

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

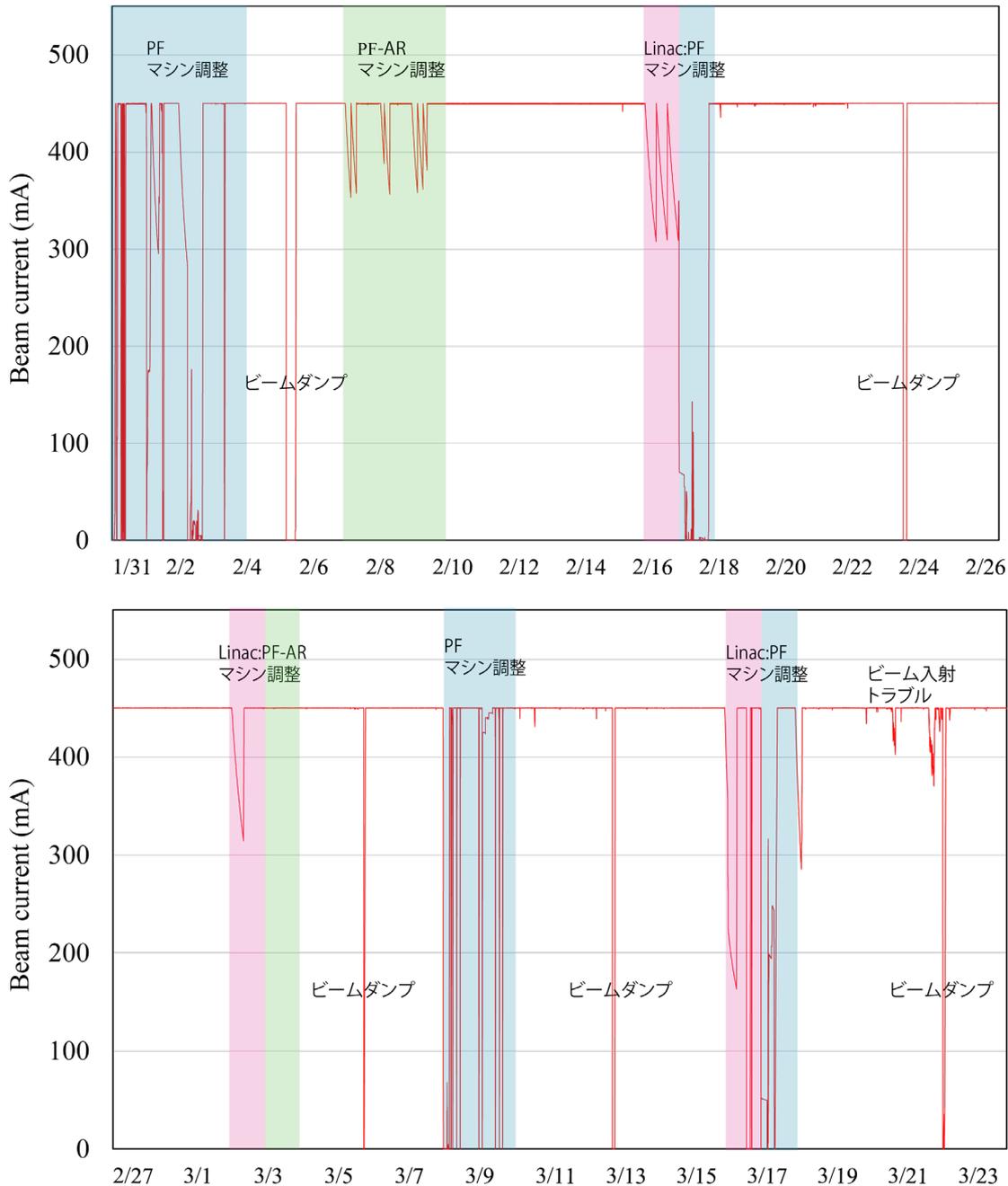


図1 PFリングにおける1月31日9:00から3月24日9:00までの蓄積電流値の推移

却水ストレーナの目詰まりにより、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、

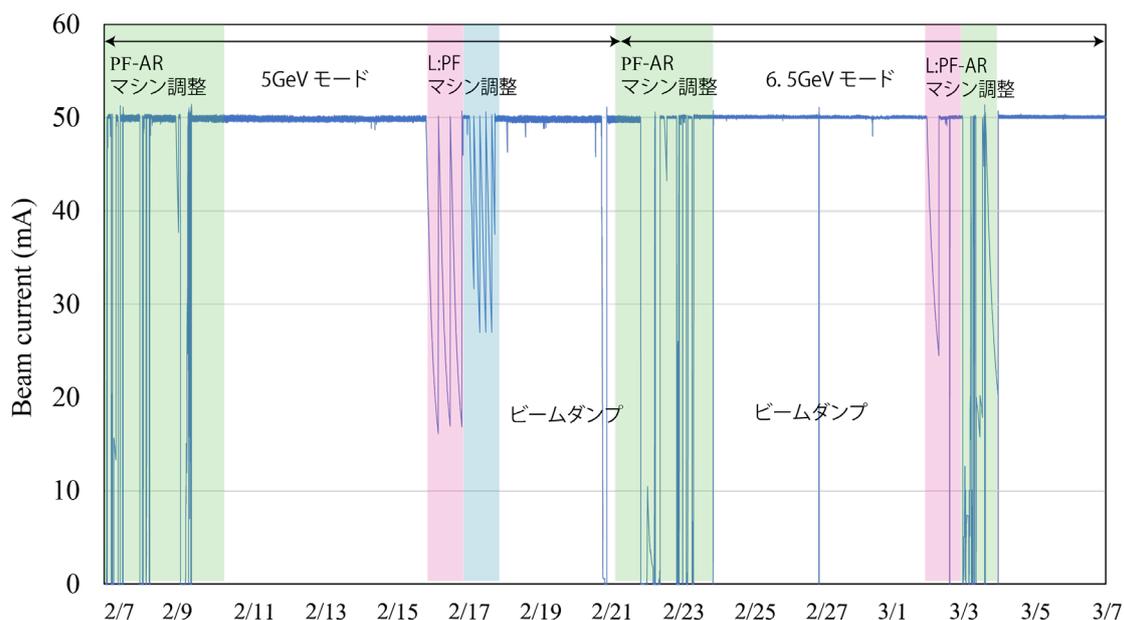


図2 PF-AR における2月7日 9:00 から3月7日 9:00 までの蓄積電流値の推移

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

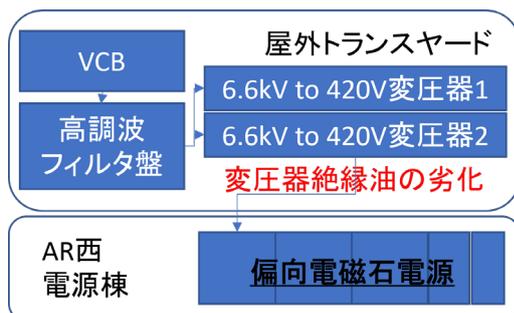


図3 PF-AR 偏向電磁石電源及び屋外変圧器とその構成



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, CCI_iPM)を考案し、製作技術開発と利用開発を同時に進めている。CCI_iPM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CCI_iPM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、CCI_iPM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。CCI_iPM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、CCI_iPM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、

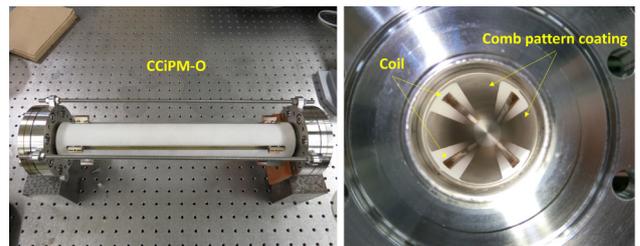


図6 実機CCI_iPM-O(Octupole)全体外観(左),内面構造写真(右)

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

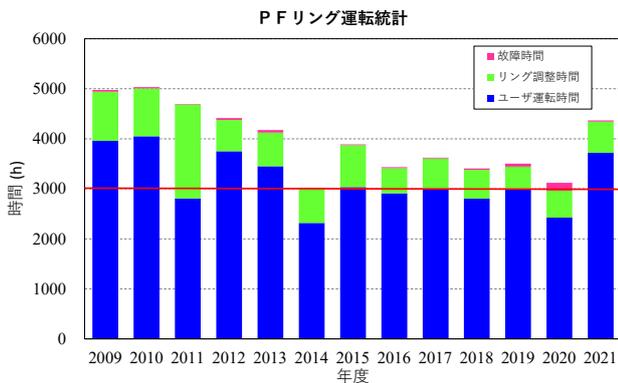


図8 平成21年度～令和3年度までの13年間のPFリングの運転統計の棒グラフ

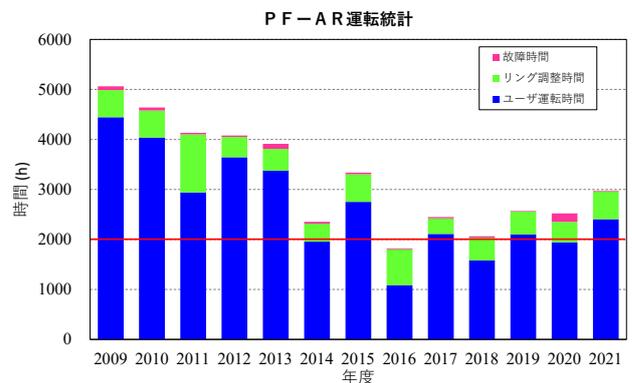


図9 平成21年度～令和3年度までの13年間のPF-ARの運転統計の棒グラフ

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。

PF リングの運転状況

図1に、PFリングにおける5月6日9:00～7月8日9:00までの蓄積電流値の推移を示す。5月6日9:00からリングの立ち上げを開始、5月10日9:00からの光軸確認を経て、予定通りマルチバンチモードでのユーザ運転を開始した。

