

KEK PF-AR における新設 GeV レンジ測定器開発テストビームラインの始動 LAUNCH OF THE NEW GeV RANGE TEST BEAMLINE FOR THE DEVELOPMENT OF AN INSTRUMENTATION TECHNOLOGY IN THE KEK PF-AR

満田史織^{#, A)}, 本田融^{A)}, 野上隆史^{A)}, 長橋進也^{A)}, 内山隆司^{A)}, 高木宏之^{A)}, 花垣和則^{A)}, 池上陽一^{A)},
中村勇^{A)}, 宇野影二^{A)}, 森隆志^{A)}, 前田順平^{B)}

Chikaori Mitsuda^{#, A)}, Tohru Honda^{A)}, Takashi Nogami^{A)}, Shinya Nagahashi^{A)}, Takashi Uchiyama^{A)},
Hiroyuki Takaki^{A)}, Kazunori Hanagaki^{A)}, Yoichi Ikegami^{A)}, Isamu Nakamura^{A)}, Shoji Uno^{A)}, Takashi Mori^{A)},
Jyunpei Maeda^{B)}

^{A)} High Energy Research Organization (KEK)

^{B)} Kobe University

Abstract

AR test beamline (AR-TBL) at KEK PF-AR was constructed for the development of detectors in 2021 under the collaboration with the Instrument Technology Development Center of Institute of Particle and Nuclear Studies as part of the diversified utilization of the synchrotron radiation accelerator¹. An internal target is inserted in the accelerator ring, and the gamma rays generated from collisions between the stored electron beam and the target are irradiated to the copper converter to produce electron pairs with the same energy level as that of the stored electron beam. The AR-TBL experiment using the reproduced electrons is important to be operated without affecting synchrotron radiation (SR) user experiments. The completion of the direct beam transport line for top-up operation of the PF-AR and the availability of variable-energy beam transport have provided an opportunity for its promotion. We will report on the details of the accelerator tuning step by step for the co-operative operation with synchrotron radiation experiments and the status of the accelerator operation for AR-TBL user operation, which has been started in 2023.

1. はじめに

PF-AR で蓄積電子ビームをインターナルターゲットのワイヤに衝突させる、素粒子原子核実験グループが希求する測定器開発テストビームラインの計画は、2014 年頃に最初の議論が行われた。2020 年度の予算措置を皮切りに計画の具体化の検討が開始され、放射光源加速器を有する加速器研究施設を中心に、素粒子原子核研究所(素核研)他、高エネルギー研究室を抱える大学関係者及び学生の協力のもと PF-AR テストビームライン (AR-TBL) 建設に向けた体制が整えられた[1]。2020 年度中にあらかたの建設工事に向けた準備が完了し、2021 年度の夏の加速器停止期間に建設が行われ秋に竣工している。2021 年度内にビームコミッショニングを完了させ、2022 年度加速器学会年次大会では第一報となる建設完了とビームコミッショニングの報告をしている[2]。

AR-TBL で利用される電子ビームは、放射光源である蓄積電子ビームハローとワイヤターゲット(WT)との衝突により生成されるガンマ線を銅コンバータで電子陽電子対生成をして得る。生成電子ビームは低エネルギーから蓄積電子ビーム(6.5 GeV と 5.0 GeV の 2 つのエネルギーモードで運用)と同等のエネルギーを最大とするブロードなエネルギー分布を持つ。コンバータの生成点から気中を通す単純な AR-TBL の光学系輸送路と 1 台のエネルギー選別偏向電磁石によりステージへ輸送され単色電子ビームが得られる。

WT の挿入深度は蓄積電子ビーム寿命に換算した損

失量として放射光実験側と決められており、それに比例する電子収量が AR-TBL 側で得られる。WT の挿入位置は蓄積電子ビームハローとなるビーム中心から 5.4σ であるものの蓄積電子ビームに与える影響は大きくユーザーランに向けた調整には放射光ユーザー運転との共立を見極めるための十分な時間が確保された。

