

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、2018 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機コンパクト 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、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ェンバーの製造・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、エネルギー回収型リニアック（ERL）の試験加速器であるコンパクト ERL（cERL）において、これまでにない大強

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	
満田 史織	准教授	
下崎 義人	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	特別助教	
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	
山本 将博	助教	
金 秀光	助教	
野上 隆史	技師	
内山 隆司	技師	
浅岡 聖二	シニアフェロー	
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	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	

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（cERL-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。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

(1-1) 電磁石・電源

2018 年 5 月 7 日に、リング六極電磁石の 1 つである SFD 電源に故障が発生した。電流制御の恒温槽モジュールが暴走し、回路全体を文字通りオープンで焼き上げてしまうという故障で、修理は不可能であった。たまたま J-PARC（素核研）がほぼ同一の電源を利用して、予備品があったため、夏まではそれを借用、改造して仮復旧、運転を続けた。

建設時の PF リングは弧部の偏向電磁石間に四極電磁石が 1 台ずつ設置され、偏向電磁石 2 台で 1 周期（-QF-SF-BM-QD-SD-BM-）という構造であった。それを、1997 年の高輝度化改造において、セル間の四極電磁石を 2 台に増やし、偏向電磁石 1 台で 1 周期（-QF-SF-QD-SD-BM-）に改造した。その際、改造後も念のために改造前に戻れるように、最初に QD があったセルと QF があったセルとで、QF、SF 電源を独立にする工夫がなされた。QFF と QFD および SFF と SFD は改造後の運転としては全く同一なのであるが、セルを -QFF-SFF-QD-SD-BM-QFD-SFD-QD-SD-BM- と交互に構成することで、QD と SD を OFF にし、QFD と SFD の極性を反転させると、元の -QF-SF-BM-QD-SD-BM- というセルがほぼ再現できる。また、PF では 3GeV 運転を行っていた時代があり、電源は全て 3 GeV 運転が可能のように設計されており、2.5 GeV 運転時には余裕のある作りになっていた。

以上の特性を最大限活用し、夏のシャットダウン時に、復旧不可能な SFD 電源は廃止、SF 電磁石全てを SFF 電源に接続する（SFD を SFF に直列に接続する）という配線改造を行った。また、電源故障時の予備電源を確保するために、QFF と QFD も QFF にまとめるという接続替えを行っていた。現在もそのまま運転を継続している。

予備的配線替えが功を奏したのは、2019 年 2 月 13 日に QDA 電源がインターロックで停止、復旧不能となった際、急遽、QDA 電磁石を QFD 電源に接続変更することで、運転再開することができた。QDA 電源の不具合も復旧不可能だと判明している。

致命的な大型電源の故障が続く中、2018 年度には緊急の予算措置により、大型電源 2 台を新規製造することができた。ただし、予算と納期の制約から、電源は現在の 2.5 GeV 運転時に必要な最大容量とし、方式も古いトランジスタドロップ方式以外の選択肢はなかった。新電源 2 台は 2019 年 3 月末に納品され、最も不安定だった QD と故障して復旧不能となった QDA と交換された。結局、高輝度化電源は 2018 年度中に 2 台が復旧不能の故障となった。

電源トラブルは 1997 年導入の高輝度化電源だけではなく、2005 年導入の直線部増強電源でも多発している。2018 年 6 月 13 日に Q9A 電源のコンデンサが液漏れを起

こし、電源が停止、ビームダンプとなった。他にも 2019 年 6 月 9 日に Q8A 電源が同様の原因で 3 回目の停止となり、復旧不可能となったため、急遽、QFD 電源への 2 度目の接続変更をして運転を再開した。2019 年の夏のシャットダウン中にできる範囲で復旧作業を行う予定である。コンデンサの液漏れが多発しているため、交換用のコンデンサは全数納品済みである。ただし、業者の都合で夏の間の交換作業は難しそうとのことであるが、できるだけ早く、交換作業を行う予定である。

ID16 番スイッチングシステムの制御系にも不具合が発生した。制御用の任意波形発生器が応答しなくなり、スイッチングの ON/OFF の度に全系の電源リセット作業が必要になるという事態になり、2019 年 4 月にはリセットしても 1 回では復旧しなくなるまで悪化した。ネットワークケーブル、ハブなどを交換したが変わらず、結局、途中にネットワークゲートウェイを設置し、必要なパケット以外を遮断したところ、不具合が解消した。打たれ弱い装置がパケット過多でダウンしたというのが結論の様であった。セプタム 2（S2）真空槽の冷却管リークにより真空ダクト及びセプタム 2 電磁石の更新が計画されている。この新規のために新規にセプタム電磁石を製作した。この新規に製作した電磁石は、現在の真空槽内に設置されるタイプではなく、AR で実用化されている大気中で使用するタイプの電磁石とした。これにより入射点の真空ダクトは簡素化されアライメント精度も向上することになる。

