

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

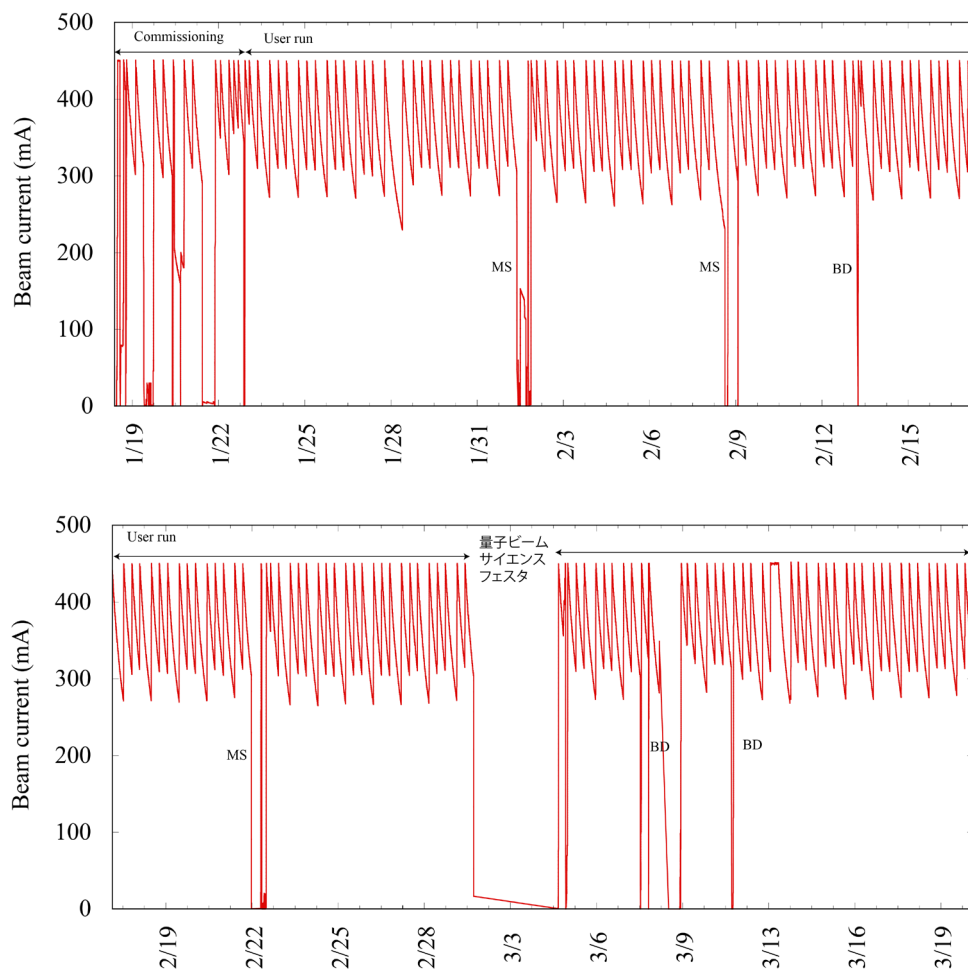


図1 PF リングにおける運転再開1月18日9:00から3月20日9:00までの蓄積電流値の推移を示す。MS はマシン調整日、BD はビームダンプを示す。

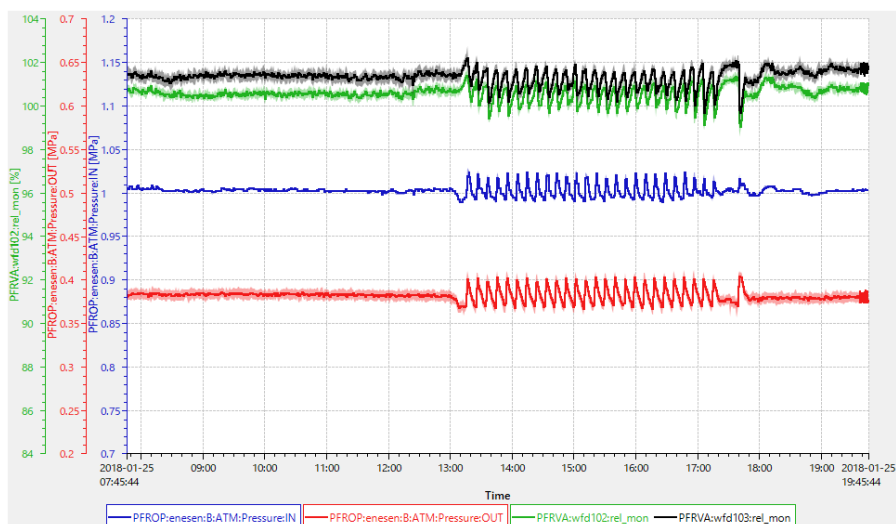


図2 PF リング, M7-B 系冷却水の IN 圧力(青線)と OUT 圧力(赤線),ダクト冷却水の流量(ある流量からの変動率)(黒線,緑線)を示す。

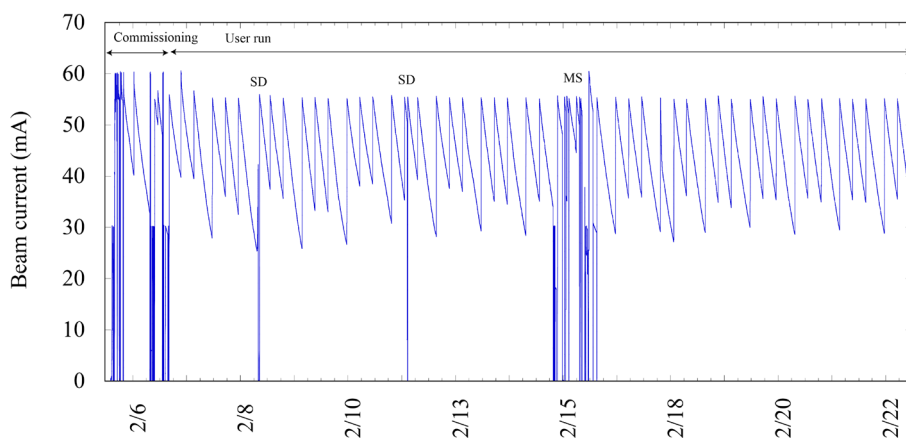


図3 PF-AR における運転再開 2 月 5 日 9：00 から 2 月 23 日 9：00 までの蓄積電流値の推移を示す。MS はマシン調整日，SD はビーム寿命急落を示す。

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

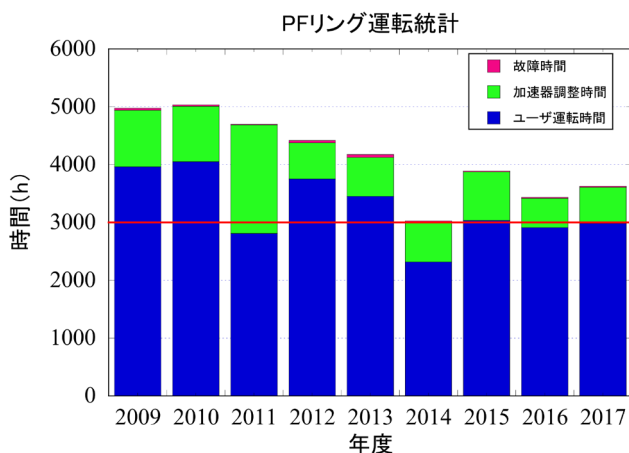


図 4 平成 21 年度～29 年度までの 9 年間の PF リングの運転統計の棒グラフ

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

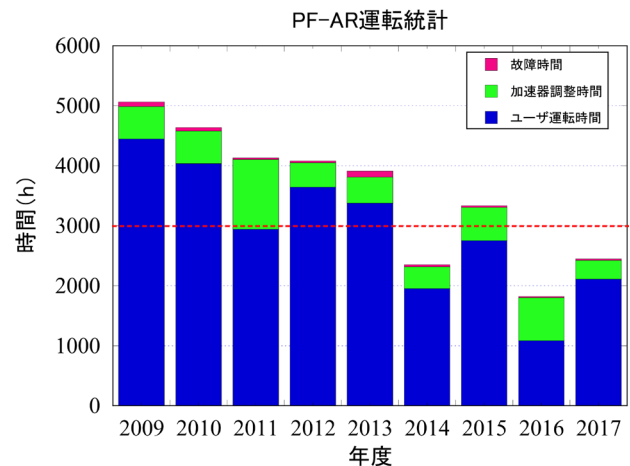


図 5 平成 21 年度～29 年度までの 9 年間の PF-AR の運転統計の棒グラフ

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、ビーム入射を可能のように更新した。すべてのアンジュレータ最小ギャップの状態で入射を行い、ビームライン側で放射線サーベイ行ったところ、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ッ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ッ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ッ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。

