

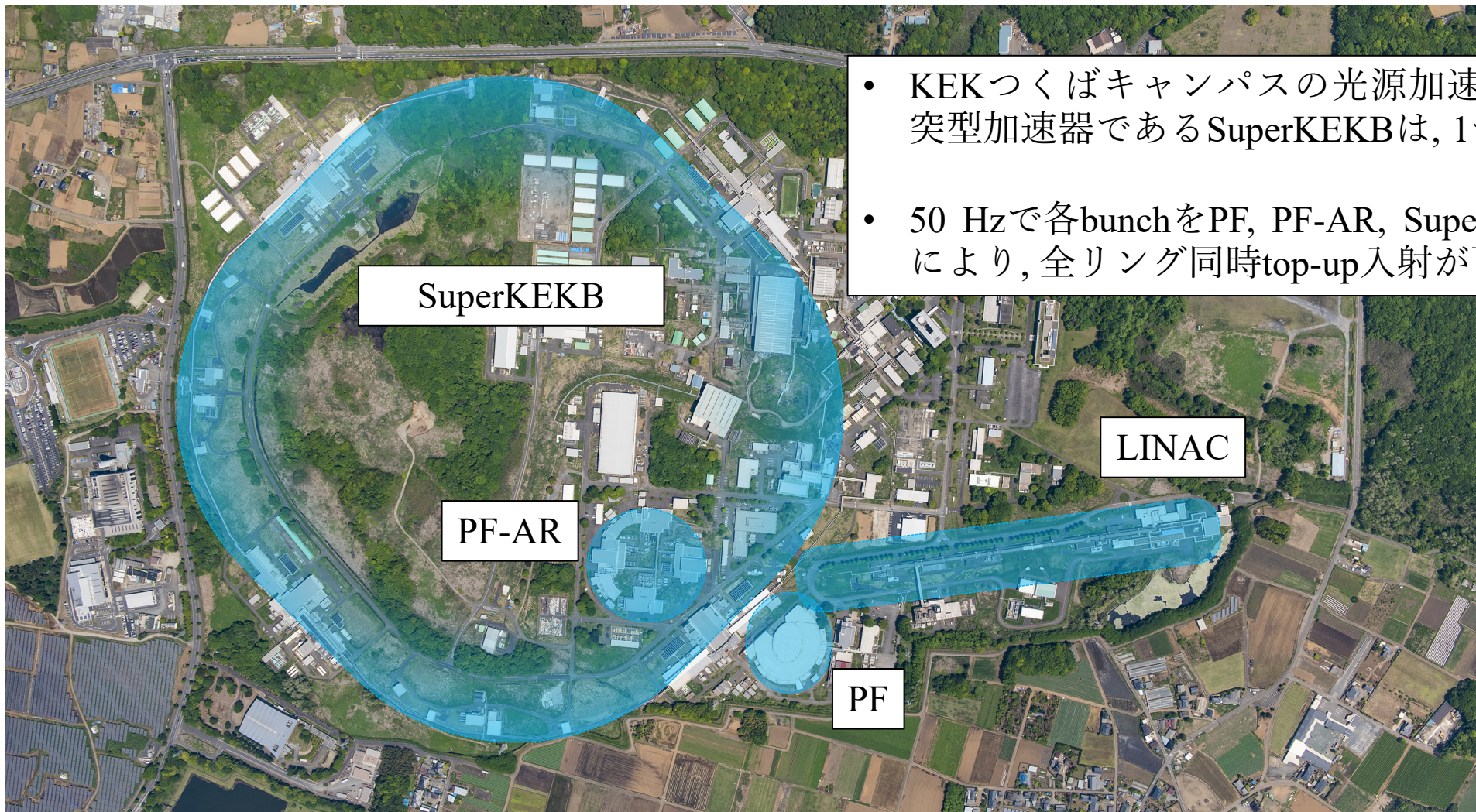
PF-AR 5 GeV運転時における PFとの同時トッパアップ入射の コミッショニング及びユーザー運転への適用

東直, 満田 史織, 長橋 進也, 原田 健太郎, 下崎 義人, 野上 隆史, 内山 隆司,
中村 典雄, 本田 融, 佐藤 政則, 岡安 雄一, 榎本 嘉範, 飯田 直子 (KEK)

2023年8月30日(水) 第20回日本加速器学会年会

1. これまでの経緯

・KEKつくばキャンパスの構成



- KEKつくばキャンパスの光源加速器であるPF, PF-ARと衝突型加速器であるSuperKEKBは、1つの入射器 (Linac)を共有.
- 50 Hzで各bunchをPF, PF-AR, SuperKEKBに振り分けることにより、全リング同時top-up入射が可能となっている.