セプタム電磁石を大気中で使用するためには、AR のセプタム電磁石同様に 0.3 mm 程度の薄肉真空管をセプタムギャップ内に挿入し入射電子ビームの通り道を真空にする必要がある。この薄肉真空管に発生する渦電流による減磁は電磁石のギャップを従来の 9.5 mm より 8.4 mm まで狭めることにより補い、電源は既設の電源を使用する予定である。図 1-1 に新規に製作されたセプタム電磁石の磁場測定



図 1-1 新規に製作されたセプタム電磁石（S2）の磁場測定の様子。手前から延びるサーチコイルによりパルス磁場を測定している。

の様子を示す。磁場測定は既設の電源を使用するために PF リング内で行った。手前から延びるサーチコイルをギャップ内に挿入しパルス磁場を計測している。

(1-2) セラミック一体型パルス電磁石の開発

次世代放射光源リングでは、回折限界を目指す極低エミッタンス光源の実現のため蓄積ビームの存在領域である動力学口径（ダイナミックアパーチャー）が狭小化する。また、将来の光源ではビーム寿命が短くなることにより、ビーム電流を安定的に維持するトップアップ入射は必須技術となる。狭い蓄積ビームの存在領域に入射ビームを合流させること、頻繁に行われるトップアップ入射の際に光ビームの光軸振動につながるような蓄積ビーム振動を引き起こさせないことが将来光源では求められる。KEK-PF では将来光源の要求のいずれも同時に満たす既存入射技術に代わる新たな入射技術開発として六極パルス電磁石入射の世界的に先駆的な開発と運転実績を得ている。

より高次の非線形磁場を用いた多極パルス入射技術の確立を目指し、セラミック一体型パルス電磁石の開発を開始している。この電磁石は空芯型でコイルが真空セラミックダクトの円筒部に埋め込まれている。真空ダクトと電磁石を高度な技術を使い簡潔な構造で一体化することで、より高次で複雑な強力なパルス磁場生成が可能で、これまでの電磁石コア、セラミックス内面コーティングからの渦電流由来の不整磁場が生じないことも特徴的であり、新入射技術の要となる次世代パルス電磁石の一つである [1-1]。

加速器実装型モデルの加速器ビーム試験を行うために 2018 年には試験計画と試験ビーム路の設計が行われ、2019 年 1 月より、PF-BT ダンプ点にキッカー性能評価試験設備が整備された（図 1-2、1-3）。2 月下旬より実際のビーム試験を開始し、真空リークや放電などの故障、コーティングのビーム損傷もなく加速器実装に求められる耐久性性能が実証された。今後、更なる詳細な性能実証試験が進められ、PF リングへの導入などの開発が順次進められていく予定である。

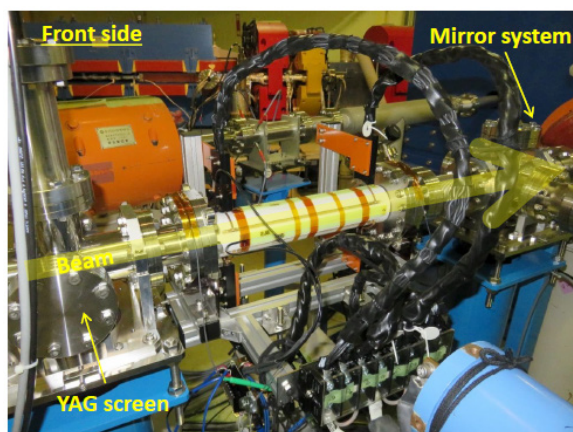


図 1-2 セラミック一体型キッカーの加速器試験路への導入（中央に見える白い円筒）

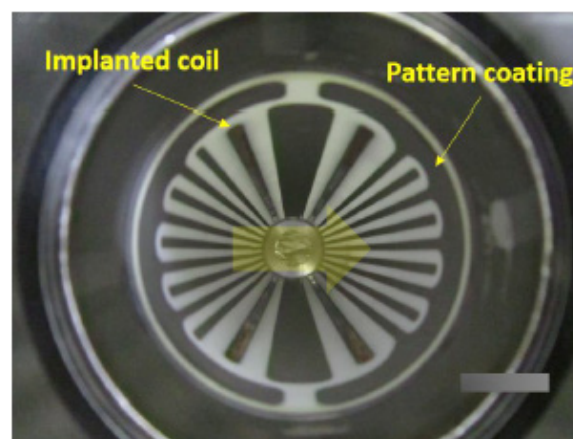


図 1-3 セラミック一体型キッカーセラミック円筒内構造（中央黄色矢印が生成される磁場の向き）

(1-3) 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、主に夏季停止期間に次の保守および機器更新作業を行った：(1) クライストロン用直流高圧電源 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、(3) クライストロン用冷却水配管系で一部劣化が見られる箇所の交換（1 系統のみ）、(4) クライストロンへの直流給電ケーブルへの延焼防止テープの設置（4 系統すべてが完了）、(5) 古いフィラメント電源ユニット 1 台の更新（4 台中 3 台が完了）、(6) クライストロンのボディ温度インターロック用回路の更新（4 台中 2 台が完了）。

