

# PF-ARテストビームライン建設計画

KEK 素粒子原子核研究所

花垣 和則

kazunori.hanagaki@kek.jp

2020年7月31日

## 1 はじめに

最近、測定器開発について説明をするときに、理論物理学者のフリーマン・ダイソンの言葉をよく引用している。

New directions in science are launched by new tools much more often than by new concepts. The effect of a concept-driven revolution is to explain old things in new ways. The effect of a tool-driven revolution is to discover new things that have to be explained.

この言葉がどれくらい正しいかはわからないが、素粒子物理学実験では、研究活動に占める測定器開発の割合が大きいのは確かだと思う。近年の大型計画では、計画立案から実現までに10年を超える歳月を要し、最先端技術を用いた新たな測定装置を開発することが珍しくない。既存の技術を使うにしても、それぞれの実験で使う測定装置は(たぶん)すべて自前で製作するので、いずれの場合も開発段階で粒子線を使ったビームテストが必要になる。

一方で、日本国内にはビームテストを実施できる施設が少なく、欧州のCERN、米国のFermilabとならび、素粒子原子核物理学研究の世界三大拠点を負担するKEKにとって、GeVオーダーのテストビームラインの保有はかねてからの悲願であった。コミュニティからもテストビームライン建設の要望は根強く、かく言う私もことあるごとに「テストビームラインが欲しい」と言い続けていた。

今年度、その要望がようやく届き、2020年と21年の2カ年計画で、KEKのつくばキャンパスPhoton Factory Advanced Ring (PF-AR) 南実験棟に電子ビームを取り出すテストビームラインを建設することになった。本稿では、その計画概要と進捗状況をお伝えする。

## 2 概要

PF-ARは、直径約120mの電子ビーム蓄積リングで、現在は物性研究のための放射光源として使用されている。電子のエネルギーは6.5 GeVで、物性研究としては利用するX線のエネルギーが高いことに特徴がある。また、単バンチ大電流であることも特徴で、ビーム電流は50~65 mA程度、周期は1.3  $\mu$ sである。エネルギーについては、運転経費(電気代)節約のために、最近では5 GeVで運転することも多い。図1に示すように、PF-ARは富士実験棟近くにあり、その北側には3つの建屋に合計8本の放射光ビームラインが存在する。



図1: PF-ARと南実験棟の位置。図中、上が北。

物質構造科学研究所放射光実験施設(PF)と加速器研究施設第六研究系にご理解いただき、テストビームライン建設を許可していただいたのは、ビームラインの作られていない南実験棟である。建屋に南側から入ったときの様子を図2に示す。正面に見える壁は歴史的遺物のビームシールドで、この原稿を執筆している数日前に、撤去作業を行った。その向こうに蓄積ビームのトンネルがあり、電子ビームは写真中、右から左に回っている。図2中には、取り出すビームのイメージもいい加減に記

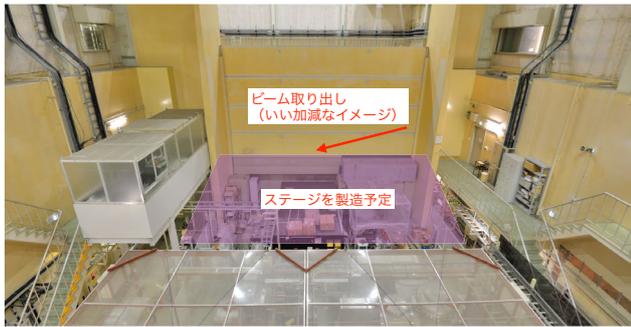


図 2: PF-AR 南実験棟内部の様子。

入してある。現在は何もないが、正面の壁手前に鉄骨でビームステージを作り、その上でユーザーがビームテストを行えるようにする。

図 3 は、蓄積電子ビームトンネル内の様子で、写真中央に写っているのは蓄積電子ビーム偏向用の電磁石である。予定では、この電磁石の上流に、電子ビームのハローを削るように、ビーム中心から離れた位置にワイヤー標的を入れ、ガンマ線を生成させる。そのガンマ線をコンバータに入射させて電子・陽電子対を生成、その後、ビーム収束用の四重極電磁石と、特定の運動量を持った電子だけを取り出すための双極電磁石の組み合わせにより、ビームテストに使用する電子ビームを取り出す。

