

入射器の現状

加速器第五研究系研究主幹 古川和朗
(2019年2月8日付け)

概要

2018年秋には、放射光施設 PF と PF-AR への電子入射運転と、ビーム開発も並行して行われて、無事に12月21日に終了した。SuperKEKB に向けた建設のために、2011年以降本格的な同時入射は行われなかったが、秋の期間に放射光施設にトップアップ入射を行って準備を整えることができ、2019年からは放射光と SuperKEKB の4蓄積リングに向けた同時トップアップ入射を行う予定である。ビーム開発については、3月に開始する SuperKEKB フェーズ3・コミッショニングに向けて重要であったが、ビーム測定などに制限があったものの同時入射機構を利用することにより、放射光入射には大きな影響を与えずに実行することができた。大震災以来電力量節約のために入射器は25 Hzで運転してきたが、秋の運転期間の最後には、50 Hzのパルス運転に向けた調整運転が行われ、大きな問題なく移行することができた。2月からの運転においては50 Hz運転を基本とすることになった。

SuperKEKB フェーズ3向けビーム開発

秋の運転期間中のビーム開発においては、夏期に改造された機器の性能確認や、ビームの特性の改善に向けたさまざまな試みが行われた。同時入射機構を用いて、パルス毎にビーム特性を切り換えることによって、多くのビーム実験が放射光施設の入射と共存しながら実行された。また、入射に影響を与える可能性のある実験は、予め専用割り当てられた時間帯を有効利用することによって実施することができた。

SuperKEKB の入射においては、大電流・低エミッタンス・低エネルギー拡がりというような特性を持ったビームを必要とする。衝突リングにおけるビーム条件と衝突性能の進展に合わせて、徐々に入射器のビームの質を高めて入

射する予定となっている。昨年のフェーズ2コミッショニングにおいては、期待された衝突性能も確認することができ順調であったが、Belle II 検出器へのバックグラウンド・ノイズが問題として認識されることになった。蓄積ビームによるノイズも少なくなかったが、入射ビームの寄与も確認されており、今後バックグラウンドを作らない入射が期待される。そのためには、ビームエミッタンス、エネルギー拡がり、エネルギージッター、軌道ジッターなどを低く抑える必要がある。

エネルギーや軌道のジッターについては、新しく導入されたパルス電磁石や低電力マイクロ波制御装置などに関連して、安定化機構の誤動作や、不十分な信号接続などが見つかっている。特殊な条件でのみ発生する誤動作も含まれており、また、装置のみの試験では発見が困難であった事象もあり、可能な部分から対策を施している。

低エミッタンスのビームの生成に肝要な RF 電子銃について、高出力 Nd:YAG レーザーが3ヶ月にわたって安定に動作し、今後の運転に自信をもたせた。ビデオカメラにより、2系統のレーザーの最終段の形状監視機構も整備された。最大5 nC以上、定常的に2 nCのビームを生成し、低エミッタンス化の実験を継続している。12月末には、RF電子銃のレーザー導入窓に真空漏れが発生したため対策を施した。帯電による放電と考えられており、窓の2重化を進めている。

ビームの低エミッタンス化については、入射器の複数の領域について、分散関数(ディスパージョン)の低減が行われ、その結果、エミッタンスの測定結果においても効果が確認されている(図1)。他にも様々なビーム調整を繰り返し、放射光施設の入射と共存が可能なフェーズ3・コミッショニング向けのビームの準備を進めている。