RF システムは概ね順調に稼働していたが、2019 年 2 月 22 日に 4 系統ある RF ステーション（高周波源と加速空洞の組）のうち 1 系統（B1 ステーション）のクライストロン用高圧電源が停止するトラブルが 2 回発生した。停止した原因は「変圧整流器二次過電流」インターロックが動作したためである。1 回目のトラブル発生後、ただちに高圧電源と直流高電圧送電ケーブルの目視点検を行い、異常が無いことを確認した後、高圧電源の再立ち上げを行った。約 4 時間後に再度同じインターロックが動作した為、B1 ステーションを停止し、残り 3 系統の RF ステーションを用いて PF リングの運転を行う事にした。これに伴い、PF リングの蓄積電流を 450 mA から 420 mA に下げた。2018 年度末まで PF リングはこの運転を継続した。トラブルのあった高圧電源の調査を PF 停止期間中に進めたところ、2019 年度始めに原因が判明し、修理が完了した（詳細は 2019 年度年報で報告予定）。

(1-4) 真空システム

U#19 の設置に伴い、アンジュレータ磁石列中の真空ビームダクトにはじめて NEG（非蒸発型ゲッター）コーティングを採用した [1-2]。PF リングでは従来、アンジュレータビームダクトは SUS 製とし、ビーム路の外側に沿って副チェンバーを設けていた。この副チェンバー内に設置した NEG ポンプモジュールによってビーム路の真空排

気を行っていた。今回新設された U#19 では、鉛直方向 15 mm、水平方向 90 mm の楕円形状のビーム路をアルミ合金の押し出し加工によって成型し、副チェンバーを持たない単純な構造とした。ビーム路内面に一様に厚さ 1 μm の NEG コーティングを施すことで、全長約 4.1 m のアンジュレータチェンバーの真空排気を行う設計である。補助ポンプとしてスパッタイオンポンプをアンジュレータの上流、下流に各 1 台ずつ配置することで、アンジュレータチェンバー内の真空圧力は運転開始後 2、3 ヶ月の焼き出しを経て、450 mA の蓄積中でも十分に 10^{-8} Pa 台を達成できる予測であった。実際に U#19 設置後約 1000 A・h の積分電流値を経験した段階で、リング真空圧力はシミュレーションの推定を少し上回る速さで低下していることが実測されている。またビーム路の内壁が十分な排気速度を持つこと、および活性化された NEG コーティング面の放射光照射による脱ガスが少ない効果によって、U#19 チェンバー内の真空圧力はコミッショニング初期の段階から、従来の副チェンバー付きチェンバーよりも低く保たれていることも確認された。

(1-5) ビーム診断システム

ビーム診断に関しては、2018 年夏のシャットダウン中に新たな直流ビーム電流モニター (DCCT) をインストールした。その後のビーム運転において、大電荷を蓄積しても大きな発熱などが起きていない事を確認し、ビームへ与える影響を下げる設計がうまくいっていることが確認できた。ビーム位置モニタ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。加速器制御に関連しては、これまでに使用してきた CSS Archiver に加えて Archiver Appliance (AA) と呼ばれる新たなアーカイブシステムを運用開始した。これによって、過去データの取り出し速度が大幅に向上した。今後は各種プログラムから AA を使えるように整備していく。

(1-6) 基幹チャンネルシステムおよび安全システム

2018 年度の活動内容については、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 安全系の維持・保守作業を行った。それ以外に 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を 2018 年度夏に行い、秋の運転から使用を開始している。

(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の交換作業)

BL-10, BL-11, BL-13: 小規模の真空作業を行った。

(2) 新規 PF 電子ビームストッパーの設置

これまで PF BL-19 に設置されていたリボルバーアンジュレータ #19 の真空ダクトに 2 本の電子ビームスト

ッパーが設置されていたが、2018 年度に更新された新規挿入光源の真空ダクトは非常に狭いものになったために電子ビームストッパーの設置が不可能となった。そのため、新規真空チェンバー付電子ビームストッパー 2 本の製作を 2017 年度に行い、それを B24-B25 間に 2018 年夏に設置を行い、秋の運転開始から運用を開始した。

(3) 安全系

PF リング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。

(1-7) 挿入光源システム

2018 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 6 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, ID02-2)、補正電磁石電源の故障に起因するものが 1 件 (ID02)、立ち上げ時の設定ミスにより Gap 変更ができなくなった事例が 1 件 (ID05)、真空封止型アンジュレータ形状変換部の温度が異常に上昇した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 (ID15) であった。また、昨年度に引き続いて ID 制御システムの更新を実施している。システム更新の主目的は、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簡略化することと、コントローラユニット外部コマンドの共通化を目指すことである。今年度の夏季シャットダウン中には新システムの導入を行い、秋季運転から新システムによる運用を開始した。

