

## PF-AR の測定器開発テストビームライン建設計画

### DESIGN OF THE GeV RANGE TEST BEAM LINE AT THE PF-AR

本田 融<sup>#, A)</sup>, 池上陽一<sup>A)</sup>, 内山隆司<sup>A)</sup>, 宇野彰二<sup>A)</sup>, 坂中章悟<sup>A)</sup>, 佐々木洋征<sup>A)</sup>, 佐藤康太郎<sup>A)</sup>,  
高木宏之<sup>A)</sup>, 谷本育律<sup>A)</sup>, 多和田正文<sup>A)</sup>, 外川 学<sup>A)</sup>, 内藤大地<sup>A)</sup>, 中村 勇<sup>A)</sup>, 中村典雄<sup>A)</sup>, 長橋進也<sup>A)</sup>,  
野上隆史<sup>A)</sup>, 花垣和則<sup>A)</sup>, 幅 淳二<sup>A)</sup>, 満田史織<sup>A)</sup>, 森 隆志<sup>A)</sup>, 山本尚人<sup>A)</sup>, 小田川高大<sup>B)</sup>, 中家 剛<sup>B)</sup>,  
前田順平<sup>C)</sup>, 飯嶋 徹<sup>D)</sup>, 鷺見一路<sup>D)</sup>, 前田朱音<sup>D)</sup>

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

<sup>A)</sup> High Energy Accelerator Research Organization (KEK), <sup>B)</sup> Kyoto University,

<sup>C)</sup> Kobe University, <sup>D)</sup> Nagoya University

#### Abstract

We are planning to construct a test beamline for the detector development that will provide GeV-order electrons at the PF-AR: a high energy synchrotron radiation source of KEK. The PF-AR is being operated at 6.5 GeV or 5 GeV using the top-up injection to maintain a stored current of 50 mA at the single-bunch mode, and the total annual operation time is 2500 to 3000 hours. A target wire will be inserted in the beam-halo of stored bunch, and  $\gamma$  rays produced by the target are converted into electron-positron pairs by a copper converter placed at the end of the ring bending magnet chamber. The test beamline has a simple configuration of about 20 m in length, consisting of one bending magnet for energy selection and seven quadrupole magnets for beam convergence. We aim a stable and simultaneous use of the test beamline with the synchrotron radiation experiment. We have confirmed that a sufficient rate of electrons are supplied to the test beamline while keeping a small loss-rate of the stored beam at the target wire. The test beamline is scheduled to be available in the fall of 2021.

#### 1. はじめに

素粒子物理学実験の研究活動において測定器開発は重要な役割を担っており、開発段階での粒子線を使ったビームテストは必要不可欠である。KEKB 加速器に併設されていた富士テストビームライン [1] が SuperKEKB のへのアップグレードにともなって休止されたこともあり、国内でビームテストを実施できる施設がとも少なく、GeV オーダーのテストビームラインの建設が待望されていた。

KEK 内では複数のテストビームライン計画案が検討されてきたが、高エネルギー放射光源加速器である PF-AR にテストビームラインを建設することが 2020 年に決定され、2021 年秋以降のビーム供用開始を目指して設計と製造を進めており、現在蓄積リングの改造とビームラインの設置が進行中である。

PF-AR でのテストビームライン企画の立案は 2014 年ごろから行われていた。一方で PF-AR では 2018 年に LINAC からの直接入射路 [2] が完成したことで 6.5 GeV でのフルエネルギー入射が可能となり、トップアップ入射で定電流を維持しながら放射光実験を行えるようになった。また運転経費削減の中で、運転コストに大きな割合を占める電気消費量を抑制して放射光実験時間を延長することを目的として、2019 年よりユーザータイムの

約半分を、蓄積エネルギーを 5 GeV に下げて運転するようになった。低エネルギー運転モードの導入も功を奏して、ここ 2 年間は年間のユーザータイムとして約 2100 時間以上が確保されている。

このような運転状況の中で、PF-AR テストビームライン計画は放射光実験の安定性を損なうことなく、放射光実験と同時並行で十分なカウントレートのテストビームの利用を可能とすることを目指して仕様を策定してきた。

本論文では、PF-AR テストのビームライン計画の概要と建設の進捗状況を述べるとともに、放射光実験との同時利用、安定運用に向けた加速器運転の課題とその取り組みについて報告する。

