

SuperKEKB入射器におけるシンクロトン放射光モニターを用いた非破壊の エミッタンス自動調整システムの開発と運用

WEPO55



Development and Operation of Non-Destructive Emittance Automatic Tuning System utilizing
Synchrotron Radiation Monitors in SuperKEKB LINAC

清宮 裕史、飯田 直子、森 隆志

KEK

1. 概要

SuperKEKBにおいて入射ビームのエミッタンスやエネルギー分散は、入射効率に大きく影響する重要なパラメータである。Linacでは加速構造を通過するビームの軌道によってビームテイルが蹴られるため、これがエミッタンスの悪化に繋がる。これらの影響はビーム軌道を適切に調整することで最小限に抑えることができる。KEKB Linacはパルスステアリングを用いて4つの異なるリングにビームを供給しているが、リニアックの上流部ではパルスステアリングの設置場所が限定的であり、上流部での軌道ドリフトがエミッタンスを悪化させ入射効率を低下させる要因となっている。軌道変動の原因の1つは気温変動と考えられており、エネルギー分散もまた同様である。この問題への対策として、位相の異なる2台のシンクロトン放射光モニター (SRM) を用いた非破壊のエミッタンスとエネルギー分散の自動調整システムを開発した。

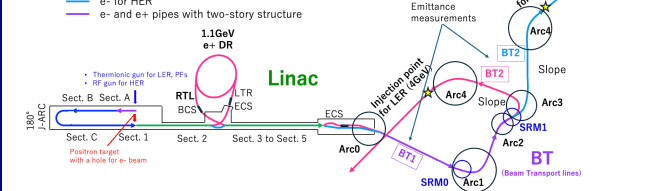
2. 実現したビームパラメータと目標値との比較

	Beam	Bunch Charge (nC)	Norm. Emitt. (Hor./Ver.) (μm)	Energy Spread (%)
Target	e ⁻	4	40/20	0.07
	e ⁺	4	100/15	0.16
Actual (April 2026) (LINAC end)	e ⁻ (1st)	1.9	94/71	0.075
	e ⁻ (2nd)	1.8	136/103	
	e ⁺ (1st)	3.1	111/3.5	0.068
	e ⁺ (2nd)	2.9	115/3.9	

・電子ビームについてエミッタンス改善が望まれている。

・より高い電荷の電子ビーム輸送する場合、Belle II BGのためにより低いエミッタンスを持つビームが必要不可欠。

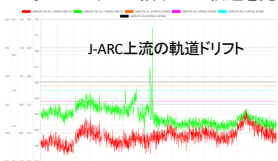
— e⁻ for HER, and primary e⁻ for LER
— e⁻ for HER and e⁺ for LER with the same beam pipe in Linac
— e⁺ for LER
— e⁻ for HER
— e⁻ and e⁺ pipes with two-story structure



3. エミッタンス変動

軌道ドリフト

入射器上流 (Sector A, B, J-ARC, and C) ではパルスSTの数が限定されている。そのため、この領域では軌道を完全に固定することが難しい。



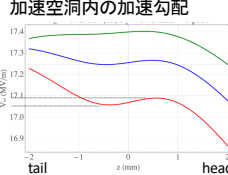
SP_R0_02 X pos	EmittX	AX	EmittY	AY
g (global value)	110.067	15.104	115.676	20.801
+0.1mm	174.65	37.921	109.955	29.962
+0.2mm	239.957	66.435	131.835	36.296
+0.3mm	247.566	68.643	121.166	38.906

