

入射器の現状

加速器第五研究系研究主幹 惠郷博文
(2022年4月8日付け)

ご挨拶

古川和朗さんの後任として、4月1日付で加速器第五研究系研究主幹を拝命しました惠郷博文(えごう ひろやす)です。2017年4月に(財)高輝度光科学研究センターより高エネルギー加速器研究機構へ移籍し、第五研究系にて高周波加速の研究開発に従事しています。微力ながら、今後はSPring-8やKEK入射器での経験を活かして光源型蓄積リングと衝突型蓄積リングへ柔軟に対応できる電子陽電子入射器として更なる安定化や高度化を進めていく所存です。宜しくお願ひ申し上げます。

運転状況

1月中旬までの冬期メンテナンス作業(前号参照)を順調に完了し、2022年1月14日からRF電子銃や加速管群のRFコンディショニングを開始、1月31日からのPF運転に備えて1月17日より電子陽電子入射器の本格立ち上げを行いました。調整は順調に進み、2月4日からPF、低速陽電子ユーザーへの利用運転を開始しました。途中、3月10日からハイブリッド運転への切り替えに対応しながら、3月24日予定どおりに光源系加速器へのビーム入射を終了しました。SuperKEKBに対しては、1月24日からDR調整のためのRFコンディショニングを行い、2月21日よりメインリングへの入射を開始しました。

その後、運転は順調に進んでいましたが、2月に入るとトリガー信号抜けによるクライストロンRF出力停止やインターロックで運転がダウンする現象が発症、2月17日より頻発するようになりました。SuperKEKBビームゲートオープン直後に抜けることが多く、原因調査の結果、イベントシステム用光FANOUTボード(VME)の故障と判明、予備品と交換して復旧することができました。下流側光源加速器や測定器の運転、利用実験への影響が懸念されましたが、大きなトラブルにならなかったのは幸いでした。3月16日深夜23:34に発生した震度4の地震は、全クライストロン運転をダウンさせ、また、加速器収納トンネルの南端大型遮蔽扉のずれによるインターロックなどを誘発

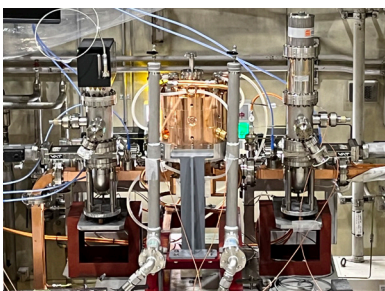


図1
新開発した球形空洞型パルス圧縮器(試作機)

させたため、入射器運転が停止しました。多くの機器は安全確認後に1時間程度で復旧できましたが、翌日、A3ユニットのクライストロンタンクに水漏れが発覚、RF出力が80%以上低下したため、交換作業が必要となりました。しかしながら、PF停止予定の3月24日まで運転継続の要望があり、B7ユニットによる代替加速などの調整を行うことによってビーム品質を損なうことなく運転を継続することができました。A3ユニットはPF運転終了後にクライストロン交換を行い、現在は通常運転に復帰しています。SuperKEKBに関しては、HER入射における入射効率の改善が急務の課題となっています。クライストロン出力位相や入射部セプトラムアングルの調整により、都度、ビーム品質の改善対応を行ってはいますが、悪化の原因について物理的な解釈を探究し、根治的対処を目指すべきと考えています。また、SuperKEKBリングの蓄積電流増強に伴うビーム寿命の短時間化などに対応するため、2バンチ運転における安定入射の課題も取り組んで参ります。今後はT(6S)実験を目論むため、運転開始から40年を経て劣化が進むビーム加速性能を回復することも大きな課題です。その解決法の一つとして、耐電力性能を向上させた新型Sバンド加速管に通常の2倍のマイクロ波を投入し、加速電圧を上げる方法があります。その運転には1ユニットあたり160MWのパルスマイクロ波電力増強が必要ですが、クライストロン増設とともに、近年開発が進んだ球形空洞型パルス圧縮器を応用します。試作機での高電力試験により良好な運転性能を持つことを確認した後、実機製作を進めてきました。今年の夏にインストールを行い、秋以降、エネルギー増強運転が期待されます。

人事異動

冒頭でお知らせしましたように加速器第五研究系主幹の古川和朗さんが3月末日付でご定年退官となりました。2012年から10年に渡って陣頭指揮を執り、五系スタッフを取りまとめて、震災後の復興やSuperKEKBリングへの低エミッタンス・高電荷ビーム入射の実現など数々の難局を乗り越えて来られました。これまでの素晴らしいご功績に感銘いたします。今後はシニアフェローとして入射器制御とビーム品質改善にご指導、ご鞭撻いただくこととなります。また、技師の三川勝彦さんも同日、ご定年退官されました。制御グループに属して、スクリーンモニターやレーザーアライメント機構、電荷計測装置においてPLC主体の制御システム構築に数多くご貢献いただきました。4月よりKEKを離れることになりましたが、新しい門出にあたり、ご多幸とご健勝をお祈り申し上げます。

PF リングの運転状況

図1に、PFリングにおける1月31日9:00～3月24日9:00までの蓄積電流値の推移を示す。1月31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4日9:00からの光軸確認後マルチバンチモードでのユーザ運転となった。3月8日～10日にハイブリッドモードへの切り替えを行い、3月10日9:00からユーザ運転を再開し、3月24日9:00に停止した。

ユーザ運転を開始した翌日2月5日14:23にデータチャンネルサーバー計算機の電源故障のため、各機器との送受信が途絶えてビームダンプとなった。古いサーバ計算機に交換し、各種設定・動作確認後21:35にユーザ運転を再開した。