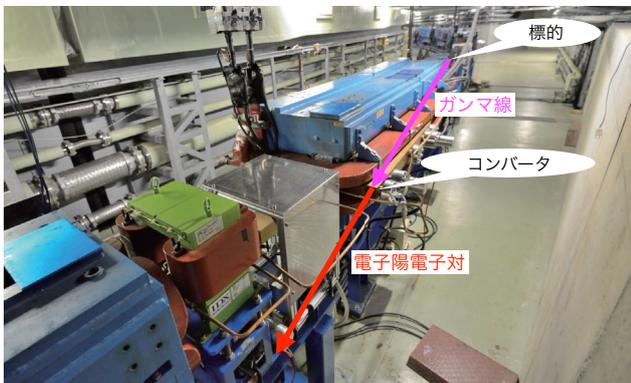


図 3: 蓄積電子ビームトンネル内の現状と、想定しているビーム取り出しイメージ。

### 3 現状

これまでの経緯を知っていたので、今年新たに本計画を KEK に対して予算要求したときは、まさか予算化されるとは思っていなかった。そのため、実際に建設をするための詳細設計はおろか、組織も皆無であった。当初は、予算が付いて夢かと思うくらい喜んだが、実際に作るとなると、どうしたらよいのか途方に暮れた。

そこで、今回の計画のもとになった 2014 年度の予算要求時の検討資料をまずは調べ、当時の首謀者で、現在

は KEK 理事の幅さんや、素核研の宇野さんに相談をして、人集めと根回しを始めた。読者はまったく興味がないと思うが、私にとって今回の計画で最大の難事は、この人集めと、各方面への根回しであった。建設する場所は PF、実際にビームラインを作るには加速器研究施設の人々の協力が不可欠、というより、彼らに動いてもらわなければ何もできないし、原子力規制庁にビームライン申請するには放射線科学センター経由となる。というように、本計画は組織横断的な協力体制がないと全く動かないのである。にもかかわらず、私には、素核研外に知り合いはほとんどいなくて、誰と話をしたらいいのかすらわからないところからこの計画を始めた。

幸いなことに、2014 年当時の話がまだ伝聞されていて、PF と、加速器研究施設第六および第四研究系に協力してもらえることになり、ようやく計画が動き出した。概要で説明したように、蓄積電子ビーム中にワイヤー標的を入れるのだから、それだけを考えても私たちの計画に対する理解がいかに大きいかかわかる。逆に、こちらとしては、蓄積電子ビームの寿命や安定性に影響が出るようなことは決してできない、というのは、今回の計画の肝の一つでもある。

#### 3.1 配置

図 4 に、現在想定している、ビーム取り出し用の電磁石等の配置を示す。電磁石の光学系の最適化を図っていて、また予算の制約もあることから、あくまで現状の想定であることを強調しておく。

図中、QC6 と QC5 は、蓄積電子ビームの収束用電磁石で、B-SE2 と B-SE1 は、偏向用の電磁石である。標的としては、直径  $100 \mu\text{m}$  のカーボンワイヤを現在考えていて、それを QC6 の直上流に入れる。PF-AR はビーム蓄積時に注ぎ足し入射が可能であるが、65 mA 運転時に注ぎ足し入射なしでも、ビームの中心から  $5\sigma$  以上離れた位置であれば、上記の標的を入れても寿命を 20 時間程度に保てるのが計算上わかっている。ただし、ワイヤを入れることで生じるビームの不安定性は懸念されるので、ワイヤの形状や挿入方法などの詳細設計はこれから詰めていかなければならない。また、単純な計算からは、ワイヤの冷却は輻射だけを利用すればよいと考えているが、熱伝導を利用しなくてもよいかどうかは、これまた今後確かめる必要がある。

