新緑の眩しい季節になりました。PFの再誕生から5年 目となりましたが、その大半の期間において甚大な影響を もたらした COVID-19 も終息に向かい、いよいよ PFの本 来の活動が可能になるものと期待しています。

5年前の『施設だより』(2019年5月号)でも述べてい ますが、PFの施設運営においては「連携」が大切です。 2023年度第1期の運転については、光熱費の抑制のため、 関係各所と連携して、例年と比べて2週間ほど前倒しとな るスケジュールを組みました。ゴールデンウイーク前から の運転となったことで、スタッフはもちろん、利用者や委 託業務従事者の皆さんへの影響も大きかったかと思いま す。この場を借りて、関係する全ての皆さんの協力に感謝 を申し上げます。

日本学術会議が募集した「学術の中長期研究戦略」には, KEK-PIP2022を踏まえ,マルチビームをキーワードとし て含む量子ビーム科学のビジョンと新放射光源施設を中心 とした施設計画が KEK 機構長から提案されました。機構 長から新放射光源施設が提案されたことは大きな意味を持 ちますが,実現のためには,文科省の「学術大型計画の基 本構想ロードマップ」に掲載されることが重要です。その 選考ですが,学術会議が採択したプロジェクトを対象に募 集が行われてきた従来の方式ではなく,学術会議による採 択を前提としない新規の方式に変更されるとのことです。 詳細については不明ですが(注:原稿執筆後,文科省の Web に募集開始の案内が掲載されました),国内の他の放 射光施設の整備計画や KEK の他の分野の大型計画との調 整も必要ですので,早期に好機が訪れた場合にも逃さない ように準備を進める考えです。

具体的には、新放射光源施設の有力な候補であるハイブ リッドリングを構成する超伝導ライナックと蓄積リングの うち、開発要素が少なく単独での運用が可能な蓄積リング 部を先行して整備するための検討を開始しました。昨年度, UVSOR, HiSOR, PF-UA と連携して開催した PF 研究会「開 発研究多機能ビームラインの建設と利用」では、高性能な 蓄積リングで展開される 2 ビーム利用サイエンスの提案が 多数ありました。また、PF および PF-AR の 2 リングを並 行して運用することは、予算、機材、人員などのリソース を分散させることになり、非効率な状態でもあります。こ のような背景からも、蓄積リング部の先行整備は合理的で あると考えています。

フォトンファクトリー計画推進委員会(2023 年 1 月 30 日) および KEK 国際諮問委員会(2023 年 2 月 22 日) で は,ハイブリッドリングの蓄積リング部について, Energy Switchable Storage Ring を提案しました。国際的にも国 内的にも,小型,中型,大型の施設が分担して,10 eV~ 100 keV を中心とした放射光利用が推進されています。国 内に,蓄積電子エネルギー(以下,電子エネルギー)が 0.5 GeV~1.5 GeV の 複数 施 設, 3.0 GeV の NanoTerasu, 8.0 GeV の SPring-8 があることも考慮して, 2.5 GeV と 5.0 GeV の切り替え(運転時間 2.5 GeV : 5.0 GeV = 3 : 1), 周長 750 m を蓄積リング部の仕様策定に向けた検討の出発 点として設定しました。この出発点は,高い基本性能,高 い自由度・拡張性,広い分野・手法への対応,現実的な建 設と運転のコストなどの観点から,以下の近似的な関係に 基づいて設定されています。

- 放射光エネルギーは、電子エネルギーの2乗に比例する。
- 放射光輝度は、電子エネルギーの4乗に反比例し、周長の6乗に比例する。
- ビームライン数は,周長に比例する。
- 建設費は、周長に比例する。電力消費は、周長を固定 するならば、電子エネルギーの2乗に比例する。周長 を電子エネルギーに応じて伸長することで、比例する ぐらいまで抑制できる。

この提案では、施設としての放射光のエネルギー範囲が 広がるだけでなく、単一のビームラインでもエネルギー範 囲を広げることが可能です。現在、将来計画の一環として 建設を進めている開発研究多機能ビームラインでは、エ ネルギーは未定ですが、軟X線と硬X線の2ビーム利用 が可能になります。また、先行して建設を進めている広 波長域軟X線ビームラインでは、50 eV~5 keVの利用が 可能になります。これらのビームラインは偏向電磁石を光 源としていますが、Energy Switchable Storage Ring のビーム ラインでは、2台のアンジュレーターを光源として、例え ば、12.5 eV~50 keV(12.5 keVの利用が可能になります。

新放射光源施設については,KEK ロードマップ 2021 に おいて,PF の稼働から 50 年となる 2030 年代前半までに 建設するとしています。放射光科学の黎明期に建設された PF が 50 年であるならば,放射光科学が飛躍的な発展を遂 げた後に建設される新放射光源施設は 100 年(あるいはそ れ以上)を目指すべきではないでしょうか。そのためには, 多様な学術研究の展開に必要な先端性を保ち続けられるよ う,将来の拡張を見据えた計画でなければなりません。し たがって,放射線遮蔽も含めた建物が極めて重要になりま す。現在,放射線科学センターや施設部施設企画課とも連 携して検討を進めています。

最後に,加速器第六研究系の研究主幹の交代について報告したいと思います。小林幸則前主幹が定年により退任し, 帯名崇新主幹が着任しました。小林さんとは,実験施設長と研究主幹として,緊密に連携しながら同じ目的に向かって施設運営を行ってきました。Energy Switchable Storage Ring も,小林さんとの議論から着想して,共同で提案したものです。引き続き,小林さんからも助言をもらいながら,帯名さんと緊密に連携して施設運営にあたります。

