

## PF-AR における GeV 領域エネルギー電子を使った測定器開発用 テストビームラインの建設

### CONSTRUCTION OF THE GeV-RANGE TEST BEAMLINE AT KEK PF-AR

満田史織<sup>#, A)</sup>, 本田融<sup>A)</sup>, 内山隆司<sup>A)</sup>, 坂中章悟<sup>A)</sup>, 佐々木洋征<sup>A)</sup>, 高木宏之<sup>A)</sup>, 谷本育律<sup>A)</sup>, 内藤大地<sup>A)</sup>,  
中村典雄<sup>A)</sup>, 長橋進也<sup>A)</sup>, 野上隆史<sup>A)</sup>, 山本尚人<sup>A)</sup>, 花垣和則<sup>A)</sup>, 池上陽一<sup>A)</sup>, 宇野障二<sup>A)</sup>, 佐藤康太郎<sup>A)</sup>,  
外川学<sup>A)</sup>, 中村勇<sup>A)</sup>, 幅淳二<sup>A)</sup>, 森隆志<sup>A)</sup>, 安部草太<sup>B)</sup>, 寺村七都<sup>B)</sup>, 前田順平<sup>B)</sup>, 小田川高大<sup>C)</sup>,  
鷲見一路<sup>D)</sup>, 前田朱音<sup>D)</sup>

Chikaori Mitsuda<sup>#, A)</sup>, Tohru Honda<sup>A)</sup>, Takashi Uchiyama<sup>A)</sup>, Shogo Sakanaka<sup>A)</sup>, Hiroyuki Sasaki<sup>A)</sup>,  
Hiroyuki Takaki<sup>A)</sup>, Yasunori Tanimoto<sup>A)</sup>, Daichi Naito<sup>A)</sup>, Norio Nakamura<sup>A)</sup>, Shinya Nagahashi<sup>A)</sup>,  
Takashi Nogami<sup>A)</sup>, Naoto Yamamoto<sup>A)</sup>, Kazunori Hanagaki<sup>A)</sup>, Yoichi Ikegami<sup>A)</sup>, Shoji Uno<sup>A)</sup>, Kotaro Satoh<sup>A)</sup>,  
Manabu Togawa<sup>A)</sup>, Isamu Nakamura<sup>A)</sup>, Junji Haba<sup>A)</sup>, Takashi Mori<sup>A)</sup>, Sota Abe<sup>B)</sup>, Natsu Teramura<sup>B)</sup>,  
Junpei Maeda<sup>B)</sup>, Takahiro Odagawa<sup>C)</sup>, Kazumichi Sumi<sup>D)</sup>, Akane Maeda<sup>D)</sup>

<sup>A)</sup> High Energy Research Organization (KEK), <sup>B)</sup> Kobe University, <sup>C)</sup> Kyoto University, <sup>D)</sup> Nagoya University

#### Abstract

A test beamline (AR-TBL) to generate GeV-energy electrons by installing an internal target in the storage ring was constructed to develop an instrument for elementary particle and nuclear experiments at the PF-AR in the KEK. The gamma rays produced by collisions between the target wire and the halo of the stored beam electron are converted into electron-positron pairs by a converter at the end of the bending magnet chamber in the storage ring to produce an electron beam. It is planned to recover the stored beam current by top-up injection to coexist with synchrotron radiation operations to beam line user. The design study, equipment procurement and manufacturing, and construction plan were completed by FY2020, and the beamline was constructed in the summer of FY2021. We will report on the overview of the AR-TBL system, construction process, recent beam commissioning, and prospect.