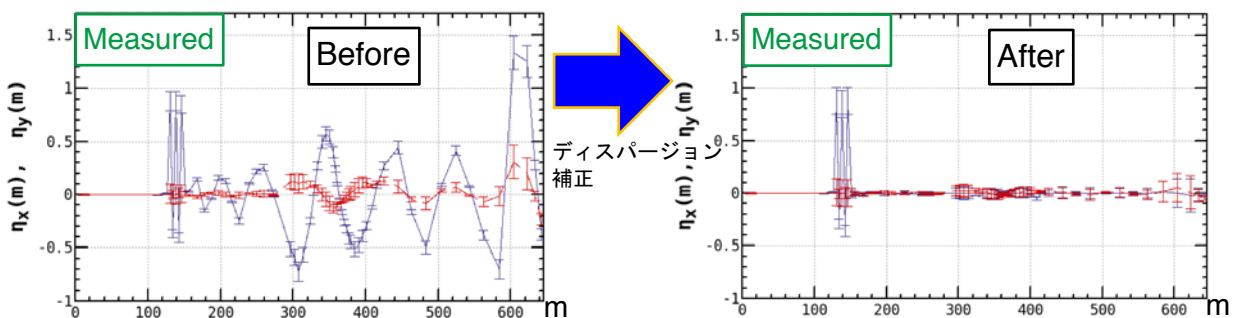


図1 ビームエネルギーを変えた時の軌道の変化からディスパージョン関数を測定し、測定されたディスパージョンが閉じるように4極磁石を調整し、低エミッタンス化を図る。

光源リングの運転状況

PFリングは、11月9日（金）9:00から運転を再開した。立ち上げ日の9:00から運転停止日の12月19日（木）9:00までの蓄積電流値の推移を図1に示す。立ち上げは順調に進み、当日中に蓄積電流値450 mAまで達した。その後、連続入射で450 mAを維持して、光焼きだしを行った。立ち上げ期間中には、新アンジュレータU#19のフリーチューニングやチューン補正等の調整を行い、ユーザ運転への対応を行った。11月14日（水）に、BL-19の光導入を行った。低電流から段階的に電流を積み上げていき、15時に200 mA、17時に定格電流値450 mAに達した。光軸調整も順調に行われ、11月16日（木）9:00より450 mA トップアップ入射によるユーザ運転が開始された。ユーザ運転は基本的にトップアップ入射で行われるが、入射器の調

整日となる水曜日については、1日3回9:00、17:00、1:00の定時に積み上げ入射が行われる。図2に11月9日から12月19日までの真空焼き出しの状況を示す。夏の停止期間にU#19のインストールのため、リングの2/3を大気開放したが、光焼き出しは順調に経過し、蓄積電流値とビーム寿命の積 ($I \cdot \tau$) は、マルチバンチモードでの運転において、11月30日にはおよそ400 A·minに達した。12月6日にハイブリッドモードへの切替のためのマシン調整を行ない、12月7日（金）9:00からハイブリッドモードでのユーザ運転を開始した。当初、400 mA（マルチ）+ 50 mA（シングル）の蓄積電流値450 mAでの運転を目標に調整していたが、ビームダンプが2回発生するとともに、進行方向のビーム不安定性の抑制が困難であったため、ビームの安定性を優先して、シングルバンチの電流値を30 mAに減

