

2. 加速器第六研究系（光源）

2-1. 概要

加速器研究施設・加速器第六研究系は、放射光源加速器（PF リング、PF-AR）の運転・維持・管理および次期放射光源（次期光源）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、応用超伝導加速器イノベーションセンター（iCASA）の所掌業務となっ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・維持および開発研究に協力している。本研究系は6つのグループで構成され、2022 年度は右の表で示されるメンバーで活動を行ってきた。なお、光源第6 グループは欠番としている。

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（cERL）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、Linac および KEKB-BT グループの協力を得て業務を行っている。また、次期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 iCASA と共同で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1 グループでは、2022 年 4 月 1 日付けで、博士研究員であった篠原智史氏が特別助教として採用された。また、同日付けで島田美穂研究機関講師が iCASA に異動となった。

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、次期光源計画の 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3 グループは PF リング、PF-AR および cERL の真空系を担当し、また PF リングの超伝導ウィグラーの保守維持・運転を担っている。2022 年度は主に PF リング入射部や PF リングと PF-AR への入射ビーム輸送ラインの改造、ならびに PF-AR 測定器開発テストビームラインのワイヤーターゲットの設置とビームコミッショニングを行った。また次期光源実現に向け特に放射光照射下で有効な排気作用を持ち、さらにガス放出も低減するビームダクト内面コーティング技術の開発研究を推進している。2022 年 4 月 1 日付で山本将博准教授が iCASA に異動となった。次期光源での電子銃開発や真空関連での各種研究開発については引き続き協力して行う。

光源第4 グループは、PF リング、PF-AR および cERL のビーム診断・ビーム制御システムに加え、それぞれの加速器制御システムを担当している。様々なビームパラメータの診断を可能にする多種多様なビームモニターや、蓄積ビームの軌道変動および不安定現象を抑制するための高速

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	特別教授・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	
田中 オリガ	助教	
東 直	助教	
篠原 智史	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	准教授	
内藤 大地	助教	
高橋 毅	シニアフェロー	
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	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	
下ヶ橋 秀典	技師	
塩澤 真未	技術員	
多田野 幹人	シニアフェロー	
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	非常勤研究員	
濁川 和幸	前任技師・技術副主幹	
田原 俊央	専門技師	
佐藤 佳裕	シニアフェロー	
光源第7 グループ		
土屋 公央	教授・グループリーダー	
阿達 正浩	助教	
齊藤 寛峻	特別助教	
江口 柊	准技師	
塩屋 達郎	非常勤研究支援員	

フィードバックシステムの運用・維持管理を行っている。また、現状より高度なビーム診断・ビーム制御を必要とする次期光源の実現に向けて、これらのシステムの高度化や研究開発も行っている。加速器制御については、各種シミュレーションの基盤となる PF 計算機システムを管理・運用するとともに、加速器コンポーネントの遠隔制御に不可欠な高速ネットワークや各種サーバの維持管理、制御ソフトウェアの開発を行っている。

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。次期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。光源第7グループでは、2022 年 4 月 1 日付で東北大学大学院理学研究科において挿入光源関連の研究をされてきた齊藤寛峻氏が特別助教として配属された。

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) 直流電磁石・電源

2020 年の故障後より行ってきた PF リング輸送路偏向電磁石電源及びリング偏向電磁石電源の制御電源交換作業が全て完了した。元々使用していた電源は製造中止であり、他社の同様方式・同容量の電源に交換したが、電源入りから出力までの時間差などの仕様が異なったため途中にリレータイマーの追加(図 1-1)やノイズ対策などが必要となった。3 年に渡って複数回の改造作業を行い、現在は問題なく動作するようになっている。

PF リング偏向電磁石電源用の高圧受電盤は 1980 年に製造されて以降、特に不具合無く運転されてきたが、ヒューズや機械的な接触器の寿命を超えて運転してきたため業者からは長年、交換を推奨されてきた。そこで、2021 年度に交換用の部品(ヒューズ、表示ランプ、電磁接触器など)を調達し、2022 年度に実際に交換作業を行った。もともとは大気中の電磁接触器だったが、真空式のものに交換し、サージアブソーバが追加された。2022 年秋の運転から使用されており、特に問題はなく稼働中である。図 1-2 に更新した高圧受電盤の写真を示す。

ここ数年、PF リングでは不規則かつ不安定な水平軌道変動が生じている。軌道解析を行って実際に変動分の補正を行うと、B01 の補正コイルのみで補正できるため、変動の原因は B01 (もしくはその付近の何か) ではないかと推定されている。磁場変動の強さは、小学校の理科実験で使う棒磁石を近づけたり離したり、という程度であり、磁石外側からの磁場測定で見つけることは非常に難しい。そこで、2022 年 6 月に B01 を半割し、コイルの外観検査を行うことにした。真空ダクトを外さずに見える範囲での検査だったが、B01 コイルに複数のひび割れがあることが分かった。図 1-3 に写真を示す。同様



図 1-2 部品交換後の PF リング高圧受電盤(上部の白い円筒 3 本がヒューズ、下部が真空式電磁接触器及びサージアブソーバ)。

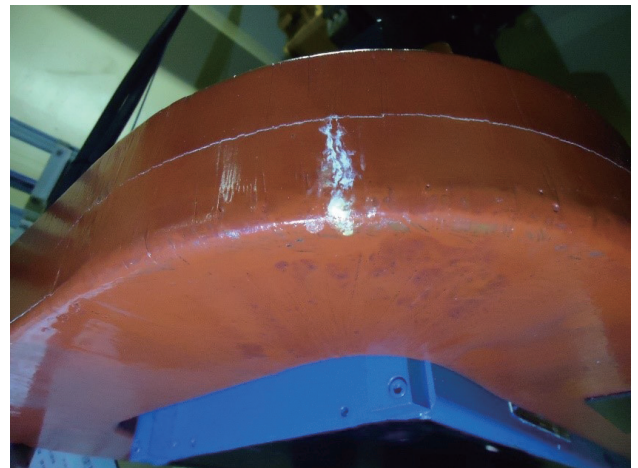


図 1-3 B01 上側コイルモールドのひび割れとモールド漏れと思われる跡。同様のひび割れと漏れがコイル内側にも存在する。

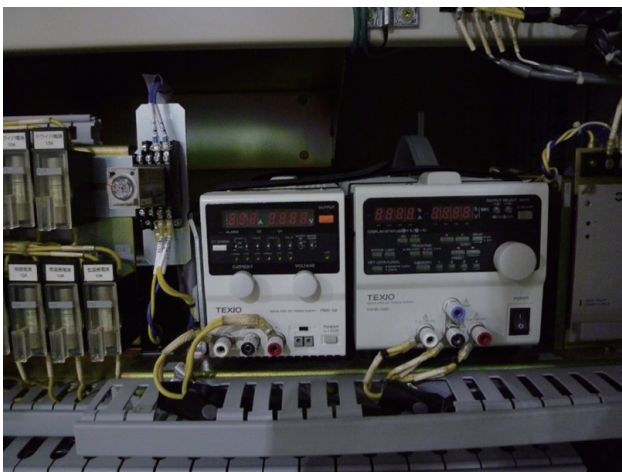


図 1-1 PF リング主偏向電磁石電源の制御電源と追加されたタイマーリレー。

のひび割れが他の偏向電磁石に存在するか全数チェックを行ったところ、外観検査できた範囲では、他には存在しなかった。2023 年度中にコイル交換を行う予定で、準備を進めることにした。また、それまでの間、B01 コイル外側の特に大きなひび割れをカメラで常時観測し、コイルの温度を温度計で測定しながら運転することとした。

PF リング電磁石及び 6 極電磁石の冷却水及び温度インターロックの信号処理用リレーボックスの抵抗が過熱、焼損する不具合が連続して生じており、故障したものを順次交換、改造修理していた。回路設計上、センサが接続されていないチャンネルがあると抵抗に電流が流れ、温度上昇する。弧部に設置されたものは全てのチャンネルに電磁石が接続されているので問題が無いが、直線部は必ず空

きチャンネルがあるため、老朽化が進んで故障が発生する様になった。2022 年度に全数の外観検査を行ったところ、動作しているものでも抵抗が焦げたり割れたりしているものが多数見つかり、全数取り外して改造（抵抗の容量を大きくする）修理を行うこととした。本当は老朽化している組み込み制御電源の交換も同時に行いたかったが、コロナ禍の部品不足で部品調達が非常に困難であり、断念した。2022 年末に全数取り外し、改造修理を依頼、2023 年 2 月に作業完了、再設置して動作確認を行った。1 台だけ制御電源の老朽化が原因と思われる地絡が発生したが、再交換して復旧させ、現在は全数問題なく動作している。

PF リング軌道補正、輸送路、挿入光源用の小型電源を更新するため、必要な電源の内の約半数となる 140 台分の予算が確保できたので、電源を発注し、2022 年度末に納品された。2023 年度より、順次運転に投入していく予定である。

(1-2) 入射電磁石・電源

PF セプトラム電磁石電源のパルサー部は、セプトラム 1 (S1) 及びセプトラム 2 (S2) いずれも 1987 年製であり、内部で使用されているオイルコンデンサーは、低濃度 PCB の含有が否定できないためこれを取り外し交換する必要がある。2022 年度の冬の停止期間中に該当のコンデンサーの交換作業を行った。交換したコンデンサーの内訳は、

- (1) SI : 主回路用 30 μ F, 5000 Vdc $\times$ 6 個,
スナバー用 0.5 μ F, 2500 Vdc $\times$ 4 個
- (2) SII : 主回路用 25 μ F, $\pm$ 2.5 kV $\times$ 4 個,
スナバー用 0.5 μ F, 2500 Vdc $\times$ 5 個

である。このうち、S1 の主回路用オイルコンデンサーは、現在の仕様で製作すると同じ容量でも寸法が大きくなり、そのままでは筐体内に収まらない。そのため、筐体内を改造するとともに、新たにフレームを追加してスペースを確保した。図 1-4 に S1 パルサー部主回路のオイルコンデンサー（左）とフレームを追加した S1 パルサー（右）の写真を示す。

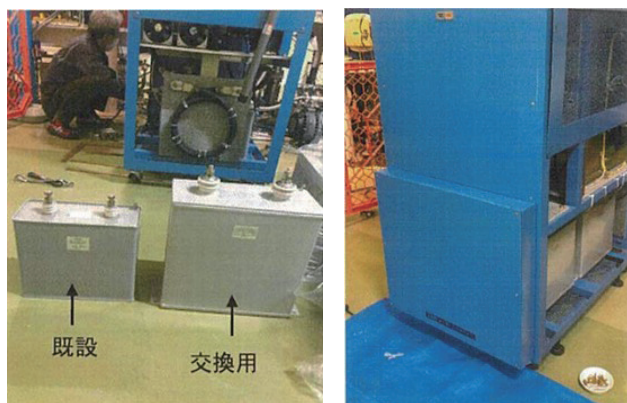


図 1-4 S1 パルサー用オイルコンデンサー（右）及び改造後の S1 パルサー部。既設のオイルコンデンサーに比べ交換用のコンデンサーが大きいため、パルサー部の前面にフレームを追加してスペースを確保している。

(1-3) ビーム輸送路 (PF-BT) スタディ

PF リングへの入射路である PF-BT について、2021 年 11 月の時点においてはシミュレーションコード SAD で計算した計算結果が測定結果を再現しない状況だった。2021 年度に調査を実施した結果、

- (1) アクロマット領域にある 2 台の 4 極電磁石 (QD1, 2) の KtoI (= 4 極磁場係数から 4 極電流値への換算係数) について、「運転で使用されている KtoI 公称値」と「ビーム計測で求めた KtoI」が大きく乖離していること
- (2) KtoI を修正した QD1, 2 を用いて Q-scan により PF 入射ビームのエミッタンスを測定したところ、x 方向エミッタンスの測定値は概ね設計値通りであるが、y 方向エミッタンスの測定値は設計値の約 2 倍になっていること

が判明した (PF 年報 2021 で報告済み)。PF-BT の素性を明らかにして解析的にビーム調整を行うために、2021 年度に引き続き 2022 年度も PF-BT の調査を行なった。

2022 年度は PF-BT にある 13 台の 4 極電磁石 (QD1~4, QE1~3, QF1, 2, QG1~4) について KtoI の調査を行なった。まず実機においてビーム条件及び 4 極電流を変えながら 8 台のビームプロファイルモニター (PM4~8, SC1~3) でビーム形状を測定した。次に SAD でこれら全てを再現するように、それぞれの 4 極電磁石の KtoI について遺伝的アルゴリズムによる推定を行なった。KtoI の推定結果を表 1-1 に、KtoI を修正して SAD でビームサイズを計算したときの測定結果との比較例を図 1-5 に示す。修正された KtoI を用いることで、SAD の計算結果が測定結果を概ね再現するようになった。

SAD の計算結果が測定結果を再現できるようになったということは、PF-BT の輸送行列を抽出できるようになったということであり、複数個のビームプロファイルモニターの測定結果があれば、輸送行列を用いてフィッティングによりビームのエミッタンスを求めることができる。そこで

表 1-1 PF-BT における 4 極電磁石の KtoI の推定結果

	KtoI (A.m)		
	修正前	修正後	設計値
QD1	14.05	9.83	9.83
QD2	5.25	9.93	9.84
QD3	10.46	9.90	9.90
QD4	10.48	9.98	9.89
QE1	5.92	5.96	5.96
QE2	7.07	5.99	5.93
QE3	6.28	6.04	5.96
QF1	4.66	6.01	5.96
QF2	6.38	6.04	5.96
QG1	4.35	5.96	5.95
QG2	4.95	6.06	5.95
QG3	5.43	6.06	5.96
QG4	2.96	6.06	5.93

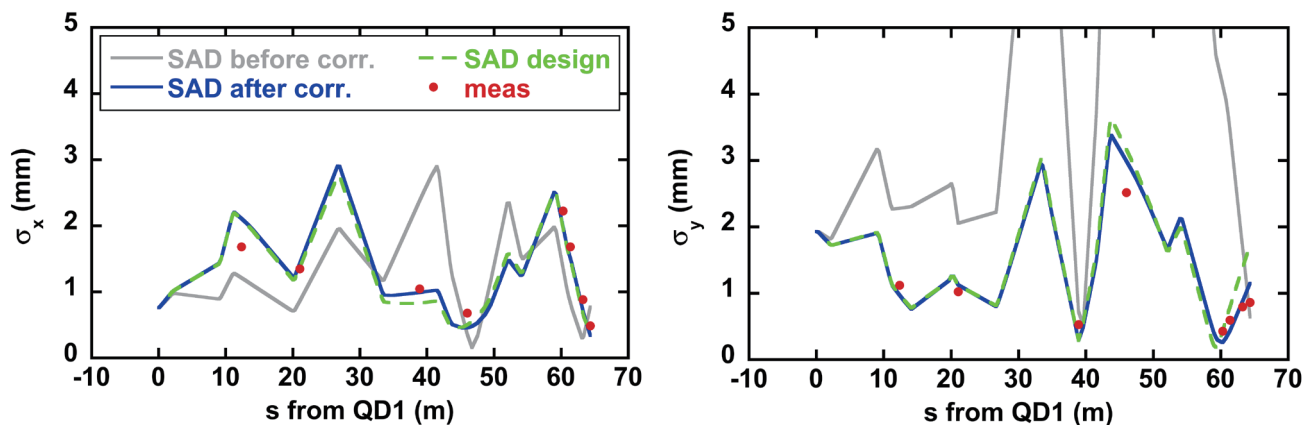


図 1-5 KtoI を修正前後の SAD によるビームサイズの計算結果と測定結果の比較例。(左) x 方向と (右) y 方向。

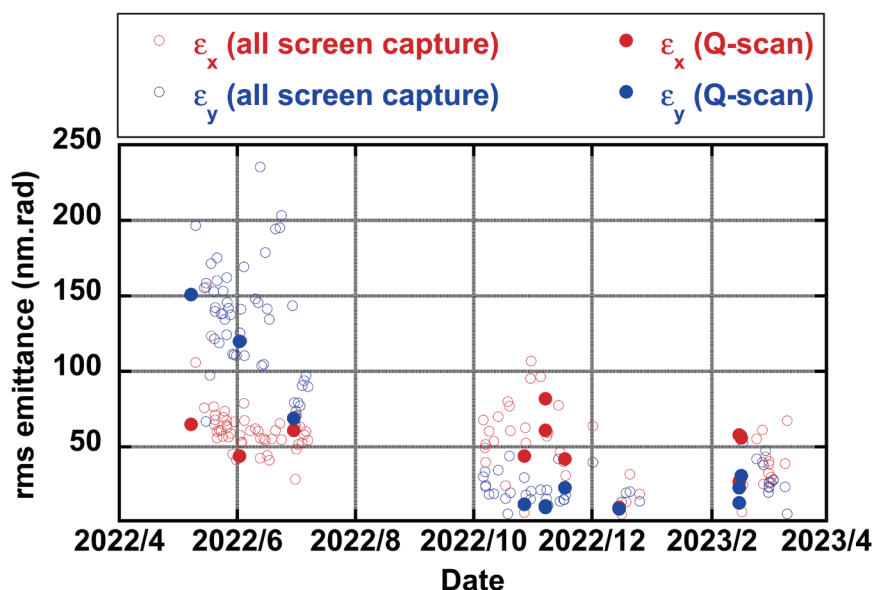


図 1-6 異なる 2 つの手法 (「all screen capture と輸送行列によるフィッティング」と「Q-scan」) で求めた PF 入射ビームエミッタンスの 2022 年度推移。

- (1) 2022 年度のユーザー運転期間中、定期的に取り得られたビームプロファイルモニターの全信号 (all screen capture) と輸送行列を用いて求めた、PF 入射ビームエミッタンスのフィッティング結果
 - (2) 2022 年度のマシンスタディ期間中に定期パラメータ取得として行なった、Q-scan による PF 入射ビームエミッタンスの測定結果
- の 2 つの比較を行なった。結果を図 1-6 に示す。両者はよく一致している。2022 年 6 月末以前は x 方向のエミッタンスに比べ y 方向のエミッタンスが 2 倍以上大きかったが、6 月末以降は y 方向エミッタンスが急激に減少するという結果となった。入射器は現在、ダンピングリング、PF、PF-AR、SuperKEKB の HER と LER の 5 リングに電子ビームの入射を行なっている。SuperKEKB の運転が停止した時期と PF 入射ビームの y 方向エミッタンスが減少した時期

がほぼ一致することから (2022 年 6 月末)、SuperKEKB の運転停止と PF 入射ビームの y 方向エミッタンス減少に相関があったのではないかと考えている。2023 年度後半には SuperKEKB の運転が再開されるため、現象の再現性の確認と、現象が再現する場合には原因調査を行う予定である。

PF-AR のユーザー運転エネルギーである 6.5 GeV 及び 5.0 GeV 両方に対応した Top-Up 運転を実現するために、PF-BT 上流部分で 4 極電磁石の移動を伴う工事を実施した。2022 年 10 月 4 日に運転を再開したところ、改造工事の影響により PF への入射効率が悪化していることがわかったため、10 月 6 日に PF-BT の調整を行なった。まずビームスクリーンモニターでビームプロファイルを確認したところ、本来、x 方向分散関数がゼロであるべき QD1 の位置で、工事後に分散関数が漏れていることがわかった。これにより PF-BT 下流に設置されているセプタム電磁石にまで x 方向分散関数の

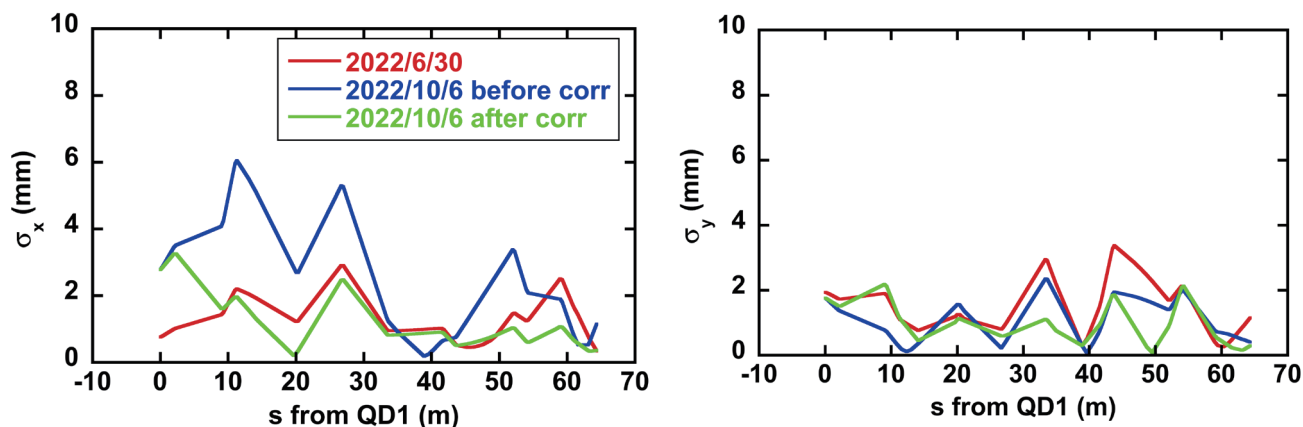


図 1-7 工事前後のビームサイズ (SAD による計算結果)。

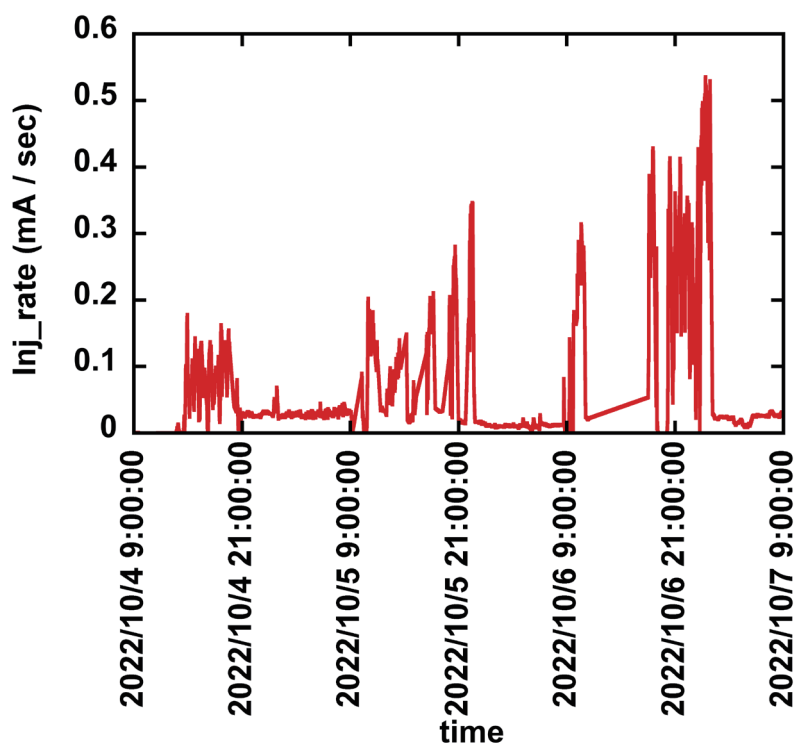


図 1-8 PF-BT 調整 (10/6) 前後の入射効率。

漏れが伝搬し、「入射ビームのエネルギージッター」と「x 方向分散関数の漏れ」により「セプタム電磁石位置での入射ビームの位置と角度」が shot-by-shot で変わること、入射効率が悪化していたものと思われる。そこでまず、分散関数の漏れを無くするために 4 極電磁石 QC1~3 の調整を行なった。