5月20日10:36 4極電磁石(Q264)の冷却水が流量低下

しインターロックが動作して、ビームダンプとなった。リングトンネル内に入域し、電磁石を保護しているストレーナを交換することで復旧した(図2)。同様の現象が5月22日21:46 4極電磁石(Q011)でも発生し、周辺の4極電磁石の冷却水量を確認したところ、軒並み低下していたため、インターロックの閾値を下げて様子を見ることとした。5月23日1:12 瞬停によりRFがダウンしてビームダンプ

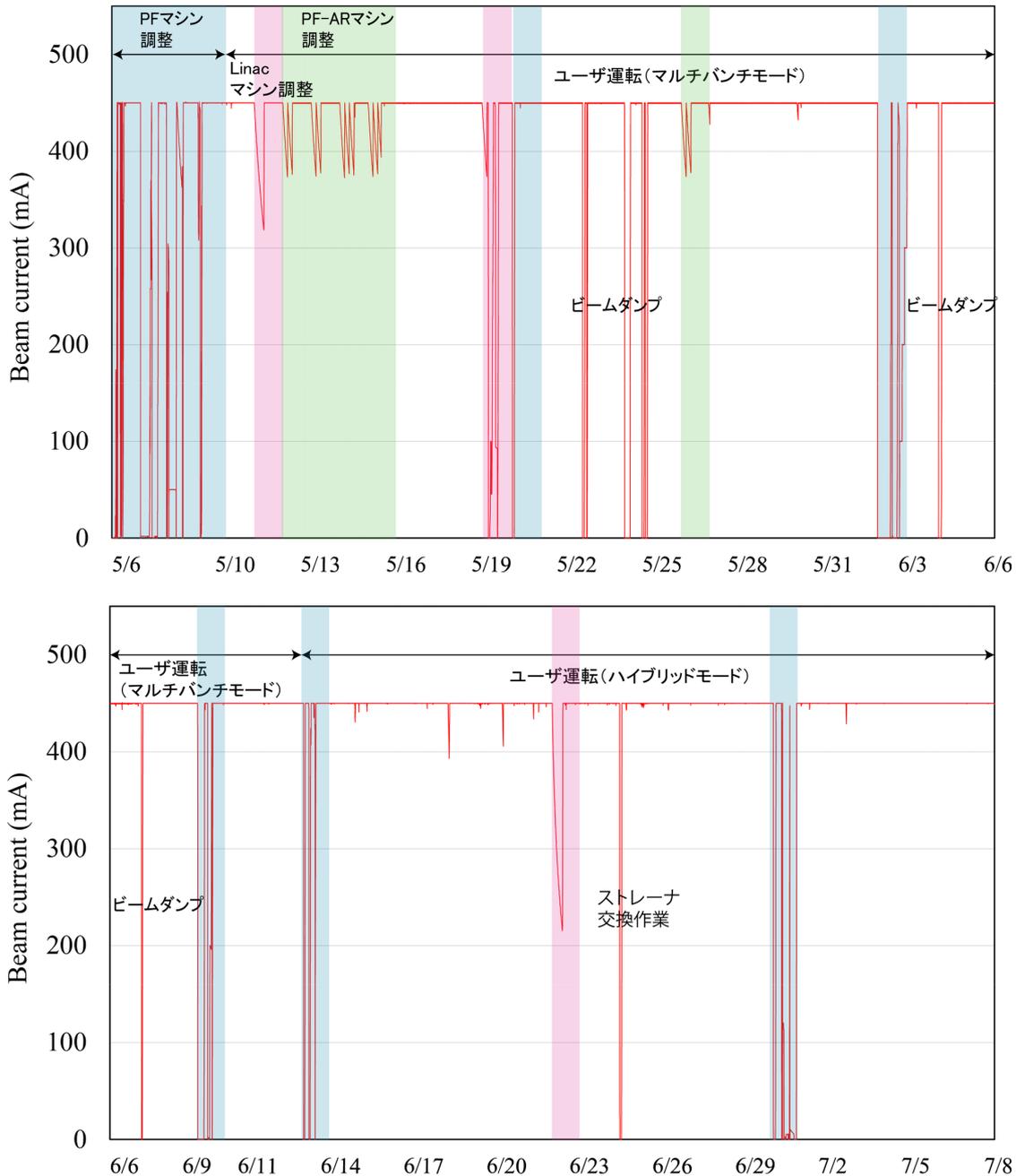


図1 PFリングにおける5月6日9:00から7月8日9:00までの蓄積電流値の推移を示す。



図2 メッシュが目詰まりして冷却水量低下を招いた4極電磁石 (Q264) のストレーナの写真

となった。RFを含め他の機器にも異常はなく、2:03にユーザ運転を再開した。

5月24日9:00から13:45まで、4極電磁石冷却水トラブルへの対応のため、ユーザ運転を中断して、流量の低下している電磁石のストレーナの交換作業を実施した。しかしながら、その後立て続けに2回4極電磁石 (Q024, Q281) の冷却水トラブルによるビームダンプが発生してしまった。流量を確認した段階ではこれらの電磁石の流量は低下

していなかったにもかかわらず、1日も立たずに急激に低下して閾値を下回るという状況であった。その後はしばらく安定していたが、6月2日6:24 4極電磁石 (Q033)、6月4日9:47 4極電磁石 (Q163) において、流量低下が原因となった2回のビームダンプが発生した。いずれもストレーナの交換作業で復旧している。これまではトラブルが発生していたのは主にリング北側に設置している4極電磁石であったが、Q163は南側に設置してある電磁石であった。そこで念のため、6月9日のマシン調整日に南側の4極電磁石すべてのストレーナの交換および清掃作業を実施した。一部のストレーナで目詰まりが進行しているものも確認された。根本的な対策として、循環冷却水の入れ替え作業に期待するところであるが、作業におよそ1週間程度要するため、ユーザ運転の停止後を予定している。それまでは、マシン調整日に流量低下が懸念される箇所のストレーナの交換・清掃作業を行って対処する方針とした。

一方、PFリングにおけるもう一つの懸案となっている水平方向の軌道変動であるが、5月19日のマシン調整日に Slow Orbit Feedback を高速化 (軌道補正の時間間隔を20秒から2秒とした) してから、スパイク的な100 μmを超える変動の頻度が少なくなった (図3)。しかしながら、頻度は減少したものの、この振動は完全に抑制されたわけではなく、引き続き振動原因の調査を行うこととした。

