

入射器の現状

加速器第五研究系研究主幹 古川和朗
(2018年4月15日付け)

概要

放射光施設への電子入射ユーザー運転と、ダンピング・リングの試験運転が順調に推移する中、SuperKEKBのフェーズ2・コミッシュニングも進行し、3月21日には電子リング(HER)へのビーム蓄積に成功し、さらに3月31日に陽電子リング(LER)へのビーム蓄積に成功した。各種新規装置の調整や、衝突点近傍の新しい電磁石を含めたビーム光学補正を繰り返して、4月中旬時点で、HERとLERそれぞれにおいて200 mAを超えるビーム蓄積が可能となっている。この間に入射器においても、新しい装置をはじめとしてさまざまな小さな障害を経験しているが、幸いにして入射を継続できており、障害を適切に管理することにより、一つ一つ正常化させている。引き続きSuperKEKB衝突点の調整を進めて最初の衝突を達成し、また進行状況によってフェーズ2・コミッシュニング中に1.5 A程度の蓄積電流と2010年時点のKEKBと同程度の衝突性能(ルミノシティ)を目指すことになる。

受電設備の障害

放射光入射運転とダンピング・リングの試験運転を継続していた3月9日の早朝1:34に、つくばキャンパス内放射光地区を受け持つPFエネルギー・センターの受電設備における障害により、停電が発生した。入射器の再立ち上げにおいては、新規装置の調整中であったことも考慮し、2次災害を避けるために積極的な並行立ち上げは控えて、慎重な確認を心掛け、18時ごろの再入射となった。

当日は、湿度が高く南風であったところ、6.6 kVの送電ダクトから高湿度の空気が受電設備に侵入し、結露を発生した。その水が、外気を遮断するための水平の絶縁板の上に溜まり、銅板の母線(ブスバー)間の放電を招いたと考えられている。全体で約18 MWの容量の受電設備は2つ

の系統から構成されているが、ブスバーが損傷したために、1系統を停止させることとなった。入射器、放射光光源リング、ダンピング・リングの全てを運用するためには電力が不足することから、予定された3月20日までの放射光ユーザー運転を優先し、ダンピング・リングは休止させて20日に運転再開させることとなった。その後、電力制限が続いたが、5月の放射光施設の運転を再開する時期までには、停電無く復旧すると期待されている。

この受電設備の主要部分は、トリスタン建設以前に入射器と放射光施設のために準備されたもので、1980年から継続して運用されている。施設部関係者による適切な計画的保守がうかがわれる。なお、今回のような障害は38年間で初めてのもので、当日の天候が非常に特殊であったと推察される。また、先に述べた約18 MWという電源容量は当時必要であった電力の4倍から5倍であり、将来の放射光施設拡大に備えたものと思われ、当時の研究者の夢の大きさにも感心させられる。

SuperKEKB レビュー委員会

3月14日から16日にかけて、SuperKEKB加速器レビュー委員会が開催された。同委員会はKEKBの建設時期に開始されてから22回目を数え、毎回KEKB/SuperKEKB加速器について、科学的・技術的な課題や運営に関わるさまざまな助言を受けて、役立ててきた。今回も、Frank Zimmermann委員長を始めとする15人の専門家から、厳しい評価をいただいた。図らずもフェーズ2・コミッシュニング中のメイン・リングのビーム蓄積間近の時期となったが、委員の方々には最も活動的な時期のプロジェクトを見ていただくことになったと思われる。24のレビュー項目の内、入射器に関係する8項目についても、それぞれ適切な助言をいただくことができた。これらは、今後のプロ



図1 PFエネルギー・センター内の設備、左から、共同溝からの66 kV受電部、6.6 kVへの変圧器、6.6 kVのブスバーを覆うダクト。ダクトの下にあるメッシュから多湿の温風が侵入したと考えられる。