2月24日3:05冷却水インターロックにより、リング4極電磁石電源QAAが停止して、ビームダンプとなった。原因はQAA電源で励磁されている4極電磁石Q262の冷

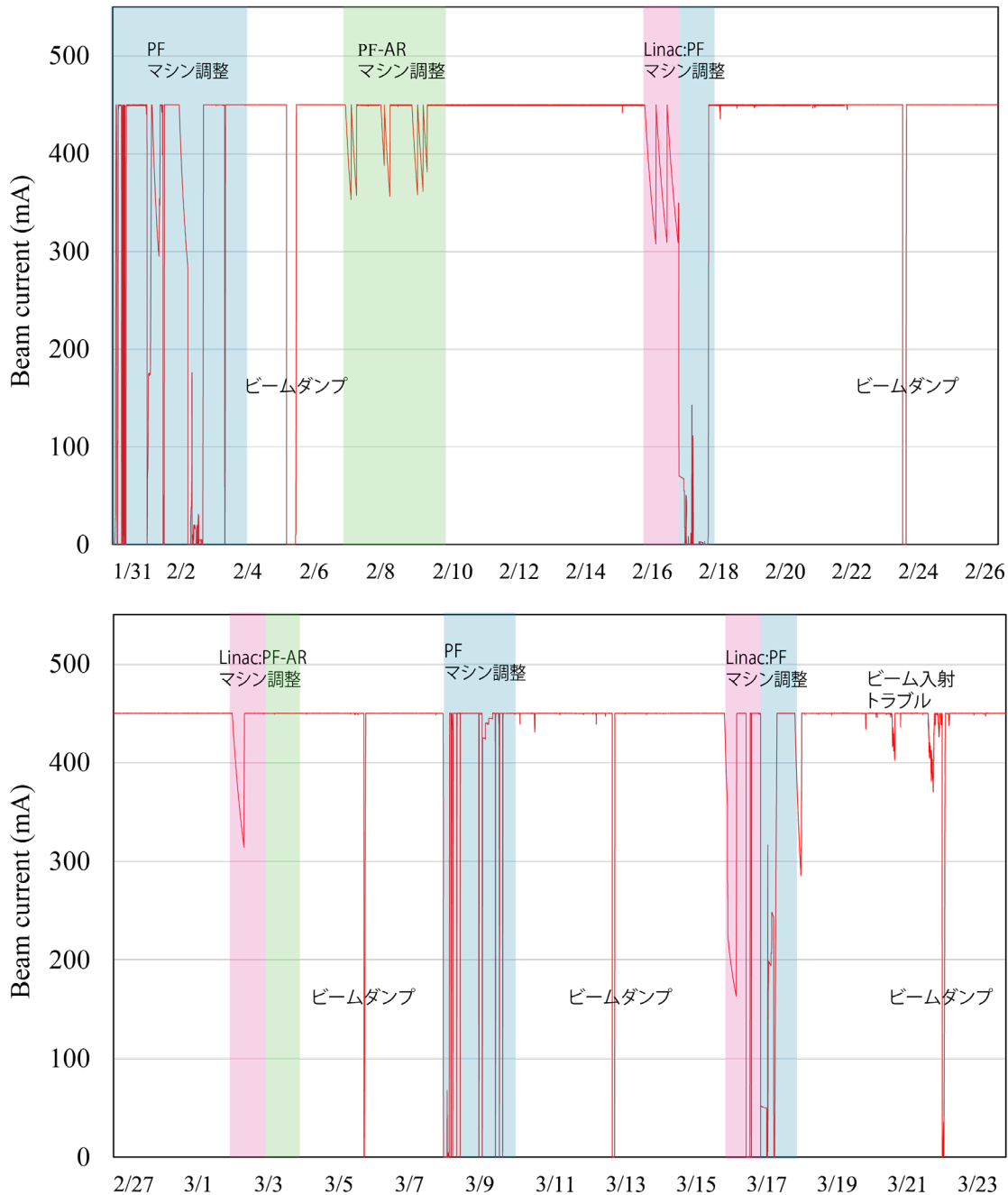


図1 PFリングにおける1月31日9:00から3月24日9:00までの蓄積電流値の推移

却水ストレーナの日詰まりにより、冷却水流量が低下したためと判明した。ストレーナを新品のものと交換して復旧した。

3月6日 2:54 ビームダンプが発生した。RF 空洞の1台に反射が起こったことが原因であった。すぐに RF 空洞を立ち上げて復旧した。

3月8日～10日のマシン調整日に、懸案となっていたキッカー電磁石 K2 のアブソーバ冷却水流量低下の件で、リングトンネルに入域して当該流量計を交換した。さらに、インターロックレベルを通常の70%から50%に再設定した。施設側 B 系冷却水システムバルブ調整およびポンプ吐出圧調整により流量低下の傾きは改善したが、アブソーバの構造上の問題もあると考えられるため、春の停止期間中に以前問題なく使用していたアブソーバと交換した。流量センサーにも付着物の堆積が見られており、化学分析により汚染源の特定を行っている。また、夏期停止期間中に B 系冷却水の入れ替えも予定している。

冬の停止期間中に設置した機器の影響と推察されているが、以前と同様のハイブリッドモードのフィルパターン(シングルバンチ+131マルチバンチ)では進行方向のビーム不安定性が抑えられなかった。試行錯誤の結果、シングルバンチ電流値 30 mA、シングルバンチとマルチバンチの間隔の距離と電流値(420 mA)は同様にして、マルチバンチ部分を2分割したようなフィルパターンにすると、進行方向のビーム不安定性が抑制されたことから、今期はこのフィルパターンでユーザ運転を実施することとした。

3月13日 4:26 に、キッカー電磁石 K4 で外部(オイルフロー)インターロックで電源が停止して、ビームダンプが発生した。インターロックリセットで復旧し、その後すぐに再入射が可能となり、6:18 ユーザ運転を再開した。運転再開後も特に異状や再発がないことから、今回は誤動

作と考えられるが、春の停止期間中に調査を行うこととした。3月16日 23:37 地震(つくば市:震度4)により、シールド扉のインターロックでビームダンプとなった。その他のインターロックも動作したが、いずれも故障・異常はなかった。リングトンネル内、光源棟・電源棟の点検を行い水漏れ等も問題ないことを確認して、ユーザ運転を再開した。ところが、再開後に進行方向のビーム不安定性が発生した。3月17日のマシン調整日にリングのゲッターポンプを作動させた結果、このビーム不安定性が抑制されたため、地震前と同じフィルパターンで運転継続することとした。3月20日頃からビーム入射不調となり、ビームが削れ450 mA を維持できなくなることが時折生じたが、キッカー電磁石のパラメータ等を調整することで対処した。PF リングは3月24日 9:00 に運転を停止して、春の停止期間となった。

PF-AR の運転状況

図2に、PF-AR における2月7日 9:00～3月7日 9:00 までの蓄積電流値の推移を示す。2月7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10日 9:00 からの光軸確認後ビームエネルギー 5 GeV でユーザ運転を開始した。2月22日～24日に、ビームエネルギーを 5 GeV から 6.5 GeV に切り替える作業を行い、2月24日 9:00 から光軸確認を行ってユーザ運転を再開し、3月7日 9:00 まで予定通り実施した。