#### 2. テストビームラインの概要

PF-AR は北東部と北西部の放射光実験フロアと北実験棟に合計 8 本の放射光ビームラインを備えている。一方で加速器の南側半分には放射光ビームラインは設置されておらず、PF-AR テストビームラインは AR 南実験棟の空きスペースを有効利用して建設される。

Figure 1 に加速器トンネル内の蓄積リングのテストビーム発生源付近と、そこから AR 南実験棟へコンクリートシールドを貫通して延びるテストビームラインの電磁石配置を示す。AR 南実験棟には Fig. 2 の写真に示したように中 2 階のステージがあらたに建設され、収束電磁石の設置や実験室整備の準備が進められている。

<sup>#</sup> tohru.honda@kek.jp

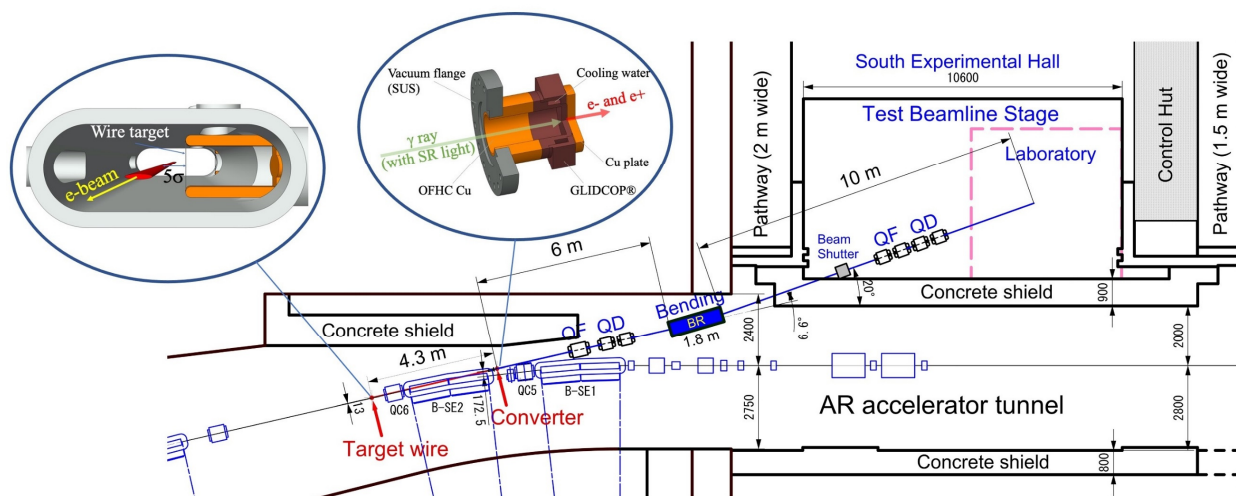


Figure 1: Overall layout of the PF-AR test beamline and perspective views of the wire target and the copper converter.

テストビームの発生は、蓄積ビームのハロー部に挿入してγ線を発生させるワイヤーターゲットと、γ線を電子・陽電子対に変換する銅製のコンバータから構成される。

ワイヤーターゲットはB-SE2の偏向電磁石の上流の短直線部に置く。この短直線部は、2018年の直接入射路建設以前は入射点として利用されており、セプタム電磁石が設置されていた。2018年に入射点が蓄積リングの南西部に移設されたことに伴って、セプタム電磁石が撤去され、この短直線部にテストビームラインのターゲットを設置することが可能となった。

テストビームラインは電子のエネルギーを選択する6.6°偏向電磁石(BR)一台と、収束(四極)電磁石7台で構成されている。テストビームラインはPF-AR加速器のビームラインと同一の高さに配置され、全長約18mでロスが少ない高スループットのビーム輸送を目指して光学設計がされている。テストビームラインの電磁石内には真空ビームダクトは設置されず、銅製コンバータで発生した高エネルギーの電子は大気中でビームテストエリアまで輸送される。