2022 年度秋に AR-TBL ユーザーへの電子ビーム試供試験としてのトライアルランが行われ試験的な放射光実験との共立が開始された。2023 年度からは第 1 期運転で 6.5 GeV エネルギーモードでのユーザーランの開始となり、第 2 期運転では 5.0 GeV ユーザーランも開始され、2024 年度の現在は定常的に AR-TBL ユーザー運転が供されている。第一報後の経過をたどりユーザー運転成立に向けた取り組みの詳細を報告する。

2. 電子ビーム試供試験トライアルラン

ビームコミッショニングにおける調整は、シミュレーション通りに WT を挿入位置まで導入し、1. 電子ビームとの衝突実験が可能であるかどうか、2. 生じるビーム寿命の変化が再現性のあるものかどうか、3. 放射光ユーザー実験との共立を破綻させる可能性のある要因があるかどうかのこれら 3 つのテーマに絞られ放射光ユーザー運転中のマシンスタディー時間を確保しそれぞれのテーマに対する調査試験が実施された。Figure 1 に策定されたユーザー運転までのマシーン調整計画表を示す。このビームコミッショニング期間中に、蓄積電流モードでの 5~30 mA 低電流、50 mA 大電流試験を通じ AR-TBL の利用原理が実証された。

[#] chikaori.mitsuda@kek.jp

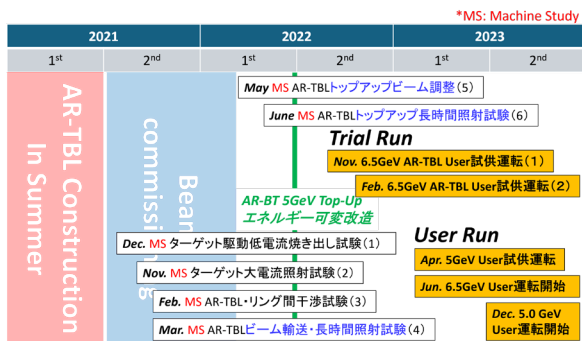


Figure 1: Machine tuning plan to the user operation.

WTを規定位置に挿入することで、ビーム寿命は20時間分短寿命化する。この寄与を PF-AR で採用する 6.5 GeV/5.0 GeV エネルギー運転モードでの 50 mA 大電流シングルバンチフィリングでの自然寿命、900 分/300

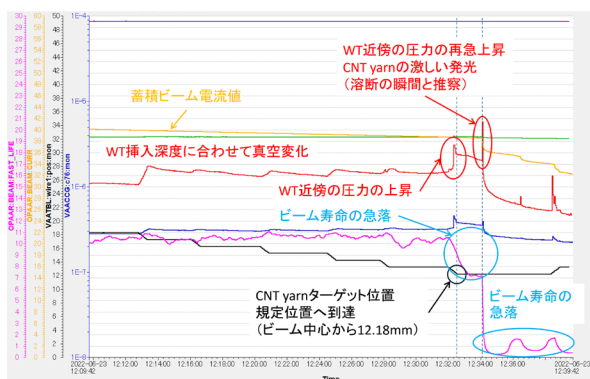


Figure 2: The stored beam life and vacuum condition at the sudden break of CNT yarn.

分程度に当てはめると、それぞれ 570 分/240 分のビーム寿命となる。ちなみに PF-AR ではエネルギーを下げることで短バンチ化するためタウチェック寿命がより短くなる傾向がある。短寿命化したことによる電流値の減少はトップアップ運転による電子ビームの継ぎ足しで補うことが可能で、放射光ユーザーにとっては放射光量と関係する蓄積電流値が維持される限りにおいては WT の挿入に不感である。

加速器運転者からみるとビーム寿命の短寿命化は、トップアップ運転をしない場合みると蓄積電流値が減るため運転に不安を抱くレベルとなる。AR-TBL にとって、いずれのエネルギー運転モードにおいても、特に本来のビーム寿命が短い 5.0 GeV エネルギーモードではトップアップ運転が放射光ユーザー運転との共立運転の要である。このことから、1. WT を挿入した状態でトップアップ運転が継続可能であるかどうか、2. WT が入射ビームと蓄積ビームいずれの衝突でも生じる定常的な熱負荷に対し破損無く維持できるかどうか、AR-TBL の成立要件を見極める重要な段階となる。

