

入射器の現状

加速器第五研究系研究主幹 古川和朗
(2020年5月11日付け)

概要

2020年度夏前の入射器運転に関して、残念ながら放射光施設のビーム運用は行われなかったことになったが、SuperKEKB衝突実験の運用については、実験グループ Belle II が一つだけであるため、国際共同研究者による遠隔監視とつくばに滞在する研究者による運用によって実験の続行が可能となっており、ビーム入射を継続している。昨年中の SuperKEKB フェーズ3の初期運転において、Belle II 検出器へのビーム・バックグラウンドについての理解が進み、さらに秋の運用においては、衝突点の垂直方向のベータ関数が設計値の3倍まで近づく1mmにまで絞られてきたため、衝突効率、ルミノシティが向上している。今年に入ってから、陽電子と、引き続いて電子についてもクラブ・ウエスト衝突を試み、衝突の安定度を向上させることに成功している。なお、クラブ・ウエストは、より小さい衝突点ベータ関数に向けて、今後とも適用できるかどうかはまだわからない。

同時に入射器に対しては、精度の高い衝突の維持のために、エミッタンスやエネルギー幅など入射ビームについての品質の要求が厳しくなっている。さらに、蓄積ビームの寿命が電子で30分程度、陽電子で10分程度と短くなっているため、入射ビームの量についても徐々に要求が高まっている。これらの要求に対応するための入射器の性能向上も期待されており、新型コロナウイルスの感染対策も取りながらも、装置やビーム性能の日々の改善や、夏の停止期間における改造の準備作業も進めているところである。例

えば、一昨年から進めてきた加速管の更新計画についても、製造された加速管の大電力コンディショニングを始めており、夏の停止期間に一部の交換が可能になると思われる。

入射器 20 万時間運転

KEK 電子陽電子入射器は、1982年からフォトンファクトリー (PF) 放射光実験施設への電子入射運転を始めた。以来、TRISTAN, PF-AR, KEKB, SuperKEKB への入射を重ね、運転期間は39年目を迎えている。その総運転時間(加速管への高電界印加時間)について5月7日の午前8時50分03秒に20万時間が達成された。先輩方の積み上げて来られた運転成果を引き継いで、20万時間運転の節目を迎えられたことは、我々が大変誇りに思うところである(図1)。新型コロナウイルスなどのために特に行事は予定されなかったが、ビデオ会議を通してモーニング・コーヒーで乾杯し、祝うことができた。

電子陽電子入射器は1978年に建設を開始し、上にも書いたとおり、1982年からPFへの2.5 GeV 電子の入射を開始した。並行して1981年にTRISTAN電子陽電子コライダー計画が認められたため、陽電子生成用入射器を建設し、1986年からTRISTANへの2.5 GeV 電子・陽電子の入射を開始した。また、1992年から低速陽電子施設も運用を始めた。さらに、1998年からはKEKB電子陽電子非対称エネルギーコライダーへの8 GeV 電子と3.5 GeV 陽電子の入射を行い、2バンチ入射や連続入射などのさまざまな加速器技術の開発が行われた。東日本大震災による大きな

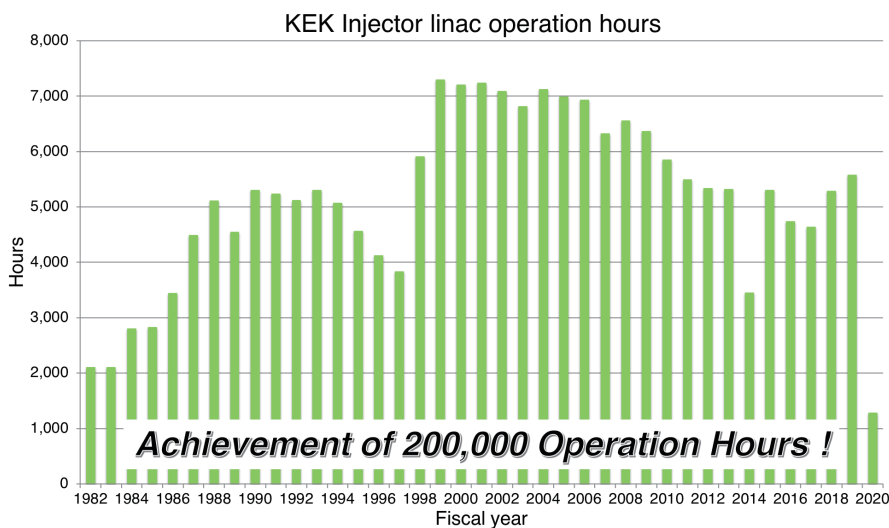


図1 1982年から積み上げた運転時間。足し合わせると20万時間になる。

被災があったが、その後大幅な改造を経て 2016 年からは SuperKEKB への 7 GeV 電子と 4 GeV 陽電子の入射を続けており、2019 年からは PF と PF-AR 両放射光施設を含めた 4 リング同時入射により、飛躍的な実験効率向上に貢献している。

入射器の体制

4 月から、岡安雄一氏が高輝度光科学研究センター (SPring-8) から 5 系のマグネット・真空グループへ異動・配属になり、岡安氏は電磁石・真空だけでなく、アライメントやビームモニターも含めた幅広い経験を積まれているので、今後入射器の性能向上や運転に活躍していただけると期待している。また、2006 年から 5 系制御グループに所属していた倉品美帆氏が、6 系に異動した。新しい職場でさらに活躍していただきたいと応援している。さらに、昨年度後半からは、中山久義氏と染谷宏彦氏に 5 系の研究開発に参加していただき、既に電子入射機構や磁場測定などの重要な分野で成果を挙げていただいている。

光源リングの運転状況

図1に、PFリングにおける立ち上げ日2月3日9:00から3月9日9:00まで約1ヶ月の蓄積電流値の推移を示す。リングの立ち上げ調整は順調に進み、2月5日15:00から予備光軸確認、2月6日9:00から光軸確認を実施した後、ユーザ運転開始となった。2月のユーザ運転はビームダンプを伴う大きなトラブルはなく概ね順調に実施されている。2月27日9:00までは、蓄積電流値450 mAでのマルチバンチモード(250バンチ)での運転を行い、2月27日にハイブリッドモードへの切り替えを行った。ハイブリッドモードにおける蓄積電流値は、シングルバンチ部分30 mAとマルチバンチ部分420 mA(131バンチ)の合計450 mAで行っている。この期間ビームダンプとはならなかったものの、チャンネルをクローズした事象が1件、ビームを削った事象が2件発生した。