AR南実験棟内の中2階のステージでは、2021年7月現在、コンクリートシールドにテストビーム貫通孔とケーブル貫通孔のコア抜き工事を終え、ステージ上に収

束電磁石設置用の罫書きを完了し、引き続いてテストビームのユーザーエリアを囲うフェンスやビームシャッターの整備を進めていく段階である。

### 3. ターゲットワイヤーとコンバータ

Figure 3にテストビーム発生源となる偏向電磁石B-SE2付近の蓄積リング電磁石と、今回新たに製造した蓄積リングのビームダクトの図を示す。蓄積リングの電子は図中を左から右へ向かって進行しB-SE2の中で曲率半径23.7mの円軌道を描いて6.4°偏向される。ターゲットワイヤー挿入部より上流、また四極電磁石QC5より下流のビームダクトは図示を省略した。

ターゲットワイヤーは四極電磁石QC6の磁極端より約300mm上流に設置される。またその150mm上流に予備として2本目のターゲットワイヤーを用意している。

ターゲットワイヤーは、その挿入によって損失をする蓄積電子のレートが、蓄積寿命 $\tau = 20$ hと同等となる位置まで挿入することを想定している。

PF-ARは常時シングルバンチ運転で最大蓄積電流値60mAで運転している。周回周波数は794kHzであり、バンチ電荷は $7.6 \times 10^{-8}$ C、ひとつのバンチに存在する電子の数は $N_e = 4.7 \times 10^{11}$ 個である。一方でターゲット挿入によって損失が許容される電子数、すなわち $\tau = 20$ hに相当する電子損失レートは、

$$\frac{dN}{dt} = \frac{1}{\tau} N_e = 6.5 \times 10^6 \text{ electorns/s}$$

で与えられる。

ここでターゲットワイヤーとして直径0.1mmのカーボンファイバー(密度2g/cm<sup>3</sup>)を仮定すると、粒子反シミュレータGEANT4による解析で、発生するγ線のエネルギー分布はFig.4のように計算される。発生するγ線のエネルギーがターゲットワイヤーを通過する電子が失うエネルギーと考える。またPF-ARのエネルギーアパーチャーは約0.9%、蓄積エネルギー5GeVに対しては45MeVである。Figure4のエネルギー分布を用いてエネルギーアパーチャーである45MeV以上のエネルギー損失が発生する割合を計算すると0.26%となる。したがって、

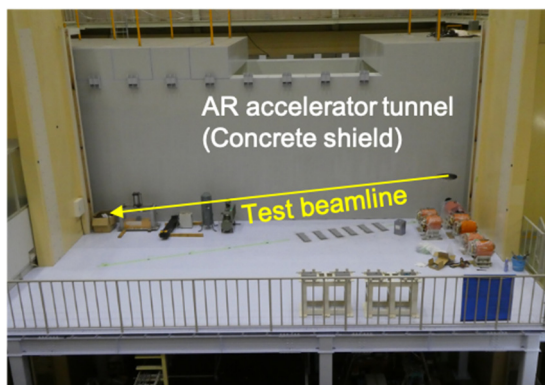


Figure 2: Test beamline stage under construction at the PF-AR south experimental hall.

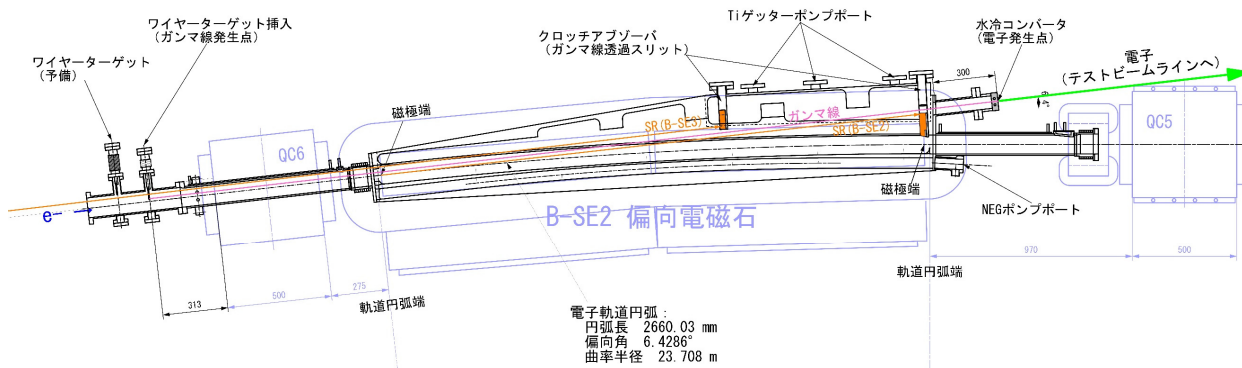


Figure 3: Configuration of the beam generation system for the PF-AR test beamline.