#### 1. はじめに

PF-AR では、GeV エネルギーオーダー電子ビームを生成し素粒子物理実験用測定器開発に利用するテストビームラインの運用へ向けた取り組み (AR-TBL: PF-AR Test Beam Line) を KEK 素粒子原子核研究所 (素核研) との研究協力で進めている。建設に具体的な研究協力体制には、PF-AR を運用する物質構造科学研究所、放射光光源加速器の運転及び開発責任を有する加速器研究施設の第 6 研究系、初代テストビームラインの建設が行われた KEKB リング内の富士テストビームライン (FTBL: Fuji Test Beam Line) [1, 2] より Super-KEKB リングの第 4 研究系、放射線安全管理の観点から放射線科学センターの 4 研究施設が協力しており、KEK 以外からは神戸大学、名古屋大学、京都大学の協力も得て、大横断的な大きな枠組みで構築されている。

素核実験の立場から、粒子線を使った測定器開発用の GeV エネルギーオーダーのビームテストが可能なテストビームラインの建設は、高エネルギー実験の世界 3 大拠点である KEK の長年にわたる悲願の建設計画である。PF-AR の放射光実験の立場からは、放射光実験運転時間が 2016 年以前に比較し半減しており、運転経費の捻出のため節電対策のビームエネルギーを 5.0 GeV に下げた運用に取り組んでいるが、PF-AR の放射光以外の 2 次利用の計画は放射光実験との共存が図られれば、PF-AR の利用価値が高まることで、更なる運転の継続性の

確保につながると期待されている。

これら双方から期待される素核研測定器開発室を主とした PF-AR でのテストビームライン計画の発足は、FTBL から仕切り直しを図る 2014 年に遡ることになる。長らく計画は検討の域を出ないままであったが、2020 年度予算化を皮切りに計画が進み [3]、2020 年度中には急ピッチで具体的な設計、機器の製作、調達が進められ、2021 年度夏に建設が完了した。現在、建設後のビームコミッショニングが加速器マシンスタディー時間を利用し順調に進行中である。

#### 2. AR-TBL の構成要素と建設へ向けた準備

建設場所は PF-AR で唯一残っていたビームライン新設可能スペースの南実験エリアである (Fig. 1)。テストビームラインステージと PF-AR リング加速器収納部はコンクリートの放射線隔壁で仕切られている。GeV オーダーの電子ビーム照射実験はステージ側で行われるため、PF-AR リングで生成する電子ビームをステージ側へ輸送する必要がある。その電子ビームは、放射光源である蓄積電子ビームハローとワイヤーターゲット (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し得る。その電子ビームは単純な AR-TBL の光学系輸送路と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。尚、この輸送路は気中ドリフトスペースとなっており、真空ダクトは設置されない。WT に、0.1 φ カーボンファイバーを想定すればビーム中

<sup>#</sup> chikaori.mitsuda@kek.jp

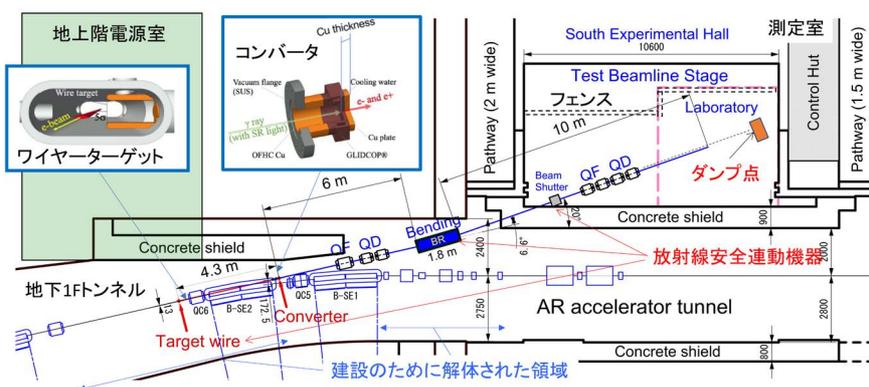


Figure 1: Overview of system component in the AR-TBL.

