必須である。バンチ長を 0.5 ps (FWHM), エネルギー広がりを 0.1% (rms) 程度に抑え込むことができれば、81.25 MHz 繰り返しの CW 運転時に平均出力として最大 10 W 程度が期待される。建設は 2019 年 10 月から開始され、翌年 2 月に 1 台目のアンジュレータの設置が完了した。2020 年 3 月のビーム運転では新規に導入された機器の動作確認と 1 台目のアンジュレータからの光計測が行われた。

(3-3) 赤外 FEL 建設と電磁石・電源の整備

コンパクト ERL (cERL) の赤外自由電子レーザー (FEL) は、NEDO 事業「高輝度・高効率次世代レーザー技術開発」の下に cERL の南直線部に建設され、2つのアンジュレータとその間に設置されるシケイン電磁石などから構成される。図 3-1 に改造前の cERL 加速器を、図 3-2 に赤外 FEL 建設による改造後の cERL 新南直線部を示す。アンジュレータ 2 台のうち上流の 1 台のみを設置する第 1 次建設が、2019 年 10 月の運転終了直後から 2020 年 3 月の運転開始前までの間に実施された。今回新たに 6 台の四極電磁石、3 台のステアリング電磁石及び 1 台のシケイン電磁石を新規導入し、既存の電磁石の並べ替えと合わせて、15 台の電磁石設置を行った。新規導入の四極電磁石は JAEA からの譲渡品、ステアリング電磁石は PF リングの早い軌道フィードバックに使用されているものと同一品、シケイン電磁石は東京大学物性研究所で以前アンジュレータ用移相器の試作機として開発されて後に KEK に移管されたもので、今回改めて新規導入の電磁石全てを PF 電源棟にて磁場測定を実施した。

架台は新たに 4 台製作し、また真空架台、アンジュレータ台座等と合わせてアンカー打設を実施した。その際、KEK-PS、EP2 ビームライン跡として放射化している箇所については (図 3-1 の赤で塗られた部分) 発生する粉塵が周囲を汚染しないようビニールハウスを設置し、その中で穿孔作業を実施した (図 3-3)。架台の設置精度は ± 1.0 mm, ± 1.0 mrad に収めた。電磁石アライメントについてはレーザートラッカー N3 (光学レベル) を使用し、 ± 0.1 mm, ± 0.1 mrad 以内に収めた。

電磁石電源については新たに CAEN SY3634 (± 10 A, 40 V) 4 台と 16 台の菊水 PWR401ML (40 A, 40 V, 400 W) を新規購入した。菊水電源自身は片極性のため、リレースイッチ機能を持った極性切替器を同時に導入し、擬似的な両極性環境を構築した。

また、電磁石電源の一部を空調管理されたハット内に設置する工事を 2019 年 9 月に実施した (図 3-4)。これと電源の回路基板の改善により、電磁石電源故障の発生率は大幅に抑えられた。