入射器の現状

運転状況

PF リング 2022 年度第 2 期の運転が 12 月 28 日に終了 し、2023年1月4日から2月7日まで冬期保守作業を実 施,2月25日からの第3期光源加速器運転の入射に向け た調整を2月8日より行なった。今回の立ち上げ調整に あたり、施設側冷却設備でトラブルが多く発生した。2月 2日,電磁石冷却水系統配管(M0B)接続部より経年劣化 したパッキンより水漏れが発生した。パッキン交換の対処 後に通水を再開したが流量が回復せず(通常:13.0 L/min → 11.5 L/min),機器動作に問題ない範囲でインターロッ ク作動値を調整した。また、2月8日の運転開始直後にA セクター電磁石冷却系統とクライストロン冷却系統の冷却 水温が15℃以上急激に低下するトラブルが発生した。通 常も夜間凍結防止運転から昼間定常運転へ切り替えるタイ ミングで水温は多少変化するが(流路切り替え時に外回り の冷水が少し混じるため),この時は凍結防止バルブの操 作ミスによる人為的エラーであった。冷却水の異常は機器 破損をもたらす可能性もあるため、一連のトラブルに対す る原因調査と対処方法について施設担当と協議し、今後の 再発防止対策を定めた。一方、機器立ち上げ調整運転中に A3 クライストロンのヒータ不良, C3 クライストロンの冷 却配管漏水,B3 クライストロンの集束電磁石水抜き部漏 水が発生した。いずれも経年劣化に起因するトラブルであ り、クライストロン交換やスタンバイユニットの代用によ り対応した。その後、ビーム調整を進め、2月15日から PF リング,2月22日より PF-AR (6.5 GeV 運転) にユー ザー利用運転に向けたビーム入射を開始,3月13日に運 転停止した。この間, 25 Hz 省エネルギー運転を行い, ビ ーム入射は順調に推移した。ダウンカウントは約40回/ 週,加速管や導波管立体回路からの反射による VSWR は 20回/週で過去最小レベルであった。PFリングやPF-AR へのビーム入射は5Hz程度のため,残りのパルス運転で SuperKEKB への入射を想定したビーム調整とスタディを 行った。3月13日に光源加速器へのビーム入射運転終了 後,入射器はシャットダウンして春期のメンテナンス作業 を行なっている。4月17日より入射器立ち上げを開始,4 月25日より光源加速器へのビーム入射を再開する予定で ある。

ビーム研究の進展

RF 電子 銃 駆動 レーザーの DOE (Diffractive Optical Element) 用レンズを変更して電子銃カソード面に当たる レーザースポットのプロファイルを広げた高電荷バンチ生 成試験を行った。DOE はレーザー径を変えて輝度を均一

加速器第五研究系研究主幹 惠郷博文 (2023 年 4 月 17 日付け)

化するために使用する素子である。レーザー径が広がり, 入射器調整によりレーザー片側ラインのみでも 2nC 超の バンチを得たが、強度分布の均一性は低下した。今後安定 的に高電荷運転を行うために、高電荷出力専用の DOE を 導入する予定である。この高電荷バンチ出力調整後に RF 電子銃の課題であるレーザー窓劣化試験を行った。真空排 気系を増強したレーザー入力ライン1側は,真空排気増強 のないライン2側と比較して出力電荷量の減少が緩和され ていることが確認された。窓付近の真空値向上により窓の 透過率劣化が改善されているため、更に排気装置を拡充す ることを検討していく。レーザー窓劣化試験時に、各蓄積 リングヘビームを振り分ける入射器最下流の第三スイッチ ヤード(SY3)に設置しているビームダンプの放射線量が 上昇し,放射化領域の拡大が懸念されたため,ビームエネ ルギーを7 GeV から PF リングと同じ 2.5 GeV に下げて運 転し、長期運転によるレーザー窓劣化データを収集した。

クライストロン駆動電源内のインバータノイズは加速電 界に影響するため、ビーム安定運転に対して懸念点の一つ である。今回、インバータ駆動電源の加速ユニットをスタ ンバイ、更に、共振充電型ユニットをローカル設定にして、 駆動電源ノイズ低減とビーム軌道ジッタの関連性を観測し た。共振充電型ユニットをローカル設定にするとモジュレ ータ内の自己安定基準電圧で動作するようになるため、ク ライストロン印加高圧への変動を低くするできることでき る。これらの設定でビーム加速運転を行ったところ、ビー ムのエネルギージッタが半減、4セクター以降の軌道変動 が1/5 程度まで減少した。これから実際にインバータ駆動 ユニットによるノイズの影響が大きいことがわかった。

J-ARC入口に設置した高速キッカーを用いて2バンチビームの個別軌道調整試験を初めて行った。運転電圧2kV (最大電圧10kV)設定で,後方バンチを十分なキック角 で軌道調整できることが確認できた。運転の際,近傍に 設置しているパルスステアリングマグネットの設定値が 0.2 A 程度変化した。キッカーのタイミングに同期してい るため,高速キッカー用電源からのノイズ影響であること が判明したため,磁気シールド設置によるノイズ対策を行 う。

