

PF-AR における Middle-low-emittance Optics の適用 APPLICATION OF THE MIDDLE-LOW-EMITTANCE OPTICS TO PF-AR

東直 ^{*,A,B}, 長橋 進也 ^A, 満田 史織 ^{A,B}

Nao Higashi ^{*,A,B}, Shinya Nagahashi ^A, Chikaori Mitsuda ^{A,B}

^A) KEK, ^B) SOKENDAI

Abstract

PF-AR (Photon Factory Advanced Ring) is 5 or 6 GeV light source, and is running about 2000-hour user-run in a year. Until FY2022, the emittance was 293 nmrad, however this could be suppressed to 163 nmrad as a half of the original to adjust the phase-advance of the normal cell optics to the optimum point. In the early 2000s, some study were tried to realize this low-emittance optics, however some trouble like a vacuum-leak and a breakdown of FB amplifier happened and this made us give up continuing beam-studies. Since 2017, the beam transport line (BT) of PF-AR was separated from the one of SuperKEKB so that the full-energy injection with 6.5 GeV was realized. Thanks to this, we became free from the instabilities due to an energy ramping-up, and the feasibility of the low-emittance optics became stronger. However, new masks were installed an upstream of RF cavities that prevents vacuum-leaks due to synchrotron radiation as a measure against hardware failures that occurred in the early 2000s. This reduces the sufficient physical aperture for the original low-emittance optics. Therefore, taking into account the presence of this RF masks, a new optics called “middle-low-emittance optics” with a moderate low emittance between 293 nmrad and 163 nmrad was considered and applied to practical user-run. In this paper, we will report on the detail of this optics and the trials for the practical application, and the current status and the future tasks.

1. はじめに

PF-AR (Photon Factory Advanced Ring) は 6.5 GeV もしくは 5 GeV の、大強度シングルバンチ放射光加速器であり、年間 2000 時間前後のユーザー運転を行っている。これまで PF-AR は 293 nmrad 付近のエミッタンスで運転を続けてきたが、ノーマルセルの位相進度を最適な値に設定できれば、元のおよそ半分程度である 163 nmrad までエミッタンスを抑制できることがわかってきた。2000 年代初頭にこの実現を目指す試みが何度かおこなわれたものの、真空リークや FB 用アンプの故障などのトラブルに見舞われ、低エミッタンス化のためのスタディは中断を強いられていた。

2017 年より、PF-AR の入射路 (ARBT) が SuperKEKB から独立し、リングエネルギーと同じ 6.5 GeV で入射が

可能となった [1]。それまで 3 GeV で入射し、6.5 GeV まで加速して運転を行っていたが、ARBT の独立により ramp-up に伴う種々の不安定性から開放され、低エミッタンス optics 実現のハードルが下がった。また、この直接入射路建設に伴い、入射点が南東部から西の RF 空洞手前に移動となった。

PF-AR は FODO で構成される 4 つのアーチ部と分散を消した 4 つの直線部からなる (Fig. 1, 2)。この FODO cell の水平位相進度を従来の 90 deg. から 140 deg. にすると、エミッタンスの理論的な最小値である、163 nmrad に到達することができる。以後、optics の計算は全て SAD [2] を使用している。

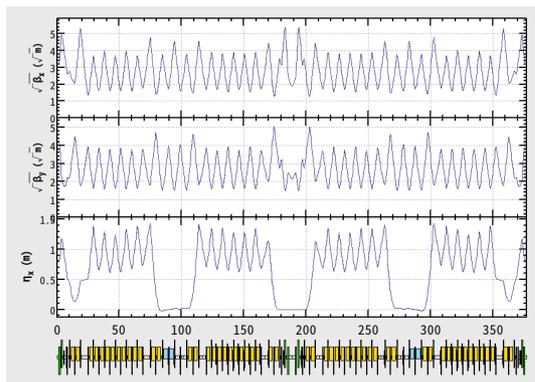


Figure 1: Conventional normal-emittance optics of PF-AR (293 nmrad).