2月27日 8:30 と3月3日 0:14 の2回 RF 空洞の反射インターロックが動作して、ビームダンプとなった。2回とも大きな問題はなくすぐに再立ち上げを行って、運転を再開した。これらのトラブル以外は比較的順調で、予定通り3月7日 9:00 で運転を停止した。

PF-AR は、3月7日 9:00 から停止期間となっているが、

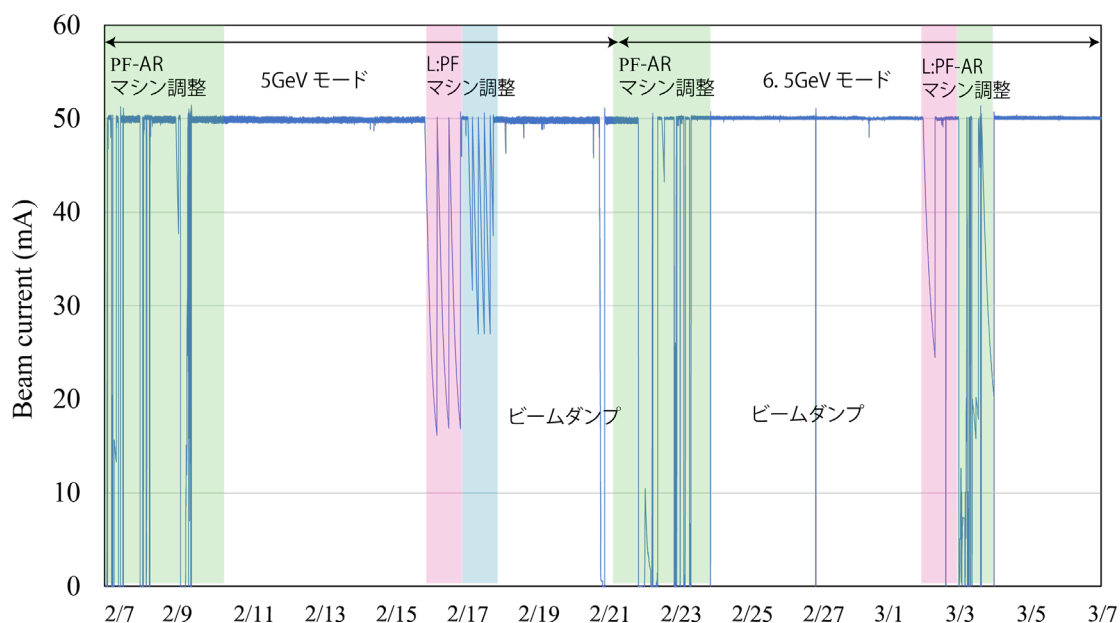


図2 PF-AR における2月7日 9:00 から3月7日 9:00 までの蓄積電流値の推移

この期間偏向電磁石電源の変圧器絶縁油交換を実施したので、次節で報告する。

PF-AR 偏向電磁石の電源変圧器絶縁油交換

春の停止期間となった3月17日より1週間をかけて、機構からの追加予算による補填を受け、劣化して緊急に処置が必要となった、PF-AR 偏向電磁石電源の変圧器絶縁油の交換が製造メーカーにより実施された。PF-AR 偏向電磁石電源は、リング全周の偏向電磁石を直列に励磁している1 MW級の直流電源である。PF-AR 西電源棟に設置されている。2006年のPF-AR 高度化改造計画において、TEMIC社により更新のための製造がおこなわれた電源である。電力源の1次側は6.6 kV降圧変圧器を屋外トランスヤードに2器備え、特別高圧変電所より直接420 Vに変換し利用している(図3)。絶縁油の劣化がいつから始まり進行していたのかは、通常5年ごとに行われるべき変圧器の保守点検が新造してから2011年の間まで行われておらず定かではないが、東北震災時に行われた変圧器点検において、絶縁油の $\tan \delta$ が5以下の規定値に対して、数値6を示していることが2019年の履歴調査で判明している。2019年の履歴調査以前に、この前兆を注意深く受け止めていればよかったのであるが、その時点では気づくことなく放置されていた状況であった。2019年に保守点検の実施が規程年数を大幅に超えて実施されていないことを憂慮し、2020年に2011年から10年ぶりに保守点検を実施したところ、絶縁油の劣化が更に進行し $\tan \delta$ 値が40以上にまで上昇し、履歴調査により過去の経緯が判明した次第である。通常であれば、屋外トランスヤードに置かれる変圧器は環境要件を加味し製造されており、絶縁

抵抗の劣化進行は20年経過後も良好であれば、体積低効率の変化率が0.5%以下/20yrの水準で推移するところであるが、この電源は新油では0.4 TΩm程度あった抵抗値が0.0040 TΩmと1/100まで低下し、絶縁油交換の規定値0.005 TΩmを下回っていた。劣化の発見が遅きに失せず、不純ガス量が規定値を超えるところまで到達していなかったため、絶縁破壊とならずに済んだのは幸いであった。2020年の劣化の判明後、夏前の加速器運転では、絶縁油の温度が90°Cを超える状態で高止まりしており、不活性ガスによる密閉容器システムであるため劣化の進行は抑制されているが、油の冷却能力の低下の結果、さらに熱劣化が進むことで絶縁抵抗を劣化させ、悪循環の結果最終的に絶縁破壊と容器の破裂へとつながる恐れがあった。

絶縁油の交換工事は変圧器2機分を順番に1機ずつ交換作業を行うことで進められた。1機あたりの絶縁油は鉱油(第4類第3石油類非水溶性)を1470 L/機使用しており、総油量は3000 L弱に達するところであるが、1機ずつ行うことで消防での立ち合いが必要となる本油種の2000 Lを超過しないため、消防への通知のみの手続きで作業が行われることとなった。また、油を抜く抜油、新油を投入する注油をそれぞれタンクローリーより直接やり取りし(図4)、作業完了後KEK所内より所外へ搬出されることで、可燃物保管の規定からも除外した作業となるように考慮された作業となっている。工事が設定された日程期間中、あいにくの雨、季節外れの雪の日が続いたため、抜油、注油には、新油に水分が入らないように慎重な作業が行われた。抜油、注油のいずれもタンク下部のコックより行われた。抜油では窒素置換法(通常なら大気開放であるが)を採用し、窒素置換により水分の混入を防ぎ、注油では、真空脱