ジェットの指針となるべきもので、丁寧な対策を心がけていきたいと考えている。

入射器の体制

4月から、飯田直子氏が4系から5系のマグネット・真空グループへ異動・配属になり、入射器とダンピング・リング、入射器とメイン・リングの効果的な協調運転に力を発揮していただけると期待している。また、東保男氏が沖縄科学技術大学院大学（OIST）から加速管・陽電子グループへ異動・配属になり、今後の長期運転に必要な加速管の開発などの課題に対して経験を活かしていただけると期待している。

光源リングの運転状況

PF リングにおける運転再開から3月20日9:00までの蓄積電流値の推移を図1に示す。

PF リングは、1月18日(木)9:00から立ち上げを開始した。リングの真空焼き出しを含めたビーム調整は順調に進み、1月23日(火)9:00から光軸確認を行い、ユーザ運転を再開する予定であった。しかし、当日は大雪であったため、光軸確認を15:00に変更して対応した。光軸調整は問題なく、無事ユーザ運転再開となった。

1月25日(木)16:00頃、PF エネルギーセンターより、M7-B 系統の純水補給が頻繁に行われていると連絡があった。M7-B 系統の冷却水は光源棟トンネル内の電磁石と真空ダクト、電源棟の電磁石電源とRF 電源で使用している冷却水である。純水補給が頻繁に行われているということは、どこかで冷却水が漏れている可能性があるため、光源棟地下及び電源棟で漏水していないか確認したが、加速器

側では漏水の痕跡は確認できなかった。そこで、電源棟屋上にあるクーリングタワーからの漏水を疑い調査した。クーリングタワーは4台1セットのものが2セットあり、合計8台のクーリングタワーがある。4台(1セット)のクーリングタワーを停止しても、残りの4台とエネセンからの1次冷却水で熱負荷をまかなえるだろうと判断して、17:20ごろよりクーリングタワー4台を停止して漏水確認作業を行った。確認作業の結果、1台のクーリングタワーで冷却水の漏水が確認できたことから、この系統のバルブを閉止して冷却水を止めることとした。クーリングタワー4台を停止して運転したが、まだ外気温が低かったため、冷却水の水温変化はほとんどなく、ビーム軌道の変動も起きなかった。クーリングタワーの漏水対策については、施設部と相談して進めている。図2に、M7-B 系冷却水のIN 圧力とOUT 圧力、ダクト冷却水の流量(ある流量からの変動率)を示す。1月25日13:00すぎごろから純水の補