心から  $5.4\sigma (=10.8 \text{ mm}, 5.0 \text{ GeV}, 6.5 \text{ GeV}$  エネルギーでは  $=14 \text{ mm})$  の位置に WT を置くと、 $2.5 \times 10^9$  個/s の電子ビームが衝突し、蓄積電子ビームエネルギーを cut-off とするエネルギー広がり光子の発生が得られる。WT の位置はターゲットとの衝突で失われる電子損失が  $\tau=20 \text{ h}$  の電子寿命時の損失レート ( $6.5 \times 10^6$  個/s) と同等となるように微調設定される。これはターゲットワイヤーの材質と衝突断面積によるため実際にビーム寿命を見ながらの調整となる。ターゲットワイヤーには CNT ヤーンとグラフェンシートが採用され、どちらも運用可能なように設置されている。電子ビームエネルギー  $5.0 \text{ GeV}$  では銅コンバータの厚みを  $16 \text{ mm}$  とすると生成された光子の  $1 \text{ GeV}/c$  の電子ビームへの最大変換率はおよそ  $14\%$  となる。WT システムは PF-AR リング南直線部アーク部短直線下流の四極電磁石 (Fig. 1 中 QC6) の直上流  $325 \text{ mm}$  に設置され、コンバータはさらにその下流偏向電磁石 (Fig. 1 中 B-SE2) の真空ダクトを新造し設置する。

建設に向けて、WT とコンバータを本計画の設計の基軸とし、①素核研側によるコンバータより下流の AR-TBL の磁石光学系の最適化と②加速器第 6 系による放射光ユーザーとの共存のためのリング側課題の検討 (WT とコンバータの設計、運転調整を含む) と AR-TBL 建設に分担を切り分け、効率的に計画を進めた。建設後は WT からコンバータまではリング付随の設備とし加速器管理下に置き、AR-TBL から下流全体のシステムは加速器が建設を請け負う後、素核研側へ管理を引き渡す。放射光ビームライン (BL) と加速器との切り分けに近い管理方法とし AR-TBL も PF-AR リングの既設の 8 つの放射光 BL に BL が追加設置される体制となる。加速器運転側からは放射光供給と電子線供給は、運転上は相違なく取り扱いがなされ、放射光ユーザーからはトップアップによる蓄積電流値が維持される限り、光軸位置とその安定性、光フラックスの安定供給に変更を加えることはなく特別に運用条件が変更されない。運用上の課題の検討について別の本学会での発表「GeV 領域エネルギー電子を使った測定器開発用テストビームラインのワイヤーターゲットが PF-AR の蓄積ビームおよび入射ビームに与える影響」(高木宏之, 他) [4] を参照されたい。

加速器側は WT 及びコンバータシステム、輸送路電磁石システム、加速器安全、放射線安全システムとして備えるべき要素の設計と肉付けを進め、電磁石、真空、RF、モニター、安全の各グループ (Gr) の協力で設計の具体化が進められた。次に加速器側で進められた各機器の

システム構築とその設置について概要を報告する。

### 3. システム構築とその設置

#### 3.1 WT システムと光-電子コンバータダクト

真空機器としては、冷却機構及び放射光アブゾーバーも含むコンバータを備えた新たな偏向電磁石ダクトの設計、ワイヤー駆動システムの設計、熱解析で判明したターゲット材の放射光照射による発熱に対応するためのワイヤー選定 (熱伝導と取り扱いやすさの観点から) と除熱設計、WT 挿入治具の蓄積ビームによる電界集中を緩和するためのインピーダンス解析と設計が、それぞれ真空 Gr と RF Gr との連携で進められた。設計とその機器詳細については別の本学会での発表「PF-AR テストビームラインにおけるターゲットと真空系の設計と整備」(佐々木洋征, 他) [5] を参照されたい。

Figure 2 は実際に PF-AR リングに設置された WT システムの外観写真である。WT システムは前述の 2 種のターゲット材を  $1 \mu\text{m}$  の分解能を有するステップングモーターで別々に駆動し (上流側に CNT ヤーン、下流側にグラフェンシート)、任意の蓄積ビームからの位置に挿入が可能で、実際の調整幅としては  $0.1 \text{ mm}$  の精度で既定の電子損失レートを探索する。WT は直線変位センサーのポテンショメータで正確に位置が把握されており  $10 \mu\text{m}$  の位置精度で再現性の高い電子損失レートを実現する。

上部からワイヤー位置を確認できるビューポート、正面よりワイヤー状態を確認するカメラで視認するビューポートの 2 種類のポートが用意された。運用の間は、放射線損傷を防ぐためにビームライン平面より退避したカメラでリアルタイムにワイヤーの損傷の有無を確認できる。