光源リングの運転状況

図1に、5月7日9:00～7月6日9:00までの約2ヶ月間の蓄積電流値の推移を示す。PFリングは、連休明け5月7日9:00に立ち上げを開始した。5月7日9:50頃リング電磁石の初期化を行っている最中に、6極電磁石電源(SFD)に不具合があることが判明した。制御系の不具合と予想され、すぐにメーカーに連絡し、午後から調査を行うこととした。午前中は入射路調整を行い、SFD電源無しでのビーム入射を試みたが、蓄積することはできなかった。メーカーの調査の結果、DAC/ADCモジュールの恒温槽の故障と判明した。図2に示すように、モジュールの内部基板は焦げ、抵抗2個破裂、配線も焦げているのが分かった。残念ながらこのモジュールの予備品はなく、また約24年前に製造された基板であるため、メーカー側の見解ではすぐに修理することは困難ということであった。幸いなことに、J-PARCハドロングループ(素核研)で同様の電源が使用されているということで問い合わせたところ、故障したモジュールの予備品があるとのことで、借用させ

ていただけることになった。その予備品のおかげで、電源は無事に動作することができ、その後のビーム調整は順調に行われた。PFリングは、5月11日9:00から光軸確認が行われた後、ユーザ運転を再開した。6月1日9:00から6日間はハイブリッドモードでのトップアップ運転が行われた。ハイブリッド運転の蓄積電流値については、昨年11月の運転と同じ蓄積電流値(マルチバンチ400mAとシングルバンチ50mA)ではVW#14付近の真空が悪化したため、シングルバンチの電流値を30mAに下げて運転した。

今期は、上述した電磁石電源のトラブル以外にも、老朽化に起因すると思われる電磁石電源のトラブルが5件発生した。まず1件目は、ビームダンプにはならなかったものの、5月15日7:59に入射路の偏向電磁石電源BTBMがダウンし、チャンネルクローズになったトラブルであった。制御系の異常であったが、ブレーカーON/OFFを行ったところ復旧し、10:03にチャンネルをオープンした。同様の現象が5月27日3:34に発生した。4:12にリングのモードを入射モードから蓄積モードに変更してチャンネルパー