なお、PF-AR の Linac からの電子ビーム直接入射路は 6.5 GeV 単一エネルギー輸送路として建設されており [3]、AR-TBL の建設時には 5.0 GeV エネルギー運転モードでのトップアップ運転は実現されていなかった。AR-TBL のユーザー運転共立は 6.5 GeV 運転期間に絞られ

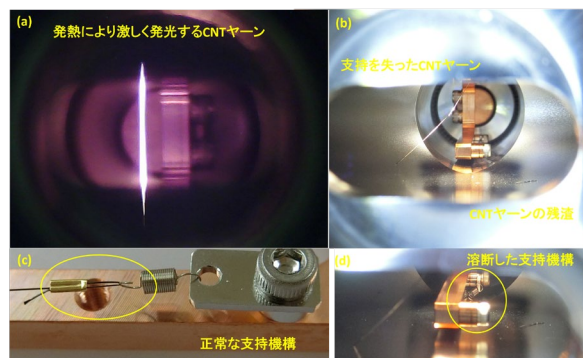


Figure 3: Broken CNT-yarn WT.

ていた背景がある。2022 年に AR-TBL の建設から遅れること PF-AR 直接入射路のエネルギー可変改造工事が実施され [4]、5.0 GeV エネルギーモードでのトップアップ運転が可能となり、いずれのエネルギーモードでも AR-TBL ユーザー運転実現の可能性が生まれた。

WT を挿入しながらの 6.5 GeV エネルギーでのトップアップ運転耐久試験は、2 つある WT の CNT ヤーン、グラフェンシート (GFS) のうち GFS において実施された。熱伝導度の悪かった CNT ヤーンにおいては、蓄積電流モードの 40 mA 大電流状態で耐久試験を実施したものの、発熱と CNT を支持するスプリング機構へのマルチパクターリング効果による電界集中により支持機構が溶断する事象が発生した。そもそもトップアップ運転での耐久試験以前に適用が絶望的となった。どのように WT の調整監視をしているのか一例として、その WT の溶断プロセスの計測データを Fig. 2 に、Fig. 3 に破損状況を示す。その後、CNT ヤーンの利用は不適と判断され 2 種の WT は GFS に統一された。GFS のトップアップ運転の耐久試験は、50 mA の蓄積電流値を維持しながら 12 時間以上ビーム寿命急落などのない状態を維持することが出来たが、12 時間後に原因不明の入射不調となり WT を抜かねば電流値が維持できない状態が発生した。Figure 4 に突然の入射効率悪化時の計測データを示す。WT を挿入していない状態で 11 時間のビーム寿命に対し、7 時間 (450 分程度) のビーム寿命となる位置に WT が挿入されたが、WT を抜くまで入射効率が回復することはなかった。この結果を受けて GFS を用いた本格的なより長時間の運用の見極めが必要であると判断し、放射光ユーザー運転中も WT を挿入し運転を行う、AR-TBL ユーザーへ

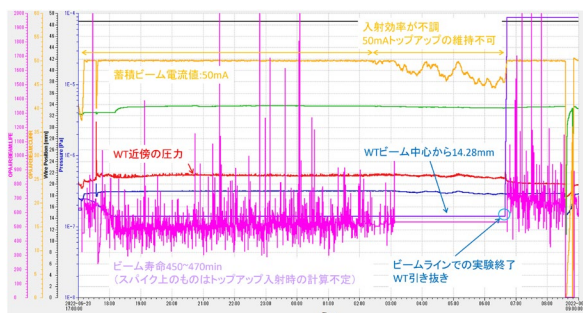


Figure 4: Example which injection efficiency was suddenly getting worse during the Top-Up operation.