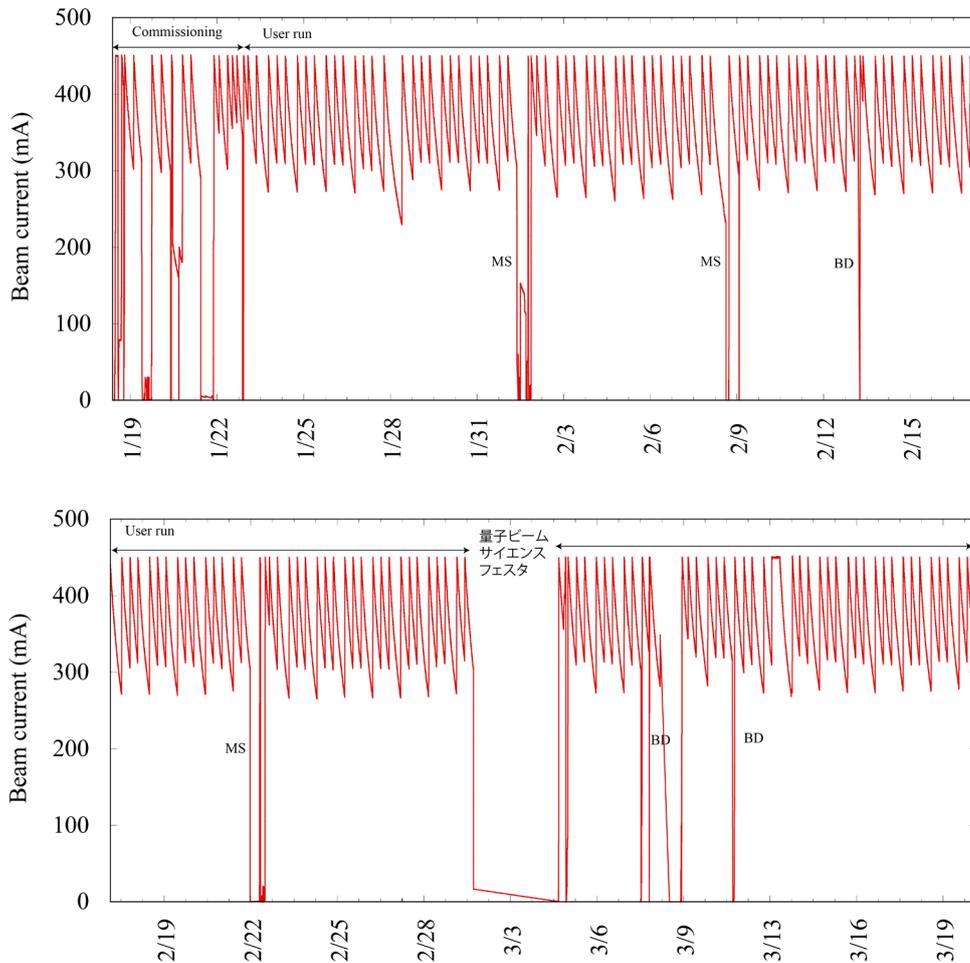


図1 PF リングにおける運転再開1月18日9:00から3月20日9:00までの蓄積電流値の推移を示す。MSはマシン調整日、BDはビームダンプを示す。

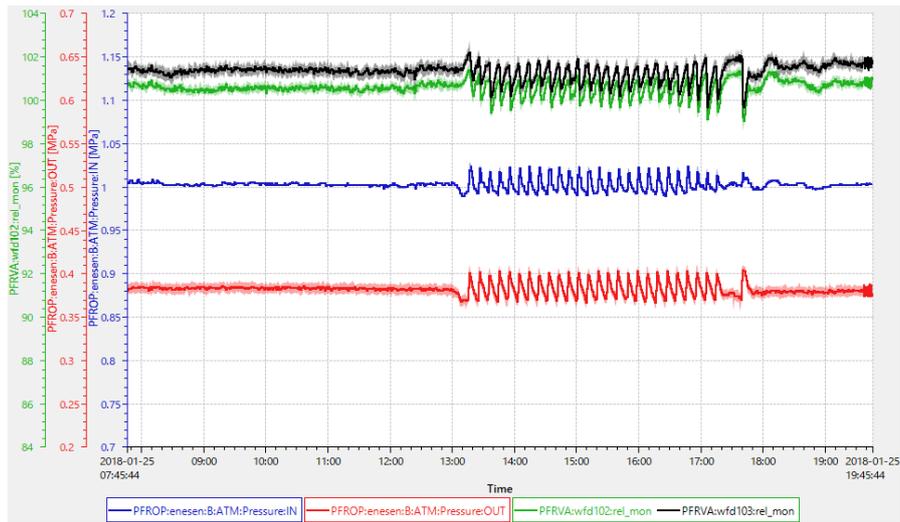


図2 PFリング, M7-B系冷却水のIN圧力(青線)とOUT圧力(赤線),ダクト冷却水の流量(ある流量からの変動率)(黒線, 緑線)を示す。

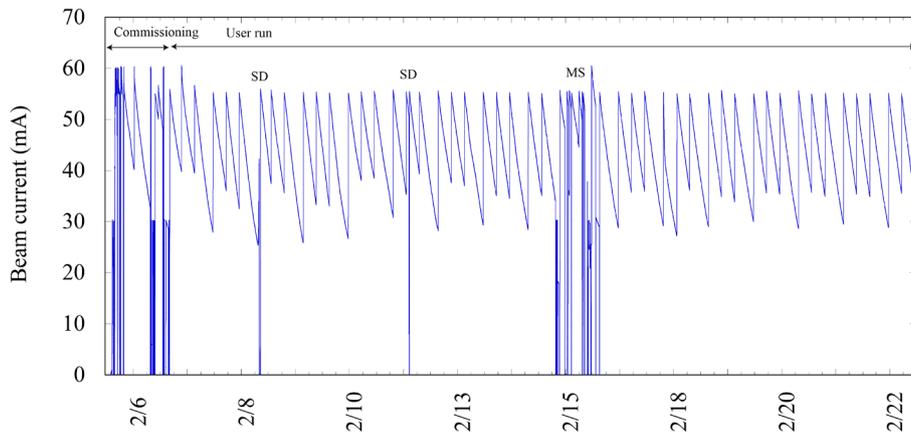


図3 PF-ARにおける運転再開2月5日9:00から2月23日9:00までの蓄積電流値の推移を示す。MSはマシン調整日, SDはビーム寿命急落を示す。

給による冷却水の圧力変動と、それに伴う流量変動が起きており、漏水しているクーリングタワーの冷却水を止めた後は変動が収まった。

2月13日(火)4:30ごろビームダンプが発生した。リングの4極電磁石電源(Q8A)がダウンしたことが原因であった。ダウンした電源を現場で確認したところ、IGBT故障のランプ点灯を確認。担当職員が来所して故障をリセットし、動作の確認を行ったところ、特に動作に問題がないことから、6:23にユーザ運転を再開した。この電源は、2015年にも同様の故障があったが、その時は内部コネクタの接触不良が原因と推察されていた。後日、故障の原因調査を行ったところ、一部老朽化によるコンデンサの劣化が確認された。すでに10年以上使用されている電源であるので、同じ時期に製造された電源についても、コンデンサの交換を考える必要がある。

3月9日(金)1:34ビーム入射中に停電が発生し、ビームダンプするとともに電磁石およびRFがすべてダウンした。2:34に復電したが深夜であることから、9:00頃