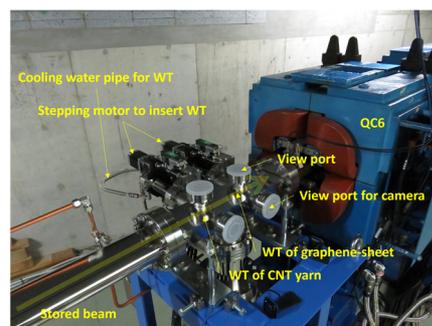


Figure 2: Wire target system installed into PF-AR.

またこの WT システム架台下には PMT とシンチレーションカウンタを組み合わせた電子線ロスモニターが電子ビームの WT でのロスを監視する。

Figure 3 は水冷式銅コンバータのインストール後である。Figure 3(a)については、リング上流の外周側より上部より見下ろした様子で、Fig. 3(b)についてはリング下流の外周側よりコンバータを正面に見た写真である。コンバータの取り付けのため既存の偏向電磁石ダクトの全てを三菱重工製コンバータ付き偏向電磁石ダクトへ入れ替えた。WT を通過したガンマ線と偏向電磁石で放射さ

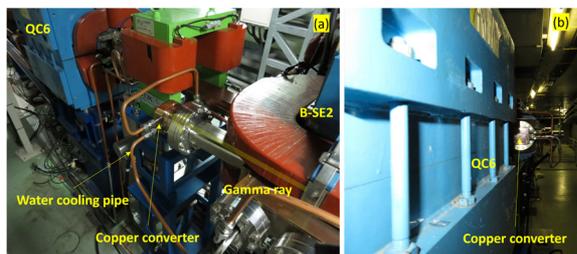


Figure 3: Converter system installed into PF-AR.

れる放射光のいずれもがこのコンバータに照射される。WT 点で衝突する蓄積ビームコアから  $5\sigma$  位置に分布する電子ビームは  $1.5 \text{ mrad}$  の傾きを有しているため、生成ガンマ線の光軸は QC5 四極電磁石のリターンヨークから  $26 \text{ mm}$  に位置し、また、QC 銅コンバータで変換生成される電子ビームは、コンバートされた直後では水平ビームサイズ  $1\sigma < 1 \text{ mm}$  以下であるので、QC5 の四極電磁石のリターンヨークをかわし AR-TBL の輸送路へ誘導される。

輸送路は加速器リング電磁石と近接しているが、最近接の B-SE1 偏向電磁石近傍で  $10\text{G}$  であるものの、輸送路偏向電磁石 BR 設置予定の場所では  $2\text{G}$  と地磁気レベルまで低下し問題がない。

### 3.2 輸送路電磁石システム

輸送路の光学系は偏向電磁石を挟み、上流側に QF と QD のダブレットを 1 台の磁極長違いの QF 電磁石と 2 台の QD 電磁石、下流側の照射実験ステージ上で同様に QF、QD をそれぞれ 2 台ずつの 4 極電磁石で構成されている。仮定する照射点はコンバータより下流  $18.3 \text{ m}$  で、鉛ブロックを積んだダンプ点からは上流  $3 \text{ m}$  に位置する。  $2 \text{ GeV}/c$  運動量の照射点のビームサイズを水平  $1\sigma = 10 \text{ mm}$ 、垂直  $1\sigma = 2 \text{ mm}$  程度になる四極電磁石位置が最適化された。内径  $\phi 46 \text{ mm}$  の円形ダクトを設置した場合にもロスなく輸送可能なビーム形状で輸送路を通る。

電磁石の諸元について Table 1 に示す。水冷電磁石は偏向電磁石の 1 台のみで、他 4 極電磁石 7 台はいずれも空冷である。これら電磁石の全ては再利用電磁石である。偏向電磁石にはバックレグに水平補正用コイルが巻かれており、垂直補正電磁石としてステアリング電磁石 2 台を最上流 QRF 電磁石の直上流に、QRD2 電磁石の直下流に追加している。水平軌道補正は、WT への蓄積ビームの衝突角度に強く依存するため放射光ユーザー向け光軸補正調整と同様の PF-AR リング側でのローカルバンプによる軌道補正を必要とする。これら電磁石設置アライメントについては、別の本学会での発表「PF-AR 測定器開発テストビームラインのための電磁石設置と加速器インターロックシステムの改修」(長橋進也、