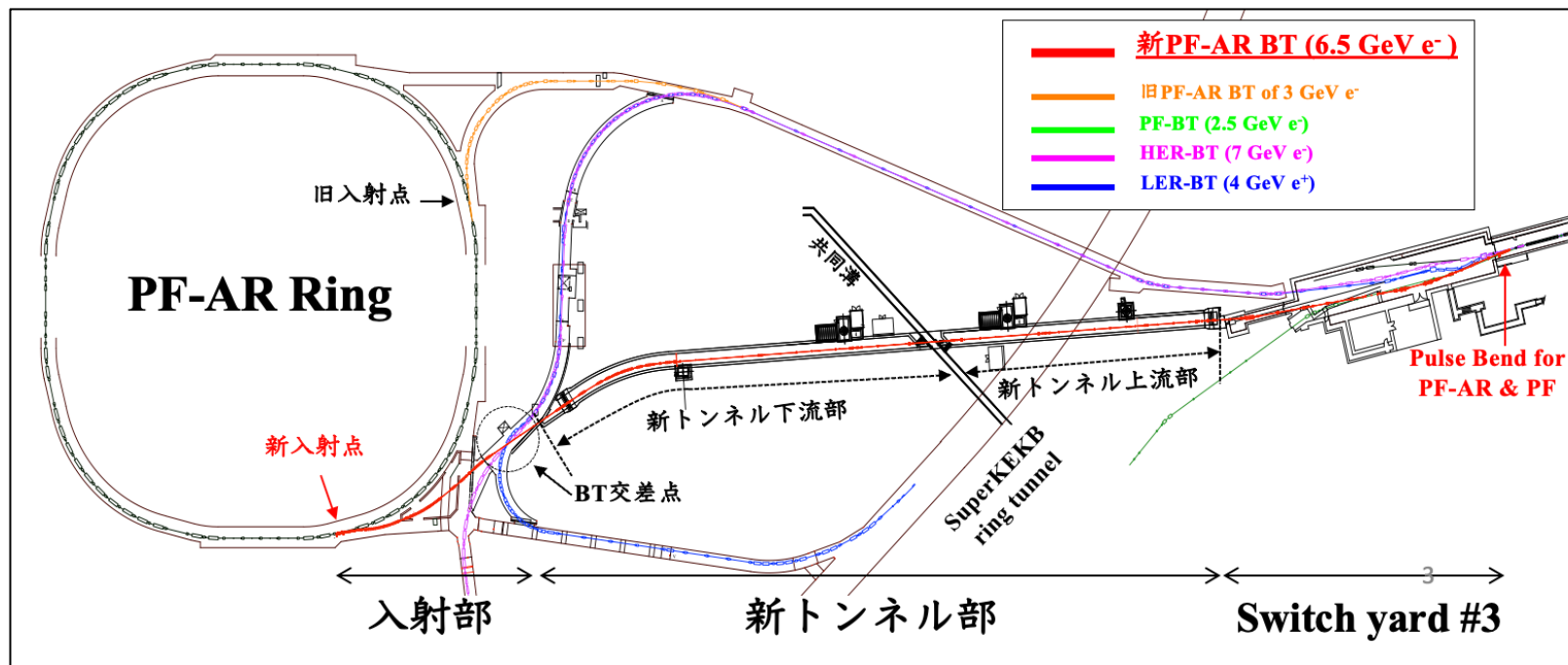
1. これまでの経緯

• SuperKEKB への Upgrade



2016年からKEKBはSuperKEKBとして生まれ変わり、より高いル~~X~~フシティを目指している。

↑ KEKB (HER) -BT と PF-AR BT (ARBT) は一部を共有



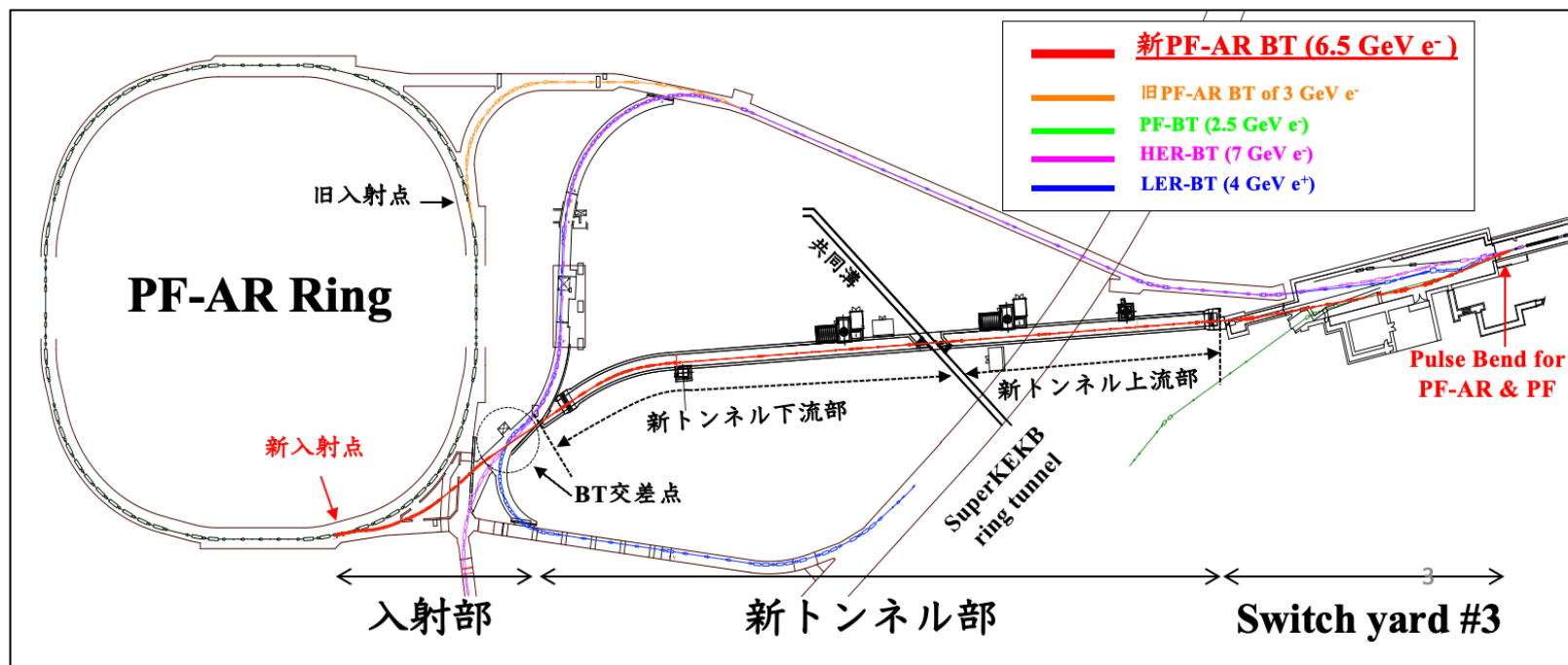
1. これまでの経緯

・ARBTの独立

LinacからPF-ARまでの輸送路 (beam transport line: BT), ARBTを独立させ、これまでの3 GeVではなく、リングのエネルギーと同じ6.5 GeVに設計



PFとPF-ARの同時top-up運転が可能となった[1]



[1] 東直 他, “PF-AR 直接入射路の建設とコミッショニング”, PASJ17, THOL10

1. これまでの経緯



運営費交付金の減少



運転コストの削減

運転コスト ~ 消費電力 × 運転時間



これまではこれで調整してきた。

1. これまでの経緯



PFの2.5 GeVに比べてPF-ARは6.5 GeVと比較的高いエネルギー

$$\frac{P_{5 \text{ GeV}}}{P_{6.5 \text{ GeV}}} \sim \left(\frac{5 \text{ GeV}}{6.5 \text{ GeV}} \right)^2 \sim 59\%$$

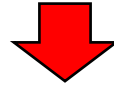
運転コスト \sim 消費電力 \times 運転時間



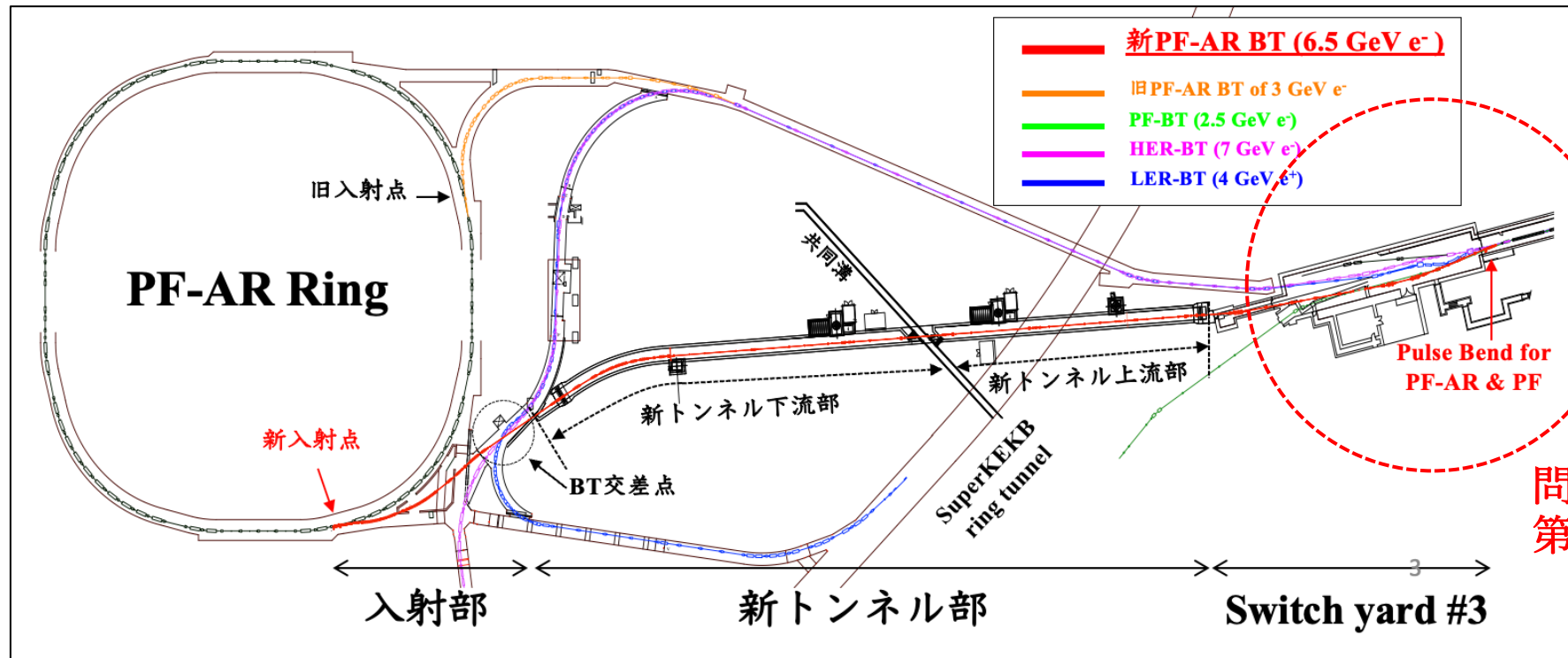
2019年から周回エネルギーをコスト・コントロールのノブとしたユーザー運転が開始された
(これまでの6.5 GeVと5 GeVで運転時間を分け合う)