QC1~3 の調整により x 方向分散関数の漏れが抑えられたので、次に QD1 による Q-scan を実施した。結果、工事に伴い x 方向にビームサイズが増大していることが確認されたため PF-BT 全体でビームサイズが小さくなるような 4 極磁場係数を SAD で求め (図 1-7)、実機に適用した。その後、ステアリングの調整を行ったところ、5 Hz 入射での入射効率が PF-BT 調整前の 0.3 mA/sec から 0.5 mA/sec まで改善した (図 1-8)。上述のように、KtoI の修正により SAD が測定結果を再現するようになった意義は大きく、効率良く PF-BT の調整ができるようになったといえる。

(1-4) セラミックスチェンバー一体型パルスマグネットの開発

PF では高速キッカ用セラミックスチェンバー一体型パルスマグネット (Ceramics Chamber with integrated Pulsed Magnet, CCiPM) [1-1] を提案し、製作技術開発と利用開発を同時に進めている。特徴は、パルス磁場を透過させるセラミックスチェンバーと磁場を発生させる電磁石コイルとを、円筒セラミックス内壁面に埋め込まれた状態で完全に一体成型していることである。本パルスマグネットは、高速性能、高繰り返し性能、そして、高い磁場出力性能を同時に満たす特性を有しており、電子ビームに対して高速で強い制御を働かせたい場合に有効なデバイスとして機能する。

この CCiPM の製作技術開発では、磁場強度の増強や次世代放射光源リングの真空ダクトに適合させる超小口径

化、渦電流磁場によるパルス磁場の減衰を防ぐ内面パターンコーティングの精密化、コーティング材に標準的な Ti ではなく銅を採用して膜厚増強による低インピーダンス化、などを進めてきた。2021 年度から開始したコーティングの開発は 2022 年度に R&D のフェーズを完了し、実機展開へ向けた実装技術の開発に移っている。超小口径化については、 ϕ 30mm 内径の円筒モデルが標準的な製作品として入手が可能となり開発が完了し、円筒以外の楕円、多角形など異形状への展開を模索している。

利用開発では、高速キッカとしての開発をテーマとし SuperKEKB における Linac での 2 バンチ個別軌道補正用超高速キッカとして 2 極（ダイポール）型（CCiPM-D）の試験的運用に向けて、2022 年度夏に Linac J-arc 部へのインストールが完了し、ビームコミショニングが順調に進んでいる。ビームコミショニングでは要求される 50 ns の立ち上がりスピードのパルス磁場出力性能の実現に成功しており、CCiPM の大きな開発の成果となっている。また同等の 2 極型では、放射光源加速器でバンチ毎の軌道を変え、ビームライン側でのマスクシステムを用意せずとも加速器側でビームがリングを数周回る毎に光軸をシフトさせることが可能な、カムシャフトバンチスキーム用の高速半導体パルス電源との組み合わせ試験の準備が進んでいる。このスキームの実現には 400 kW 以上の大電力の 1 MHz の高繰り返し出力が可能な半導体パルス電源と CCiPM の組み合わせが必要となる。現在、半導体パルス電源は模擬負荷において 400 kHz の高繰り返し出力で 160 kW の電力の引き出しに成功していて、実負荷 CCiPM との組み合わせ試験を 2023 年度に計画している。

新たな応用展開である CCiPM の 8 極（Octupole）型（CCiPM-O）利用を 2021 年度に PF リングで開始した。これは Top-Up 入射時の光軸振動を抑制することを目的として PF が世界で先駆的に開発したパルス 6 極電磁石の後継器である。2022 年度を通じてビームコミショニングが行われており、いくつかの問題を解決しながら順調に進んでいる。PF リングにおけるパルス 8 極入射スキームの確立に向けた状況を以下に簡単に報告する。

CCiPM-O 入射では、入射ビームはパルス生成される 8 極磁場の高磁場の領域に精密に置く必要がある。これは、入射ビームを蓄積ビームと合流させるために必要な蹴り入れ力が厳密に蓄積リングの光学系と入射ビームがリング真空ダクトと衝突せずに周回する物理口径で決まっているためである。そのため、入射スキームの確立の課題の 1 つに、入射ビームを制御し、CCiPM-O のインストールされている位置の断面形状（x-y 平面）の適切な位置へ入射させるスタディが重要である。逆に蓄積ビームは、8 極磁場のゼロ磁場領域を通過するように置かれるため、入射ビームを蹴り入れる作用にて蓄積ビームは作用を受けずに静的に通過するはずである。しかしながら、8 極磁場が CCiPM-O のインストール時の設置誤差により精密に生成されない場合、不整磁場により静的な通過が叶わない。この確認が 2 つめのスタディ課題である。パルス 8 極磁場は、35 kV

の電圧で、1.2 μ s のパルス幅の電流 3000 A の出力が可能なサイラトロン電源に接続されている。おおよそ 3000 A の電流を磁場生成のために必要とするときには CCiPM-O にはおおよそ 12 kV のパルス電圧が印加される。そのため、CCiPM-O の治具の高電圧下での（or パルス電圧下での）健全性の監視は 3 つめの重要な課題である。これら 3 つの課題について重点的にビームコミショニングが行われ下記の結果を得ている。

まず、課題 1 つめの入射ビームの精密な入射点制御である。2020 年に行われた PF セプタム更新に伴う入射部改造工事で CCiPM-O 入射においても入射条件が成立する最適化が行われているにも拘わらず、理想的な軌道を制御できていない。いくつか原因が分かっており、1 つは、Linac からの入射ビーム輸送路での光学関数、エネルギーの不定による PF リングとのマッチング不整合、もう 1 つは、入射部改造により導入した入射部エアギャップに設置した輸送路とリングを大気で区切るための SUS 膜の設置からくるビーム広がり問題である。1 つめは、ビーム輸送路の季節ごとの光学関数が正確に測定されリングと整合させるスタディが開始されたことや、入射ビームのエネルギー不定による軌道変動に対するリアルタイム軌道補正フィードバックの追加など（1-3 章を参照）により解決へ向けた試みが着実に進んでいる。2 つ目は、SUS 膜によるビーム広がりが入射ビームの核となる部分を失い、PF リングの電磁石光学系が入射ビーム軌道の真芯をとらえられていないことから、SUS 膜の撤去などのあらたな改造措置を検討する必要がある。この問題はリング内の物理口径狭小部でのビームロスとも大きく関わっており、改造ワーキンググループが立ち上がり今後の改造に向けて検討を進めている。

次に課題 2 つめの蓄積ビームの静的な通過が 8 極磁場中心で行われているかどうかである。ビームベースドによる測定の結果、100 μ m 以下の振動抑制が出来ていることが確認された。概ね良好な結果であったが、本来、磁場設計上は 10 μ m 以下が想定されていることから、設置時のミスアライメントにより不整磁場が生じていることが判明した。今後、この課題は改善されていくべき内容として開発が継続する。

課題 3 つめの CCiPM-O の耐電圧性能であるが、初期の段階で 9 kV 以上の性能が確保されなかったことで善後策の立案が急がれた。耐電圧性能が劣化していた箇所は、不整磁場の生成を極力抑制するために、電流リード線の正極、負極を近接させていたところである。このリード線を保持する治具のホルダー内で沿面放電が生じ、12 kV の耐電圧性能が実現できなかった。これは、治具に沿面放電を防ぐ間仕切り板を追加し、リード線間を磁場整形に影響を及ぼさない程度に広げることで現在完全に解決している。

パルス 8 極入射スキームの確立に向けたビームスタディを通じた基礎的な課題の洗い出し作業が進み、2023 年度においては具体的なビーム入射の調整が開始される予定である。2024 年度の SUS 膜の抜本的な解決がなされた暁には、バン

プキッカ入射から、Top-Up 入射時の光軸振動が抑制されたパルス 8 極入射の導入を開始することを計画している。

(1-5) 高周波加速 (RF) システム

PF リングの高周波 (Radio Frequency; RF) 加速システムの概念図を図 1-9 に示す。基準信号源で発生した高周波信号 (周波数 500.1 MHz) を低電力高周波制御系 (ローレベル系) で制御した後、200 kW クライストロンで大電力高周波に増幅する。増幅された大電力高周波 (電磁波) は、導波管、サーキュレータ、ダミーロード等から成る立体回路系を通して加速空洞まで伝送される。加速空洞に投入された高周波電力により加速空洞内に高周波電圧を発生し、蓄積された電子ビームを加速する。また、クライストロンには直流高圧電源 (標準出力: -40 kV, 8 A) を用いて電力を供給する。PF リングでは、図 1-9 に示すシステムが 4 系統ある。この RF システムは、2022 年度を通して大きなトラブル無く順調に運転された。夏季停止期間中には、クライストロン用直流高圧電源の保守点検と低電力高周波制御系の点検を実施した。

PF リングで進められている PF 高度化計画の一環として、低電力高周波制御系 (ローレベル系) の更新を進めている [1-2]。ローレベル系の主要な役割は、加速空洞で発生する高周波電圧の振幅と位相を安定化すること、加速空洞の同調を制御すること、機器に異常が発生した場合に大電力高周波の投入を停止すること、などである。現状のローレベル系は、図 1-10 に示すように多数のモジュール化した高周波回路を NIM ビン (電源付き筐体) に収納し、回路モジュール間をケーブルで接続してシステムを構成し

ている。しかし、近年アナログ部品の調達が難しくなっており、今後安定に運用してゆくことが困難である。これを最先端のデジタル技術を用いた高周波制御系に置き換えることで、より高安定で高性能なローレベル系を構築する予定である。新しいデジタル・ローレベル系は、デジタル通信用途に用いられる MTCA.4 規格に基づく各種回路ボード群と筐体 (シェルフ) を組み合わせて構築する。令和 3 年度補正予算 (施設整備補助金) により、2022 年度にデジタル・ローレベル系の中核部分である「PF 低電力高周波デジタル制御システム」の調達を行った。試験中のデジタル・ローレベル系の一部を図 1-11 に示す。2023 年度には、納品されたシステムを PF リングに設置して各種調整を行い、運用を開始する予定である。

ローレベル系のうち、機器に異常が発生した場合に高周波を停止する機能 (低速 RF インターロック) については、先行して構築を進めた。旧システムでは多数のリレー回路を用いていたが、これを PLC (Programmable Logic Controller) を用いた新システムに置き換えた。新しい低速 RF インターロックシステムでは、PLC に 2 種類の CPU を搭載し、ラダープログラムを用いてインターロック動作 (機器保護の動作) を行うと共に、そのステータスを上位の EPICS (Experimental Physics and Industrial Control System) から監視できる。制御パネルの例を図 1-12 に示す。この新しいシステムは 2022 年秋から運用を開始しており、デジタル・ローレベル系と並列して継続使用される。

PF リングの RF システムでは、制御系の更新も進めている。1980 年代に制御システムを構築した際には、各機器の情報を計算機に取り込む際のインターフェースとし

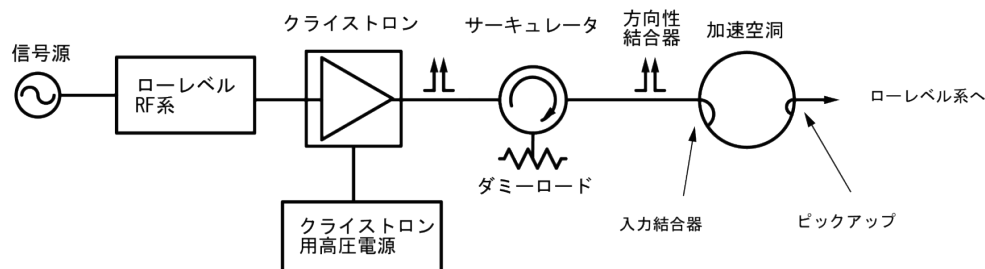


図 1-9 PF リングの高周波加速システムの概念図 (4 系統のうちの 1 系統)。

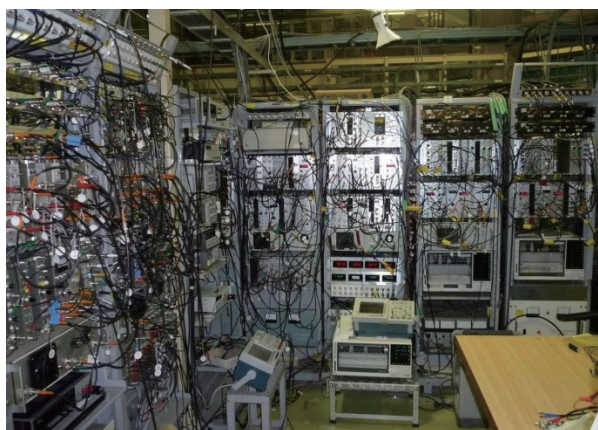


図 1-10 PF リングの低電力高周波制御系 (2022 年度現在)。



図 1-11 試験中のデジタル低電力高周波制御系の一部。

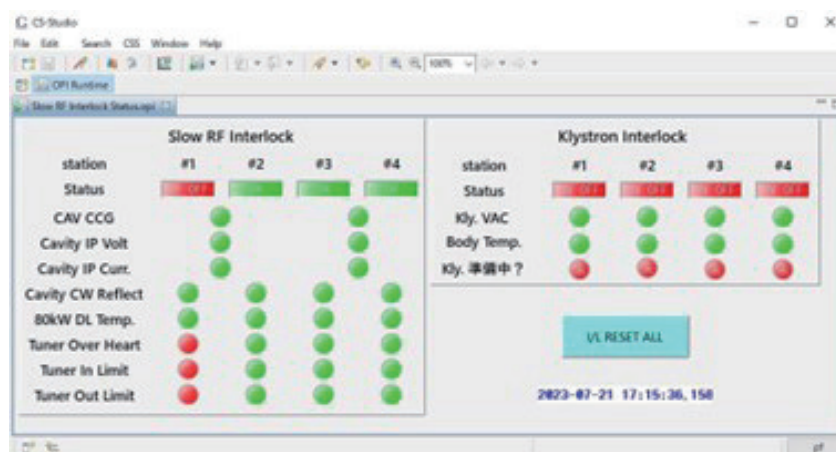


図 1-12 新しい低速 RF インターロック系の制御パネル。

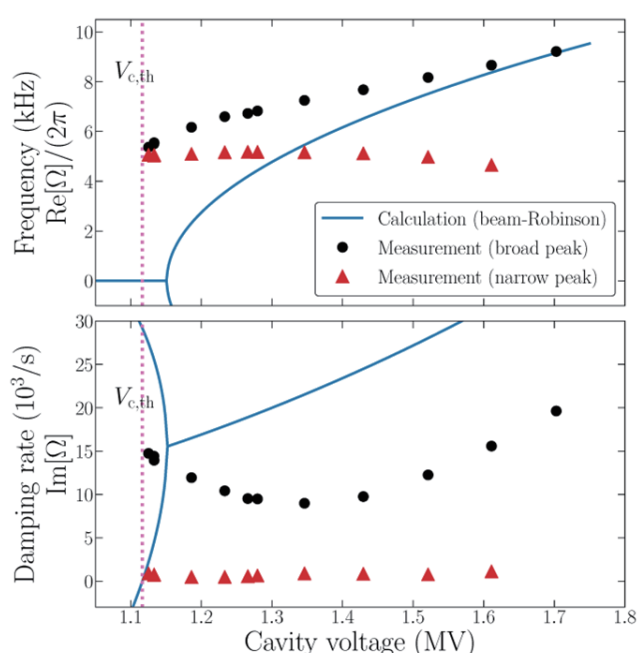


図 1-13 PF リングにおける縦方向コヒーレント振動数の理論的予測値と測定結果。横軸は空洞電圧、縦軸はコヒーレント振動数（上図）とその減衰率（下図）を示す。実線は理論的予測値を、丸と三角の記号は測定値を示す。（文献 [1-3] より転載）。

て、主に CAMAC (Computer Automatic Measurement and Control) 規格の回路ボードを採用した。CAMAC は 1972 年に定められた規格で、近年は衰退してきている為、これを PLC を用いた EPICS IOC (Input and Output Controller) と PLC 用入出力モジュールに順次置き換えている。2022 年度には、高圧電源の制御インターフェースを、CAMAC から EPICS IOC に更新した。対応する EPICS ソフトウェアも整備した。2023 年度にアナログ・ローレベル系をデジタル・ローレベル系に更新すれば、古い CAMAC インターフェースは不要になる見込みである。

マシンスタディに関しては、ビーム電流が大きい時に発生す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) に関する実験的研究を 2019 ~ 2021 年

度にかけて進めてきた。これにより大きな研究成果があり、論文発表を行った [1-3]。電子蓄積リングでは、周回するビームの集団 (パンチ) がビーム進行方向 (縦方向) に一斉に振動する時の振動数を、縦方向コヒーレント振動数と呼ぶ。このコヒーレント振動数を PF リングの様々な条件で測定したところ、理論的な予測と合わない現象を発見した。図 1-13 に示した青色の実線が、理論から予測されるコヒーレント振動数を示す。これに対して測定結果 (図 1-13 の黒色の丸印) は、空洞電圧が約 1.4 MV より低い条件で理論値から大きくずれていた。さらに、理論では予測されないもう一つの振動 (図 1-13 の赤色の三角印) が出現することもわかった。従来、縦方向コヒーレント振動の理論は確立したもので、円形加速器のビームの振る舞いはその理論通りに説明できると考えられてきた。これに対し、static Robinson instability のしきい値の近くでは、従来の理論では説明できない新たな現象が出現することを示した点が、この研究の大きな成果である。このように興味深く重要な現象が発見された事で、静的ロビンソン不安定性に関連した研究が今後活発に行われると期待される。このような加速器の基礎研究で得られた知見は、より高性能な次期光源加速器を設計、建設する際に大いに役立つ。

(1-6) 真空システム

2020 年度の入射部セプタムチェンバー改造にあわせて、モニターグループが考案したビーム入射路終端の真空を封止している SUS 箔 (厚さ 0.2 mm) を入射電子ビームが通過するときに発生する光学遷移放射 (OTR) を利用するビームプロファイルモニターを設置していた。OTR 光の可視成分を集光結像して観測することには成功したが、ビームプロファイル像には大きな歪が生じていた。歪の原因は SUS 箔の表面がきれいな平面ではなく、凹凸や歪が生じているためと推定され、2022 年度には製造や溶接の工程を工夫して SUS 箔の平面度を改善したビームダクトを作り直して更新をした。SUS 箔の交換によって観測されるビームプロファイル像の歪を格段に減らすことができた。観測時に蛍光板で入射ビームを遮ってしまう通常のビーム

プロファイルモニターとは異なり、常時連続してビーム形状を観測できる新しいモニターとして、まだ改良の余地はあるものの、実用化の可能性を示すことができた。

現行の PF リングの入射点には、入射ビーム輸送路と蓄積リングビームダクトの間にエアギャップを設けており、入射ビームはビーム輸送路の終端と蓄積リングビームダクトの真空を封止している 2 枚の SUS 箔（それぞれ厚さ 0.2 mm）を透過して入射されている。PF リングにおける 2022 年度のマシンスタディで、入射電子ビームが SUS 箔を通過することで散乱されて角度広がりが増加することが、高効率・低損失での入射を妨げている可能性が明らかとなった。この問題を解決するため、エアギャップを廃止し、ビーム輸送路の真空と蓄積リングの真空の間の隔壁をなくすか、あるいは入射ビームの角度広がりへの影響が少ない非常に薄い膜で隔てる方針をたて、入射部ビームダクトの再改造を計画している。

入射器 Linac の後端にある第 3 スイッチヤードにおいて、PF リングと PF-AR のビーム輸送路に電磁石を追加設置することで、PF-AR が 5 GeV での低エネルギー運転をする場合にも PF リングと PF-AR が同時に連続 Top-Up 入射できるようにするための改造を進めている。2022 年度には PF リングのビーム輸送路に特別設計の小型偏向電磁石を 3 台追加設置した。垂直方向の磁極間隔が約 22 mm まで狭められた小型偏向電磁石を収容するためと、また新設する偏向電磁石の近傍では電子ビームがビームダクト中心から大きく離れた軌道を描くため、垂直方向を 20 mm まで狭め、水平方向に幅を広げた扁平なビームダクトを設計し設置した。2022 年秋の運転期間に両リングの同時入射のビーム試験を無事完了しており、2023 年度からは PF-AR の蓄積エネルギーが 6.5 GeV でも、5 GeV でも PF リングと同時の連続 Top-Up 入射が可能となる。

(1-7) ビーム診断システム

ビーム診断に関しては、原因不明の鉛直方向軌道変動に対する調査や突発的に生じたビーム不安定現象への対処に時間を割いたものの、ユーザー運転を長時間中断せざるを得ないような深刻なトラブルはなく、総じて安定な運用を継続できた。最近のハイブリッドモードによるユーザー運転は、マルチバンチ部に 420 mA、孤立バンチに 30 mA を蓄積し、全蓄積電流としては通常のマルチバンチモードと同じ 450 mA として行ってきたが、孤立バンチユーザーからの要望に応え、2022 年度第 2 期運転からはマルチバンチ部 400 mA、孤立バンチ 50 mA でのハイブリッドモードに復帰した。2021 年度に調達した個別バンチフィードバックシステムのためのデジタル信号処理回路（iGp12）は、数回のビーム調整を経て、予定どおり 2022 年度中にユーザー運転へ導入した。システムの心臓部である回路の老朽化が解消されただけでなく、従来の回路よりも高精度でビーム不安定現象の観測やフィードバックの調整を行うことが可能になった。