今期の挿入光源開発としては昨年度から引き続き BL19 用の U#19 の更新を進めてきた。従来の BL19 用リボルバー型アンジュレータから、様々な偏光状態をもった軟 X 線の散乱・分光実験や STXM 実験に使用される可変偏光ア

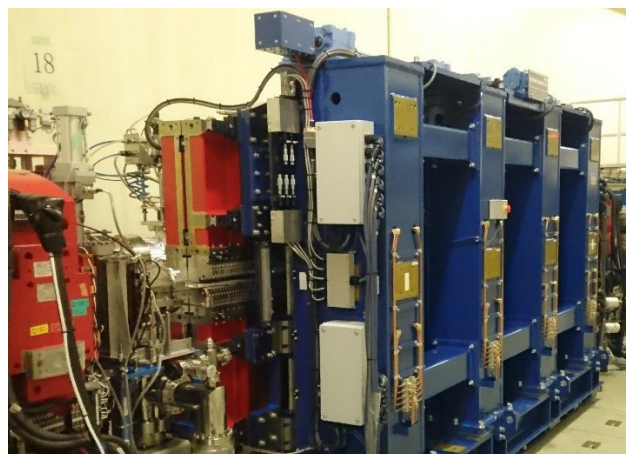


図 1-4 PF リングに設置された ID19

ンジュレータ (EPU) : U#19 として更新された (図 1-4)。U#19 は APPLE-II 型の EPU であり、放射光のエネルギー範囲は 100 eV から 2 keV である。このエネルギー域を様々な偏光状態を持った光を発生する。PF リングのすべての APPLE-II 型 EPU の特徴は、4 列の磁石列を全て独立に動く構造を持つことである。これにより Gap 間隔の変更による光子エネルギー調整以外に、Gap を固定したまま上下または左右の磁石列をビーム進行方向にスライドさせて光子エネルギーを調整する、adjustable phase undulators (APU) として利用できる特徴を持っている。APU 方式では制御方式が簡単になるため、PF では全ての APPLE-II 型 EPU の制御方法として APU 方式を採用しており、U#19 も同様の運転を行う。U#19 は延長された直線部の長さを最大限に利用して全長 3.7 m と PF リングで最も長いアンジュレータになる。その周期長は 68 mm, 周期数は 55 である。U#19 の建設にあたっては、使用する全ての磁石の電子進行方向の磁場分布を予め測定を行い、このデータを使用して良好な磁石の初期配列を決めている。この磁場の重ね合わせによる磁石初期配列の決定法は、これまでの PF での EPU 開発で発展させてきた手法である。U#19 の建設に当たっては水平偏光モードと垂直偏光モードの磁場分布を同時に最適化する試みを新たに行った。この結果、初期状態での U19 の半周期毎の積分磁場偏差は 0.2% であり、これは PF での EPU の調整目標を初期配列状態で満す良好な結果を得た。

磁場調整を終えた ID19 は 2018 年秋にリング内に設置された。その後、PF リングの秋期運転立ち上げ時に ID19

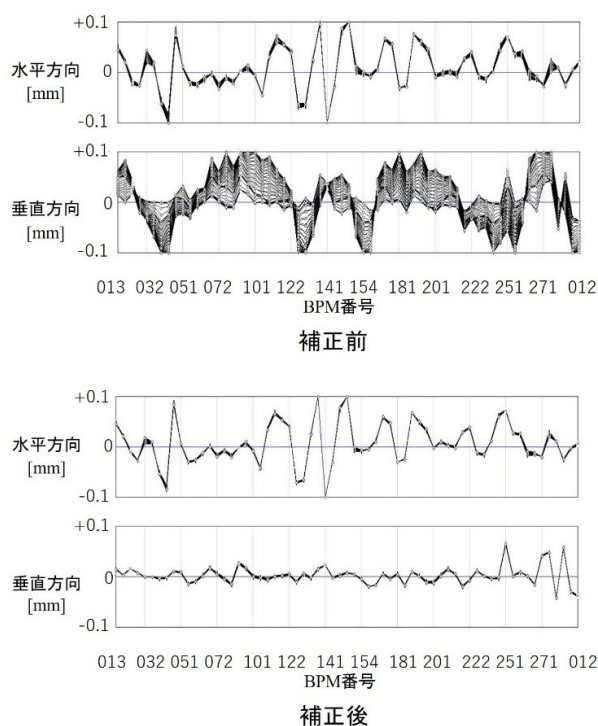


図 1-5 フリーチューニングのための COD 補正の代表例 (円偏光: C+S モード)