電子ビームを試供するトライアルラン(放射光実験を優先しいつでも WT を抜き AR-TBL 実験を中断することが許される)が設定された。

6.5 GeV でのトップアップ入射モードでの放射光ユーザー運転中のトライアルラン(試験的に AR-TBL ユーザーもついている状態)を、2022 年の秋、2023 年冬に行った。AR-TBL のトライアルランは、6.5 GeV エネルギーで秋、冬、それぞれ 24 日間、19 日間、連続で実施された。

これらのトライアルランを通じて、1. 入射ビームと蓄積ビームが常に衝突するが、WT の損傷が発生せずに長期耐久性能が確保されていること、2. トップアップ入射の入射時蓄積ビーム水平振動が発生しても、寿命の急減などの不安定性は誘起されず、WT によるビーム損失を補償して安定した蓄積電流値の維持が可能であること

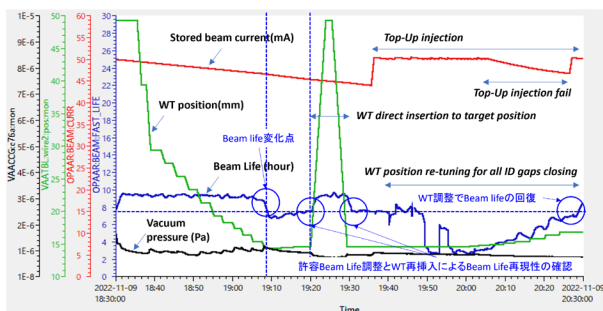


Figure 5: The trend graph in the WT position tuning. The vacuum pressure near the WT, beam lifetime, and stored beam current are shown. During the trial run, top-up injection was failed due to the combination of ID gap closure (around 20:05).

が確認された。これにより、AR-TBL の運用が放射光ユーザー運転と共存できることが実証された。Figure 5 に 2022 年 11 月 9 日、6.5 GeV 運転にトライアルランの調整を行ったときの WT 位置調整の記録を示す。

WT の位置調整では挿入深度によりビーム寿命の変化が見られるため、既定のビーム寿命となる挿入深度を WT の運用の規定位置として設定する。まず蓄積ビームモードで正確にビーム寿命を監視しながら挿入する。Figure 5 で示される WT のない状態でのビーム寿命はおおよそ 10 時間程度であるため、既定の 20 時間の寿命を許容する場合、ビーム寿命が 6.6 時間程度になる近傍が WT 挿入位置となる。次に厳密なビーム寿命の位置まで WT 位置を戻す微調整が行われ一度、WT の全抜き差しの再現性の確認を行い仮の WT の位置決定がされる。その後、WT 挿入位置でトップアップ入射の成立を確認

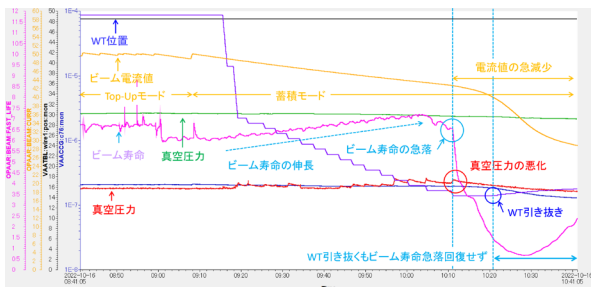


Figure 6: Rapid reduction of stored beam life during the insertion of WT in the stored beam operation mode.

する。ただし、その設定位置は、ビームサイズの変化を伴う挿入光源 (ID) のギャップ閉止状態により微調整が必要であり、各 ID の閉止状態の組み合わせによってはトップアップ入射で蓄積電流値を維持できない状態も生じる。そのため再微調により、全 ID の最小ギャップまでの閉止状態でビーム寿命が急落しない、ビーム寿命の安定した最終的な運用のための WT 位置が決定される。Figure 5 では ID の最小ギャップによりトップアップ入射の継続が不可能となり、20:05 頃 WT の位置の再調整を実施し、WT の位置がより浅くなる方向で再決定されていることがわかる。これは BL ユーザーがいかなる ID ギャップを選択しても共存が可能にするために厳しい運転状態を想定する必要があるためである。ちなみに ID ギャップの閉止によりビーム寿命の急落が一度生じた場合、WT の位置に影響のない位置まで引き下げない限りビーム寿命が回復しきらない。