2021 年度に調達したビーム位置モニター（BPM）用信

号処理回路とそれらを利用した高速軌道フィードバックシステムについては、新しく整備したテストベンチにおいて不具合の洗い出しやその改修、性能評価を行った。それと並行して実際の設置場所となる PF 地下機械室のインフラ整備を進め、第 2 期運転の開始までに全台の移設を完了した。限られたマシンスタディの時間を利用して実ビーム信号による試験も行い、得られた初期データについては日本加速器学会の年会で報告した [1-4]。当初の予測以上に多く判明した各種不具合への対処や電気代高騰によるマシンスタディ時間の削減によりまだ従来の BPM システムと入れ替えるには至っていないが、2023 年度中のユーザー運転導入を目標に調整を続けている。

PF リングのビーム輸送路（PF-BT）に設置してあるスクリーンモニターでは、2021 年度にアナログの CCD カメラを GigE カメラに更新したのに続き、ダクト内のシンチレータを従来のアルミナ蛍光板から Ce:YAG シンチレータに更新する作業を行った。更新前後におけるシンチレータの写真を図 1-14 に示す。これにより入射ビームのパラメータ測定や調整がより正確に行えるようになり、ビーム入射効率の安定化や改善に繋がると期待される。PF-BT 最下流に位置するエアギャップ用金属窓から発せられる遷移放射光（OTR）を利用した常時プロファイルモニターでは、窓周辺の溶接加工時に生じた窓表面のうねりが原因で OTR 画像に大きな歪みが生じていた [1-5]。この状況を改善すべく、2022 年夏の停止期間中にはできるだけ窓表面

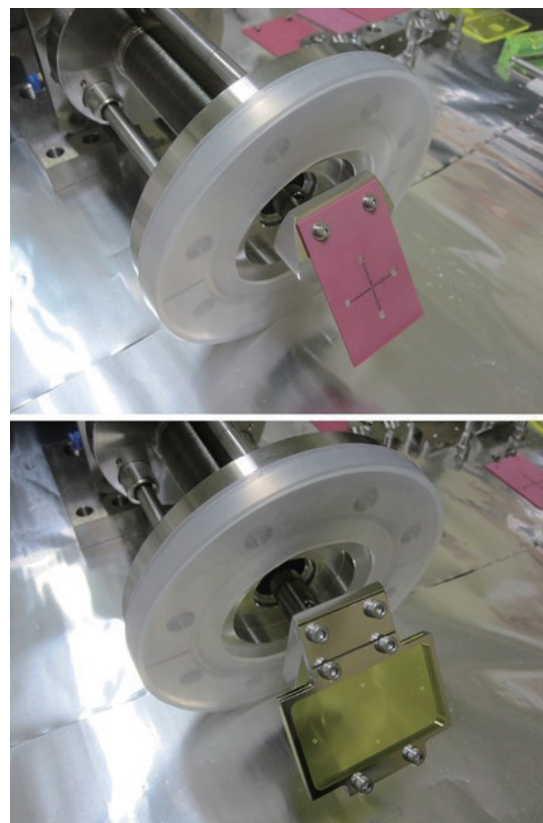


図 1-14 更新前のアルミナ蛍光板（上）と更新後の Ce:YAG シンチレータ（下）の写真

に熱歪みが生じないよう配慮して再製作したセプトマダクトとの入れ替え作業が行われた。その結果、OTR 画像に一定の改善は見られたものの、依然として窓表面の歪みや迷光の影響が大きく、通常の入射軌道では正確なビームプロファイルを得るのは困難であることが分かった。更なる改善のためにはセプトマダクト自体の構造を見直す必要があると考えており、詳細は今後の入射部更新計画の進捗に合わせて検討する。

また、現在 PF-BT で使用している BPM からの信号は、RF 信号合成器を用いて 1 台の高速オシロスコープにより処理しているが、より高い精度のビーム位置測定を実現するため、各 BPM に 1 台の信号処理回路を設ける計画を進めている。使用する回路は PF-AR の BT BPM 用に独自開発したもので、これまでの PF-AR 運転において十分な使用実績がある。2022 年度は、この回路を PF-BT の BPM にも展開すべく量産を開始した。今後は実ビーム信号での試験や制御系の整備を行い、問題がなければ上記の現行システムからの入れ替えを順次行う予定である。

入射ビームや蓄積ビームの損失量を測定・監視するためのビームロスモニターについても、定期的な保守により安定に運用できた。PF リングには半導体検出器を用いたポータブルエリアモニターと、シンチレータに光電子増倍管を組み合わせた高速ロスモニターが常設されているが、2022 年度はこれらに加えてガフクロミックフィルムを用いた新方式のロスモニター開発を行った。ガフクロミックフィルムは放射線の Dose 量に応じて黒く変色する特殊なフィルムで、リアルタイム性はないものの非常に安価であり、ビームロスの 2 次元分布を広範囲にわたって手軽に測定できるというメリットがある。フィルムの変色具合（吸光度）と Dose 量との較正は、放射線科学センターや他の研究系の協力も得て行った。その結果を基に測定した PF リング一周にわたるビームロス分布は日本加速器学会の年会で報告し、内容が評価されてポスター部門の年会賞を受賞した [1-6]。

加速器制御に関しても定期的なメンテナンスや要望に応じたソフトウェア開発を行い、安定なユーザー運転に貢献できた。2022 年 8 月には、前年度更新した PF 計算機システムの初メンテナンスを行い、各種ファームウェアのアップデートや OS イメージのバックアップを実施した。

(1-8) 基幹チャンネルシステムおよび安全システム

基幹チャンネルシステム関連の活動として、BL-12 では BL-11 のアクティビティを移設するための大規模な改造が行われた。新 BL-12 基幹チャンネルは 12A、光モニター用ライン、12C の 3 本で構成される。主な作業は旧基幹チャンネル下流部の撤去、3 分岐水冷マスクの製作・設置、ビームシャッターの製作・設置、ラージバルブの小型化である。3 分岐マスクは、フランジとマスク部分を Be-Cu 地金から一体成型することにより、コストを大幅にカットしている。真空シールのエッジ部分は SUS に比べて柔らかいので、銀メッキしたアニール銅ガasketを使用し、

締め付けトルクは最大 10 N・m とした。ビームシャッターは、偏向電磁石を光源とする光の取り出し角が 36 mrad と大きいため、ICF356 の大口径のものを製作し、遮蔽ブロックは SUS を使用した。ビームシャッターの下流には三分岐チャンバーを設置し、12A、12C ラインは ICF114 ゲートバルブ、中央の光モニター用ラインは水冷ストッパーで終端している。ベーキング後の真空立ち上げは順調であったが、光導入時に想定以上のガス放出が確認された。このため、運転中は真空インターロックの閾値を 1.0^{-5} Pa から 1.0^{-4} Pa に変更している。

BL-18 の ICF356 ラージバルブは設置から 30 年以上経過し、開閉にかかる時間が非常に長くなっていた。また、ベーキングの繰り返しで真空のシール性能も落ちていたため、新しく HTC 製の ICF356 バルブと交換を行った。バルブは壁貫通口の外に設置されており、クレーンが届かないためリフターを使用しての搬出となった。立ち上げ当初は開閉時のガス放出が大きかったが、現在は順調に枯れが進んでいる。

制御関連では、トンネル内に設置している基幹チャンネルリレーボックスの内部電源（50 台）の交換を行った。

安全システム関連の活動として、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た。2022 年度には、PF 加速器の老朽化したインターロックシステムの再構築作業を行った。新しいインターロックシステムは前年度までに試験した産業用ネットワークやフィールドバスを使用し、省配線を意識したシステムとして構築を行った。この新システムへの切り替えについては、インターロックシステムの性質上、動作確認を十分に行ったうえで新システムへ切り替えを行いたいため、2023 年で旧システムとの平行運用で動作を開始し、様々なシチュエーションで新システムの動作が旧システムと違いがないことを確認した上で、切り替えを行う予定である。

(1-9) 挿入光源システム

2022 年度の PF リングの運転における挿入光源（ID）関連のトラブルは前年度と同じく 2 件発生している。前年度に起こった 2 件がどちらもフリーチューニング用補正電磁石電源の故障によるものであったのに対して今年度はどちらも Gap 値読み取り用のエンコーダーの不具合によるものであった。トラブルの発生回数は少ないものの着実に機器の老朽化の影響が表れつつあるといえる。補正電磁石電源に関しては更新計画を現在実施中であるが、エンコーダーを含めたその他の機器も製造中止となったものが多くあり、現在のところ手持ちの予備品への交換で対応している状況である。このため各機器の予備品の補充と代替品への更新を行っていく予定である。

また 2022 度はやはり老朽化が顕著な超伝導垂直ウイグラー：VW#14 の更新のための検討を ID グループとして真

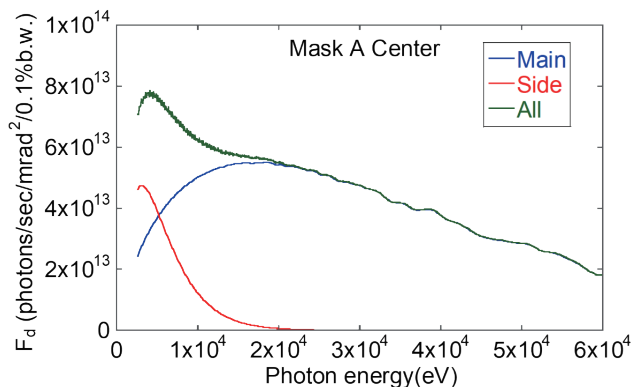


図 1-15 BL-14 マスク A の中心での放射光フラックス密度の計算例

空グループと行った。これまでに現在の VW#14 より小型であるが最大磁場強度は VW#14 と同じ 5T を出せる 3 極ウイグラーが提案されている。そこで ID グループでは計画中の垂直ウイグラーの放射特性の詳しい検討を行った。現在の BL-14 では放射光マスクによって A,B,C の 3 本のプランチラインに分かれて実験を行っている。このうち上下に 3 mrad ほど軸外して放射光を受ける A,C ラインでは、主極（メインポール）からの放射光のみではなく副極（サイドポール）からの放射光も考慮する必要がある。このためウイグラー中での電子軌道から直接に各マスク位置での放射光を計算することで現在の VW#14 との放射特性の比較・検討を行った。図 1-15 に検討中の垂直ウイグラーからの放射光特性の計算例を示す。ここではマスク A 中心でのフラックス密度をメインポール（青線）、サイドポール（赤線）及びその合算（緑線）で示している。放射光エネルギーが 20 keV 以下の領域ではサイドポールからの放射も十分寄与してくることがわかる。ここで使われた放射光計算の手法は次期光源での挿入光源の検討にも役立つものであり、今後さらに開発を進める予定である。

(1-10) PF リング運転のまとめ

表 1-2 に 2009（平成 21）年度から 2022（令和 4）年度までの PF リングの運転統計を示し、それらのデータを棒グラフにしたものを図 1-16 に示す。2022 年度当初は、リング運転時間 4,128 時間（172 日）ユーザー運転時間 3,616 時間で計画したが、実際のユーザー運転時間は 3,590 時間と、わずかに目標に届かないものの概ね達成できたといえる。

故障時間は前年度と同程度の約 25.8 時間、故障率は約 0.7%、平均故障間隔時間（MTBF）は約 144.6 時間で、昨年度に比べると少し悪化しているものの、いずれも良好な値を維持できている。図 1-17 に故障時間の内訳を示す。2022 年度は電磁石関連が約 71.8% を占めていた。これは第 1 期に電磁石の冷却水流量低下によるビームダンプが多発したこと、また、原因不明の軌道変動調査にも時間を割いたことが原因である。次いで制御・モニター関連のトラブルが

約 16.7% であり、老朽化の傾向が見える。RF 関連による故障率は 5.2% と昨年度と同様に非常に低く、RF システムがほとんどトラブルなく安定に稼働したことが分かった。

表 1-2 PF リングの運転統計

年度	リング 運転時間 (h)	リング 調整・ スタディ 時間 (h)	ユーザ 運転 時間 (h)	故障 時間 (h)	平均故障 間隔 (MTBF) (h)
2009 (H21)	4,976.0	979.5	3,961.9	34.5	167.0
2010 (H22)	5,032.0	958.7	4,050.8	22.5	226.7
2011 (H23)	4,696.0	1,875.1	2,809.2	11.7	157.3
2012 (H24)	4,416.0	624.0	3,752.9	39.1	164.9
2013 (H25)	4,176.0	672.0	3,451.4	52.6	159.3
2014 (H26)	3,024.0	696.0	2,316.6	11.4	155.2
2015 (H27)	3,888.0	839.6	3,034.0	14.4	132.5
2016 (H28)	3,432.0	504.0	2,910.7	17.3	162.7
2017 (H29)	3,624.0	624.4	2,983.4	16.6	214.3
2018 (H30)	3,408.0	576.0	2,803.6	28.4	166.6
2019 (R01)	3,504.0	440.0	3004.1	59.9	153.2
2020 (R02)	3,120.0	536.0	2425.6	158.4	172.3
2021 (R03)	4,368.0	624.0	3720.8	23.2	220.2
2022 (R04)	4,128.0	512.0	3,590.2	25.8	144.6

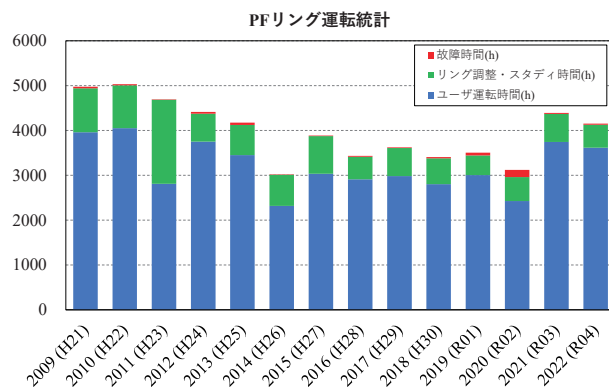


図 1-16 2009 年度から 2022 年度までの PF リング運転統計グラフ

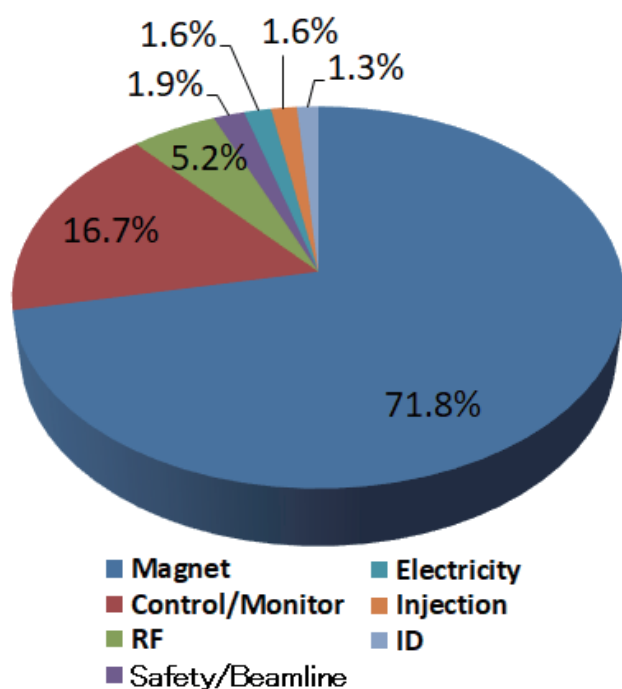


図 1-17 2022 年度 PF リング故障時間の内訳

参考文献

- [1-1] 満田史織, 他, 第 6 回日本加速器学会年会要旨, 2015 年, 2879-2882.
- [1-2] 内藤大地, 他, 第 19 回日本加速器学会年会要旨, 2022 年, pp. 639-643.
- [1-3] T. Yamaguchi, *et. al.*, Phys. Rev. Acc. Beams **26**, (2023) 044401. DOI: 10.1103/PhysRevAccelBeams.26.044401
- [1-4] 高井良太, 他, 第 19 回日本加速器学会年会要旨, 2022 年, pp. 921-926.
- [1-5] 高井良太, 他, 第 18 回日本加速器学会年会要旨, 2022 年, pp. 306-310.
- [1-6] 塩澤真未, 他, 第 19 回日本加速器学会年会要旨, 2022 年, pp. 743-747.

(2) PF-AR の運転・維持・管理および開発

(2-1) 運転調整と運用計画

PF-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 I 期目計画が 2020 年に完了し, 2021 年度より新たな 3 カ年計画による II 期目の計画が開始されている。I 期目の 3 カ年では, AR 直接入射路が完成しフルビームエネルギー Top-Up 運転が可能になったことを最大限に活かせるように, フルビームエネルギー 6.5 GeV, 節電モードビームエネルギー 5 GeV の「運転調整の構築と確立, 合理化」, PF-AR を構成する加速器機器の重点的な「老朽化対策, 保守性の合理化」を目標とし, 安定した放射光供給の実現が目指された。2020 年度までの 3 カ年計画で PF-AR の Top-Up 運転を基軸とした安定した運用の目途が立ったことから, II 期目である 2021 年から開始された 3 カ年計画は「AR 利用の高度化」を運転目

標としている。2022 年はその 2 年目に入る。高度化の柱は 3 つあり, 1 つ目は素粒子原子核研究所との連携で進めている測定器開発用ビームラインを増設する AR test beam line (AR-TBL) 建設計画, 2 つ目は PF-AR のローエミッタンス化を目指す AR ローエミッタンス (AR/Low ϵ) 計画, 3 つ目は, PF-AR 5 GeV 本 Top-Up 運転対応のための改造計画である。これら先の 2 つの計画は, 共に強く関連した課題を有しているため, それらの加速器運用上の課題を克服していくことにより, 計画の同時実現性が高まる。その同時実現性の鍵となる計画が 3 つ目の改造計画である。高度化が既存加速器の土台の上に積み上げていくとするならば, これらの計画を順当に推進していくために, 加速器機器装置の健全性も重要であるため, PF-AR の先の運転の 10 年を見越した保守, 整備が必要となっている。「長期老朽化対応」の計画策定も II 期運転計画の重要な課題である。

PF-AR 運転では, 5 GeV 省エネルギー運転, 6.5 GeV フルエネルギー運転の 2 つのエネルギーモードでの運転が定常化し, それぞれが, 運転期間の半分の運転時間を占有し運用がなされた。6.5 GeV では Top-Up 運転により, PF リングと PF-AR では完全にオンデマンドに入射が行われるが, 5 GeV 省エネルギー運転では PF リングとの持ち時間配分による疑似 Top-Up 運転 (PF/AR 互いに持ち時間内のみ Top-Up 運転が行われ持ち時間以外に入射待ち時間となる) である。2022 年度を通じて, 引き続き疑似 Top-Up 運転が継続されたが, 2022 年夏にはこのいずれのエネルギーモードに対してもオンデマンド入射を可能とするための改造工事が実施された。詳細は別項であらためて触れることとする。

運転調整では, 2021 年度より導入された立ち上げ調整の短縮化である「クイックスタート (AR の定格運転エネルギーより低い 5 GeV エネルギーの運転調整においても急ぎ放射光の安定供給状態に到達させる調整)」が機能し始めた。この運転調整の合理化は, ユーザー運転時間の確保も難しい時世の中で, AR 高度化計画が本格化しそれぞれのプロジェクトで必要とされるビーム調整時間を確保するために, 2020 年度より検討が進められてきたものである。重要な立ち上げ調整時間を, これまでの調整期間を延ばすことなく, II 期運転計画で改造工事が完了した各プロジェクトのビームコミッショニングに割り振ることが可能になり, 2022 年度のプロジェクト成功の鍵となった。それぞれの運転調整について詳細は別項のプロジェクト報告で取り上げる。

2022 年度を通じて, 運転を途中, 長時間中断せざるを得なかった事象は, 大きく 3 つに分類される。1 つ目は, 入射バンパキッカ故障によるもの, 2 つ目は, 直線部に配置される 4 極電磁石電源の故障によるもの, 3 つ目は偏向電磁石の冷却水インターロック誤発報によるものである。

前年度開始した入射バンパキッカ 3 台体制による本来の入射システムの運用が 2022 年度を通じて実践することが可能になった。しかしながら, その間, 夏の運転 6.5 GeV 運転エネルギー切り替え前の 6 月上旬に, キッカ 1 台のト

ランスの故障によりビームがダンプし 5 時間の放射光供給の運転中断を余儀なくされた。キッカ 3 台のうち、当該故障電源は下流端のキッカに該当するため、故障のままでは残りの 2 台での入射が不可能なため、中央のキッカ電源を下流端の電源として運用することで、上下流端 2 台の電源での運用でサイクル残りのユーザー運転の Top-Up 入射の継続を確保した。夏には修理が完了し、秋以降の運転では 3 台キッカでの運用体制が再開され、それ以降は故障なく年間の運転を終了している。この入射キッカの 3 台システムの運用の可否は、入射時の蓄積ビームの水平振動による影響を無視できない。AR-TBL 計画推進の成功の鍵となるため、年間を通じて 3 台キッカによる運用が可能となったことは重要な課題改善の成果としてとらえている。

2022 年度の夏の運転では、6 月下旬より、34 度以上の急激な外気温の上昇が生じた。空調設備のない西電源棟に設置されている、1987 年の製作から 35 年が経過した 4 極電磁石電源群 8 台には過酷な運転環境となった。外気温の温度上昇を原因とし、前面電源の排熱により過熱されたメーターリレーの故障、電源の水冷冷却機能（冷却設備は外気温による熱交換システムのため）が追い付かず過温状態により電源がダウンし放射光供給運転継続が出来なくなった。それぞれ 5 時間、3 時間の運転中段を余儀なくされた。故障原因の追究に時間を要し、判明したメーターリレーについては交換し運転を再開した。電源の冷却機能が追い付かない問題についてはスポットクーラーを導入し過温状態となった電源内トランスを局所的に冷却し、運転最終日まで凌いだ。本電源以外では、同電源室に配置される PF-AR ビーム輸送路 (AR-BT) 用、空冷型 4 極電磁石電源群の温度高による異常発報によりダウンし Top-Up 入射が滞ることも起きている（図 2-1 参照）。工業扇の設置やスポットファンの増設により対応し運転最終日までこちらも凌いでいる。近年の高温となりやすい夏場の気候で運転を