ビームハローに置いたカーボンワイヤーに入射することが許容される電子数は  $N_{inc} = 2.5 \times 10^9$  electrons/s と想定される。Fig. 4 は蓄積エネルギー5 GeV に対する解析であるが、蓄積エネルギー6.5 GeV の場合もエネルギーアップチャーを逸脱する電子数の割合は全く同等であることが示される。

ターゲットワイヤー挿入地点の 6.5 GeV における蓄積ビームサイズは、水平が 2.6 mm、垂直が 0.1 mm である。蓄積ビームの電子バンチの拡がりとして  $\sigma = 2.6$  mm の一次元正規分布を仮定すると、直径 0.1 mm の円形断面のカーボンワイヤーに  $N_{inc} = 2.5 \times 10^9$  electrons/s の電子が入射するのは、ワイヤーを軌道中心から約 14.0 mm =  $5.4\sigma$  に置いた場合である。5 GeV の場合はエミッタンスが小さくなるので水平ビームサイズが  $\sigma = 2.0$  mm となり、ワイヤーの挿入位置は  $5.4\sigma = 10.8$  mm となると想定される。

実際はカーボンファイバーの材質として直径 0.1 mm の CNT ヤーン (carbon nano tube の撚糸) と厚さ 40  $\mu\text{m}$  のグラフェンシートを採用することとした。CNT ヤーンは密度が 0.6~1.4 g/cm<sup>3</sup>、グラフェンシートは同じく 2.0 g/cm<sup>3</sup> とされており、一般的なグラファイトに比べて幾分か小さいの値となっている。またグラフェンシートは細く裁断すると引張り強度が不足して保持具への設置が困難であったので幅 1 mm × 厚さ 40  $\mu\text{m}$  の短冊状として、ビーム進行方向に平行に設置することとした。カーボン材料の密度と断面積が異なれば、それによって 0.9% のエネルギー

損失が発生する割合が異なってくるので、ターゲットの物質質量が小さい場合は中心軌道に近づけ、ターゲットの物質質量が大きい場合には中心軌道から遠ざけて、ターゲット挿入による電子損失レートが想定した蓄積寿命  $\tau = 20$  h 相当になるように調整することになる。

ターゲットワイヤーで発生した  $\gamma$  線は偏向電磁石 B-SE2 の中をまっすぐに通し、偏向電磁石ビームダクトの  $\gamma$  線取出しポートに接続した銅製コンバータで電子・陽電子対に変換される。偏向電磁石ビームダクトは放射光を吸収するクロッチアップゾーナを 2 本備えており、上流側のアップゾーナは主として一つ上流の偏向電磁石 B-SE3 で発生した放射光を、下流のアップゾーナは B-SE2 自身で発生する放射光を吸収する。また下流アップゾーナにはターゲットワイヤーで発生した  $\gamma$  線を通わせるスリットがあり、このスリットを抜けて  $\gamma$  線と同時に B-SE3 からの放射光がコンバータに照射する。この放射光照射の熱量 (最大 130 W) を冷却するために、銅製コンバータには冷却水パスを通してある。

Figure 5 に銅製コンバータの電子変換率の厚さ依存性のプロットを示す。これも Fig. 4 と同様に蓄積エネルギー5 GeV の場合の計算である。電子ビームの運動量 1 GeV/c において電子の発生率が最大となる 16 mm をコンバータの厚さとして採用している。

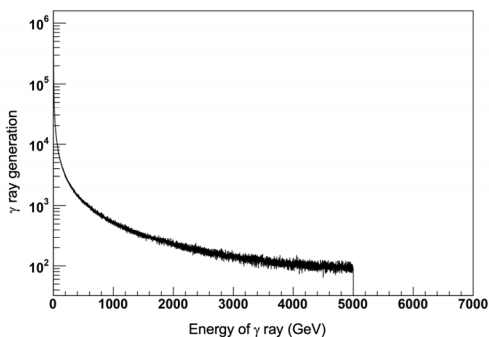


Figure 4:  $\gamma$  ray generation rate of 0.1-mm diameter carbon wire when 5-GeV electrons injecting at a rate of  $1 \times 10^9$  /s.