第 1 次建設終了後の新南直線部の様子を図 3-5 に示す。

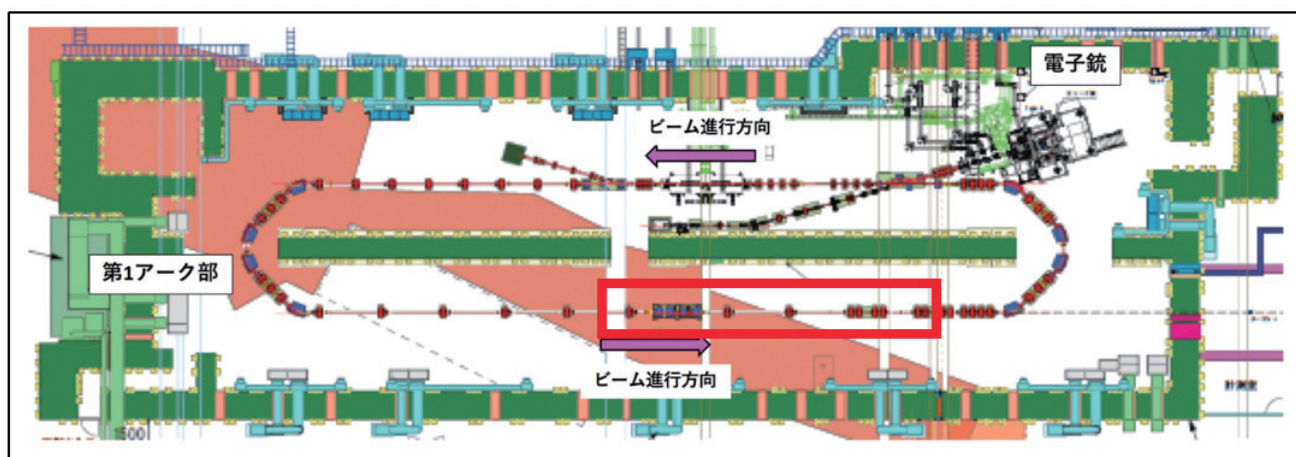


図 3-1 cERL 加速器室内全体と今回改造した部分 (赤枠)

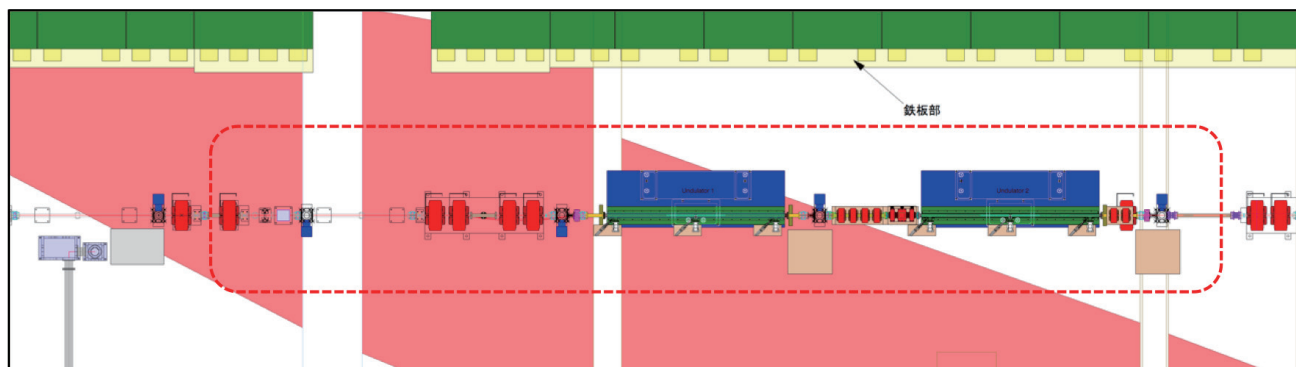


図 3-2 FEL 設置後の cERL 新南直線部の概略 (赤枠)