のコミッショニングスタディを行った。光子エネルギーの変更中や偏光モード切り替え中に電子ビーム軌道が動かないようにするため、アンジュレータ両端の端部電磁石による軌道補正を行うために各偏光モードで決められた範囲内で磁石列位相を動かしながら補正データ取得を行った。ID19 では ID13 と同様に 6 つのモード (LHR,E+S,E-S,LVS,C+S,C-S) 及び各モード遷移分の COD 補正データテーブルの作成を行っている。図 1-5 に軌道補正結果の代表例 (円偏光: C+S モード) を示す。上側の 2 つが補正のない場合の位相変化に伴う水平・垂直の COD であり、下側の 2 つが補正結果を示している。これにより秋の PF ユーザー運転開始とともに ID19 ユーザー利用も開始され、順調に運用されている。

参考文献

- [1-1] C. Mitsuda et al., “Development of ceramics chamber integrated pulsed magnet for an accelerator implementation”, Proc. Ann. Mtg Part. Accel. Soc. Jpn. 2018, 1018 (2018).
- [1-2] Y. Tanimoto, T. Nogami, X. G. Jin, M. Yamamoto, R. Takai, and T. Honda, Proc. 10th Int. Particle Accelerator Conf. IPAC2019, Melbourne, Australia, p1276 (2019).

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 運転での 2018 年度の主眼は、まず、直接入射路ができてからの 6.5 GeV 電子エネルギーによるトップアップ運転の定常化である。6.5 GeV 電子エネルギーでのトップアップ運転は、必要な放射線安全対策や、キッカー電磁石の暴発、BPM (Libera) の調整不足によるビーム軌道の歪みなどの対策が 2017 年度中に行われたことにより、予定通り 2018 年 11 月 20 日より開始することができた。蓄積電流値は、発熱の問題から 55mA とした。運転は、立ち上げ調整を確立したことにより調整時間の合理化が進み、年度を通じて大きな問題を経験することなく順調であった。

その次に求められたのは、放射光源加速器運転時間を確保するために加速器運転電力を 44% 抑制する試算から、5.0 GeV 電子エネルギーによる放射光供給の試験的な調整である。PF-AR リングでの 5.0 GeV 電子エネルギーの導入に向けたマシンスタディを 2018 年 6 月 14 日に開始し、2019 年 3 月 4 日から 11 日にはビームラインへ 5.0 GeV 電子エネルギーの放射光を供給しユーザー運転を模擬した運転を行った。電子ビームエネルギーを 5.0 GeV に変更する場合には、入射リニアックからの電子ビームのエネルギーを変更し、PF-AR リングまでの輸送路 (AR-BT) のエネルギーの最適化、PF-AR リングのエネルギーの最適化が必要である。また、PF リングとのトップアップ運転を両立させるために、6.5 GeV 電子エネルギーに対応させ建設している AR-BT と PF リングへの輸送路 (PF-BT) との交叉

点の DC 偏向電磁石の運用を 5.0 GeV 電子エネルギーにも対応できるような入射スキームの確立が必要であった。エネルギーの最適化を行わないと、隣のバンチにも入射されてしまったり、入射効率が極端に低くなってしまったりするため、PF-AR リングの入射電子ビームエネルギーに対する最適化が最も困難であったが、6.5 GeV 運転を 1 日行った後で 5.0 GeV 運転へ切り替えてリングのエネルギー精密調整を行うことで調整が容易になることが明らかになった。エネルギーの低い状態で調整を開始した場合、加速器装置を取り巻く環境温度の暖機が進まず調整中に温度ドリフトが生じ加速器の状態を一定に保つことができなかったことが要因と考えられる。PF リングのトップアップ運転との両立では、新たに、交叉点の DC 偏向電磁石を PF と PF-AR でのトップアップ時間の配分通りに、その間磁場強度を自動的に変更し各輸送路へ入射ビームを入射する方法を確立した。PF リングの電子ビーム寿命よりも PF-AR のそれが長いことを考慮し、得られた最適な配分時間の割り振りは、PF リングへ約 3 分、PF-AR へ約 30 秒となっている。この時間には偏向電磁石の電流値切り替え指令の実行時間や、電磁石の磁気平衡到達時間が含まれている。今後、確立した運転調整方法を 5.0 GeV 電子エネルギーのユーザー運転に対応させていく予定である。

マシンスタディでは、2003 年 4 月以降中断していた低エミッタンスオブティクススタディを再開したが、1 シフトだけではリングを数十ターン周回するパラメータを見つけることはできたものの、蓄積には至らなかった。今後もこのスタディを継続して行う予定である。その他のマシンスタディ時間（36 シフト中 35 シフト）は、いずれも立ち上げ調整スキームの確立を主眼とし、全て調整対応に当たった。

(2-2) 電磁石・電源

PF-AR 電磁石では昨年度の偏向電磁石の老朽化による冷却水ホースの水漏れをきっかけに予防保全として全数交換を実施したことが功を奏し、大きな漏水事故などもなく運転を行えた。電磁石電源では、製造や運用開始 10 年以上が経過する電源や付帯システムに軽微な故障が散見されているが、運転前に発見され、事前に対応がとられており、ユーザー運転を止めることなく安定した光供給がなされた。