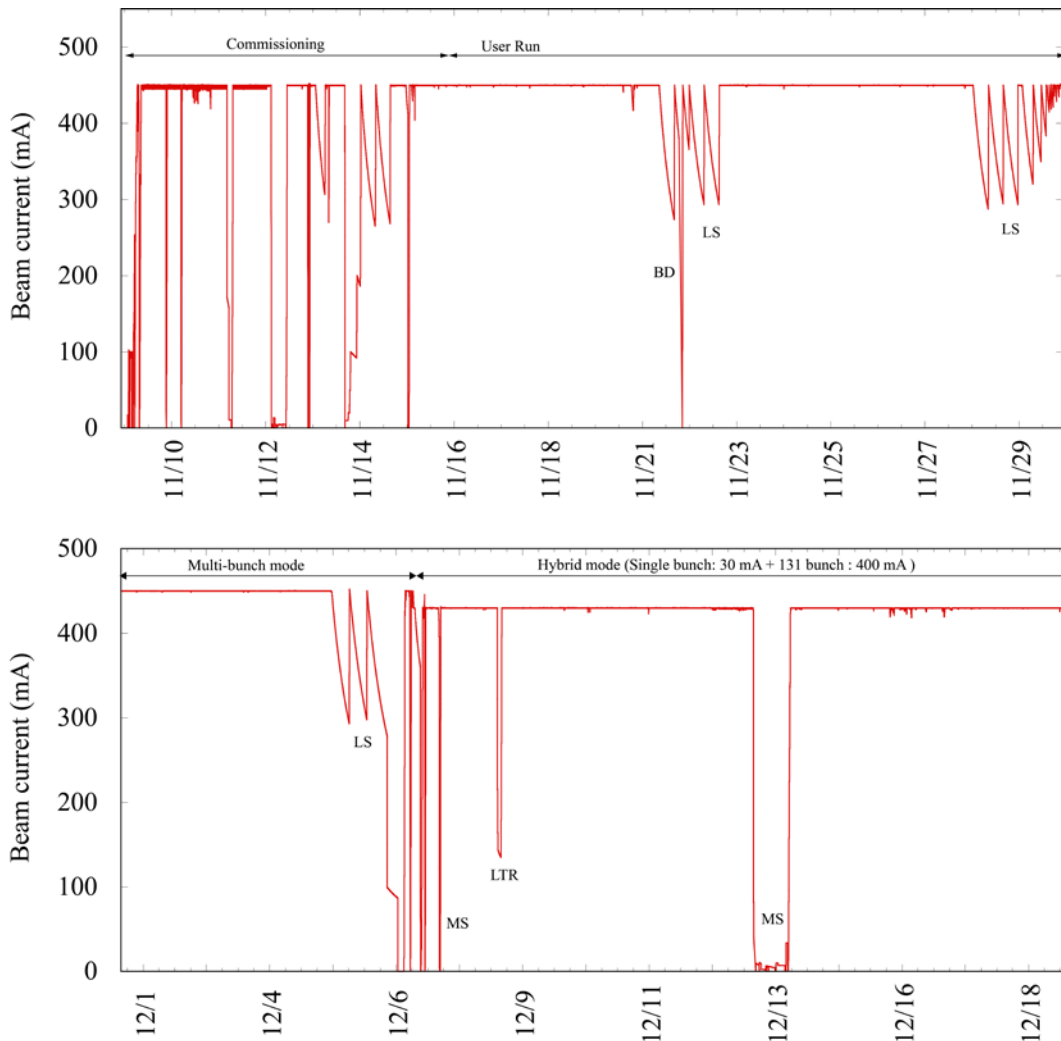


図1 PFリングにおける11月9日9:00～12月19日9:00までの蓄積電流値の推移。LSは入射マシン調整日、LTRは入射器トラブル、BDはビームダンプを示す。

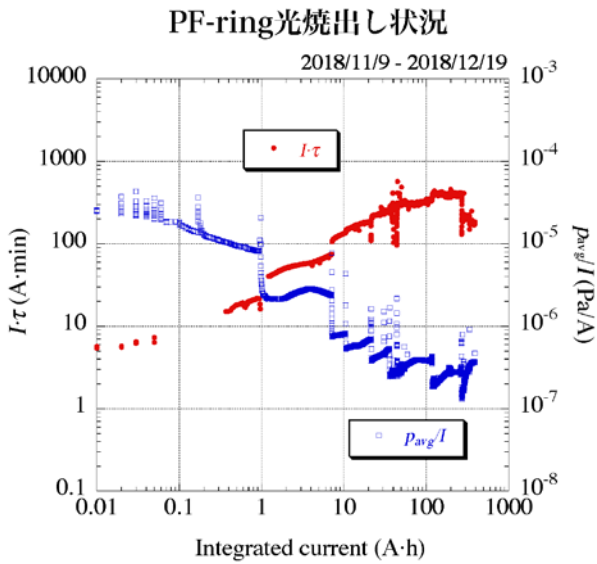


図2 PFリングにおける11月9日から12月19日までの真空焼き出しの状況を示す。横軸は積分電流値、縦軸左は蓄積電流値とビーム寿命の積、縦軸右は蓄積電流値で規格化したリングの平均真空度を示す。

らして、蓄積電流値 430 mA でのユーザ運転を実施した。さらに今期のハイブリッドモードでは、運転開始当初真空封止型アンジュレータのギャップ値に依存して現れる水平方向のビーム不安定性にも悩まされたが、後日水平方向クロマチシティを調整することで不安定性が抑制され、その後ビームは安定となった。一方で、ハードウェア関連のトラブルが3件あった。12月7日(金)ハイブリッドモードでの光軸調整時に、BL#04のラージバルブが動作しないというトラブルが発生した。バルブの圧力空気を調整して動作はしたものの、動作が不調で安定しないため、バルブを開状態に保持して、ユーザ運転することとした。2件目は、12月8日(土)12:30に発生した。このトラブルは入射器のタイミング系のトラブルであったが、トラブル対処の過程で蓄積電流値が段階的に削れるという現象が起こった。ビームが削れる現象は、入射用キッカー電磁石の放電トリガーのタイミング異常によるものと判明した。その後同様のタイミング系のトラブルが発生した時は、ビームをOFF(入射を停止)してから対処するようにしたことで、ビームを削ることはなくなった。3件目は、12月9日(日)に発生した。BL#21の純度測定用PCが故障して、純度が