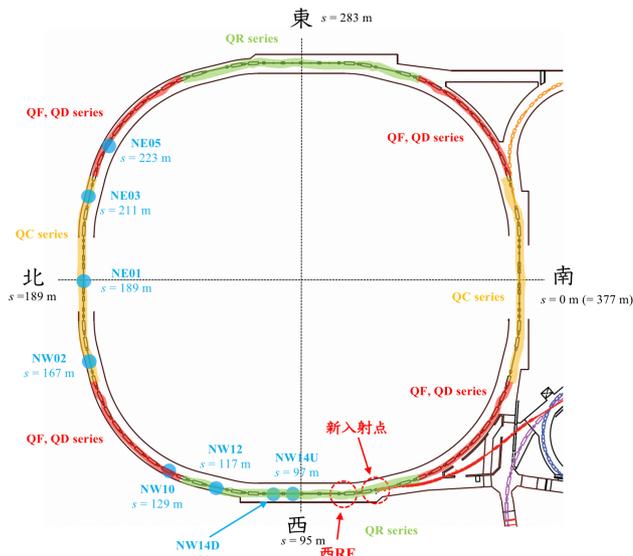


Figure 2: Layout of PF-AR.

* nao.higashi@kek.jp

Table 1: Physical Aperture (PA) and Horizontal Beam-size in Conventional Low-emittance Optics and New Middle-low-emittance Optics

Optics	Position	PA _x [mm]	σ _x [mm]	PA _x [σ _x]
Conventional Low-Emittance	New Injection Point	28	1.5	19
	RF Mask	17	2.1	8.1
New Middle-low-emittance	New Injection Point	28	2.3	12
	RF Mask	17	1.8	9.4

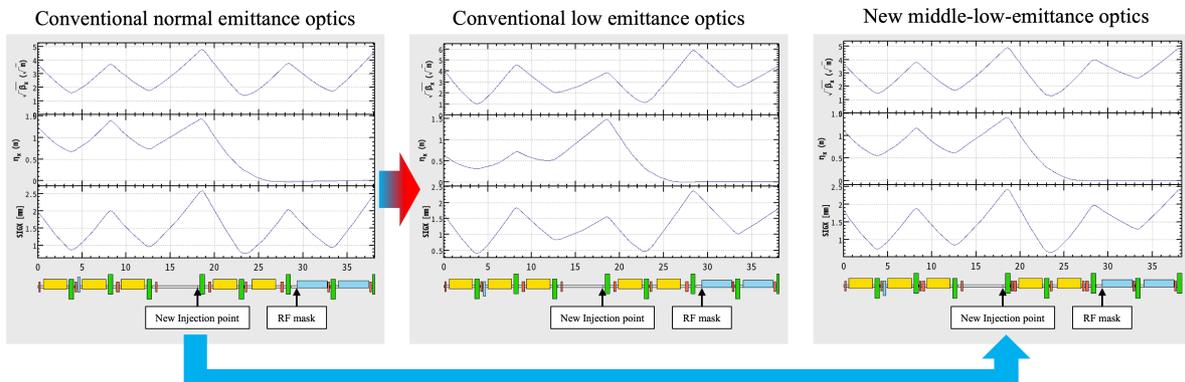


Figure 3: Comparison of $\beta_x, \eta_x, \sigma_x$ in conventional normal-emittance optics, conventional low-emittance optics and new middle-low-emittance optics.

2. 従来の Low-emittance Optics と適用の課題

これまで適用が試みられてきた low-emittance optics だが、2000 年代初頭の low-emittance optics 適用試験中に発生したハードウェアの故障の再発を防ぐための措置として、放射光による真空リークを防ぐためのマスクが RF 空洞近傍（ビーム進行方向から見て上流側）に設置された。また、入射点が新直接入射路適用により、南東からほぼ真西の、西 RF 空洞直上流へと移動となった。これらの影響により、従来の low-emittance optics をそのまま今のリングに適用すると、十分な physical aperture を確保することが不可能となった [3]。今回、現状のリングのハードウェア構成とそれで決まる physical aperture を元に、low-emittance optics を再考した。その結果、従来のような“full”の (163 nmrad の) low-emittance optics の実現は難しいものの、位相進度を緩和した“middle-low-emittance optics”を作成した。