チャンネルクローズケース1:2月17日軌道フィードバック用電磁石電源PV02の電流値の上昇が確認された。そのままにしておくと、最大電流値まで到達することが予想されたため、当日15:00にチャンネルをクローズして、フィードバック用電磁石電源の電流値をゼロにする作業を行った。30分程度の作業でユーザ運転を再開した。

ビームを削ったケース1:2月18日16:53に蓄積電流値が約10 mAほど削れる現象が発生した。地下機械室でセラミック一体型キッカーの作業を行っていたときに、入射キッカーの充電トリガーラインにノイズが入り、K4キッカーのみが誤動作したことにより、ビームを削ったことが調査の結果判明した。この誤動作は一度しか発生していな

いが、何らかの対策を施して再発防止に努めることとした。

ビームを削ったケース2:2月22日6:42 K4キッカー電磁石電源のインターロックが動作し、電源がOFFした。その結果、蓄積ビームが約80 mA削れるという事象が発生した。ビームが削れる現象に気がつき、手で連続入射を中断した。K4キッカーのインターロックの動作によるものと判明し、インターロックをリセットして、電源の再立ち上げを行なったのち、連続入射を再開した。ただし、動作したインターロックはOilflowによるもので、滅多に出ないインターロックであり、停止期間中に調査を行うこととした。このインターロックによる誤動作は今のところ再発していない。また、キッカー電磁石でインターロックが働いて電源がOFFした場合、手で連続入射を停止するのではなく、自動で直ちに停止するよう対策を施すこととした。

PFリングのユーザ運転は、3月9日9:00で予定通り運転を停止して、春の停止期間となった。

図2に、PF-ARにおける2月10日9:00から2月25日9:00までの蓄積電流値の推移を示す。PF-ARは、2月6日9:00にリングを立ち入り制限にして、電磁石等の通電試験および高周波加速空洞のエージング作業を行ない、2月10日9:00からリングの立ち上げ調整作業を開始した。立ち上げ時はビームエネルギーを6.5 GeVに設定して、リングの機器が正常に動作していることを確認するとともに、機器の温度が安定するのを待ち、翌日ビームエネルギーの設定を5 GeVに切り替える作業を行った。5 GeV運転の場合、立ち上げから3日間かかるものの、より安定にユーザ運転

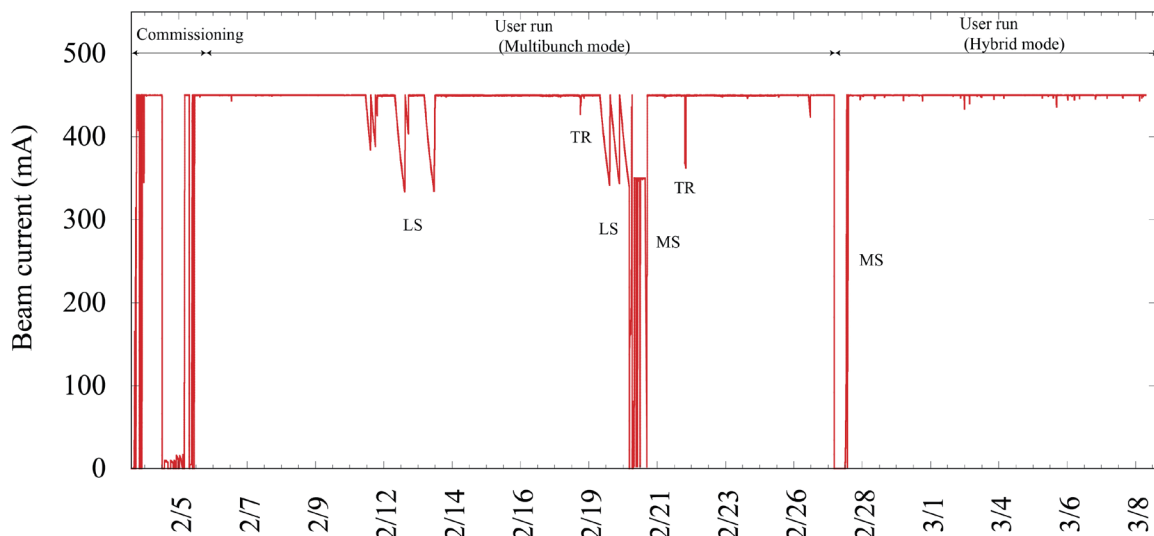


図1 PFリングにおける2月3日9:00から3月9日9:00までの蓄積電流値の推移を示す。LSは入射器調整、TRは入射器トラブル、MSはリング調整を示す。

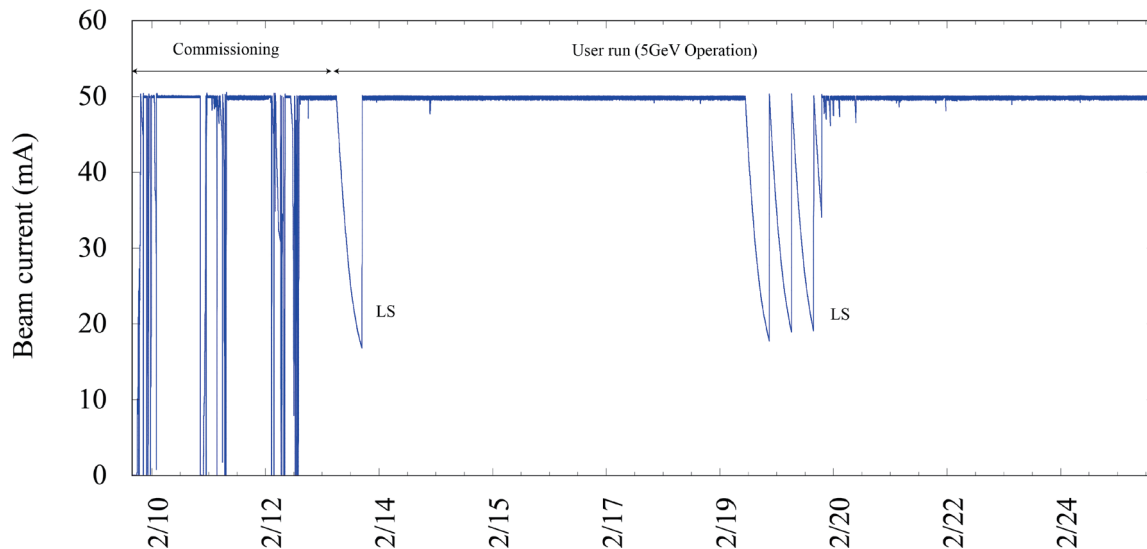


図2 PF-ARにおける2月10日9:00から2月25日9:00までの蓄積電流値の推移を示す。LSは入射器調整を示す。

を開始する手法が確立したと考えている。2月12日に予備光軸確認、2月13日9:00から光軸確認を行った後、ユーザ運転を開始した。この期間、ビーム寿命急落が3回発生したが、自然に回復したため再入射は必要なかった。さらに、ビームダンプを伴う故障は発生せず概ね順調にユーザ運転が実施され、2月25日9:00に予定通り運転を停止し、春の停止期間となった。