6月13日にハイブリッドモードへの切り替えを行ない、

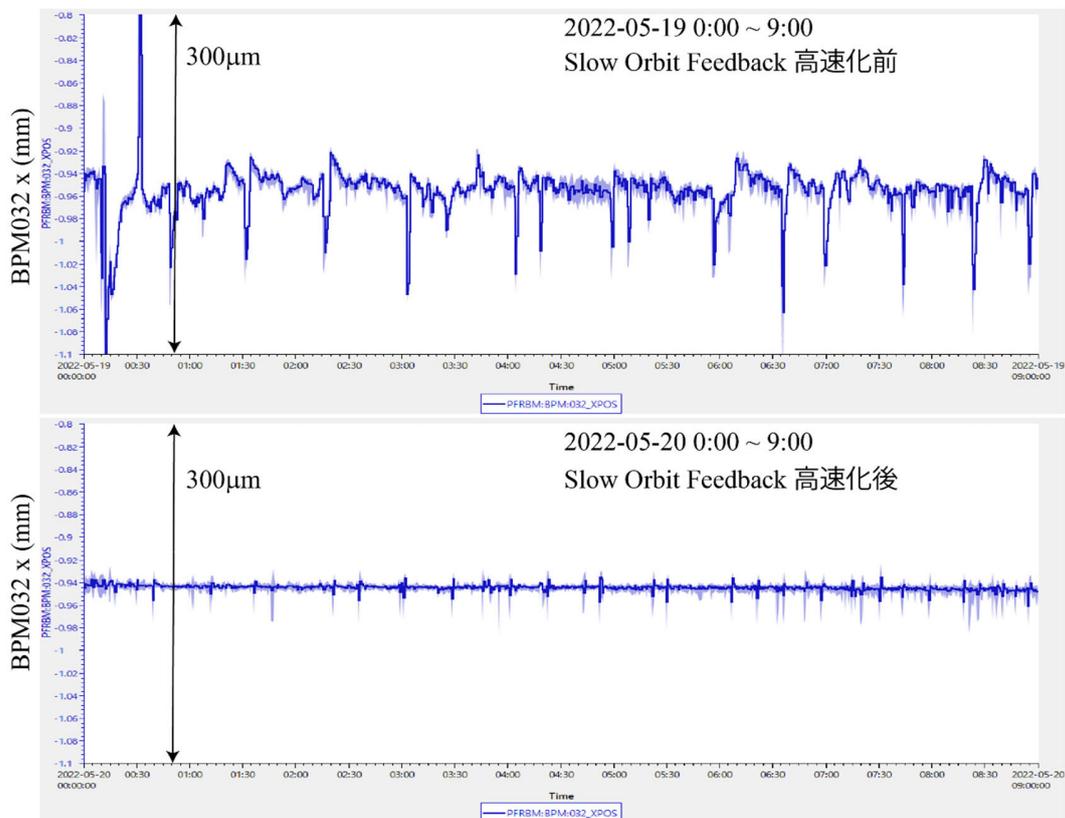


図3 PFリングにおける水平方向軌道変動の時間推移 (振動の振幅が比較的大きい場所のビーム位置モニター BPM032 で観測した軌道の水平位置) を示す。上図は Slow Orbit Feedback 高速化前、下図は高速化後の約9時間の推移を示している。

6月14日9:00から光軸確認を行った後、ユーザ運転を再開した。ハイブリッドモードでは、シングルバンチ部30 mA、マルチバンチ部420 mA、計450 mAの蓄積電流値で運転している。このモードにおける蓄積電流値とビーム寿命の積 ($I \cdot \tau$) は、平均180 A·min程度であった。原因不明の水平方向の変動は、ハイブリッドモードでも発生しているが、数10 μm 程度の変動が断続的に起きて、たまに大きく跳ねるといった状態が続いた。

6月16日9:00過ぎ、垂直方向でおよそ100 μm の断続的な変動が発生した。10:15にチャンネルをクローズして調査したが、原因特定には至らないまま、変動が収まってしまった。再発の恐れはあるものの、11:11にユーザ運転を再開した。結果的に、垂直方向の変動は運転停止まで再発しなかった。

6月22日3:30水平・垂直方向の両方で大きめの軌道変動が発生し、同時にシングルバンチの純化ができなくなるという現象が発生した。原因調査を行ったところ、垂直方向のベータトロンチューンが通常に比べて20 kHzほどずれていることが判明した。このチューンのずれを4極電磁石 (QD) で調整したところ、純化が可能となりバンチ純度も元に戻った。結果的に、原因は多極ウィグラー (MPW#5) のメインエンコーダが故障し、ギャップ値が正常な値を示さず、それを受けてチューン補正機構が動作して、チューンのずれが生じたことと判明した。故障したエンコーダのままでは、再発の恐れがあるため、同日17:00にチャンネルをクローズし、サブのエンコーダへ切り替え正常なギャップ値を確認して、ユーザ運転を再開した。

6月23日22:30監視していた4極電磁石 (Q282) の流量計で、冷却水流量低下が見られたため、翌日6月24日19:30からユーザ運転を中断して、Q282を含めた4カ所のストレーナ交換作業およびリング全周の流量計の確認を実施した。4カ所のストレーナはかなり汚れていたが、交換作業により流量低下が改善された。

PFリングでは、猛暑の中であったがビームダンプもなく比較的安定に運転が続けられ、7月8日9:00に運転を停止して、夏期の停止期間となった。秋の運転再開は、10月4日9:00を予定している。

PF-ARの運転状況

図4に、PF-ARにおける5月12日9:00～7月1日9:00までの蓄積電流値の推移を示す。5月12日9:00から5 GeVで立ち上げを開始し、5月16日9:00から光軸確認を実施して、予定通り5 GeVモードでのユーザ運転を開始した。

5月19日14時から15時の間にバンチ純度が悪化した。その時間に“Master Oscillator FB OFF/ON” (SKEKBでリングの周波数を振っている時に出るメッセージ)が出ていた。この場合、LINACの周波数の設定も変わるので、それが原因でバンチのずれが発生したと推測された。20:11に再入射で復旧したが、“Master Oscillator FB OFF/ON”が出る時は、入射を行わないように制御系を改修した。

5月25日2:24 4極電磁石電源 (QC2N) が停止しビームダンプとなった。原因は、冷却水インターロックが動作したためであるが、リセットにより復旧した。流量計センサーの誤動作と推察された。

6月7日9:00から6.5 GeVへの切り替え作業を行った。各種調整は順調に進み、6月10日9:00から光軸確認を行った後、ユーザ運転再開となった。

6月10日17:00ビームロスが発生した。原因はビーム入射用キッカー電磁石 (K#3) が動作していないためであった。担当者により故障原因の調査を行ったが、K#3の早急な復旧は困難と判断し、キッカー電磁石電源 (K#2とK#3) を入れ替えて、K#1とK#2の2台のキッカー電磁石で入射することとした。入れ替え作業および入射調整が順調に進み、22:42ユーザ運転再開となった。

6月19日16:30頃からビーム入射が不調となり調整を行ったところ、メインバンチの隣のバンチにビームが入ってしまったため、一端ビームを捨てて再入射を行った。

6月25日11:28西電源棟のビーム入射路4極電磁石電源 (QF3, QF5) が温度インターロックでダウンした。これらの電源はリセットで対処したが、電源復旧中に同じく西電源棟のリング4極電磁石電源 (QC1N) が出力過電流インターロックでダウンし、ビームダンプとなった。最初はリセットが効いたので何度か立ち上げを試みたが、途中でリセットが効かなくなったため、メーカーに故障調査を依頼した。調査の結果、出力過電流を検出しているメタリレーの故障が原因であることが判明し、予備品と交換して復旧した。

6月26日14:47故障から復旧したQC1N電源が、今度はトランス温度異常のインターロックが動作してダウンし、ビームダンプとなった。筐体を開け、スポットクーラで冷風を当てることでトランスを冷却し復旧となった。

6月27日13:30ビームロスが発生した。ビーム入射路QF3電源がダウンしたため、冷却ファンにより冷却をさらに増強して対処した。

同日14:30再度ビームロスが発生した。今度は、水平方向のビーム不安定性が発生したためであることが判り、再入射を試みた。しかし、積み上げ途中でRFの反射でビームダンプとなった。原因を調査したところ、RF空洞の冷却水温度が上がり過ぎて不安定性を誘発していると推察された。調整中に水温が下がったことから、不安定性が収まり50 mAまで積み上げることができて、ユーザ運転再開となった。

6月28日17:11RF反射によるビームダンプが発生したが、このときは、ビーム不安定性は起きていなかったことからダンプの原因は不明であるが、すぐに再入射ができてユーザ運転再開となった。

6月29日15:00リング偏向電磁石電源のトランスの油温が上昇、温度インターロックが動作してダウンし、ビームダンプとなった。屋外に設置したトランスであるが、ファンを設置して冷却を試みたところ、油温が下がり復旧した。今回生じた一連のトラブルは、西電源棟室内の電磁石電源

およびRFで起きており、猛暑のため電源棟内が高温になったためではないかと推察される。空冷式の冷却塔で冷却水を冷やしているため、今年のような猛暑となると冷却が追いつかなくなることも要因の一つと考えられる。