から各装置の状況確認を行った。幸いリングに関しては運転に関わる重故障はなく、入射器の復旧を待つこととなった。ただ、ビームライン27の真空が 10^{-1} Paまで悪化していたため、そのビームラインのみ停止することが検討された。その後の復旧作業で真空が回復し、すべてのビームラインで運転再開することが可能となった。18:34に入射器からビームが供給され、リング側の軌道調整等を行って、20:34にユーザ運転を再開した。3月11日15:38、Q5A電磁石電源がIGBT故障インターロックでダウンし、ビームダンプが発生した。2月13日にも同じ症状がQ8A電磁石電源で発生している。担当者が来所し、ブレーカーのOFF/ON後に初期化することで復旧し、17:52にユーザ運転を再開した。原因は何らかの接触不良によるものと推測された。

3月20日(火)9:00に予定通りPFリングの運転を停止した。運転再開は、5月7日(月)を予定している。

PF-ARにおける運転再開から2月23日9:00までの蓄積電流値の推移を図3に示す。PF-ARは、2月5日(月)9:

00 から立ち上げを開始した。立ち上げビーム調整時にすべての真空封止アンジュレータのギャップを最小にしてビームを入射しても、実験ホール（ビームライン側）の放射線レベルに問題ないことを確認した。今期の運転では初期電流値を 60 mA とすると、ビーム寿命が極端に短い状況にあった。その原因は今のところ特定できていないが、対処として 5 mA ほど電流値を低くするとビーム寿命が延びることから、初期電流値を 55 mA に下げて運転した。その他のビーム調整は順調に進み、2月7日（水）9：00 から光軸確認を行った後、ユーザ運転を再開した。

2月12日（月）2：56 に大きなビームロスが発生した。ビームロスの原因は前期に頻発していたキッカー電磁石のミスファイアであった。冬の停止期間中にキッカー電磁石電源にノイズ対策を実施したが、完全な問題解決には至らなかった。そのため、今期も入射時以外はキッカー電源を OFF する対処を行って、運転を継続することとした。その後の調査で、特定のキッカー電源が先にミスファイアを起こし、それにつられて他の電源もファイアする現象であることを把握した。次期の停止期間中には先にミスファイアする電源を調査し、原因究明に努める。