2. ARBT 5 GeV 運転の課題

2017年から運転が開始された新しいARBTは6.5 GeVの設計で建設された。



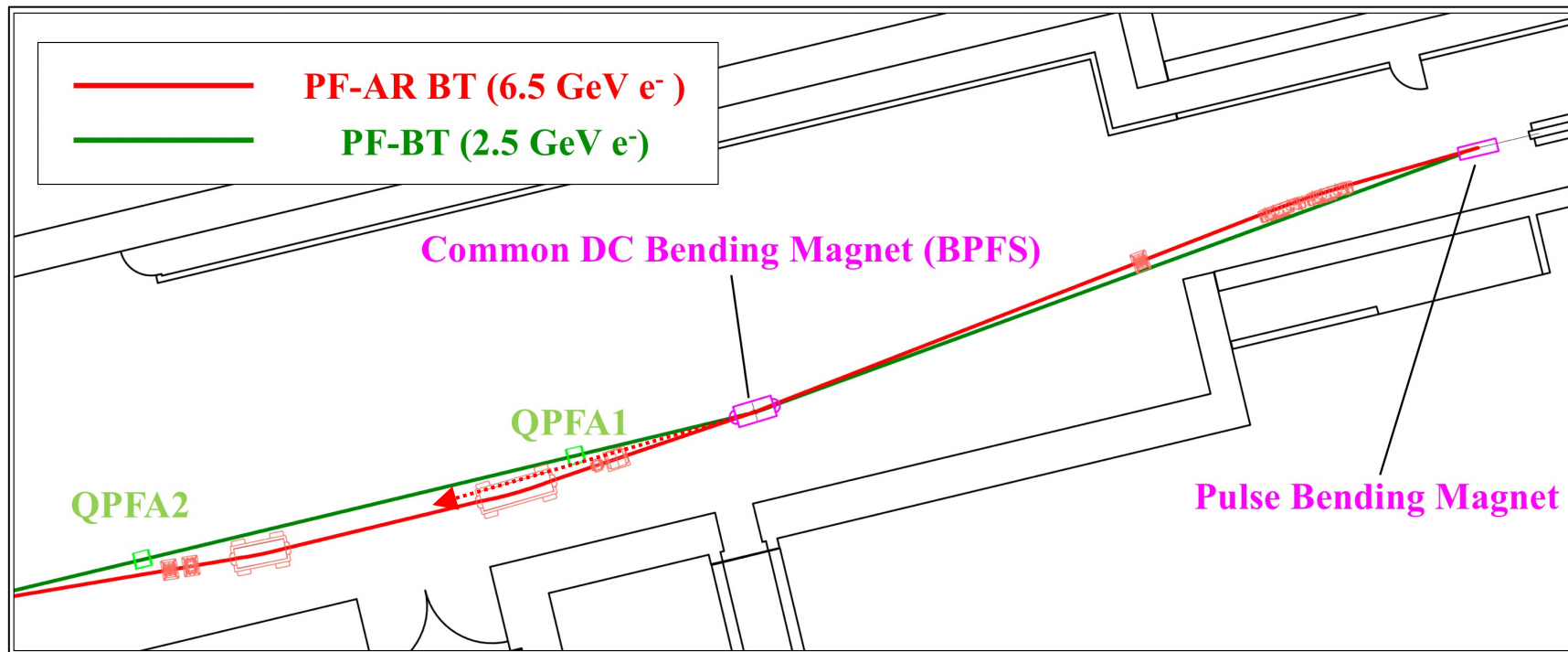
5 GeVというエネルギーでPF/AR同時top-up入射するのは不可能。



2. ARBT 5 GeV 運転の課題

ARBTとPFBTの交差点に共通DC偏向電磁石 (BPFS)が存在

➡ 5 GeVの電子ビームはBPFSを通過すると蹴られ過ぎて設計軌道からズレていく

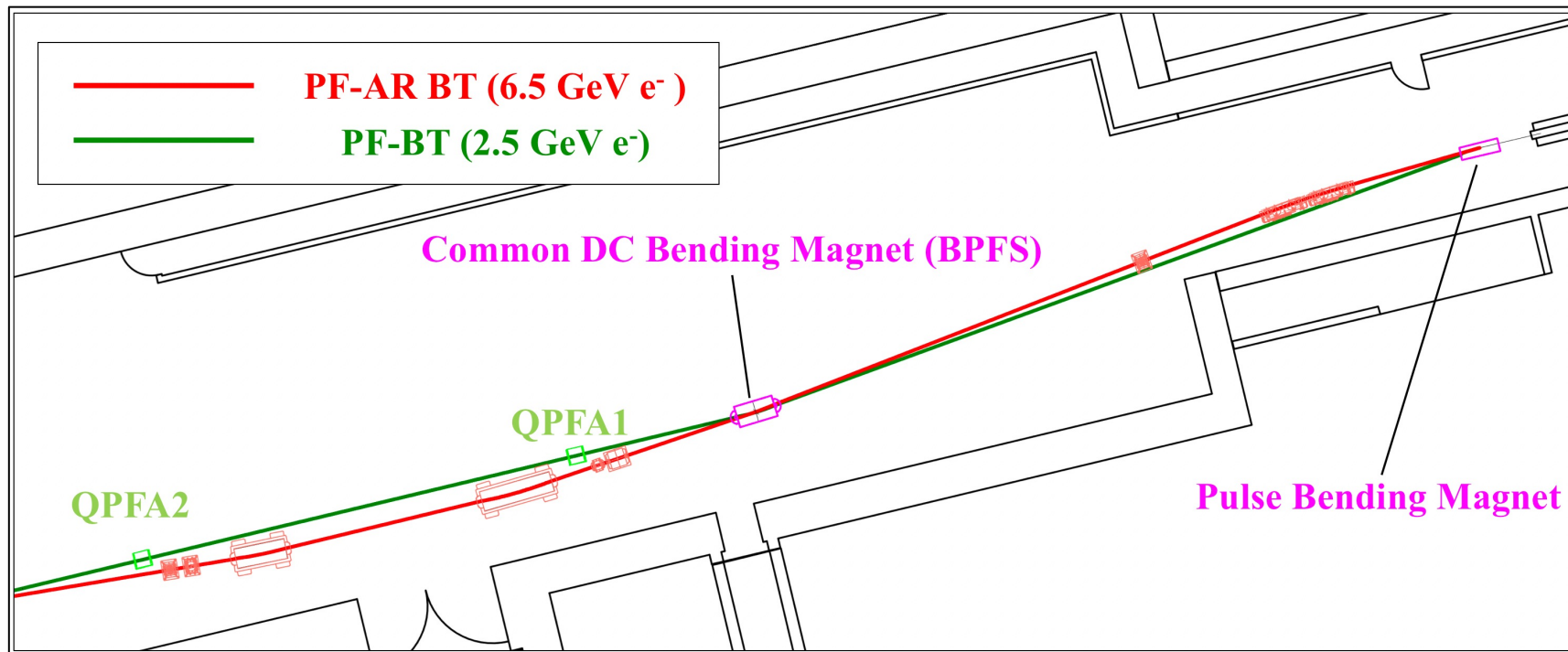


3. 疑似トップアップ運転の採用

PFとPF-ARそれぞれに150秒と90秒の入射時間を与える

➡ PF, PF-ARのそれぞれの入射時に共通DC偏向
電磁石の励磁電流を各エネルギーに合わせる

➡ 疑似トップアップ運転の成立[2]



[2] 長橋進也 他, “PF-ARにおける5 GeV運転の状況”, PASJ2020, THPP63

4. 真トップアップ運転の需要



・運転スケジュールの制限からの開放

multi-bunchとsingle-bunchが共存するPFのHybrid運転下では
ビーム寿命が短く、連続入射(真トップアップ)が要求される

➡ PF Hybrid運転の裏で、PF-ARは6.5 GeV運転を選択せざるを得ないという制限からの開放

・PF-ARテストビームライン^[3]運用に伴う対策

素粒子・原子核実験用検出器開発のためのテストビームラインの運用が開始

➡ ビーム不安定性・ビームロスの発生, ビーム寿命急落時にも柔軟な対応が可能

・low emittance optics採用に伴う対策

高輝度化が望めるPF-AR low emittance化が現在進行中

➡ ビーム不安定性・ビームロスの発生, ビーム寿命急落時にも柔軟な対応が可能

[3] 本田融 他, “PF-AR の測定器開発テストビームライン建設計画”, PASJ2021, MOP049

5. 真トップアップ運転実現のための改造

一昨年度 (2021年度) に予算化され、昨年度 (2022年度) の夏に phase1 の改造工事が実施された。

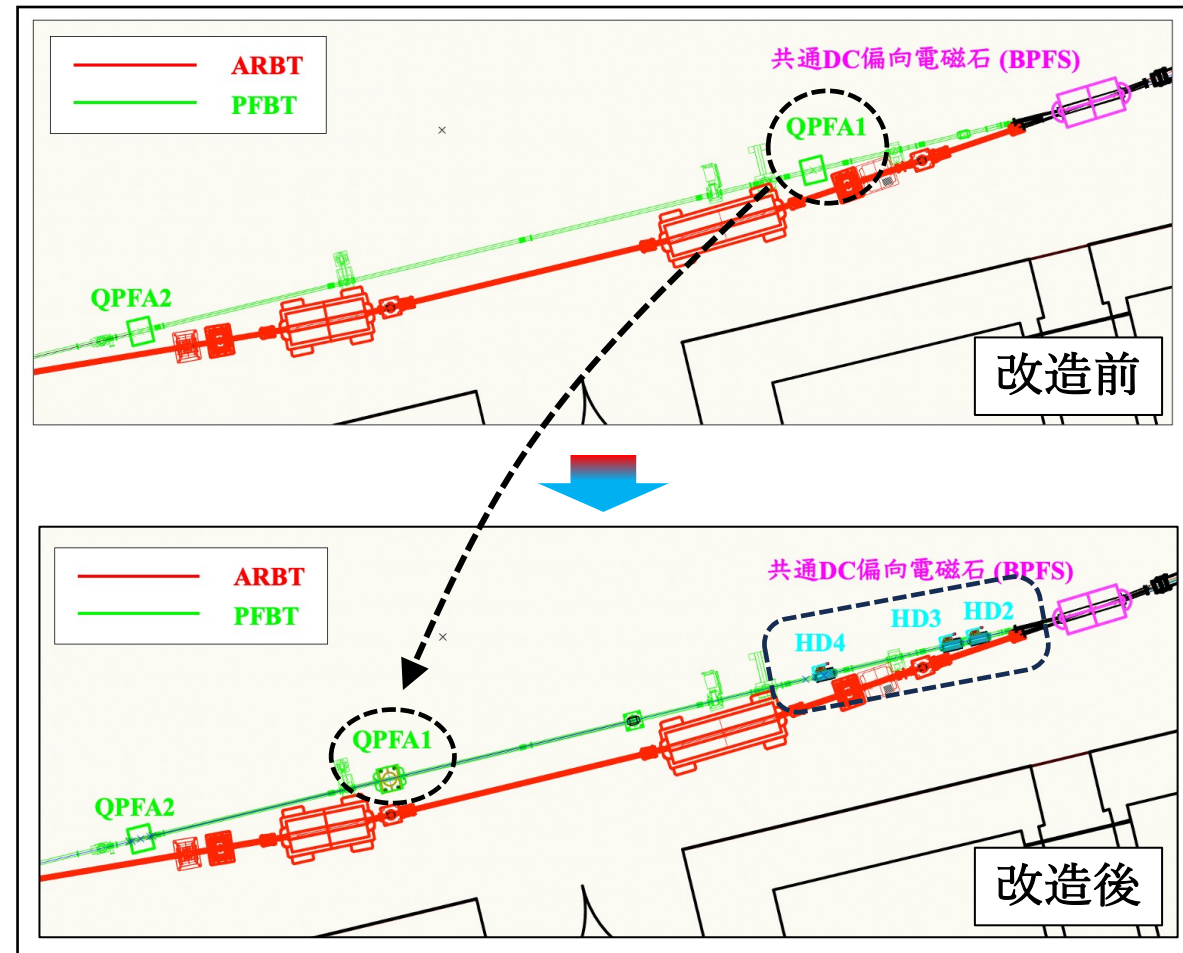
➡ ARBT 5 GeVを追加で成立させるのが目的だが、今回はPFBTのハードウェアが改造された。

方針

- 共通DC偏向電磁石 (BPFS) の磁場強度を弱め ARBT 5 GeV 設定に寄せ、PFBT で発生する軌道のズレを吸収。
- BPFS 直下にある四極電磁石 “QPFA1” を下流に移設し、空いたスペースに3台の水平ステアリング電磁石を新設。
- 水平ステアリング設置場所の真空ダクトを扁平ダクトに置き換える。