2006年TEMIC社製 5盤面の大型電源
フル定格 1500A/1200V : 1.8MW

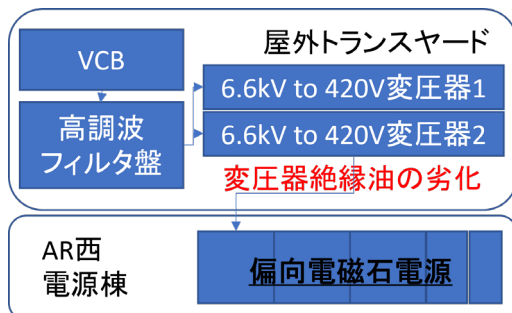


図3 PF-AR 偏向電磁石電源及び屋外変圧器とその構成



図4 新油注入のためのタンクローリー(上)、真空脱気装置、発電機の配置(下左)、真空脱気装置(下右)。



図5 絶縁耐圧試験機によるサンプリング検査

気装置を介しながら行った。せっかくの絶縁油の交換が無駄とならないように処置された。また注入された新油は、真空脱気循環を3循環、つまり1500 Lを3循環の4500 L分行い、徹底して絶縁油の油質の劣化要因を除くよう処置した。絶縁油の油質の管理は、現場に絶縁耐圧試験機を持ち込み、(1) タンクローリーで搬入された直後の生油の状態、(2) 真空脱気装置を介して注油した新油の状態、(3) 注入及び脱気循環、不活性ガス充填封止が完了し、液面調整後の1日寝かせた後の3種の状態で採油し耐圧試験を行い、規定値である50 kV絶縁耐圧を全ての状態でクリアした(図5)。窒素充填は真空容器内の大気混入を97%以下まで低減するように酸素モニターで監視しながら行った。

全ての交換作業を終え、1日後の油面が安定した時点で、総合動作試験となるPF-AR全周に渡る通電試験を行い問題なく運転を完了することができた。本来ならば変圧器容器の破損などを疑い容器の更新など劣化原因の排除を行うべきところであるが、今後の運転計画とコストバランスを勘案し、この交換で10年以上かけて進行する劣化には対応できると判断し、絶縁油交換の処置をとることとなった。この絶縁油交換により、偏向電磁石電源変圧器故障で長期運転停止に追い込まれる事態が回避され、PF-ARにおいて安定した放射光実験が継続できる要因の一つになったと考えている。

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状況

放射光実験施設(PF)では、現行の放射光源加速器から次世代放射光源加速器、電子加速器全般の幅広い応用用途を目指す、空芯型構造を採用した高速キッカー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)を考案し、製作技術開発と利用開発を同時に進めている。CCiPMは高速キッカーとしての開発をベースに、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ーとしての応用が計画され、現在2022年度夏期停止期間中の設置へ向けて順調に装置の製作を進めている。本報告では、その応用として世界で初となるCCiPMを用いたパルス8極入射技術の開発状況について報告する。

PFでは、パルス4極電磁石(Pulsed Quadrupole Magnet: PQM)から、パルス6極電磁石(Pulsed Sextupole Magnet:

PSM)に至るまで、パルス多極入射技術の先駆的な開発を進めてきている。すでに蓄積されているビームを揺らさずに入射させる手法は、放射光コーザからは入射時に光軸変動がないため、ビーム入射を意識しないことから「Transparent Top-Up injection」と表現され、次世代放射光源においてもその有用性が認識されている。この技術の精度をさらに向上させるため、PFで培われたPSM入射技術の知見を活かし、鉄芯型パルス電磁石入射の課題を克服する空芯型パルス電磁石の開発が開始されている。課題は、次の3点に絞られる。第1点目は、鉄芯で生じる渦電流磁場が蓄積ビームへ与える不整キックである。第2点目は、入射時に蓄積ビームを静的に保持するより広い磁場ゼロ領域の確保と入射ビームが通過する位置で強磁場を得るための水平磁場分布の高次曲線化である。第3点目は、セラミックス内面コーティングの渦電流磁場が蓄積ビームへ与える不整キックの低減である。これら3つの課題は、CCiPMにおいて全てが克服されると期待される。

空芯型の場合、コイルの配置と本数、そしてコイルへ流す電流の向きにより任意の磁場を形成できる。6極磁場より高次の8極磁場は、4本のコイルをビーム軌道平面から45度の位置に対称に配置し、平行電流を流すことで生成する。CCiPMは、この空芯型パルスマグネットを極めて簡潔に実現したものである。マグネットは、400 mmの真円筒セラミックスダクト壁面に設けた、長さ300 mm、幅4 mmの銅コイルを貫通溝に埋め込むことで完全に一体成型し、コイル間の絶縁構造と磁場応力、大気圧による真空応力、ビームロードによる熱応力に対して高精度かつ強固なコイル保持構造を有している(図6左写真)。コイルは貫通溝に収められているが、円筒内表面より突出することなく、貫通溝に収められることで、必要磁場からコイル位置を決めた時にセラミックスダクトの物理口径を最大化できる(図6右写真)。さらに、ボア径を小さくすることで、磁場強度も増強させることができることから、セラミックスダクトの口径をφ60 mm、φ40 mm、超小口径のφ30 mmと多様なバリエーションに対応する製作技術が確立している。空芯型であることで3つの課題のうち2つの課題が克服されており、CCiPMは空芯型パルスマグネットをいかに高精度に組み上げるかという課題に対する磁石構造の提案となっている。残されたビームインピーダンスを低減するためのダクト内面メタルコーティングについては、渦電流磁場の要素であり、透過磁場の減衰の原因となるため、

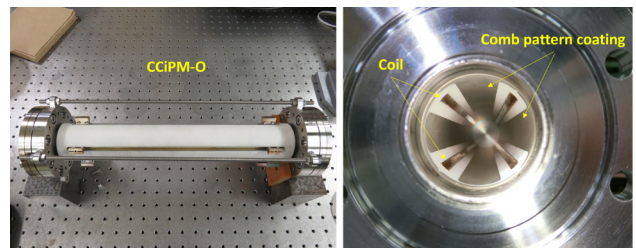


図6 実機CCiPM-O(Octupole)全体外観(左),内面構造写真(右)