3. Middle-low-emittance Optics の設計

Middle-low-emittance optics を考える際に、まずは新設された RF マスクで入射されたビームがなるべく削れないことを検討した。新入射点の physical aperture は 28 mm、RF マスクでは 17 mm となるので、新入射点の水平方向ビームサイズ σ_x を $\sigma_{x, inj}$ 、RF マスク部の水平方

向ビームサイズ σ_x を $\sigma_{x, RF}$ とすると、

$$\frac{28 \text{ mm}}{\sigma_{x, inj}} \leq \frac{17 \text{ mm}}{\sigma_{x, RF}} \quad (1)$$

$$\sigma_{x, RF} \leq \frac{17}{28} \times \sigma_{x, inj} \quad (2)$$

が満たされていれば、入射ビームが RF マスクで削れることはない (ただし厳密に評価するには入射ビームの tracking が必要になる)。

Figure 3 に、従来の normal-emittance optics ($\varepsilon_x = 293 \text{ nmrad}$)、従来の low-emittance optics ($\varepsilon_x = 163 \text{ nmrad}$) の場合と、今回作成した middle-low-emittance optics ($\varepsilon_x = 245 \text{ nmrad}$) の場合の新入射点から RF マスクまでの $\beta_x, \eta_x, \sigma_x$ を示した。また、Table 1 に、それぞれの physical aperture をビームサイズ σ_x で割った値をまとめた。元の low-emittance optics では入射点が $18.7 \sigma_x$ の physical aperture があるのに対して、RF マスク部では $8.1 \sigma_x$ しかない。一方、今回作成した middle-low-emittance optics では完全に式 (2) を満たしているわけではないが、physical aperture の差は小さく、入射ビームの条件 (septum 壁にどれだけ寄せるか、など) によっては、入射ビームはロスすることなく、リング内を周回することが可能となる。Figure 4 に、作成した middle-low-emittance optics (リング 1 周分) を示す。

3.1 主要 Parameter

現在、PF-AR は 6.5 GeV と 5 GeV の両方のエネルギーで運転を行っているため、それぞれの middle-low-emittance optics と従来の normal-emittance optics との主要 parameter の比較を Table 2, 3 に示す。Touschek 寿命については X-Y coupling を 1% と仮定して計算した。

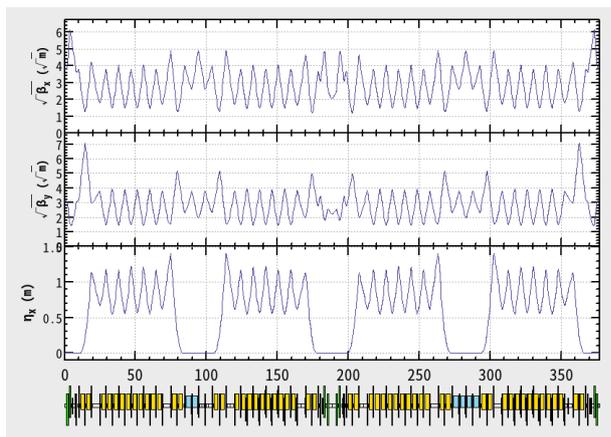


Figure 4: β_x , β_y and η_x of new middle-low-emittance optics.

Table 2: Parameters of Each Optics in 6.5 GeV

	Conventional Normal-emittance	Middle-low-emittance
Circumference [m]	377.26	
RF voltage [MV]	16	
Energy loss [MeV/rev.]	6.66	
Natural Emittance [nmrad]	293	245
RF Bucket height [%]	0.918	0.960
Momentum compaction factor	1.26×10^{-2}	1.15×10^{-2}
Betatron tune (ν_x, ν_y)	10.14/10.21	10.26/10.05
Damping time (hor./ver./long.) [ms]	2.47/2.46/1.23	2.45/2.46/1.23
Energy spread σ_E/E	1.14×10^{-3}	1.15×10^{-4}
Natural Bunch Length [mm]	16.0	15.4
Touschek Lifetime [h]	118.5	71.1