春の停止期間中の作業

PFリングでは、放射光源加速器において放射光の安定供給のために必要不可欠となったトップアップ運転の新たな入射技術の開発を不断に進めてきている。世界に先駆けて開発を行った多極パルス電磁石入射による、蓄積ビームの無摂動入射技術は、極低エミッタンスを目指す次世代放射光源加速器においてもっとも有力な次世代トップアップ入射技術の候補の一つとなっている。2008年には世界で初めてパルス六極電磁石によるトップアップ入射の実証が行われ2010年から2014年まで本格的にユーザ運転へ適用された。

六極電磁石の磁場分布はパラボリックな2次曲線となる

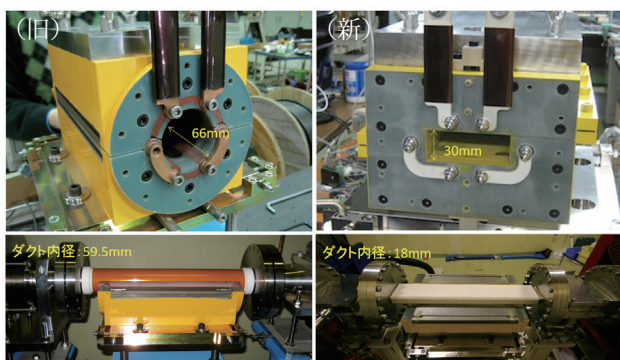


図3 新旧パルス六極電磁石及びそのダクト

ため、磁石中心の磁場中心では磁場がゼロとなる点とゼロ近似領域が存在する。この磁場中心点を蓄積ビーム軌道と合わせれば蓄積ビームには磁場の影響を与えずに、2次曲線磁場上の軌道にある入射ビームにのみ磁場を作用させ入射ビームを蓄積ビームに合流させることが可能である。しかしながら、この原理に反し磁場中心に置かれた蓄積ビーム軌道上のビームが振動を有していたことが、運用から見えて来た大きな課題の一つである。この振動は運用期間中に高度化更新を行った角ボア型のパルス六極電磁石(図3)により顕著となり、実証機として使用した真円ボア型の9倍の振動振幅を生成する結果となった。角型ボアは水平方向のアーチャーを確保しつつ、ギャップを狭小化し磁場強度を増強するために採用されており、ギャップ寸法は真円ボア型から1/3まで縮小している。振動振幅の増大の理由を単純に考えた場合、ギャップ寸法の縮小率が2乗が蓄積ビームの振動振幅の増大をもたらしていると説明でき、ギャップ寸法の縮小に伴い蓄積ビーム軌道に近づいた不整磁場の存在が予想できる。これまでの磁場計測のデータを改めて見直した結果、磁場中心に存在するはずのない主磁場とは逆向き、かつ主磁場に対して遅延のある主磁場強度の1/10程度のパルス磁場が存在することが判明した。この主磁場に対する不整磁場の遅延と磁場方向が逆向きの振る舞いは渦電流により生成された磁場の典型的な現象である。磁場の透過性を確保するために使用する真空ダクトのセラミックスダクトにはビーム壁電流の通過性を確保し、渦電流を極力抑制するために3 μ mの薄膜のTiコーティングを実装させるが、この薄膜が渦電流を引き起こし、蓄積ビームを振動させている原因である。コーティング面がギャップの狭小化でビームに近接し、渦電流による磁場の効果を強くしたと考えられる。セラミックスダクトを除いた磁場計測の結果と比較すると磁場中心での不整磁場の強度は1/9まで減衰することから、渦電流による不整磁場は、セラミックスダクト内面コーティングからの寄与

が90%を占め、残り10%程度は積層ケイ素鋼板の鉄心またはコイルからのものと推察できる。この角型ボア形状はKEK-PFの成功を受けてパルス六極電磁石入射技術を採用したUVSOR、あいちSRにおいてもほぼ同寸法で採用されており、いずれの施設でも本来、振動を有するはずのない蓄積ビームの振動を観測するに至っていて、渦電流効果の抑制が多極パルス電磁石入射技術の確立に重要な課題であるとの認識で一致している。

この課題の原因を明らかにするために、2019年度より角ボア型パルス六極電磁石のビームベースドによる渦電流効果の解明を開始し、並行して、不整磁場の主要因であるセラミックスダクトのコーティング起源による渦電流の生成を抑制するため、新たなコーティングの開発を進めている。内面コーティングの改善が図られれば90%以上の渦電流の抑制が可能であるため、全面コーティングに代わる渦電流の抑制とビーム壁電流の通過性を同時に満足する新たなコーティング形状とその実装技術が必要である。

PFリングでは、八極以上の高次な多極パルス入射技術の開発を目指し空芯型のセラミックスチェンバー型体パルスマグネット (CCiPM) の開発 [1] を並行して進めており、この開発では、磁極がセラミックスダクトに埋め込まれている構造的な制約といち早く渦電流効果の弊害を認識した内面コーティング形状の改善の必要性から新たなセラミックスダクト内面コーティング技術の開発が進められて来た。ここで開発された技術はFLiP (Fine Line coating Process) と名付けられ、CCiPM開発の基幹技術の一つとなっている。FLiPは $\phi 30$ mm内径の超小口径セラミックスダクト内面にも円筒長手方向に渦電流ループを阻害するスリット形状とビーム壁電流を通過させる容量性能の形状を同時に満たす櫛歯型の微細な形状のコーティングを実装可能とする。この技術の応用を18 mmギャップの角ボア型パルス六極電磁石のセラミックスダクトに展開させたことが本開発の重要な起点である。渦電流抑制の要請から櫛歯幅が最適化され、ビーム壁電流の通過性の確保からインピーダンスを低減するように櫛歯間隔が最適化された。その結果、櫛歯間隔は1 mmまで狭小化し、全面コーティングに対するコーティングの面覆率は83%を越えている(図4)。シミュレーションの結果を踏まえると渦電流による主磁場の損失は0.1%以下まで低減され、PFリングにおけるユーザ運転でビームダクトに最大負荷となる運転条件の