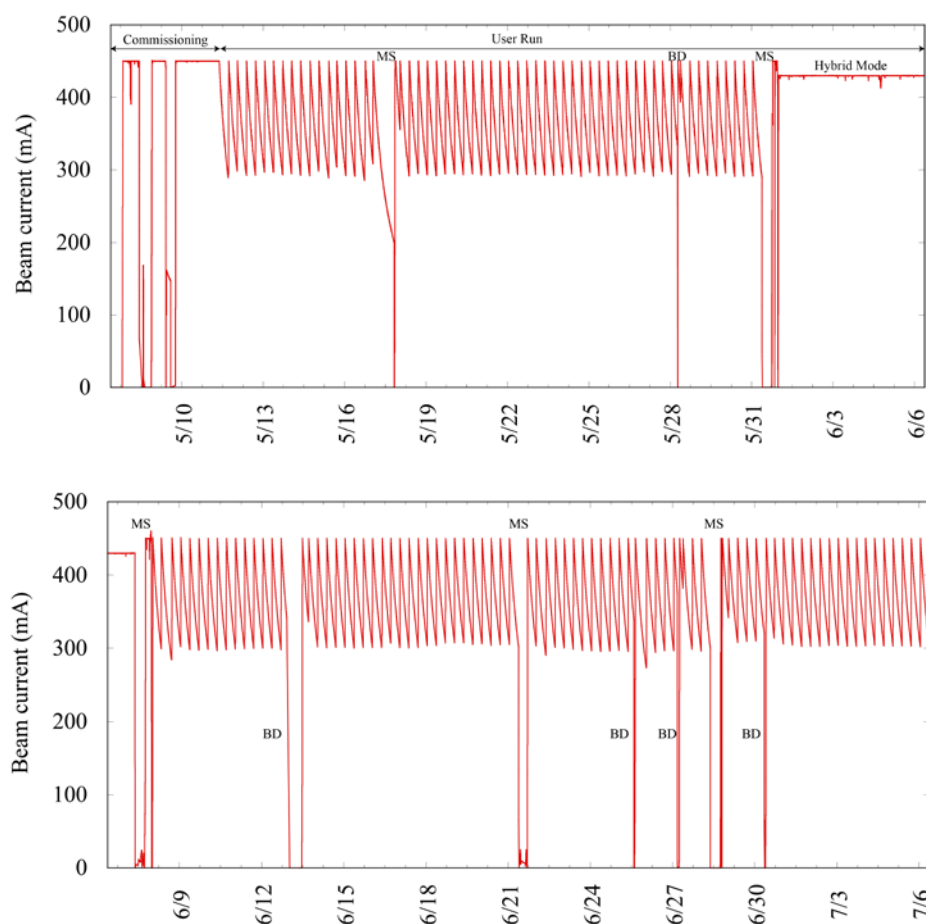


図1 PFリングにおける5月7日9:00～7月6日9:00までの蓄積電流値の推移。MSはマシン調整、BDはビームダンプを示す。



図2 PFリング立ち上げの5月7日に故障したSFD(6極電磁石:1994年製造)電源。上下図の黒いダイヤルが3つについているモジュールが故障したモジュールで、下図がモジュール内部の基板。内部基板は焦げ、抵抗2個破裂、配線も焦げているのが分かった。

ミットを行い、ユーザ運転はすぐに再開した。制御系異常を起こしたPLCが特定されたため、予備PLCと交換し、9:00にモード切り替えのためにチャンネルをクローズした時に、BTBMの初期化を実施した。その後9:07にチャンネルパーミットを行い、通常の手順通り積み上げ入射を行って、ユーザ運転となった。2件目のトラブルによるビームダンプは、6月12日22:04に4極電磁石電源(Q9B)がIGBT故障のアラームでダウンしたことによる。電磁石電源盤内のコンデンサが破損して、基板上に液が漏れていた。夜間の交換作業は困難と判断し、翌朝メーカーを呼んで、予備のコンデンサとの交換作業を行った。約2時間程度の作業で交換は完了し、電源の再立ち上げ後11:49にユーザ運転を再開した。3件目は6月25日14:05、同じく4極電磁石電源(Q5A)がIGBT故障のアラームでダウンしたことによるものであった。電源盤内を調査したが、内部に異常は見られなかった。この電源は3月11日にも同様な現象が起こって、メーカーで調査をおこなったものの、特に異常は確認されなかった。今回が2度目のトラブルであった。故障リセットで特に問題なく復旧し、15:29にユーザ運転再開となった。4件目も3件目と同じようなトラブルであるが、6月27日4:16今度は4極電磁石電源(Q6A)がIGBT故障でダウンしたことによるビームダンプであった。この故障時も特段の異常は見られず、Q5Aの対応と同様に故障リセットで復旧し、6:16にユーザ運転を再開した。これら、Q5A、Q6A、Q9BはPFリング直線部改造時に製作された電源で、製造から約14年が経過している。5件目の故障は、6月30日8:10に発生した。やはり4極電磁石電源であるが、QDと呼んでいる電源で、出力電流値480Aに対して±10A程度で電流が変動し、ビームダンプとなった。この電源はPFリング高輝度化時に製作されたもので、上記3つの電源よりもさらに古く製造から24年以上経過している。調査の結果、電源内部に異常は見ら

れなかったもので、再立ち上げを行ったが、その立ち上げ完了直後のビーム入射中に変動が再発してビームが削れたため、応急処置として電源扉を開けて内部をファンで空冷することにした。その結果、変動はなくなり電流値が安定したことから、10:00にユーザーランを再開した。応急処置後からは電流変動の再発はなかった。PFリングは、7月6日9:00で運転を停止し、夏の停止期間となった。老朽化に起因した電磁石電源のトラブルに関しては、コンデンサ全数交換および新規電源製作等も視野に入れて対策を進めている。