0.1 mm の軌道差でBT1でのエミッタンスが ~70 μm 程度増大している。この値は無視できない。

二球問題

2つのピークを持つエネルギー分布

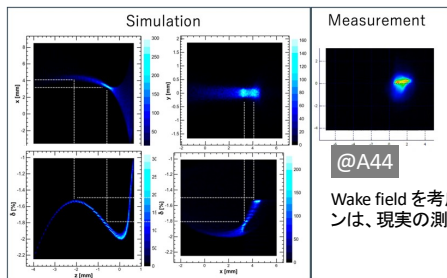
Longitudinal wake を考慮した加速空洞内の加速勾配



・ビーム電荷が約 2 nC 以上であれば、エネルギー分散が最小となるのはエネルギー分布に2つのピークを持つ場合となる。

・ビームの前方と後方にエネルギーのピークを持つため、z-δ に依存したビームとなる。

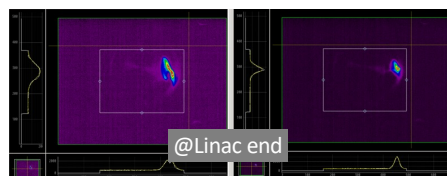
- ・加速空洞内の Transverse wake によって蹴られたビームは x(y)-z 依存を持つ。
- ・z-δ と x(y)-z 依存を持つビームは位相が進むことで x(y)-δ 依存を持つようになる。
- ・最終的に、設計した dispersion が無い場所に dispersion が発生する。



直線でも二球が観測

Wake field を考慮したシミュレーションは、現実の測定を再現している。

- ・この二球現象は軌道調整のみで解消することができ、エミッタンスも大きく改善した。



- ・原理的には、この二球問題は加速空洞のRF位相を変えてエネルギー分散を小さくする要領である程度補正することができるが、根本的な解決にはならない。
- ・Wake fieldによって生じた二球は軌道調整で解消すべき問題といえる。

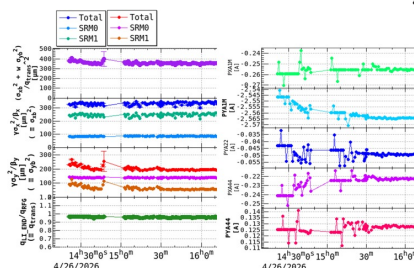
4. Emittance auto tuning system (EAT)

導入

- ・2つのシンクロトン放射光モニター (SRM) がBT電子ビームラインに異なる位相の場所に設置されている。
- ・SRMで非破壊測定されたビームサイズを最小化するように、入射器上流のパルスSTをパラメータとして自動で位相の異なる2箇所のビームサイズを最小化する = エミッタンスを最小化するシステムを構築。
- ・非破壊測定であるため、基本的にSuperKEKB MRIに入射中は常時補正を行った。
- ・最適化手法としてはDownhill SimplexあるいはBayesianを選択することができる。

軌道と全RF位相の調整による改善

- ・入射器におけるRF位相の一括調整が、入射効率に大きく影響を与えることが判明したため、これもパラメータとしてシステムを改修。
- ・このRF位相の一括調整は、RF gun 用レーザーの位相を変更することほぼ等価である。
- ・RF位相の調整はビーム軌道を変化させるため、RF位相→軌道の順で調整を行っている。
- ・これにより、入射効率だけでなく Belle II 検出器のBGも大きく改善した。



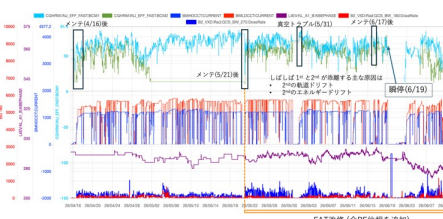
BT1でのエミッタンスの推移

軌道調整のみの場合:

- ・1st バンチのみの運転の場合、垂直エミッタンスが EAT 稼働後は安定して 50 μm 未満まで改善していることが多い。
- ・一方、ダブルバンチ運転の場合 2nd と同時に最適化しようすると 2nd に引きずられて 1st も悪化し、エミッタンスの改善は期待したほどではなかった。

全RF位相調整も行った場合:

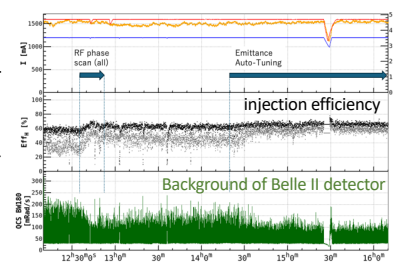
- ・全RF位相を導入後はこれが有程度解消され、1st, 2nd 共に良い状態を維持できている。



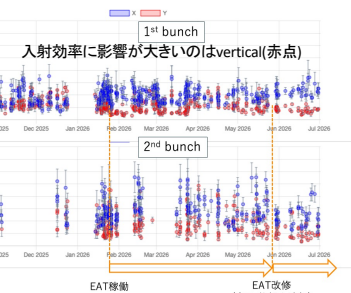
目的関数:

$$\frac{\sum_i \sigma_{x,i}^2 / \beta_{x,i} + w \sum_i \sigma_{y,i}^2 / \beta_{y,i}}{Q_{\text{Linac end}}^2 / Q_{\text{RF gun}}^2}$$

- ・入射効率に関しては水平エミッタンスよりも垂直エミッタンスの方が重要であるため、現在は w=2 に設定。
- ・本システムは、意図せず軌道を乱すことを避けるため、入射器およびBTの軌道FBシステムと連携して動作するように設計されている。



- ・左図の最上図は目的関数の値の推移 (紫色)、右図はEAT稼働時のパルスST電流の推移を表している。
- ・時間の経過とともに目的関数の値は減少し、それと連動して、上図に示すよう入射効率&BGが大きく改善した。



入射効率の推移

- ・メンテ後の入射は、これまで2nd バンチの入射に苦労しており数日調整が必要なものもあったが、本システム導入後は特別な調整なしに入射することが可能となった。
- ・入射効率はMRのTuneによって大きく変化する。
- ・入射効率のみで入射ビーム性能を見ようとする場合、あくまで目安程度。

BT2でのエミッタンス測定結果

- ・2026/2/13のBT2での測定で直近では最良の垂直エミッタンスであった。
- ・2025年では y_{ey} > 200 μm が当たり前で、2nd に関してはMR入射できない状態であった。
- ・全 RF 位相をEATで最適化するようにした後 (5月中旬後) は更に改善し、BT2の測定に関してはこれまでで最良の結果を得た。
- ・目標 y_{ey} ~ 40 μm と比べると依然大きい。

		2026/2/13		2026/6/17		2026/6/24	
		1 st	2 nd	1 st	2 nd	1 st	2 nd
BT1 (WS)	y _{ey} [μm]	81 ± 9	144 ± 16	118 ± 16	69 ± 32	100 ± 16	208 ± 26
	y _{ey} [μm]	41 ± 5	79 ± 8	36 ± 4	39 ± 9	24 ± 11	31 ± 6
BT2 (MSE16)	1 st						
	y _{ey} [μm]	173 ± 3	237 ± 3	188 ± 3	238 ± 3	289 ± 3	-
	y _{ey} [μm]	134 ± 84	176 ± 18	105 ± 2	137 ± 11	145 ± 11	104 ± 9

まとめ

入射器のビーム軌道変動に伴い、エミッタンスが変動する。この変動を低減するため、シンクロトン放射光モニターを用いた非破壊エミッタンス調整システムを開発、運用を行った。同様に、エネルギー分散の変動を低減するために、全RF位相調整を調整パラメータとして導入した。本システムにより、エミッタンスの改善、安定性の向上、SuperKEKBへの入射効率の向上、そしてBelle IIIにおけるバックグラウンドの低減に成功した。しかし、入射効率や安定性は依然として十分ではない。入射性能に影響を与える 2nd バンチのみを選択的にキック可能な高速キックアーや入射点での1stと2ndのエネルギー差をなくするような自動調整を導入することで、さらなる入射効率と安定性の向上を図るつもりである。