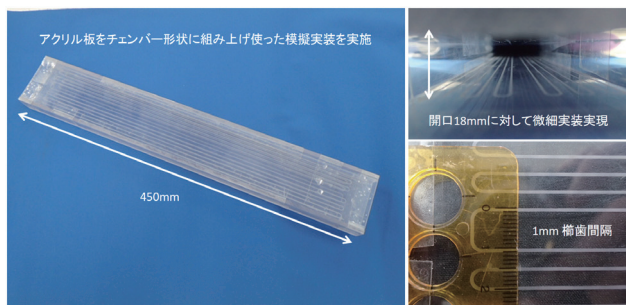


図4 櫛歯形状のパターンコーティング実装試験

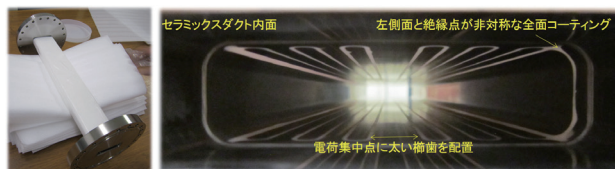


図5 完成したパルス六極電磁石用新セラミックスダクト

50 mAのシングルバンチと400 mAのマルチフィリングを共存させるハイブリッドモードを自然バンチ長で仮定すると、インピーダンスによる発熱損失は80~100 Wと見積もられている。この損失はセラミックスダクトを抱え込む電磁石への伝熱放熱により冷却できる条件値と同等となっており、実際のユーザ運転で採用されているシングルバンチ電流値が30 mAまで抑えられていることを考慮すると運転上の裕度が十分であると判断できる。

2019年度に製作を開始した新ダクトは今春に製作と5 μ m厚みのTiコーティングのFLiP実装が無事に完了し、櫛歯間の絶縁抵抗は300 M Ω 以上を達成している(図5)。微細形状の実装の難しさから一部コーティングに剥離などの損傷はあるが面覆率に対して0.3%以下であり問題がない。現在、順調にPFリング設置のベークングを始めとする真空準備が進められており、2020年度4月中旬に設置を完了させ5月からのユーザ運転に適用されることになっていた。さらに、ビームベースドによる旧セラミックスダクトの調査の結果と本開発による改善結果が比較されFLiP技術による櫛歯コーティングの渦電流抑制の有効性について実証試験が進められる予定であった。しかしながら、5月からのユーザ運転が中止となり、本開発の実証は秋の運転に持ち越されることになった。

- [1] C. Mitsuda *et al.*, "Accelerator Implementing Development of Ceramics Chamber with Integrated Pulsed Magnet for Beam Test", Proc. IPAC2019, Melbourne, Australia, 4164 (2019).

令和元年度の運転のまとめ

表1に平成21年度から令和元年度までの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6に示す。令和元年度のユーザ運転時間は3004.1時間となり、かろうじて3000時間を確保できた。故障時間は昨年より増加して約60時間、故障率は2%程度、平均故障間隔時間(MTBF)も150時間程度と、例年と比べると比較的故障が多かった年度となった。故障の内訳を調べると、令和元年度も昨年度と同じく電磁石電源の故障によるトラブルが約70%であったが、RFに起因するトラブルの割合は半分となり15%程度であった。PFリングにおいては電磁石電源の老朽化がじわじわと進んでいると推察される。

なお、表1の2018年度(H30年度)分について、これまでに報告していたリング運転時間およびユーザ運転時間

表1 平成21年度～令和元年度までの11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)	5,037.0	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	2,983.0	16.6	214.3
2018 (H30)	3,408.0	576.0	2,803.6	28.4	166.6
2019 (R01)	3504.0	440.0	3004.1	59.9	153.2

表2 平成21年度～令和元年度までの11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	312.3	2,111.0	24.7	38.8
2018 (H30)	2,064.0	456.0	1,581.6	26.4	64.3
2019 (R01)	2568.0	456.0	2099.7	12.3	264.0

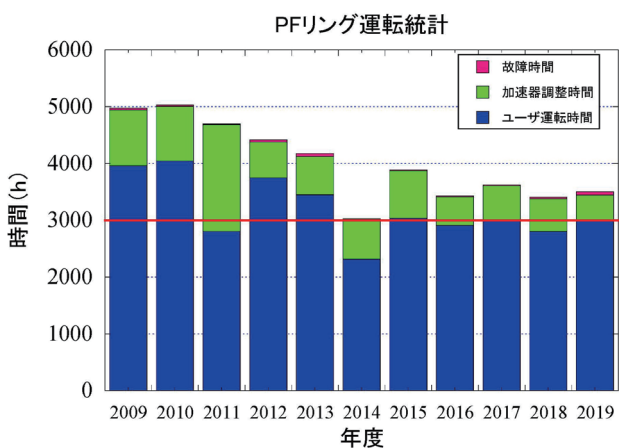


図6 平成21年度～令和元年度までの11年間のPFリングの運転統計の棒グラフを示す。なお、2018年度（H30年度）については、ユーザ運転時間で12日（288時間）分が下方修正されている。

は12日間（288時間）多くカウントされていることが判明した。原因は、産業利用に供給した運転時間を実際は6日間であったところを誤って18日間（432時間）とカウントしてしまったことであった。そのため、リング運転時間を3696.0時間から3408.0時間に、ユーザ運転時間を

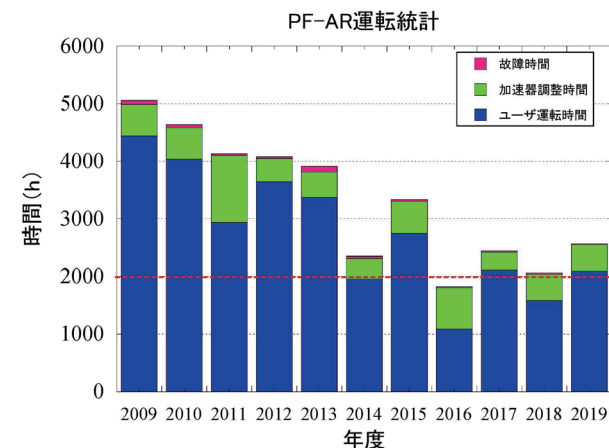


図7 平成21年度～令和元年度までの11年間のPF-ARの運転統計の棒グラフ

3091.6時間から2803.6時間に、この運転時間変更に伴い平均故障時間間隔も183.5時間から166.6時間に下方修正した（赤字箇所）。

表2と図7にPF-ARの運転統計を示す。令和元年度のユーザ運転時間は2099.7時間となり、昨年度に比べて約600時間増加した。これは、PF-ARにおいて運転時間を