図3に、PF-ARにおける5月14日9:00～6月29日9:00までの蓄積電流値の推移を示す。PF-ARは、5月14日9:00から立ち上げおよびリングの調整を行って、予定通り5月17日9:00から光軸確認を行い、ユーザ運転を再開した。PF-ARでは、RF関連の老朽化に起因するトラブルおよび寿命急落による再入射が頻発した。RFに関わるトラブルの1件目は、5月19日の1:49に発生した。PF-AR東電源棟にあるクライストロン用高圧電源がインターロック動作で停止し、ビームダンプした。担当者が来所して調査を行い、故障個所の基板を交換して復旧した。深夜における、過去に経験のない箇所での故障であったため、復旧までやや時間を要した。2件目は、5月28日の1:39にRF空洞の高次モード引き出し用ケーブル(HOMケーブル)の温度インターロックでRFがダウンし、ビームダンプとなったトラブルであった。温度スイッチをリセットし、さらに蓄積ビームの電流値を50mAに下げて運転を開始したが、4:20に再発した。そのため、HOMケーブルの交換が必要と判断し、9:00からケーブルの交換作業を行った。このトラブルについては、詳細を後述する。6月6日～12日の期間、ビーム寿命急落による再入射が4回発生した。6月12日以降に起こったビーム寿命急落は、アンジュレータNW14-2のギャップを最小の8mmにしたことによる。6月14日のマシン調整日にこの現象を調査したところ、垂直方向のビーム軌道がNW14-2の場所で下側に寄っていることが分かり、蓄積電流値や他のビームラインのギャップの変更等のビームの条件が変わることによってビームが削れてしまうことによるものと判断した。6月18日未明にNW14-2のギャップが40mmまで開いたことでビーム寿命が長くなり安定した。後日6月21日にも調査を行ったところ、垂直方向のペータロンチューンを変えると寿命が変わることが判明した。NW14-2のギャップを8mmまで閉めてもビーム寿命が減少しないチューンを見つけたが、ビーム寿命の変化の様子が変わった(図4)。ペータロンチューンとビーム寿命の依存性を理解するため今後も調査を続ける予定である。6月11日10:06にRF HOMケーブルの温度上昇の報告があり、安全をみて17:00の入射から蓄積電流値を50mAまで下げて運転することとした。6月14日のマシン調整日にそのHOMケーブルを予備のケーブルと交換し、6月15日0:30から蓄積電流値を60mAに戻して運転した。今回は温度が上昇し始めたところで交換したため、若干黒く変色していた程度