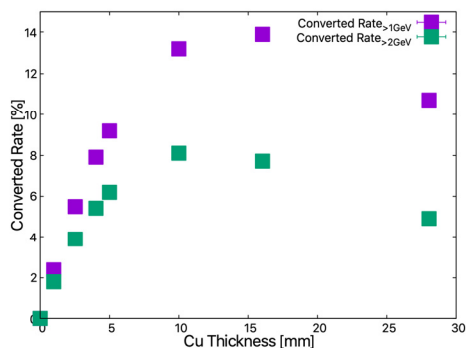


Figure 5: Thickness dependence of the conversion rate of the Cu converter.



#### 4. テストビームラインの性能予測

テストビームラインの光学関数は Fig. 5 に示すとおりである。Figure 6 にテストビーム実験エリアでの運動量 2.0 GeV/c の電子ビームのプロファイルを示す。左上が水平方向、右上が垂直方向のビームレートの位置依存性である。左下は水平方向の位置に対する運動量変位 ( $z' = \Delta p / p_0$ ), 右下が  $x, y$  平面でのビームプロファイルである。そして Fig. 7 に蓄積エネルギーが 6.5 GeV と 5 GeV のときにそれぞれ得られるテストビームのカウントレートのビームトラッキングによる評価結果を示す。

運動量 2GeV/c のとき、テストビームの空間的な広がりは水平方向に±10 mm 程度、垂直方向に±2 mm 程度の範囲にまとまり、また 2 GeV/c をピークに広い運動量レンジにわたって数千カウント以上のテストビームが供給されることが予測され、テストビームラインとして十分な機能を果たすことが期待される。

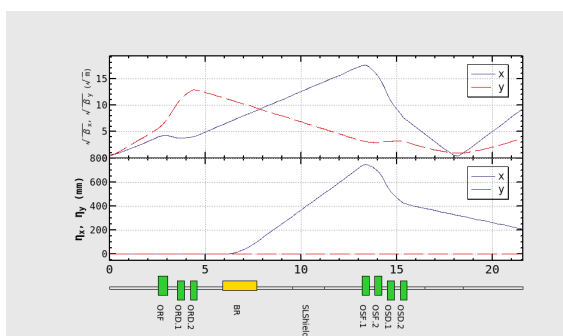


Figure 5: Beta function and energy dispersion function of the PF-AR test beamline.

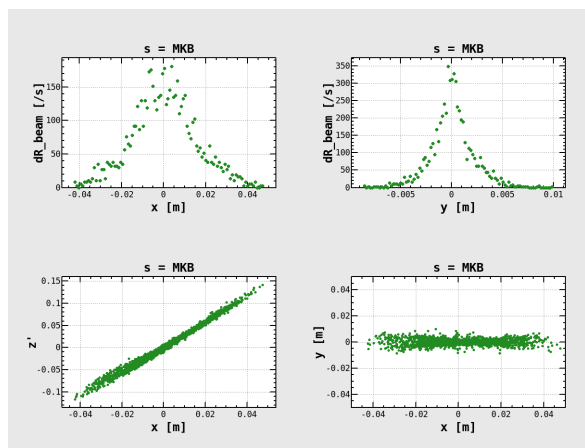


Figure 6: Beam profile of the test beam.

#### 5. 安定運用に向けた加速器の課題

3 章で述べたように、ターゲットワイヤーを挿入したときに蓄積電子ビームの損失レートが蓄積寿命 20 時間に相当する分だけ増加することを想定している。6.5 GeV 運転での典型的な蓄積寿命は約 20 時間であるが、ターゲットを挿入したときはビーム損失が 2 倍となり蓄積寿命は 10 時間に短縮することになる。5 GeV の低エネルギー運転では蓄積寿命も短く、仮に 10 時間の寿命で運転さ