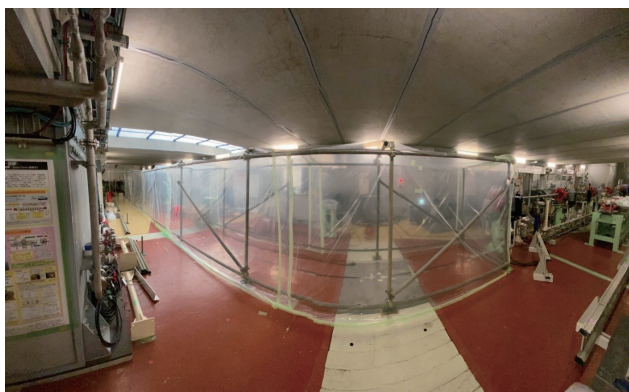


図 3-3 放射化された床へのアンカー打設時の様子



図 3-4 空調管理が導入された一部電磁石電源

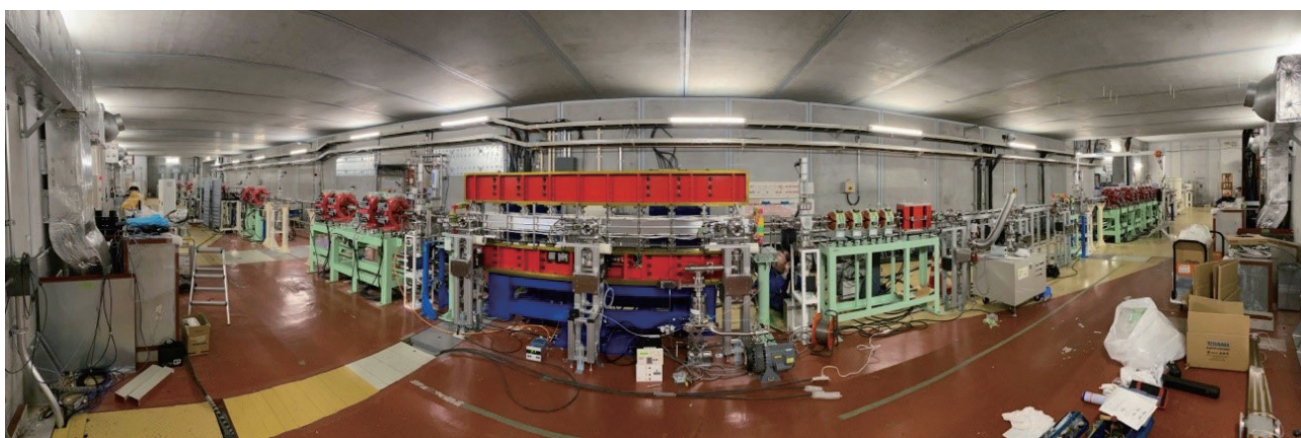


図 3-5 第 1 次建設完了後の新南直線部。中央に見えるのがアンジュレータ U01。

(3-4) cERL 用ビーム診断システム

スクリーンモニタ、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。2019 年度は FEL 運転に関連してアンジュレータ部のスクリーンモニタおよびビーム損失モニターなどの製作・開発を実施した。制御では各種のビーム調整ソフトウェア開発と運転を行い、FEL ビーム調整に貢献している。

(3-5) cERL-FEL 用アンジュレータの建設

今期の挿入光源開発として光源第 7 グループでは、コンパクト ERL (cERL) において中赤外自由電子レーザー用の 2 台のアンジュレータ (U01, U02) を建設した。この計画は、NEDO (新エネルギー産業技術総合開発機構) の公募型委託研究「高輝度・高効率次世代レーザー技術開発」に基づくもので、中赤外波長領域 (波長 10 ~ 20 μm) の波長可変な高出力レーザー光源を開発する事を目標とする。電子ビームエネルギーが 17.5 MeV である cERL において、この波長領域の放射光を発生させるために周期長 24 mm、長さ 3 m のアンジュレータを 2 台タンデムに配置して使用する。このアンジュレータは Gap を 10 mm に固定して、波長変更のために上側磁石列を長手方向にスライ

ドさせる Adjustable Phase Undulator (APU) 方式を採用している。この方式の採用によって計画全体でのコストを抑制しつつ、2 台の cERL-FEL 用アンジュレータを短期間で建設することに成功した。

cERL リングでは電子ビームエネルギーが 17.5 MeV と低いために、アンジュレータ内部の電子ビームの輸送がこのアンジュレータの開発に当たっての重要な課題であった。また、このアンジュレータでは上下磁石列を構成する各磁石を、長さ 3 m のアルミ磁石列取付け板へ直接クランプ留めしているため、U01、U02 の磁場調整においては磁石の入れ替えによる調整法を採る事ができない。そこで予め全ての磁石に対してビーム進行方向の磁場分布を測定してこれを重ね合わせることで予め良い磁場分布を得ることを目標に開発を行った。個別磁石の磁場分布測定には準備を含めて 3 カ月以上を費やしたが、合計 2200 個の全ての磁石の磁場測定を行った。この測定データを用いた最適化計算の結果、アンジュレータ内を電子ビームが振動する全領域で磁場を整える目的を満たす初期磁石配列を得ることに成功した。この結果をもとに 2 台のアンジュレータに対して磁石の組付けを行った。U01 は 2019 年 12 月に KEK へ搬入されて、磁場測定を開始した。磁石列の精密位置調整