PF-ARは、7月1日9:00に運転を停止して、夏期の停止期間となった。秋の運転再開は、10月12日9:00を予定している。

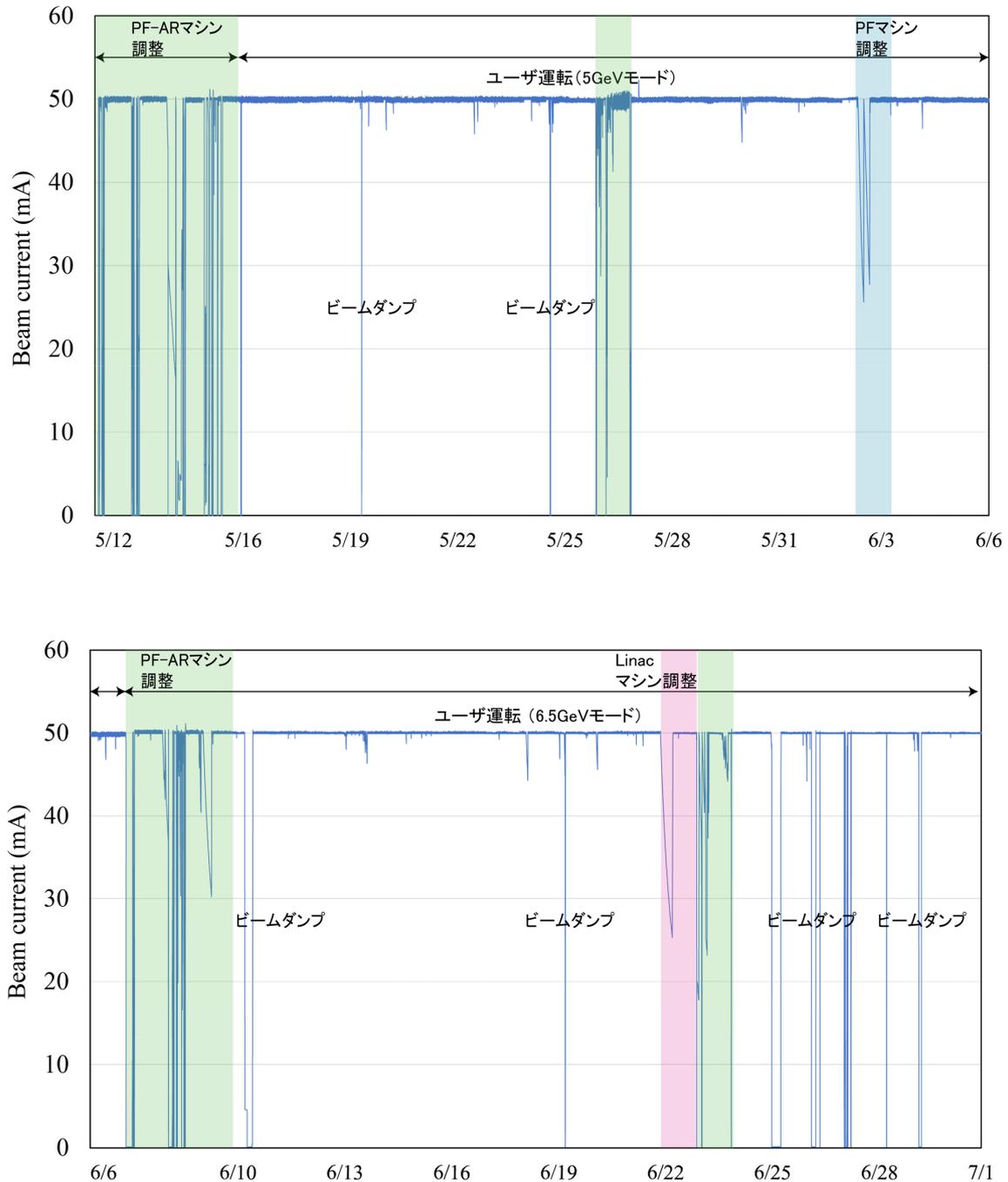


図4 PF-ARにおける5月12日9:00から7月1日9:00までの蓄積電流値の推移を示す。

光源リング運転状況

今年度も夏期の停止期間中に、各種装置の定期的な点検保守を行ないながら、PFリングおよびPF-AR両リングにおいて改造作業を行った。PFリングにおいては、BL-12基幹チャンネルの改造を実施するとともに、リング側のクロッチアブソーバーを交換した。また、入射路のプロファイルモニターの蛍光板をアルミナ蛍光板（デマルケスト）からYAG蛍光板に全数交換した。PF-ARにおいては、5 GeV 運転時にも連続入射によるトップアップ運転（「本」トップアップ運転）ができるように、入射路の改造作業を実施した（次節で詳細を記述する）。

図1に、PFリングにおける立ち上げ日10月4日9:00～10月25日9:00までの蓄積電流値の推移を示す。立ち上げ調整は、順調に行われた。リングの真空度を確認しながら、徐々に電流値を上げていき、初日に450 mAに到達し、真空光焼きだしとなった。2日目以降の調整も順調で、予定されていたスケジュール通り、10月7日9:00からの光軸確認後ユーザー運転が開始された。

しばらく安定な運転が実施されていたが、10月16日9:00-9:18に軌道フィードバック用補正電磁石電源の電流値が最大電流値に近づいたため、チャンネルを閉じユーザー運転を中断して、リセット作業を実施した。

10月19日11:02に、軌道フィードバック用補正電磁石

設定値過大エラーが発生し、一時的に停止した。しかし、軌道が大きく変動している様子はなかったため、12:00まで待ってからユーザー運転を中断して復旧作業を行った。作業は、チャンネル閉→フィードバックOFF→COD補正→フィードバックONという手順をふみ、問題なく復旧したことからユーザー運転を再開した。このトラブルはめったに発生しないトラブルで原因は不明だが、ビーム位置モニター（BPM）の読み値に一瞬異常な値が入ってしまったためと推測される。現時点まで様子を見ている状況であるが、再発はしていない。

10月20日0:46に入射路偏向電磁石電源（BTBM）の制御に使用しているCAMACのレジスタが故障し、BTBMが突然オフとなった。トップアップモードであったため、インターロックが動作してチャンネル閉となった。原因は制御に使用しているCAMACモジュールのレジスタが故障したためであった。そこでBTBM電源を現場で立ち上げ直して、ビーム入射を開始し、2:01にユーザー運転を再開した。10月27日のマシン調整日に故障したCAMACモジュールの交換作業を行う予定である。

10月21日1:37から30分程度、5:47から10分程度、垂直方向のビーム不安定性が発生し、垂直方向のビームサイズが通常の2-3倍になっていた。しかしながら、しばらくして自然にビーム不安定性は収まった。後日原因調査を

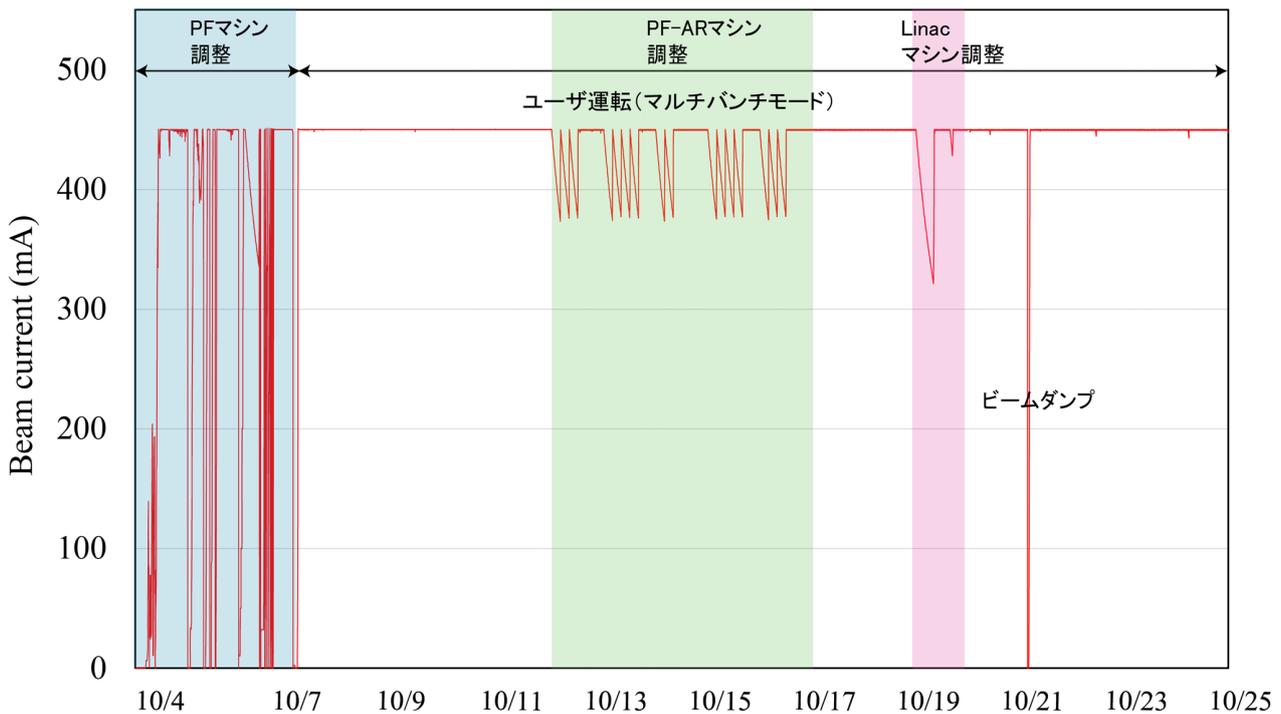


図1 PFリングの立ち上げ日10月4日9:00～10月25日9:00までの蓄積電流値の推移を示す

行ったところ、U#15のギャップが4.3 mmの時に同期して、不安定性が発生していたようであるが、ギャップに同期していたのはこの時のみであった。これ以前や以後にギャップを4.3 mmにしていた時もあったが、必ずビーム不安定性が発生しているわけではないようである。現時点では原因は不明であるが、引き続き注意して観測を行っていく。

10月21日12:32にチャンネルダンプが発生した。トレンチにおいてBL-5のレギュレータ圧空漏れがあったが、ユーザー側からの希望もあり、昼休みに圧空の一次側を止めて対処を行おうとした。しかしながら、MBSが閉まった際にレギュレータ内に残っていた圧力が足らず、バルブが規定時間内に閉まりきらなかった。そのため、インターロックが動作してビームダンプとなってしまった。最初からBL-5だけチャンネルを閉じて作業を行っていただければビームダンプを防げたトラブルであることから、今後はそのように対処することとした。