Table 3: Parameters of Each Optics in 5 GeV

	Conventional Normal-emittance	Middle-low-emittance
Circumference [m]	377.26	
RF voltage [MV]	8	
Energy loss [MeV/rev.]	2.33	
Natural Emittance [nmrad]	173	145
RF Bucket height [%]	0.860	0.899
Momentum compaction factor	1.26×10^{-2}	1.15×10^{-2}
Betatron tune (ν_x, ν_y)	10.14/10.21	10.26/10.05
Damping time (hor./ver./long.) [ms]	5.42/5.40/2.69	5.39/5.40/2.70
Energy spread σ_E/E	8.79×10^{-4}	8.81×10^{-4}
Natural Bunch Length [mm]	14.9	14.3
Touschek Lifetime [h]	22.4	17.2

3.2 Dynamic Aperture Survey

新入射点とRFマスク部のphysical apertureと β_x の関係について注意を払ってmiddle-low-emittance opticsを作成したが、もちろんdynamic apertureが十分に広くなくてはならない。特に入射点におけるbumpされた蓄積ビームと入射ビームの距離、ここでは28mmを確保したい。Figure 5にmiddle-low-emittance opticsのdynamic apertureを示す。ここで、2 familyの6極電磁石を用いてchromaticityは(1.0, 1.0)としている。この結果、on-momentum ($dp/p = 0\%$)において、26.2mmまで確保できることがわかった。当初は28mmまで確保する予定であったが、先のphysical apertureと β_x の関係のところと同様、septumに入射ビームを近づければ、28mmまで確保しなくても破綻しないことがわかったので、これで問題ないと考えている。

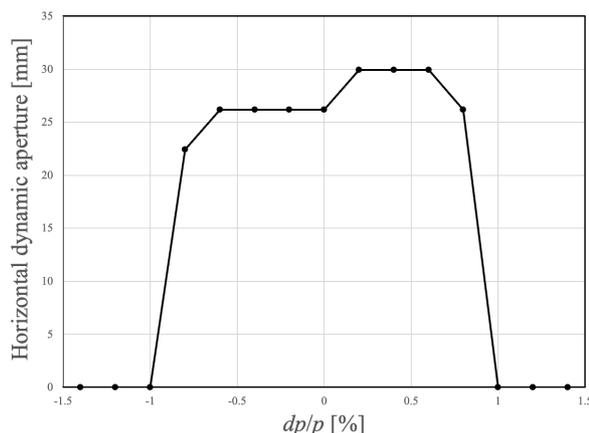


Figure 5: Horizontal dynamic aperture of new middle-low-emittance optics.

4. 適用試験

新たなmiddle-low-emittance opticsの適用試験は2021年6月より開始された。この一連のスタディでは、従来のPF-AR定格電流である50mAの蓄積確認、挿入光源のギャップ閉止試験、BLへの光供与試験、素粒子原子核測定器開発のためのAR Test-BL [4, 5]との共存試験などを行った。

50mAの蓄積については、規定通りRFマスクを挿入したまま入射し、50mAまで蓄積できることを6.5GeV、5GeVともに確認した。また、実際の運転を想定し、挿入光源のギャップが閉じている場合でもtop-up入射で50mAを維持することができることも確認した。以下ではmiddle-low-emittance opticsが確立できたか確認するために取得されたデータについて、いくつかピックアップして説明をおこなう。

4.1 光モニタによるビームサイズの比較

PF-ARでは偏向電磁石光源(NW5)を利用して、放射光をmonitorするシステムが存在している。これは通常運転時には、定期的に画像の確認・保存を行い、安定した運転を担保するためのものであるが、今回はこれを用いて従来normal-emittance opticsとmiddle-low-emittance opticsにおけるビームサイズの比較を行った。

Figure 6, 7にその1例として、初めてユーザー運転にmiddle-low-emittance opticsを適用した日の、従来normal-emittance opticsから新たなmiddle-low-emittance opticsに切り替えた時のビームサイズ(ピクセル単位)の変化について示した。またTable 4に従来のnormal-emittance opticsとmiddle-low-emittance opticsで想定されるビームサイズ(mm単位)と光モニタで実測されたビームサイズ(ピクセル単位)、そしてそれぞれの比についてまとめた。ただし $\varepsilon_y = 0.01 \cdot \varepsilon_x$ を仮定した。この比を見ると水平方向のビームサイズは設計値と比較し、6.5GeVでは実測がやや小さく、5GeVではおおそ一致している。しかし垂直方向ビームサイズでは6.5GeV、5GeVの両方で、設計値に比べて測定値の比が大きくなっている。これについては今後原因究明を進め