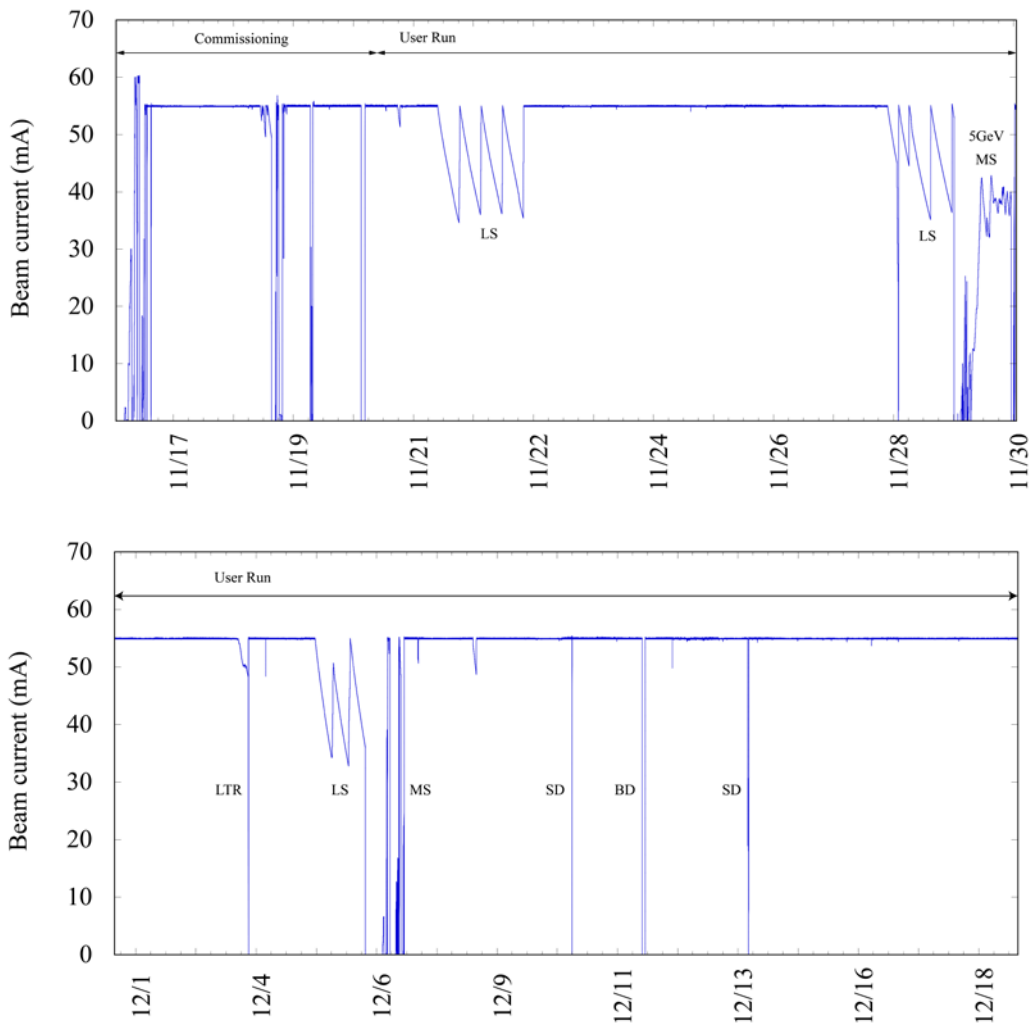


図3 PF-ARにおける11月16日9:00～12月19日9:00までの蓄積電流値の推移。LSは入射マシン調整日、LTRは入射器トラブル、SDは寿命急落による再入射、MSはマシン調整日を示す。