行うことの難しさを示している。

偏向電磁石用の冷却水フローズスイッチのインターロック誤発報も 2022 年度運転において頻度が多く認められたビームダンプ要因である。これによりその都度、放射光供給運転を 1 時間程度中断している。発報後すぐにリセットができること、冷却水が通水状態であることを確認した。そのため突発的な冷却水の一時的な目詰まりと判断していたが、頻発する事から、フローズスイッチの接点の経年劣化による発報も疑いフローズスイッチの交換による対応を進めた。しかしながら、夏の運転から秋の運転、冬の運転でも再発し、結果として誤発報であると理解されている。原因は AR トンネル内に設置する電磁石冷却水、温度のインターロックを集約し上位ネットワークコンピュータに配信する、製作より 40 年が経過するリレーボックスのリレースイッチの経年劣化による接点不良である。リレースイッチは正常動作に数万回の接点開閉が保証されているが接点表面の経年劣化が進行する。AR トンネル内に設置される 176 台の全電磁石の冷却水、温度のインターロックの健全性の確保が、安定した放射光の供給運転を目指すうえで重要な課題である。

(2-2) 電磁石・電源

PF-AR の電磁石電源は、偏向電磁石電源 1 台、4 極電磁石電源 29 台、6 極電磁石電源 2 台、補正電磁石電源 149 台である。35 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、多力年にわたる計画的な保守を進めており、2022 年度はその 5 カ年計画の 4 カ年目に該当する。

偏向電磁石電源はリング内に配置する偏向電磁石すべてを直列励磁している唯一の電源で、代替機がないため、保守を計画的に慎重に進めなければならない重要電磁石電源である。2021 年度末の春に大がかりな屋外トランスヤードに設置される 2 器の偏向電磁石電源用変圧器の絶縁油交換工事が行われた。これにより先 10 年程度の安定した運用の目的が立ち 2022 年度の運転に入った。絶縁油の交換後の夏の運転は電源に付随する問題はなく順調に運転を継続することが出来た。特に、先に報告しているが、6 月下旬より外気温の急激な上昇があり自然対流空冷式の変圧器にとっては過酷な環境下であったが、異常な絶縁油の温度上昇も見られていない。前年度の保守点検で、電源内部に設置される縦置き基板のリードコンデンサーバンクのリードコンデンサーを固縛するインシュロックが経年劣化により破断が進んでいることが判明し、スイッチング周波数で共振するコンデンサーの半田接続部の疲労破断が懸念された（図 2-2 参照）。そこで 2022 年度の保守点検では重点課題としておよそ 100 箇所のそれらを耐候性インシュロックで再固縛する作業を実施した。他の点検項目では異常は見つかっておらず、必要な電源出力電流の安定性も確保されており、健全な状態を維持できている。

他電磁石電源系統では、保守点検で大きな異常が見つかっておらず継続した運転へ不安な要素は多くはない。た



図 2-1 (左) 製作より 35 年が経過する老朽化電源の冷却応急処置。(右) AR-BT 電源群ラックの冷却応急措置。粉塵に弱い精密電源のため空冷ファン付きクリーンブース化している。冷却能力不足により応急処置を実施。

だし、2つの経年劣化による故障事象が発生している。いずれも、35年の運用を継続している4極電磁石電源群のうち直線部電磁石に接続されるQC電磁石電源で起きている。1つ目は、前年度も故障が起きている電流偏差異常によるQC4N電源の重故障の発生である。原因は、電磁石電源に設定電流値をデジタルアナログ変換し、出力電流値を指示するリファレンスアンプ基板を駆動する±15Vの電圧出力の制御電源の故障である。前年度、この制御電源の廃番指定に伴い、新規基板の製作にとりくみ予備基板を保有するようになっていたため、迅速な交換対応で復旧させている。前年度までの保守定期点検では故障予兆を把握すべき点検項目より外れていた末端基板となっていたが、2022年度より点検項目に組み込まれている。先の故障は、冬の保守点検前に起きた事象であるため、運悪くユーザー運転中断を余儀なくされている。以後は、予防保全にて対応できると判断している。2つ目は、運転項目でも述べた6月下旬の外気温上昇によるQC1N電源重故障と電源重異常である。メーターリレーが高温状態で接点不良を起こし故障し電源過電流状態を発報し続け電流出力ができなくなった。電源の冷却能力を超過する高温状態となりトランス過熱により重異常でこちらも電源運転の継続が出来なくなった。いずれもQC1Nと特定の電源で発生しているが、理由は、電源棟内に同様に設置されるSuperKEKBの電源群との配置にある。当該電源はSuperKEKB電磁石電源の排熱直下にあり、電源の吸気部分へ排熱が直接向かう配置となっていた。他同類のQC電源群も同列にあるものの排熱を直接受けることなくやや排熱の流路が確保されたためかろうじて重異常、重故障を免れた。対応方法がないため、今後の同時期の運転委は留意し、必要に応じて予防的にスポットクーラーの設置を進める必要がある。

もっとも運用電源台数が多い補正電磁石電源で前年度まで起きていた故障は、保守点検が一巡し全電源へ保守が入ったため、皆無となった。保守計画が功を奏している一例である。

電磁石系統では、前年度には、放射線劣化による電磁石冷却水配管用ゴムホースの破裂漏水、電磁石への電力を供給する水冷天井ブスバーの目詰まりによる温度高異常の結果、電源出力を停止する故障、天井ブスバーホース接続部の口金からの漏水故障など、経年劣化に起因する事象が多発していたが、2022年度を通じてそれらの事象は、あらかたの故障による劣化部の洗い出しと更新が進み発生していない。しばらくは、電磁石本体での異常はおさまり比較的安定した運転の継続が期待される。

電磁石の温度異常、冷却水低下異常を監視し加速器の正常運転をつかさどる電磁石インターロックシステムにおいて不具合が発生し今後の対応について善後策が必要な状況となっている。例年に比べ、偏向電磁石の冷却水低下異常による偏向電磁石電源の出力停止の頻度が多く、2022年度を通じて5回起きている。先に述べたように当初、実際の流量低下、流量監視のフロースイッチの故障が疑われ交換対応を進めたが、原因は、40年以上が経過する電磁石インターロックシステムのリレースwitchの接点不良にあった。リレースwitchには経年劣化の使用限度があるため全電磁石のインターロックに今後同様の故障が発生することが予想される。この点を見越し、電磁石インターロックシステムの新システムの構築が、2016年より開始されており、運転予算がないなか細々としたシステム更新の予算を確保し、2022年度によりやく試運用を開始される体制が整った(図2-3参照)。新システムは、旧システムと完全に並行して構築されており、全電磁石へのインターロックの計

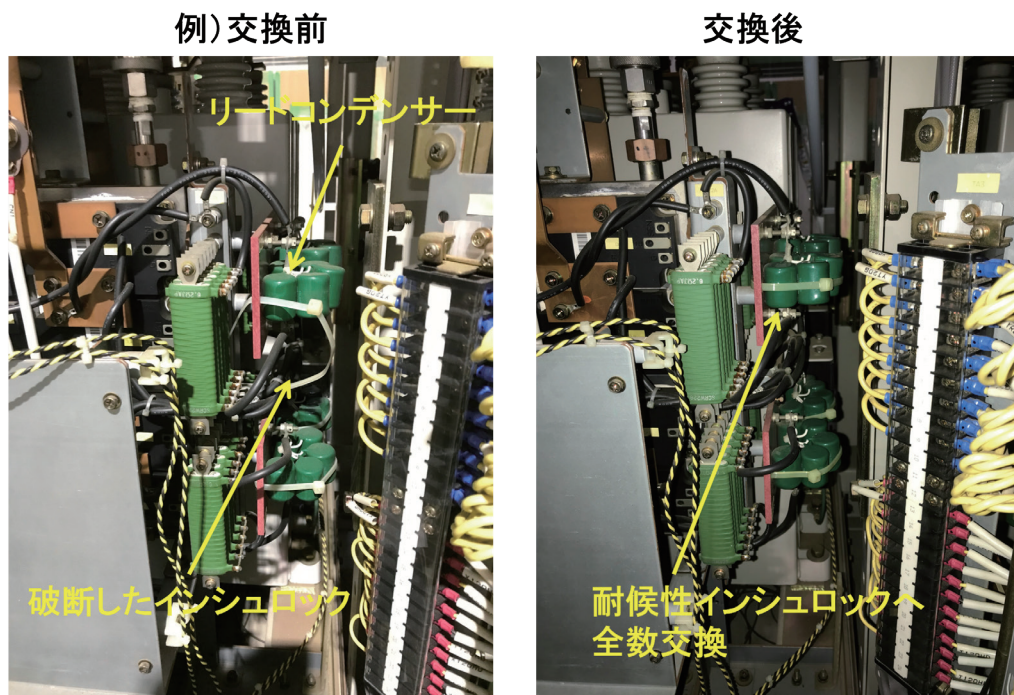


図2-2 リードコンデンサーバンクの経年劣化した固縛インシュロックの交換。

装ケーブルはトンネル内の新中継ボックスを介して完全に新設がされている。そのため、各電磁石の旧システム上の異常が生じた場合、試験的に、新システムへ移行できる仕組みとなっている。2021年度より、電磁石台数の少ない6極電磁石で旧システムと新システムを並行した運用を開始した。誤配線はもとより長期的な不具合が生じないことを確認しシステムの運用上の課題洗い出しを実施してきた。2022年度には、実流量は低下しておらずフローズスイッチの異常でもない場合には、新システムを活用し電源を停止できるところまで新システムの運用の幅を広げ、該当する偏向電磁石に関して試運用が開始されている。全電磁石の新システム移行は、放射光ユーザー運転への影響を考えるとリスクが大きいため、このように、不具合の生じたものから移行していく計画である。また、上位計算機システムへのPLCを経由した信号の集約の機構が、まだ手つかずとなっており、こちらの整備も徐々に進められていく予定である。なお、新システムへ移行した偏向電磁石で冷却水流量低下のインターロックの発報は起きていない。

(2-3) 入射電磁石・電源

2022年6月10日17:00にPF-ARでビームロスが発生した。この時キッカ電磁石電源の波形を確認すると3台あるキッカ電磁石のうちキッカ3(K3)の波が出力していないことが分かった。電源室に入室し調査をするとK3電源から異臭が確認された。これによりK3電源は重故障と判断し、電源をOFFし休止状態とした。PF-ARの運転を継続するために、K3電源の出力ケーブルをK2電源に取り付けて、K2電源でK3電磁石を駆動によるK1、K3電磁石2台入射を行いPF-ARの運転を継続した。運転停止後にK3電源を調査したところ、サイラトロンのヒーター用トランスが過熱のため損傷していることが分かった。そして、その原因はサイラترونCX1175 Cのヒーター部がショートしていたためにヒーター用トランスに過電流が生じたことが分かった。損傷していたトランス及び周辺ケーブルを交換するとともに、サイラترونも交換し復旧した。図2-4に過熱損傷したトランス(左)及び交換したサイラترونの実装状態(右)の写真を示す。

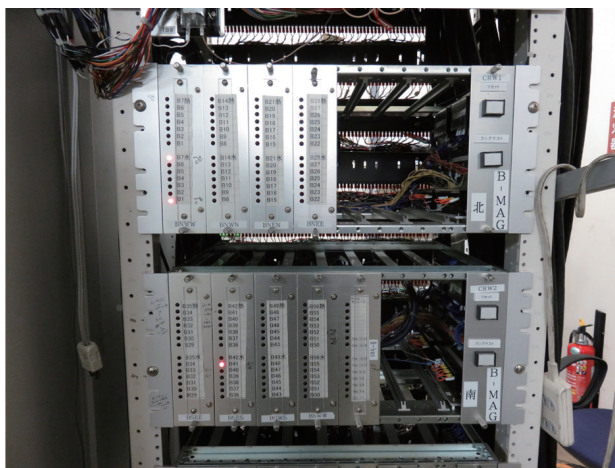
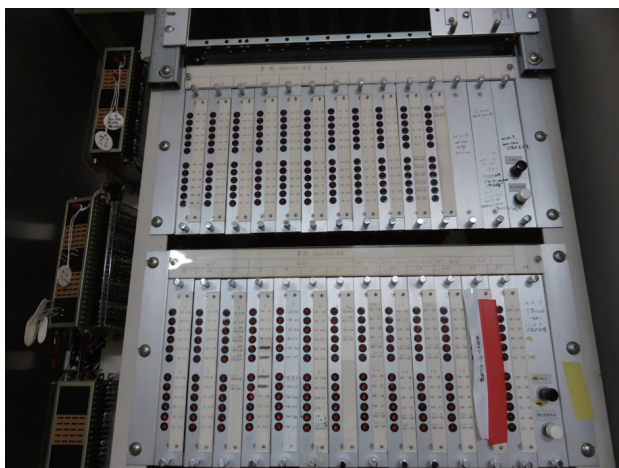


図 2-3 隣り合わせでラック設置されている新(右)旧(左)AR電磁石インターロック集約システム



図 2-4 過熱損傷したトランス(左)及び交換したサイラترونの実装状態(右)。

(2-4) マシンスタディ

2022 年度マシンスタディでは、II 期計画の AR 利用高度化のための各プロジェクトに対するビーム調整を重点的にスタディ時間の配分を行った。1 つ目は、AR 中間ローエミッタンス運転の 2023 年度からの実用化に向けたビーム調整、2 つ目は AR-TBL の 2022 年秋からの放射光供給運転との共立試運用に向けたビーム調整、3 つ目は、PF-AR の 5 GeV エネルギーでのオンデマンド Top-Up 入射を目指した輸送路改造後のビームコミッシュニング調整である。

PF-AR におけるローエミッタンス計画は、現状のオブティクスによる自然エミッタンス 296 nmrad を現行リングの電磁石配置で可能とされる理想的な 161 nmrad まで低減を目指すものである。このローエミッタンス計画は、AR 高度化改造により掲げられたテーマの AR シングルバンチ電流の 200 mA の大電流化と 150 nmrad 低エミッタンス化の一つでありその起点は 2001 年まで遡る。大電流化は現状老朽化した RF 空洞の HOM による発熱の問題があり実現が難しい状況である。低エミッタンス化については、フルエネルギー入射による Top-Up 運転の目途が立ちリングが温度的に安定化したことにより、具体化に向かう好機となっている。ローエミッタンスオブティクスを採用すると、老朽化した RF への放射光照射を防ぐ RF マスクがある状態で、容易にはビームを入射し蓄積することが出来ないことが早くに判明した。そこで、ローエミッタンス (161 nmrad) へのロードマップの中間点となる RF マスクを避けられる中間ローエミッタンス (236 nmrad) の実践をすすめることが 2022 年度の目標となっていた。光試供試験や機器損傷のない運転が可能であることなどの基礎的なスタディが 2021 年度に完了しており、2022 年度に AR-TBL 運用との中間ローエミッタンスオブティクスによるユーザー運転への共立が可能と判断することで、2023 年度夏の運転より導入が計画されている。

中間ローエミッタンスオブティクス試験では 3 つの成果が得られた。1 つ目は、6.5 GeV、5 GeV エネルギーモードのいずれでも 50 mA 蓄積電流値での Top-Up 運転の継続が可能になった。2 つ目は、挿入光源のギャップクローズによるチューンシフトをグローバルチューン補正で逐次補正することで挿入光源毎のどのようなギャップ開度の組み合わせでも放射光を安定して供給することが可能になった。最後の 3 つ目は、建設が完了しビームコミッシュニングを進める AR-TBL のプロジェクトとの共存について、中間ローエミッタンスオブティクスの状態でもワイヤーターゲットを挿入したまま Top-Up 運転の継続が可能になったことである。挿入光源毎に、ギャップ閉度が異なるだけでなく、その状態に応じたビームプロファイルに対してワイヤーを挿入していてもビーム寿命の安定性を確保することが出来た。このことは、放射光供給と AR-TBL への電子線供給が共立する最低限の条件となっている。AR の二次利用を推進しながら、AR の放射光高度化利用も推進できることを立証したことにつながる。2023 年度夏の運転より、中間ローエミッタンスオブティクスの運用が開始される予

定である。

AR-TBL の 2021 年度夏の建設後から開始されたビームコミッシュニング調整は、2022 年度に入っても継続され、希少なビーム調整時間を効率よく使い、確実にユーザー運転へ向けた条件出しの調整を行った。2022 年度の秋の 6.5 GeV エネルギーモードでの運転では、AR ローエミッタンス化計画における放射光試供試験のように、対外ユーザーへ電子ビーム試供試験が計画されており、それに向けた、使用するワイヤーターゲットの選択、長時間の安定性確認、高い再現性の確保、挿入光源のギャップの閉度に応じた調整や寿命急落時の放射光ユーザー運転継続のための応急処置プロシージャー確立の調整が進められた。この調整期間の間に、AR-TBL のシフト体制を含む運用形態や、運転員体制なども確立がなされた。マシンスタディの確保が難しいため、この調整期間中に得られた Top-Up 入射を伴った長時間安定性は、2 シフト程度を最大としたものであったが、問題なく運転することが出来たことから、2022 年度の秋の運転で、ユーザーへの試供を行うトライアルランが予定通り実施された。秋の運転では、20 日間、冬の運転において、22 日間の連続運転に成功している。その間、ワイヤーターゲットを挿入した状態で、ビーム不安定性、ビーム寿命の急落も引き起こされず、無事に放射光供給ユーザー運転との共立に成功した。共立運転期間中の平均ビーム寿命は、秋の期間でおよそ 450 分、冬の期間でおよそ 380 分であった。ワイヤーターゲットの位置はそれぞれの期間でビーム中心から 14.97 mm, 14.22 mm, AR-TBL ステージ側での照射用電子の収量はそれぞれの期間 800 カウント / 秒, 1000 カウント / 秒程度であった。ワイヤーターゲット挿入深度からビーム寿命と電子収量が外挿でき、再現性の高い運用が出来ていると判断できる。トライアルランの成功を受けて、次年度から、6.5 GeV エネルギーモードでのユーザー運転が開始される。5 GeV エネルギーモードでのユーザー運転については AR-BT 5 GeV エネルギー可変 Top-Up 対応のための Phase-1.5 の夏の改造の完了の後、秋の運転以降から予定されている。

AR の 5 GeV エネルギーモードでの運転は、2022 年度の夏の AR-BT 改造工事により AR が 5 GeV エネルギーでの運転状況下においても PF と AR のいずれでもオンデマンド入射が可能となった。改造工事の詳細については別項で報告するのでそちらを参照されたい。改造工事後、あいにく 5 GeV エネルギーモードでの運転は冬にはアレンジがなされなかったが、秋の運転期間においては 5 GeV エネルギーモードでの運転があり、ビームコミッシュニングとなるビーム調整が行われた。ここで特筆すべきことは、この調整で、PF と AR の合同マシンスタディとの特別な調整期間が 2 度設けられたことである。これは、AR-BT のエネルギー可変化のために、エネルギーが AR よりも低い PF-BT 側で改造工事が行われたためである。AR-BT で単一エネルギーのみの輸送しかできなかった理由は、AR 直接入射路の建設時にエネルギー可変の要求が放射光ユーザー側よりなかったためである。そのおかげで、一部の偏向

電磁石を PF-BT と共通化し、SuperKEKB の輸送路と混雑する狭い第3スイッチャードにて地盤の良好な場所に新たな輸送路のルートを選定することが可能になった。共通化した偏向電磁石は PF と AR の異なるエネルギーの電子ビームが通過するため、2.5 GeV と 6.5 GeV を定格として設計した輸送路は、5 GeV エネルギーの電子ビームに対して PF 側で軌道のふくらみをもたらすことになる。よって、PF-AR で必要とされるエネルギーのビームの輸送に合わせ、PF-BT 側でこの軌道のふくらみに相当する余剰角を吸収する新たな偏向電磁石の追加改造が必要である。ビーム調整では、AR-BT を 5 GeV の電子ビームを輸送する必要とともに、PF-BT で生じる軌道のふくらみを補正することが必要である。よって、PF-BT と AR-BT を同時にビーム調整する必要がある。そのため、初めての試みとして、PF/PF-AR 合同マシンスタディの調整時間が確保された。この 2 度の調整時間を通じて、PF-BT の改造で追加された電磁石に概ね設計値通りの余剰角補正值を入力し、AR-BT では振り分けマグネットから共通偏向電磁石までを、PF-BT の軌道ふくらみをやや抑制する 5 GeV エネルギーよりもやや高いエネルギー設定とした。その結果、安定して PF、AR のいずれにも Top-Up 入射が可能となることを実証した。2 度の調整と調整の間では 1 週間程度あ

ているが、高い再現性で 1 度目の設定値がそのまま通用する。また、輸送路の電子損失はこの改造で変化なく、改造前と同等の 0.34 nC の輸送が可能となっている（図 2-5）。2 シフト以上の長時間連続運転で入射効率が変化することなく安定性についても確保された。PF と AR の 2.5 GeV、6.5 GeV エネルギーモードでの Top-Up 入射時の入射効率と同等の入射効率を得た。このビームコミッショニングの成果を受け、2023 年度の夏の運転より 5 GeV エネルギーモードでの Top-Up 入射が運用される予定である。

(2-5) 測定器開発テストビームライン (AR-TBL)

PF-AR では、GeV オーダーの素粒子物理実験用測定器開発のためのテストビームライン (AR-TBL: PF-AR Test Beam Line) のユーザー利用を目指すビームコミッショニングを、素核研測と協同で進めている [2-1]。PF-AR では放射光実験運転時間が 2016 年以前に比較し半減していることから、PF-AR の放射光以外の 2 次利用の計画は放射光実験との共存が図られれば、PF-AR の利用価値が高まり運転の継続性の確保につながると放射光利用側からも期待がされている。AR-TBL が設置された場所は PF-AR で唯一残っていたビームライン新設可能スペースである南実験エリアである（図 2-6）。

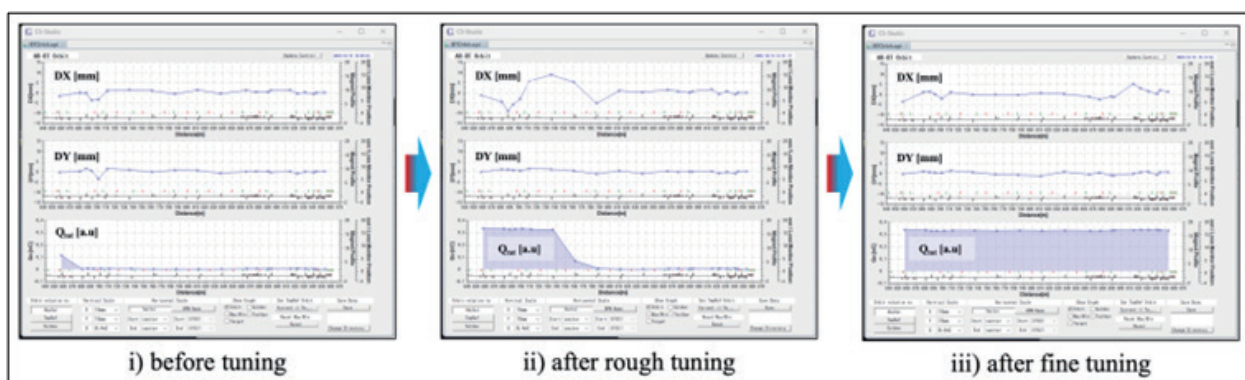


図 2-5 PF 及び PF-AR の合同マシンスタディで実施された Top-Up ビーム輸送調整の結果。左図より右図へ向かい調整が進むことでビーム輸送を改造前の Top-Up 状況と遜色ない水準で実施できている。