CCiPM では内面コーティングに様々な太さの櫛歯形状を導入するパターン形状コーティングの技術が適用されている。

これらの新構造パルスマグネット製作技術、コーティング技術の開発が進み、2019年度にPFでは空芯型パルス8極電磁石(POM)、CCiPM-O(Octupole type CCiPM)のプロトタイプの製作に成功し、2020年度に実機が完成した。これに先立ち、2018年度からは2021年度のPFリングへの設置準備計画の検討が開始された。検討された内容は設置場所の検討、必要とされる蹴り角と許容される物理口径、システムの構築方法である。検討の結果、既設PSMシステムを入れ替える形で、パルス電源の再利用とともにシステムを流用することで費用を抑え、さらにφ40mmの口径を採用することでPFリングの物理口径を制限することなくPSMと同程度の蹴り角によるビーム入射が可能であると判断された。この検討結果を受けて、真空改造の設計が2つの観点から進められた。設置場所が上流をアンジュレーター#02の扁平ダクト、下流側をリング8角形状ダクトに挟まれる。片側水平アパーチャー34mm、片側垂直9mmのPSMから真円丸ダクトとなるCCiPM-Oをインピーダンスの観点から滑らかに変換接続する形状変換ダクトの検討、CCiPM-Oの上流偏向電磁石からの光アプゾバーの新設置と挿入深度の検討である。PSMの磁極長は300mmでセラミックスダクト長がフランジ間500mmとなっており、CCiPM-Oのコイル長300mmでセラミックスダクト長400mmとほぼ同一で幸いなことにキック点としては移動しない。2020年度には改造のための真空機器の準備が整った。これら準備と並行して昨年度の夏に行われた入射効率改善のためのPFセプタム老朽化更新に伴う入射点改造も重要な連携要素となっている。更新改造では、蓄積ビーム軌道と入射ビーム軌道を近づけることで、超伝導垂直ウィグラーや各種アンジュレーターなどの狭小物理口径を回避して、入射効率の改善へとつなげる計画が含まれている。同様に、改造前の入射点セプタム壁位置が21mmの場合、CCiPM-Oが物理口径の制限となる可能性があったが、更新改造は16mmとなっていることで回避されている。また、PSM扁平ダクトの垂直方向の狭小物理口径もCCiPM-Oで改善させることができ、Top-Up入射がバンブ入射からCCiPM-Oに移行できれば、バンブ入射における漏洩軌道問題、マルチターンキック問題などの解

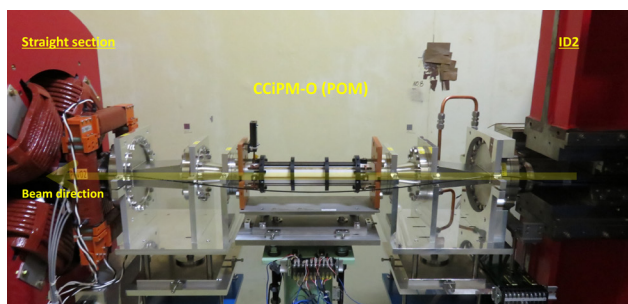


図7 北長直線部(B01-B02間)に設置されたCCiPM-O(外層補助コイルつき)

決へと結びつけることも可能と考えられており、PFでの改造、高度化の流れに連続性と運動性を有している。

2022年1月の停止期間中に、CCiPM-OがPFリングに設置された(図7)。設置アライメント誤差は、セオドライト、ティルティングレベルN3を使い、水平垂直方向の設置誤差を±20μm以内、回転誤差を100μrad以内に納めた。設置時に10⁻¹⁰Pa・m³/s台のスローリークのトラブルなどがあったが、リーク対処を実施して封止され、無事に設置が完了した。現在、立ち上げ調整期間を通じ、基礎データを取得するビームコミッションが進行中である。ビーム入射への運用には課題改善などを進めながら1年程度かかることを想定している。セラミックス内面櫛歯コーティングからの脱ガスもなく、順調に焼き出しが進みビーム寿命が延びている。450mAの蓄積ビームのマルチフィルモードでもビームインピーダンスによる発熱は50°C以下に抑えられており、不安定性は生じていない。通常キッカーダクトと同程度の発熱である。形状変換ダクトの発熱もない。CCiPMが世界で初めて放射光源リングにて運用を開始されたが、現時点では大きな問題がなく、将来の幅広い応用に道が開けたと考えている。

令和3年度の運転のまとめ

表1に平成21年度から令和3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8に示す。令和3年度は、ユーザ運転時間をここ数年の目標値であった3000時間の2割増となる3600時間に設定した。この目標値を実現すべく、年度当初リング運転時間4368時間(182日)ユーザ運転時間3744時間で計画したが、実際のユーザ運転時間は3720.8時間となった。故障時間は昨年度から大幅に減少して約23時間、故障率は約0.6%、平均故障間隔時間(MTBF)も約220時間となり、例年と同程度の値に回復するとともに、ユーザ運転時間3600時間の目標値を達成した。故障の内訳を調べてみると、令和3年度は制御・モニター関連のトラブルが約34%、電磁石関連が約22%であったが、RF関連による故障率が1.1%と非常に低く、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9にPF-ARの運転統計を示す。PF-ARも同様に目標値を2000時間から2割増の2400時間を目標値に設定し、年度当初のリング運転時間を2976時間(124日)、ユーザ運転時間2416時間確保するよう計画したが、実際のユーザ運転時間は2404.7時間となった。故障時間は昨年度に比べ大幅に減少し約11時間、故障率は約0.5%、平均故障間隔時間(MTBF)も約242時間となり、こちらも例年と同程度の値に回復するとともに、ユーザ運転時間2400時間の目標値を達成した。故障の内訳は、約60%が電磁石関連、約20%が制御・モニター関連、約18%がRF関連であった。電磁石関連の故障では、老朽化した電源の故障のほか、電磁石冷却水用ゴムホースからの水漏れが多発するようになってきていることから、ゴムホース交換を含めた対策を検討している。

表1 平成21年度～令和3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)	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	624.0	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