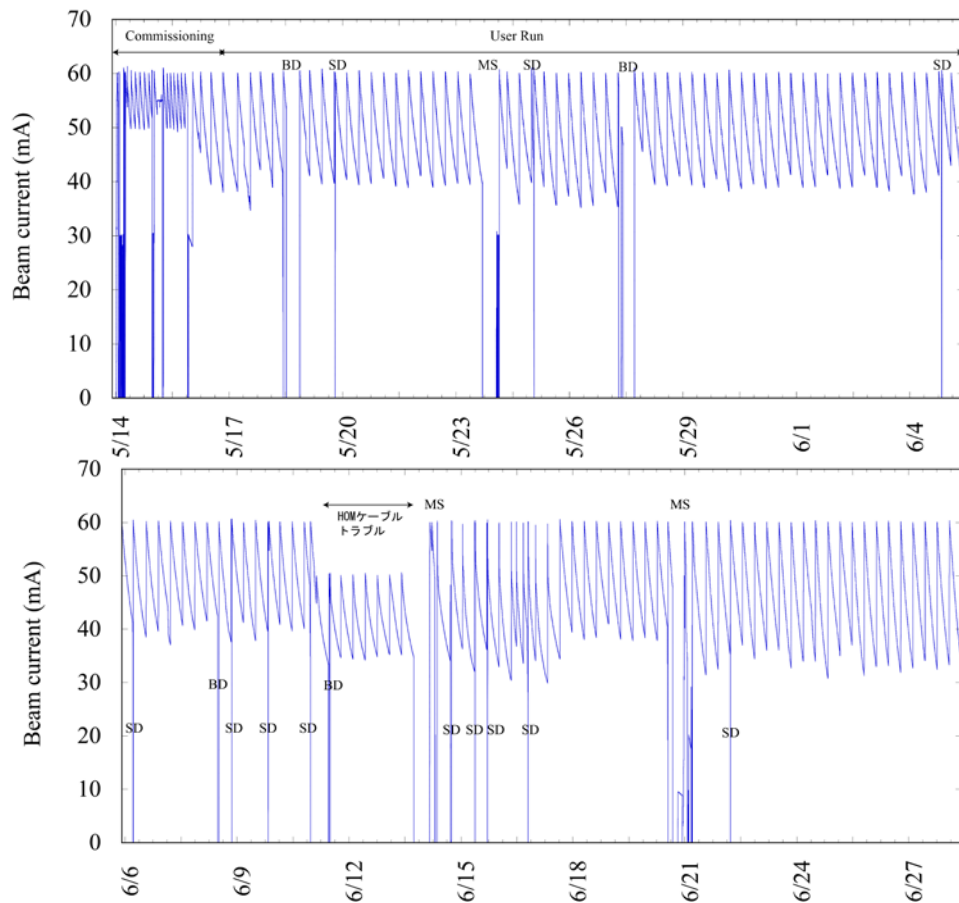


図3 PF-ARにおける5月14日9:00～6月29日9:00までの蓄積電流値の推移。MSはマシン調整、BDはビームダンプ、SDは寿命急落による再入射を示す。

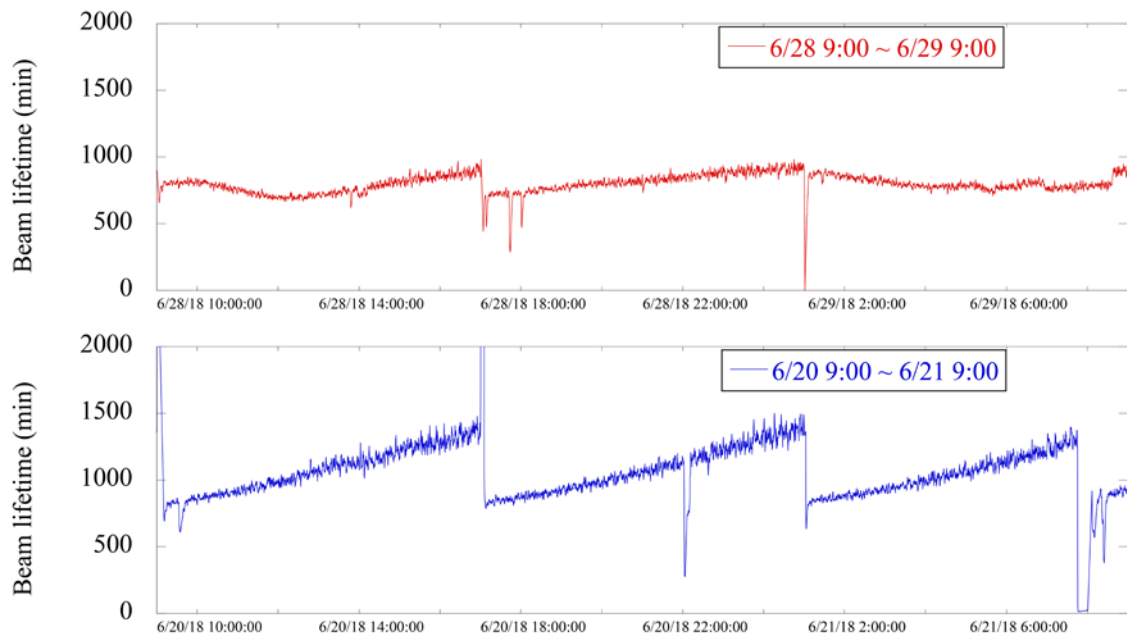


図4 PF-ARにおける1日のビーム寿命の推移：垂直方向のベータトロンチューンを変えた後のビーム寿命（上図），変える前のビーム寿命（下図）を示す。

で損傷はなかった。今後も温度が上がり始めたら交換することとした。キッカー電磁石 (K1) が勝手に励磁してビームダンプするという現象が3件発生した。その原因調査は続けているが決め手がなく、調査結果を整理し夏の停止期間中にこの現象が起こらない対策を施す予定である。6月21日に5 GeV 運転のマシINSTAディを行った。入射・蓄積は順調にすすみ60 mA まで蓄積することに成功した。次回は秋の立ち上げ時にビームライン側で調査する予定である。PF-AR は、6月29日9:00に予定通り運転が終了し、夏の停止期間に入った。

PF-AR における HOM ケーブルに関するトラブル

上述したように PF-AR 東電源棟 (AR 東棟) の RF が停止しビームダンプした。空洞 E-4 (東直線部、最下流の空洞) の高次モード (higher order mode, HOM) ケーブルの温度異常を示すインターロックが動作していた。PF-AR では11セル APS 型加速空洞を6台使用しており、それらの空洞の加速セルから有害な高次モードの電磁場を引き出すために、空洞1台あたり12本 (1台の空洞だけ10本) の HOM ケーブルが使われている。それぞれの HOM ケーブルには2個の温度スイッチが取り付けられており、温度60℃以上になるとスイッチが動作し、ローレベル系で RF を停止する。空洞と HOM ケーブルの写真を図5に示す。最初のインターロック動作 (1:39) の後、温度スイッチをリセットし、最大ビーム電流を50 mA に下げて運転再開を試みたが、約1時間後に同じインターロックが動作した。シフトリーダーが当該ケーブルの交換が必要と判断して早朝に担当者に連絡し、朝9:00頃から交換作業を開始した。新品の予備ケーブルと交換後、AR 東棟のクライストロンを立ち上げ、11:53にユーザ運転を再開した。不具合のあったケーブル (NH-HF-20D ケーブル、両端コネクタ付き) を調査したところ、内導体と外導体の間に螺旋状に入っ



図5 PF-AR 東直線部の APS 空洞 (E-4) の写真 (5/28 撮影)。空洞当たり12個の HOM カップラーが取り付けられ、取り出した HOM 電力は HOM ケーブルを通して3 kW 水冷ダミーロードに導かれる。今回交換した後の HOM ケーブルを赤色矢印で示す。

図6 故障した HOM ケーブルに付属する L 型アダプタ (ダミーロード側)。絶縁体のポリエチレンが黒色に変色していた。



図7 故障した HOM ケーブルの端のコネクタ (ダミーロード側) を外したところ。絶縁体のポリエチレンはよりひどく変色し溶けていた。

図8 故障した HOM ケーブルの端のコネクタ (HOM カップラー側) を外したところ。絶縁体のポリエチレンは健全であった。



いるポリエチレン製の絶縁体のうち、ダミーロード側の絶縁体が黒色に変色して一部溶けていた (図6, 図7)。反対の HOM カップラー側の絶縁体は健全であった (図8)。ちなみに、ケーブルに貼り付けたサーモラベルは、中央部とダミーロード側ともに60℃以上の温度上昇があったことを示していた (図9)。