Table 4: Comparison of Designed and Measured Beam-size in Light Profile Monitor

energy [GeV]	optics	ε_x [nmrad]	β_x [m]	η_x [m]	σ_x [mm]	measured σ_x [px]	β_y [m]	σ_y [mm]	measured σ_y [px]
6.5	conventional normal-emittance optics	295	3.99	0.767	1.40	57	10.5	0.176	20
	middle-low-emittance optics	253	5.07	0.668	1.37	54	10.2	0.161	21
	ratio (middle/normal) [%]	85.6	-	-	97.7	95	-	91.3	105
5	conventional normal-emittance optics	169	3.13	0.656	0.927	43.7	18.2	0.175	19.2
	middle-low-emittance optics	143	3.35	0.650	0.898	42.5	10.9	0.125	18.6
	ratio (middle/normal) [%]	93.5	-	-	96.8	97.3	-	71.2	96.9

Table 5: Result of Bunch Length Measurement with Streak Camera

energy [GeV]	optics	bunch length calculated by SAD [mm]	measured bunch length [mm] @50 mA	ratio [%]
6.5	conventional normal-emittance optics	16.2	15.3	94.5
	middle-low-emittance optics	15.5	14.5	93.7

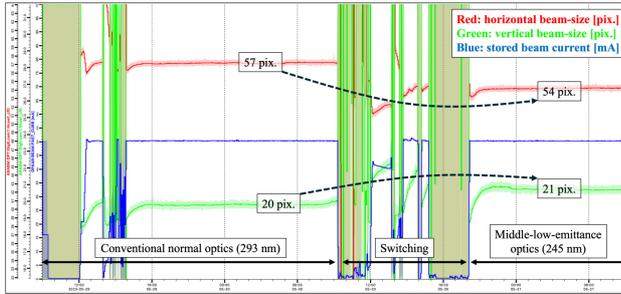


Figure 6: Transition from conventional normal-emittance optics to new middle-low-emittance optics in 6.5 GeV.

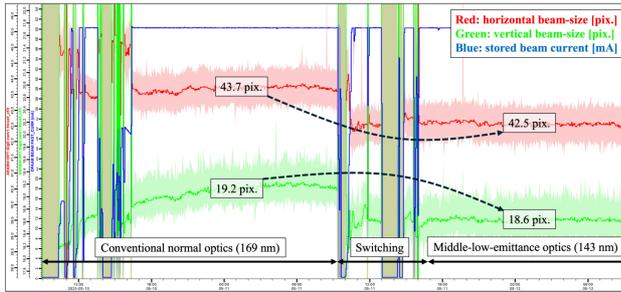


Figure 7: Transition from conventional normal-emittance optics to new middle-low-emittance optics in 5 GeV.

ていく必要があるが、X-Y coupling が従来 normal optics と middle-low-emittance optics で変化している、ということも考えられる。さらに、

1. local bump によるピクセル単位から mm 単位への変換係数の推定
2. LOCO [6] による実 β 関数の推定

などを実施すれば、 $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ 及び X-Y coupling の推定も可能になると考えている。

4.2 Streak Camera によるバンチ長測定

従来 normal-emittance optics と middle-low-emittance optics のそれぞれについて streak camera でバンチ長を測定した。バンチ長測定の一例を Fig. 8 に示す。また、測定結果について Table 5 に示す。バンチ長の計算値については SAD の計算結果を使用した。測定値は共に 50 mA 時のものである。どちらの optics についても近

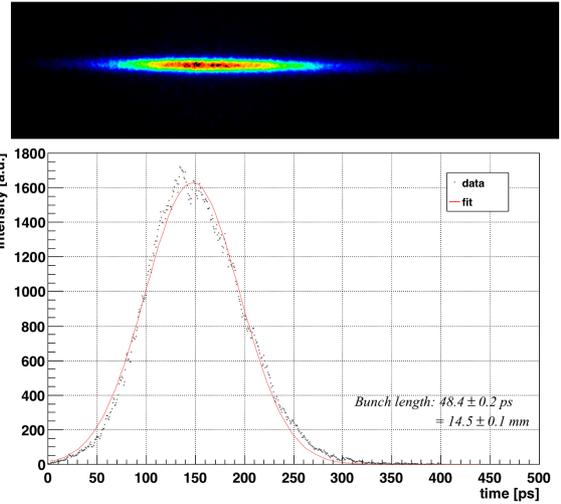


Figure 8: Image example of streak camera and its projection.