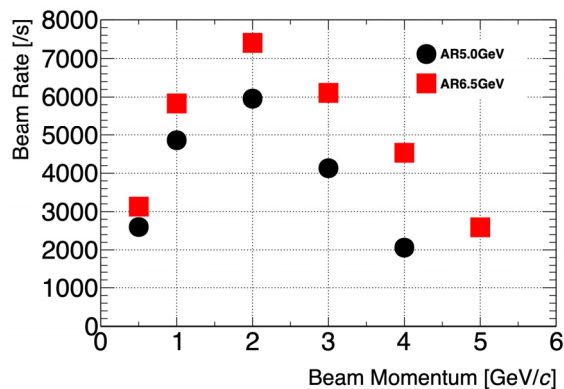


Figure 7: Momentum dependence of the beam rate of the PF-AT test beamline.

れていたとすると、ターゲットを挿入したときの蓄積寿命は 6.7 時間となる。蓄積寿命が安定していれば、この寿命低下分をトップアップ入射で補い定電流を維持することは容易である。

ターゲットワイヤーの挿入位置は 10  $\mu\text{m}$  以内の再現性をもってコントロールする仕様であるが、ワイヤーの位置が固定されていても、ビーム軌道やビームプロファイルにゆらぎがあれば蓄積寿命が大きく変動することも考えられる。テストビームラインの運用試験ではターゲットワイヤー挿入位置と蓄積寿命変動の相関を注意深く観測し、将来的に必要なならばワイヤーの挿入深さにフィードバックをかけて蓄積寿命の安定化をはかるつもりである。

また PF-AR は蓄積寿命の変動が起こりやすいリングであり、ダストトラッピング[3]に起因する寿命の急落が観測されることもある。もしターゲットワイヤーの挿入によって蓄積寿命が不安定になり、極端に寿命が短くなることが頻発すると放射光実験への影響も無視できなくなる。ダストトラッピングは新規のビームダクト設置後に頻発する傾向もあり、加速器真空の焼き出しとコンディショニングを進めるとともに、特に寿命変動の動向を注視していく必要がある。

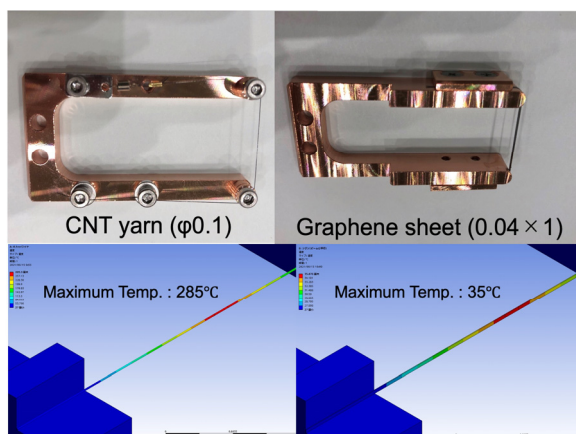


Figure 8: Photographs of the target wire retainers and wire temperature analysis. Left: CNT yarn. Right: Graphene sheet.

4章で述べたようにターゲットワイヤーの材質としては元々カーボンファイバーを想定していたが、今回はCNTヤーンとグラフェンシートを採用することとした。

両材質とも製作上において樹脂等の高分子材料は一切用いられておらず、純粋にカーボンのみでつくられている。Figure 8 の上半分にCNTヤーンとグラフェンシートをそれぞれの保持具に取り付けた写真を示す。

Figure 3 に示したようにターゲットワイヤーは蓄積リングの電子軌道に対して外側から挿入するため、使用時には放射光の照射を受けることになる。直径0.1 mmのターゲットの場合、流入する熱量は1 W程度である。

ターゲットワイヤーの候補としては高融点金属の採用も考えられたが、例えばタングステンが高エネルギーエックス線の放射光の吸収率が80%程度と高く、ワイヤーが細いため伝導による冷却が有効に働かない場合を仮定すると、高々1Wの放射光照射でも最高温度が1400°C程度まで上昇することも予想された。

一方でカーボン系の材質であるCNTヤーンやグラフェンシートは放射光の吸収率が5%程度と低く、最高温度はCNTヤーンが約300°C、グラフェンシートが約35°Cと推定されている。特にグラフェンシートは面内の熱伝導率が銅の約4倍の1500 W/(m K)であることが効いて、温度上昇が10°C程度におさまることが期待される。