前回ケーブルを交換してから約10年が経過しており、今回のケーブル発熱の原因は、AR トンネル内の強い X 線環境下での経年劣化が原因と考えられる。他の HOM ケーブルも同程度の年月使用しており、交換が必要な時期に来ていると考えられるため、対策を検討中である。



図9 故障した HOM ケーブルのサーモラベル表示。(左) 中央部、(右) ダミーロード側。いずれも50℃以上を示す赤色と60℃以上を示す緑色のサインが表示されていた。

夏期停止期間中の作業状況

PF リングは7月6日(金) 9:00、PF-AR は6月29日(金) 9:00 に運転を停止して、夏期の停止期間となった。

PF リングにおける今夏の重要な作業は、BL-19 の増強計画に伴うアンジュレータの更新作業であった。これまで使用していた古いアンジュレータ (R#19) を撤去して、新しいアンジュレータ (U#19) と入れ替えを行うとともに、U#19 を設置する B18-B19 間直線部の床補強工事を行った。

運転停止後ただちに、R#19 撤去のための真空パージ作業を行なった。さらに、上流下流のコンポーネントの切り離し、配線撤去などを行なった。7月18日～19日に R#19 をリングトンネルから地下機械室のプラットフォームへ移動し、7月20日に R#19 を支えていた補強用 H 鋼の撤去を行った。図1に R#19 撤去前後の B18-B19 間直線部の様子を示す。プラットフォームへ移動した R#19 の磁



図1 R#19 撤去前後の B18-B19 間直線部の様子を示す。R#19 設置のために補強していた H 鋼も撤去され、B18-B19 間のトンネル内側がフラットな状態になった。



図2 内面に NEG コーティングされた U#19 用の新しい真空チャンバー

石の放射線量を計測したところ問題ないレベルであることがわかり、磁石の取り外し作業を行った。磁石はドラム缶に入れてしばらく保管した後、再度線量を計測し問題ないことを確認して廃棄した。7月31日に U#19 用の新しい真空チャンバーが納品され、リング北搬入口から地下機械室へ搬入し、真空引き等の作業を行った。図2に新しい真空チャンバーを示す。この真空チャンバーは内面に排気作用を持つ非蒸発型ゲッター (NEG) コーティングを施したチャンバーで、PF リングでは初めてインストールされることになる。



図3 PF-AR 北棟挿入光源準備室で磁場調整中の新しいアンジュレータ (U#19)



図4 U#19のPFリング加速器室内搬入作業の様子を示す。(上左図)リング内側を時計回りに移動、(上右図)B18-19間直線部前で真空チャンバーの設置、(下左図)ビーム軌道に合わせるように押し込む、(下右図)U#19の真空チャンバーをリング側のチャンバーに接続。

新しいアンジュレータ U#19 の PF-AR 北棟挿入光源準備室における磁場調整 (図 3) が終了し、9 月 25 日の週に PF リングへの搬入を実施した。U#19 は PF リング北のシールド扉から加速器室内へ、さらに B27-B28 直線部 (U#28 はあらかじめ移動してあった) からリング内側に引き込まれ、時計回りにリング内を移動、B18-B19 間の直線部まで運ばれた。リング内側で真空チャンバーを磁石列のギャップに挟み込み固定、直線部に押し込まれた。その後、アンジュレータの磁石の中心とビーム軌道をあわせるための精

密アライメントおよびリング真空チャンバーとの接続作業が実施された。一連の作業の様子を図 4 に示す。同時に、U#28 を所定の位置に戻す作業も行われた。

U#19 更新作業以外にも、PF リングおよび PF-AR において、電磁石、RF、真空、基幹チャンネル、モニター・制御などの定期的な保守維持点検作業などが行われた。