利点

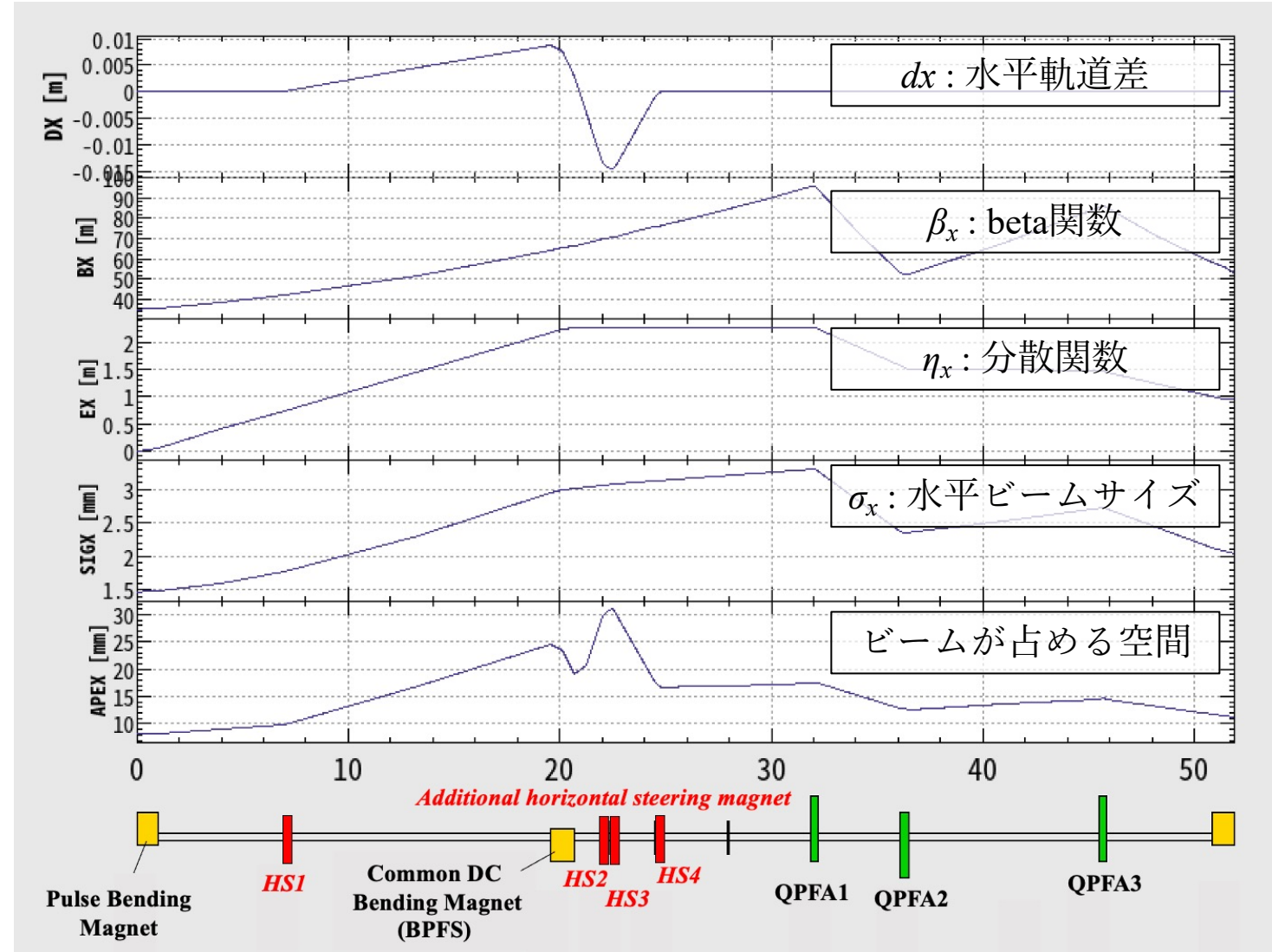
- PFBT のみに磁場をかけるので DC で良い。
- 真空ダクトの改造は主に新規設置電磁石部のみで済み、比較的高価な Beam Position Monitor (BPM) や Screen Monitor の新規製作の必要がない。



5. 真トップアップ運転実現のための改造

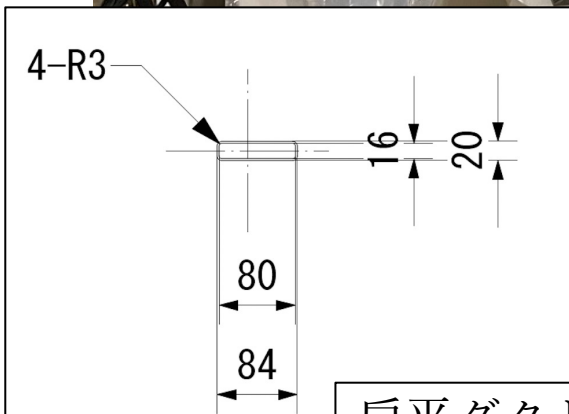
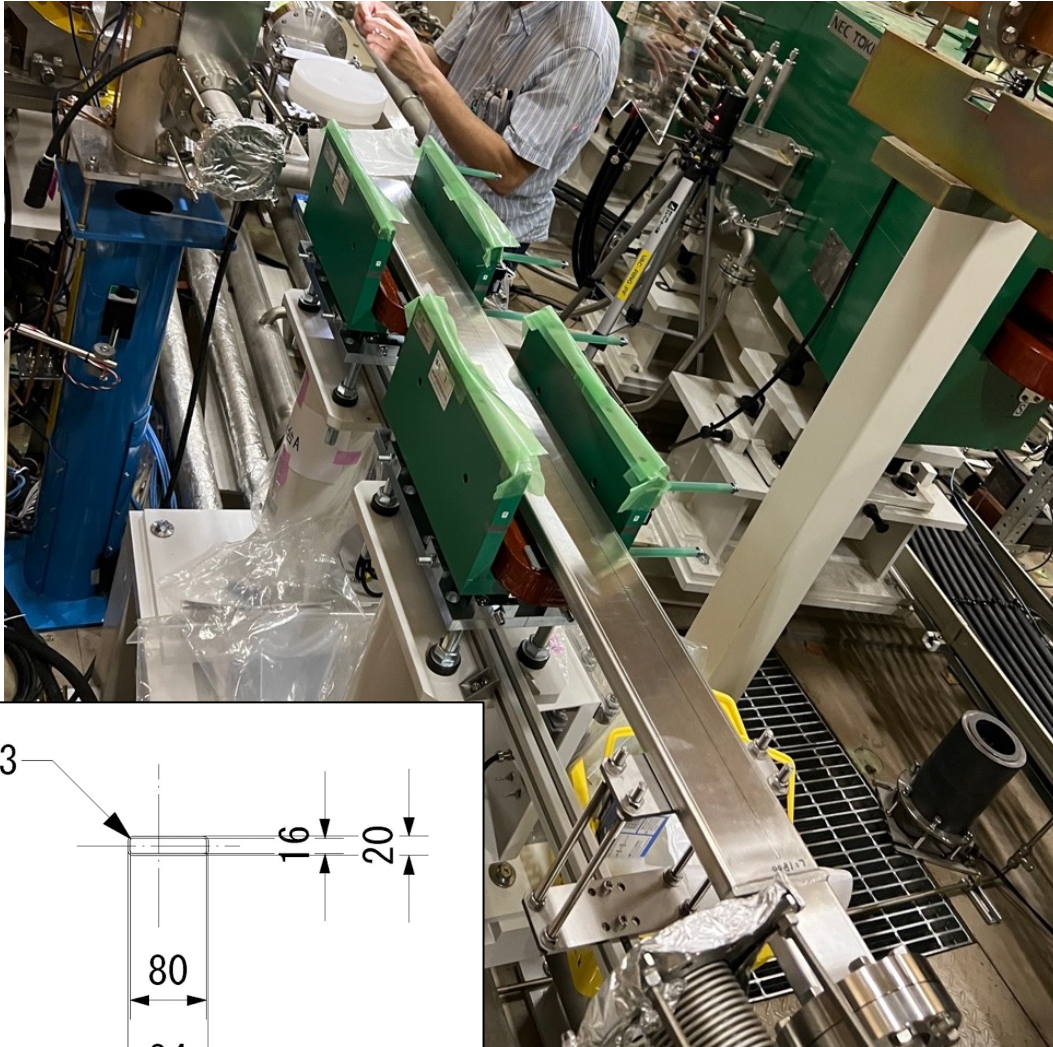
・新PFBTのOptics

- 共通DC偏向電磁石“BPFS”をPFBT 2.5 GeVの設定よりも弱めて5 GeV ARBTを成立させる。
- そのためBPFS下流で大きなDXが発生。
- 前もって水平ステアリング“HS1”で逆方向に蹴っておき、BPFS下流で発生するDXを実効的に抑制する。
- BPFS下流は新規インストールの水平ステアリング“HS2, 3, 4”の3台で位置 (DX) と角度を設計に戻す。
- 3台の水平ステアリングを新規インストールするため、四極電磁石“QPFA1”を下流に移設。歪んだopticsは下流の四極電磁石で補正済み。
- 当該部の既設ダクト径 25 mmを超えるので、これを受けられるように水平に大きい扁平ダクトを新規製作, インストール。