ワイヤ標的で生成されたガンマ線は、B-SE2 内に位置する真空ビームダクトを通り抜け、現状のビームダクトであれば、最下流の壁に入射する。このビームダクトは新たに建設予定で、ガンマ線が入射する最下流には水冷の銅製コンバータを装着する。このコンバータはガンマ線を電子陽電子対に変換すると同時に、蓄積電子ビーム

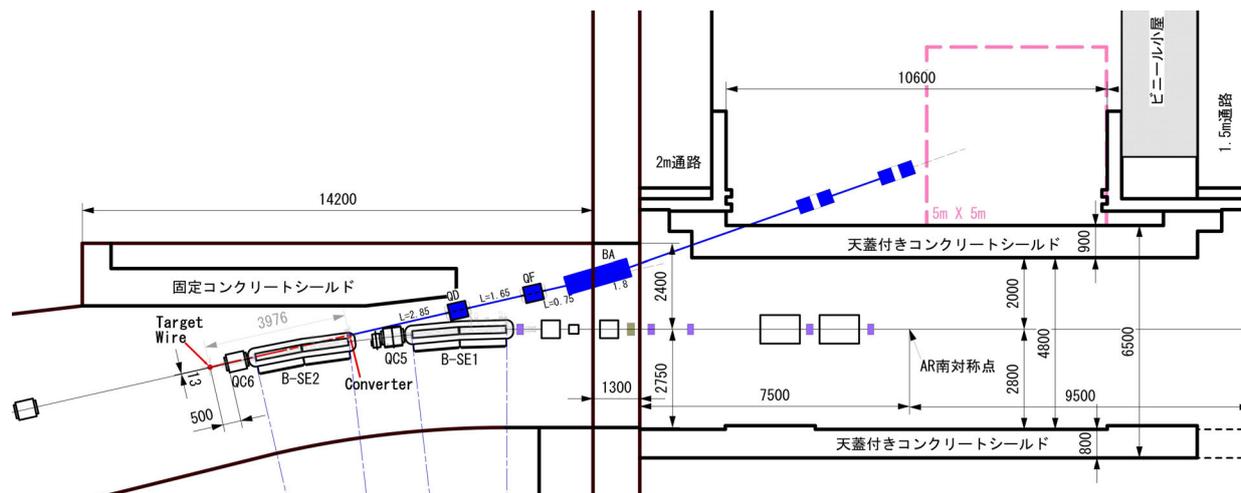


図 4: ビーム取り出し用電磁石の配置。方位が図 1 と反対で，図中下が北。[本田融さん（KEK 加速器研究施設）作成。]

が生成する X 線を遮蔽する役目も担う。

コンバータで生成された電子陽電子対は 2 台の四重極電磁石 QD と QF を通過した後，双極電磁石 BA で特定の運動量を持つ電子だけをビームラインに取り出す。蓄積電子ビーム用トンネルの壁に穴を開け，取り出されたビームは図 2 に示したようにビームステージ上に輸送される。現在，コンバータの厚さと取り出し電磁石群の光学系の最適化を行っているが，予算が許せば，ビームステージ上に 4 台の四重極電磁石を 2 ペアにして配置する。