秋の運転再開については、PF リングが 11 月 9 日 (金) 9:00、PF-AR が 11 月 16 日 (金) 9:00 を予定している。

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

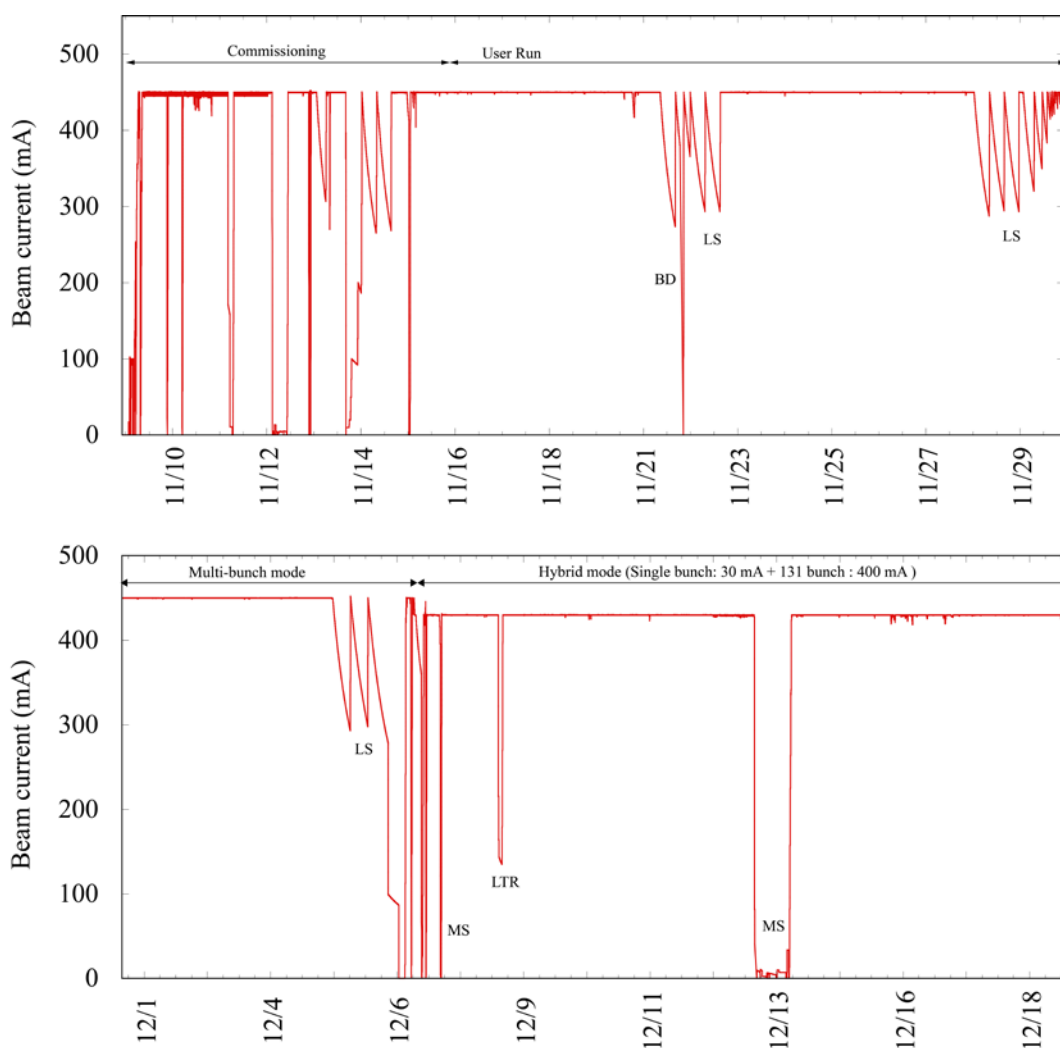


図1 PF リングにおける11月9日9:00～12月19日9:00までの蓄積電流値の推移。LSは入射マシン調整日、LTRは入射器トラブル、BDはビームダンプを示す。

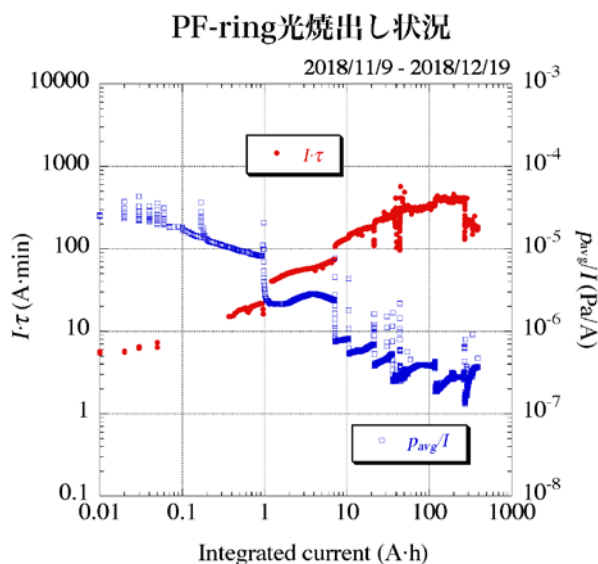


図2 PFリングにおける11月9日から12月19日までの真空焼き出しの状況を示す。横軸は積分電流値、縦軸左は蓄積電流値とビーム寿命の積、縦軸右は蓄積電流値で規格化したリングの平均真空度を示す。

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ティ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