機械学習による入射器の自動調整研究も進めている。今回, J-ARC でのディスパージョン補正試験を行った。評価 関数次第で収束状況が変わるため,評価関数の設定を最適 化していく必要がある。ベイズ最適化法を用いた陽電子生 成用1次電子ビーム試験では,データを測定後に J-ARC 前後のパルスステアリングを自動調整させると 20 回程度 の繰り返しでディスパージョンの漏れを抑えた安定点へ収 束するが,電荷ロスを同時に抑えられなかった。陽電子電 荷量変動(LER 用ビーム)抑制への機械学習適用試験では, y方向軌道ジッターが大きく影響し,J1/J5パルスベンド(陽 電子生成1次電子ビームの主ビームライン合流用)の変動 に依存する。ただし,これらのベンドの安定度(0.02%) は設計値以下となっているため,現状以上の電源安定度向 上は見込めない。長期軌道ドリフトはターゲット前の軌道 調整で対応する。機械学習適用試験では,サブハーモニッ クバンチャー, A, Bセクターのビーム加速位相を調整パ ラメータに加えることにより,電荷量ロス抑制の自動最適 化が可能となった。ただし,ディスパージョン試験と同じ パルスステアリングを使用しているためディスパージョン 漏れ補正と電荷ロス抑制は,今回同時に最適化できなかっ た。ビーム解析を進めて,同時最適化の手法を検討してい く。

このように光源加速器への安定ビーム入射を行うと共に ビーム性能向上に向けた入射器改造やビーム解析調整を進 めている。

はじめに

長年にわたって加速器第六研究系を率いてこられた小林 幸則さんの後任として,研究主幹となりました帯名崇です。 これまで加速器のビーム診断や,不安定抑制をはじめとす るビームの安定化,加速器制御などに従事してきました。 今後は六系スタッフをはじめ多くの方々の協力のもと,既 存加速器のさらなる安定化と高度化を目指すとともに,な んとしても次期光源の建設が実現できるように微力ながら 尽力していきたいと考えています。

次期光源が早期に建設できることが理想ではあります が、そこに至るまでの間にも次世代を担う中堅~若手研究 者・職員の方々が新しいアイディアや最新の技術を導入し たり、高性能化が出来たりするような環境をつくることが 必要と考えています。昨今の社会情勢や予算状況を考える と楽観視できるものではありませんが、粘り強く、系全体 での研究開発を継続していきたいと考えています。

4月からは第六研究系のグループ構成を少し変更してい ます。これまで光源第1グループは10人を超える大所帯 であったところを電子軌道・電磁石を担当する第1グルー プと、入射・電源を担当する第6グループの2つに分けて それぞれにグループリーダーを置く体制をとります。これ は、研究開発はもちろん、現場での意思決定や作業、ディ スカッション等を迅速かつより詳細に行うことが目的で す。新グループのリーダーは第1グループが原田健太郎さん、 第6グループは満田史織さんにお願いし、また、第4グル ープのグループリーダーとして帯名が担当してきたところ を高井良太さんに担当いただきます。新体制によってより 迅速かつ活発な研究開発が実現できることを目指します。

光源リングの運転状況

図1に, PF リングにおける2月15日9:00~3月13日 9:00までの蓄積電流値の推移を示す。2月15日9:00に第 3期の運転を開始した。立ち上げ調整は概ね順調に進み, 2月17日17:00からの光軸確認後マルチバンチモードでの ユーザー運転となった。3月1日9:00~3月2日17:00に ハイブリッドモードへの切り替えを行い,3月2日17:00 からユーザー運転を再開した。ハイブリッドモードは第2 期と同様に、シングルバンチ部50 mA とマルチバンチ部 400 mA の計450 mA の蓄積電流値で運転した。

3月5日13:13水平軌道が大きく変動し,13:15 蓄積電 流値が30mA以上減少した。調査したところ,ビーム不 安定性が発生していた。対策手順に従ってRF 位相変調を ON にしたが,さらに電流値が減少してしまったため,ビ ームをダンプして電流値ゼロからの積み上げ再入射を実施 することとした。15:15 にユーザー運転を再開したが,フ ィルパターン制御プログラムが停止していて,ハイブリッ ドモードのフィルパターンが制御されていないことに気が ついた。そのため,再度ゼロからの積み上げ入射をおこな い,16:43 にユーザーランを再開した。その後,19:57 シ ングルバンチ部のビームが削れ,しかもビーム不安定性が 抑制できない状態となったため,3度目の再入射となった。 21:26 にユーザー運転を再開し,その後は安定に運転され





図 2 PF-AR の 2月 20日 9:00~3月 13日 9:00 までの蓄積電流値の推移を示す。

た。これら一連のビーム不安定現象に関しては,後の調査 で SFD 電源が異常動作していたことが判明したため,運 転停止終了後にインターフェースボード基板の調査を含め 根本的な原因調査を行っているところである。

3月12日16:55ビーム入射が停滞し,蓄積電流値 450 mAが維持できなくなり,ビーム不安定性も発生した。 RF 位相変調を ON するが,不安定性が抑制できず,17:01 ビームダンプとなった。再入射を試みるが,ビームが積み 上がらず原因を調査することとなった。原因は横方向個別 バンチフィードバックで基準にしている RF 分周器の信号 のタイミングがずれていたためであることが判明した。タ イミングを調整することで,ビーム不安定性が抑制され, 450 mA まで蓄積できるようになり,ユーザー運転を再開 した。