PF-AR光焼出し状況

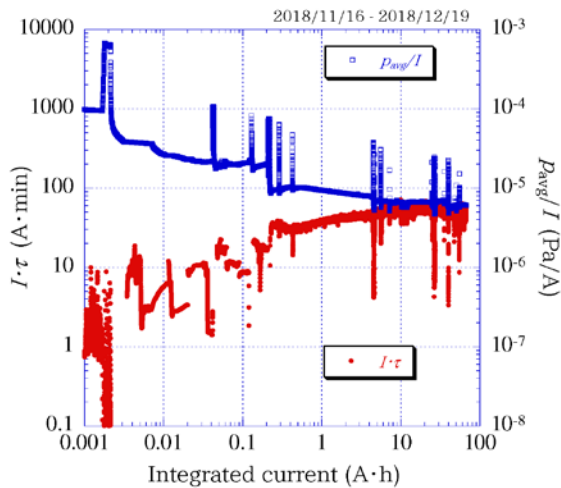


図4 PF-ARにおける11月16日から12月19日までの真空焼き出しの状況を示す。軸は図2と同じ。

測定できなくなったというトラブルであった。故障の原因を調べたところ、電源ユニットであることが判明し、交換して復旧した。この後は順調にユーザ運転が行われ、12月19日(水)9:00に停止となった。

PF-ARは、11月16日(金)9:00から運転を再開した。立ち上げ日9:00から運転停止日の12月19日(木)9:00までの蓄積電流値の推移を図3に示す。PF-ARも立ち上げは順調に進み、16時頃には蓄積電流値60 mAに達した。今期からPF-ARもトップアップ入射によるユーザ運転を行うことになっていたが、RF空洞の高次モード減衰用ケーブルの発熱を考慮して、最大蓄積電流値を55 mAにして運転することとした。立ち上げ時の種々の調整も順調に進み、11月20日(火)9:00からトップアップ入射によるユーザ運転が開始された。PF-ARのユーザ運転でトップアップ入射が行われるのは、初めてのことである。懸念されていた入射用キッカー電磁石の暴発現象(入射のタイミングでないときに励磁してしまう現象)は、停止期間中に対策を施したことが功を奏したと推察され、全く発生しなかった。図4に11月16日から12月19日までの真空焼き出しの状況を示す。PF-ARも光焼き出しは順調に経過していて、 $I \cdot t$ は、11月30日でおおよそ55 A·minに達した。11月29日(木)のマシン調整日に、ビームエネルギーを5 GeVに下げて、いわゆる5 GeV運転で、放射光をビームラインで観測する試験を実施した。ただし、入射が不調で蓄積電流値は40 mA程度までしか達しなかった。スタディ後は、ビームエネルギーを6.5 GeVに戻し、蓄積電流値55 mAでのトップアップモードによるユーザ運転が継続された。12月に入ってから、入射器トラブルによる入射中断が数回、寿命急落による再入射が2回、RF起因によるビームダンプが1件発生したものの、トップアップモードでのユーザ運転は概ね順調であったといえる。12月6日(木)マシン調整日に、再度5 GeV運転のための

マシンスタディが実施された。前回のスタディ時の入射の不調の原因が判明し、その対処を行ったところ、55 mAの蓄積に成功した。これで、加速器側としては、3月に一週間実施される5 GeV試験運転の見通しが立った。

U#19 NEG コーティングチェンバの立上げ状況

昨年10月にPFリングに設置したアンジュレータU#19には、国内の放射光源加速器では初めて、内面に非蒸発型ゲッター(NEG)コーティングを施した真空チェンバが採用されている。このNEGコーティングは、チェンバ内面にTi-Zr-Vを1 μm 程度製膜したものであり、ベーキングにより化学吸着作用を持つようになるため、チェンバ自身を真空ポンプとして機能させることが可能となる。

U#19真空チェンバは、外形寸法が高さ20 mm幅290 mm長さ4.1 mであり、ビーム路として縦15 mm横90 mmの楕円開口形状をもつ。イタリアのサエスゲッターズ社において、アルミ合金製チェンバの押出加工やAL-SUSクラッド製フランジの溶接、およびNEGコーティングの製膜が実施された後、7月末に納品された。その後、所内で真空試験などを行い、リング内へは9月下旬から10月上旬にかけて、U#19本体の据付作業に合わせて設置された(図5)。U#19周辺真空ダクトや真空ポンプ類のベーキング(200°C, 44時間)とNEGコーティングの活性化(160°C, 48時間)を含む真空立上げ作業の結果、ダクト内の圧力は 1×10^{-8} Paに到達した。

11月9日(金)のリング運転開始後の光焼出しも順調に進行した。図6に12月19日(水)までのU#19真空ダクトの枯れ(青点)と $I \cdot t$ の進展(赤点)を示す。U#19真空チェンバ自体は真空計を持たないため、接続管部の真空計BAG183での圧力で示している。グラフには真空ダクト設計時に行ったモンテカルロシミュレーションによる枯れの予測も合わせて示しており(青と緑の実線)、ほぼ予測どおり順調に立ち上がっていることがわかる。12月3日時点でのU#19周辺部の圧力は450 mAのビーム蓄積時