PF-AR の一部四極電磁石電源には二次電圧を定格の 50% に制限することが可能な切り替えタップが整備されており、現状のリングオブティクスでの運転電圧が定格電圧より 50% 以下であることを踏まえて無効電力改善のために試験的に 50% タップでの運転を行った。これについても年間を通じて問題なく運転を行えた。

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り劣化が進んでおり、配線設備再構築を進めている。現設備を生かし並行し整備することで、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予定である。2018 年度の

運転を通じて、その第一段階である六極電磁石インターロックシステムの試験運用が完了した。

(2-3) 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、夏季停止期間に幾つかの機器更新および保守作業を行った。まずクライストロン用高压電源 (PF-AR 東棟と西棟に 1 台ずつ設置) の制御盤内のプログラマブル・ロジックコントローラ (PLC) については、2017 年度に故障が発生し、同様の故障が続発すると運転が困難になる危機的状況にあった。この PLC を新型に更新し、制御用ソフトウェアの移植も完了させた。また、PF-AR で使用中のクライストロン用ソケット (東棟) から若干の絶縁油漏れが発生したため、クライストロン本体をソケットから外し、ソケットを修理した後、復旧させた。また例年の通り、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。冬季停止期間には、大電力高周波源で使用している 40 kW ダミーロード 1 本から水漏れが発生したため、予備品と交換した。

PF-AR ではビームを加速するために、11 セル APS (Alternating Periodic Structure) 型加速空洞を 6 台使用している。各加速セルには、ビームが誘起する高次の共振モード (Higher Order Mode; HOM) によるビーム不安定性を緩和する為に、高次モード結合器 (HOM カップラー) が取り付けられている。近年の PF-AR の蓄積電流値の向上に伴い、HOM カップラーから引き出される高次モードの電力が増加しており、HOM カップラーおよび高次モード引き出し用ケーブル (HOM ケーブル) が発熱するトラブルが増えている。2018 年度には、PF-AR の運転中に HOM ケーブルが発熱し、運転を中断して復旧作業を行った事例が 4 回発生した。このうち 5 月 28 日に発生したトラブルでは、取り外した HOM ケーブルのポリエチレン製絶縁体が黒色に変色し、その一部が溶けていた。これらの HOM ケーブルは放射線環境で 10 年以上使用しており、劣化が起きていることがトラブルの一因と考えられる。緊急対策として、2018 年夏の停止期間に HOM ケーブル及び HOM カップラーの接続部を全数点検し、劣化が見られた HOM ケーブルの交換を行った。また、ケーブルが発熱した場合に加速用高周波を停止するための温度スイッチを (ケーブル当たり 2 箇所から 3 箇所に) 増設した。抜本的な対策としては、2019 年度に HOM ケーブル全数 (70 本) を更新する計画を検討中である。合わせて、放射線による同様の劣化が予想される部品として、HOM ケーブルを終端する水冷式 3 kW ダミーロード (70 台) と HOM カップラー (70 台) で使用されているポリエチレン絶縁体があり、これらの部品も交換するのが望ましい。2018 年度には、これらの更新計画を策定し、調達の準備を進めた。

(2-4) 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。5 GeV 入射に関連して、Linac から

のビームを各ターンごとに位置と角度を検出するための回路とプログラムの開発を行った。このほか、ビーム輸送ライン（Beam Transportline, BT）のビーム位置検出器を独自に製作し評価を行った [2-1]。検出回路の設計はもちろん、回路を収める筐体部分も 3D プリンターにて自作することで安価かつ柔軟な設計開発を行い、量産する段階にきた。今後も必要に応じて同様の設計開発を行う態勢が出来ている。2017 年度の運転では Linac の運転条件によっては単バンチ純度が悪化する現象が見られたため、主バンチ後方のバンチを常時純化するようにシステムを変更・調整して純度を保つようにした。データ保存に関しては PF と同様に Archiver Appliance を導入して評価を行った。今後は過去データを AA に移行する作業を行う予定である [2-2]。

(2-5) 安全システム

2018 年度の活動内容については、昨年度と同様に、PF-AR 安全系の維持・保守作業を行った

(1) PF-AR Top-up 入射により蓄積電流一定に保ったままユーザー運転行うことに成功

X 線領域の放射光源用電子ストレージリングである Photon Factory Advanced Ring (PF-AR) では、2.5 ~ 3.0 GeV の電子ビームを入射し、6.5 GeV まで加速してから放射光利用実験を行っていたが、2017 年に直接入射路が完成したことにより、フル・エネルギー入射が可能となった [2-3]。これを受け、PF-AR では、トップアップ運転へ向けた整備を進めてきた。2017 年 4 月には全真空封止アンジュレータのギャップを最小まで閉じた状態で入射を試み、同年夏の停止期間中にはインターロックの改修や制御ソフトウェアの改修を行った。同年 12 月には全ビームラインへ光を導いた状態（MBS 開）で放射線量測定を実施し、問題ないことを確認した。これ以降は、MBS 開のまま継続し入射を行っており、2018 年 11 月には、トップアップ入射により蓄積電流値を一定に保ったままユーザー運転を行うことに成功した。蓄積電流値の安定度は、55 mA に対して ± 0.1 mA 程度を実現している [2-4]。