図 3-6 磁場測定中の U01

はレーザー変位計で磁石列表面の相対位置を測定し、差動アジャスターによって上下磁石列の平行度を調整した。磁場測定中の U01 の写真を図 3-6 に示す。

U01 は ID 調整室での磁場測定の後、2020 年 1 月末に cERL 南直線部にインストールされた。U01 のコミッショニング調整は、3 月の cERL-FEL のビーム運転時に行い、課題であったアンジュレータ内のビーム輸送と目標波長である中赤外波長領域の放射光発生に成功している。

(3-6) 赤外 FEL に関するビーム運転

cERL において赤外領域の FEL 発振を実証することになり、2021 年 2 月までに波長 20 μm の発振を目指している。周回エネルギーはこれまでに実績のある 17.5 MeV とし、周期長 24 mm、長さ 3 m のスライド式のアンジュレータを設置することとなった。そのうち 1 台は 2020 年 2 月に設置したが、それまでは FEL 発振のためのビーム調整となった。必要なビーム性能は、バンチ電荷 60 pC において、rms バンチ長 250 fs、エネルギー拡がり 0.1%、水平・垂直規格化エミッタンスが 3 mm-mrad である。2019 年度は 4 月、6 月、10 月、および翌年 2020 年 3 月に、合計 4 回のコンパクト ERL のコミッショニングを行った。このコミッショニングは、電子線の照射実験と時間を分け合って行った。2019 年 4 月は、FEL 発振とエネルギー回収の両立を目指して 3 MeV で入射調整を行った。しかし、低い入射エネルギーのビームが空間電荷効果の影響を強く受けたため、エミッタンス増加を抑えることができず、目標エミッタンスからほど遠い結果となってしまった。そこで、確実に赤外光の発振を目指すため、入射エネルギーを上げることとした。5 MeV 入射を目指していたが、超伝導加速空洞の熱負荷を考慮し、2019 年 6 月と 10 月は 4 MeV 入射で運転することになった。

高品質を維持しつつバンチ長 250 fs を得るために、17.5 MeV まで加速した後にバンチ圧縮を行った。この手法では、主加速空洞のオフクレスト加速でバンチ内にチャープを与える。偏向電磁石で構成されるアーク部では、わ

ずかなエネルギーのずれに応じて到達時間が変化するようにオブティクスを設定し、バンチ長をコントロールする。バンチ長はコヒーレントテラヘルツ光で推定した。

いくつかの加速位相でバンチ圧縮の最適化を行った。その時のエミッタンスやエネルギー拡がりを測定して最適な条件を探した。エネルギー拡がりが最小となる位相からのずれをチャープ位相と定義したところ、およそ 8 度が最適であった。この結果はトラッキングシミュレーションでも検証を行った。最適な計算コードは加速器の場所によって異なるため、入射部・周回部・FEL 部でそれぞれを最適化して繋げた。これを Start-to-end simulation と呼ぶ。入射部は GPT のトラッキング結果を元に遺伝アルゴリズムでオブティクスを最適化、周回部は ELEGANT をベースに線形オブティクスを最適化した後、GPT でトラッキングした。そのアンジュレータ内の計算では、GENESIS にそのビーム粒子分布を引き渡して赤外 FEL 強度を計算している。