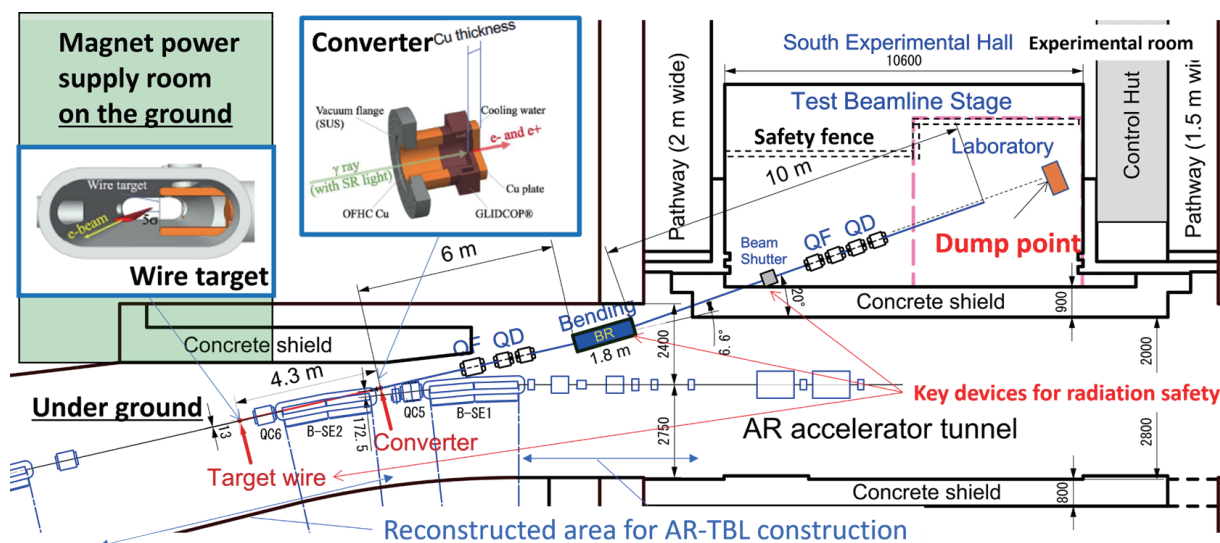


図 2-6 AR-TBL 全体像俯瞰図

GeV オーダーの電子ビーム照射試験を行うための電子ビームは、放射光源である蓄積電子ビームハローとワイヤーターゲット（WT）との衝突により生成されるガンマ線を銅コンバータで電子陽電子対生成して得られる。単純な TBL の電磁石光学系輸送路とエネルギー選別の偏向電磁石により単色電子ビームが得られる。ビーム中心から 5.4σ の位置（6.5 GeV エネルギーでは 14.0 mm, 5 GeV エネルギーではエミッタンスが小さくなるため 10.8 mm となる）に WT を置くと、 10^9 個 / 秒の電子ビームが衝突し、蓄積電子ビームエネルギー（5 GeV）をカットオフとするエネルギー広がり光子の発生が得られる。最終的に得られる照射用電子収量は 2.0 GeV/c の運動量をもつもので 6000 個 / 秒が期待される。詳細については、PF 年報 2021 を参考にされたい。

2020 年度の予算化を皮切りに大きく計画が進み、2021 年度夏に計画通り建設が完了した。2021 年度秋に WT の放射光を使った焼き出しを開始し、その後、実ビームを使った焼き出し試験に移行した。WT 挿入深度を慎重に探りながらビーム寿命と WT 挿入深度との相関が予想であることを確認し、冬にビームコミッショニングを開始させた。照射用電子収量が概ね期待値通り得られ、原理実証が確認されたことが、2021 年度までのプロジェクトの進捗結果である。

2021 年度でのビームコミッショニングでは、原理実証に主眼が置かれ、2022 年度には、いよいよ放射光供給運用との共立運転に向けた課題洗い出しのビームコミッショニングが開始された。2022 年度に掲げられた課題は次の通りである。1 つ目は、それまでの蓄積モードで行われてきた WT の挿入試験を Top-Up 入射モードでも長時間安定して成立させることである。2 つ目は、Top-Up 入射状態で、出来る限り長時間、WT の挿入状態を維持し WT の耐久性を確認することである。3 つ目は、挿入光源のギャップ可変状態で WT の挿入深度を維持し、ビーム寿命への影響を判断することである。これらの課題洗い出しは、2021 年度のビームコミッショニングでビーム不安定性が確認された、5 GeV エネルギーモードの運転期間では実施が避けられた。これらの課題の洗い出し確認は、2022 年度夏の運転までに実施されることとし、2022 年度の秋の運転、冬の運転での 6.5 GeV エネルギーモードでの運転期間においては、AR-TBL にユーザーをつけたユーザーへの照射用電子ビーム試供試験の開始が計画された。ユーザー試供試験では、その間 WT は放射光供給のユーザー運転と共立して挿入された状態を維持する。ただし、試供試験であるため、WT の破損や、ビームの不安定性の誘起が認められた場合には WT を引き抜き、問題の解決がなされるまで WT の挿入を再開しない取り決めとされた。試供試験といえども照射用電子ビームは供給され続けるため、ユーザーサイドに有効利用されることが望ましい。ただし、不測の事態にはユーザー利用を中断してもらうよう AR-TBL ユーザーにとっては気の毒な運用であったが、AR-TBL と放射光供給の共立運転が確立するまでは放射光ユーザー運転を優先するよう話し合われた。

先するよう話し合われた。

1 つ目の課題に対し、6.5 GeV エネルギーモードの運転で WT を挿入したまま Top-Up 入射で蓄積電流値を維持することに成功した。Top-Up 入射では、まず、Top-Up 入射時の蓄積ビームの水平振動で WT の蓄積ビームに対する位置が、その振動が減衰する 2.5 ms の間まで浅くなったり逆に深くなったりし想定以上の電子ビームの WT との衝突や不安定性を誘起する可能性があることに留意しなければならない。次に、WT への電子ビームの衝突は蓄積ビームだけでなく、入射ビームも衝突し、必要以上の WT への熱負荷が生じることに留意する必要がある。この課題を確認するために、まずは、入射ビームがない状態で、Top-Up 入射を模擬する、入射キッカの空打ちによって長時間安定性に問題がないことが確認された。次に、実際に入射ビームを伴う Top-Up 入射が実践され、結果、ビーム不安定性が誘起されることなく、また、異常な WT の発熱も生じることが確認された。ただし、Top-Up 入射のたびに蓄積ビームの水平振動が生じていることで、AR-TBL ステージ側の照射用電子ビームの収量が、定常状態にくらべスパイク上に 1.5~2 倍の跳ね上がることが確認されている。今後、安定した照射用電子ビームの供給のために Top-Up 入射時蓄積ビーム水平振動の抑制スキームの確立が急がれる。これら試験は短時間の間だけ、50 mA の蓄積電流値にて、2 種の WT に実施されている。

2 つ目の課題では、2 種類用意された、上流側に設置された WT の CNT ヤーン（CNT）と下流側に設置されたグラファイトシート（GFS）のそれぞれで Top-Up 入射を伴う長時間挿入試験を行った。GFS では、何ら長時間の耐久性に問題が生じなかったが、CNT においては、激しい発光現象のもと WT の溶断にいたった。CNT に張力を与えるために備えていたスプリングが変形し伸び切って、またスプリングと接続部付近で CNT ヤーンが切断していた。スプリングは高温になって変形、破損したと考えられた。放電やビーム由来の高周波に誘起された電流によって温度

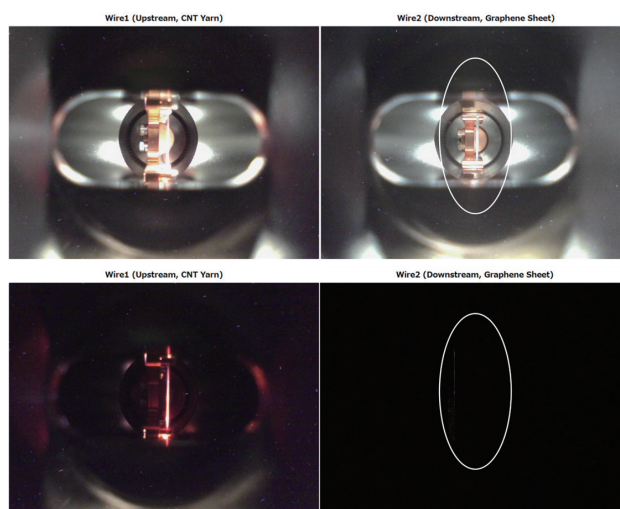


図 2-7 左列 WT の CNT、右列 WT の GFS となっており、蓄積電子ビームの衝突中の発熱状態に歴然とした差が生じていることがわかる。

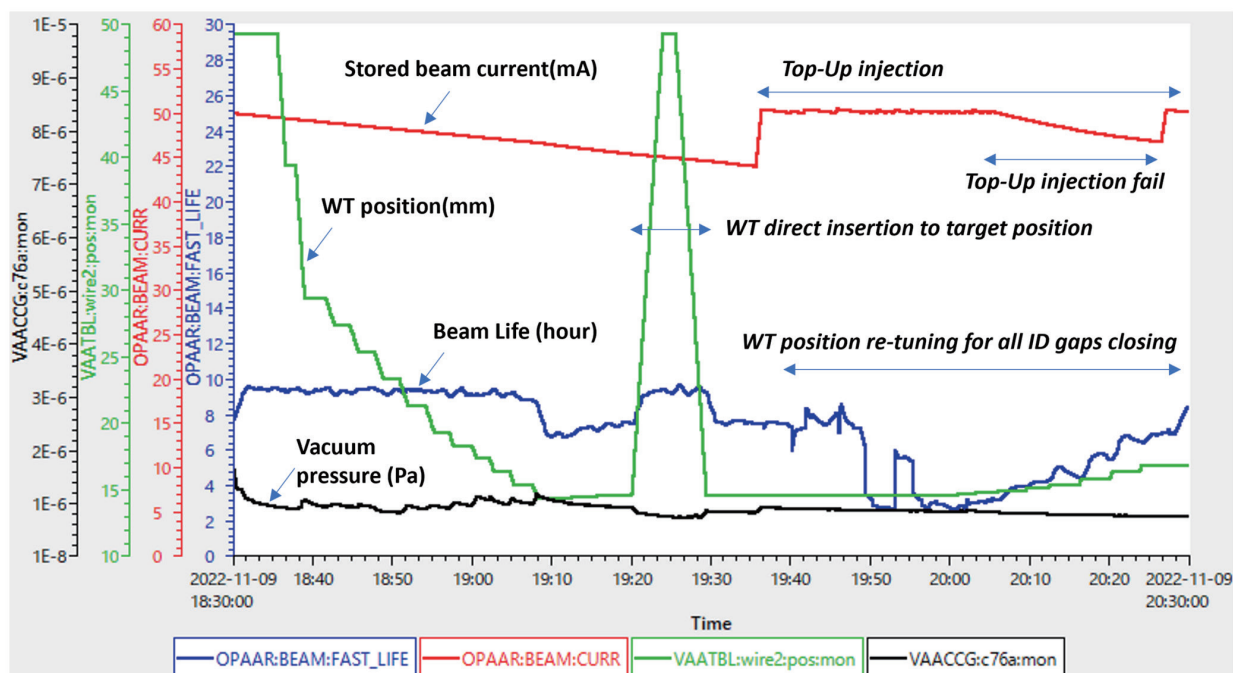


図 2-8 トライアルラン実施時のビーム調整の履歴。WT 位置調整と近傍真空、ビーム寿命、蓄積ビーム電流値の変化。途中、ID ギャップ閉止状態の組み合わせで Top-Up 入射が滞る事態が生じている（20:05 頃）。

が上昇したものと推測される。図 2-7 に WT が蓄積電子ビームと衝突している状態のリアルタイムに監視していたカメラ画像を示す。このことから、熱伝導率がもともと GFS より低かった CNT は今後の運用において WT として適材でないと判断された。夏の加速器停止期間中に GFS に交換、統一された。WT の一つに不測の事態が生じたとしても 2 本目の WT を導入することで、AR-TBL 電子ビーム供給試験は継続可能な体制としている。

3 つ目の課題は、WT 挿入状態に伴う放射光供給運転で挿入光源ギャップの閉度と蓄積電子ビーム寿命への影響調査である。挿入光源 (ID) ギャップの全てをフルオープンにした状態で、Top-Up 入射モードで WT を既定の電子ビーム寿命まで挿入し、ID のギャップを 1 台ずつ、ユーザー運転中の最小ギャップまで実際に閉じさせた。その結果、全 ID のうちもっとも狭小ギャップとなる NW14-1 において、10 mm の閉度で急激にビーム寿命が急落することが判明した。最小ギャップ 8 mm とした場合には、蓄積電流値を維持することは不可能であるため、最小ギャップの状態であらためて WT の挿入深度を最適化する方法をとった。AR では挿入光源ギャップの閉度によるチューン変調が生じることは把握されており、それによる結果としてのビームサイズの変化であるのか、挿入光源ギャップの閉度に応じた直接的なビームサイズの変化によるものなのか AR における精密なビームサイズ監視モニタが充足されていないため判断は難しい。いずれにしても、挿入光源ギャップの閉度により、ビームサイズが膨らみ、WT の蓄積電子ビームとの衝突位置が変化することで、ビーム寿命が短くなっていると判断されている。これに対して、挿入光源のギャップの閉度に応じて、WT の位置を再最適化することで対応する事、またビーム寿命が回復されることが



図 2-9 秋のトライアルランでの AR-TBL 上への実験セットアップの様子。

運転スキームとして確立されたことで、運用の懸案とはされてはいない。

以上の課題確認の全てが完了し、秋、冬の加速器運転の 6.5 GeV エネルギーモードでの AR-TBL 電子ビーム試供試験を実施した。いわゆるトライアルランである。図 2-8 に実施の際の加速器側電子ビーム調整の一例を示す。図 2-8 で示されるような加速器側の調整が完了してから、放射光供給のユーザー運転との共立運転が開始された。秋、冬の 6.5 GeV エネルギーモードでの運転は、それぞれ、24 日間、19 日間あった。その間 WT を引き抜き退避させ試供試験を中断させるような事態なく、連続して無事に 2 回のトライアルランを成功させた。図 2-9 にトライアルラン時のユーザーによる実験セットアップ風景を示す。

2023 年度は 6.5 GeV エネルギーモードでのユーザー運転がいよいよ開始される。また、5 GeV エネルギーモードでのユーザー運転は秋の運転より開始される計画である。

つまり AR-BT の 5 GeV エネルギー可変 Top-Up 入射の裕度を向上させる Phase1.5 改造工事の完了をまって開始することになる。ビーム寿命が短くなる AR-TBL の運用で、確実に Top-Up 運転を成功させることを重視した予定となっている。

(2-6) PF-AR エネルギー可変 Top-Up 運転実現のための輸送路改造

PF-AR でのフルエネルギー Top-Up の運用は、Linac からリングへの直接入射路が完成した 2017 年から開始された。この直接入射路はビームエネルギー 6.5 GeV の単一エネルギービームの輸送にのみ最適化されていたため、2019 年度に節電措置として開始した 5 GeV エネルギーモードでの運転では、「疑似」的な Top-Up 運転をおこなってきた。疑似 Top-Up 運転 [2-2] はあくまでも定期的な入射時間内

において Top-Up 入射が実現されるものであるため、PF または PF-AR のいずれかの加速器がビームを占有する期間においては蓄積モードでの運用をせざるをえない。また PF のビーム寿命の短いハイブリッド運転の裏での PF-AR の運転は本来の Top-Up 運転が可能な 6.5 GeV エネルギーモード運転が固定されるなどスケジュール上の柔軟性が不足していた。さらに PF-AR でのビーム寿命が低下する AR-TBL プロジェクトの共存運用では、運転エネルギーがいくらであっても Top-Up 入射は成立必要条件となっており、本来の Top-Up 入射、「本」Top-Up 運転が希求された。2019 年より「本」Top-Up 運転へ向けた改造計画の立案する作業部会が発足し、2022 年度夏に、予算化され改造工事が実施された。改造場所は、Linac 第 3 スwitchyard にある PF-BT 及び AR-BT の輸送路が複雑に交叉する部分である (図 2-10)。

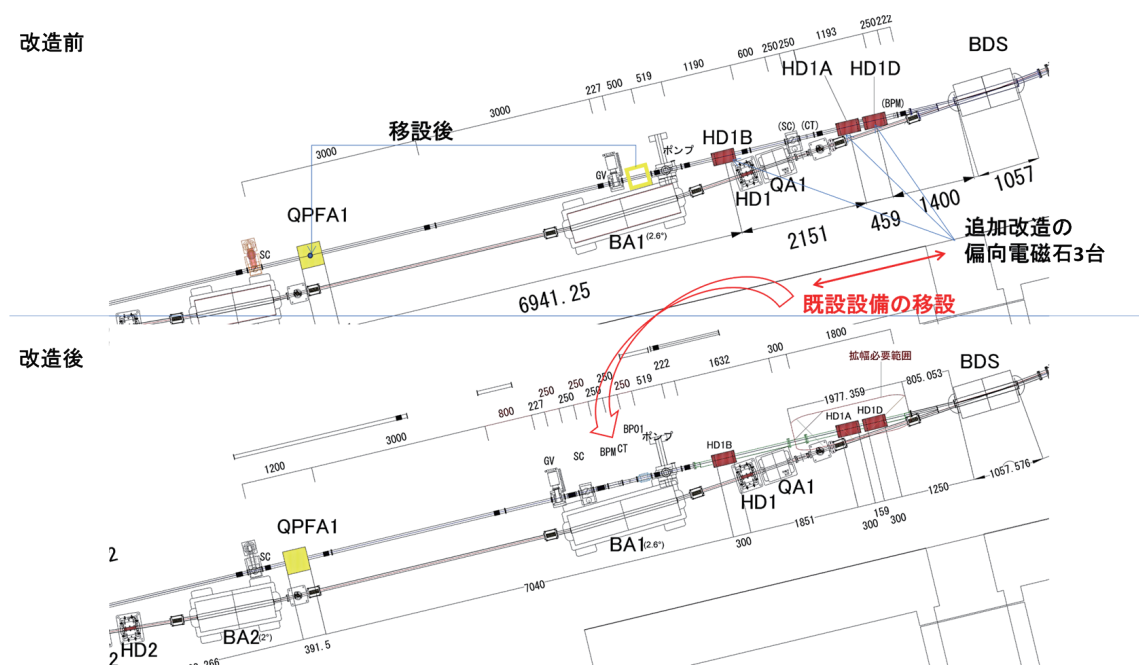


図 2-10 Linac 第 3 スwitchyard 機器再配置と余剰角補正偏向電磁石の追加。

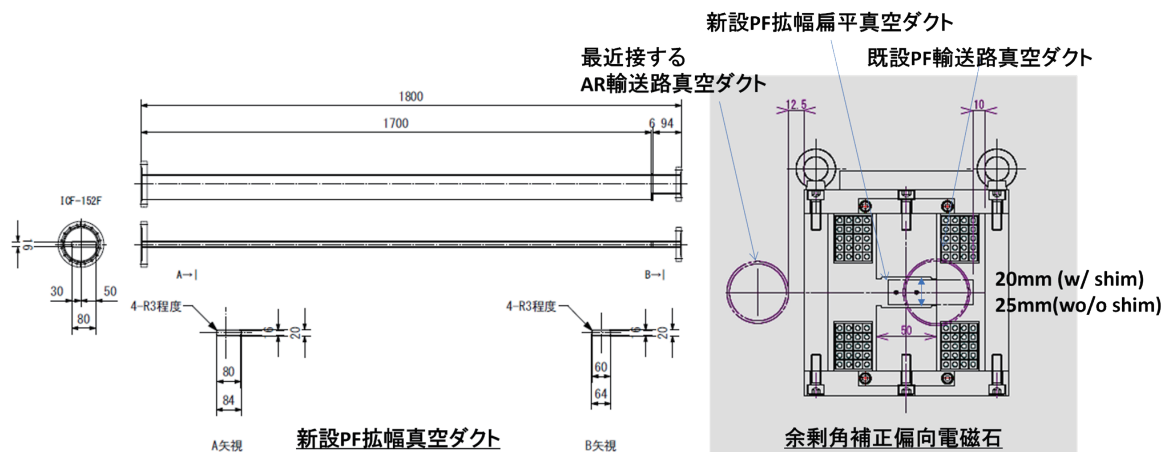


図 2-11 拡幅真空ダクトの設計と余剰角補正偏向電磁石の設計。

改造案は、ビームエネルギーの低い余剰角を補正しやすい PF ビーム輸送路に 3 台の補正偏向電磁石を導入するものである [2-3]。いずれの輸送路にも共通に利用されている 6.5 GeV エネルギーで規格化されている電磁石は PF-AR の 5 GeV ビームエネルギーを輸送する結果、PF ビーム輸送路では十分な偏向角を得ることが出来なくなり余剰角が生じる。PF 輸送ビームの軌道は、BPFS を境にした輸送路下流で大きく膨らむことになる。PF-AR のエネルギー可変輸送の対応に向けた改造であるのに、PF リング用輸送路の改造となるためやや複雑である。改造後の運転調整でも PF と PF-AR の輸送路いずれにおいても、同時に Top-Up を実現するための余剰角補正量を最小限に抑える輸送光学系の調整が行われる。

2021 年に本改造計画の具体化へ向けた予算化が進み、2022 年度夏の長期加速器停止期間での改造工事に向けた改造工事の工程の検討、機器配置設計、機器の設計、製作、調達が進められた。改造による機器配置を図 2-10 に示す。BPFS 下流より真空ダクトをビーム軌道のふくらみを吸収するために拡幅をするため拡幅ダクトに入れ替えられる。そのダクトは PF-AR ビームダクトとの干渉を避けて小型であるにもかかわらず強い余剰角補正用の偏向角を生むために狭小ギャップで偏向電磁石を製作するため扁平に製作された (図 2-11)。そのダクト拡幅範囲の BPFS 直下流より 3 台の偏向電磁石 (HD1D, HD1A, HD1B) を置くため、既設の機器はすべてが撤去、下流側へ移設された。2021 年度内に、水冷偏向電磁石、電磁石電源、電源格納ラック、電磁石付帯設備 (冷却配管、ケーブル、電力盤)、真空ダクト群、電磁石架台、機器移設用架台群の調達を行ったものは、2022 年度夏の工事で設置が完了した。

