

## PF-ARの低エミッタンス化 LOW EMITTANCE OPTICS FOR PF-AR

東直\*, 原田健太郎, 長橋進也, 宮島司, 小林幸則, 中村典雄

Nao Higashi\*, Kentaro Harada, Shinya Nagahashi, Tsukasa Miyajima, Yukinori Kobayashi, Norio Nakamura  
High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

### Abstract

PF-AR is a 6.5 GeV storage ring for the synchrotron radiation with the emittance of about 300 nmrad that is about two orders of magnitude larger than that of the present standard light sources. The injection energy was 3 GeV and the beam instability was so severe that we almost cannot change the optics and operating point from the original one designed in 1980s with keeping the injection and acceleration stability. A new 6.5 GeV full energy direct beam transport (BT) line was constructed and PF-AR started the user-run with this new BT from Spring 2017. The injection was very smooth with the weak beam instability compared to the case of 3 GeV and thus there is a new possibility to change the optics and operating point for the low emittance. In this presentation, we review the previous low emittance optics study in 2003 and the preparation status for the machine study with the new BT.

### 1. はじめに

PF-ARは6.5 GeVの蓄積リング型放射光源で、周長377 m、エミッタンスは約300 nmradで、蓄積電流値は約50 mA、常にシングルバンチで運転されている。建設以来、2016年までは3 GeVでビームを入射、蓄積し、それを6.5 GeVまで加速してユーザー運転を行っていたが、現在は6.5 GeVに対応したAR専用の新入射路が建設され、フルエネルギー入射で加減速することなくユーザーランが行われている[1]。6.5 GeVに比べると3 GeVでは、蓄積ビームのバンチ長が短く、減衰時間が長い為、不安定性の影響を受けやすい。また、限られた周長で常伝導空洞を使って6.5 GeV運転を行う為、空洞はAPS型の21セル多連空洞が6モジュール必要で、HOM励起の観点から不安定性を完全に防ぐことが非常に難しい。ARのノーマルセルはFODO構造で、セルあたりのチューンの進みを増やすことで、エミッタンスを下げることができる。過去に、エミッタンスを現在の約半分の160 nmradまで小さくしたオプティクススタディを行ったことがあるが、大電流の蓄積と安定した運転が非常に困難であり、また、途中で機器が損傷してしまったこともあり、中止となった。入射エネルギーが6.5 GeVになり不安定性の影響がかなり改善された現在、機器保護の観点からはかなり慎重にならざるを得ないが、再び低エミッタンスのオプティクスへの挑戦を検討する価値は十分にある。ここでは、過去のスタディの経緯と結果について振り返った後、これからのスタディにおいて何が重要なのかについて発表を行う。

### 2. 過去の低エミッタンスオプティクスの概略

まずは過去のスタディで試された低エミッタンスオプティクスの概略についてここで述べる。

パラメータの詳細をTable 1に示す。ARのノーマル

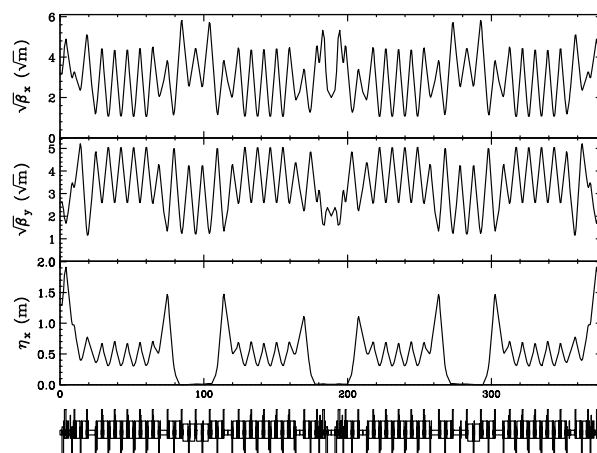


Figure 1: Optics of the ring.