10月22日以降、1シフトに1~2回の頻度で100 μmを超えるような比較的大きな水平方向の軌道変動が起きはじめた。未だに原因不明の変動であるが、継続して調査を行っている。

図2に、PF-ARにおける立ち上げ日10月12日9:00～10月25日9:00までの蓄積電流値の推移を示す。10月12日に5 GeVで立ち上げを行った。9:00からパトロール、9:50から入射に関わる総合動作試験1項目を実施し、10:00ごろよりビーム調整を開始した。PF-ARも立ち上げ調整は順調に実施され、10月17日9:00からの光軸確認後にユーザー運転が開始された。

10月20日8:36に、偏向電磁石B_SE02の流量インター

ロックが動作して、ビームダンプとなった。リングトンネル内に入域し確認したが特に異常はなかった。インターロックはリセットが効いたことから、誤動作と判断し、再立ち上げを行ってユーザー運転を再開した。

5 GeV エネルギートップアップ運転実現へ向けた改造計画

PF-ARでのフルエネルギートップアップの運用は、Linacからリングへの電子輸送路である直接入射路の完成をもって2017年に開始された。この直接入射路はビームエネルギー6.5 GeVの単一エネルギービームの輸送に最適化されている。2018年以降年々削減されてきた運転経費に対応するため、5 GeVにビームエネルギーを下げた運転モードの確立が加速器側へ要請された。2018年から5 GeV運転モードが試行され、2019年には5 GeV運転モードと6.5 GeV運転モードとを、およそ半分ずつの期間で実施することとなった。しかし、直接入射路は5 GeV運転期間中は、PFリングとのビームを打ち分けて共有する「本」トップアップ入射ができないという状態になる。そこで、新たに考案した「疑似」トップアップ入射による蓄積電流値の維持が行われている。疑似トップアップ運転とは、PFリング、PF-ARに対して2分30秒と1分30秒のそれぞれのオンデマンド入射の時間猶予を与えて、その期間内は固定のリングへの入射を継続するものである。これにより各リングでの蓄積電流値は0.4 mA以下の変動幅で維持することが可能となる。この時間猶予は、PFリングとPF-ARへのビーム振り分けの共通パルスベンド (PB) およびPF輸送路 (PF-BT) とARの輸送路 (AR-BT) が交叉する共通DCベンド (BPFS) の偏向角切り替えと

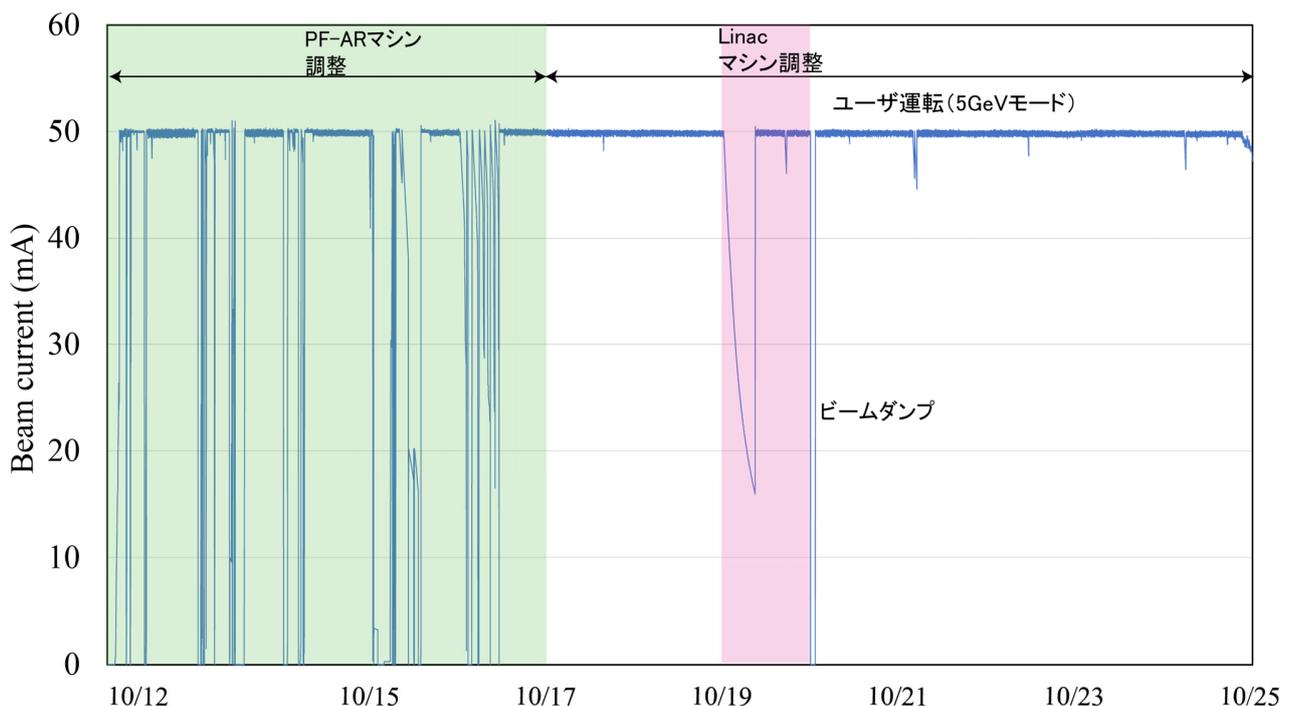


図2 PF-ARの立ち上げ日10月12日9:00～10月25日9:00までの蓄積電流値の推移を示す

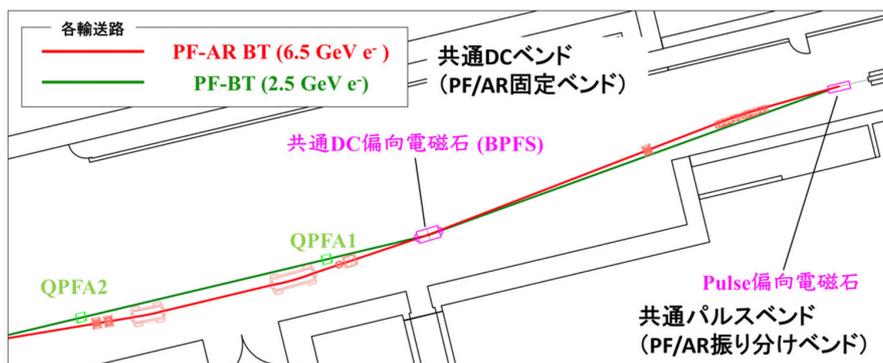


図3 Linac 第3スイッチヤード内のPF-ARおよびPF電子ビーム輸送路

Linacでのエネルギー補正フィードバックに要する時間となっている。図3に複雑に輸送路が交叉するLinac第3スイッチヤード(SY)のPF-BT及びAR-BTの配置図を示す。直接入射路建設時に狭小な空間条件で輸送路を交叉させながら配置する必要があったことから、単一エネルギー輸送の条件となっている。

疑似トップアップ運転によって、蓄積電流値が放射光供給に問題とならない程度に維持はできるが、実際にはいくつかの問題が露呈している。1つ目は、5 GeVエネルギー運転では、疑似トップアップ運転でも蓄積電流値の損失の補充が間に合う十分なビーム寿命の運転モードがPFリング側に求められるため、PF-ARが5 GeVエネルギー運転の時にはPFリングではマルチフィリングモードでの運転の必要があり、運転モードに対するスケジュール管理に足枷があることである。2つ目は、PF-AR側で常時連続にビーム入射が必要となる運転立ち上げ調整期間、マシンスタディ期間はPFリング側では通常ユーザー運転モードであるため、トップアップ運転ができないことから、4時間ごとの定時入射による蓄積モード(蓄積電流値がビーム寿命通り減少していくモード)での運転が必要となる。したがって、放射光ユーザーにとっては貴重な放射光実験時間中に継続した定量の放射光供給を受けられないという問題である。3つ目は、これが最も大きな問題であるが、PF-ARの多角利用の測定器開発テストビームライン計画、そして高度化利用の低エミッタンス計画のいずれもが、原理上ビーム寿命が短くなる運転計画であるため、5 GeVエネルギー運転においても本トップアップ運転が計画の成立条件として必須なことである。これらの問題は、5 GeVビームエネルギー導入計画の要請があった当初より判明していた内容であり、2019年の5 GeVビームエネルギー運用計画の立案と並行して、本トップアップ運転実現へ向けた輸送路改造計画立案の作業部会が立ち上げられ検討が開始されていた。

2019年から2020年にかけて、輸送路改造案を2つの案にまとめた。第1案は、費用はかかるが改造範囲が限定的さらに運用が容易で、ボトルネックのエネルギー(偏向角)が固定となっている共通DCバンドをパルスバンド、また