完成した余剰角補正偏向電磁石は、近接する AR-BT 真空ダクトと干渉せずに、かつ、磁石の漏洩磁場が AR ビームの軌道に影響をおよぼさないように、薄肉のリターンヨークを持つ窓枠型を採用している。薄肉化することで磁場の飽和などを留意する必要があるが、200 A の定格電流に対する励磁まで無飽和で励磁可能な設計としており、磁場

測定の結果、磁石中心で 136.4 A の運転想定電流で必要磁場として 0.272 mT を得た。これは、シミュレーション期待値に対して誤差の範囲で合致している。誤差は 0.01% 以下となっており、製作誤差はこれに準ずるものとなっている。また、磁石中心での磁場の長手方向積分となる BL 積では、136.4 A の運転想定電流で、10.7 mrad の補正角を得ることが出来、これは要求値 10 mrad に対して 10% 弱の裕度のあるものとなっている。ちなみに実磁極長 300 mm に対して、有効磁極は 330 mm となっている。電源定格は 250 A のものを採用し、電磁石の冷却能力から、200A の通電が可能であることから、余剰角補正量は十分な裕度があって補正することが可能である。選定された電源の電流出力安定度は 100 ppm でこちらも磁場の要求精度 (ビーム軌道制御の制御安定度からくる) である要求値 10^{-4} の水準を満たしている。図 2-12 に磁場測定の様子と磁場測定結果の一例を示す。全電磁石の磁場性能が均一であることを確認し、加速器トンネル内にインストールされている。

2022 年 7 月、PF 運転終了の翌週、Linac 加速器停止直後より現場の既設機器及び機器架台、真空ダクトの撤去の工事が開始された。現場は Linac 導波管や機器冷却設備、そして先の機器群が複雑に入り組んで設置され混雑している。PF-BT 及び AR-BT が最近接していることから作業スペースは限られ、撤去作業は機器の破損がないように慎重に進められた。並行して、作業干渉のない、Linac のクライストロンギャラリー (加速器トンネル上階部) には余剰角補正電磁石の電源及び電源制御システムが 19 インチラック 1 棟で集約されるものが新設、整備された。加速器トンネル内は機器群の撤去が済んだところへ、新設電磁石架台、移設機器架台のケガキ測量が行われ、余剰角補正電磁石が設置された。電磁石は粗アライメントが実施され、電磁石を半割して、拡幅扁平真空ダクトの受け入れ態勢が整った。移設機器の設置も済んだ後で、いよいよダクトの設置作業が開始され、真空締結されたのは、工事開始からおよそ 1 か月後の 8 月中旬である。真空締結が済めば、粗排気を開始することが可能で、10 月の PF の秋の運転開始に

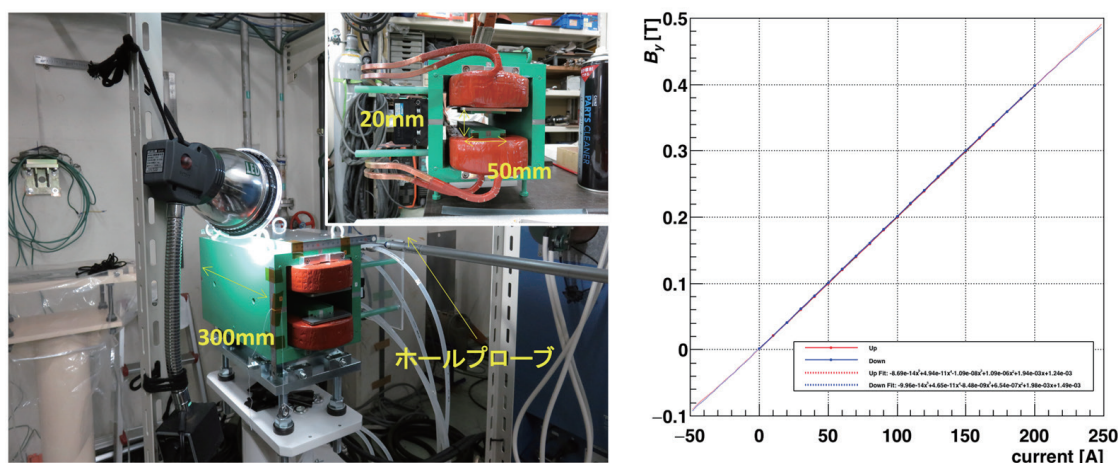


図 2-12 (左) 磁場測定の様子。(右) 磁石中心での励磁曲線の 1 例。5 次関数にてフィッティングした結果を重ね書きしている。

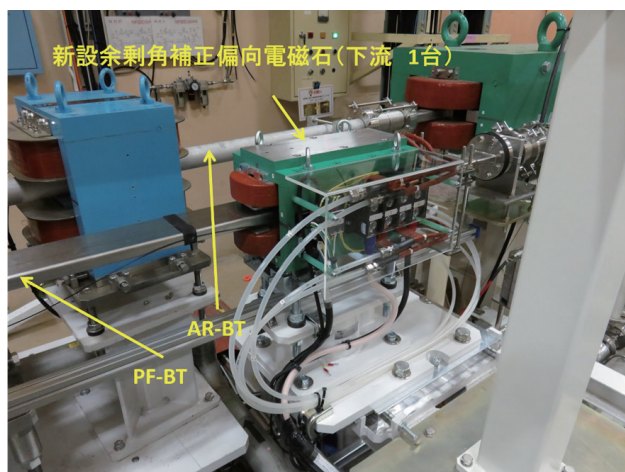
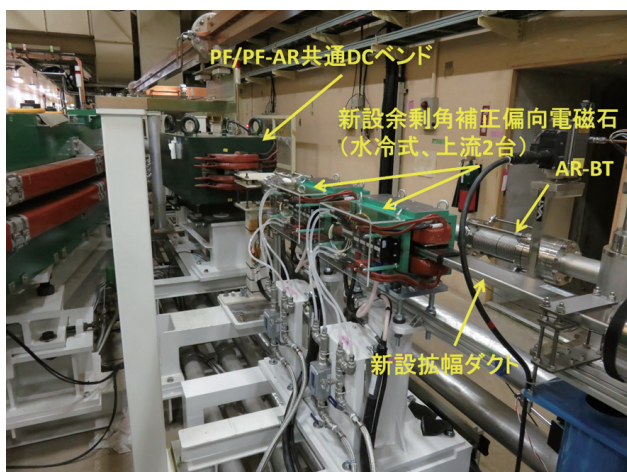


図 2-13 増設された偏向電磁石 3 台のうち上流側 2 台の写真。さらに上流に余剰角を生じる PF, PF-AR 共通 DC ベンドが見える。最近接する AR-BT 真空ダクトも隣に見える。

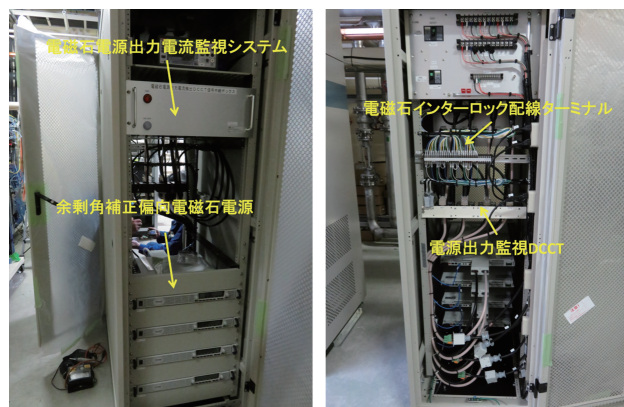


図 2-14 新設された余剰角補正電磁石電源及び電源制御システム。

向けて十分に早くに真空の立ち上げが開始された。真空ダクトが電磁石内にインストールされたので、電磁石の半割の復旧が行われた。移設機器類の制御、給電ケーブル類の延伸、接続作業もその後に行われた。加速器トンネル内の作業がひと段落したところで、いよいよ電磁石の付帯設備の整備が開始された。クライストロンギャラリーに設置の電源と電磁石を結ぶ出力ケーブル、水冷電磁石の冷却水流量、温度を監視するインターロックケーブル、電磁石への冷却水配管の敷設である。これらは、8 月の下旬から 9 月の上旬にかけて作業され完了している。9 月上旬に仕上げとなる、測量と、余剰角補正電磁石の精密アライメントが完了し、PF-AR エネルギー可変 Top-Up 入射のための改造工事が竣工した。拡幅扁平真空ダクトが現在、秋の運転へ向けて改造工事を実施している（図 2-13 に新設された電磁石を示す）。図 2-14 にクライストロンギャラリーに設置された偏向電磁石電源システムを示す。秋からの運転で運転調整を確立するビームコミッショニングが順調にすすめられたことは、AR 運転の項（2-1 章）で報告した。2023 年度夏の加速器運転より、PF-AR おける 5 GeV 本 Top-Up 運転の運用が開始される。

また、現状の余剰角補正の裕度を上げるための追加の余剰角補正電磁石が共通パルスベンドの下流すぐに、同型のものを、1 台あたりに 2023 年度夏の加速器停止期間に追加される Phase1.5 計画が予定されている。2022 年度の工事を Phase1.0 とし、今回工事を分離している理由は、拡幅扁平ダクトを導入することで垂直方向に狭小アパーチャーとなる輸送路上の箇所が、複数箇所となることを避けたためである。ビーム輸送がアパーチャーの条件で滞ることになると重大なリスクであるためリスクを分散するため、Phase1.0 のビーム輸送の成功を受けて、Phase1.5 工事に取り掛かる計画となっている。

(2-7) 高周波加速 (RF) システム

PF-AR の高周波加速 (RF) システムは、年度を通じて概ね順調に稼働した。第一期の運転では、6 月 26 日から 7 月 1 日までの期間にビームダンプが頻発したが、外気温が約 36℃まで上昇し、冷却水温度が上昇した影響と考えられる。夏の停止期間中には、例年行っているクライストロン保守、高圧電源保守点検、チューナー駆動系点検、低電力高周波制御系の点検を行った。高圧電源の保守の際に、3 相 6.6 kV 用受電盤で用いている真空遮断器 (VCB) を前年度に調達した新品と交換した。また冬にはクライストロン冷却系の保守を行った。

PF-AR では、クライストロンで発生した大電力の高周波（周波数 508.57 MHz；電力約 520 kW（AR 東棟）および約 280 kW（AR 西棟））を導波管コンポーネントで構成された立体回路を用いて分配し、トンネル内の加速空洞まで伝送している。大電力立体回路の概要を図 2-15 に示す。この立体回路系は 1980 年代半ばに構築されたもので、導波管フランジや送風口等の設計が古く老朽化も著しい。このため、導波管の老朽化対策を進めている。2022 年度には、年次予算と機構長裁量経費の配分により、RF 分配用のマジック T 周辺の H ベンド、直導波管、ベローズをまず更新し、続いて東西の電源室からトンネルに通じるピット内の導波管のベローズ等を更新した。交換された古い導波管

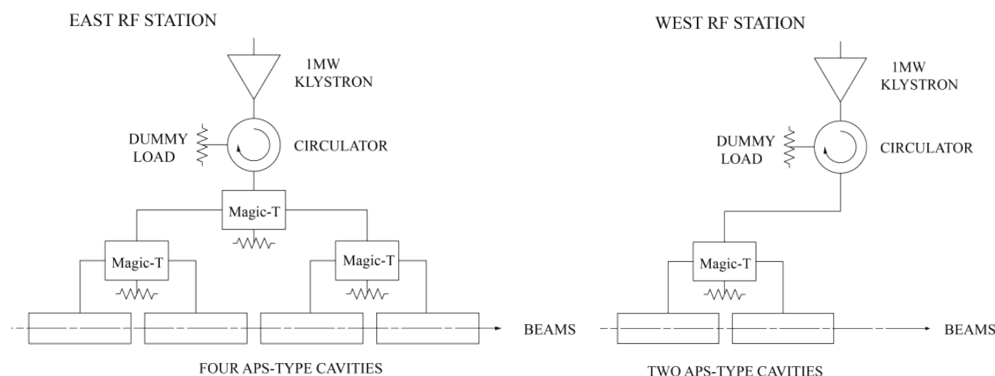


図 2-15 大電力高周波を分配・伝送するための立体回路系（左：PF-AR 東棟，右：PF-AR 西棟）



図 2-16（左）交換したピット内の古い導波管箇所。（右）交換した導波管の不具合箇所の例。放電痕のようなものが見られた。

の不具合箇所の例を図 2-16 に示す。立体回路系には、まだ老朽化した箇所が残っており、引き続き老朽化対策を進める予定である。

PF-AR の加速空洞には、高次モード（HOM）電力を引き出すための HOM カップラーを合計 70 個用いている。この HOM カップラーはビーム電流が高い時に発熱するため、冷却ファンを設置する対策を進めている。2022 年度には、PF-AR 東直線部の HOM カップラー 17 箇所に小型ファンを設置した。また、HOM 引き出し用ケーブル全体を空冷する大型扇風機を合計 6 台設置した。引き続き、残りの HOM カップラー（24 か所）にファン設置を進め、ビーム電流の増強を目指す。

クライストロンのコレクターで発生する温度約 100℃ の水蒸気を冷却するためのエアフィン・クーラー（AFC；図 2-17）は毎年冬の停止期間に点検・保守を行っている。2022 年度の点検で、PF-AR 東棟の AFC のバンドル管（水蒸気を通す集合管）から漏水の不具合が見つかった。また、AFC 2 台ともに、送風するための筐体部分（風袋部）の鉄板の腐食が進行している。これらについては修理を検討中で、その為の予算を要望している。また、西棟 AFC のファンモーター 2 台のうち 1 台について、回転時の振動が認められたため、2023 年度初めに交換修理を行う予定である。



図 2-17 クライストロンで発生した水蒸気を冷却するためのエアフィン・クーラー。

PF-AR 東棟のクライストロン用直流高圧電源では、出力電圧を切り替える際に使用するタップ切り替えが遠隔制御できないという不具合が 2023 年 2 月に発生した。2022 年度第三期の運転は手動切り替えで対応し、修理を 2023 年度初めに行う予定である。細かいトラブルでは、PF-AR 東棟のクライストロン・コレクター冷却系下部から少量の水漏れが発生したため、該当箇所の配管を交換する修理を行った。

(2-8) 真空システム

2022 年度は、前年度に建設された PF-AR 測定器開発テストビームラインのビームコミッショニングを継続した。テストビームライン用のガンマ線発生源となるワイヤーターゲットとして、炭素組成の物質を探索し、直径 0.1 mm のカーボンナノチューブ撚糸（CNT ヤーン）と厚さ 0.04 mm、幅 1 mm のグラファイトシートの 2 種類を採用した。いずれの材質も製造過程で樹脂や油脂は一切使用されておらず純粋な炭素から成り、発熱や電子照射によって加速器真空に有害なガス放出がないことも採用の理由であった。

2021 年度中のビーム試験で、最大蓄積電流値 50 mA にてワイヤーターゲットを蓄積リングのビーム軌道に近づけたとき、CNT ヤーンではターゲットワイヤー自体や支持金具の周

辺で発光が観測され、短時間のうちにワイヤーの破断が発生した。2022 年度夏季の運転休止期間中に真空外に取り出して観察したところ、図 2-18 の中で黄色い丸で囲んだ部分、ワイヤーに張力を与えるためにつけたバネが変形損傷し、CNT ヤーンもバネとの接合部分で切断していた。蓄積ビーム軌道に近づけたときに放射光照射を受ける CNT ヤーンの中心部は、熱解析シミュレーションによって局所的に 300℃程度まで温度が上がると予測されていたが、間接的に水冷されている支持金具や周辺部の温度上昇は想定していなかった。実際にはバネ部分が高温になって変形したと思われ、発熱の原因として CNT ヤーンからの放電電流や蓄積電子ビームの高周波に誘起された電流などが考えられる。破断が発生する前には CNT ヤーンの中心部以外も含めワイヤー全体に発光がみられており、ターゲットワイヤー部も全体的に高温になったと推定された。

一方でグラファイトシートを 1 mm 幅で切り出したターゲットの方は、最大蓄積電流 50 mA で所定の位置まで電子ビームに近づけても、CNT ヤーンのような発光や放電は見られなかった。グラファイトシートは面内方向の熱伝

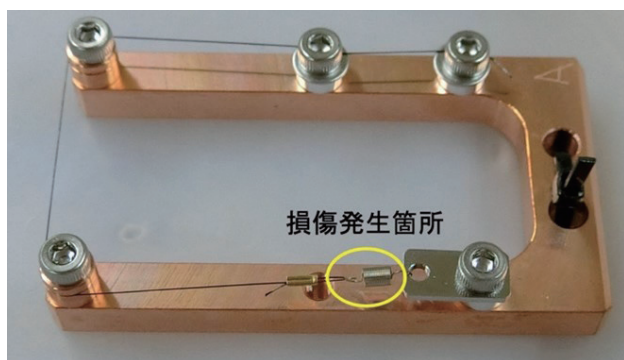


図 2-18 CNT ヤーンの保持金具。張力を与えるバネが損傷し、バネとの接合部で CNT ヤーンが切断した。

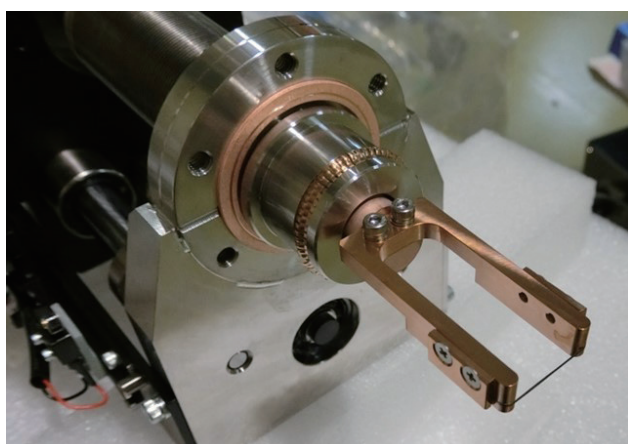


図 2-19 直線移動機構に取り付けたグラファイトシート製ワイヤーターゲットと保持金具。ビーム試験では発光や放電の兆候は見られず、蓄積電子ビームのハローのターゲットとして安定して機能している。

導に優れ放射光照射部の温度上昇が小さいことも有利に働いたと思われる。ワイヤーターゲットに衝突して γ 線を生ずる電子の数、すなわちリングの蓄積寿命低下のコントロールが、ワイヤー挿入位置を精密に制御することによって再現性良く行えることが確認された。蓄積寿命が長時間にわたって安定していることも実証され、またターゲットワイヤー挿入中も支障なく Top-Up 入射が可能であることも示された。テストビームラインの実験エリアにおいて十分に実用となる電子ビームの収量が観測され、収量のエネルギー依存性もテストビームラインの電子輸送シミュレーションの結果をよく再現するプロットが得られた。図 2-19 に直線移動機構に取り付けたグラファイトシート製ターゲットワイヤーおよびその保持金具の写真を示す。グラファイトシートのターゲットを用いたテストビームラインの試験運用も 2022 年度中に始まっており、2023 年度からはテストビームラインのユーザー利用が本格的に開始される計画である。

(2-9) ビーム診断システム

ビーム診断に関しては、第 2 期のユーザー運転中にバンチ純化タイミングのふらつきが発生し、その影響でバンチ純度の悪化や放射光の強度変動が観測された。調査を実施するも原因の解明には至らなかったため、各ビームラインで強度変動が観測される度に純化タイミングを微調整することで運転を継続したが、第 3 期運転以降この現象は見られなくなった。その他には大きなトラブルはなく、年間を通じて安定に運用できた。加速器制御システムの稼働状況も良好であった。

PF-AR のビーム輸送路 (AR-BT) に設置しているスクリーンモニターでは、PF-BT に先行して GigE カメラを採用しているが、入射ビームのエネルギーが高いこともあり放射線による画質の劣化が問題となっている。特に Linac のビームダンプや SuperKEKB の BT と共存する第 3 スイッチヤード内のカメラは劣化の進みが速いため、カメラの周囲を鉛のシートやブロックで囲うことで外部からの放射線を遮蔽している。2022 年度は上述したガフクロミックフィルムによるビームロスモニターを劣化の激しいカメラ周辺に設置し、放射線の空間分布測定を行った。その結果を基に鉛ブロックを配置することで、より効果的な放射線遮蔽が可能になった。また、AR-BT に常設しているシンチレータと光電子増倍管を用いたビームロスモニターでは、今後の設置コスト削減に向けてロス信号の波形取得方法の再検討も進めている。

各種マシンスタディへの協力も行った。南直線部に新設されたテストビームライン (AR-TBL) の調整では、ビームロスの測定や直流ビーム電流トランス (DCCT) を用いたビーム寿命の精密測定等で貢献している。蓄積ビームのエミッタンス低減を目的としたマシンスタディでは、Turn-by-Turn のビーム位置モニターによる入射振動測定や結像光学系によるビームプロファイル測定、ストリークカメラによるバンチ用測定等を実施した。

(2-10) 挿入光源システム

2022 年度の PF-AR における挿入光源関連のトラブルは NE#01 で 1 件発生したのみであり概ね順調に運転できた。トラブルの原因は補正電磁石電源の故障であり、予備品への交換で復旧した。PF-AR の挿入光源も 1990 年から 2006 年の間に建設されたものであり機器の老朽化問題は PF よりも深刻である。老朽化対策は今後も重要な課題として検討を進める予定である。

(2-11) PF-AR 運転のまとめ

表 2-1 と図 2-20 に PF-AR の運転統計を示す。2022 年度のユーザー運転時間は 2,418 時間となり、前年度とほぼ同程度の運転時間を維持できた。しかし、PF リングのユーザー運転時間の水準にはほど遠い状況にあることは変わらない。