18 日間の短い運転ではあったが概ね順調に行われ、2月23日（金）9：00 に予定どおり運転を停止した。運転再開は、5月14日（月）を予定している。

平成 29 年度の運転のまとめ

表 1 に平成 21 年度から 29 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 4 に示す。平成 29 年度のユーザ運転時間は 2983 時間と 3000 時間をわずかに下回ったが、故障率は例年並みの 1% 以下を維持でき、一方平均故障間隔（MTBF）は 214 時間と 200 時間を上回り、ここ数年で極めて安定な運転が行われたといえる。故障の内訳を調べると、29 年度は電気設備関係の故障と電磁石電源および入射用パルス電磁石電源の故障で 90% 以上を占めた。これらは、老朽化に起因する故障といえる。28 年度超伝導垂直ウィグラーで真空リークを伴う故障が再発したが、29 年 7 月に真空ダクトの更新作業を行った。更新後、ハイブリッド運転時に上流にあるアブソーバ付きダクトとベローズダクトで発熱が起こり、真空悪化がみられたものの、真空リークは全く起こらず概ね順調に稼働したといえる。

表 1 平成 21 年度～29 年度までの 9 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)
2009 (H21)	4,976.0	979.5	3,961.9	34.5
2010 (H22)	5,037.0	958.7	4,050.8	22.5
2011 (H23)	4,696.0	1,875.1	2,809.2	11.7
2012 (H24)	4,416.0	624.0	3,752.9	39.1
2013 (H25)	4,176.0	672.0	3,451.4	52.6
2014 (H26)	3,024.0	696.0	2,316.6	11.4
2015 (H27)	3,888.0	839.6	3,034.0	14.4
2016 (H28)	3,432.0	504.0	2,910.7	17.3
2017 (H29)	3,624.0	624.4	2,983.0	16.6

表 2 平成 21 年度～29 年度までの 9 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)
2009 (H21)	5,063.0	542.5	4,445.7	74.8
2010 (H22)	4,638.5	542.5	4,037.5	58.5
2011 (H23)	4,131.5	1,162.0	2,941.5	28.0
2012 (H24)	4,080.0	408.0	3,643.2	28.8
2013 (H25)	3,912.0	434.0	3,378.4	99.6
2014 (H26)	2,352.0	360.0	1,955.0	37.0
2015 (H27)	3,336.0	552.0	2,753.0	31.0
2016 (H28)	1,821.0	717.0	1,085.7	18.3
2017 (H29)	2,448.0	312.3	2,111.0	24.7