図 2 に, PF-AR に お け る 2 月 20 日 9:00 ~ 3 月 13 日 9:00 までの 蓄積電流値の 推移を示す。2 月 20 日 9:00 から 運転を開始し, PF-AR も立ち上げ調整は順調に進み,2月 22 日 17:00 からの 光軸確認後ビームエネルギー 6.5 GeV で ユーザー運転を開始した。第3期は全期間 6.5 GeV モード で運転した。PF-AR においては、ビームダンプが一度も 発生せず、ユーザー運転は大変順調であった。

両リング共に,3月13日9:00 で運転を停止して,春の 停止期間となった。

2022 年度の運転まとめ

表1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3に示す。2022年度の運転時間 は、ここ数年の目標値であった3,000時間の2割増である 3,600時間を目標とした。これを実現すべく、年度当初リ 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。電気代の急激な上昇のため,場合によっては第3期の ユーザー運転が中止となる可能性もあったものの,文部科 学省による追加対策をうけてユーザー運転が実現できたこ とが大きく貢献している。

故障時間は昨年度と同程度の約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。故障の内訳を調べてみると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2と図4に PF-AR の運転統計を示す。令和4年度の ユーザー運転時間は2,418時間となり、昨年度とほぼ同程 度の運転時間を維持できた。しかし、PFユーザーと同様 のユーザー運転3,000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%で昨年度にくらべ 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と同じ程度であった。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。

表1 2009(平成21)年度~2022(令和4)年度までの13年間の 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)	5032.0	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	624.0	2983.4	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	3,004.1	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	3590.2	25.8	144.6

表 2 2009 (平成 21) 年度~2022 (令和 4) 年度までの 13 年間 の PF-AR 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)	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 (H29)	2,448.0	312.0	2,111.3	24.7	38.8
2018 (H30)	2064.0	456.0	1581.6	26.4	64.3
2019 (R01)	2568.0	456.0	2099.7	12.3	264.0
2020 (R02)	2520.0	408.0	1943.9	168.1	150.9
2021 (R03)	2976.0	560.0	2404.7	11.3	241.6
2022 (R04)	3,000.0	560.0	2418.3	21.7	143.5



図 4 2009 (平成 21) 年度~2022 (令和 4) 年度までの 13 年間 の PF-AR の運転統計の棒グラフ



図3 2009(平成21)年度~2022(令和4)年度までの13年間の PF リングの運転統計の棒グラフ

超伝導ウィグラー下流の放射線レベル測定

ガフクロミックフィルムは,放射線への暴露により色が 変わるラジオクロミックフィルムの一種である(図5左)。 もともとは医療分野でX線やγ線の線量分布測定用として 開発・販売されてきたが、近年国内外の加速器施設におい て放射線レベル測定に応用されている。このフィルムを用 いて, 2021 年 12 月に PF リングトンネル内の放射線量分 布を測定したところ [1], 超伝導ウィグラー下流において 放射線量がトンネル内で一番高いという結果になったこと から, 2022 年 10 月に詳細な分布測定を行った。測定はマ シンスタディ中に実施した。フィルムを設置して蓄積電流 値を 450 mA とし、約1時間経過した後に、ビームを落と してフィルムを回収した。フィルムの設置場所は、超伝導 ウィグラー下流の①加速器室内の内壁, ②加速器室内の外 壁,③ダクトの上部を通る梯子の3か所において,鉛直, 水平, ビーム進行方向とした(図5右)。今回は, ①の場 所での測定結果について報告する。

図6の左図はビームと同じ床から1200 mmの高さにお

いて、ビーム進行方向に 1000 mm 間隔で設置したフィル ムである。その中でも放射線量の高い A, B の場所で、鉛 直方向 0 mm から 2000 mm の範囲でおおむね 200 mm 間隔 で設置したフィルムを図6の右図に示した。どちらの測定 結果もフィルムの変色度合から放射線量分布を直観的に見 て取れるが,変色度合を定量的に評価するため,フィルム を一般的な反射式のフラットベッドスキャナーを用いて デジタル化して取り込み, Python を用いて解析を行った。 フィルムの変色度合を,吸光度(Optical Density)に換算 してプロットしたものが図7である。吸光度はカウント値 の逆数の対数をとったものであるため、フィルムが黒いほ ど吸光度の値は大きく,放射線量も高い。図7の左図から 超伝導ウィグラーの真横よりやや下流の領域で放射線量が 高くなっているということが分かる。また、図7の右図か ら、ビームの高さより床面での放射線量が高いということ が明らかになった。これは、PF リングの超伝導ウィグラ ーが鉛直下向きにビームを蹴っていることに起因して、ビ ームロスが発生してしまっていることが原因と考えられ



図5 ガフクロミックフィルムの変色(左)と測定場所(右)



図6 測定①の場所に設置した回収後のフィルムの変色度合い



図7 測定①の場所に設置した回収後のフィルムの吸光度の分布

る。今後,超伝導ウィグラーを消磁して同じ測定を行い, ビームロスの原因を探りたいと考えている。

参考文献

 M.Shiozawa *et al.*, "Beam Loss Evaluation By Gafchromic Film", in the Proceedings of the 19th Annual Meetings of Particle Accelerator Society of Japan, Online, 2022.