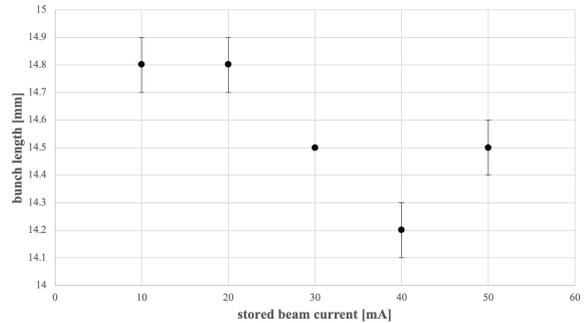


Figure 9: Dependence of bunch length on stored beam current in middle-low-emittance optics.

い値の比で、測定値の方が小さく観測された。この原因についてははまだよく理解されていない。Figure 9 に、middle-low-emittance optics におけるバンチ長の蓄積電流値依存性を示す。図中の error-bar は projection に対する gaussian fit に由来する。この測定では全ての点が測定誤差の範囲内、というわけではなかったが、蓄積電流値に対して大きな依存性、例えば蓄積電流値に対する単調増加は認められなかった。

5. ユーザー運転への適用

2023年5月から、middle-low-emittance optics のユーザー運転への適用を開始した。適用に至るまでは、先に述べたようなスタディに追加して、BL ユーザー側に対する試供試験も実施した。これについては参加 BL が限られているため取得できたデータは限定的ではあるが、 ε_x が小さくなった効果が強く実感された、とは言い難い結果であった(急激にビームサイズが大きくなった、などはなかったが、ビームサイズの縮小量がこちらの事前の見積もりと相違があるなど)。しかし、輝度や光量の著しい減少や、運転が不安定になる、などの問題はなく、一方で AR-TBL に対する安定度確保に寄与できる、ということから、middle-low-emittance optics はユーザー運転に採用となった [5]。

適用後は従来 optics と同様の安定度で運転ができていますが、様々な要請やより安定した運転のため、middle-low-emittance optics 導入と前後して、様々な対応を行っている。

5.1 Global Tune Correction の適用

放射光加速器では、挿入光源のギャップをユーザーの利用したい波長等に合わせて変化させると、電子ビームに印加される磁場強度が変わり、tune が変化する。PF-AR と同じ KEK つくばキャンパスにある PF-ring では挿入光源を挟むようにして tune 補正用の 4 極電磁石がインストールされており、feed-forward で変化分を補正するような仕組みを採用している。PF-AR ではこれまでそのような仕組みがなかったが、今回の middle-low-emittance optics 導入後に、normal cell の QF, QD を用いた tune 補正システムを採用した。

5.2 Single Bunch 純化のための β_y の調整

先に述べたように、PF-AR は大強度 single bunch 運転を採用している放射光源であり、時分割観察を行っているユーザーにとって、single bunch の純度は重要である。純度を維持するため、設定された bunch 以外に存在する電子は南直線部に設置されているストリップラインキッカーで蹴られるが、この kick 力は垂直ビームサイズ σ_y に比例している。今回の middle-low-emittance optics ではエミッタンスそのものが小さくなったとともに、南直線部の β_y も従来 optics と比較して小さくなっており、純度の維持に問題が生じた(本来は挿入光源のギャップ長は BL ユーザーが自由に換えられるが、ギャップに対して設定できる範囲が限定された)。これらを補うため、 β_y を局所的に大きくするような optics の minor change を実施した。

6. 今後の課題

今回、PF-AR では従来 optics から ε_x を下げた middle-low-emittance optics の作成とユーザー運転への適用を実施した。しかし解決すべき課題も多く、限られたスタディ時間を有効に利用して、さらなる PF-AR の魅力向上に努める必要がある。以下にそれら課題についていくつか挙げたいと思う。