(2) 安全系

PF-AR 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。

(2-6) 挿入光源システム

2018 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 2 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 1 件（NE03）、冷却水の流量低下によるインターロック作動が 1 件（NW02）であった。この流量低

下に関してはフローメータの設定値を変更することで対処した。この NW02 での流量低下はここ 15 年間に徐々に進んできているためフローメータの劣化が考えられる。そのため来年度は古いフローメータの更新を検討している。

参考文献

- [2-1] 下ヶ橋秀典, 帯名崇, "PF-AR 直接入射路用ログアンブ型 BPM 信号検出回路の開発", 第 16 回日本加速器学会年会プロシーディングス THPI026, 京都, 2019 年 8 月.
- [2-2] 中村卓也, 帯名崇 "PF-AR 加速器における Archiver Appliance の導入", 第 16 回日本加速器学会年会プロシーディングス FRPH008, 京都, 2019 年 8 月.
- [2-3] 東直他, PF-AR 直接入射路の建設とコミッションング, 第 14 回日本加速器学会年会, 2017.
- [2-4] 長橋進也他, PF-AR におけるトップアップ運転, 第 16 回日本加速器学会年会, 2019.

3. コンパクト ERL の運転・維持・管理および開発

(3-1) ビーム運転

エネルギー回収型リニアック（ERL）は質の高い電子ビームを大きな電流で運転できるという特徴がある。このような、低いエミッタンスと短いバンチ長を同時に兼ね備えたビームは、自由電子レーザーやテラヘルツ光源への応用が期待されており、これまでにない特徴的な光源となる可能性を持っている [3-1]。コンパクト ERL（cERL）ではバンチ電荷 60 pC（1.3 GHz で 100 mA に相当）で低いエミッタンスを維持するために、電子銃レーザーのスタッキングの調整、BPM の影響を補償する八極磁場の印加、などの工夫により、直線状に配置する入射診断部でエミッタンスが 2 mm・mrad 以下に改善することができた。また、低い電荷量でバンチ圧縮を行い、バンチ長は 200 fs 以下という値が得られた。また、短いバンチ長から発生するテラヘルツ光を共振器で増幅させることにも成功した。これらのビームスタディはできる限り高い質のビームを実現するため、入射部のエネルギーを高めに設定し、エネルギー回収ができない状態であったが、エネルギー回収のために設定を変更して 1 mA ビーム輸送の再現を行った。今後は低エミッタンス・短バンチ・大電流を同時に満たすような運転を目指していく予定である。

(3-2) 照射部ビームラインの建設

2018 年 7 月 27 日から 2020 年 3 月 31 日を期間とした株式会社アクセルレータとの委託研究契約に基づき、cERL において電子線照射による医療用 RI 製造、および道路舗装用アスファルトの劣化回復と高性能化に関する研究が開始された。

天然のモリブデンに約 10% 含まれているモリブデン 100 に約 14 MeV のガンマ線を照射すると、原子核の中から巨大共鳴反応により中性子が放出され、モリブデン 99 に変

化する。寿命 66 時間のモリブデン 99 は、寿命約 6 時間の準安定核テクネチウム 99 m の母核となる。このテクネチウム 99 m が、薬剤の中に組み込まれて投与されることになる。薬剤は患部に選択的に分布し、テクネチウム崩壊時の放射線を計測することで、患部のイメージングなどが可能になる。日本で使用されている医療用 RI の薬 60% を占めるモリブデン 99 であるが、現在は海外の原子炉で製造されたものの輸入に 100% 依存している。そこで、超伝導電子線形加速器を使った製造システムを開発し、国内で製造して安定供給を目指すというのが本委託研究の最終目的である。そのため、cERL では、約 20 MeV の電子線をモリブデンに照射し、商用加速器設計のための基礎データ取得を行うことになっている。

原油からの石油精製時、燃料油や化学原料を抽出した後、最後に残るアスファルトは、石や砂利と混ぜられて道路舗装に幅広く使われている。舗装道路は車が何度も通ることによって凹凸が生じる輻掘れ、素材としての劣化が原因のひび割れなどで寿命を迎え、舗装し直しが必要となる。舗装道路の長寿命化もしくは劣化部分の回復再生には、アスファルトの高性能化が必要であり、それは、変形しにくく、かつ、割れにくくすることである。一般に化学的には、剛性と粘性は一方を高めるともう一方は低くなるという、相反する性質である。アメリカ DOE の報告書によれば、アスファルトに電子線を照射することで高性能化が可能になるとのことであるが、詳細はどこにも記述されていない。そこで我々は、アスファルト自体の物性に関する基礎研究および電子線照射による変化の研究を行うことにした。

cERL における電子線照射ビームラインは、2018 年 7 月より建設が開始された。モリブデン製造のために最大 20 MeV、10 μ A、理化学実験のための電子線照射（主にアスファルト研究用）に対し最大 10 MeV、10 μ A の電子線照射が可能になるように設計された。放射線変更申請が 2019 年 9 月になされ、2019 年 1 月に許可、ビームライン建設作業は 2018 年 3 月末に完了した。2019 年 4 月に調整運転を開始、4/12 に施設検査、4/17 付けで合格、2019 年 6 月に実際に RI 製造および理化学実験を行い、データの解析を進めている。今後、2019 年 10 月、2020 年 2 月の cERL の運転でも、照射実験を行う予定である。