先に述べたが、この運転の後の 2020 年 2 月に 2 台のアンジュレータのうち 1 台を設置し、3 月は初めてのアンジュレータによる赤外光測定の実験となった。超伝導加速空洞を冷却する冷凍機の圧力を上げることによって、5 MeV 入射が可能となった。まずは低電荷でアンジュレータ内に設置したスクリーンモニターでビームの観測を行った。その後、アンジュレータ赤外光の観測を目指して、60 pC/bunch の電荷量でビーム調整を行った。バンチ圧縮によるバンチ長調整、スクリーンモニターのビームサイズや Q scan 測定でビームプロファイル調整、ステアリングによる軌道調整を実施した結果、赤外光の検出に成功した。検出器は帯域の広いものであったが、バンドパスフィルターを用いて 20 μm の波長であることを確認した。アンジュレータ由来の光であることを確認するために、スライドによって赤外強度が計算通りに変化していることを確かめた。さらに強い強度を目指すため、赤外光強度を見ながら、最終的なビーム調整を行った。パワーメータを用いて、絶対値の測定も試みるほか、産総研との共同実験で赤外領域に吸収のある試料・サンプルで透過スペクトルの測定も行った。以上の赤外光測定のほか、ビーム調整・測定のスタディを並行して行った。バンチ圧縮の際にエミッタンスやエネルギー拡がりが非線形に増加していることを実測することができた。また、バンチ長をテラヘルツ光だけでなく、ストリークカメラの測定を試みているところである。また、超伝導加速空洞（主加速空洞と入射器空洞）のビーム応答マッピングや新規に設置したアンジュレータ付近の電磁石が設計通りに動作していることを確認した。

(3-7) 電子線照射ビームライン実験

cERL の電子線照射ビームラインは、2019 年 4 月に施設検査に合格、実験を開始した。4 月中は空の試料カプセルを使ってビームラインの動作チェックやモニターの較正を行い、5 月には加速器室内空調に HEPA フィルタを追加する工事を行い、6 月より実際の RI 製造及び理化学実験を

開始した。

半減期 66 時間の ^{99}Mo は、医療用 RI として日本で最もよく使われている $^{99\text{m}}\text{Tc}$ の母核であり、天然金属モリブデンに約 10% 含まれる ^{100}Mo に対し、14 MeV のガンマ線を照射することで、原子核の巨大共鳴反応によって生成される。その過程を $^{100}\text{Mo}(\gamma, n)^{99}\text{Mo}$ と書く。電子線を金属モリブデンに照射すると、制動放射でガンマ線が発生し、それが核反応を引き起こす。6 月、10 月の 2 ヶ月間に行われた ^{99}Mo 製造実験で、 ^{99}Mo の収率、電子ビームエネルギー依存性、ガンマ線のターゲット内でのビーム進行方向及び垂直な面内での分布などの精密な測定に成功した。cERL では、照射停止後すぐに試料を取り出して測定を開始できる。その特長を活かし、半減期 15 分の ^{91}Mo などの短寿命核についても正確に測定することができた。電子線を直接金属モリブデンに照射すると、モリブデン自身によってガンマ線が発生するが、試料手前にタングステンなどの重金属をコンバータとして設置すると、効率よく電子線をガンマ線に変換することができる。10 月の実験では、コンバータ試験も行われた。また、約 1.5 MBq 製造した ^{99}Mo を使って、RI 試料棟で共同研究者の千代田テクノが $^{99\text{m}}\text{Tc}$ の抽出実験を行い、アルミナカラム法（ジェネレータ法）と有機溶媒抽出法の両者で高純度の $^{99\text{m}}\text{Tc}$ の抽出に成功した。

理化学実験としては、アスファルトに約 10 MeV の電子線を照射し、劣化を回復もしくは防止し、長寿命化を図るための基礎実験が行われた。約 200 kGy の電子線照射を行い、共同研究者の東亜道路工業が性状の変化を測定した。また、照射済み試料の一部は PF の BL-10C に運ばれ、小角散乱測定が行われた。性状の変化は観測されたものの、針入度、軟化点、実際に車輪を走らせて変型を見るホイールトラッキング試験などのためには、もっと大量の試料が必要とのことであった。そこで、東亜道路工業にそれらの試料を用意して頂き、2020 年 3 月に関西電子ビーム株式会社（福井県）のロードトロンで電子線照射を行うこととした。照射済み試料の解析は 2020 年 4 月以降となる。

参考文献

- [1] https://www.nedo.go.jp/koubo/IT3_100064.html
- [2] H. Kawata *et al.*, “High Repetition Rate (81.25 MHz) FEL Project Based on cERL”, 2019 EUVL Workshop, June 10-13, 2019, CXRO, LBL, Berkeley, CA, USA.