セルはQF-B-QD-BというFODO構造であり、ノーマルセルの水平方向の位相の進みをセルあたり90度から140度まで増やすことで、エミッタンスを約半分の約160 nmradまで減らすことができる。これにより、光の輝度を0.1 keVで約2.3倍、1 keV以上で約3倍まで増やすことができる[2]。また、電磁石の電流値は既存電源で対応できる範囲である。低エミッタンスのオプティクスをFigure 1に示す。図の始点は南直線部であり、そこで分散関数が大きくなっているのは、隣接する旧入射点でのオプティクス最適化の為である。旧入射点でのダイナミックアパーチャは現在のオプティクスで約65 mm、低エミッタンスのオプティクスで約25 mmで、バケットの範囲で運動量が変わってもほとんど一定である。物理アパーチャと比較すると、両者とも物理アパーチャよりも広く、ダイナミックアパーチャに問題はない。

\* nao.higashi@kek.jp

Table 1: Parameters of the Ring

	Present	Low Emittance	
Circumference [m]	377.26		
Phase advance / cell			
horizontal degree	90	140	
vertical degree	90	40	
Betatron tune			
horizontal	10.14	11.84	
vertical	10.21	8.38	
Chromaticity			
horizontal	-13.60	-20.67	
vertical	-13.37	-14.78	
Energy [GeV]	6.5	3.0	
Energy spread $\sigma_E/E$	$1.15 \times 10^{-3}$	$5.28 \times 10^{-4}$	
Energy loss [MeV/rev]	6.661	0.302	
RF voltage [MV]	17.4	3.0	
Damping time			
horizontal [msec]	2.45	24.95	
vertical [msec]	2.46	24.98	
longitudinal [msec]	1.23	12.50	
Emittance [nmrad]	287.59	162.60	34.7
Momentum compaction	$1.26 \times 10^{-2}$	$7.50 \times 10^{-3}$	$7.49 \times 10^{-3}$
Synchrotron tune	0.054	0.043	0.028
Bunch length [mm]	15.94	11.81	8.61
Bucket height [%]	0.84	1.30	1.06

### 3. 過去のスタディの概要

PF-AR の低エミッタンス化スタディは 2003 年 1 月に初めて試行され、その後 4 月より本格的に系統的なスタディが開始された。

2003 年 4 月 2 日のスタディでは、約半日の調整後、数 mA の蓄積までは容易にできたが、入射し続けてもそれ以上電流が増加しないという状況に陥った。その後、当時の PF-AR で行っていた不安定性対策 (RF 電圧、betatron tune、bunch-by-bunch フィードバック、8 極電磁石などの調整、及び head-tail 不安定性を考慮した色収差測定・補正等) を実施した結果、初日に最大約 27mA までの蓄積に成功した。その後、各種調整を重ねながら、安定して運転電流である約 50mA までの蓄積が可能になるパラメータを探索したが、見つかることができなかった。

翌 4 月 3 日のスタディでは、様々な調整が継続されたが、蓄積電流がある状態での入射率は低く、再現性や安定性も非常に低いまま、目標を満たすようなパラメータを見つけることはできなかった。bunch-by-bunch フィードバックを長時間に渡り大出力設定で運転した結果、ストリップラインキッカー用の RF アンブ 4 台の内 3 台に不具合が発生し、その後の午後 5 時頃、RF トラブルの為にそれ以上の運転が困難な状況となった。西直線部の RF 空洞#1 の HOM カブラの出力ケーブルに接触不良があり、その部分が焼損し、真空リークしたのが原因であった [3]。バンチ長が短い 3 GeV の状態で長時間の蓄積スタディを行った為、通常よりも多くのパワーが HOM カップラーからダミーロードに流れたと推測される。

上記トラブルのためユーザー運転開始が延期され、RF トラブルの復旧作業が行われた。故障箇所の修理後、真空引き及びビーム無しでのエイジングは順調に進んだが、ビーム調整を開始したところ西 RF#3 空洞が放電するという現象が起き、エイジングを続けても改善する

ことはなかった。そのため 4 月 14 日に西 RF 空洞#3 を detune して運転から外し、クライストロンからも立体回路を切り離し、西は空洞 3 台でユーザー運転を再開することとなった。

その後、2003 年 10 月、2004 年 6 月に行われたスタディでは、3 GeV と 6.5 GeV 間の加減速ループを考慮して入射パラメータを探索するスタディが行われたが、前回同様再現性や安定性が非常に悪く、最大蓄積電流も 30 mA を超えることができなかった。また、加速途中の約 3.4 GeV でビームが失われ、6.5 GeV まで加速することもできなかった。

2004 年夏に、西側 4 台、東側 2 台だった空洞構成を、西 2 台、東 4 台に変更し、西の空いた直線部に挿入光源を設置する改造が行われた。その際、不具合が発生して復旧できなかった#3 空洞が取り出され、予備空洞と入れ替えられて東直線部に設置された [4]。