図5 現場設置後のアンジュレータU#19。真空ダクトは磁石列の最小ギャップ23 mmに対して1.5 mmの隙間で設置されている。

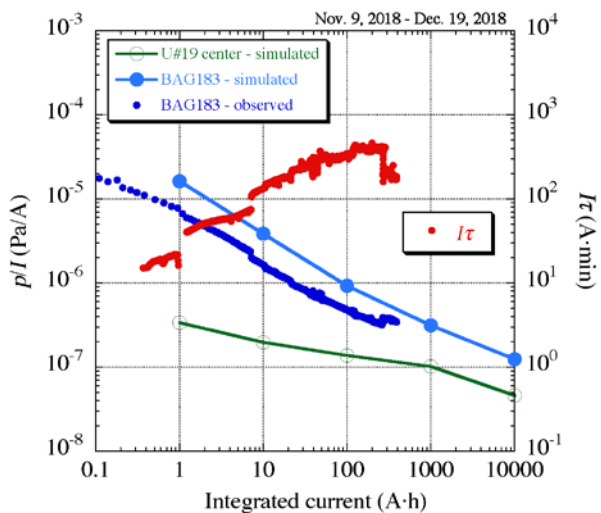


図6 光焼出し効果によるU#19 真空ダクトの枯れ（計算値と実測値）と蓄積電流値とビーム寿命の積（ $I\tau$ ）の進展。

で 1.5×10^{-7} Pa であり、その後さらに改善された。

計算によるとU#19 真空ダクト内部の圧力（緑線）はNEG コーティングの効果により周辺部の圧力（青線）よりも1桁程度低くなっており、このことはビーム寿命の速やかな伸展のみならず、ビームラインに向けて放出される制動放射ガンマ線の低減にも寄与していると考えられる。

PF-AR クライストロン用高圧電源制御盤内 PLC 更新作業

PF-AR のクライストロン用高圧電源（2台）の制御盤は1988年に製造された。内部で使用しているPLC（プログラマブル・ロジック・コントローラ）はすでに製造中止、さらに開発環境も失われており、プログラムの書き込みが出来ない状態になっている。2017年9月のPF-AR クライストロン用高圧電源の保守中に、PF-AR 東棟に設置されている制御盤内のPLCのROMが故障しているのが判明した（図7）。ROMは予備がなく現在使用されているものしかないため、東棟の高圧電源立ち上げのために、西棟のPLCからROMを外して、東棟のROMと置き換えて、PLCをブートして立ち上げるという操作を行った。一度電源を立ち上げれば、そのまま運転できる状態にはなるものの、西棟のROMも故障すると、高圧電源が東西とも動かなくなるという状況となった。そのため、直ちにPLCの更新を電源メーカーと協議し、更新作業を実施することとした。更新に当たっては既存のPLCは廃番であるため入手可能なPLCを使用する事になるが、すべての高圧電源立ち上げ手順の動作を既設電源に合わせるため、ソフトウェアの改変を含めてかなり労力のいる作業となることが判明した。結果的には新規PLCの調達、ソフトウェア製作、現場設置作業で約1年がかりの作業となった。PLC更新の現場作業と動作確認作業は、昨年夏の停止期間中に行われた（図8）。東棟と西棟の両方のPLCが更新されたことによって、高圧電源の動作停止のために、PF-ARが長期に運転停止になるという危険な状況は回避された。



図7 クライストロン用高圧電源制御盤（1988年製）（左上図），および制御盤内の故障したPLC（右下図黄色矢印）。



図8 更新されたPLC

運転，共同利用関係

2018年度のPFおよびPF-AR第2期のユーザー運転は、それぞれ11月16日、11月20日から開始され、両者とも12月19日（水）に運転を終了しました。このなかで、PF-ARでトップアップ運転が行われたのは、大きな前進であると思います。また、12月6日（木）には、PF-ARの5 GeV運転のスタディを第1期に引き続き実施し、3月の再度のスタディに向けて手応えを得ることができました。5 GeV運転を行うようになれば、消費電力の面からは有利になりますが、高エネルギー領域のビーム強度が低下しますので、従来の6.5 GeV運転とバランスをとりながら運転を行っていく計画です。