表2 平成21年度～令和3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

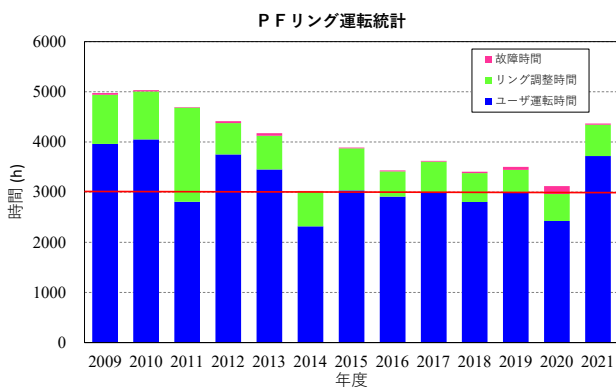


図8 平成21年度～令和3年度までの13年間のPFリングの運転統計の棒グラフ

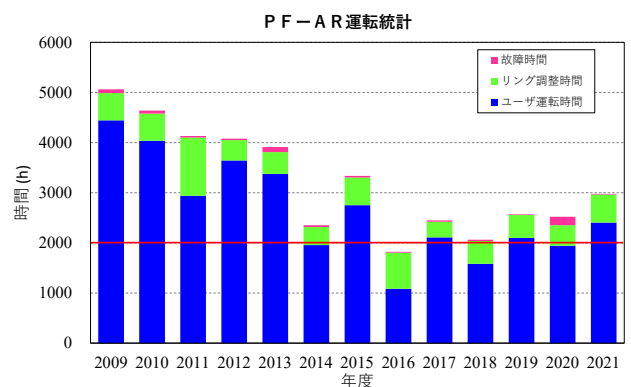


図9 平成21年度～令和3年度までの13年間のPF-ARの運転統計の棒グラフ

加速器第 6 研究系内の人の動きについて

光源第 3 グループの谷本育律准教授が、2 月 1 日付けで教授に昇任されました。谷本さんには、引き続き真空システムの保守・維持・管理を担当して頂くとともに、新放射光源計画における開発研究を中心的な立場で担って頂くことを期待しています。

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いました齊藤寛峻さんが、4 月 1 日付けで特別助教として光源第 7 グループに配属されました。齊藤さんには挿入光源の保守・維持・管理ならびに関連する開発研究を行って頂きます。

光源第 1 グループの島田美帆研究機関講師と光源第 3 グループの山本将博准教授が、4 月 1 日付けで応用超伝導加速器イノベーションセンターに異動になりました。お二人は、超伝導利用推進グループに所属し、コンパクト ERL を中心とした産業応用等の利用推進の中核的な役割を担いますが、新放射光源計画における超伝導リニアックの開発研究において協力して頂くことも期待しています。

2021年8月号の放射光実験施設の現状の原稿で予告した通り、本号では「多目的時間分解軟X線計測法の開発」について紹介します。

「多目的時間分解軟X線計測法の開発」 (プロジェクト責任者：足立純一)

放射光の特徴の1つは、時間幅100ピコ秒弱のパルス性を持つことです。PFリングでは、パルス性活用のため、孤立大電荷バンチの利用が可能なハイブリッド(HB)モード運転を各期に実施しています。本プロジェクトでは、パルス性を活用した時間分解軟X線計測が活発に行われるようになるよう、計測機器の整備と実証実験を進めています。

本プロジェクトは2019年9月頃から本格的に活動を開始しました。本プロジェクトでは、軟X線のユーザーを増やすこと、多様な試料や検出法を容易に試せるようにすることを目的として、差動排気システムの開発と多目的実験槽の準備を進めています。並行して、時間分解計測に必要な信号記録装置などの整備を進めています。そして、本プロジェクトに対して認められたPF-S型課題のビームタイムを利用して、サブマイクロ秒からピコ秒領域での時間分解軟X線吸収計測の実証実験に取り組んでいます。

1) 差動排気システム

真空紫外線(VUV)・軟X線(SX)は大気によって吸収されるため、この領域の放射光を用いる実験では、ビームライン(BL)だけでなく、試料から検出器まで、大気を除いた環境を作る必要があります。VUV・SXを利用した多様な測定を展開するため、試料槽側の真空度が障害とならないようにする差動排気システムの開発を行っています。大気圧He環境の試料槽と超高真空BLの大きな圧力差を克服することが必要です。そのような差動排気システムは、国内では、SPring-8において実装されています。これを参考に、条件最適化のためにアパチャー部を取り替えやすい形状とした、可搬型の差動排気システムを製作しました。

この可搬型差動排気システムについて、動作検証を行いました。アンジュレータビームラインのBL-13Aでは、90%以上の光量を通過させていることを確認しました。一方、現在のところ、偏向部ビームラインのBL-11Aでは、十分な光量を通過させることができていません。大気圧He環境の利用の際に、多量のHeが消費されることのないよう、Heを還流させることも試みています。消費量を減らせることは確認できていますが、現在のところ、高純度を保つことはできておらず、今後の課題となっています。

2) 多目的軟X線実験槽

フリーポートで利用する実験槽の準備を進めています(図1)。差動排気システムと組み合わせて大気圧He環境下での計測や、超高真空を必要としない試料の計測を目的としています。標準構成として、試料位置合わせ用に自動ステージを設置し、試料や検出器の交換を容易にするため、Oリング封止のアクセス扉を備えた仕様としています。検出器として、後述の高速フォトダイオード以外にも、軟X線用シリコンドリフト検出器やチャンネル電子増倍管を利用できるように準備を進めています。

3) 信号処理・記録システム

HBモードの孤立大電荷バンチからのパルス光を利用する方法は、大きく2つに分けられます。1つは、孤立バンチ部の放射光を切り出して、強いパルス放射光による信号だけが検出器に入るようにする測定法です。もう1つは、孤立バンチ部の放射光による信号を、バンチ列からの放射光による信号から識別して記録する方法です。

記録すべき信号が電荷量であるときには、高速の検出器だけでなく記録に適した機器が必要になります。孤立バンチ部の放射光による信号の記録のため、ボックスカー積分器付きロックインアンプ(Boxcar)を準備しました。PFリングと同期した信号波形を平均化でき、微弱な信号であってもノイズに埋もれることなくデータが得られます。

400 eVの光が 3×10^8 photons/sec程度(シリコンフォトダイオードで5 nA程度)得られる条件なら、Boxcarを用いれば孤立バンチ光による信号をノイズに埋もれることなく記録できています。高速フォトダイオード、バイアスティー、低リップル高圧電源の組み合わせにより計測できることが実証されました。