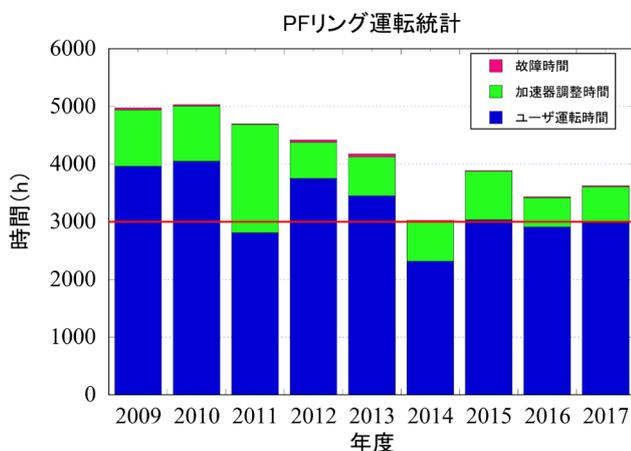


図 4 平成 21 年度～29 年度までの 9 年間の PF リングの運転統計の棒グラフ

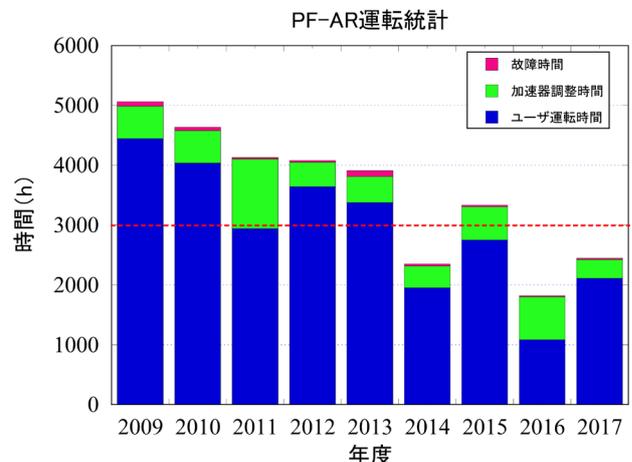


図 5 平成 21 年度～29 年度までの 9 年間の PF-AR の運転統計の棒グラフ

表2と図5にPF-ARの運転統計を示す。平成29年度のユーザ運転時間は2111時間と2000時間をわずかに上回ったが、3000時間の水準にはほど遠い状況にある。故障率は例年並みの1%程度を維持できたものの、平均故障間隔(MTBF)は38.8時間とここ数年では最悪の数値となった。これは、ビームライン側のトラブルと新しく導入されたキッカー電磁石の誤動作によるビームダンプが頻発したためであった。一方で、PF-ARでは6.5 GeV 直接入射路が完成し、フルエネルギー入射によるユーザ運転を開始することが可能となった。ビーム入射時に加減速を行う必要がなくなるとともに、ビーム不安定性によるビームロス等もなく、短時間にビームの積み上げが完了することから、ビーム入射によるユーザ運転の中断は大幅に改善された。さらに、トップアップ運転へむけた準備として、安全系の更新を行った。すなわち、ビームシャッターを開いた状態で、さらにすべての真空封止型アンジュレータのギャップを最小ギャップにして、ビーム入射を可能なように更新した。すべてのアンジュレータ最小ギャップの状態に入射を行い、ビームライン側で放射線サーベイを行ったところ、放射線レベルは問題ないことも確認された。これで、PF-ARもPFリング同様にトップアップ運転がいつでも行える状況となった。

人の動き

加速器第7研究系では、光源第6グループ(ERL電子銃グループ)・グループリーダーの宮島司准教授が、4月1日付けで加速器第6研究系加速器理論グループに異動になりました。宮島さんは、放射光源研究系の電子軌道グループに着任されてから、電磁石の設計製作、軌道調整等を担当されてきました。特に、PF-AR高度化時には、加減速を伴うPF-ARの電磁石パターン制御プログラムを担当され、完成度の高い制御プログラムによってPF-ARのスムーズな加減速の成功に導きました。また、医学利用に必要であった5 GeV運転にも中心的に対応されました。ERL放射光計画が実質的に動き始めた頃から、特に空間電荷効果の影響の強い低エネルギー領域のビーム力学を研究テーマに選び、コーネル大学に一年間留学をされるなど積極的に研究に取り組み成果を上げられました。一方でコンパクトERLのビームコミッショニングでは中心的に活躍され、大電荷かつ低エミッタンスビームの輸送に大きな貢献をされました。さらに宮島さんはERLの電子銃グループのグループリーダーとして、グループメンバーをうまくまとめてこられました。さらに、総研大生や韓国からの留学生等の若手研究者の指導も積極的に行っていました。今後は光源加速器だけでなく、衝突型加速器や大強度陽子加速器でのビームダイナミクスなどへの貢献も期待されています。

加速器研究施設内の異動関係では、加速器第5研究系の非常勤研究員の舟橋義聖さんが、加速器第7研究系に異動になり、主に超伝導空洞を取り入れた電子顕微鏡の開発を行って頂きます。

新規採用関係では、高輝度光科学研究センター(JASRI)

から、満田史織さんと下崎義人さんの2名が、4月1日付けで加速器第7研究系の准教授として着任されました。お二人とも光源第1グループに所属して頂き、満田さんには、ビーム入射システムの開発研究を含めた電磁石および電磁石電源の担当、下崎さんには低エミッタンスリングおよび大強度加速器のビームダイナミクスの開発研究を担当して頂きます。