の50%に対して、省エネルギー5 GeV 運転を導入した結果である。しかしながら、PFリングと同様のユーザ運転3000時間の水準にはほど遠い状況にあることは変わらない。故障率は例年より少なく0.6%程度、平均故障間隔(MTBF)は264.0時間と過去最高の数値であった。故障の内訳は、RFに起因するトラブルが約70%、冷却水関連のトラブルが約14%であったが、ダストトラップによる再入射や入射機器によるトラブルが減少した。運転関係では、PFリングとPF-ARの入射が昨年度から始まった高速切り替えによってお互いの入射を妨げずに行えるようになり、同時トップアップ運転が確立した。

加速器第6研究系内の人の動きについて

光源第5グループの佐藤佳裕技師が3月31日付けで定年退職となりました。4月1日からシニアフェローとして、引き続き同グループにおいて安全関連の技術開発を中心に業務を担当していただくことになりました。

異動関連では、光源第6グループの加藤龍好教授と本田洋介助教が、4月1日付けで応用超伝導加速器センターに移られることになりました。コンパクトERLにおける自由電子レーザーやテラヘルツ光源などの新光源開発研究において、中心的な役割を担うことが期待されています。なお、光源第6グループに所属されていたお二人が異動となりましたので、このグループはしばらく空席といたします。

採用関連では、光源第1グループの田中オリガ特別助教が、4月1日付けで助教に採用されました。田中さんには引き続き同グループにおいて、軌道解析やビームダイナミクスを中心に業務を担当して頂きます。

昇任関係では、光源第5グループの田原俊央技師が、4月1日付けで専門技師に昇任されました。田原さんには、引き続き同グループにおいて、基幹チャンネル関連の技術開発を中心に業務を担当して頂きます。また、光源第7グループの江口柊技術員が、4月1日付けで准技師に昇任されました。江口さんにも、引き続き同グループにおいて、挿入光源関連の技術開発を中心に業務を担当して頂きます。

基盤技術部門の紹介（第3回）

<https://www2.kek.jp/imss/pf/section/beamline/>

昨年度の第2号（8月発行）から、放射光実験施設を構成する3部門（運営、基盤技術、測定装置）について紹介をしています。今回は、実験施設最大の部門である基盤技術部門の第3回として、検出系、時間分解、試料環境を主務とするメンバーを紹介させていただきます。

検出系チームを主務とするのは、岸本俊二教授（チームリーダー）と西村龍太郎博士研究員の2名です。検出系チームは、放射光計測に関する検出技術の開発研究と運用を担当します。岸本さんは、検出器の専門家です。APDによる超高速検出系を始めとして、各種検出系の実装を進めています。PF/PF-ARのビームラインでは、岸本さんの開発した検出器が何台も使われていますので、知らぬ間に恩恵にあずかっている利用者も少なくないと思います。西村さんは、元々の専門であるDAQシステムの開発に関して、KEK独自の大容量データの高速転送技術SiTCPの10G化に取り組んでいます。また、PFとして進めている「3次元X線ゾーミング顕微鏡の開発」（PF NEWS 2019年11月号『施設だより』参照）のプロジェクトの中で、コンピューター・ラミノグラフィの計算コード開発なども担当しています。

時間分解チームは、PF/PF-ARの孤立バンチ大電荷を活かした時間分解測定に必要な測定手法や実験装置の開発を担当します。このチームを主務とするのは、足立純一研究機関講師（チームリーダー）1名のみですが、測定装置部門などとも連携して、時間分解測定に関する各種開発と実装を進めています。足立さんは、PFとして進めている「多目的軟X線時間分解計測システムの開発」のプロジェクトリーダーでもあり、PFの運転調整も担当しています。

試料環境チームは、温度、圧力、電場、磁場、ガス雰囲気、レーザー照射など、試料環境に関する種々の知見と技術を収集して蓄積し、各ビームラインの高度化に活用することを目的としています。このチームを主務とするのも、丹羽尉博技師（チームリーダー）1名のみですが、測定装置部門などとも連携して活動しています。丹羽さんは、PF-ARの運転調整も担当しています。

運転・共同利用関係

PFおよびPF-ARの2019年度第3期の運転は、予定通りに行われました。PFは2月3日から3月9日まで、2月28日以降はハイブリッドモードでの運転を実施しました。また、PF-ARは2月10日から2月25日まで5 GeV運転を実施しました。

2020年度第1期の運転については、新型コロナウイルス感染症拡大への対応として、中止することとしました。

大変残念ですが、利用者とスタッフの安全が第一です。運転再開に向け、放射光実験におけるソーシャルディスタンスの確保について検討を進めます。運転を再開しても、直ぐに従来通りには戻せない可能性が高いと思いますが、ご理解をお願いします。

PF-PACは、新型コロナウイルス感染症拡大への対応として、書面審議で開催されました。詳細については、本誌速報をご参照ください。次回7月はWeb会議方式での開催を予定しています。なお、中止となったPFシンポジウムについても、早期にWeb会議方式等で開催することを検討したいと考えています。

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。全て4月1日付です。柴崎裕樹さんが測定装置部門の特別助教に着任しました。柴崎さんの専門は高圧科学です。高圧科学ビームライン群（BL-18C, AR-NE1A, AR-NE5C, AR-NE7A）の高度化と共同利用の推進を主務としますが、それだけでなく広く放射光科学の発展に貢献してもらうことを期待しています。また、金澤知器さんが新学術領域研究の研究者として着任し、光触媒の反応ダイナミクスの研究に従事しています。高木秀彰さんと山下翔平さんは測定装置部門の助教に、若林大佑さんは基盤技術部門の助教に、特別助教から異動になりました。益々の活躍を期待しています。また、兵藤一行さんが准教授から教授に昇任し、放射光実験施設・運営部門の部門長に着任しました。