第3期については、PFは2月12日（火）から3月28日（木）の年度末のギリギリまで、量子ビームサイエンスフェスタの開催中以外は運転を行う予定です。一方、PF-ARの第3期のユーザー運転は予定されていません。ユーザーの皆様にはご迷惑をお掛けしますが、ご理解のほどよろしくお願ひします。その代わりに、第3期には1週間程度5 GeV運転のテストが予定されています。来年度の本格実施に向けて経験を積んでいく予定です。2019年度予算は、引き続き大変厳しい状況になりそうですが、PFリングについては年間3,000時間程度のユーザー実験時間を確保する方針です。PF-ARについては、5 GeV運転を導入して運転経費を節約することで、できる限りの運転を行いたいと考えております。

BL-19の建設に関して

これまでに繰り返し報告してきた軟X線領域のビームラインBL-19ですが、順調に建設が行われ、11月にはファーストビームを確認することができました。同ビームラインの建設は、国際競争力強化事業と新学術「水惑星学の創成」(<https://www2.kek.jp/imss/news/2018/highlight/0627AquaPlanet/>)の支援を受けて建設されたもので、関係者の皆様には改めて感謝を申し上げます。本ビームラインでは、APPLE-II型アンジュレータを新たに設置することで、90-2,000 eV程度までの高輝度軟X線が利用可能となっております。走査型透過X線顕微鏡（STXM）を常設したAブランチとフリーポートのBブランチを振り分けミラー切り替えで、実験を行うことが可能となっております。2019年度からのユーザー公開を目指して、現在様々な調整や機器の整備を進めているところです。

クライオ電子顕微鏡の共用開始に関して

PFニュース Vol.36 No.2でもお知らせしたとおり、構造生物学研究センターにクライオ電子顕微鏡（クライオ電顕；Thermo Fisher社製 Talos Arctica）が導入されました。導入

以来、AMEDを始め、多くの皆様のご協力のもと、10月には一般ユーザーに向けてAMEDのBINDS事業（創薬等先端技術支援基盤プラットフォーム事業）の一環として、共用を開始することができました。クライオ電顕を利用すれば、結晶化の出来ない生体高分子であっても、近原子分解能での構造情報を得ることが可能になります。ただし、結晶化は不要とは言っても、グリッドと呼ばれる観察試料の作製は様々なノウハウが必要とされている難しい段階で、タンパク質の結晶構造解析における結晶化に相当する部分になっています。従って、クライオ電顕の解析では、このグリッド作成に、多くの労力を割くこととなります。また、単粒子解析には、結晶構造解析に比べ多くの計算が必要で、いわゆるGPU boxと云われている並列計算用の計算機が必要となります。構造生物学研究センターでは、解析用のコンピューターを5台導入して解析環境を整えるとともに、体制の整備および強化を行い、共用に対する体制を整えてきました。現時点では（今後の予定も含めれば）、大学からは12グループ（今後、更に6グループが予定）ほどがBINDS事業を通じてクライオ電顕を利用しているとともに、企業研究者に対する“お試し測定”も8社が実施（更に6社が予定）するなど、アカデミア、産業界を問わず構造生物学分野からのクライオ電顕に対する大きな期待を感じております。このような状況の下、近原子分解能での構造解析の成功例も出てきました（図1）。もちろん解析には、結晶構造解析に利用できる程度の高純度のサンプルが必要とされますが、是非とも結晶化の困難なサンプルをお持ちのユーザーの皆様は、積極的に利用を検討していただければと思います。ご利用を希望の方は、お気軽に構造生物学研究センターまでお問い合わせください。

人事異動

構造生物学研究センターの研究員のSimon Millerさんが12月末日で退職され、新しい職場で働くことになりました。これまでの物質構造科学研究所での活動に感謝するとともに、今後の益々のご活躍をお祈りいたします。

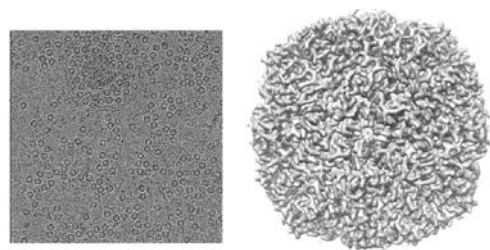


図1 SBRCのクライオ電顕で撮影したアポフェリチンの像（左）と、そこから再構成されたポテンシャルマップ