3. ローエミッタンスオプティクスを導入

先に 6.5 GeV エネルギー運転での原因不明の突然の入射効率の悪化に伴うトップアップ運転による蓄積電流値の維持が困難となった事例を示した。同様に、5.0 GeV エネルギーであっても 50 mA 蓄積モード状態で、ビーム寿命の急落が生じ WT を抜くまで寿命が改善しなかった状態監視の結果を Fig. 6 に示す。WT を入れない状態で、6.7 時間のビーム寿命があり WT の規定位置となるビーム寿命は 5 時間である。通常 WT の挿入深度が深くなるにつれビーム寿命が短くなるはずであるが、反してビーム寿命が伸長し、最終的に急激なビーム寿命の急落となった。回復には WT を抜く必要があり、先のトップアップ運転モードとは状況が異なるものの、最終的な解決方法としては WT の引き抜きが必要であり、そこに至るビーム物理プロセスは不明なものの原因は WT を起因するものと理解されている。

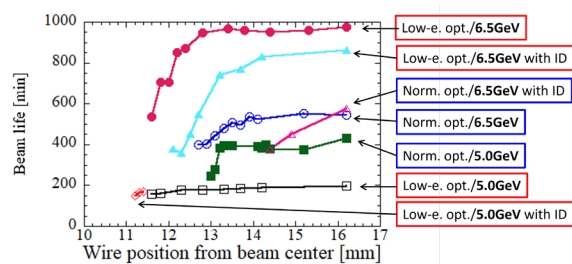


Figure 7: Stored beam-life profile dependent on beam energy, ring optics (Normal optics: norm. opt. and low-ε optics: low-e opt.), and Insertion Device (ID) condition (ID gap closure).

Figure 7 にそのヒントとなるビーム寿命でみた、ビーム水平方向のプロファイルを、エネルギーごと、挿入光源 (ID) ギャップの閉止状態の有無ごと、296 nmrad エミッタンスのリングオプティクスと 2/3 エミッタンスとなるローエミッタンスオプティクスごと、それぞれの組み合わせについて示す。WT を水平方向に挿入することは可視光ストリークカメラなどの光学的ビームプロファイルよりもビームハロー部まで明瞭にビーム広がり診断が出来る蓄積電子ビーム水平プロファイルのプロベリングでもある。その観

点から Fig. 7 を見るとノーマルオプティクスでは WT の挿入深度ともにビーム寿命が滑らかに減衰していくものの、ID ギャップの閉止が伴う場合や、エネルギーが 5.0 GeV と下げられた場合には寿命が急激に減衰する、または、急な変化点があることがわかる。ビーム寿命のビームプロファイルの観点から、ノーマルオプティクスでの WT を挿入した運転では、例えば、ID ギャップの閉止の組み合わせ状態や、WT の位置の 0.2 mm 以下の変化でビーム寿命が急落する事が想像できる。

これに対し、現在適用となったローエミッタンスオプティクス[5]においては、ややデータ点が少ないが、寿命急落にいたる変化点がないことが、ID ギャップ閉止状態でも、いずれのエネルギーモードでも理解できる。ビーム水平プロファイルのビーム寿命分布がリングオプティクスに依存しており、放射光ユーザー実験との共立の成立性に関係している。ただし、ノーマルオプティクスでのオペレーションポイントとしてのチューン値が適正であったかどうかなどの議論が十分になされていないため、今後の詳細なスタディーが必要である。オプティクスの変更により共立運転の成立性が確立されたことから、リングオプティクスのローエミッタンスオプティクスへの変更を行った。5.0 GeV エネルギーでのトライアルラン電子ビーム試供試験は、このオプティクス変更を受け、2023 年 5 月 GW 明けより 14 日間に渡り無事に成功した。

4. AR-TBL ユーザー運転の開始

AR-TBL の本格的なユーザー運転は、2023 年度の 5 月 GW 明け～6 月中旬の夏の放射光ユーザー運転期間の後半における蓄積電子ビームエネルギーが 6.5 GeV となる運転モードで開始された。そこでトライアルランでの総運転日数の 43 日間に加え、15 日間のユーザーランを無事に成功させた。5.0 GeV エネルギー運転モードでのユーザー運転の開始は、2023 年度 11 月からの秋の運転期間の前半において実施され、20 日間のユーザーランを無事に成功させている。2024 年に入り、冬の加速器運転からは AR-TBL ユーザー運転が放射光ユーザー実験運転の共立要件となり、2024 年度の今夏の加速器運転まで順調にユーザー運転の実績を積み重ねている。