はそのDCバンドをはさみパルスキッカーでサンドイッチする方法を採用する。これにより、5 GeVへとビームエネルギーが低下し生まれる余剰角分を、PFリングおよびPF-ARへバンチ毎に打ち分ける案である。第2案は、費用を抑制し、割安な機器の組み合わせで進める方法である。やはりボトルネックの共通DCバンドを中心に、6.5 GeV時には運用せずに、5 GeV時にのみDC的に余剰角を補正する偏向電磁石をいずれかの輸送路に導入する。さらに、余剰角で生まれる軌道のふくらみを、真空ダクトの拡幅改造で吸収しながら軌道が大きくふくらまない位置で補正をかけていく案である。これらの検討案について十分な議論を行い、最終的にビームエネルギーが低く余剰角を補正しやすいPFビーム輸送路に導入し、3台の補正偏向電磁石と拡幅ダクトを用いた余剰角補正を用いる案を採用することとした。PF-ARの5 GeV対応に向けた改造であるにもかかわらず、PFリング用輸送路の改造となるためやや複雑であるが、改造後の運転調整において、PFとPF-ARの輸送路いずれにおいても、同時に本トップアップのための余剰角補正量を最小限に抑える輸送光学系の調整が行われることとなる。共通パルスバンドに対しては、肩寄せ法というPF-AR用5 GeVのビームをバンチ毎に打ち分けるための運用方法が考案された。共通パルスバンドの出力励磁波形は正弦半波波形であるので、通常の6.5 GeVであるならばその頂点の最大出力点でビームをパル的に偏向すればよい。しかしながら、バンチ毎にショットバイショットで3000 A近くの出力電流のビームエネルギー毎に制御することは困難であるため、ミリ秒オーダーで制御が可能なデジタルタイミングシステムを利用することで、ビームと出力電流とのタイミングをわずかにずらし、正規の頂点のタイミングからエネルギー減少分の波高となる波形の立ち上がり部分のタイミングに合わせて仮想的に波高を変えたように見せる方法をとる。これにより、無理なく6.5 GeVと異なるビームエネルギーでも対応が可能で、その方法による誤差は電流ピーク点での安定度 10^{-3} のレベルと同等である。

2021年に本改造計画の具体化へ向けた予算化が進み、2022年度夏の長期加速器停止期間での改造工事に向けた

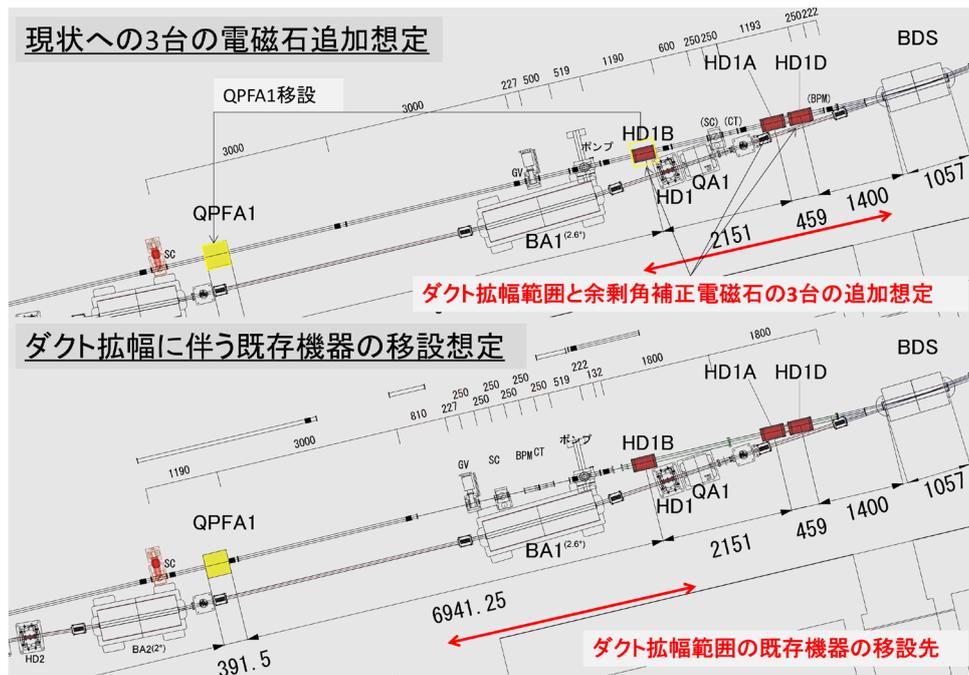
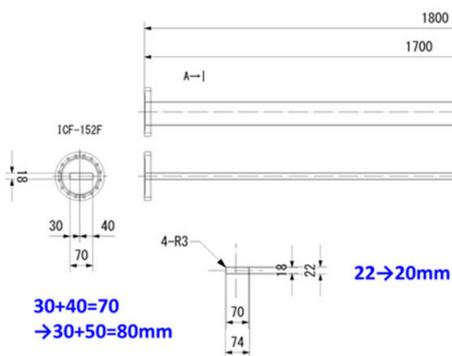


図4 Linac 第3スイッチヤード機器再配置と余剰角補正偏向電磁石の追加

拡幅真空ダクト



既存PFダクトとの相対位置関係 既存ARダクトとの相対位置関係

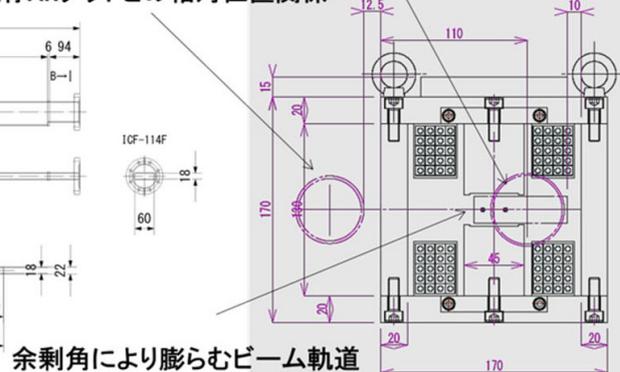


図5 拡幅真空ダクトの設計と余剰角補正偏向電磁石の設計

工程の検討，機器配置設計，機器の設計，製作，調達が進められた。改造による機器配置を図4に示す。BPFS 下流より真空ダクトの拡幅をするため拡幅ダクトに入れ替えられる。PF-AR ビームダクトとの干渉を避けるために余剰角補正用偏向電磁石は小型にする必要がある。狭小ギャップにすることで強い偏向角を可能にし，それにもない拡幅ダクトは扁平に製作される（図5）。そのダクト拡幅範囲のBPFS 直下流より3台の偏向電磁石（HD1D，HD1A，HD1B）を置くため，既設の機器はすべてが撤去，下流側へ移設される設計となっている。2021年度内に，水冷偏向電磁石，電磁石電源，電源格納ラック，電磁石付帯設備（冷却配管，ケーブル，電力盤），真空ダクト群，電磁石架台，機器移設用架台群の調達を行ない，2022年度夏期停止期

間に改造・設置作業を完了した。10月4日より開始された第2期の運転期間中にPF-ARが5 GeVモードでも「本」トップアップ運転が実現するようコミショニングを行う予定となっている。

光源リング運転状況

図1に、PFリングにおける立ち上げ日10月4日9:00～運転停止日12月26日9:00までの蓄積電流値の推移を示す。

立ち上げ調整は、順調に行われた。リングの真空度を確認しながら、徐々に電流値を上げていき、初日に450 mAに到達し、真空光焼きだしとなった。2日目以降の調整も順調で、予定されていたスケジュール通り、10月7日17:00からの光軸確認後ユーザー運転が開始された。

しばらく安定な運転が実施されていたが、10月16日9:00～9:18に軌道フィードバック用補正電磁石電源の電流値が最大電流値に近づいたため、チャンネルを閉じユーザー運転を中断して、リセット作業を実施した。

10月19日11:02に、軌道フィードバック用補正電磁石設定値過大エラーが発生し、一時的に停止した。しかし、軌道が大きく変動している様子はなかったため、12:00まで待ってからユーザー運転を中断して復旧作業を行った。作業は、チャンネル閉→フィードバックOFF→COD補正