なお、RI 製造は千代田テクノルの共同研究で、cERL 内では完全密封状態での取り扱いのみで、開封および各種測定は機構内既存の非密封 RI 施設である RI 試料測定棟で行われる。試料測定棟に関しても、cERL で製造したモリブデンおよびテクネチウムの取り扱いを開始するための放射線変更申請が行われ、許可されている。一方、アスファルトに関しては、東亜道路工業との共同研究であり、試料としてのアスファルトの提供、特性試験などは東亜道路が担当することになっている。KEK では、マルチプローブの量子ビームを活かした測定（X 線小角散乱（SAXS）、中性子小角散乱）を行う予定であり、PF 測定器の協力で、既にアスファルトの SAXS 測定を 2 回、合計 6 試料に対して実施した。世界的にも比較的早くから研究が行われて

いるが物質構造についての報告は見当たらない。今回の構造解析を更に推し進め物質構造モデルが構築できれば、学術的な成果は勿論のこと、社会課題解決の観点からもその意義は大きいと考えられる。

(3-3) ビーム診断システム

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。2018 年度は照射ラインの新設にともなって、必要なモニター類（BPM/スクリーン/ロスモニター）を増設して、コミッショニングを行った。電子銃カソードを観測するため、焦点距離可変のカメラの導入を進めている。また、今後の FEL 運転に必要なビーム調整を実現する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。

(3-4) 安全系

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。2018 年度には cERL に新設された照射部ビームラインに関して照射部周りの放射線安全のための遮蔽の設計と設置、新たなモードに対応した電荷制限器の更新作業を放射線科学センターの担当者として協議しながら行った。

(3-5) NEDO プロジェクトへの採択

我々は産業技術総合研究所、東京理科大学、浜松ホトニクスと共同で「分子振動を利用する高効率加工プロセス用中赤外高出力レーザー光源開発」というテーマを提案し、2018 年 12 月に 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」に採択された [3-2]。このプロジェクトで我々が担うのは、KEK にある cERL を用いて中赤外 FEL を建設し、その FEL を産業用レーザーに必要な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。このプロジェクトで建設する FEL 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のシステムを設置する。アンジュレータは Gap 固定型であり、上下磁石列の位相差で光子のエネルギーを変える APU である。周期長は 24 mm で、周期数は 124 となるが、両端に 12 mm ずつの端部がつき、全長は 3 m となる。Gap は 10 mm で固定され、上下磁石列の位相が揃った時の K 値は 1.4 である。電子ビームの周回エネルギーが 17.5 MeV のときの FEL 波長は約 20 μ m となる。2018 年度はこの FEL の基本設計を行い、部材調達を開始した。2020 年 3 月に前段アンジュレータのみを用いた光発生の予備実験を行い、2020 年 6 月以降でアンジュレータ 2 台を用いた

FEL 発振実験を行う予定である。この FEL は将来の EUV リソグラフィ用の ERL ベース FEL のための実証機になることが期待されている。

参考文献

- [3-1] Yosuke Honda, Miho Shimada, Alexander Aryshev, Ryukou Kato, Tsukasa Miyajima, Takashi Obina, Ryota Takai, Takashi Uchiyama, and Naoto Yamamoto, “Stimulated Excitation of an Optical Cavity by a Multibunch Electron Beam via Coherent-Diffraction-Radiation Process”, *Phys. Rev. Lett.* **121**, 184801 (2018).
- [3-2] https://www.nedo.go.jp/koubo/IT3_100064.html

4. KEK 放射光計画

光源第 2 グループの助教 1 名(山本尚人)を約 10 ヶ月間、フランスの SOLEIL シンクロトロン施設に派遣し、主に次世代放射光源におけるビーム力学の研究を行った。大規模なビームシミュレーションにより興味深いビーム力学現象が見つかっており、これらの知見は KEK における将来光源計画に役立つものと期待される。

5. 他の加速器への協力

新構造材料技術研究組合 (ISMA) では、産業技術総合研究所において小型電子加速器中性子源を用いたコンパクトな中性子材料分析施設を構築している。加速器制御システムを構築するにあたり、KEK で多くの経験がある EPICS (Experimental Physics and Industrial Control System) を採用した。導入にあたってセミナーのほかシステム構築の協力を行った。

2-3. 今後の展望

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。