AR-TBL ユーザー運転調整で積み重ねられた、いくつかのビーム寿命及び電子ビーム生成率で得られた蓄

積電子ビームの水平ビームプロファイルについて見てみる。Figure 8 は 6.5 GeV エネルギーと 5.0 GeV エネルギーモードでの水平方向のビーム寿命と AR-TBL で観測された電子収量率である。エネルギーが下がり自然ビーム寿命(図中凡例内 Normal beam Life:NL)がそれぞれのエネルギーで 200 分程度と 1000 分程度と差があり、ターゲットとなる寿命を図中凡例 TL (Target beam Life) で示している。もとの自然ビーム寿命に応じて挿入深度ともにゆるやかに線型的に寿命が減衰していき、AR-TBL で観測される電子収量率は自然対数的に増加しビームハローの形状が正規分布に従っているように見える。WT 位置の電子ビームの許容損失数はビーム寿命で決まっているため、原理的にはターゲット寿命にていずれも電子収量率は等しくなるはずであるが 5.0 GeV エネルギーモードが 10%程度低い。WT の挿入深度がそれぞれ異なるのはビームサイズがエネルギーにより異なるため、11.1 mm と 12.7 mm が 5.0 GeV、6.5 GeV エネルギーでの規定位置に相当する。オプティクスで決まるビーム中心からの 5.4σ (10.5 mm @5.0 GeV、13.7 mm @6.5 GeV) 離れた想定位置と概ね合致するが 6.5 GeV で相違がやや大きい。ノーマルオプティクスにおける規定位置がビーム寿命で、13.0 mm と 12.7 mm となっており 5.0 GeV、6.5 GeV エネルギーでの想定位置の 10.8 mm、13.9 mm と大きく乖離していたのと比べ改善がされている。

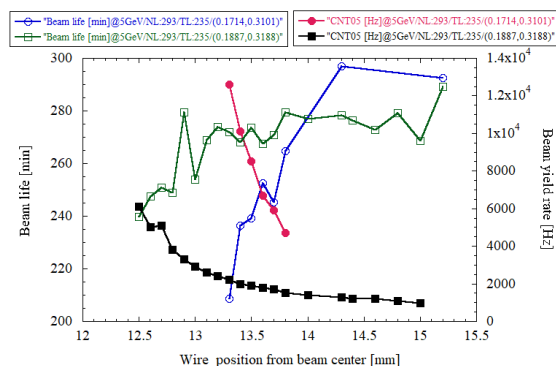


Figure 9: Horizontal beam profiles by using beam life and beam yield rate for operating beam-tune values.

オプティクスの変更で改善された因子の一つである。

Figure 9 に 5.0 GeV エネルギー運転モードにおけるビーム寿命がほぼ同程度の状態で、オペレーションポイント(水平・垂直チューン値)が異なる場合の、WT を用いたビーム寿命及び電子収量率でビーム水平断面構造を見た様子を示す。オプティクスで想定される 5.4σ ビーム位置に近いところに WT の挿入位置が決定された際のチューン値 $(v_x, v_y) = (0.1714, 0.3188)$ では、ビーム寿命、電子収量率いずれもゆるやかな変化を見せておりビーム形状が正規分布に従うように見える。それに対し、チューン値 $(v_x, v_y) = (0.1887, 0.3101)$ では、ビーム寿命の規定位置までの WT の挿入で、オプティクスで想定される位置まで到達する以前に、ビーム寿命が短くなり、電子収量率も急激な増加を見せている。この場合、放射光ユーザー運転との共立性が低く、WT の位置がトップアップ入射時振動で振動する場合や、ID ギャップの閉止による不整磁場の影響によるビームサイズ変化で、ビーム寿命の