昇任関係では、光源第4グループ准教授の帯名崇さんが、4月1日付けで教授に昇任されました。帯名さんには、引き続き光源第4グループのグループリーダーとして、ビーム診断システムの開発研究に着手して頂きます。それから、光源第6グループ特別助教の金秀光さんが助教に、光源第1グループの博士研究員であった東直さんが特別助教に採用されました。東さんには、引き続き光源第1グループに所属して、電子軌道関連の開発研究を中心に行って頂きます。

平成30年度のこれらの異動・昇任・新規採用に伴い、加速器第7研究系では一部グループの再編を行うこととしました。特に、光源第6グループはこれまでのERL電子銃開発から、FEL等のビームダイナミクスの開発研究を行うグループとして位置づけ、光源第7グループから加藤龍好教授をこのグループのグループリーダーに、本田洋介助教をグループメンバーとしました。一方、山本将博助教、金秀光助教、内山隆司技師には光源第3グループに異動していただき、蓄積リングにおける真空システムの高度化等の開発研究にも加わって頂くこととしました。さらに、光源第7グループのリーダーは、加藤教授から土屋准教授に引き継いで頂くこととしました。

運転，共同利用関係

PF および PF-AR の 2017 年度第 3 期の運転は，3 月 9 日の落雷による PF の停止を除いて，ほぼ予定通り行われました。PF-AR については，年度当初は運転経費を十分に確保できず，第 3 期の運転が見込めませんでした。物構研および機構からの追加予算により，2 月 7 日から 2 月 23 日という短い期間ながら運転を行うことができました。一方 PF については，昨年春から秋にかけて行われた入射器の大規模改修工事の影響で，年度末に近い 3 月 20 日まで運転することになりました。この改修工事の結果，KEK の 4 つの蓄積リング（PF，PF-AR および SuperKEKB の HER，LER）に対して，任意のタイミングで入射が行えるようになり，調整が順調に進めば，2018 年度の第 2 期から PF のトップアップ運転を再開するとともに，PF-AR でもトップアップ運転を開始できる予定です。

2018 年度第 1 期は，PF は 5 月 11 日，PF-AR は 5 月 17 日より，それぞれユーザー運転を開始する予定です。通常の運転は，PF，PF-AR それぞれ 6 月 30 日，6 月 29 日の朝に終了しますが，PF については今年度初めての試みとして，「産業利用促進運転」を 7 月 6 日の朝まで予定しています。これは従来の運営費交付金による運転とは別に，施設利用等の有償利用の利用料収入を原資として，追加で運転を行うものです。この運転期間には，一般施設利用の他に，優先施設利用での利用も受け付けています。優先施設利用は，国又は国が所管する独立行政法人その他これに準ずる機関が推進するプロジェクトにより採択された研究課題の実施のために，施設を優先的に利用することができる制度ですが，2017 年 10 月より，科学研究費助成事業での利用も可能になりました。予算が削減される中で，少しでも運転時間を確保するための新たな試みですので，是非，積極的にご利用ください。なお，定められた時期までに有償利用の申し込みが無い場合には，一般の共同利用課題にビームタイムを配分します。

ビームライン改造等

2017 年度より 3 年間の予定で，大学共同利用機関法人に係る重点支援として，「放射光施設ビームラインを活用した産業界等におけるイノベーション創出の推進」が認められ，この予算を利用して，BL-19 の全面的な更新を開始しました。新 BL-19 は，軟 X 線領域の可変偏光アンジュレータと入射スリットレスの可変偏角不等刻線間隔回折格子型分光器で構成され，2 つのブランチのうちの一つに，産業界，学术界双方から需要の高い走査型透過 X 線顕微鏡（STXM）を設置し，もう一つのブランチをフリーポートとする予定です。なお，2017 年度に採択された新学術領域「水惑星学の創成」（領域代表：東京大学，関根康人先