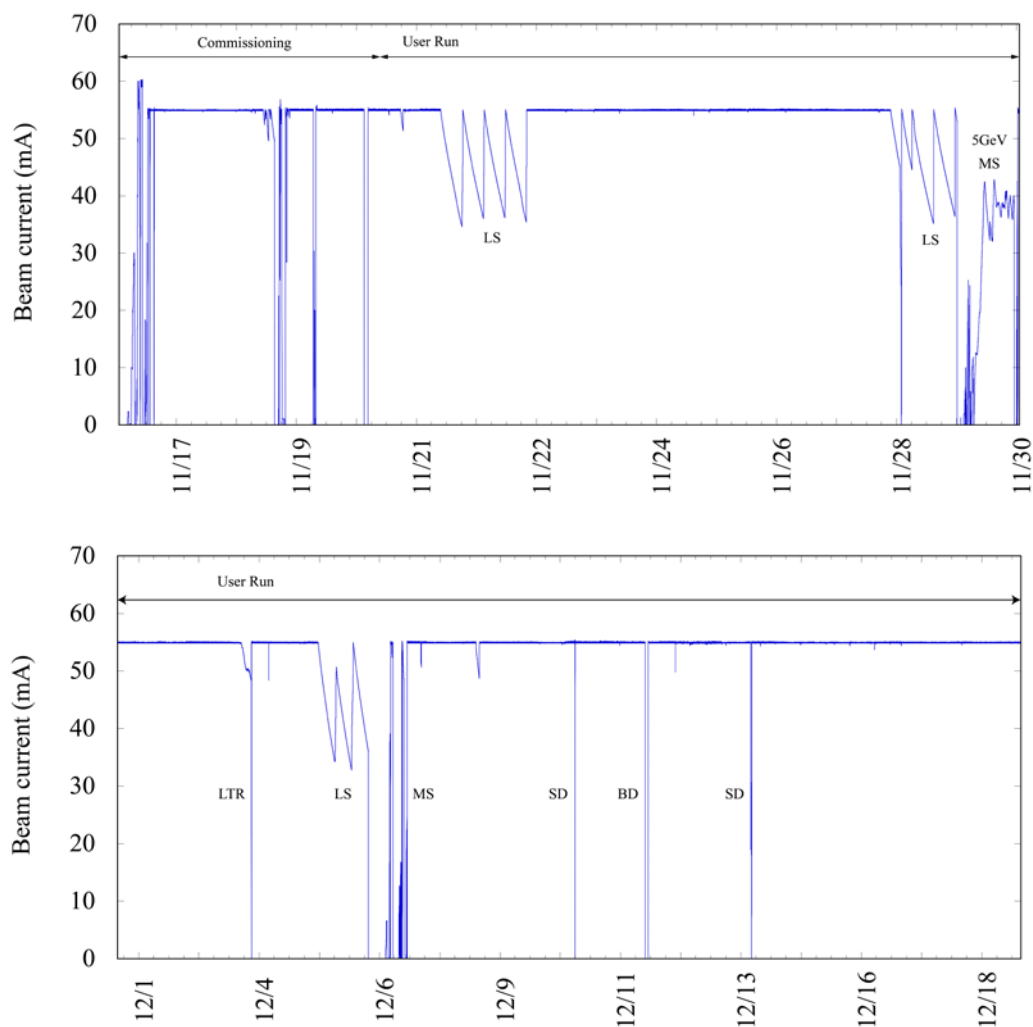


図3 PF-ARにおける11月16日9:00～12月19日9:00までの蓄積電流値の推移。LSは入射マシン調整日、LTRは入射器トラブル、SDは寿命急落による再入射、MSはマシン調整日を示す。

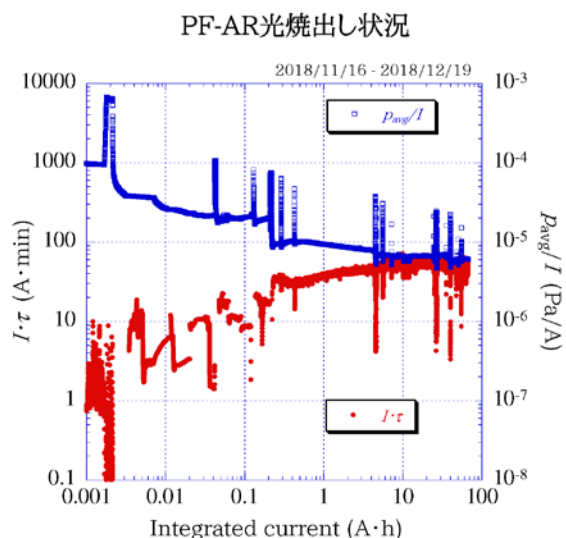


図4 PF-ARにおける11月16日から12月19日までの真空焼き出しの状況を示す。軸は図2と同じ。

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ようになっていたが、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、 $(I \cdot \tau)$ 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き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 $I \cdot \tau$ 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

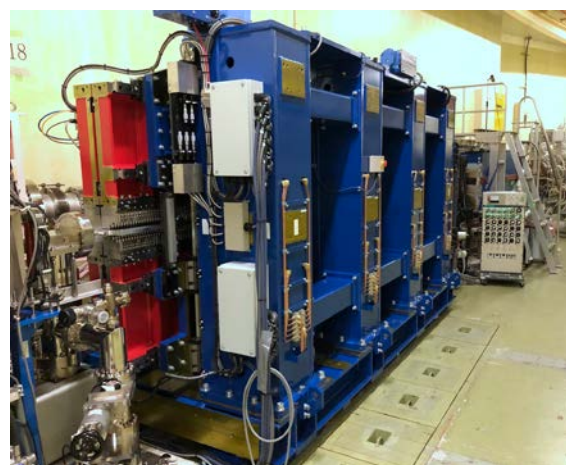


図5 現場設置後のアンジュレータU#19。真空ダクトは磁石列の最小ギャップ23 mmに対して1.5 mmの隙間で設置されている。

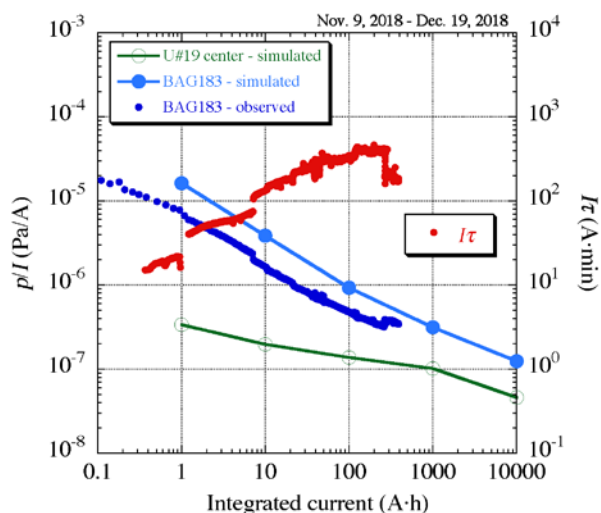


図6 光焼出し効果によるU#19 真空ダクトの枯れ（計算値と実測値）と蓄積電流値とビーム寿命の積（ $I\tau$ ）の進展。

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）。

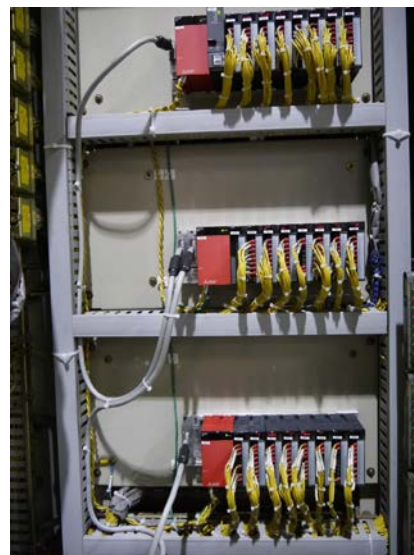


図8 更新された PLC