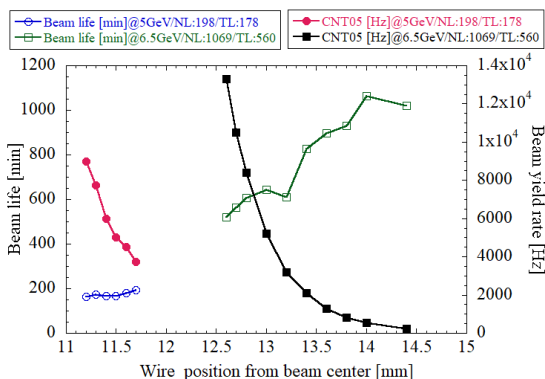


Figure 8: Horizontal beam profiles by using beam life and beam yield rate at AR-TBL with WT probe for beam energies of 6.5 GeV and 5.0 GeV respectively.

急落や、入射不調が発生することとなる。このようなオペレーションポイントは避ける必要がある。

ユーザー運転の成立には、ビーム寿命を使ったビーム形状の断面構造の判断が必要であり、オプティクスで想定される形状でなければならない。またそのオペレーションポイントは水平/垂直チューン値を適切に選択する必要がある。

5. グローバルチューンフィードバックの導入

Figure 10 に蓄積ビームエネルギーが 5.0 GeV、6.5 GeV エネルギーのそれぞれのユーザーラン期間のある 1 週間のビーム寿命と蓄積電流値の推移を示す。外的なトラブルの要因がない限り非常に安定した蓄積電流値の維持と、運転エネルギーによるビーム寿命のベースは異なるものの、一定のビーム寿命の維持が出来る事がわかる。この成功の鍵となったのがそれまで導入がなされていなかった ID ギャップ閉止時に変化させるチューンシフトに対応するためのグローバルチューンフィードバックの適用である。PF-AR にある 5 本(全ビームライン 8 本中)の真空封止挿入光源をもつ放射光ユーザービームラインの数ある組み合わせの中、全 ID ギャップが最小ギャップまで閉止状態であるときに、チューン値が $\Delta v_y = 0.002$ 程度変化する。この値は、ID ギャップの閉止組み合わせ、または閉止度合いによってはこれよりも大きくなりまたは小さくなる。オペレーションポイントのチューン値が $(\Delta v_x, \Delta v_y) = (0.01, 0.008)$ ずれることでビーム形状の構造が変化することは前述した通りであり、ギャップ閉止過渡状態・閉止時に、ビーム寿命の急落が発生している。これを是正するために、リング主四極収束・発散電磁石 2 台を使いグローバルチューンフィードバックをかける。

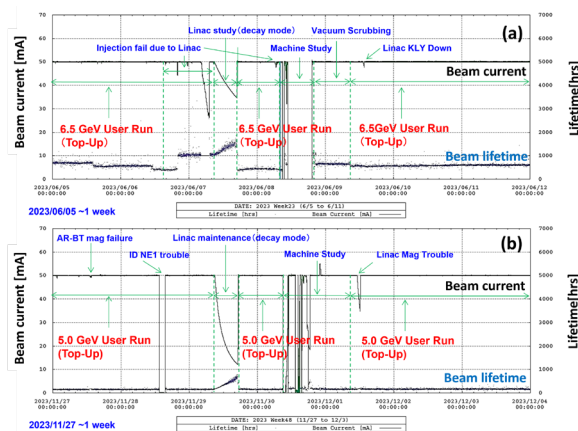


Figure 10: The stored beam current and beam life during AR-TBL user operation. (a) and (b) are 6.5 GeV and 5.0 GeV energy modes respectively.