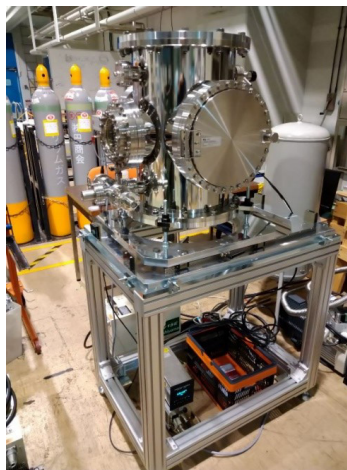


図1 多目的軟X線実験槽の外観。PF実験準備棟ホールで仮組みをして到達真空度の確認をしている。

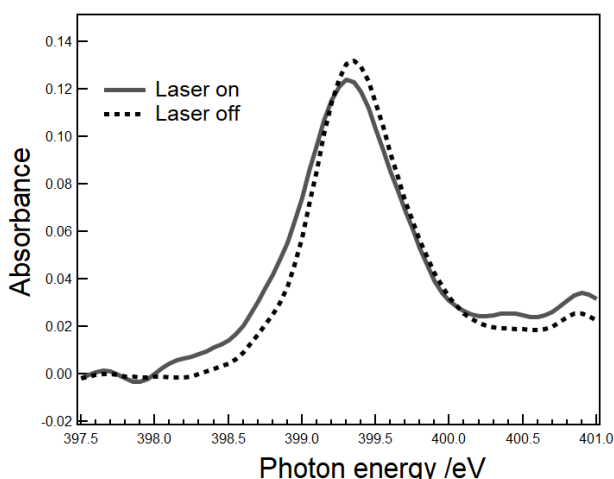


図2 鉄(II)フェナントロリン錯体水溶液の窒素 K 吸収端時間分解軟 X 線吸収スペクトル。515 nm のパルスレーザー照射時(実線)と照射後約 0.13 msec (破線)で有意な変化を確認できた。後者では、レーザー照射による励起状態はほぼ緩和している。

4) レーザー pump - 放射光 probe による時間分解軟 X 線吸収スペクトルの測定例

軟 X 線による溶液試料の吸収計測が可能になってきています。時間分解軟 X 線計測により、液相で起きる光化学反応の情報を得ることを目指しています。

上述の検出システムを活用して、溶液試料に対するレーザー pump - 放射光 probe による時間分解軟 X 線吸収スペクトル (SX-XAS) 計測を透過法で実施しました。PF-AR において、時間分解硬 X 線吸収スペクトルの測定がすでに行われている鉄(II)フェナントロリン錯体水溶液を試料としました。溶液セルを用いる光化学実験の問題点が顕在化し、実験条件の設定にかなり時間を要しましたが、515 nm パルスレーザーと同期した窒素 K 吸収端の時間分解 SX-XAS の測定に成功しました(図2)。現状では、信号強度が弱いため、軟 X 線に十分な感度を持つと期待されるアバランシェフォトダイオードを導入して測定の効率化を図る予定です。

軟 X 線吸収計測を試してみたい方、マイクロ秒以下の時間分解能での軟 X 線計測に興味がある方は、プロジェクト責任者までご連絡ください。3) で紹介した信号処理・記録システムについても、利用相談に応じます。

運転・共同利用関係

2022 年度第 1 期の運転ですが、PF は 5 月 6 日に、PF-AR は 5 月 12 日に運転を開始する予定になっています。PF は 7 月 8 日まで、PF-AR は 7 月 1 日まで運転を続けます。PF のハイブリッドモードは 6 月 14 日から最後までです。PF-AR は 5 GeV で運転を開始して、6 月 10 日以降を 6.5 GeV で運転します。2022 年度第 2 期の運転は、6 月上旬ごろに決定する予定です。

PF-PAC の全体会議が 3 月 23 日に Web 会議方式で開催され、開発研究多機能ビームラインの建設に関連した BL-11 と BL-12 の再整備計画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、奥山大輔さんが放射光実験施設・測定装置部門の准教授に着任しました。回折・散乱の測定手法グループを担当します。また、同日付で、成田千春さんが技術員に着任しました。3 月に東北大学の修士課程を修了、基盤技術部門に採用され、制御系チームのメンバーとして活動を開始しました。光学系チームを兼任します。3 年間博士研究員を務めた西村龍太郎さんは、4 月 1 日付で、特別技術専門職に異動しました。3 月 31 日付で、運営部門長の兵藤一行教授が定年となりました。引き続き、放射光実験施設の特別教授として勤務しています。定年の兵藤さんに代わり、4 月 1 日付で、放射光実験施設・運営部門の部門長・特別教授に北島義典さんが着任しました。

はじめに

2019年4月にPF関係の組織改編を行い、放射光科学第一研究系に表面科学研究部門と固体物理学研究部門、放射光科学第二研究系に材料科学研究部門と構造生物学研究部門が誕生して約3年が経ちました。私は3年前のPFニュースでも本欄を執筆しましたが、そこには、「研究系は、ある物質群や現象(サイエンス)をターゲットとし、放射光はもちろん、低速陽電子、中性子、ミュオンなどの様々な手法を駆使して物質・生命科学を先導することをミッションとしています。もちろん、単にユーザーとして施設を利用するのではなく、施設を有する研究所としての利点を最大限に活用し、研究対象をより深く探究するために、実験施設や光源系のメンバーと協力して、サイエンス・ドリブンで新たな手法開発を行うことも重要なミッションとなります」と書かれています。今後も、物構研の研究系ならではの活動を展開していきたいと考えています。

さて、「研究対象をより深く探究する」ためには、もちろん既存の放射光施設において測定手法や解析方法を高度化していくことも大切ですが、その延長線上には必然的に、光源自体の高度化があります。実際、ここ数年国内外で次々に建設が進んでいる高輝度光源によって、より微小な領域を、より精密に観察することが可能になり、様々なサイエンスが大きく発展することが期待されます。一方で物質・生命科学においては、輝度の向上だけでは解決できない問題もたくさんあり、既存の常識にとらわれない全く新しいコンセプトの光源や実験方法を創り出していくことが重要です。以下、PFの将来計画において、どのような新しいサイエンスの展開が期待できるかを考えてみたいと思います。

PFの将来計画における新しい利用研究への期待

PFシンポジウムなどでも紹介があったように、PFでは将来計画として「ハイブリッドリング」を掲げています。この新しい放射光源のコンセプトについては、1月のプレスリリースをご覧ください(<https://www.kek.jp/wp-content/uploads/2022/01/pr20220105.pdf>)。ハイブリッドリングは蓄積リングと超伝導線形加速器からなり、蓄積ビームからの高輝度放射光(SRビーム;約10ps幅のパルス光が2ns程度の間隔で得られる、連続光に近いビーム)に加えて、超伝導線形加速器からのビームを一度だけリングに通すことで得られる超短パルス光(SPビーム;パルス幅は最短で50fs程度)を同時に使用できます(もちろんSRビームとSPビームを別々に利用することもできます)。このような2種類のビームそれぞれは、現在でも別々の施設に行けば使うことができますが、これらを同じ試料に対して同時に使うことで、どのようなサイエンスが切り拓かれる