はじめに

2019年度の組織改編において、放射光科学第一，第二研究系が装い新たに再スタートしましたが、2020年度4月には物構研を横断する組織として、新たなマルチプローブ利用研究の推進を目指す量子ビーム連携研究センター(CIQUS)が設立されました。放射光科学第一，第二研究系はもともと、ある物質や現象に着目して、放射光をはじめとする様々なプローブを用いた先端的な研究を行うことをミッションとしていますので、このセンターとは密接な関係にあります。したがって、一部のメンバーが所属を新センターに移すとともに(後述)、多くのメンバーがセンターを併任することになります。今号では、放射光科学第一研究系の二つの研究部門のうち、固体物理学研究部門の活動内容について少し詳しく紹介しますが、この研究部門は特にマルチプローブを活用した様々な研究を行っています。

固体物理学部門の紹介

固体物理学研究部門は、熊井玲児教授、村上洋一教授、中尾裕則准教授、佐賀山基准教授、岩野薫研究機関講師の5名の承継職員が、それぞれPIとしてグループを作って活動しています。この研究部門では、放射光をはじめ、物構研のもつ4つの量子ビームを使って、物質の結晶構造・電子構造を調べることで、物質のもつ性質や材料の機能の起源を解明する実験的・理論的な研究を行っています。また、そこから得られた知見をもとに、新奇な物性の開拓や新たな材料の開発を推進しています。さらに放射光実験施設とも協力して、次期光源も視野にいれた新たな実験手法の開拓や、実験装置の高度化・最適化も行っています。以下、それぞれの研究グループの活動内容を紹介します。

熊井グループは、分子性結晶・薄膜や、強相関電子系材料を対象に、「物質のマクロな物性の起源をミクロな構造から理解する」ことを中心に研究を行っています。手法としては、X線回折、X線反射率をはじめ、中性子やミュオンなどのプローブも活用しています。また、温度や圧力、電場、光照射など、外場による構造変調の観測から、物性発現の起源を探る研究も精力的に行っています。最近では、有機エレクトロニクスデバイスへの応用が期待される高品質高性能な有機薄膜の構造の解明に加えて、計算科学やデータ科学を活用して材料の機能予測・構造予測を行い、材料開発の高度化を行うための研究もはじめています。メンバーとしては、内部スタッフは熊井さんと佐賀山遼子さん(研究支援員)ですが、材料開発や物性測定、計算科学、データ科学の活用など、外部の多くの研究者と連携して研究を推進しています。

村上グループは、元素戦略プロジェクト電子材料領域「東

工大元素戦略拠点」のKEK副拠点における研究に参画しています。東工大拠点やNIMS副拠点などで合成に成功した電子材料を対象に、放射光、中性子、ミュオンを用いて、その機能発現機構を明らかにする研究を行っています。これまで、鉄系超伝導体やエレクトライドなどの精密結晶構造や電子構造・磁気構造の詳細を明らかにしてきました。最近では、イオン伝導体・発光材料・太陽電池材料・有機強誘電体などの研究にも取り組んでいます。メンバーは村上さんの他に、東工大元素戦略センター所属の山浦淳一さんと河智史朗さんです。なお、昨年度末までメンバーだった玉造博夢さんは後述の通り転出されました。

中尾グループは、回折・散乱に分光を組み合わせた実験手法である共鳴X線散乱を主たる実験手法とし、特異な物性発現の背後にひそむ結晶構造・電子構造の変化を捉えることを目指しています。中でも、次期光源の光源特性と言われるコヒーレンスと共鳴X線散乱を組み合わせたマルチスケール軟X線顕微鏡の開発を進め、強相関電子系の巨大応答現象やメゾスコピックな磁気テクスチャであるスキルミオンの外場応答現象などに対して、マルチスケールでの観測を行い、これらの動的な物性の起源を探る研究を推進しています。また、PF内の他部門と連携して、共鳴X線散乱に時間分解を組み合わせたレーザーポンプ&放射光プローブの研究展開も進めています。メンバーは中尾さんと山崎裕一さん(物質材料研究機構主任研究員、物構研客員准教授)です。また、共鳴軟X線時間分解測定では、足立純一さん(基盤技術部門)、深谷亮さん(材料科学研究部門)と連携しています。なお、石井祐太さんもメンバーでしたが、後述の通り転出されました。

佐賀山グループは、対称性の観点から物質の性質や機能発現の機構を明らかにすることを目指して研究を行っています。硬X線領域の放射光を用いて温度や外場による格子対称性の変化を精密に調べることを主としていますが、多角的な視点を持って多自由度(スピン、軌道占有自由度、電気分極、格子、電荷、等)間の相関を調べるために、相補的な複数の量子ビーム(放射光、中性子、ミュオン)を積極的に活用しています。

岩野グループでは、第1のテーマとして固体の光励起後のダイナミクスを中心とした理論研究を行っています。これは最近ではJST CRESTのプロジェクト「強相関系における光・電場応答の時分割計測と非摂動型解析」の枠組みの中で行われており、光励起状態における新しい電子状態の検出のための「過渡吸収スペクトル」に対して、理論から新しい計算スキーム構築を提案しています。対象とするのはいわゆる強相関電子系で、低次元の分子性結晶や金属酸化物などを念頭に置いて研究しています。また、これ

とは別に第一原理計算を用いて光励起後の構造変化、特に強誘電性などの秩序変数の巨視的变化に関係した研究も行っています。第2のテーマとしては、強磁性体の非一様ドメイン構造に関係した理論研究を行っており、最近ではいわゆる迷路構造のフラクタル性やそれが磁化過程に与える影響などを調べています。メンバーは、岩野さんと研究員の山口辰威さんです。

人事異動

最後に、放射光科学第一、第二研究系に関する人事異動を報告します。2/20付で、構造生物学研究部門の研究員の小祝孝太郎さんが退職し、民間企業に就職されました。また、3/31付で、固体物理学研究部門の博士研究員の石井祐太さんが東北大に、研究員の玉造博夢さんがJAEAに、材料科学研究部門の研究員の渡邊稔樹さんが京都大に、それぞれ転出されるとともに、構造生物学研究部門の研究員のGIANNOPOULOU, Anastasiaさんが帰国されました。一方、表面科学研究部門の博士研究員として阪田薫穂さん(4/1付)、材料科学研究部門の研究員として高木壮大さん(4/1付)、構造生物学研究部門の研究員として阿久津誠人さん(3/1付)、大志田達也さん(4/1付)、露口正人さん(4/1付)が新たに着任され、表面科学研究部門の特別助教の北村未歩さんが、4/1付で助教に採用されました。転出・着任された方、昇任された方ともに、今後のますますのご活躍を期待しています。なお、固体物理学研究部門の村上洋一さんと材料科学研究部門の小野寛太さんは、4/1より所属を量子ビーム連携センターに移しましたが、それぞれの研究部門における活動は継続されます。