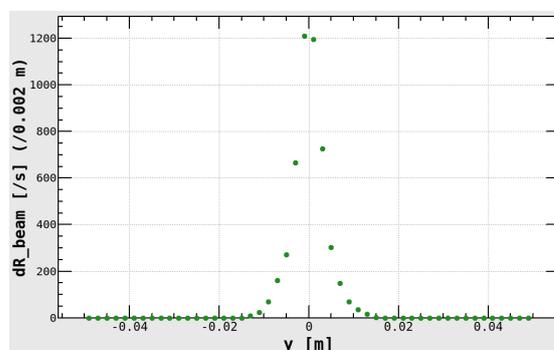


図 6: ビーム取り出し位置での鉛直方向のビームの形。

### 3.2 性能予想

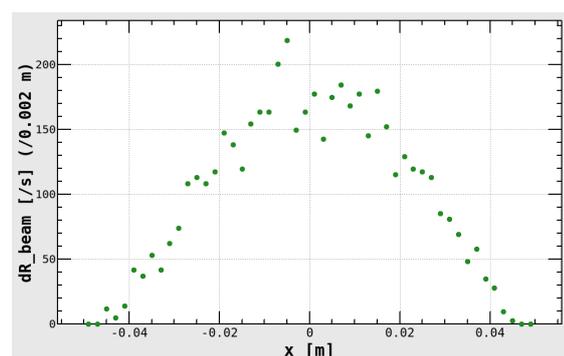


図 5: ビーム取り出し位置での水平方向のビームの形。

繰り返しになるが，このレポート執筆段階ではコンバータの厚さも光学系もまだ確定はしていない。よって，この節では取り出すビームのレートと形を紹介するが，あくまで目安と考えていただきたい。また，図 4 の配置で示された光学系のシミュレーション結果はまだ見せられなくて，ここで見せるものは，下流側の四重極電磁石の配置が図 4 とは異なることを強調しておく。

蓄積電子ビームのエネルギーを 6.5 GeV，コンバータを厚さ 16 mm の銅として，2 GeV のビームを取り出したときの，ビーム取り出し位置でのビームの分布を図 5 と図 6 に示す（本節で示す図 5 から図 8 は，名古屋大の鷺見一路さんと前田朱音さんに作成していただいた）。ここでは，ビーム取り出し位置は，図 4 中の赤点線で囲まれた領域の中心付近としている。縦軸は各ビンでのレートである。双極電磁石で運動量選択を行っているの

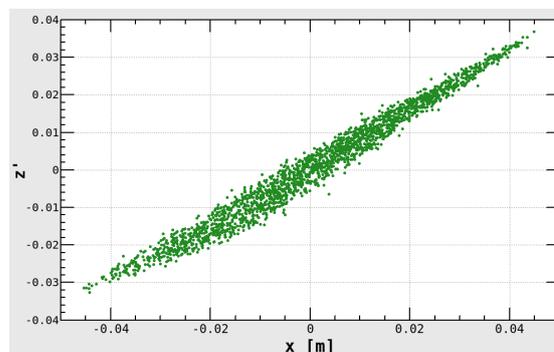


図 7: ビーム運動量とビーム位置との相関。

で， $x$  と運動量には相関がある。光学系を最適化するこ

とで運動量分散をなるべく抑えていて、その様子を図7に示す。縦軸は、ゼロが2 GeVに相当し、2 GeVからどれだけ離れているかの割合を示している。カロリメータの較正などで、よりモノクロマティックな分布が欲しいユーザーは、飛跡検出器でビームの位置をイベントごとに測定し、図7の相関に基づいて運動量を補正するか、カロリメータを用いて  $x$  分布のピーク付近を使うことが考えられる。図5と図7の両方を見れば、運動量分散をどれくらいに抑えたいかによって、どれくらいのレートになるかを推測できる。