加速器第6研究系内の人の動きについて

冒頭で述べたように,2023年3月31日をもって小林 幸則さんが定年退職となりました。小林さんは14年にわ たって加速器第六研究系を率いてこられました。最初に PF-AR 高度化に着手・実現されたことに続き,次世代光 源として ERL 加速器の先進性に注目されて新たな加速器 を提案され,試験加速器としての cERL の建設から稼働に 至るまで主導してこられました。また,その後にも AR 直 接入射路が建設できて 6.5 GeV でのトップアップ運転が実 現できたことも小林さんの指導力や人望あってこそのこと と思います。深く感謝しております。今後も特別教授とし て引き続き御指導・御鞭撻いただきます。

新人採用については,4月1日付けで光源高周波(RF) グループの技術員として本村新(もとむらあらた)さん が着任されました。本村さんには高周波関連装置の維持・ 管理や保守を行うとともに,RF 関連の様々な技術開発に 従事していただきます。

昇任については、4月1日付で原田健太郎さんが教授に 昇任されました。これまで同様に既存光源の保守・維持・ 管理はもちろん、次期光源に関する研究開発を進めて頂く とともに、先に述べた電子軌道・電磁石グループリーダー としてグループのまとめ役を担っていただきます。おなじ く4月1日付けで阿達正浩さんが助教から研究機関講師に 昇任されました。引き続き挿入光源に関連する研究開発と 業務に従事していただきます。技術職員についても、長橋 進也さんが技師から先任技師に昇任されました。電子軌道・ 電磁石グループでの保守・管理・維持の継続はもちろんの こと、関連する装置の技術開発を担当していただきます。 さらに、先任技師として技術職員のまとめ役も務めていた だくことを考えています。また、野上隆史さん、内山隆司 さん、下ケ橋秀典さんの3名が技師から専門技師に昇任さ れました。引き続きそれぞれ所属されている各グループで、 関連する装置の保守・管理・維持、ならびに技術開発を担 当していただきます。

最後に,人事案件ではありませんが総合研究大学院大学の修士一貫コースの学生として渡辺留合(わたなべるあう)さんが4月に入学されました。指導教員である谷本さんのもと,真空グループに所属していただいて研究・学業に専念して頂くことになります。

2022 年 11 月号の放射光実験施設の現状で予告した通り, 本号では「BL-11 と BL-12 の再整備」について紹介します。

開発研究多機能ビームライン BL-11A, -11B の建設 (プロジェクト責任者:若林大佑)

開発研究多機能(R&D)ビームラインBL-11A,-11Bは, ビームライン基盤技術の深化と開発研究を通じた人材育成 などを目的として建設されます。2021年4月から1~2ヶ 月に1回,HiSORおよびUVSORとともに,R&Dビーム ライン検討会を開催し,光学系デザインの検討や開発項目 の議論を行ってきました。昨年度にはPF研究会「開発研 究多機能ビームラインの建設と利用」を開催し,利用者の 皆さんから,新放射光源施設計画へ繋がる2ビーム利用の サイエンスの提案を受けました。

R&D ビームラインは,偏向電磁石を光源として,硬X線(HX)ブランチ BL-11Aと軟X線(SX)ブランチ BL-11B で構成されます。BL-11Aは,ビームラインの中流と下流にそれぞれ広いハッチを有し,HX 領域の白色光および単色光を用いて,光学素子や測定手法の開発が実施され



図1 旧 BL-11A, -11B, -11D の撤去前(上)と撤去後(下)の様子。

放射光実験施設長 船守展正 (2023年4月29日付け)

ます。一方, BL-11B は,回折格子分光器の前後の入射ス リットと出射スリット位置に集光点を持つ設計となってお り,SX 領域の白色光および単色光の集光ビームを用いて, ビームライン上下流方向を広く使った開発研究が実施され ます。特に,BL-11Bの光学素子の切り替えと再配置を行 うことで,BL-11Aの下流の実験ハッチ内にSXのビーム を導入し,HXとSXの2ビーム利用に関する開発研究を 行うことが可能です。前述のPF研究会においても,2ビ ーム利用についての活発な意見交換がありましたが,より 良いビームラインになるように,引き続き,詳細設計を柔 軟に更新しながら進める予定です。

2022 年度第 3 期をもって旧 BL-11A, -11B, -11D の 3 ビ ームラインの利用が終了したことを受けて, R&D ビーム ラインの建設に向けた環境整備に着手しました。具体的に は, 旧ビームラインのチャンバーやビームダクト類の撤去 とケーブル用地下ピットの埋め立て工事を行いました(図 1)。夏の停止期間には,残りの撤去と床の補修を完了し, 順調に進めばビームライン基幹部の建設を開始する計画で す。下流のブランチ建設は来年度を予定しています。現 在,建設サイトの環境整備と並行して,基幹部を含むビー ムライン上流部の詳細設計を詰めるための検討を進めてい ます。

広波長域軟 X 線ビームライン BL-12A の建設 (プロジェクト責任者:大東琢治)

広波長域軟 X 線ビームライン BL-12A は, 旧 BL-11A, -11B, -11Dのアクティビティを移転するために, 50~5,000 eV のエネルギー範囲が利用可能となるように設 計されたビームラインです。BL-12Aの特徴として, 偏向 電磁石の光源点に対して,上下に分岐する2本のパスを持 つことが挙げられます(図2)。それぞれのパスは軟X線 用 (S path: 50~2,000 eV)の回折格子分光器とテンダーX 線用(T path: 1,700~5,000 eV)の二結晶分光器を備えてお り、最終的に合流して共通の集光点を持つ設計となってい ます。利用するパスの選択は、最上流と最下流のミラーの 脱挿入により行います。期待されるスペックは、旧 BL-11 群と比較して, エネルギー分解能こそ同程度ですが, フラ ックスは軟X線領域で 2~13 倍, テンダーX線領域で約 1.2 倍となる計算です。集光サイズは、パスによって異なるも のの, 0.5~0.7 mm (H) × 0.07~0.5 mm (V) 程度を見込んでい ます。