はじめに

低速陽電子実験施設 (Slow Positron Facility, SPF) が物質構造科学研究所 (物構研) の正式な組織になって1年が経ちました。しかし本実験施設は、未だ極めて小さな所帯ですので、共同利用は放射光共同利用実験の一環として行っています。ビームタイム中の安全管理なども同様です。

これまでPFのサイト内にホームページがありましたが、昨秋よりリニューアルし、物構研のサイト内に移動しました。新しいURLは、

<https://www2.kek.jp/imss/spf/>
です。

ビームラインの状況

SPFでは、専用電子リニアックで約50 MeVまで加速した電子を、Taターゲットに当て、電子・陽電子対生成から陽電子を得ています。それを負の陽電子仕事関数をもつW薄膜モデレータを用いてエネルギー3 eVの低速陽電子として取り出します。低速陽電子生成部 (Taターゲット/Wモデレータ) は35 keVまで高電圧印加できるようになっており、ここで陽電子を任意のエネルギーに静電加速して、同じ実験室の測定スペースに磁場輸送して使います。現在使用中の低速陽電子生成部は、2010年に取り換えてから10年になります。ターゲットまわりは運転中に最も放射線量が高くなる箇所です。配線の被覆がかなりダメージを受けており、2019年夏のメンテナンス期間に全てを交換しました。同箇所の高電圧フィードスルーもかなりダメージが見られることから、2020年夏のメンテナンス期間に生成部をチェンバごと取り替える予定です。

生成部について毎年行っているメンテナンスについて紹介します。ターゲット/モデレータは、電子線の照射によって発熱するので、銅製円柱型の熱アブソーバの内部に純水を送って冷却していますが、外部配管のシンプレックスチューブは、念のため毎年取り替えます。その際、ホルダ内の水路の奥が不純物イオンに浸食されていないことを、深さを測定して確認します。また、万一のために床に置いてある漏水検知器の動作テストをします。さらに、コンバータに接続されたコンデンサ (容量30 nF, 耐圧50 kV) を毎年取り替えます。このコンデンサは、加速された電子がコンバータに入射したときに起こる、瞬間的帯電による電圧変動を抑えるためのものです。

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、SiC表面上に形成した2層グラフェンにCaをインターカレートした2次元超伝導体の構造を解明しました (共同利用課題代表: 高山あかり氏)。その結果、Caがインターカレートされている位置およびグラフェンの積層状態が、それまで考えられていたものとは異なることが明らかになりました。

SPF-A4の低速陽電子回折 (LEPD, レプト) ステーションでは、その直前に設置された低速陽電子輝度増強部で消滅した陽電子からの γ 線に由来するバックグラウンドノイズを低減するため、輝度増強部直後の輸送用静電レンズを太く長くしました。また、従来使用していたセンターホール付き2層遅延アノード検出器 (DLD) の十字型の不感領域が不便なので、3層遅延アノード検出器 (HEX-DLD) に置き換えました。まず電子銃を用いた動作試験を行い、鮮明な低速電子線回折 (LEED) パターンが得られました。さらに静電レンズと検出器を実装後、実験チェンバまで支障なくビームを導くことに成功しています。

SPF-B1の汎用ステーションでは、現在はポジトロニウム (Ps) のボース・アインシュタイン凝縮の実現に必要なレーザー冷却の実験が行われています (共同利用課題代表: 石田明氏)。2019年度には、今後の実験の進展に備えて、レーザー防護用の暗幕を整備しました。

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が行われています。

その他

共同利用ビームタイムを有効に生かすための、実験ステーションから独立した試料作製チェンバの導入が進行しています。2019年度には所内公募研究費や外部資金により、試料マニピュレータ、電子衝撃加熱型3源エバポレータ、反射高速電子線回折 (RHEED) 装置、Ar⁺イオンスパッタ装置、真空維持型の試料搬送ベッセルなどを整備しました。

人事異動

2020年4月1日付で、和田健准教授が着任されました。和田さんは2010年4月～2016年3月の間物構研放射光第一研究系低速陽電子グループに所属しておられたので、ご存じの方も多いと思います。

物質構造科学研究所諮問委員会（構造生物学研究センター）報告

物質構造科学研究所 構造生物学研究センター
田辺幹雄・千田俊哉

去る2020年2月14日、主に構造生物学研究センター（SBRC）を対象とした、物質構造科学研究所諮問委員会が開催されました。委員会では国際評価委員であるAlexander Wlodawer博士（NIH-NCI）に、SBRCの現状と将来的な展望について、SBRCのメンバーによるプレゼンテーションと、センターで事前に作成した過去5年間（2014-2019）の活動報告書に基づき評価して頂きました。またSBRCが今後も研究中核ハブとして継続的に発展していくために検討すべき事として忌憚のない御意見を頂き、議論を深めました。

委員会は、まず小杉物構研所長より、開催の挨拶と物構研の組織、研究所全体の理念、方針について概要を話して頂き、その後、千田がSBRCの目標、研究成果と開発状況、研究費獲得状況等のセンター全体の活動を総括しました。その後、午前中はSBRCが重点的に推し進める研究の一部（GTP biology, Glycobiology, Infectious diseases）について、それぞれセンターのメンバーが研究発表と質疑応答を行いました。昼食を挟み、午後は研究施設としての技術開発や将来計画に関して、結晶化施設、生体高分子結晶構造解析（MX）、生体高分子用のX線小角散乱（Bio-SAXS）のビームライン、クライオ電顕とバイオイメーキングの順にメンバーが発表を行った後、各ビームラインや実験室を廻り、施設の現状について説明いたしました。最後に足立副所長が議長となり、所長、副所長を含む委員メンバーとSBRCのメンバーにより、現状への評価と将来への展望について議論し終了となりました。Wlodawer博士には後日以下の質問に回答していただくという形で報告書をまとめて頂きました。ここではその報告書のすべてをご報告することは出来ませんので、ポイントのみを紹介いたします。