故障時間は約 22 時間、故障率も 0.9% で前年度にくらべると少し悪化している。これは第 1 期には例年以上の急

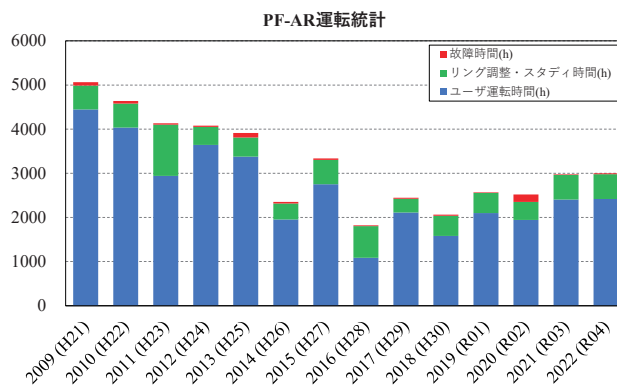


図 2-20 PF-AR 運転統計グラフ

表 2-1 PF-AR 運転統計

年度	リング 運転時間 (h)	リング 調整・ スタディ 時間 (h)	ユーザ 運転 時間 (h)	故障 時間 (h)	平均故障 間隔 (MTBF) (h)
2009 (H21)	5,063.0	542.5	4,445.7	74.8	107.1
2010 (H22)	4,638.5	542.5	4,037.5	58.5	54.5
2011 (H23)	4,131.5	1,162.0	2,941.5	28.0	59.3
2012 (H24)	4,080.0	408.0	3,643.2	28.8	111.3
2013 (H25)	3,912.0	434.0	3,378.4	99.6	74.0
2014 (H26)	2,352.0	360.0	1,955.0	37.0	90.5
2015 (H27)	3,336.0	552.0	2,753.0	31.0	154.7
2016 (H28)	1,821.0	717.0	1,085.7	18.3	84.9
2017 (H28)	2,448.0	312.0	2,111.3	24.7	38.8
2018 (H30)	2,064.0	456.0	1,581.6	26.4	64.3
2019 (R01)	2,568.0	456.0	2,099.7	12.3	264.0
2020 (R02)	2,520.0	408.0	1,943.9	168.1	150.9
2021 (R03)	2,976.0	560.0	2,404.7	11.3	241.6
2022 (R04)	3,000.0	560.0	2,418.3	21.7	143.5

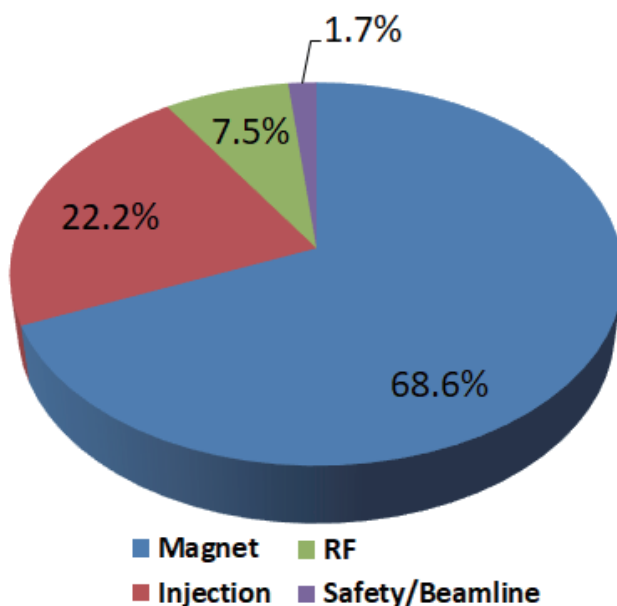


図 2-21 2022 年度 PF-AR 故障時間の内訳

激な外気温の上昇により電源内冷却機能が追い付かなくなったため電源内部温度が上昇しインターロック発報したことによるビームダンプが多発したこと、入射キッカー電源の故障があったことに由来している。平均故障間隔 (MTBF) は約 144 時間で故障回数は例年度同じ程度であった。図 2-21 に示すように、故障の内訳は約 70% が電磁石関連、22% がビーム入射関連、7.5% が RF 関連であった。

参考文献

- [2-1] 満田史織, 他, 第 19 回日本加速器学会年会要旨集, 2022 年, pp. 320-324.
- [2-2] 長橋進也, 他, 第 17 回日本加速器学会年会要旨集 2020 年, p651-655.
- [2-3] 東直, 他, 第 19 回日本加速器学会年会要旨集, 2022 年, pp. 579-582.

(3) コンパクト ERL の運転・維持および開発

(3-1) ビーム運転およびビーム力学の検討

2021 年 10 月の周回部と入射部の 1:5 のエネルギー比でのバーストモード運転でのエネルギー回収の成功を受けて、2022 年 2 月の運転では CW ビームでのエネルギー回収を試みた。最終的に 0.3 mA での CW ビームのエネルギー回収に成功しており、アンジュレタ用の狭い真空ダクトがある状態でも 1 mA の CW モード運転が可能であることが判った。これらの詳細は 2022 年度の加速器学会において報告している [3-1~3-4]。

2022 年度において cERL は運転を行わず、電子銃、レーザー、電磁石などの機器整備や冷凍機システムの保安検査のみが行われた。次期の運転は 2023 年 10 月に予定されているが、放射線の定期検査のため、CW で電流 1 mA での運転が必要であり、現状の FEL モードでそれを可能にするための最適化を行っている。放射線の検査の後には、いよいよ CW モードでの FEL 発振実験や、照射実験なども再開される予定となっている。ここでは、現状のハードウェアに合わせた、cERL のビーム力学的な最適化について述べる。

cERL においてビーム力学的に最も重要なパラメータは、電子銃の電圧、入射部と周回部のエネルギー、バンチ電荷である。電子銃については、500 kV を目指して修理が行われ、2022 年秋から 2023 年春にかけてのコンディショニング、電子銃単独運転の結果、最終的に 450 kV で運転することに決まった。QE (カソードの量子効率) の測定も行われ、60 pC のバンチ電荷を目指してレーザーの調整中である。また、CW 運転のためのレーザーインターロックや入射部の電磁石配置もアップデートされた。具体的には、入射部において磁場を歪めていた 2 台の BPM と、その歪み補正用の 8 極コイルが取り除かれ、新たに 2 極のステアリングコイルが設置、入射部全体の再精密据え付けが行われた。

次の運転に向けて、次のような運転モードを想定してシミュレーションを行っている。

1 CW モード、平均電流 1 mA 運転

バンチ電荷は低く、最大 0.77 pC、電子銃レーザーはスタッキングなし (小パワー) でバンチ長は 3 ps、バンチ圧縮なしである。バースト運転時のバンチトレイン長は 1、レーザーは 1.3 GHz 繰り返しのものを利用する。入射部と周回部のエネルギー比は 1:6 で、入射部出口のビームエネルギーは 2.9 ~ 3.0 MeV である。これらのパラメータでは、既にビームテストを行った実績があり、周回部周回後、合流部上流のスクリーンモニター (cam30) までのビーム輸送まで成功している。次期運転では、最初に、主空洞をデチューンし、入射エネルギーのままでビームをダンプまで直接輸送し、ダンプシケインの調整から始める予定である。

2 テラヘルツ実験用運転

バンチ圧縮を行い、ビーム繰り返しは 1.3 GHz と想定されている。繰り返し 1.3 GHz なら、低電荷でも問題ない。

バーストモードの場合のバンチトレイン長は 1 μ s、バーストのビーム繰り返しは 5 Hz である。次期運転では、CW 運転時に同時並行で実験が行われる予定である。必要期間はおおよそ 2 週間と思われる。

3 FEL 実験用運転

今までの cERL における FEL 実験では、エネルギー回収を行ってこなかったが、次期からの運転では、エネルギー回収を試す予定である。入射エネルギーは 3.5 MeV、入射部からビームを再調整して、ビームロス対策を行った後、FEL 発振のために大電荷、短パルスに最適化する。電子銃はレーザースタッキングありで、電荷 60 pC、バンチ長 40 ps、バースト時のパルストレイン長 0.1 μ s となる。FEL 用にバンチ圧縮を行うためには、81 MHz 繰り返しのレーザーが理想だが、現状のハードウェアにおいて電荷量を一定に保ちながら繰り返しを上げるためにはモジュール交換が必要との指摘もあり、詳細は現在検討中となっている。

それぞれの運転モードに対して、最適なビームパラメータを決定し、実際に運転を行うための加速器のモデリングを行った。

次期運転に備え、これら 3 つの運転モードを確立する為に、引き続きシミュレーションを行っている。シミュレーション及び想定されるビーム調整について概略を述べる。

CW 運転に対しては、前記の通り、電子銃電圧 450 kV、入射エネルギー 3.0 MeV で入射部の最適化を行った後、周回部からダンプまでを含めた start to end (S2E) シミュレーションへと進む。入射部のシミュレーション手法の詳細は [3-1] を参照。エネルギー比は 1:6 なので、合流や取り出し部の調整は比較的容易であると思われる。

FEL 実験用の運転に対しては、入射エネルギーについて、3.5 MeV と 3.0 MeV の 2 通りについて検討を行っている。それぞれに対して入射部を最適化、その後、バンチ圧縮、FEL 発振を含めた S2E シミュレーションを行い、周回部出口でのビーム性能によってどちらを選択するか判断することになっている。

ビーム運転の結果をシミュレーションで再現する計算も行っており、例えば、cERL で実際に観測された、3 山のビームプロファイルをシミュレーションで再現し、原因を調べるスタディを行っている。他にも、運転時のオプティクスマッチングの再現、何が効果的に作用するかの調整ノブ探し、主空洞のオフセンターをビームが通過したときの影響、コヒーレント放射 (CSR) の影響などのシミュレーションを行っている。

実際のビーム調整において、FEL 用の高電荷のビームマッチング [3-2] には、いくつかの手法がある。以前より利用しているものとして、組み合わせノブの検討、Matlab や elegant の運転中の活用、ビームパラメータを 4 極電磁石を使って測定する Q scan 応答計算などの準備を行った。今後は Ocelot の利用、機械学習の活用 [3-5] などへと進む予定である。

ビーム運転時の調整の指標として、ビームロスモニターを利用しているが、それを最大限に活用するために、モニ

タ数の増加、場所の移動などについてもシミュレーション結果を用いて判断している。また、実際の運転中のビームロス抑制の為に、次期運転では機械学習も実際に利用される予定である。

(3-2) 電磁石・電源と付帯設備

電磁石電源では 2021 年度の運転で故障した 3 台の両極性電源について、メーカーに送り修理を行った（厳密には LiAM 本体 1 台、AC/DC ボード 1 枚、power ボード 2 枚）。

2022 年度に電磁石電源用の空調管理ハットを追加設置したが、電源ラック自体は全体の 10 % がハット外に置かれたままであった。今期はこの残りの 10 % 分をハット内へ移設した（図 3-1）。これにより電磁石電源全てが空調管理されたハット内で管理できるようになり、高湿度・粉塵などの影響による電源の故障発生が抑制されると期待される。

2022 年度、電子銃改造のためにその直下流に位置する入射部の解体が行われた。この作業により発生しうるアライメントエラーの把握のため、前後して入射部の測量を実施した。図 3-2 に高さ方向のグラフを、表 3-1 に水平方向のソレノイド位置の前後差について示す。高さ方向につい

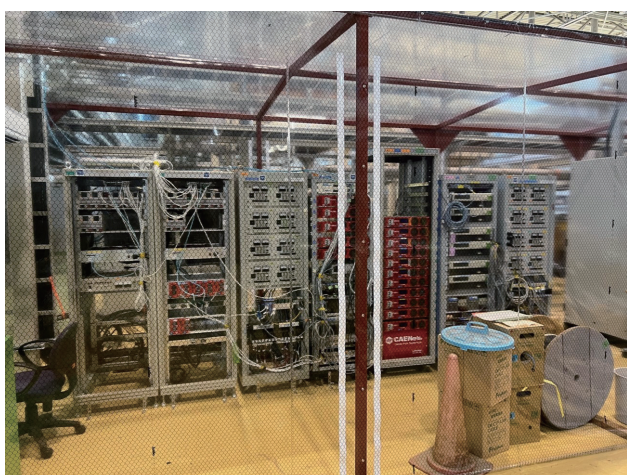


図 3-1 空調管理ハットに移設した電磁石電源。

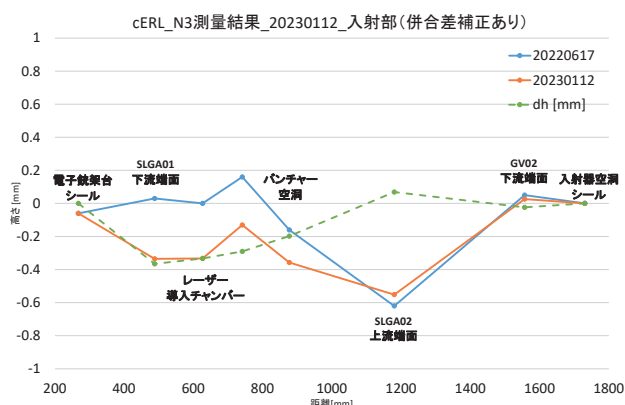


図 3-2 入射部高さ測量の結果。入射器空洞の高さを基準とする。

表 3-1 入射部解体前後での水平方向位置の比較。ds がビーム進行方向（上流側が+）、dr が断面方向（外側が+）。

電磁石名	dr[mm]	ds[mm]	dz(N3)[mm]	dz(LT)[mm]
SLGA01	-1.190	-1.067	-0.34	+0.118
SLGA02	-0.864	-0.259	+0.08	+0.108

ては ± 0.4 mm 以内で再現できており、またこれ以上アライメントを進めることは難しい。水平方向に関しては全体として周回部に 1 mm 程度寄るような結果となった。ソレノイドには調整機構が付いているので、今後必要であればアライメントが可能である。

(3-3) パルプへの電子線照射

2022 年の 2 月、3 月にわたって 2 回のビーム実験を行い、NEDO の競争的資金 [3-6] による効率的ナノセルロース製造に関連した木材への電子線照射実験を実施し、電子ビーム照射によるセルロースナノファイバー生成の効率向上のメカニズムを明らかにすることができた [3-7]。

(3-4) アスファルト照射実験

電子線照射による改質効率を高めるために、アスファルトを高温で溶融したまま電子線を照射する実験を計画・実行した。そのため、電子線照射によって温度が上昇し過ぎないように空冷のための送風システムを製作し、温度測定のための熱電対システムも準備した。照射は 2023 年 2 月に NHV コーポレーション（株）にて行い、アスファルトを溶融状態にするヒーターシステムに用意した空冷システムと温度測定システムを組み込んだ後、4 種類のアスファルト試料に 1 MGy の電子線を照射することができた。東亜道路工業（株）にて照射アスファルトの解析・評価を行う予定である。また、2021 年度に関西電子ビーム（株）にて電子線照射したアスファルト試料に対して PF にて X 線小角散乱実験を行った。解析の結果、劣化アスファルトのマルテン成分について照射の有無で顕著な相違があり、2023 年度の土木学会において成果を発表することになった。

(3-5) EUV-FEL の設計研究

日本において将来の先端半導体の量産を目指す会社ラピダス（株）と先端半導体量産技術の研究開発拠点である LSTC（Leading-edge Semiconductor Technology Center）が設立された。KEK は LSTC の参加機関の 1 つになっており、将来のリソグラフィー用大出力 EUV 光源として ERL を用いた EUV-FEL 光源の産業化が期待される。国内研究会では 2022 年 7 月の NGL（Next-Generation Lithography）ワークショップ 2022 と 2023 年 1 月の EUV-FEL Workshop 2023 にて、国際会議等では 10 月の国際ワークショップ ERL2022 と Source Workshop 2022 及び 11 月の MNC（International Microprocesses Nanotechnology Conference）2022 にて、半導体リソグラフィー用 EUV-FEL 光源（cERL を使った EUV-FEL 概念実証実験を含む）の招待講演を行

った。特に、MNC2022 の発表は Progress Review 論文としてまとめられ、Japanese Journal of Applied Physics (JJAP) に掲載された [3-8]。また、2021 年度末に投稿した EUV-FEL 光源に関する論文も Journal of Micro/Nanopatterning, Materials, and Metrology (JM3) に掲載された [3-9]。

(3-6) ビーム診断システム

2022 年度はビーム運転がなかった代わりにいくつかの大きな保守作業が行われた。ビーム診断関連の作業としては、2021 年 2 月から 3 月にかけてのビーム運転中にインターロックシステムの不備により損傷したスクリーンモニター (SCM#08) の調査・修理を行った。eERL の周回部で使用しているスクリーンモニターは、基本的に 2 段式のスクリーンホルダを備えており、片方に Ce:YAG シンチレータ、もう片方に OTR ターゲットが取り付けられている。今回誤って大電流ビームが照射されたことにより破損したのは前者の Ce:YAG シンチレータで、カメラ画像でもシンチレータの半面が割れて三日月状の穴が開いていることが観測されていた。実際にスクリーンホルダを大気中に取り出して調査したところ、シンチレータの背後に取り付けてあったステンレスミラーもビームが通過した部分が局所的に変形しており、鏡面光沢も失われていたため、破損したシンチレータと合わせて予備品と交換した。図 3-3 に交換前のシンチレータとミラーの写真を示す。飛散したシンチレータの破片は直上流の BPM ダクトと直下のイオンポンプ内から見つかり、ホルダに残っていた破片と合わせるとほぼ 100% 回収できていることが分かった。この交換作業に合わせ、今回同じく破損していることが判明した OTR ターゲットの交換も行った。破損した原因や時期は不明であるが、大部分の破片はやはり直下のイオンポンプ内から見つかっており、このポンプが絶縁不良で使えなくなった時期から推測すると、恐らく周回部建設直後に行ったベーキング時の熱応力が原因で破損したものと思われる。破損した OTR ターゲットは、試験的に中央に直径 5 mm の穴を開けた Ce:YAG シンチレータとステンレスミラーに交換した。この穴にビームを通すことでビームのコアを取り巻く希薄なハロー成分のみを分離して観測できると期待している。

この修繕作業に引き続き近年問題となっていた電子銃大口径フランジからの真空リークに対処するため、電子銃および入射部の解体・復旧作業が行われた。これに対応して、ビーム診断に関しても BPM 用同軸ケーブルやスクリーンモニター用光学系等の一時撤去・復元作業を行った。入射部に設置されていた 2 台の BPM (BPM#01, #02) は、それらのフィードスルーが加速前の低エネルギービームに悪影響を与えている可能性があったため、今回の作業に合わせて撤去し、それぞれダミー管と交換した。

また、電子銃の直下流にあるスクリーンモニター (SCM#01) では、従来のビューポートとカメラの間に電子銃のカソードを観測するための専用カメラを新設した。このスクリーンモニターはシンチレータの他に金属製のミラーを挿入できる構造になっており、カソード交換の際には

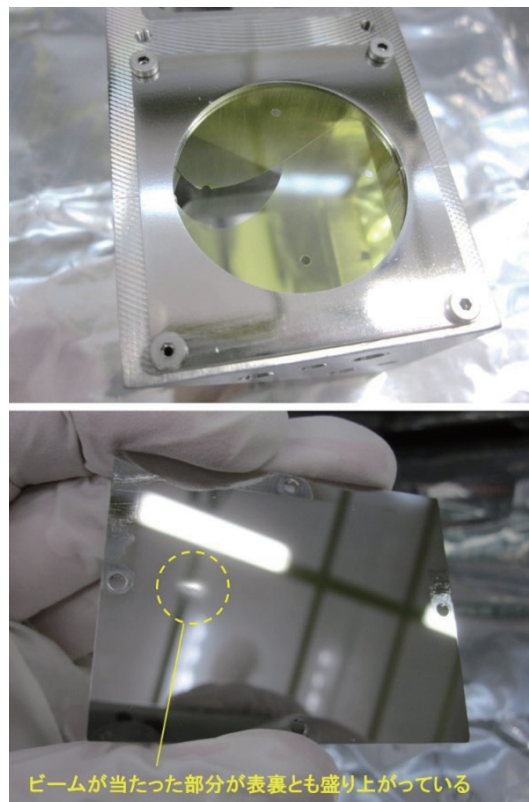


図 3-3 大電流ビームの誤照射を受けて破損した Ce:YAG シンチレータ (上) と局所的に変形したステンレスミラー (下) の写真。

そのミラーを介してカソードを正面から観測しながら作業が行われる。このときのカメラにはシンチレータ観測用のカメラを流用してきたが、シンチレータとカソードではカメラからの距離が大きく異なるため、その都度焦点距離の異なるレンズに交換して光軸も再調整する必要があった。この手間を解消するため、従来のビューポートからシンチレータ観測用カメラまでの光路に 45° 傾けた平面ミラーを設置し、合わせて新設した別のカメラでカソードを覗けるようにした。平面ミラーは位置再現性の高いフリップマウント上に取り付けられており、容易にシンチレータ観測用の光路から取り除くことができる。このシステムの新設により、今後は平面ミラーの出し入れだけで随時カソードを観測することが可能となった。

参考文献

- [3-1] 田中織雅, 他, 第 19 回日本加速器学会年会要旨集, 2022 年, pp.877-880.
- [3-2] 島田美穂, 他, 第 19 回日本加速器学会年会要旨集, 2022 年, FRP056.
- [3-3] 加藤龍好, 他, 第 19 回日本加速器学会年会要旨集, 2022 年, TWP010.
- [3-4] 谷川貴紀, 他, 第 19 回日本加速器学会年会要旨集, 2022 年, THP023.
- [3-5] 神尾彬, 他, 第 19 回日本加速器学会年会要旨集, 2022 年, TUP051.

- [3-6] NEDO 先導研究プログラム／エネルギー・環境新技術先導研究プログラム「高効率ナノセルロース製造のための革新的量子ビーム技術開発」
- [3-7] 森川祐, 他, 第 19 回日本加速器学会年会要旨集, 2022 年, TUP027.
- [3-8] N. Nakamura, *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **62** (2023) SG0809.
- [3-9] H. Kawata, *et al.*, J. Micro/Nanopattern. Mater. Metrol. **21** (2022) 021210.