他)[6]を参照されたい。

全ての電磁石はリサイクル電磁石であるが設置前に磁場測定が行われている。目的は磁場の BL 積、平坦度の確認と初期化シーケンスの確立、励磁曲線の取得である。偏向電磁石の積分磁場平坦度は、 $\pm 25 \text{ mm}$  の範囲において  $1 \times 10^{-4}$  が確保されている。中心磁場で定格

Table 1: Magnet Specification

Magnet name	Length/Bore/Gap	Field strength	Current
QRF	500/ $\phi 52 \text{ mm}$	16.0 T/m	50 A
QRD1,2	360/ $\phi 52 \text{ mm}$	12.5 T/m	28 A
BR	1780/34 mm	1.2 T	200 A
QSF1,2	360/ $\phi 52 \text{ mm}$	12.5 T/m	28 A
QSD1,2	360/ $\phi 52 \text{ mm}$	12.5 T/m	28 A
V-St1,2	250/54 mm	$37.7\mu\text{T}$	3A

電流  $200 \text{ A}$  通電時に  $2.21 \text{ Tm}$  の積分磁場を得ることが出来、AR-TBL に誘導される  $2.0 \text{ GeV}$  電子エネルギーの選別時には  $69 \text{ A}$  の通電で  $K0=115 \text{ mrad}$  の蹴り角を必要とする。四極電磁石についてはボア径の諸元が一致しているため一元化でき、 $30 \text{ A}$  の通電時に  $4.74 \text{ T(B'L)}$ 、偏向電磁石と同様の考えで  $2.0 \text{ GeV}$  電子エネルギー選別時には  $16.6 \text{ A}$  の通電で QRF、QRD、QSF、QSD のそれぞれで  $K1=0.53, -0.278, 0.275, 0.258 \text{ mrad}$  の蹴り角を得る。全電磁石の性能は、AR-TBL の輸送機能として十分なものであることが磁場計測で確認された。

電磁石と接続する電源の諸元を Table 2 に示す。全て空冷式電源である。偏向電磁石電源は 1985 年製のサイリスタードロッパのリサイクル電源を利用しておりインストール前にオーバーホールが行われ健全性が確保された。電子ビームのエネルギー選別の要となる電源であるため、必要エネルギー分解能の 1 桁下の安定度を重視した電源となっている。四極、双極補正電磁石電源(それぞれの型番、HX-S-060-100G、BWS40-7.5)は小型で比較的廉価なカタログ電源を選定し建設コストの抑制を図った。予備電源が用意されており、ケーブルの接続替えだけで迅速に故障対応が可能で、偏向電磁石電源についても更新機の製作を進めており予備機を備えること

Table 2: Power Source Specification

Magnet name	Company/Cond.	Rated power	# of P.S. ():res.	Stability
BR	IDX Co./Recycling	200A/140V	1	55ppm
Q	Takasago Co./New	100A/60V	4(+1)	<600ppm
V-St	Takasago Co./New	$\pm 7.5\text{A}/\pm 40\text{V}$	2(+1)	<800ppm

で故障時の体制も十分に考慮された。

これら電源の遠隔制御は、偏向電磁石電源は横河 PLC との多芯信号ケーブル接続によるアナログ接点信号によるビット制御で、四極電磁石電源は遠隔制御を電源オプションの TC-L2S デジタル制御ユニットを接続しイーサネットによるデジタル制御、補正電磁石電源は横河 PLC との多芯ケーブル接続によるアナログ基準電圧