構造生物学分野におけるSBRCの位置づけ、リーダーシップに関して

SBRCは、PDISやBINDSなどの多くの国家的なプロジェクトに参加すると同時に、それらを通して科学的に重要な貢献もしており、SBRCは構造生物学分野でリーダー的役割を果たしてきたと言える。非常にハイレベルの研究が行われており、最先端の共同研究を行うための研究組織である。MXとBioSAXSビームラインのユーザーも、質の高い研究を発表している。Toll様受容体、集光性タンパク質複合体、オートファジー関連タンパク質複合体、ヘリコバクター・ピロリ由来のガンタンパク質の研究は、その例である。MX、BioSAXS、分子動力学法などの手法を組み合わせ得られたビタミンD受容体の構造解析も注目に値する。

国際的な学術研究拠点として

細菌感染症、遺伝子転写過程の研究、GTP代謝などの分野で国際共同研究を成功させている。またPaul Scherrer Institut/Swiss Light Sourceとの協定に基づき、研究者の相互訪問が行われているだけでなく、硫黄原子の異常散乱を利用した構造解析手法であるNative-SAD法の推進や、結晶整形などに関しても国際交流が行われている。海外からの来訪者や国際会議での成果発表から判断しても国際的研究拠点としての役割を果たしていると言える。海外からの訪問者に対する英語サポートもセンターの事務部門により適切に行われている。

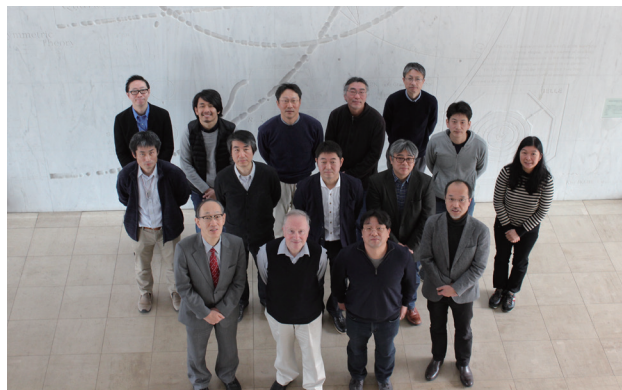
SBRCの研究プロジェクト及び技術開発に関して

SBRCで実施されている研究プロジェクトは十分に選択されており、さらなる発展に向かって進められていると考えられる。ハイインパクトな学術誌に掲載された論文数からも、その研究の質の高さは伺える。研究スタッフの規模が比較的小さいことや、サポートと研究の間で人的資源を共有する必要があることを考慮すると、研究成果は十分である。また、タンパク質発現、結晶化、データ収集の自動化のレベルは非常に高い。クライオ電子顕微鏡装置の増設は、現代の構造生物学の最前線であり続けるために必要不可欠である。

SBRCの方向性に関して

SBRCは成熟した組織であり、現在は非常に順調に推移しており今後も高い生産性を維持していく可能性が高いと考えている。長期的には、シンクロトロン機能アップグレードやクライオ電子顕微鏡装置の増設などの計画が鍵となる。

上記のポイント以外にも、多くの有益なアドバイスを頂きました。また報告書の全文はPFのWebに公開される予定です。Wlodawer博士にはSBRCの現状と将来像について真剣にご議論頂きましたことを心より感謝致します。頂きましたアドバイスを基に、さらなる研究の発展とユーザーへのサポートを推進していきたいと考えています。



PF-SAC 諮問委員会、中央がWlodawer博士。

PF-AR 測定器開発用テストビームラインの建設

KEK 素粒子原子核研究所 花垣和則

素粒子原子核物理学実験では、研究活動の中で測定器開発の比重が大きく、その測定器開発段階においては、粒子線を使ったビームテストが、ほとんど全ての実験計画で必須である。一方で、日本国内にはビームテストを実施できる施設が少なく、欧州の CERN、米国の Fermilab と並び、素粒子原子核物理研究の世界三大拠点を自負する KEK にとって、GeV オーダーのテストビームラインの保有はかねてからの悲願であった。また、ユーザーコミュニティからもテストビームライン建設の要望は根強く、今回その要望がようやく届き、2020 年と 21 年の 2 カ年計画として、つくばキャンパス PF-AR 南棟（図 1）に、電子ビームを取り出すテストビームラインを建設することとなった。

PF-AR の蓄積電子ビームのハローを削るように、ビーム中心から離れた位置にワイヤー標的を入れ、ガンマ線を生成させる。そのガンマ線を converter に入射させて電子・陽電子対を生成、その後、ビーム収束用の四重極電磁石と、特定の運動量を持った電子だけを取り出すための双極電磁石の組み合わせにより、ビームテストに使用する電子ビームを取り出す。数年前のレートの見積もりでは、蓄積電子ビームのエネルギーが 6.5 GeV、電流 65 mA を仮定すると、2 GeV の電子を 4 kHz 程度で取り出せると見込んでいた。

今後、上記のビームレートの再検証をまずは行い、その後、標的や converter の最適化、そして、必要ならばビームダクトの設計と建設を今年度内に行う。さらに、放射線遮蔽、ビームステージの建設、ビーム取り出し用電磁石の調達など、やらなければならないことが山積みされているが、ビームライン建設のための組織が構築されたわけではなく、素核研、加速器、物構研の有志によりこの計画を進めていかなければならない。そこで、建設後の運用を含めて、自主運営できるようなユーザー会を立ち上げる必要がある。

いずれにせよ、念願のテストビームラインが KEK に建設できることは非常に喜ばしいニュースである。PF-AR の新たなビームラインとして、物構研との連携を強化しつつ、多くのユーザーが使える施設を目指したい。

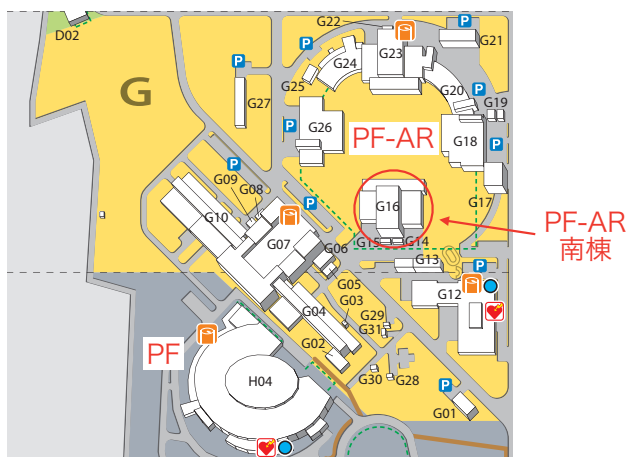


図 1 PF-AR 南棟の地図