のか、PF内での議論をもとに、一例を紹介します。

これまで自由電子レーザーのような短パルス光源において、10fsオーダーの時間分解能で、超高速現象の観察が行われてきました(数10ps程度より遅い現象についてはPF-ARなどの蓄積リング型光源も利用されています)。そうした研究では主に、可視光レーザーとパルスX線の組み合わせによるポンプ&プローブ法を用いて、光による励起の過程や、それに引き続いて起こる化学結合の切断などが観察されています。ご承知の通り、ポンプ&プローブ法では同じ現象が何度も繰り返すことが必須であり、ポンプ光(主に可視光)とプローブ光(X線)の時間差を変えながら光励起と測定を繰り返すことで時間分解測定を実現しています。一方で、高精度で何度も繰り返すのが難しい現象、例えば化学反応に対しては、主に蓄積リング型の放射光を用いたリアルタイムその場観察が行われています。観察の時間分解能は幅広く、数分の場合もあればミリ秒、さらにはマイクロ秒といった例もあります。こういった時間スケールは、反応の素過程には遠く及びませんが、比較的安定な反応中間体を同定したり、化学種の量が反応の進行とともにどのように変化していくかを調べたりすることによって、反応機構の解明に極めて重要な役割を果たしてきました。さらに最近では、時間分解に加えて空間分解も同時に実現することによって、不均一かつダイナミックに進行する反応を観察することが可能になってきており、より詳細な反応機構の解明が進んでいます。

このように、短い時間スケールでの繰り返し現象の観察と、比較的長い時間スケールでの非繰り返し現象の観察は、それぞれに発展してきており、たくさんの知見が得られています。さらに、PFの将来計画では、現在のPFをはるかに上回る性能のSRビームによって、後者における時間・空間分解能の大幅な向上が見込まれます。ところが、このように大きく異なる時間スケールで起こる現象を互いに結び付ける研究は、思いのほか進んでいません。例えば光照射によって化学反応を促進する光触媒において、ある実験によって光照射に伴う励起状態を観察されたとしても、その励起状態が、別の実験で比較的長い時間スケールで観察される化学反応に関与しているかどうかは、必ずしも自明ではありません。ひょっとしたら、化学反応には全くつながらない励起状態を観測しているだけかもしれないのです。したがって、一つの試料に対して、同じ時に起こる異なる現象を、空間情報も含めて一度に観察することが極めて重要になります。ハイブリッドリングにおいて、SPビームとSRビームを組み合わせることで、異なる時間スケールの現象を空間的な動きも含めた一連の過程として観察することができれば、全体としての化学反応機構の解明が飛躍的に進むと期待されます。この例のように、光触媒に

において、光照射によってどこにどのような励起種が生成し、それがどのように化学反応につながっていくのかを明らかにすることは、ハイブリッドリングならではのユニークな研究の一つになるでしょう。その他にも、SP ビームをポンプ光、SR ビームをプローブ光とするポンプ&プローブ測定など、様々な可能性が考えられますので、読者の皆さんにも是非、ハイブリッドリングを用いてどのようなサイエンスが展開できるか、夢を膨らませていただければ幸いです。

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。構造生物学研究部門の特任准教授の安達成彦さんと学振特別研究員の伊藤道俊さん、固体物理学研究部門の研究員の山口辰威さん、そして量子ビーム連携研究センターの特任助教の羽合孝文さん、研究員の齊藤耕太郎さんと塚原宙さんが、3/31 に転出されました。新しい職場での今後のますますの活躍を期待しています。なお、材料科学研究部門では、特別助教（テニュアトラック）もしくは助教（定年制）1名の公募を実施しています（6/15 〆切）。興味のある方は是非、応募をご検討ください。

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, < 600 W) で加速された電子ビームで生成した世界最高クラスの高強度低速陽電子ビームを共同利用に供しています。陽電子を用いた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として、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) 測定などの研究を進めています。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、2021年度の共同利用実施課題数は18課題、共同利用実人数は37名、ユーザー実験の配分時間は3992時間でした。なお、ビームタイム毎に、1つのユーザーグループが使用するステーションだけにビームを供給しています。

ビームラインの状況

未整備だった SPF 二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年度より開始されています。初年度に既存のリモートバルブのみを利用するインターロックシステムを導入したの続き、2021年度は、B1F/1F分岐後に各1台、SPF-B1とSPF-B2の実験ステーション直上流に各1台の計4台のゲートバルブを手動式からリモート制御式に交換し、冬の停止期間にインターロックシステムを組み込んで、第3期より運用を開始しました。

ビーム輸送コイル用の電源のうち、老朽化およびリモート制御に難のある電源26台を新しい電源に置き換えると共に、放射光実験施設基盤技術部門の制御系チームによって新電源のリモート制御の整備が行なわれ、運用を開始しました。ビームステアリング用の両極性電源30台も老朽化により故障が頻発して交換が必要ですが、故障した場合には加速器第5研究系から不要になった同じ仕様の両極性電源をご支給いただくことで当面は対処することになりました。

これまで整備を進めてきた TRHEPD 用試料準備チャンバーに、多くの研究室で試料調整に使われている LEED/AES 装置を新たに導入し、共同利用ユーザーによる使用が開始されました。

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 of 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、表面構造解析に関する共同利用実験が行なわれており、準結晶2層グラフェンの層間隔の決定などの成果が出ています。

SPF-A4の低速陽電子回折 (LEPD, レプト) ステーションでは、LEPD パターンの取得に成功していましたが、実際の構造解析に欠かせない迅速な試料冷却システムと試料角度を再現性高く微調整できる機構を供えたマニピュレータや、標準的な表面試料作成環境の整備を進めています。また、放射光実験施設 (PF) の角度分解光電子分光 (ARPES) 実験ステーション (BL-2A, BL-13B) との間での試料ホルダの仕様の共通化にも対応した、冷却にも配慮した通電加熱タイプの試料ホルダも新たに設計し、導入しました。

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。

その他

星建夫客員准教授 (鳥取大) らによって TRHEPD を対象に開発が開始された表面構造解析のフレームワークが、東京大学物性研究所計算物質科学研究センターで「2DMAT」として公開されています*。現在は表面 X 線回折 (SXRD) や LEED/LEPD にも対応しており、講習会なども開催しています。2DMAT では、大域探索を行って最適候補を選び、各候補について局所探索を行うことができ、現実的な計算時間で絶対的な最適解 (R 因子最小) を自動的に見つけます。さらに、ビームがプローブする深さ (解析すべき深さ) と、得られた原子座標の不確かさを定量的に知ることができます。

* <https://www.pasums.issp.u-tokyo.ac.jp/2dmat/>

人事異動

2021年度から変化はありません。