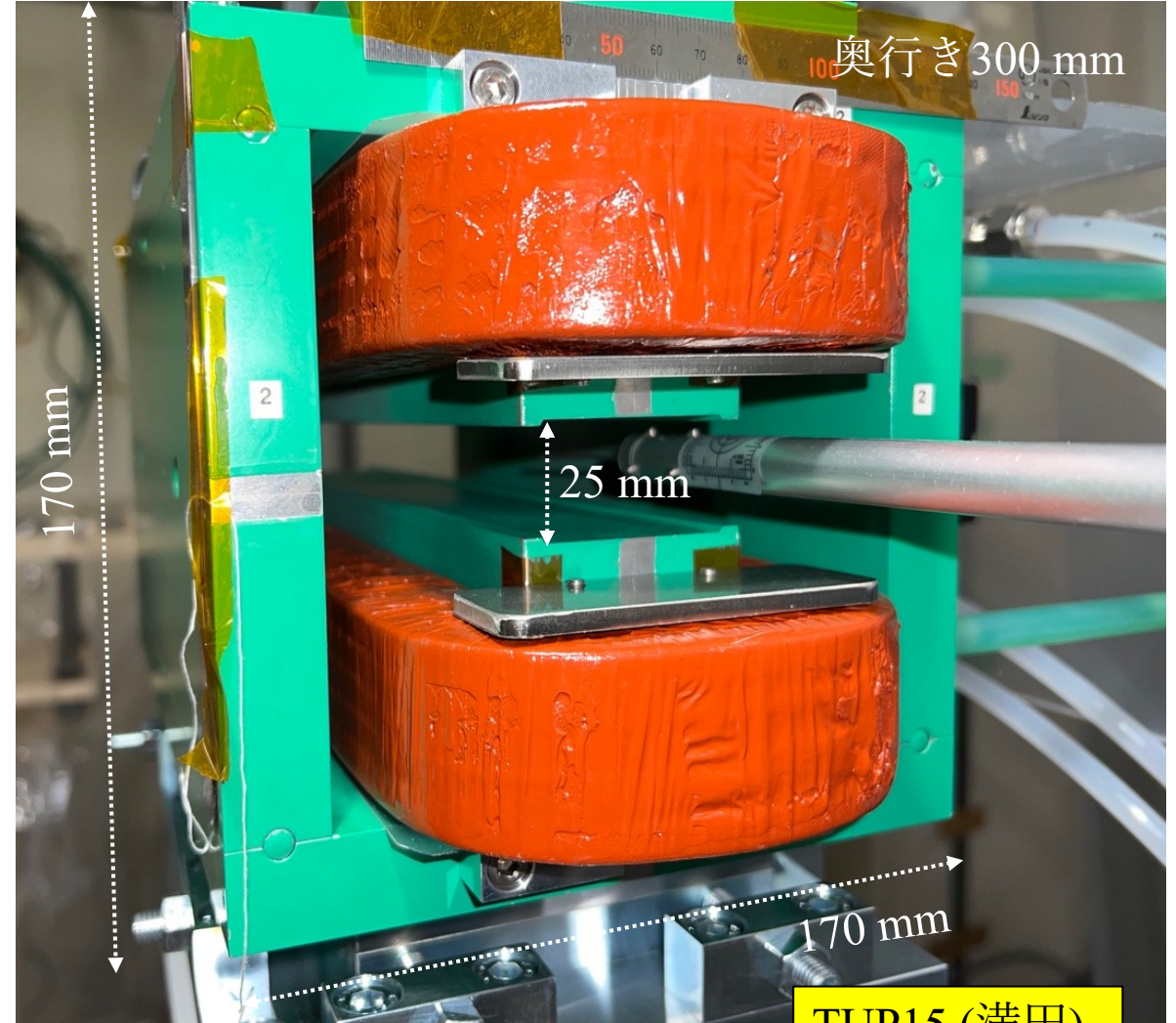


5. 真トップアップ運転実現のための改造

• magnet and vacuum duct



扁平ダクト断面図

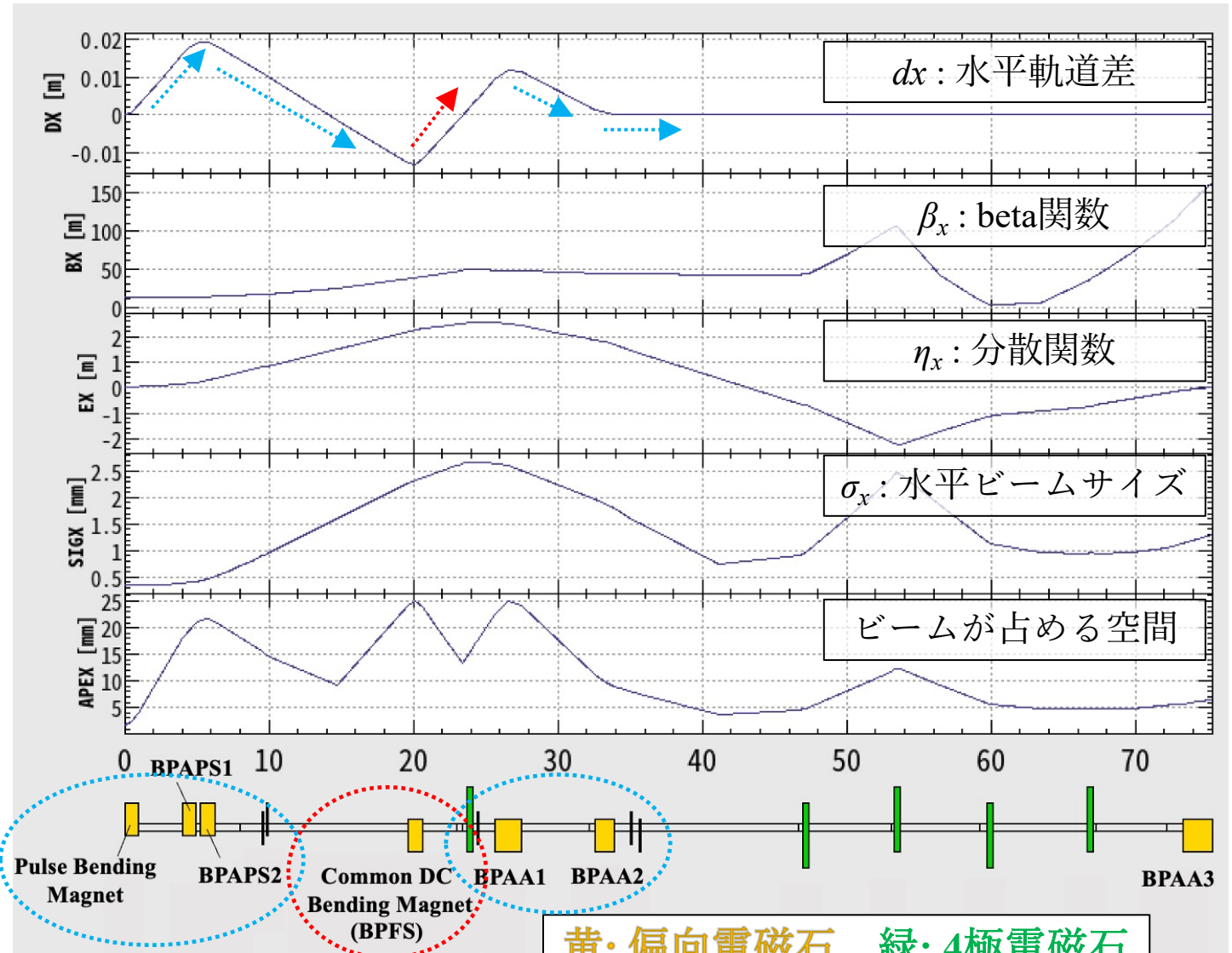


TUP15 (満田)
TUP43 (長橋)

5. 真トップアップ運転実現のための改造

・新ARBT (5 GeV) のOptics

- 共通DC偏向電磁石“BPFS”は6.5 GeV設定からは弱めたものの、5 GeV設定よりも強いいため下流で大きなDXが発生。
- 前もってBT分岐点であるpulse bendとその下流の2つのbendを用いて逆方向に蹴っておき、BPFS下流で発生するDXを実効的に抑制する。
- BPFS下流は既設の偏向電磁石2台で位置(DX)と角度を設計に戻す。
- APEX (ビームが占める空間: $|DX| + 5\sigma_x$) は全領域で既設ダクト径の25 mmを超えないように設計。
- pulse bendの振幅はpulse to pulseで変更できないため、PFBTとARBT間で蹴り角を切り替えられないが、位相(delay)を制御することにより、実効的に蹴り角を変更している。



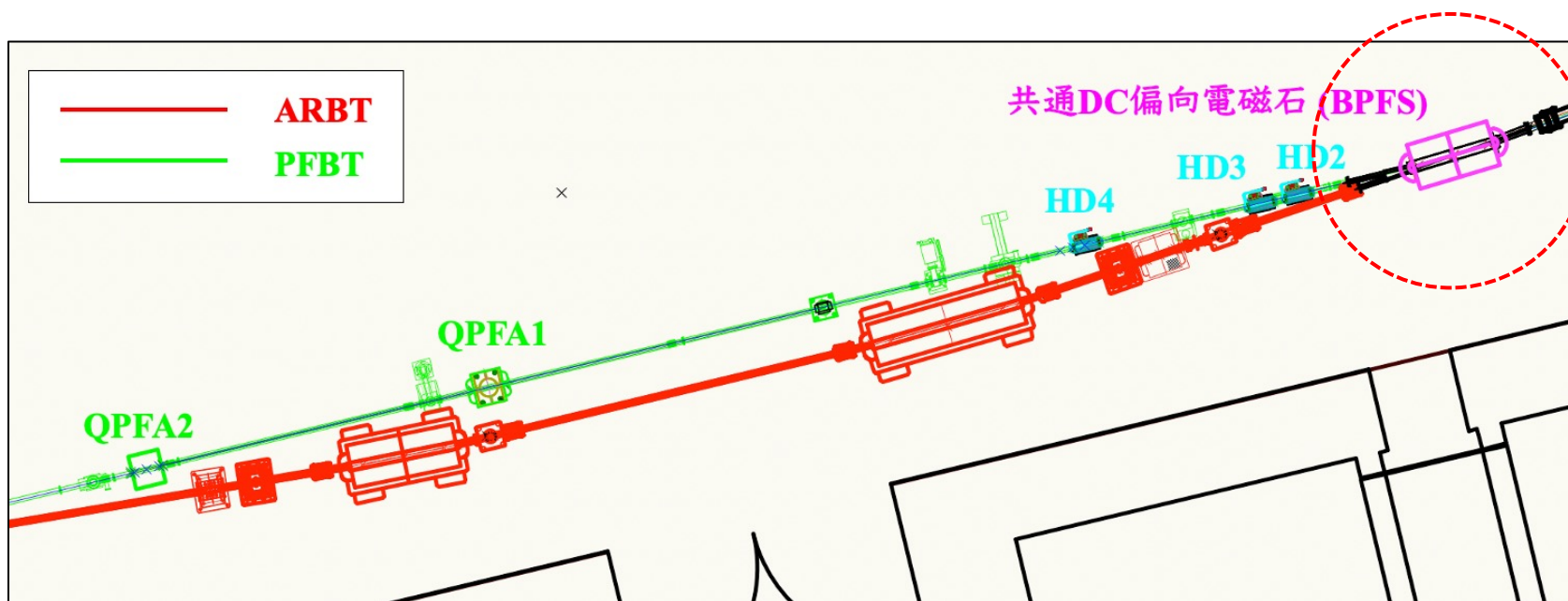
6. コミッショニングとユーザー運転への適用

・コミッショニング

2022年度10 - 12月期の運転で、PF (2.5 GeV)/PF-AR (5 GeV)の同時トップアップ入射のstudy (コミッショニング)を実施.