RF 復旧が完了した 2004 年 10 月、12 月に再び入射パラメータを探索するスタディが行われたが、結局、再現性と安定性を欠いたままスタディを終えた。

その後、2005 年以降、空調や冷却水の安定性に関する調査を含め、スタディの主眼は入射時のパラメータ安定性と再現性を確保することが最優先となった。PF-AR の運転における最も困難な点は、完全に確立されたパラメータが存在しないことであり、低エミッタンスオプティクスでは特に顕著な問題であった。当時、通常の入射時にもこの問題は認識されており、安定した運転のため常に様々なパラメータを調整していた。

低エミッタンスオプティクススタディは 2005 年以降行われていないが、その後のスタディや調整の結果、冷却水や空調の安定性がある程度確立されており、現在では蓄積リング側が原因で入射が滞るような機会は減少している。

### 4. 低エミッタンス化再挑戦に向けて

低エミッタンス化スタディが行われた 2003 年及び 2004 年から現在までに PF-AR には様々な変化があった。そのうち低エミッタンス化に利点として働くのは、

1. 6.5 GeV のフルエネルギー入射
2. ストリップラインキッカー用 RF アンブの保護
3. HOM ダンパー用ケーブルの温度管理

である。1. については、2017 年に PF-AR 専用の直接入射路が建設され、リングエネルギーと同じ 6.5 GeV で入射することが可能になった。これにより damping time がこれまでの 3 GeV 入射の際と比較しおよそ 1/10 程度になり、様々な不安定性が抑制されることが期待される (Table 1)。ただし入射中のロスについては、6.5 GeV 入射の方がより厳しくなるという点に留意する必要がある。2. については 2003 年のスタディにおけるアクシデントをきっかけに、回路保護を設定した。本来 bunch-by-bunch フィードバックは 3 GeV 入射における不安定性を抑制するためのもので、6.5 GeV においてその効果は小さいと思われるが、2003 年のようなアクシデントが起こる危険性は排除される。3. についても 2003 年のアクシデントを教訓に対策を施したものであ

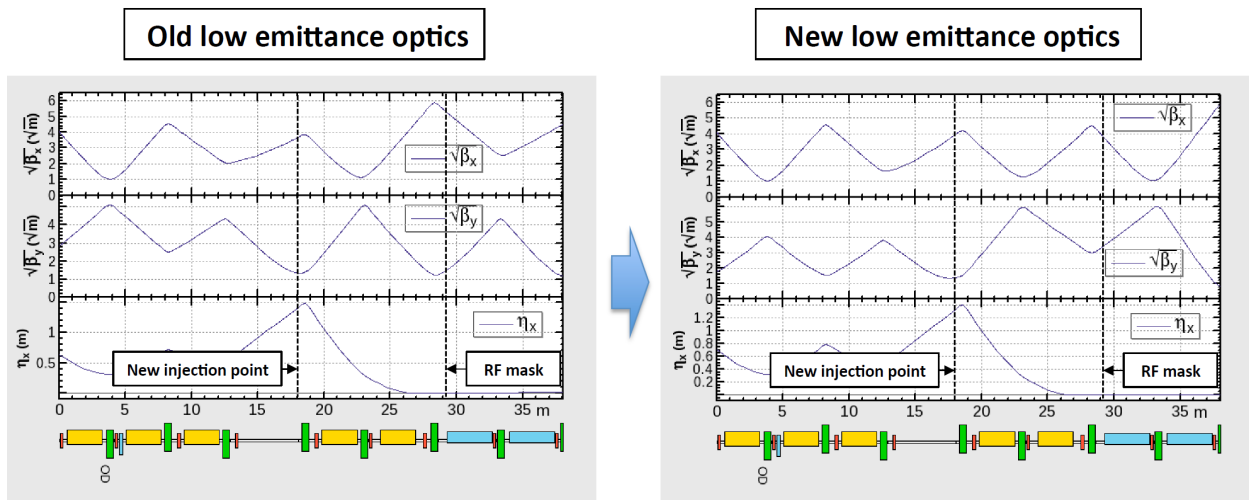


Figure 2: Optics of the low emittance ring. The left is the old optics designed for the study conducted in 2003 and 2004. The right is the design taking into account the existence of the RF mask with 19 mm-aperture.