BL-12A の建設に当たっては、準備作業を 2022 年夏の停止期間より実施しています。隣接する BL-12C とのクリア ランスを確保するため、BL-12C を BL-13 側に 5.5 mrad 移 設する作業を行いました。この春の停止期間には、BL-12 中二階デッキに光学素子設置のための開口部を造る工事を



図2 BL-12A の概略図

行いました。なお,旧 BL-11 群解体で得られたチャンバーやビームダクトの一部については,BL-12A での再利用に向けて,改造や洗浄を進めています。本格的なビームライン建設は,夏の停止期間に開始する計画です。

共同利用については,2023年度第2期より段階的に開始する予定です。T path の建設を先行させてテンダーX線 領域を公開,その後,S pathを建設して軟X線領域も公開, 2024年度にはフルスペックでの公開とする予定です。持 ち込み装置を接続の上での利用を基本に考えていますが, 旧 BL-11A,-11Bの汎用 XAFS チャンバー,旧 BL-11Dの X線反射率計チャンバーについては、ビームラインに常設 します。

BL-12A は,世界的に見ても稀なほどエネルギー範囲の 広いビームラインとして設計されています。この特徴を活 用した新しい研究のアイデアをお待ちしています。

運転・共同利用関係

2023 年度第1期の運転については、光熱費の高騰への 対応の一環として、入射器の立ち上げ時の調整運転の時間 を短縮(光熱費を抑制)するため、真空を破る作業を夏の 停止期間に変更してもらい、例年よりも早い日程での運 転としました。PFは4月25日から運転を開始しており、 PF-ARは5月10日から開始する予定です。ともに6月16 日まで運転を継続します。PFのハイブリッドモードは5 月30日から最後までの予定です。PF-ARは5GeVで運転 を開始して、6月1日以降を6.5GeVで運転します。現在、 2023年度第2期の運転計画の策定に向けた光熱費の確保 について、機構内で調整を行っています。

PF-PAC の全体会議が,3月20日に Web 会議方式で開催され,S型課題等の中間・最終評価方法の見直しなどが 審議されました。詳細については、本誌記事をご参照ください。

人事異動

最後に,放射光実験施設に関する人事異動を報告します。 4月1日付で,小菅隆さんが先任技師から機構全体で 2~3 名の主任技師に PF 関係者で初めて昇任しました。同日付 で,石井晴乃さんも技術員から准技師に昇任しました。お 二人の一層の活躍を期待しています。また,同日付で,西 村龍太郎さんが放射光実験施設・基盤技術部門の特別助教 に着任しました。特別技術専門職からの異動で,引き続き, 制御系チームを主務として検出系チームを兼任します。さ らに,同日付で,熊木文俊さんが博士研究員に着任しまし た。総合研究大学院大学在籍時の経験を活かして,基盤技 術部門・時間分解チームの研究活動を開始しました。な お,3月31日付で,岸本俊二さんは定年後の再雇用の任期, 亀卦川卓美さんと鈴木芳生さんは研究員としての任期が満 了となりました。

放射光科学第一,第二研究系の現状

2022 年度第3号の PF ニュースで予告した通り,今回は 放射光科学第一研究系の研究部門の一つである固体物理学 研究部門のメンバーが中心になって実施している先端的な 物質科学研究を紹介します。

分子結晶における微視的内部構造の観測による巨視的物性 発現機構の解明

物質の性質を理解するためには、その物質の構造の理 解が必要となります。そのために、主に放射光X線を利 用した回折・散乱実験を通じて物質の内部構造を明らか にする研究を進めています。特に, 分子自身あるいはその 配列に自由度をもつ分子性結晶では、微細な構造の違いが 大きな物性の違いを与えるため、詳細な構造の観測が物性 発現機構の解明のために必須となるとともに、新たな物質 開拓のために重要な知見となります。近年、学術的な興味 のみならず応用面からも注目されている有機エレクトロ ニクスのための材料開発研究 [S. Horiuchi et al., Chem. Sci., 11, 6183 (2020); S. Horiuchi et al., RSC Adv., 9, 39662 (2019)] に加え、デバイス開発に欠かすことのできない薄膜試 料での構造評価 (図 1) [S. Arai et al., Phys. Rev. Materials, 7, 025602 (2023); K. Nikaido et al., Adv. Mater. Interfaces, 9, 2201789(2022)]を行い、新規物質、物性開拓のための研究 を推進しています。また、大型回折計を利用して、温度 や圧力など、外場下での物性発現を構造変調から理解す るための測定 [S. Inoue et al., Chem. Mater., 34, 72 (2022); K. Sunami et al., Phys. Rev. B, 99, 125133 (2019); A, Ueda et al., RSC Adv., 9, 18353(2019)] にも積極的に取り組んでいます。

共鳴 X 線散乱を用いた構造物性研究

共鳴X線散乱(RXS)は、回折・散乱の空間相関の観測 とX線吸収分光やX線磁気円二色性(XMCD)といった 電子・磁気状態の観測を組み合わせた手法です。したがっ て吸収端を選択することで、元素・軌道選択的にこれら電 子・磁気状態の空間相関、つまり秩序状態が決定できま