信号と接点信号を用いた遠隔制御である。Figure 4 は電源室に配置された電源システム群である。偏向電磁石電源を除く小型電源は1つの19インチラックに集約し格納され、それぞれの出力ケーブルはCAEN DCCT(偏向電磁石用 CT-300V、四極電磁石用 CT-100V-C)を電源出力マイナス側でクランプし、精密に試験照射中の電流値が監視できる。このDCCTの制御電源も高安定化された安定化電源を利用し、デジタルマルチメーター(KETHLEY DAQ6510)とともにDCCT監視システムとして構築されている(Fig. 5(a))。

電磁石電源には、水冷式の偏向電磁石の流量計プロセススイッチとともに、他全ての電磁石の電磁石異常過

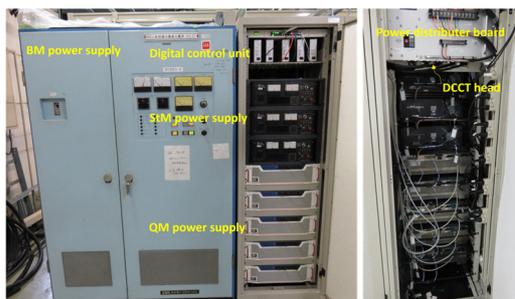


Figure 4: Magnet power supply system in AR-TBL.

熱を温度スイッチによって判断する「機器保護」インターロック信号を、電磁石インターロック中継ボックスを経由し接続をしている(Fig. 5(a))。また、感電事故などを未然に防ぐため電源の On/OFF ステータスを監視する「安全」インターロック信号として、電源状態信号が電源から電源ステータス中継ボックスを経由し、電磁石に設置のパライト、PLCに接続する。偏向電磁石電源の運転状態は電子ビーム誘導の安全バンドとしての放射線安全の成立条件として機能させている(Fig. 6)。これらの電磁石電源制御システムは電源収納ラックと隣接ラックに整備された。

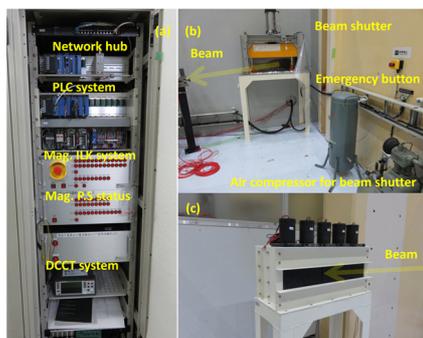


Figure 5: Magnet control and interlock system.

### 3.3 ビームシャッターシステム及びビームダンプ

実験ステージの安全を担保するシステムの要はビームシャッターシステム(Fig. 5(b))、及びビームダンプ点(Fig. 5(c))である。ビームシャッターシステムは圧縮空気で作動し、この開閉状態が安全インターロックの成立条件として組み込まれている。詳細については別の本学会での発表[5]を参照されたい。ビームシャッターは貫通孔が300 mm 厚みの鉛で埋めることでシャッターとの隙間からの放射線漏洩を防ぐ構造である。シャッターは厚み30 cm の鉄製シャッターである。ビームダンプ点は、実験

室のプレハブ小屋の手前に置かれており、鉛レンガブロック(100(D)×200(H)×50(W)mm)を5枚横に並べて厚み200 mm で250 mm の横幅となる遮蔽とPMTと鉛ガラスカウンターで構成するビームエネルギーの電磁カロリメーターを兼ねたシステムとなっている。

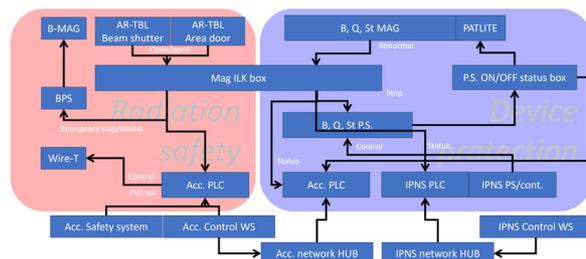


Figure 6: Magnet control and interlock system.