謝辞

cERL の照射ビームラインの建設及びビーム運転の一部は株式会社アクセルレータが出資する委託研究として行われた。また、RI 製造は千代田テクノ、アスファルト改質実験は東亜道路工業との協同研究として行われた。cERL における中赤外 FEL の開発及びビーム運転の一部は NEDO プロジェクト「高輝度・高効率次世代レーザー技術開発」によるものである。

（４）将来光源計画へ向けた R&D

低エミッタンスのビームを蓄積する将来の放射光源リングでは、蓄積された電子のバンチ内で電子同士が衝突する効果（Intrabeam Scattering）が顕著になる。その結果、ビームの寿命が短くなり、ビームエミッタンスが増大する。この問題を緩和するために、世界の将来光源計画の多くにおいて、高調波空洞を導入することにより電子のバンチを伸ばすことが検討されている（図 4-1）。光源第 2 グループでは、将来光源リングに最適な高調波空洞の設計研究を行っている。検討中の高調波空洞（図 4-2）は、508 MHz 高次モード減衰空洞として提案された TM020 型空洞 [4-1] のアイデアに基づくものである。この TM020 型空洞を 1.5 GHz 高調波空洞に適用すると、空洞内に蓄積された電磁場の蓄積エネルギーが大きい事により、高周波電圧を一定に保つことが容易になるという大きな長所がある。2019 年度には、光源第 2 グループに所属して研究を行っている総合研究大学院大学の山口孝明を中心として、この TM020 型高調波空洞でどのように寄生モード（TM020 モード以外の不必要な電磁場を生ずる恐れのある共振モード）を減衰するか、また周波数チューナーや入力カップラーを取り付けた場合にどのような問題が生ずるか、の課題について、集中的に研究を進めた。これらの研究成果に関して文献 [4-2, 4-3] で発表した。引き続き、TM020 型高調波空洞を実用化するための開発研究を進めている。

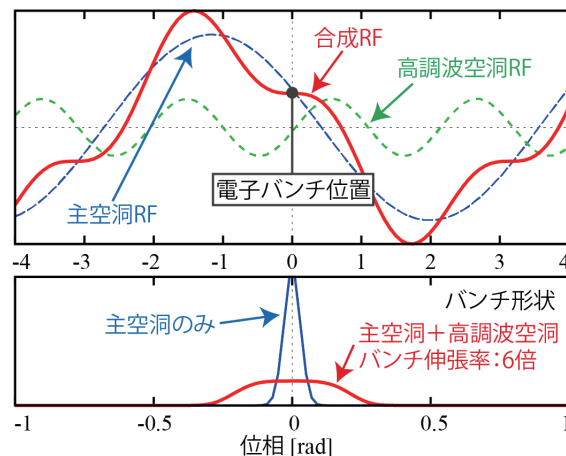


図 4-1 高調波空洞の導入による電子バンチ伸張の計算例。上図に示したように主空洞 RF と高調波空洞 RF の両方を用いることで、下図に示したようにバンチを伸張する。

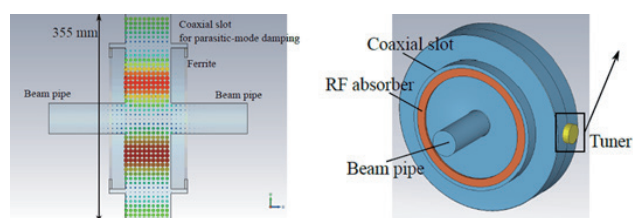


図 4-2 TM020 モード型高調波空洞の概要（左）と周波数チューナーの影響の検討（右）

参考文献

- [4-1] 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, 2014 年 8 月 9 ～ 11 日, 青森, pp. 237-241.
- [4-2] 山口孝明, “次世代放射光源のための 1.5 GHz TM020 型高調波空洞の設計研究”, 修士学位認定研究レポート, 総合研究大学院大学, 2020 年 3 月.
- [4-3] 山口孝明, 坂中章悟, 山本尚人, 内藤大地, 高橋毅, “TM020 型高調波空洞において寄生モード減衰機構が加速モードに与える影響”, 第 17 回日本加速器学会年会プロシーディングス, 2020 年 9 月 2 日～9 月 4 日, オンライン, 発表 ID: WEPP31.