図1 薄膜·表面用多軸回折計

す。特に軟X線領域は、多彩な物性を示すことで注目される 3d 遷移金属や 4f 希土類金属などの吸収端が存在し、 XMCD による研究も盛んに行われています。このような 背景のもと、軟X線領域 (200-5000eV) での RXS 実験が可 能となる真空中X線回折計を開発するとともに、RXS に よる研究を推進しています [山崎 *et al.*, 放射光 **30**, 3 (2017); 中尾 *et al.*, 放射光 **34**, 55 (2021); https://research.kek.jp/people/ hironori/beamlines/rsxs/]。

このような研究を通じて,次期光源でのみ利用可能と 思っていた光のコヒーレンスを利用した研究が PF でも可 能であることがわかってきました。そこで RXS とコヒー レンスを組み合わせた磁気イメージング研究を開始しまし た。その結果,コヒーレント回折イメージングによる磁気 スキルミオン格子などの磁気イメージングに成功しました [V. Ukleev et al., Quantum Beam Sci. 2, 3 (2018); V. Ukleev et al., Phys. Rev. B 99, 144408 (2019); C. Tabata et al., JPS Conf. Proc. 30, 011081 (2020)]。また,試行錯誤した実験の中か ら,試料で生成された軟X線渦ビームのらせん波面の観 測(図 2)に成功するとともに,磁性体中に存在するトポ ロジカルな欠陥構造の新たな観測手法の提案に至りました [Y. Ishii et al., Phys. Rev. Applied 14, 064069 (2020); Y. Ishii et al., Sci. Rep. 12, 1044 (2022)]。

このように軟X線領域の磁気イメージング手法は,まだ まだ未開拓な領域が広がっています。そこで現在,S2課 題「トポロジカル磁性体における位相欠陥と拡張多極子の 動的構造可視化」(実験責任者:山崎裕一(NIMS))での 磁気イメージングの利用展開と並行して,PF-S課題「軟 X線領域のコヒーレンスを利用したイメージング手法の技 術開発」のもとに PF 内の他部門と連携して,様々なイメ ージング手法に挑戦しているところです。また RXS 手法



図2 (a) インラインホログラフィの回折パターン (b), (c) ℓ=±1 の軟X線渦ビームの位相分布

の新たな可能性の開拓として,これまで観測不可能と思われてきた磁気八極子の検出の可能性を提案するとともに, Q=0のRXSと言えるXMCD実験により,拡張磁気八極子 状態が観測できることを実証しました [Y. Yamasaki *et al.*, JPSJ **89**, 083703 (2020); M. Kimata *et al.*, Nat. Commun. **12**, 5582 (2021)]。

マルチプローブ・マルチモーダル分析のための環境整備

物構研では、放射光だけでなく他の量子ビームを組み 合わせたマルチプローブ・マルチモーダル分析を推進し ています。最近, CIQuS(量子ビーム連携研究センター) では、マルチプローブの利用を促進するため、DECTRIS 社製のピクセルアレイ型X線光子計数型2次元検出器 PILATUS3S 1M(以下, PILATUS1M)を導入し、その利用 環境の整備を進めています。現在 Photon Factory で物性物 理や材料評価の分野で一般的に用いられている BL-8 のイ メージングプレートと比較して、PILATUS1M にはいくつ かの利点があります。Photon Counting方式を採用しており, 1ピクセルあたり約10⁶のダイナミックレンジを持つので, 微弱な反射から高強度までの精度の高い測定が可能です。 また、リードアウト時間が短い (3.6 µsec) ため、ハイスル ープット測定にも適しています。ただし、検出面積が狭く (169×179 mm²), ピクセルサイズが大きい (172×172 µm²) という欠点があります。そのため、現在のビームライン装 置群と併せて相補的に活用し、効果的な運用を行いたいと 考えています。

さらに, BL-8B と BL-14A で回折実験を行うために, 試 料環境や測定システムを整備しています。BL-8B では垂 直式電動位置調整器を開発し, シャッターレスでの振動写 真測定が可能なシステムを構築しました(図 3)。現在は データ解析のための装置定数の決定方法やソフトウェアの 開発や利用方法について検討を進めています。また, BL-14A では, 令和4年度末に新たに電動20軸を増設しまし た(図 4)。BL-14A は光源が Vertical Wiggler ですので, PF



図3 IP 回折計に取り付けた垂直型電動位置調整装置と PILATUS 1M (BL-8B)



図4 令和4年度末に増設した水平型電動位置調整器(BL-14A)

の他のビームラインと比べると高エネルギー側でフラック スが高く垂直偏光であることが特徴です。そのため,短 波長X線を選択し散乱面を水平方向にすることで(図4), より高分解能の実験が可能になります。今後はハードとソ フトの両面で整備を進め,東海キャンパスの中性子やミュ オンと相補的に活用してマルチプローブによる物性測定や 材料評価を促進していきます。また,MLFやJRR-3の中 性子散乱回折用二次元検出器装置群と解析のノウハウの共 有やソフトウェアの共同開発等についても検討していま す。