決まり事: ARBTとPFBTで共有する電磁石 (BPFS)はnobとして触らない.

触らなければ, ARBTとPFBTの調整は, “理想的には”独立しているはず.



6. コミッショニングとユーザー運転への適用

・調整の手順

共通DC偏向電磁石 (BPFS)の励磁電流 (蹴り角)を決める (設計値)

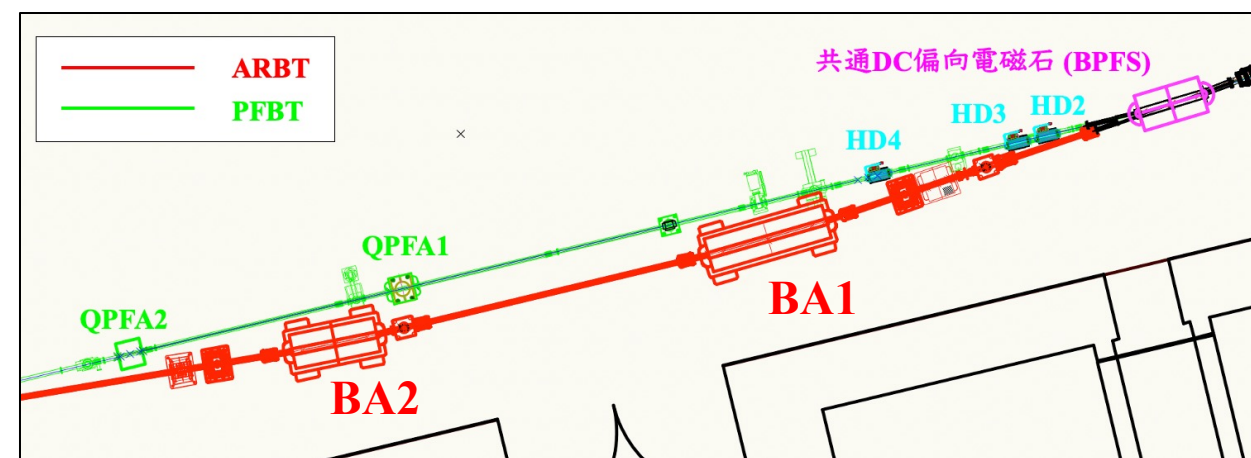
PF-AR (5 GeV)

BA1, BA2で軌道を閉じる

PF (2.5 GeV)

HD3, HD4で軌道を閉じる

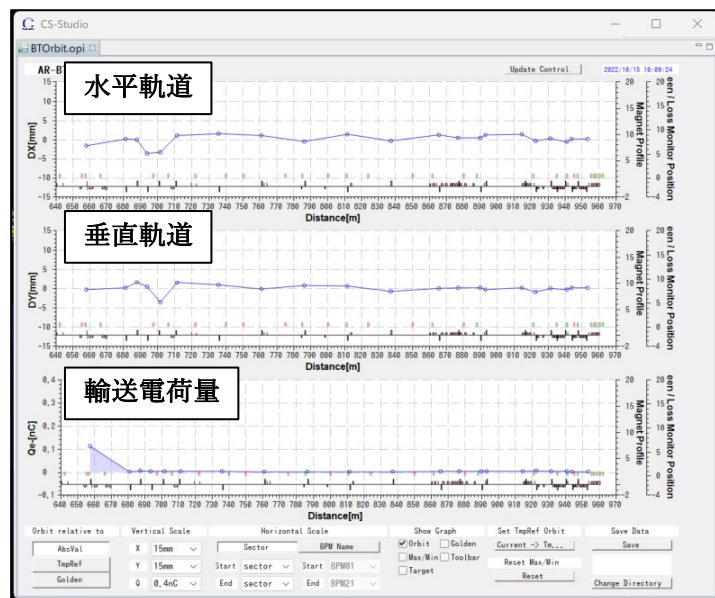
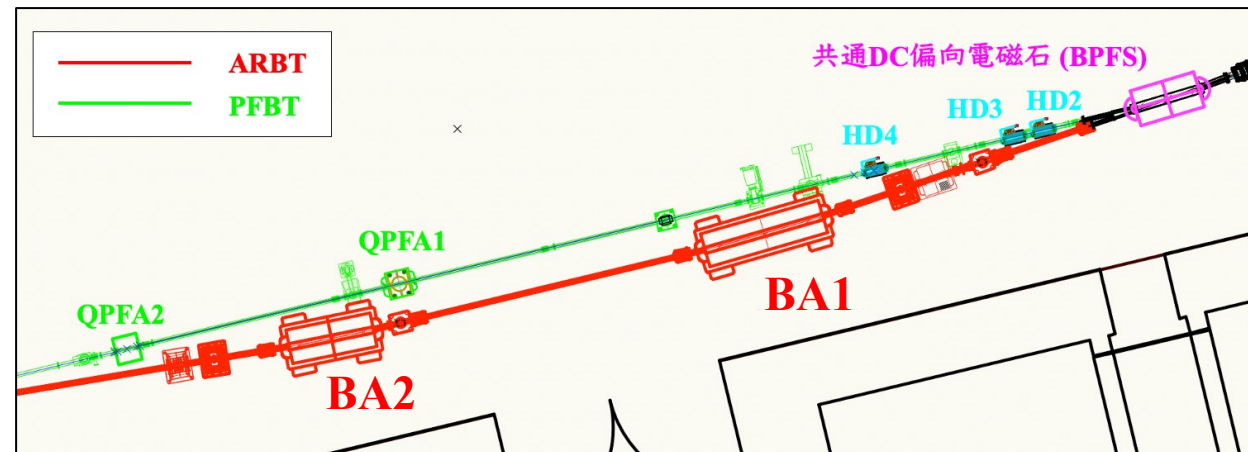
2つの free parameterがあれば、理想的には位置と角度を設定でき、軌道を閉じることができる。



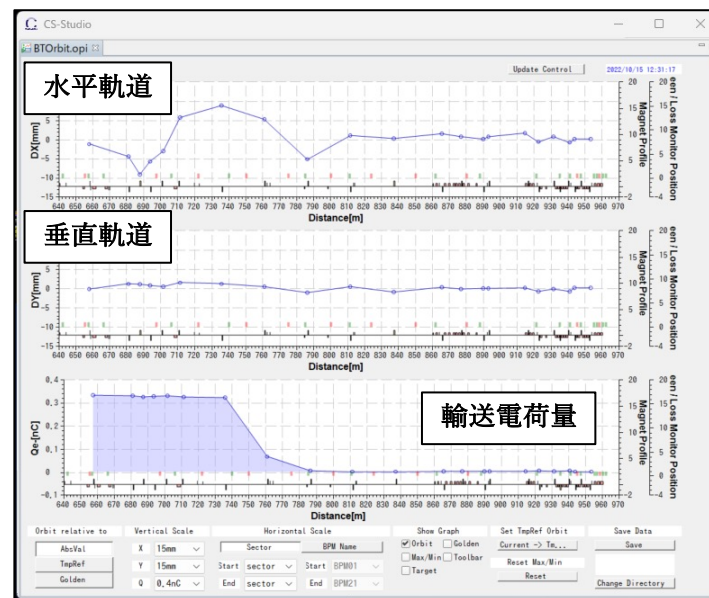
6. コミッショニングとユーザー運転への適用

・ARBTの調整(例)

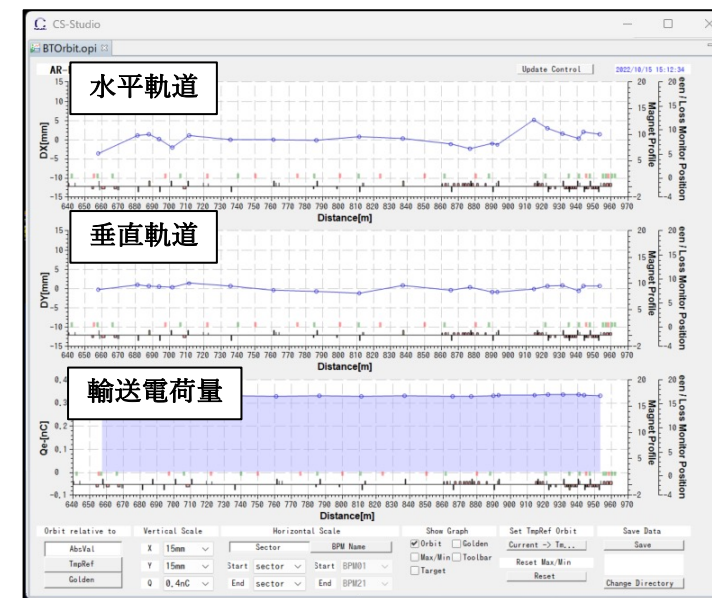
- PFBTと共有する共通DC偏向電磁石 (BPFS)はノブとして使用しない。
- BPFS下流のBA1とBA2を使用すれば, 水平軌道を基準軌道に近付けることができる。