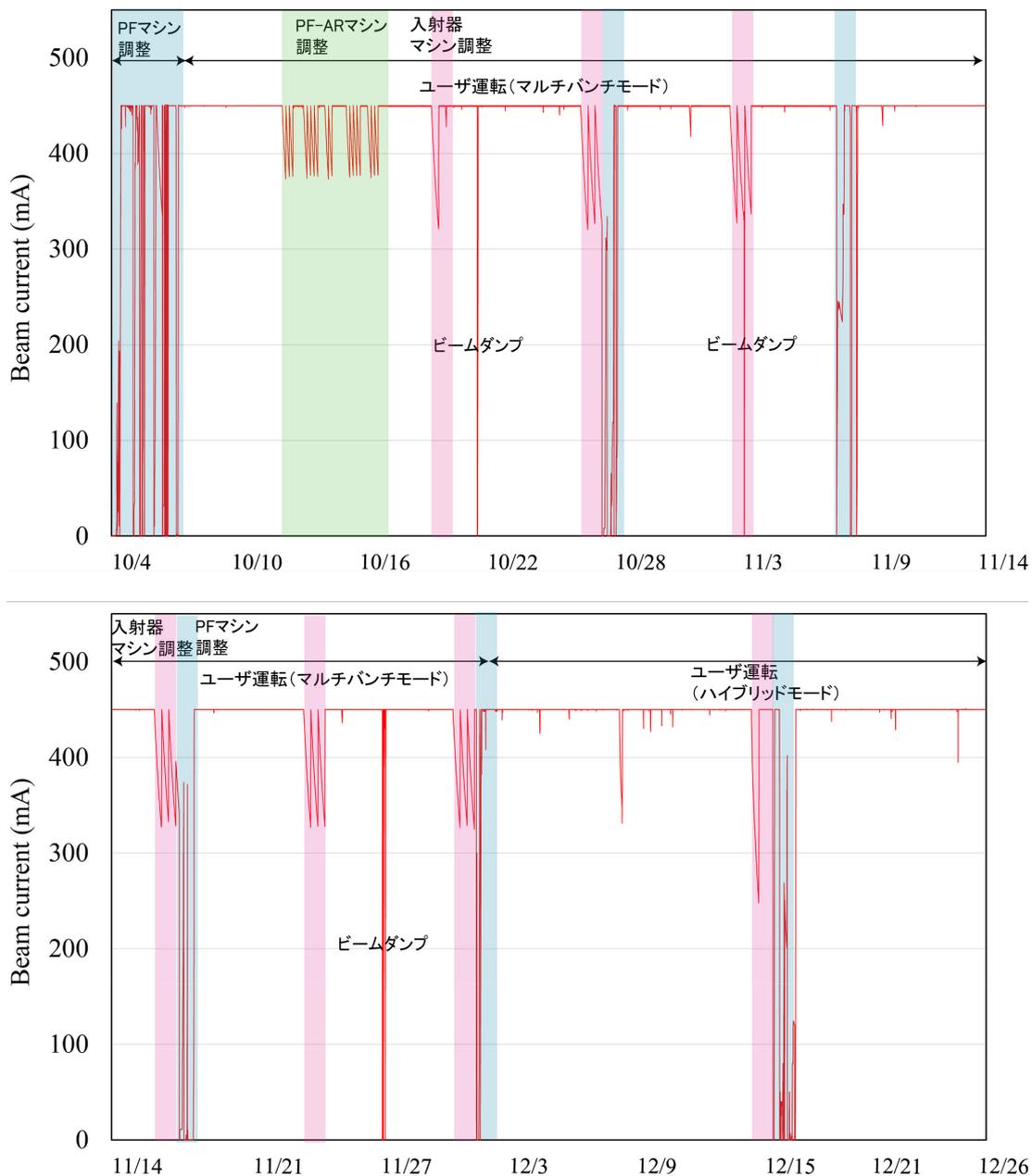


図1 PFリングにおける運転開始日10月4日9:00～運転停止日12月26日9:00までの積電流値の推移を示す。

→フィードバック ON という手順を踏み、問題なく復旧したことからユーザー運転を再開した。このトラブルはめったに発生しないトラブルで原因は不明だが、ビーム位置モニター (BPM) の読み値に一瞬異常な値が入ってしまったためと推測された。しばらく様子を見たが再発はしなかった。

10月20日0:46に入射路偏向電磁石電源 (BTBM) の制御に使用している CAMAC のレジスタが故障し、BTBM が突然オフとなった。トップアップモードであったため、インターロックが動作してチャンネル閉となった。原因は制御に使用している CAMAC モジュールのレジスタが故障したためであった。そこで BTBM 電源を現場で立ち上げ直して、ビーム入射を開始し、2:01 にユーザー運転を再開した。10月27日のマシン調整日に故障した CAMAC モジュールの交換作業を実施した。

10月21日1:37から30分程度、5:47から10分程度、垂直方向のビーム不安定性が発生し、垂直方向のビームサイズが通常の2~3倍になっていた。しかしながら、しばらくして自然にビーム不安定性は収まった。後日原因調査を行ったところ、U#15のギャップが4.3 mmの時に同期して、不安定性が発生していたようであるが、ギャップに同期していたのはこの時のみであった。これ以前や以後にギャップを4.3 mmにしていた時もあったが、必ずビーム不安定性が発生しているわけではないようである。現時点では原因は不明であるが、引き続き注意して観測を行った。

10月21日12:32にチャンネルダンプが発生した。トレンチにおいてBL-5のレギュレータ圧空漏れがあったが、ユーザー側からの希望もあり、昼休みに圧空の一次側を止めて対処を行おうとした。しかしながら、MBSが閉まった際にレギュレータ内に残っていた圧力が足らず、バルブが規定時間内に閉まりきらなかった。そのため、インターロックが動作してビームダンプとなってしまった。最初からBL-5だけチャンネルを閉じて作業を行っていただければビームダンプを防げたトラブルであることから、今後はそのように対処することとした。

10月22日以降、1シフトに1~2回の頻度で100 μ m を超えるような比較的大きな水平方向の軌道変動が起きはじめた。未だに原因不明の変動であるが、継続して調査を行った。

入射器マシン調整日11月3日1:00のビーム電流の積み上げ入射を行っていた時に、ビームダンプが発生した。原因は、入射用キッカー電磁石3台中1台 (K3) が励磁しなかったことにより、蓄積ビームの軌道が大きすぎてしまったためと判明した。誤動作によるものと推察されるが、ビームダンプ後の再入射は特に問題がなくユーザー運転が再開された。運転停止まで再発はしなかった。

11月24日9:00に軌道フィードバック用補正電磁石電源1台が最大電流値に近づいたため、一旦チャンネルを閉じて、電流値のリセットを行った。リセット後はすぐに運転を再開した。

11月27日0:57 PF 光源棟地下機械室にて水漏れを発見

した。RF # 4の集束コイル冷却水配管からの水漏れであることが判明した。チャンネルを閉じて、水漏れ対策の作業を行った。作業が終了して、入射を再開したが、水平方向のビーム不安定性が発生した。個別バンチフィードバックのパラメータを調整して水平方向の不安定性は収まったものの、バンチフィルの乱れから進行方向のビーム不安定性が発生してしまった。パラメータ調整では抑制できず、ビーム電流ゼロからの再入射を行って対処した。その後、ビーム不安定性の再発は起きていない。

12月1日にマルチバンチからハイブリッドモードへの切り替え作業を行った。今期は、シングルバンチ部の電流値を50 mA、マルチバンチ部の電流値を400 mA、合計450 mAとした。12月2日9:00から光軸確認を行って、ユーザー運転を再開した。

12月4日9:00垂直方向の軌道変動が発生した。13:50にチャンネルを閉じて軌道フィードバックのON/OFF操作を行ったところ変動は収まった。しかし、変動の原因が特定できておらず、様子を見ることとした。

12月5日19:30に垂直方向の軌道変動に対応するため、一旦チャンネルを閉じて、故障していると推測されていた高速軌道フィードバック制御用DACボードを交換した。しかし、その後も軌道変動が発生したため、他の原因であることが判明した。結果として、補正電磁石電源PV28の電流値がある閾値を超えると不安定になり、変動が発生することを突き止めた。PV28近傍の補正電磁石電源石VD36を調整することで、PV28の電流値を抑制して対処した。12月6日からは、垂直方向の遅い軌道フィードバック (SOFB) をOFFにすることで、PV28の電流値ドリフト自体を抑えて運転 (軌道のずれが目立ち始めたら手で数分間ONにする) し、その効果により運転終了まで垂直方向の軌道変動は再発しなかった。

この期間ハイブリッドモードの蓄積電流値450 mA (シングルバンチ部50 mA、マルチバンチ部400 mA) でユーザー運転を実施しているが、入射器マシン調整日やトラブルなどで430 mAを下回ると進行方向のビーム不安定性が発生する。不安定性が発生した場合は、RFに位相変調をかけて抑制するようにしているが、ビームラインによっては強度変動として観測されていると推測される。しかしながら、このビーム不安定性を完全に抑制する手段はなく、現状ではRFの位相変調に頼らざるを得ない。

12月24日1:23頃、蓄積電流値が407.4 mAまで突如削れるという現象が起きた。同期してRF空洞パワーの変動が一瞬発生していた。蓄積電流値が低下したことでビーム不安定性も発生したが、RF位相変調のON/OFF操作を実施して抑制した。その後も、蓄積ビームが削れる現象が2回起きた。やはり、RF空洞パワーの変動と関係があるようにも推察されたが、時折生ずる現象で原因の特定には至らなかった。

PFリングは、12月26日9:00に予定通りユーザー運転を終了して、冬の停止期間となった。第3期の運転開始は、2月15日9:00を予定している。

図2に、PF-ARにおける立ち上げ日10月12日9:00～11月7日9:00までの蓄積電流値の推移を示す。10月12日に5 GeVで立ち上げを行った。9:00からパトロール、9:50から入射に関わる総合動作試験1項目を実施し、10:00ごろよりビーム調整を開始した。PF-ARも立ち上げ調整は順調に実施され、