人事異動

放射光科学第一,第二研究系に関連する人事異動を報告 します。4/1付けで,表面科学研究部門の阪田薫穂さん(3 月まで博士研究員)が特任准教授として採用されるととも に,加藤かざしさん(筑波大学)が構造生物学研究部門の 博士研究員として,藤津悟さん(東京工業大学)が固体物 理学研究部門の研究員として,それぞれ着任されました。 また,量子ビーム連携研究センターのAHMED,Rezwanさ ん(博士研究員)が,低速陽電子実験施設の博士研究員と して,改めて採用されました。一方,表面科学研究部門の 北村未歩さん(助教)が量子科学技術研究開発機構に,固 体物理学研究部門の山浦淳一さん(研究員)が東京大学に, それぞれ転出されました。新しい職場・立場でのますます の活躍を期待しています。

はじめに

低速陽電子実験施設(Slow Positron Facility, SPF)では, 専用リニアック(~ 50 MeV,~ 550 W)で加速された電子 ビームを用いて生成した高強度低速陽電子ビームを共同利 用実験に供給しています。物質最表面および表面直下の原 子配列, 陽電子やポジトロニウム (Ps), Ps 負イオンとい ったエキゾチック粒子の基礎物理実験や、それらの粒子と 物質との相互作用の解明を目的に、全反射高速陽電子回折 (TRHEPD, トレプト), 低速陽電子回折 (LEPD, レプト), 汎用ステーションにおける実験(現在は Ps のレーザー冷 却実験を実施中), Ps 飛行時間(Ps-TOF)測定実験などを 行っています。専用リニアックの管理・運転は、加速器研 究施設第5研究系によってなされ、低速陽電子生成部から 下流側の管理・運転は物構研 PF と SPF によってなされて います。共同利用は放射光共同利用実験の一環として行っ ており、2022 年度の共同利用実施課題数は 14 課題、共同 利用実人数は42名,ユーザー実験の配分時間は3,456時 間でした。

ビームラインの状況

未整備だった SPF2 次ビームラインの真空インターロッ クの導入が,放射光実験施設基盤技術部門のインターロッ クチームにより 2020 年度に着手され,2022 年度には計画 した全ての整備が完了して運用が開始されました。

PF で進められてきた漏電対策を参考に,SPF でも漏電 遮断器の活用による漏電対策の導入を開始しました。

ビームモニター用に利用していたアナログカメラの LAN カメラへの更新を進めています。必要となる仕様を 見たすスイッチングハブや LAN ケーブルの導入を進め, 運用を開始しました。今後は,遠隔操作への対応の検討を 進めていく必要があります。

低速陽電子ビームのパルス幅1 µs を数百 µs から 50 Hz の繰り返しの上限の 20 ms 付近まで伸長するパルスストレ ッチャーは,既に 5 keV で運用され,多重検出を許さない 検出器での LEPD 実験を可能としています。このシステム を,15 keV でビームを輸送している TRHEPD に対応させ るため,2022 年度は試験電極の設計および製作を進めま した。2023 年度の夏には高電圧対応のバルス電源を製作・ 導入して試験する予定で,2024 年度の以降の適切なタイ ミングでのビームラインへの導入を検討しています。

各ステーションの状況

現在, SPF には4つのステーションが稼働しています。 地階テストホールの SPF-A3, SPF-A4と,地上階クライス トロンギャラリー実験室の SPF-B1, SPF-B2 です。

SPF-A3の全反射高速陽電子回折(TRHEPD,トレプト)

ステーションでは,表面構造解析の共同利用実験が行われ ており,Cu(111) 基板上に大面積で成長させた二次元ホウ 素マテリアルが,1次元原子鎖が並んだ二次元ホウ化銅化 合物を形成していることが確認されました。

SPF-A4の低速陽電子回折(LEPD,レプト)ステーショ ンでは,既にLEPDパターンの取得に成功していましたが, 基本的な実験環境の整備を加えて桁違いの回折強度が得ら れるようになり,構造解析に必要なデータを表面が汚染さ れる前に取得できることをCu(001)表面で確認しました。 さらに,LEPDステーションで作成した試料をPFで開発 された超高真空搬送容器でPFのBL-13Bに搬送し,角度 分解光電子分光(ARPES)実験にも成功しています。今 後は実際にLEPDによる構造解析を進め,表面構造(低速 陽電子)と電子状態(放射光)のマルチプローブ実験を推 進していくことを計画しています。

SPF-B1 の汎用ステーションでは、ポジトロニウムのレ ーザー冷却の共同利用実験が行われています。

SPF-B2 のポジトロニウム飛行時間法(Ps-TOF)ステー ションでは,試料表面からのPs放出のエネルギー分布を 通じての表面研究の共同利用実験が行われています。現在, 試料を冷却しながらのPs-TOF測定を可能とするための実 験ステーションの改造が行われています。

その他

2 次元物質の構造決定に用いられる複数の先端量子ビー ム計測技術向けの汎用データ解析ソフトウェア "2DMAT (ツーディマット)"において、並列モンテカルロ型ベイズ 推定などの解析手法を駆使して、TRHEPDの複雑なデー タ構造の中に潜む「真の解」(= 正しい原子配列)を効率 的に高信頼に見つけ出すことが可能となりました。X線回 折や電子回折など他の量子ビーム計測技術にも適用できる ように拡張されており、将来的には、それら測定データ を相補的に解析することも検討しています。また、決定 した表面構造の情報を用いて第1原理計算(QUANTUM EXPRESSO)による電子状態の計算も可能です。

人事異動

CIQus 博士研究員だった Rezwan Ahmed 氏が, 2023 年 4 月より物構研の博士研究員として SPF での研究を開始す ることになりました。