スタート



BA1, BA2の粗調整後

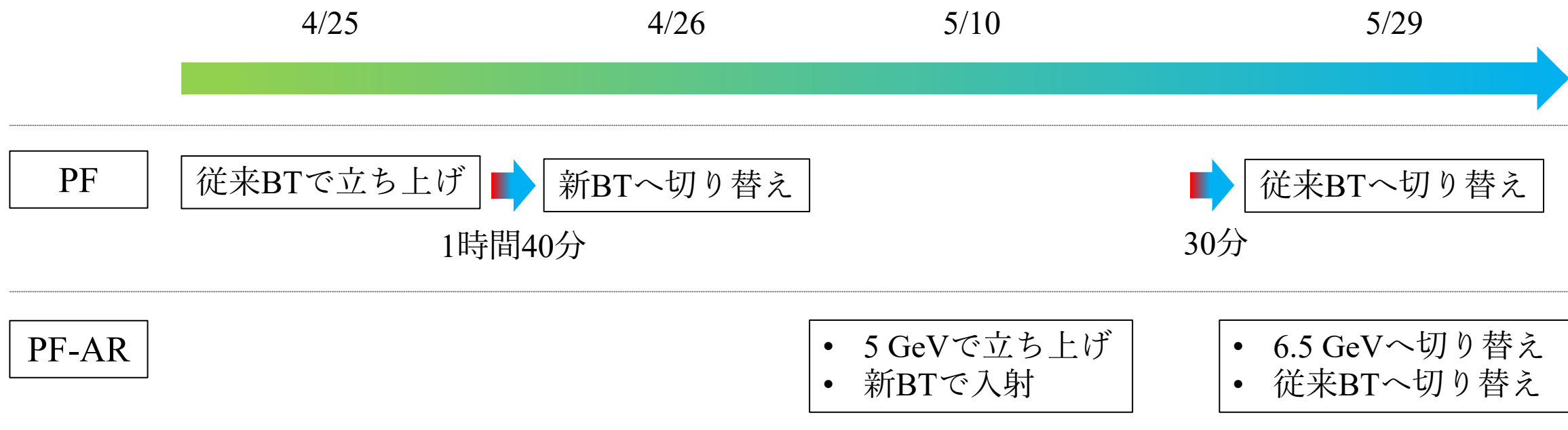


BA1, BA2の精密調整後

6. コミッショニングとユーザー運転への適用

・ユーザー運転への適用

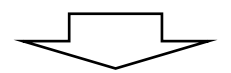
今年度 (2023年度) 4月から開始されたユーザー運転で初めての適用



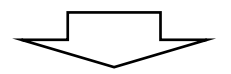
- ・ 切り替えはトラブルもなくスムーズに実施できている.
- ・ コミッショニング時に確立したパラメータを呼べば, 大きな調整は今のところ必要ない.

7. phase1.5 の改造

phase1改造 (2022年夏)



phase1 commissioning (2022年秋~冬)

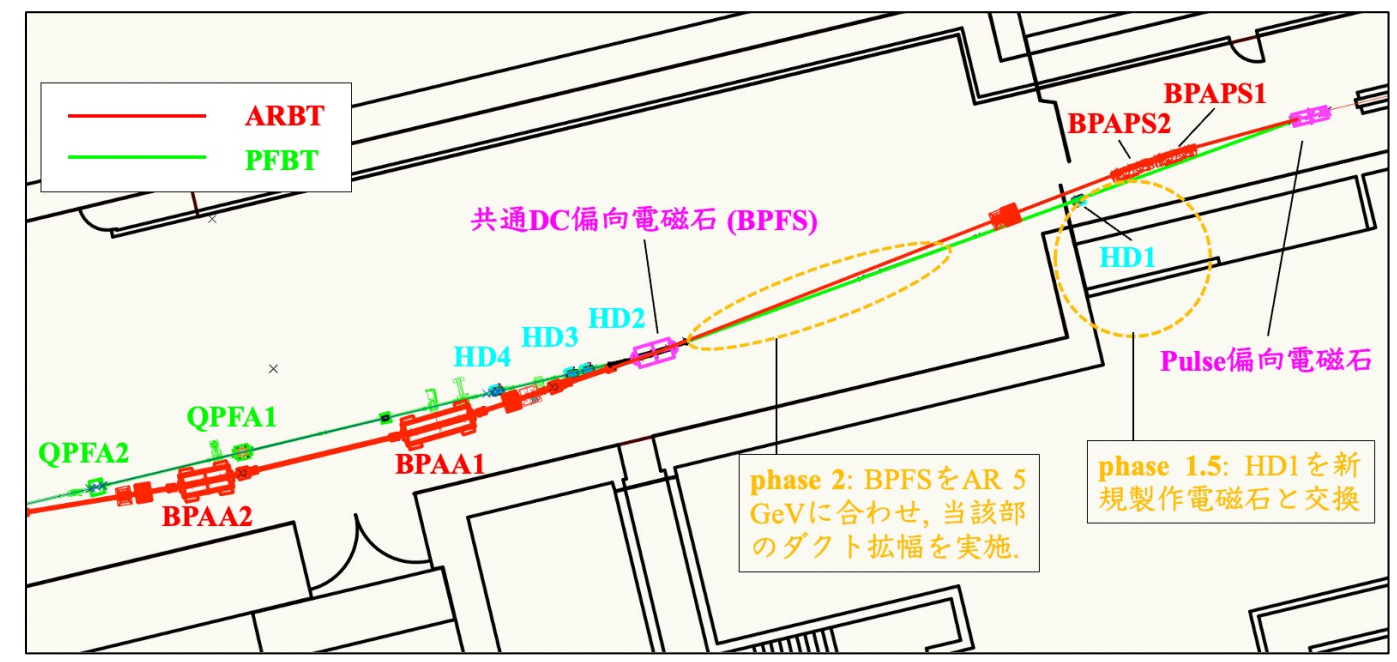


phase1の運転適用 (2023年度第1期~)



phase1.5 (今夏)

最上流の水平ステアリングを新規製作のものと交換。



phase1.5の改造箇所

既存の電磁石・電源では、フル定格3 A, 0.7 mradで新PFBTの軌道を作っており、余裕がなかった。



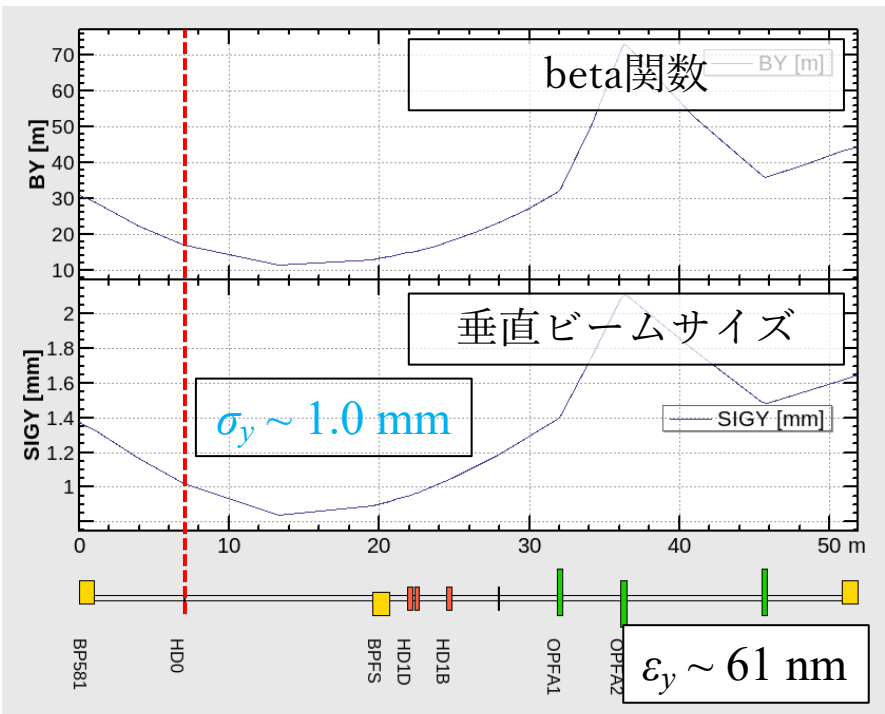
新規インストールステアリングは150 Aで11.7 mrad蹴ることができる。

7. phase1.5の改造

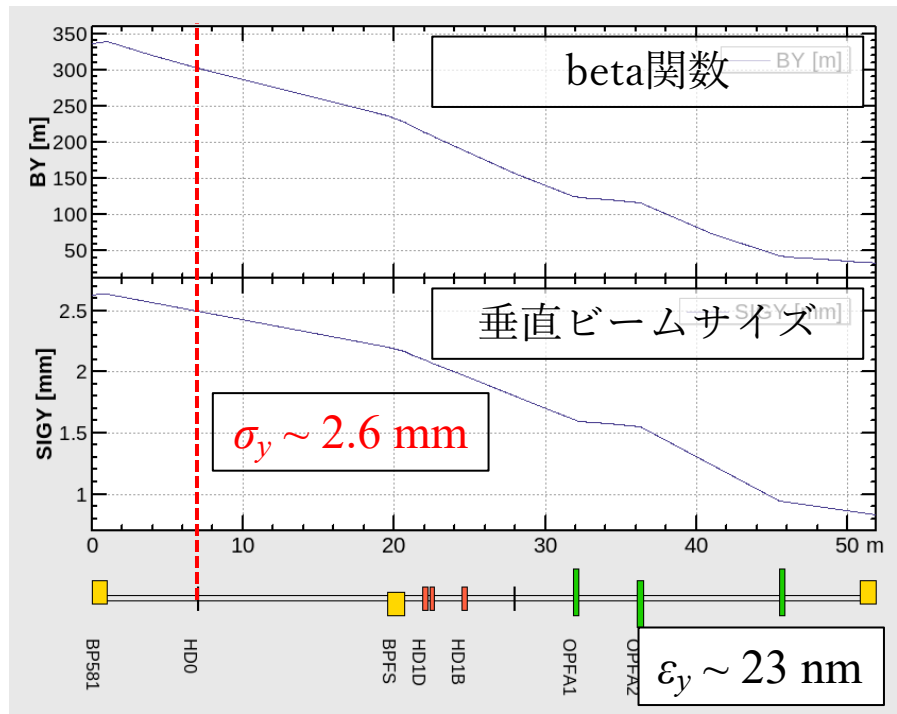
beam tuningの課題

- opticsの設計との乖離
 - optics測定結果を反映させると, phase1.5改造部で $\sigma_y \sim 2.5$ mm
 - 8 mmの物理apertureでは, 3σ 程度までしか確保できない