これにより不整磁場分のチューンシフトを補正し、ビームサイズの変調が抑制されることとなった。ビーム寿命急落、AR-TBL 側での電子収量率の変化もなくなり AR-TBL の運用の基礎形態がこれにて定まった。

Figure 11 に最新の AR-TBL の照射点において取得されたビームプロファイルを示す。現在、2 kHz 程度の電子収量率が得られている。期待値に対して、輸送路中の 30%程度の大气散乱による損失を勘案しても 3 倍程度及

ばないため、また AR-TBL 側で観測されたビームサイズについても輸送路オプティクスで期待される $\sigma_x/\sigma_y = 10 \text{ mm}/2 \text{ mm}$ と大きく相違があり、原因について期待値の妥当性も含めて議論が進められている。

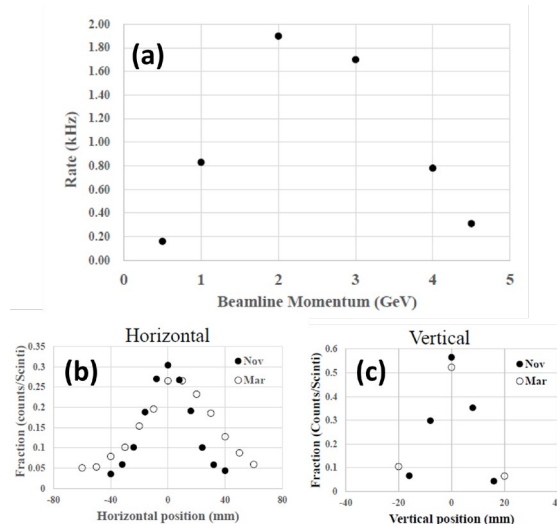


Figure 11: Beam yield spectrum (a) and beam horizontal and vertical profiles achieved in AR-TBL irradiation point during 5.0 GeV energy operation.

6. 残された課題と今後の取り組み

PF-AR では本来の定格の運転蓄積電流値として 60 mA が期待されているマシンであるが、トップアップ運転の成立後は、逆に定常的な熱負荷が加速器リング全体の、特に RF システムへの負担となり 50 mA の運転が基本となっていた。RF システムの熱耐性の強化などにより蓄積電流値の AR-TBL にも恩恵のある 55 mA/60 mA 増強・大電流化への試行が開始されており、ローエミッタンス化とともに PF-AR 放射光の特徴を生かす運転の高度化が図られていく予定である。また、大電流化とローエミッタンス化の成り立ち向上のための策として、大電流 2 バンチフィルモードにて総電流値を 70 mA へ到達させる計画も試行中である。総電流値が増加することで AR-TBL における電子収量率はその比率分増加する。しかしながら、1 バンチ当たりの電流量は低くなるため、ビーム安定性が改善され、より WT の挿入深度を深めることが可能であり、シングルバンチフィリングでの電子収量率も相乗的に増加が期待できる。放射光ビームライン側では総フラックス量は増えるものの大強度パルス、時分割実験において 2 バンチ間隔が許容されるかどうかは課題となる。

謝辞

本プロジェクトを成功させるために、KEK では加速器第 6 研究系、加速器第 4 研究系、素核研測定器開発センター、物構研 PF、放射線科学センターはもとより、高エネルギー実験に携わる京大、神戸大、名古屋大の学生、スタッフの皆様に変な多くの方々のご協力ご尽力を頂きました。この場をお借りし、深く感謝申し上げます。

参考文献

- [1] T. Honda *et al.*, “Design of the GeV range test beam line at the PF-AR”, Proceedings of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Takasaki (Online meeting), Japan, Aug. 9-12, 2021, pp. 379-383.
- [2] C. Mitsuda *et al.*, “Construction of the GeV-range test beamline at KEK PF-AR”, Proceedings of the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Kitakyushu (Online meeting), Japan, Oct. 18- 21, 2022, pp. 320-324.
- [3] N. Higashi *et al.*, Journal of the Particle Accelerator Society of Japan, “加速器”, vol. 14, no. 3, pp. 134-141 (2017).
- [4] C. Mitsuda *et al.*, “Improvement of the beam transport line for realizing the top-up injection with 5 GeV beam energy in KEK PF-AR”, Proceedings of the 20th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Funabashi, Japan, Aug. 29- Sep. 1, 2023, pp. 310-315.
- [5] H. Nao *et al.*, “Application of the middle-low-emittance optics to PF-AR”, The 21st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2024), Yamagata, Japan, Jul. 31-Aug. 3, 2024, WEP031, this meeting.