6.1 実 Optics の測定と Emittance の推定

middle-low-emittance optics を適用し、 ε_x を下げた設計を適用してはいるが、測定データの解析が不十分であることから、実際にユーザーにとって有益な導入になっているかは未だ不明瞭である。実 optics の推定には先に述べたような LOCO を用いることで可能となる。最終的なゴールは BL ユーザー側との試供試験で、こちら側の推定と consistent で positive な結果が得られることであるが、そもそも BL での評価は、光源点からミラーなどを経由した長い転送が伴うため、大きな error を伴う可能性がある。従って、BL 光試供試験の前に、十分に加速器側で閉じた中で、middle-low-emittance optics 導入の効果を評価すべきである。

6.2 入射時に観測される放射線ロスの低減

現在 6.5 GeV の middle-low-emittance optics において、入射時に入射点直下の BL, NW14 にて放射線ロスが観測されている。これは 5 GeV では観測されていない。現在、6.5 GeV と 5 GeV では南直線部の β_y 調整などで optics が微妙に異なっているが、このロスがこの optics の差に起因しているのか、単純にエネルギーの差に起因しているのか不明である。この原因を特定するため、今後 5 GeV と 6.5 GeV の optics のそれぞれで particle tracking simulation を実施したいと考えている。

6.3 Full-low-emittance Optics の導入

本研究の本来の目的は理論的に達成できる最小エミッタンスを持つ“full-low-emittance optics”を導入することである。これは本稿の序盤で述べたように、当初の導入検討時とは異なり、RF 空洞を保護するための RF マスクがインストールされた結果、この点が最小 physical aperture となったことで、導入が難しくなっている。しかし、今回の middle-low-emittance optics のための検討、実際の導入を経て多くの知見が積み重ねられた。Middle-low-emittance optics に対してさらなる検討の緻密化、例えば入射ビームと入射 aperture の最適化や、synchrotron 入射などを導入することで full-low-emittance optics を実現することができるかもしれない。この full-low-emittance optics の検討については、現行の middle-low-emittance の現状把握や上記に挙げたような課題解決と平行して検討を進めていく予定である。

謝辞

今回の middle-low-emittance optics の作成やスタディ、ユーザー運転への導入に関して、原田健太郎さん、下崎義人さん、中村典雄さん、小林幸則さん、高木宏之さん、篠原智史さん、高井良太さん、帯名崇主幹を始めとして KEK 加速器研究施設第 6 研究系の皆様には様々なご指導をいただきました。この場を借りて改めてお礼申し上げます。また、丹羽尉博さんをはじめとする KEK 物質構造科学研究所放射光実験施設の方々には optics 変更の際に様々な測定をしてくださるなど、ご協力いただきました。また、運転・スタディ時には三菱電機システムサービスの皆様にご協力いただきました。この場を借りて御礼申し上げます。

参考文献

- [1] N. Higashi *et al.*, “CONSTRUCTION AND COMMISSIONING OF DIRECT BEAM TRANSPORT LINE DEDICATED FOR PF-AR”, PASJ2017, Sapporo, Japan, Aug. 2017, pp. 212-215.
- [2] <https://acc-physics.kek.jp/SAD/>
- [3] N. Higashi *et al.*, “LOW EMITTANCE OPTICS FOR PF-AR”, PASJ2017, Sapporo, Japan, Sep. 2017, pp. 325-328.
- [4] C. Mitsuda *et al.*, “CONSTRUCTION OF THE GeV RANGE TEST BEAMLINE AT KEK PF-AR”, PASJ2022, online, Japan, Oct. 2022, pp. 320-324.
- [5] C. Mitsuda *et al.*, “LAUNCH OF THE NEW GeV RANGE TEST BEAMLINE FOR THE DEVELOPMENT OF AN INSTRUMENTATION TECHNOLOGY IN THE KEK PF-AR”, PASJ2024, Yamagata, Japan, Jul. 31-Aug. 3, 2024, WEP029, this meeting.
- [6] J. Safranek, “Experimental determination of storage ring optics using orbit response measurements”, Nucl. Instru. Meth. A, vol. 388, pp.27-36, 1997. doi.10.1016/S0168-9002(97)00309-4