10月17日9:00からの光軸確認後にユーザー運転が開始された。

10月20日8:36に、偏向電磁石B_SE02の流量インターロックが動作して、ビームダンプとなった。リングトンネル内に入域し確認したが特に異常はなかった。インターロックはリセットが効いたことから、誤動作と判断し、再立ち上げを行ってユーザー運転を再開した。

10月25日に入射効率低下のための原因調整を行ったところ、メインバンチ以外のバンチにビームが入ったためビ

ームを捨てて、再入射を実施した。

11月2日に純度が悪化したとの連絡があり、純化調整をせずに様子を見ていたが、翌日には純度が回復するということがあった。今期は純度に関連するトラブルが何度か起こっている。メインバンチに対して後ろのバンチを蹴るように純化のタイミングを設定しているが、以前に比べてタイミングのふらつきが大きいことが要因と推測している。しかしながら、ふらつきの原因は不明のため様子を見ているところである。現状では純度が悪化した時にその都度純化調整を行い対応していくこととした。

11月7日9:00より6.5 GeVモードに切り替え、11月11日9:00から光軸確認を実施してユーザー運転を再開した。

11月11日9:00から、6.5 GeVユーザー運転において、測定器開発テストビームライン用内部標的を挿入して、放射光実験と共存する試用運転が開始された。12月5日

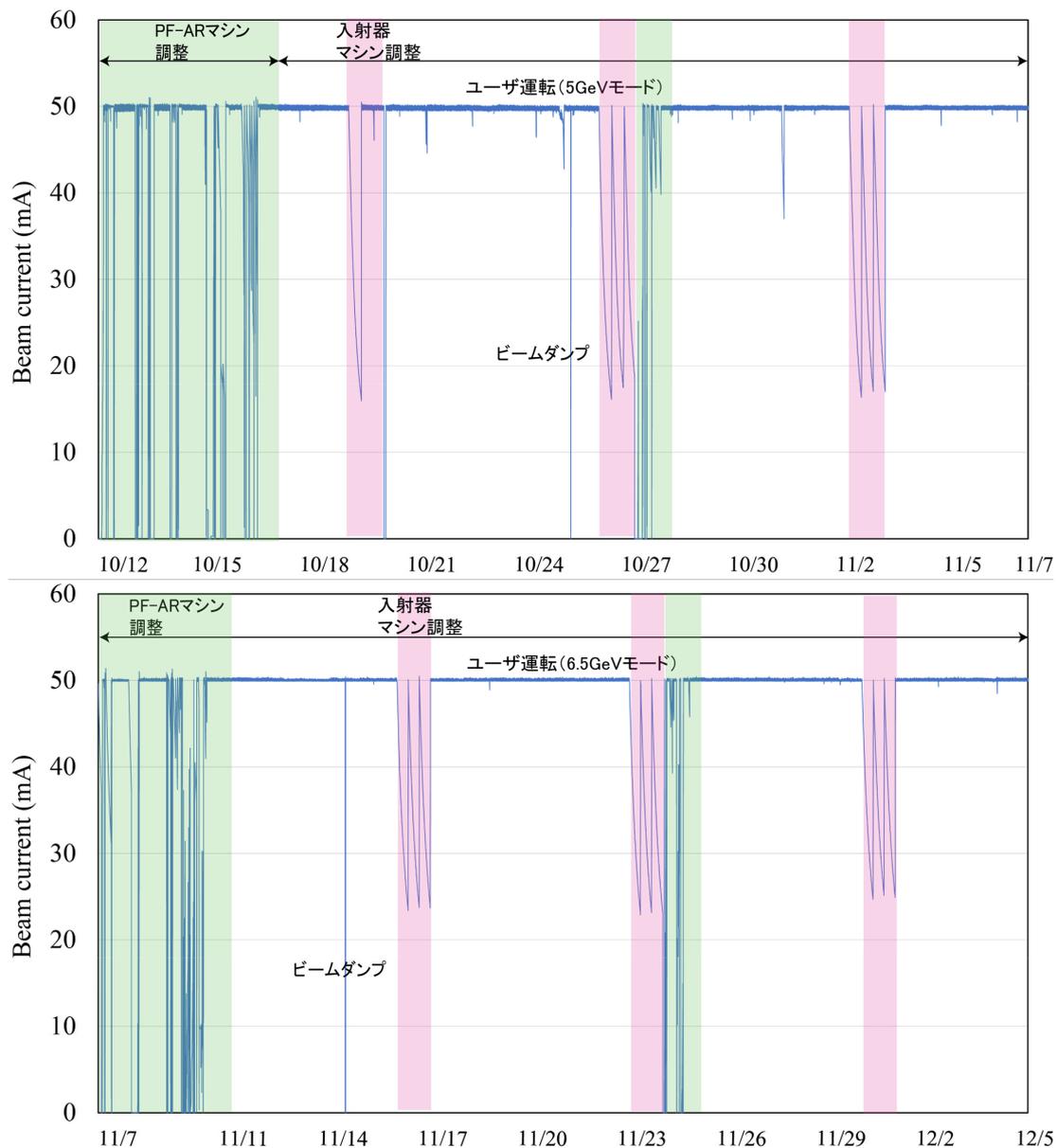


図2 PF-ARにおける運転開始日10月12日9:00～運転停止日12月5日9:00までの蓄積電流値の推移を示す。

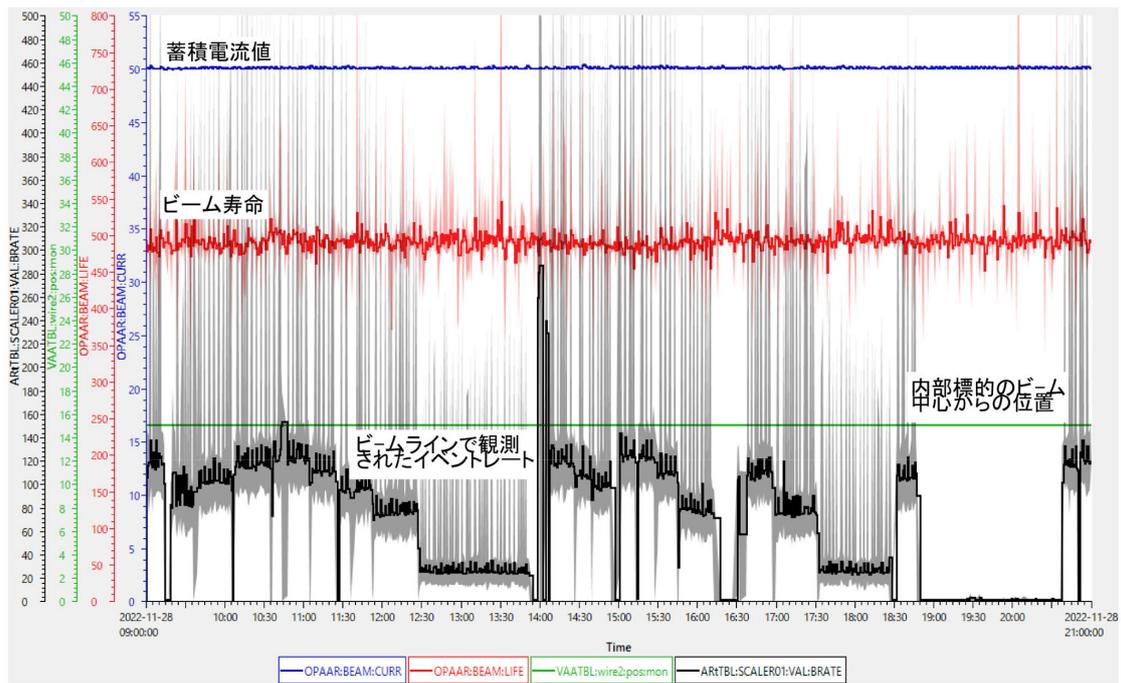


図3 PF-ARにおける11月28日9:00～11月28日21:00までの蓄積電流値（青：単位 mA），ビーム寿命（赤：単位分）内部標的のビーム中心からの位置（緑：単位 mm），ビームライン側で観測されたイベントレート（黒：単位 Hz）の推移を示す。

9:00の運転停止まで、概ね安定した電子ビームがビームライン側に供給された。測定器開発テストビームラインにおける11月28日9:00から21:00まで12時間のイベントレートの推移をリングの運転状況と合わせて図3に示す。

11月14日19:32 西RF空洞#1で反射が起こり、インターロックが動作してビームダンプとなった。直ちにリセットされ、19:56には運転が再開された。

11月22日、25日にビーム寿命急落があったが、再入射の必要がなく回復した。真空度の悪化も観測されなかった。

12月4日PF-AR電荷制限器のトラブルで一時入射が中断したが、誤動作であることが判明し復旧した。

12月5日9:00予定通りユーザー運転を終了して、冬の停止期間となった。PF-ARの第3期の運転開始はPFリングより5日遅れた2月20日9:00を予定している