図 1 撤去前（上）と撤去後（下：2018 年 4 月 26 日撮影）の BL-19 の様子

生）からも予算を投入することによって，更新スケジュールを大幅に前倒しすることができました。2017 年度にはアンジュレータを製作するとともに，ビームラインの設計と主要コンポーネントの製作を行いました。3 月 20 日の 2017 年度第 3 期の運転終了とともに，旧ビームラインの解体作業を開始し，春のシャットダウンを利用して光軸の測量やハッチ建設を行っています。今後，夏季シャットダウン中にアンジュレータおよびビームラインを設置し，第 2 期の運転から立ち上げ，調整を開始する予定です。第 2 期の運転から立ち上げ，調整を開始する予定です。ビームライン更新の様子は Web ページ (<http://www2.kek.jp/imss/news/2018/topics/0409PF-BL-19/>) でも紹介していますのでご覧ください。

PF シンポジウム

3 月 2-4 日に開催された量子ビームサイエンスフェスタ

において、1日目に11件のユーザーグループミーティングが、3日目に第35回PFシンポジウムが、それぞれ開催されました。ユーザーの皆様には、年度末のお忙しい時期に、初めての開催地である水戸までお越しいただき、ありがとうございました。今回は物構研、PF-UAともに、執行部メンバーが入れ替わるタイミングですので、PFの運営や将来計画に関するこれまでの活動のまとめと、今後の展望が重要なテーマとなりました。引き続きユーザーの皆様と密接に連携し、PFにおける放射光科学を発展させていきたいと考えております。

PFが一段と活気づくことを期待しています。

人事関連

新年度を迎えるにあたり、多くの人事異動がありました。建設当時から長年にわたってPFを支えてこられた河田洋教授と山本樹教授が2017年度末をもって定年退職を迎えるとともに、同じく当初からPFを支え、2012年度からは機構の理事を務めてこられた野村昌治理事が退任されました。これまでの多大なご貢献に心より感謝いたします。今後もそれぞれ、加速器第六研究系の特別教授、物構研のシニアフェロー、および物構研のダイヤモンドフェローとしてご活躍されます。電子物性グループのグループリーダーである組頭広志教授が、東北大学多元物質科学研究所に異動されました。引き続き20%のクロスアポイントメントとして物構研に所属し、PFにおける研究を継続されます。構造物性グループの特任准教授の一柳光平さんが自治医科大学に、特任助教の小林賢介さんが物質・材料研究機構に、また、電子物性グループの特別助教の蓑原誠人さんが産業技術総合研究所に、それぞれ異動されました。今後のますますのご活躍をお祈りします。また、電子物性グループの研究員の河合純さんが退職されました。

次に新任の方々をご紹介します。電子物性グループの特任助教として、羽合孝文さんが3月1日に着任され、元素戦略磁性材料研究プロジェクトのもとで、高性能磁性材料研究を推進されます。大学共同利用機関法人に係る重点支援「放射光施設ビームラインを活用した産業界等におけるイノベーション創出の推進」の特別助教として、高木秀彰さん、山下翔平さん、若林大佑さんが着任されました(4月1日付。以下同じ)。高木さんは生命科学グループに所属して小角散乱実験の高度化と利用支援に、山下さんと若林さんは先端技術・基盤整備グループに所属してBL-19の建設に、それぞれ従事する予定です。生命科学グループと電子物性グループの博士研究員として、篠田晃さんと小畑由紀子さんが着任され、それぞれ蛋白質結晶構造解析の高度化と光電子分光による機能性薄膜の研究に従事されます。生命科学グループの研究員として大原麻希さんが着任され、CREST「シグナルペプチド：細胞外微粒子機能の新規マーカー」のもとでX線マイクロビーム照射による細胞生物学的変化解析に従事されます。ImPACT「ユビキタス・パワーレーザーによる安全・安心・長寿社会の実現」の研究員として益田伸一さんが着任され、極短周期アンジュレータの開発に従事されます。新たなメンバーを迎え、