(5) 他の加速器への協力

2018 年度からはじまった産業技術総合研究所の小型電子加速器中性子源に対する協力は継続している。また, 2019 年 8 月に開催された加速器学会年会では運営に協力し, 特に AI 技術に関する研修会を実施することに尽力した。

2-3. 活動計画

光源第1グループでは、PFリングにおいてPFリングの電磁石電源の老朽化対策と新しく製作したセプタム2の性能評価と更新の準備作業を進める。また、低エミッタンス化やビームの安定化を含む光源性能の強化を行うPF高度化計画に対しては、オプティクスの検討やセラミックス一体型パルス電磁石などの開発も進めていく。PF-ARリングにおいては、本格的なPF-AR 5.0 GeV ユーザー運転に向けた調整や性能向上のための検討を進める。コンパクトERLでは、ビームラインの建設が完了した電子ビーム照射ラインで、モリブデン99の製造試験とアスファルトの長寿命化試験のための本格的なビーム運転を始めるとともに、EUV-FEL光源の実証(POC)実験にもなりうる赤外自由電子レーザー計画に向けたオプティクス設計と電磁石システム整備及び大電荷ビーム運転を行っていく。

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。特に、PFリングのクライストロン用高圧電源は、最も古いA1号機が2003年製であるため、劣化し易い部品の交換を進めたい。また、近い将来に期待されるPFリング高度化に向け、RFシステムの高度化について検討を進める予定である。将来の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、過渡的ビーム負荷の補償法の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の改良やアップグレード、cERLの開発に対応した真空システムの設計開発を行っている。PFリングでは、老朽化した入射点のビームダクトの更新に伴って入射スキームの最適化を第1グループとともに進め、またcERLでは電子線照射ラインやFEL開発に伴う真空システムの開発を行っていく。U#19のビームチェンバーに採用し実績を積んだNEGコーティング技術についても、PFのアップグレード計画や将来光源開発に向けた要の真空技術として、性能評価やコーティング技術開発をCERNや企業との共同研究として継続していく。またPFリングの超伝導ウィグラーの更新に向けた設計開発を推進して行く。

光源第4グループではPF、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ではパ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次年度中

に実施したいと考えている。

光源第5グループでは、BL-19基幹チャンネルの改造によって得られた知見によって、小口径化が挿入光源SXビームライン基幹チャンネルの超高真空維持に大いに役立つことが分かったので、今後も挿入光源SXビームラインの改造を行う機会に小口径化を推進していくことを計画している。

光源第6グループは、cERLをベースとした中赤外自由電子レーザー(cERL-FEL)の建設において主動的役割を果たし、世界初の高繰返しFELの実現を目指す。これと同時にFEL建設後の利用研究とFELシステムのアップグレードの検討を進める。高強度テラヘルツ光源開発では、新たに建設したテラヘルツ光輸送路を活用して、高強度テラヘルツの利用研究を開拓する。また、次世代半導体微細加工用として期待されているEUV-FELを実現する上での技術的課題の多くは、cERL-FELの設計検討、建設、ビームコミッショニングを通じて解決の目途がたつと予想されるため、これをEUV-FELの設計に反映させる。

光源第7グループでは、コンパクトERL(cERL)において中赤外自由電子レーザー用のアンジュレータの検討を進めて、磁場調整及び測定法の開発を行っていく。またPF-ARにおいては、ID制御システムの更新を行う予定である。これは今年度にPFで行ってきたID制御システムの更新に続いて、ARにおいてもID制御システムの共通化を目指すものである。また真空封止アンジュレータ(NW#02, #12, #14-36, #14-20)用の温度監視ロガーの更新もあわせて行っていく予定である。