Table 2: Comparison of Physical Aperture

	$\varepsilon_x$ [nmrad]	$\Delta p/p$	$\beta_x$ [m]	$\eta_x$ [m]	$\sigma_x$ [mm]	PA <sub>x</sub> [mm]	PA <sub>x</sub> [ $\sigma_x$ ]
New Injection Point	288	$1.15 \times 10^{-3}$	18.5	1.34	2.78	28.0	10.1
RF Mask			11.7	-0.05	1.84	19.0	10.3
New Injection Point	163	$1.14 \times 10^{-3}$	13.6	1.42	2.20	28.0	12.7
RF Mask			27.8	0.00	2.13	19.0	8.93

り、温度は運転中常に監視されている。さらに、温度監視はインターロックに組み込まれており、2. と同様 2003 年と同じようなアクシデントが起こる危険性を排除している。

一方、低エミッタンス化を行うにあたり、

1. RF マスク
2. キッカー電磁石数の減少
3. 入射点移動における optics の制限

のように新たに考慮すべき課題も存在する。1. について、2007 年に加速空洞を放射光から保護する目的で、RF マスクと呼ばれる保護マスクを設置した [5]。リングにおける最小物理アパーチャが半径 19 mm の RF マスクになると、それよりも広い入射アパーチャを通過したビームがそこで削れ、マスクが放射化してしまう。現在のエミッタンス 288 nmrad における物理アパーチャの現状と、低エミッタンス化を現状で行った際の物理アパーチャについて Table 2 にまとめる。ここで  $\sigma_x$  は水平方向のビームサイズ、PA は物理アパーチャである。物理アパーチャをその場所でのビームサイズで規格化した値を Table 2 に PA<sub>x</sub> [ $\sigma_x$ ] としてまとめている。現在の optics では RF マスクの方が新入射点よりも広いいため、ビームが RF マスクと干渉することはない。しかし低エミッタンス optics を現在の入射点で仮定すると、RF マスクが新入射点よりも狭くなる。

2. キッカー電磁石数の減少によって、入射において設定できる自由度が減少する。旧入射点ではキッカー

電磁石は 4 台あり、 $x$  及び  $x'$  を独立して設定できたが、現在の新入射点ではキッカー電磁石は 3 台に減少し、 $x$  と  $x'$  をそれぞれ独立に設定することはできない。また、3. については、旧入射点においては南側の optics に制約が無い分入射の方に余裕をもった設定が可能だったが、新入射点は南西に移動し、直下に RF 空洞があるため、optics は制限される。

以上のような過去にはなかった制約がいくつかあるが、現在これら全ての要求を満たすような新たな低エミッタンス optics を設計している。Figure 2 にその 1 例を示した。過去の低エミッタンス optics では新入射点における  $\beta_x$  が RF mask における  $\beta_x$  に対して小さい。新たな optics はその差を縮める、もしくは大小関係を逆転させる必要がある。

## 5. まとめ

PF-AR は 6.5 GeV の放射光施設であるが、1987 年のユーザー運転提供開始からその optics はほとんど変わっていない。2003 年と 2004 年に tune advance を変えることによる低エミッタンス optics スタディを実施したが、強い不安定性の元で入射を繰り返したため様々な機器の故障を引き起こした。2017 年にリングエネルギーと同じ 6.5 GeV で入射できるような PF-AR 専用の入射路が建設された。これによりビーム不安定性が抑制されることが期待でき、改めて低エミッタンス化を目指したスタディを行う予定である。

## 参考文献

- [1] 東直 *et al.*, “PF-AR 直接入射路の建設とコミッショニング”, 第 14 回日本加速器学会年会, 札幌市, 2017 年 8 月 3 日, THOL10.
- [2] Y. Kobayashi, “PF リングおよび PF-AR の低エミッタンス運転”, 第 22 回 PF シンポジウム, 2005 年 3 月 18 日.
- [3] 春日俊夫, “PF 光源系の現状”, PF ニュース, Vol.21, No.1, 2003 年 5 月.
- [4] 春日俊夫, “PF 光源系の現状”, PF ニュース, Vol.22, No.2, 2004 年 8 月.
- [5] 高橋毅 *et al.*, “AR 加速空洞用放射光可動マスクの設置とビームテスト”, PF-RING REPORT 905, 2007 年 10 月 30 日.