## 4. 建設プロセス

PF-AR 運転の夏の停止期間に入った7月1日から工事が開始され10月2日までの丸3カ月に渡り建設工事が進められた(Fig. 7)。素核研の照射実験室の設置される南棟中2階となるステージとリング遮蔽壁の貫通孔設置作業(作業後に夏の工事まで埋め戻し)は、前年度3月に完了させ、電磁石電源室の整備は加速器運転期間中の6月に始められるなどの工期の短縮を図った。工事開始直後は、AR-TBLが加速器リング外側に位置するので、AR-TBLの電磁石搬入路確保のため、またWTシステム挿入、偏向電磁石ダクトのコンバータ付随ダクトへの入れ替えのため、アーク部上下流で加速器リングの解体作業が行われた(Fig. 1)。並行し、電源室、加速器トンネル内の電磁石付帯設の備整備作業が2週間かけ進められた。8月末以降に、既設リング側の復旧、WT、コンバータシステムの配管及び制御構築、真空粗排気、AR-TBL電磁石群の精密アライメント、総合動作試験、放射線検査が順に進められ、AR-TBLを設置した状況で秋からの放射光ユーザー運転が無事に再開された。WTシステム及びリング大気開放の影響少なく、ひかり焼き出しにより3週間ほど(積分電流値=20 A・h)でビーム寿命 $t\tau=12 \text{ A}\cdot\text{min}$ 、真空度 $10^{-5} \text{ Pa/A}$ に到達した。

## 5. 加速器ビームコミッショニング

秋のマシンスタディーの動作確認試験では、1. リングを蓄積状態として5.0 GeV電子ビームエネルギー運転の低電流蓄積電流値5.0 mA及び30 mAでのWTの挿入駆動試験、2. 大電流蓄積電流値50 mAの蓄積電子をリング蓄積状態として6.5 GeV電子ビームエネルギー運転でのWTへの蓄積ビームハロー衝突試験が行われた。1項では、2種のWTをそれぞれ1 mmステップずつ慎重に20 mm程度の深度まで挿入し放射光によるWT、WTの支持治具の焼き出しを進め、放射光のWTへの照射による発光現象を観察した。WT駆動による機構部のガスだまりからの初期の真空を悪化させるガス放出や焼き出しによる真空悪化があったものの高い再現性で挿入が可能であることが実証されている。2項では、50 mAの蓄積電流値で本格的な蓄積電子ビームハローとWTとの衝突試験が行われ、衝突による焼き出し効果を真空悪化の数値で監視しながら想定されるビーム寿命 $t\tau=20 \text{ h}$

の損失レートを生じさせる位置まで挿入させた。衝突の焼き出しにより真空は瞬間的に悪化するが、徐々に回復し継続しなかった。1 mm ステップでの挿入で大まかにビーム寿命の変化点を確認し、厳密なビーム寿命の境界点は 0.1 mm のステップでその 1 mm の深度幅の狭い範囲に存在する。蓄積ビームの大きな損失を生まないためには高い再現性で所定の位置に WT を挿入し、WT と蓄積ビームとの相対距離を 0.1 mm の精度で変化させないことが重要である。

冬のマシンスタディーのビームコミッショニングでは、1. AR-TBL の電磁石群が蓄積リング電子ビーム軌道と近接するためその励磁による磁場の影響があるかどうかの確認、2. 大電流の蓄積電流値 50 mA での蓄積電子ビームを蓄積状態として 6.5 GeV 電子ビームエネルギーでの WT への蓄積ビームハロー衝突試験の長時間ランと継続した生成電子ビームのステージ側での観測を行った。1 項では、AR-TBL の電磁石の励磁が蓄積ビーム閉軌道 (COD) とチューンへ影響を及ぼすことがないか電磁石 1 台ずつを励磁しながら確認され、近接する四極電磁石群 (3 台) 及び偏向電磁石の励磁で 40  $\mu\text{m}$  程度の COD が発生することが確認された。励磁電流をゼロとしても残留磁場により COD は残るが、蓄積リングでは常に COD 補正プログラムが軌道の乱れを修復しており、放射光ビームライン側への光軸の乱れが生じることがない。AR-TBL 側で電磁石の励磁、非励磁を数秒の早い時間で繰り返す磁場の初期化シーケンスに対する軌道補正



Figure 7: Completion of AR-TBL in 2021.