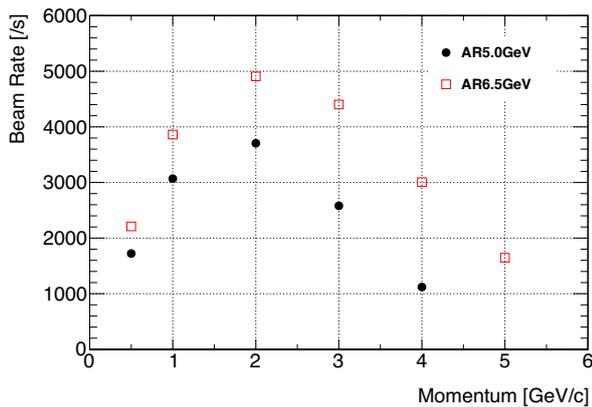


図 8: 取り出す電子ビームレートの運動量依存性。赤四角が蓄積電子ビームが6.5 GeV のとき、黒丸が5 GeV のときに対応している。

ここまで示したビームの形は、蓄積電子ビームが6.5 GeV のときに2 GeV の電子を取り出したときの予想だが、取り出すビームの運動量を変えたときのレート予想を図8に示す。ざっくり言って、kHz オーダーのレートは達成できるかな、というのが現在の感触だ。

### 3.3 進捗状況

前の節で示した通り、これまでのところ、光学系とコンバータの最適化を最優先で実施している。また、建設という意味で一番大きな要素は、B-SE2 電磁石内の曲線部ビームダクトの製造である。その最下流部には水冷のガンマ線コンバータを装着し、内部には放射光を遮蔽するためのアブソーバを取り付ける。これらの詳細設計と調達の準備を現在行っている。順調にいけば、1番の大物であるこのビームダクトは2021年の夏前に納品、夏の加速器シャットダウン時に設置するシナリオを描いている。

ビームダクトの次に大物となるのは、ビーム取り出し用の電磁石関連だが、幸いなことに、図4に記載してある四重極電磁石6個と、双極電磁石はKEKB BTグループからお借りできることになった。これに合わせて

現在調達を急いでいるのが、電源や架台、ケーブルなどの関連物品で、これらは年度内調達を目指している。

インフラ整備も徐々に進んでいる。前述した蓄積ビームトンネル外の不要なシールドの撤去や、ビーム取り出しに際して邪魔になるトンネル内の不要遮蔽物の撤去作業を済ませた。ビームステージ製造のための検討も進めている。ステージ製造時には、足場となる部分を片付けないとわからないが、図2を見てもらうとわかる通り、現在は、加速器グループが使用中で、製造のときは一時退去をしてもらわないとわからない。この交渉がうまく進めば、年度内には製造してしまいたい。

## 4 課題と今後

このテストビームライン計画には専属のスタッフがいるわけではないし、そもそも誰と話をしても「人手不足ですね」と言われる状況なので、鬼が笑う話だが、ビームライン完成後の運用は、ユーザー会を立ち上げて自主運営してもらうことを想定している。また、現段階の作業の中心は加速器関連だが、電磁石の電源のコントロール系や、インターロックなどは、素核研あるいは大学からのユーザー予備軍の人たちが手を出せる内容だ。そこで、ユーザー会を早期に立ち上げたいところなのだが、人が集まることを是としない風潮の昨今、希望者を募るだけ募ったにもかかわらず、未だ何もしていない。ビーム診断などでも活躍を期待しているので、ユーザー会設立は喫緊の課題である。

いずれにせよ、念願のテストビームラインがKEKBに建設できることは非常に喜ばしい。この2年でなんとか完成に漕ぎつけ、PF-ARの新たなビームラインとして物構研との連携を強化しつつ、多くのユーザーが使える施設を目指したい。

## 5 謝辞

本計画は、様々な諸施設関係者の多大なる理解のおかげで成立している。通常は関わりのない人たちが集まって協力して下さることで、どうにかこうにか計画が進んでいる。PF-AR南実験棟には、PFの新たなビームライン建設計画があったことを知り、PFの人たちに対して改めて感謝の意を強くしています。本計画の実働は、本田融さんをはじめとする加速器研究施設第六研究系の方々と、第四系KEKB BTグループの森隆志さんが中心です。まだ完成したわけではなく、計画が始まったばかりで、放射線科学センターその他、さらに多くの方にもこれから協力していただかないとこの計画は進みません。関係者には、改めてお礼を申し上げます。