TUP47 (下崎)



設計



Qscan測定反映の実optics (2022年10月)

- 5 σ 確保する場合には, linac側の4極電磁石から調整し, PFBT入り口のoptics matchingを実施する必要がある。
- そのために11月開始の次期運転では, PF運転前からlinacと協調して調整する予定。

ご清聴ありがとうございました

・関連する発表

- 満田 史織 (TUP15: ポスター: 8/29(火))
 - PF-ARにおける5GeVトップアップ運転実現のための輸送路の改造
- 長橋 進也 (TUP43 : ポスター: 8/29(火))
 - PF-ARにおける5GeVトップアップ運転実現のための電磁石設置
- 下崎 義人(TUP47: ポスター: 8/29(火))
 - KEK PF-BTに関するシミュレーションモデルの改修と加速器調整への適用



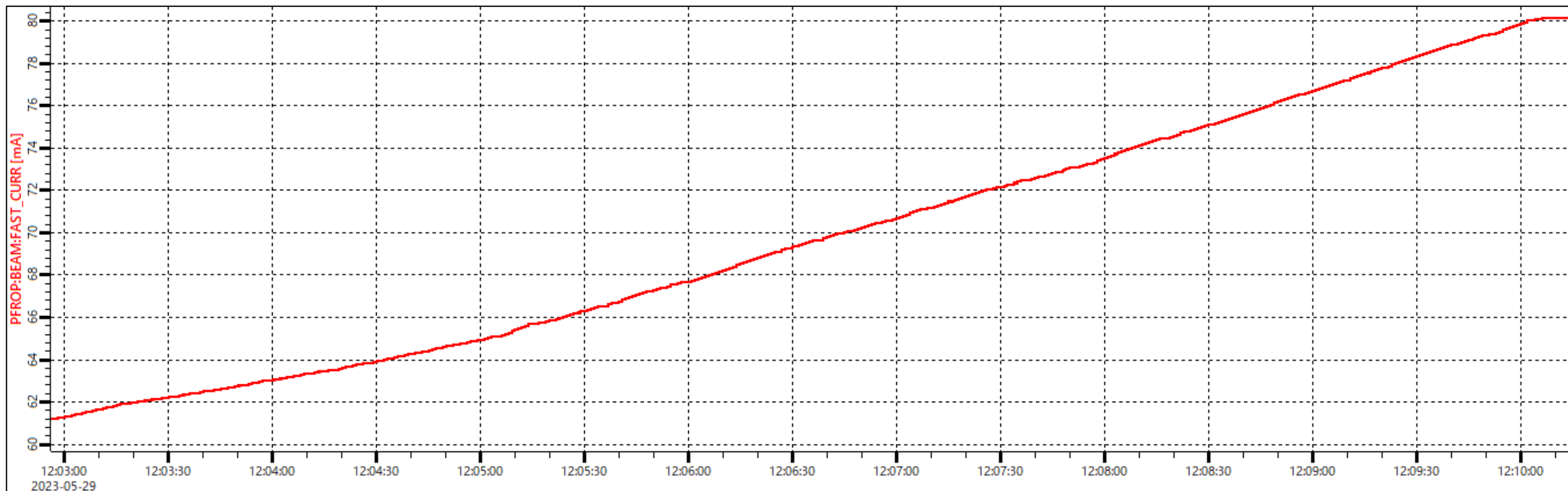
backup

・PFBT, 切り替え前後での入射率の変化

(あくまで一例)



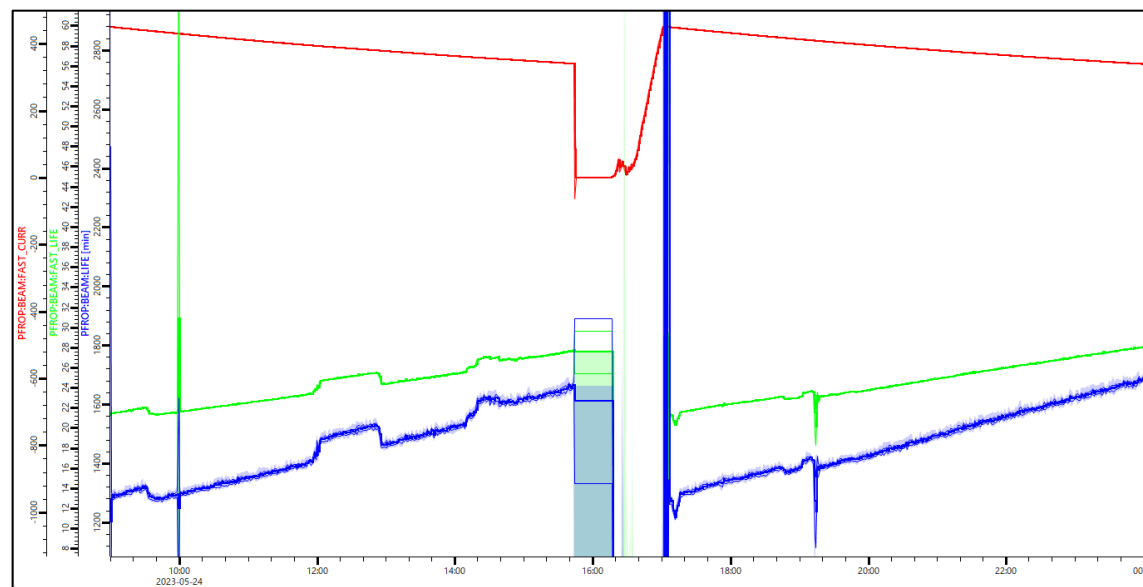
- mode切り替え前の入射率: 160 mA/600 s ~ 0.27 mA/s with 5 Hz.
- 切替後: 18 mA/390 s ~ 0.046 mA/s with 1 Hz -> 0.23 mA/s with 5 Hz.



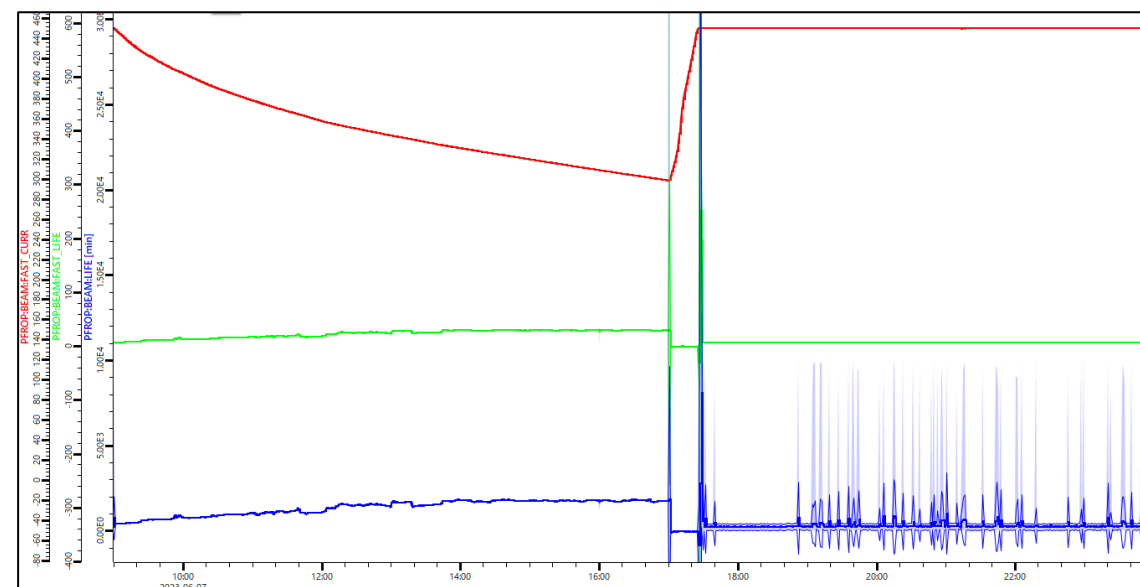
・PFのビーム寿命



multi-bunch



hybrid mode



5/24: 定時入射時: 1292 min. (21 hour (fast))

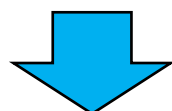
6/7: 定時入射時: 406 min. (7 hour (fast))

6. コミッショニングとユーザー運転への適用

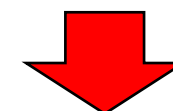
2022年度10 - 12月期の運転で、PF (2.5 GeV)/PF-AR (5 GeV)の同時トップアップ入射のstudy (コミッショニング)を実施。

昨年の5/14, 5/15, 10/15にPF-AR (5 GeV)単独で実施し、輸送に問題ないことを確認。10/27, 11/7に同時試験を実施、従来と同等の電子ビーム入射率を達成。

	5月14日	5月15日	10月15日	10月27日	11月7日
AR (5 GeV)					
PF (2.5 GeV)					



夏季作業



ARBT単独で実施

- ARBTのみに使用するparameterの確立
- 軌道調整, 入射率の確認

ARBT/PFBT, 同時study

- 確立したARBTを再現後, PFBTの軌道調整を実施
- 11/7はPFBT -> ARBTの順で軌道調整を実施