の追従性も確認され追従可能との結果を得た。2 項では、本格的な WT と蓄積電子ビームとの衝突実験が行われ、電子損失レートが規程ビーム寿命となる位置に WT が置かれ、蓄積運転モードで 8 h の継続した電子ビームのステージへ誘導する長期ランを実施した。CNT ヤーンではマルチパクタ効果のような放電現象が生じたため長期ランには適用せず、グラフフェニート WT を使い、南実験棟ステージ上での素核研によるシンチレーションカウンター (Fig. 7(e)) による監視で、蓄積ビーム位置から 0.1 mm ステップでのサーベイを実施し 14~15 mm の間 14.3 mm 位置で安定して 1000 count/s の電子ビームが

観測された (Fig. 8(a))。WT の位置、電子ビームの生成量のエネルギー分布 (Fig. 8 (b)) のいずれも期待と要求を満足する結果となり AR-TBL の利用原理が実証された。

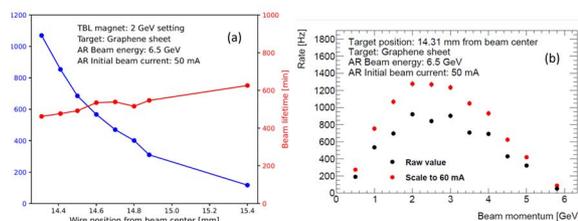


Figure 8: The beam rate for the WT inserting depth (a) and the beam rate for electron beam energy (b).

## 6. 運用に向けた課題と今後の計画

今後、WT を挿入したままのトップアップ運転モードによるユーザー運転期間中の連続運用の実績を積み重ねる必要がある。その課題は、1. 入射ビーム、蓄積ビームが常時 WT への衝突を繰り返す中で、WT の長期的な耐久性や偶発的な放電損傷が起きるかどうかが、2. トップアップ入射で蓄積電流値を維持できるように、WT でのビーム損失を不定とさせないことである。1 つ目は、実際に長期運用を試験的に始めることで検証せざるを得ない。2 つ目は、トップアップ運転時の蓄積ビームの振動が、所定の WT と蓄積ビームとの相対距離を維持できない要因となるため、不用に蓄積ビームのコアが削られるようなことがあれば入射が停滞し、また不用意な WT への熱的疲労を与えることになる。入射が停滞し、蓄積電流値が維持できない場合には、放射光ユーザー実験が成立しないため、バンブ軌道の漏洩による蓄積ビームの振動の抑制は大変重要な課題となっている。

トップアップ運転を成立させ、2023 年度には AR-TBL ユーザー運転を開始することを目標に計画が進められている。世界でも稀有なインターナルターゲットを挿入した放射光加速器運用の実現も近い。

## 参考文献

- [1] J. Haba *et al.*, “KEKB—富士テストビームライン (FTBL) (I) -その設計-”, 「加速器」Vol. 4, No. 2, 2007, pp.131-135.
- [2] T. Egawa *et al.*, “KEKB—富士テストビームライン (FTBL) (II) -その建設-”, 「加速器」Vol. 4, No. 4, 2007, pp.318-325.
- [3] T. Honda *et al.*, “PF-AR の測定器開発テストビームライン建設計画”, Proceedings of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, QST-Takasaki Online, Japan, Aug. 9-12, 2021, pp.379-383.
- [4] H. Takaki *et al.*, “GeV 領域エネルギー電子を使った測定器開発用テストビームラインのワイヤーターゲットが PF-AR の蓄積ビームおよび入射ビームに与える影響”, Proceedings of the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Kitakyushu, Japan, Oct. 18-21, 2022, to be published.
- [5] H. Sasaki *et al.*, “PF-AR テストビームラインにおけるターゲットと真空系の設計と整備”, Proceedings of the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Kitakyushu, Japan, Oct. 18-21, 2022, to be published.
- [6] S. Nagahashi *et al.*, “PF-AR 測定器開発テストビームラインのための電磁石設置と加速器インターロックシステムの改修”, Proceedings of the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Kitakyushu, Japan, Oct. 18-21, 2022, to be published.