(4) 次期光源計画へ向けた R&D

(4-1) 新型主加速空洞の開発

光源リングの加速空洞（主空洞）では、加速に用いる電磁場の共振モード（加速モード）を励振してビームを加速する。空洞内には、加速モードの他に寄生モードと呼ばれる電磁場の共振モードが多数存在するが、それらは蓄積ビームの不安定性を引き起こす。したがって、光源リングの加速空洞では、高い加速電圧を発生すると同時に有害な寄生モードの共振を減衰させ、ビーム不安定性を避けることが重要である。

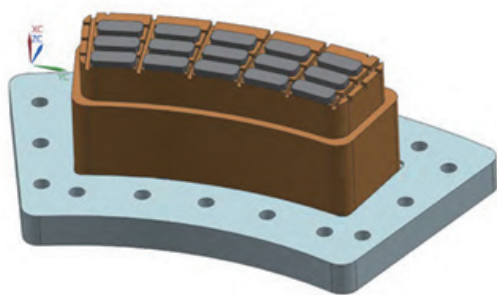


図 4-1 設計された寄生モード減衰モジュールの 3 次元モデル

光源第 2 グループでは、PF 高度化計画と次期光源計画で使用する為の新型加速空洞の設計検討を 2020 年度から進めている。検討中の加速空洞は、SPRING-8-II 用に開発された TM020 型空洞 [4-1, 4-2] のアイディアに基づいているが、PF 高度化計画や次期光源計画で最大限の性能を発揮するように、様々な改良を加え新たにデザインしたものである。2022 年度には、前年度に引き続いて、放射光実験施設から光源 R&D 経費の配分を受け、寄生モード減衰モジュールの設計検討を行った。設計された減衰モジュールを図 4-1 に示す。電波吸収体であるフェライトのブロックを銅ブロックに接合し、銅ブロックを水冷することでフェライトで発生する熱を取り去る。銅ブロックにはフランジを付け、金属性のシール材（U タイツシール）を用いて真空シールを行う。フェライトと銅ブロックとの接合、非円形形状の U タイツシールを用いた真空シール、銅ブロックと空洞側との電気接触方法などが重要な要素技術である。本設計検討により、減衰モジュールの具体的な設計がほぼ固まった。引き続き、非円形 U タイツシールを用いた真空シール試験に進む予定である。

(4-2) TM020 型高調波空洞の開発

極低エミッタンス（極小サイズ）のビームを蓄積する次期光源リングでは、蓄積された電子の集団（バンチ）の中で電子同士が衝突する効果（Intrabeam Scattering）が顕著になる。その結果、ビームの寿命が短縮したり、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は、電子のバンチを進行方向に伸ばすことが有望である。電子のバンチを伸ばすため、高調波空洞という装置が必要となる。高調波空洞とは、加速用高周波の整数倍（例えば 3 倍）

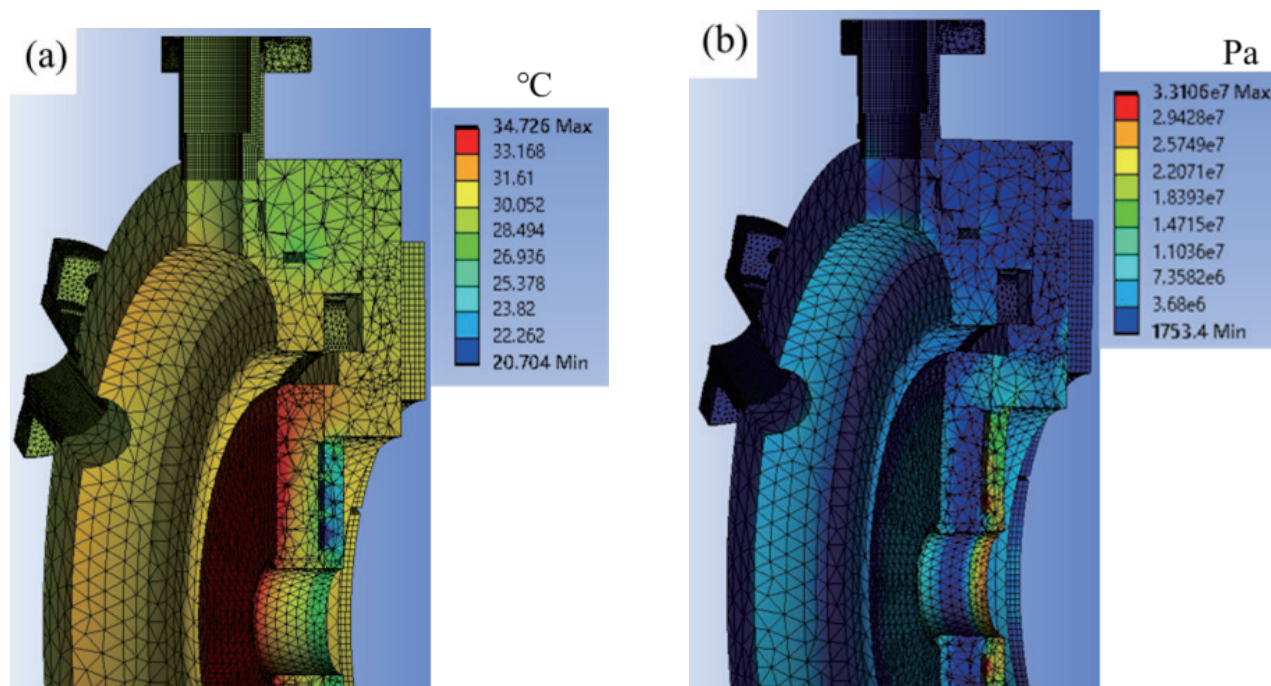


図 4-2 高調波空洞の熱構造解析（左図）および応力解析（右図）の例

の高周波電圧を発生できる空洞である。光源第2グループでは、次期光源リングに最適な高調波空洞として1.5GHz-TM020 空洞の開発研究を行ってきた。この高調波空洞では、通常1個だけを使用するのが常識である周波数チューナー（共振周波数を同調するためのピストン状の装置）を3個対称に取り付けることにより電磁場の対称性を改善し、高調波電磁場が寄生モード減衰機構に漏れ出すのを避けるなどの工夫を凝らしている。電磁場シミュレーションによる最適化、低電力モデル空洞を用いた高周波測定、熱構造解析までを実施し、その成果を論文[4-3]で発表した。図4-2に熱構造解析および応力解析の例を示す。また、この成果で総合研究大学院大学の山口孝明が博士号を取得した[4-4]。今後は、予算の目処が付き次第、大電力を投入できる高調波空洞の実機を製作し、早期に実用化したいと考えている。

(4-3) シミュレーションによるビーム不安定性の研究

近年の計算機の著しい性能向上により蓄積リング内を周回するビームの振る舞いをシミュレーションにより調べる手法が益々発達していることはPF年報2021でも述べた。光源第2グループでは、蓄積リングを周回するビームの不安定性をシミュレーションできるコード、mbtrack および mbtrack2 の開発に参加しており、これらのコードを用いたシミュレーション研究も行っている。その研究の一環として、フランスの次期光源計画であるSOLEIL-IIにおけるビーム不安定性の研究をSOLEILのグループと共同で行っている。特に、高調波空洞を用いた場合に可能となるバンチ伸長性能の検討や、高調波空洞の加速モードによってビーム不安定性が引き起こされる可能性の検討について研究成果を上げている。高調波空洞を導入した場合に特有のビーム不安定性（PTBL不安定性）のシミュレーション例を図4-3に示す[4-5]。

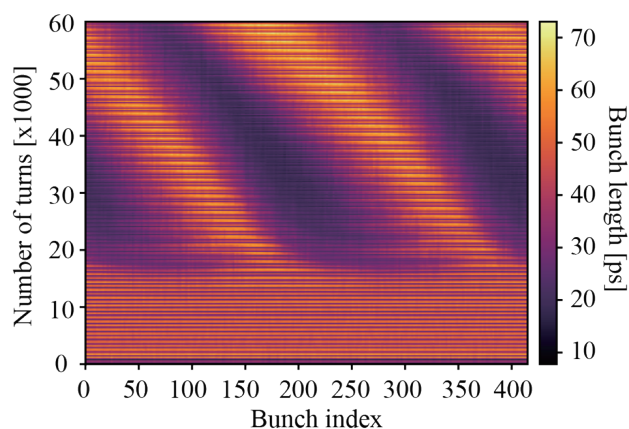


図4-3 多粒子トラッキングコード mbtrack によるビーム不安定性（PTBL不安定性）のシミュレーション例[4-5]。

(4-4) ガス放出を低減する真空ダクトの内面コーティング技術の開発

非蒸発ゲッター（NEG）コーティングをはじめとする真空ダクトの内面コーティング技術は、ビームダクトの小口径化によって分布排気的重要性が増す次期光源加速器にとって必要不可欠な技術と考えて、実用化と性能や耐久性の向上などの観点から開発研究を継続している。

NEGコーティング膜にPd薄膜をオーバーコートすることによって、特に水素を排気する能力が高く、その性能が繰り返し大気開放されても劣化しない、有用な内面コーティングが得られることを実験的に示し2021年度に報告した[4-6]。またNEGコーティング薄膜は活性化によって放射光照射されたときのガス放出量（光刺激脱離係数）が小さくなる長所を持つことが知られているが、Pd薄膜をオーバーコートすると光刺激脱離係数がさらに一桁小さくなり、放射光が照射されたときのガス放出量を低減できることも明らかにした[4-7]。

放射光源加速器では、真空ダクト内面や放射光アブゾーバに大強度放射光が照射することによって放出されるガスが、ビーム路を超高真空中に排気する上で主要な負荷となる。ステンレス鋼、アルミ合金や無酸素銅といった通常の真空ダクト材料にコーティングを施すことによって、表面の光刺激脱離係数を小さくすることは、特に新しい光源加速器のコミッショニング初期の真空圧力を改善することに寄与し、加速器が安定して定格の出力を出せるようになるまでの期間を大幅に短縮することに繋がる。リングのビームダクトに全面的にNEGコーティングを採用して建設された最近の放射光源加速器でも、分岐ダクトなど複雑な形状の部分やビームダクト内面に突き出す放射光アブゾーバなど、一部の表面にはコーティングが施されていない例が多い。放射光照射によるガス放出を想定したビームダクトの真空圧力シミュレーションでは、内面コーティングが無く大きい光刺激脱離係数をもつ表面が一部に残っていると、それらの小さい面積の部分からのガス放出がビームダクトの真空圧力を有意に高くすることが示される。そこで我々は、複雑な形状のビームダクトの内面にもNEGコーティングを可能とする、永久磁石を内蔵したNEG合金製のスパッタリングターゲットの開発を行っている。また一方で、これまであまり表面コーティングが施された例のない無酸素銅製の放射光アブゾーバ表面の光刺激脱離係数を低下させる表面コーティング手法の探索も行っている。面積の狭い放射光アブゾーバ表面などは必ずしも排気作用を持たなくても、光刺激脱離係数を下げてガス放出量を低下させることがビームダクトの真空圧力を下げることに寄与する可能性がある。2022年度には放射光アブゾーバの表面コーティング材料の候補としてAgやPdを選択し、銅製サンプルを用いた放射光照射によるガス放出量測定の実験を行い、その効果を実証した[4-8]。今後は具体的な真空ビームダクトの設計に応じ、ダクトの形状や材質、また構成部品の機能に適した表面コーティングを採用することで、ビームダクト全体の真空圧力を改善する技術の開発を

行っていく計画である。

(4-5) 新型光位置モニターの開発

現在 PF リングのビームラインには、基幹部と測定器フロアを合わせて計 20 台の光位置モニターが設置されており、光軸の時間変動を常時監視するのに利用されている。継続的なメンテナンスにより安定な運用を続けているものの、設置から 20 年以上が経過しているため保守部品の入手が困難になってきている。また、これらは X 線検出部の構造上鉛直方向の光位置変動にしか感度がないため、偏向電磁石が光源のビームラインにのみ設置されている。この光位置モニターの老朽化対策と挿入光源が主力となる次期光源に向けた R & D を兼ねて、2021 年度より新型光位置モニターの開発に着手した。図 4-4 にその模式図を示す。この新型光位置モニターは 4 枚の X 線検出ブレードを備えることで鉛直方向だけでなく水平方向の光位置変動にも感度を持つため、アンジュレータ等を光源とするビームラインでも使用できる。また、各ブレードから放出される光電子間の空間電荷効果を緩和する工夫がなされており、リングのフィルパターンに依らず安定した出力を得ることができる。開発は主に光源 R&D 経費の支援を受けて進められており、2021 年度には X 線検出ヘッドと水冷遮光マスク、2022 年度には同ヘッドの精密駆動機構と独立専用架

台の製作を行った。今後は BL-21 のモニターラインに設置し、改良・量産に向けた性能評価を開始する予定である。

(4-6) 挿入光源のその場磁場測定システムの開発

次期光源計画の R & D として第 7 グループではリングに設置されたアンジュレータの磁場をその場で測定するための手法の開発を行っている。開発中の手法は、図 4-5 のように電子ビームダクトとの干渉を避けながら上部と下部の磁石列磁場を別々に測定し、磁場を合成して電子軌道上の磁場を算出する。これまでに下部磁石列磁場測定へ向けてホールプローブを駆動するリニアモーターの駆動試験などに成功している。現在、PF リングのシャットダウン期間を利用して、U#19 の底部磁石列磁場測定へ向けたリニアガイドの精密調整へ向けた準備を進めている。U#19 は全長 3.8 m と長いために、3 分割したリニアガイドを下部磁石列取付ビーム側面に連結・設置して使用する。このためには 3 本のリニアガイドが精度よく一直線に並ぶように調整することが必要である。このリニアガイドの調整のためにレーザーオートコリメータによる真直度測定を行い、シムによるリニアガイドの精密位置調整を行う。図 4-6 にリニアガイドの位置測定と位置調整時の写真を示す。今後、ホール素子を取り付けて磁場測定を行っていく予定である。

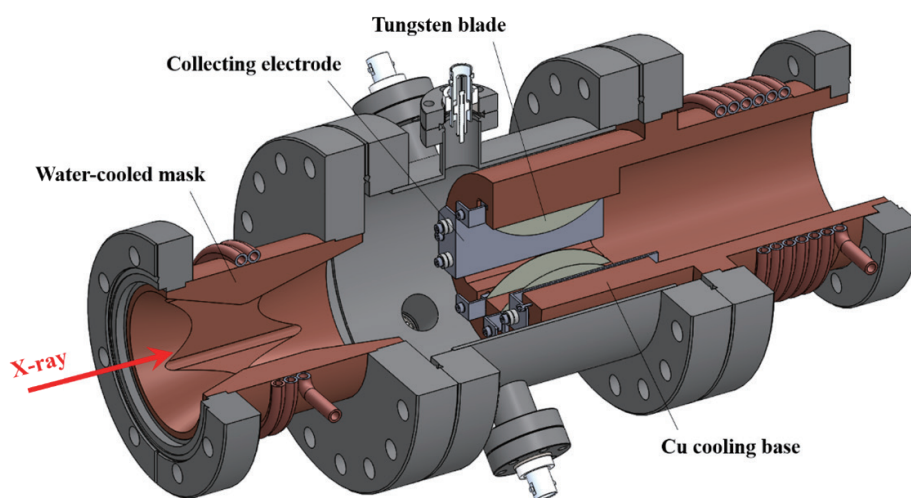


図 4-4 開発中の新型光位置モニターの模式図

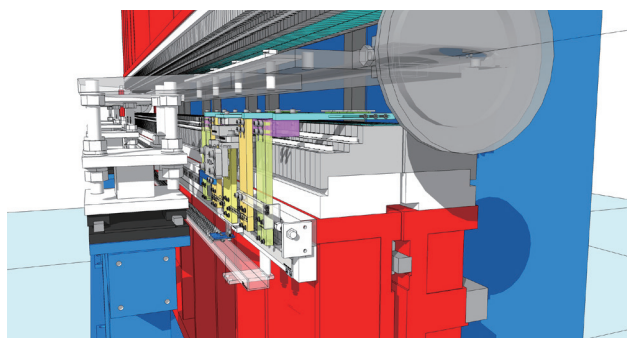


図 4-5 その場磁場測定システム概念図

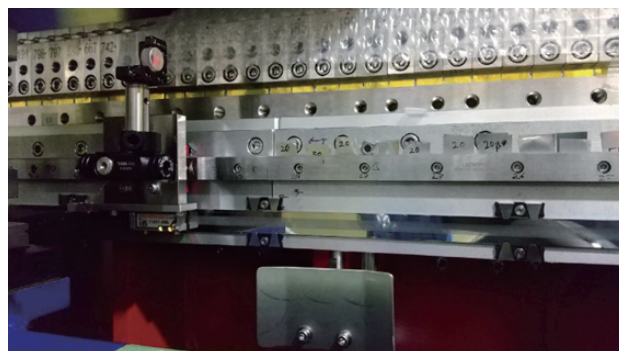


図 4-6 その場磁場測定システムのリニアガイド位置調整

参考文献

- [4-1] 惠郷博文, 他, 第 11 回日本加速器学会年会要旨集, 2014 年, pp. 237-241.
- [4-2] 惠郷博文, 他, 第 16 回日本加速器学会年会要旨集, 2019 年, pp. 17-21.
- [4-3] T. Yamaguchi, *et al.*, Nucl. Instr. and Methods in Phys. Res. A **1053** (2023) 168362. DOI: 10.1016/j.nima.2023.168362.
- [4-4] 山口孝明, 博士論文, 総合研究大学院大学, 2023 年 3 月, <http://id.nii.ac.jp/1013/00006319/>
- [4-5] N. Yamamoto, *et al.*, Proc. of 14th international Particle Accelerator Conference (IPAC2023), Venezia, 2023, pp. 3451-3454.
- [4-6] X. G. Jin *et al.*, Vacuum **192** (2021) 110445.
- [4-7] X. G. Jin *et al.*, J. Vac. Sci. Technol. B **39** (2021) 064202.
- [4-8] X. G. Jin *et al.*, Vacuum **207** (2023) 111671.

(5) 他の加速器への協力

2018 年度から始まった産業技術総合研究所の小型電子加速器中性子源への技術協力を継続している。大学や高専との共同研究も進めており、広島大学・呉工業高等専門学校とは機械学習や加速器の運転データを活用したディープラーニングに関する共同研究を行っている。また、2023 年 3 月には、東京工業大学や他の研究系の制御関係者の協力を得て、全国の大学院生や若手研究者を対象にした EPICS 入門講習会を開催した [5-1]。本講習会の開催にあたっては、KEK が実施している「加速器科学総合育成事業」の支援を受けた。

参考文献

- [5-1] https://cerldev.kek.jp/trac/EpicsUsersJP/wiki/intro/20230302_KEK

2-3. 今後の展望

光源第1グループでは、引き続いてPFリング電磁石電源の老朽化や冷却水系への対応を行いつつ、PFリングのさらなる高輝度化や軌道安定化を目指して中型及び小型電源の開発・更新を進める。また、PFリングへの入射効率や入射性能の向上のためにBTや入射系のスタディを行うとともに、PFリングのみならず次世代光源の入射も見据えてセラミックス一体型パルス電磁石の開発を行っていく。PF-ARにおいても、安定かつ持続的な運転のためにさまざまな電磁石電源の老朽化対策を行いつつ、現在進行中の低エミッタンス化とそのユーザー運転の実現を図る。また、第3スイッチヤードのBT改造を継続して5 GeV PF-ARとPFリングとの完全同時Top-Up運転を実現するとともに、AR-TBLの安定的な運転を目指してスタディを行っていく。次期光源については、ハイブリッド光源の設計検討と研究開発を進める。cERLでは、赤外FELの運転と性能向上とCW運転による高出力化を目指すとともに、次世代半導体リソグラフィへの応用としてEUV-FELの設計検討をさらに進めていく。電子線照射ビームラインでの実験も含めて木材照射によるナノセルロースの効率的な生成、アスファルトの長寿命化、RI生成などの産業応用に向けた研究開発に貢献する。

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、引き続き性能向上と老朽化対策に努める。進行中のPFリング高度化の一環として、2023年度中にローレベル系をデジタルローレベル系に更新する予定である。更新後は、加速用高周波を従来よりも高精度にデジタル制御する事が可能になり、PFリングに蓄積される電子ビームの時間方向の安定度（ビームのタイミングのずれ）が改善される見込みである。また、次期光源で必要となるより高度なRF制御方式も組み込み、試験してゆく予定である。平行して、PF高度化計画と次期光源計画に使用できる新型主加速空洞とTM020型高調波空洞の研究開発も進めてゆく。次期光源計画のRFシステムに関する設計検討も積極的に行う予定である。

光源第3グループでは、引き続きPFリング、PF-ARの改良やアップグレード、cERL加速器の開発に対応した真空システムの設計開発を行っていく。PFリングとPF-ARでは真空システムに関わるリング全周に配置された電源や制御機器にも主として老朽化による故障が目立っており、次期光源にも対応できるシステム開発を踏まえて、現行リングの機器更新にも努めて行きたい。NEGコーティング

を始めとする表面コーティング技術の開発は、PFの次期光源計画に向けた開発はもとより、世界の加速器の将来計画への応用も考えられる。NEGコーティングに関するライセンスやノウハウの供与も受けたCERNの真空グループとは、今後とも、PFリングでの光刺激脱離係数測定の担当や新しいスパッタリングターゲットを提供するなどの協力をし、共同で開発を進めていく。

光源第4グループでは、PFリング、PF-AR、cERLのビーム診断・ビーム制御と加速器制御システム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行いつつ、更なる高度化を実現するための研究開発を継続する。具体的にはビーム不安定現象の解明と抑制、ビームロスによる放射線レベルの精密計測と低減化、極小ビームサイズ・バンチ長の測定、サブミクロンオーダーのビーム軌道安定化等が挙げられる。これらは次期光源のビーム診断システムにも直結する研究課題であり、今後も現行システムの安定運用と並行して研究開発を続けていく。

光源第5グループでは、開発研究多機能ビームライン建設のために既存のBL-11のアクティビティをBL-12に移すことを行っている。それに伴い、2022年度はPF BL-12基幹チャンネル改造を行った。2023年度はPF BL-11基幹チャンネル改造が予定されている。これまで開発を進めてきた銅合金を用いた水冷マスクは基幹チャンネルだけでなくブランチ・ビームラインでも採用される予定となっており、今後の展開が期待される。安全系に関しては、最新のコンパクトなPLCを用いた基幹チャンネル・コントローラを開発し、PF BL-21に続いてBL-18でも導入して、良好な結果を示すことを確認した。今後も更なる高機能化・高信頼化の開発を行っていく。また、PF加速器のインターロック更新については、まずは旧システムと新システムとの平行運用から開始し、運転計画に支障が出ないように配慮しながら、十分な動作確認を行ったうえで新システムへの切り替えを行う予定である。

光源第7グループでは、引き続き老朽化対策に努め、PF及びPF-ARの挿入光源の安定的な運用を目指していく方針である。一方、次期光源計画に向けては挿入光源のコンセプト設計を進めて、CDR作成の準備を進めていく。また次期光源計画に必要な挿入光源のR & Dを継続的に行っていく予定である。R&Dの内容としては、上述のその場磁場測定器の開発に加えて、超伝導MPWの要素開発に着手する予定である。