ターゲットワイヤーとその保持具はPF-ARの周回周波数794 Hzで、76 nCの大電荷を持つバンチに近接し、高周波の電磁波にさらされることになる。電磁場解析コードCSTを用いて、モデル化したワイヤーターゲット挿入機構とそのビームダクトについてWake impedanceの解析を行ったところ、Fig. 9に示すように2250 MHz付近と3500 MHz付近に共鳴があることが予測された。Figure 9はターゲットワイヤーを軌道中心から10 mmまで近づけたときの解析結果である。

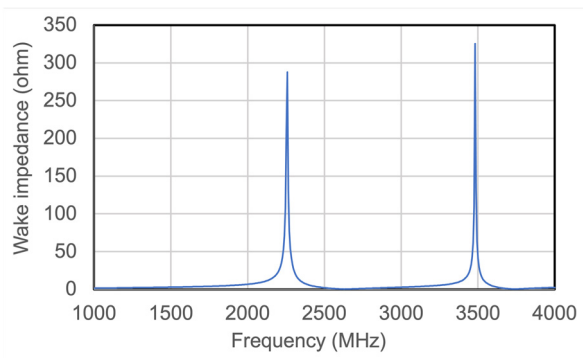


Figure 9: Wake impedance analysis of the target wire insertion mechanism and its beam duct.

シミュレーションで得られる磁場分布はワイヤー保持具の上下面とビームダクトの約2 mmの隙間に集中する傾向がみられた。保持具表面に発生する磁場強度から見積もられる発熱量は数十 W未満であった。ターゲットワイヤー挿入機構の心棒は銅合金(クロム銅)で製作し、同軸上の水冷パスを設けている。Wake impedanceに由る発熱は十分に冷却が可能と推測している。

また同じくワイヤー保持具の上下面とビームダクトのすき間に発生する電場でMultipacting放電が発生する可

能性を検討したところ、蓄積電流値やワイヤー挿入位置の兼ね合いによってはMultipacting放電の条件を満たす可能性も指摘された。当初ワイヤー保持具の材質はアルミ合金製を考えていたが、アルミ合金表面は二次電子放出係数が高くなりやすく、その結果Multipacting放電発生の可能性が高くなることを忌避して、銅合金(クロム銅)製に設計変更をした。

Multipacting放電は比較的穏やかな放電で、放電が発生した場合連続した発光と真空圧力の上昇が予測される。実際にはターゲットワイヤーや保持具の微小な突起に由来するフィールドエミッションや、それに伴うアーク放電のような現象も発生する可能性も考えられ、またこのような放電がワイヤーの切断や損傷を招く可能性もある。ワイヤー挿入機構を設置するビームダクトには、ワイヤーをカメラで常時観測するビューポートを取り付けてあり、放電現象の発生に備えて画像を記録する予定である。

ターゲットワイヤーは蓄積ビーム軌道からは $5\sigma = 13$  mm離れているが、PF-ARの入射ビームはその減衰時間である約2.5 msの間、最大16 mmの振幅で水平に振動している。したがって振動が減衰をするまでに入射ビームはターゲットワイヤーに何度か衝突することになる。ターゲットワイヤーが十分細いので相互作用をする電子数が限られること、相互作用をしても電子がエネルギーを損失して失われる確率が低いことから、入射効率には大きな影響を与えないと推定しているが、テストビームライン試験運転時には入射効率に与える影響を検証するとともに、ビームトラッキングを用いた検討も行っている。

## 6. まとめ

素粒子物理学実験にとって必要不可欠なテストビームラインを高エネルギー放射光源加速器PF-ARに建設している。放射光実験とテストビームラインの安定的な同時並行運用が可能となるように企画をしている。2020年からビームラインの仕様策定と製造を始め、2021年には加速器の改造とビームラインの設置を進めている。2021年秋以降のテストビームラインの試験運転、供用開始を予定している。

## 参考文献

- [1] J. Haba and A. Morita, J. Particle Accelerator Society of Japan, 4 (2007), pp. 59-63.
- [2] N. Hgashi *et al.*, J. Particle Accelerator Society of Japan, 14 (2017), pp. 134-141.
- [3] Y. Tanimoto *et al.*, Phys. Rev. Accel. Beams, 12 (2009) 110702.