

KEK 電子陽電子入射器の SuperKEKB 入射性能向上計画 SuperKEKB INJECTION IMPROVEMENT PLAN AT KEK ELECTRON POSITRON INJECTOR LINAC

古川和朗 *^{A)}, 明本光生 ^{A)}, 荒川大 ^{A)}, 荒木田是夫 ^{A)}, 飯田直子 ^{A)}, 惠郷博文 ^{A)}, 榎本收志 ^{A)}, 榎本嘉範 ^{A)}, 大沢哲 ^{A)}, 岡安雄一 ^{A)}, 小川雄二郎 ^{A)}, 柿原和久 ^{A)}, 梶裕志 ^{A)}, 片桐広明 ^{A)}, 紙谷琢哉 ^{A)}, 川村真人 ^{A)}, 佐武いつか ^{A)}, 佐藤政則 ^{A)}, 設楽哲夫 ^{A)}, 周翔宇 ^{A)}, 白川明広 ^{A)}, 杉村仁志 ^{A)}, 諏訪田剛 ^{A)}, 清宮裕史 ^{A)}, 染谷宏彦 ^{A)}, 竹中たてる ^{A)}, 田中窓香 ^{A)}, 張叡 ^{A)}, 中島啓光 ^{A)}, 夏井拓也 ^{A)}, 坂東佑星 ^{B)}, 東保男 ^{A)}, 肥後寿泰 ^{A)}, 本間博幸 ^{A)}, 松下英樹 ^{A)}, 松本修二 ^{A)}, 松本利広 ^{A)}, 三浦孝子 ^{A)}, 三川勝彦 ^{A)}, 宮原房史 ^{A)}, 矢野喜治 ^{A)}, 横山和枝 ^{A)}, 吉田光宏 ^{A)}, 由元崇 ^{A)}, レーマン・ムハマド・アブドウル ^{A)}, 王迪 ^{B)}

Kazuro Furukawa* ^{A)}, Mitsuo Akemoto ^{A)}, Dai Arakawa ^{A)}, Yoshio Arakida ^{A)}, Naoko Iida ^{A)}, Hiroyasu Ego ^{A)}, Atsushi Enomoto ^{A)}, Yoshinori Enomoto ^{A)}, Satoshi Ohsawa ^{A)}, Yuichi Okayasu ^{A)}, Yujiro Ogawa ^{A)}, Kazuhisa Kakihara ^{A)}, Hiroshi Kaji ^{A)}, Hiroaki Katagiri ^{A)}, Takuya Kamitani ^{A)}, Masato Kawamura ^{A)}, Itsuka Satake ^{A)}, Masanori Satoh ^{A)}, Tetsuo Shidara ^{A)}, Xiangyu Zhou ^{A)}, Akihiro Shirakawa ^{A)}, Hitoshi Sugimura ^{A)}, Tsuyoshi Suwada ^{A)}, Yuji Seimiya ^{A)}, Hirohiko Someya ^{A)}, Tateru Takenaka ^{A)}, Madoka Tanaka ^{A)}, Rui Zhang ^{A)}, Hiromitsu Nakajima ^{A)}, Takuya Natsui ^{A)}, Yusei Bando ^{B)}, Yasuo Higashi ^{A)}, Toshiyasu Higo ^{A)}, Hiroyuki Honma ^{A)}, Hideki Matsushita ^{A)}, Shuji Matsumoto ^{A)}, Toshihiro Matsumoto ^{A)}, Takako Miura ^{A)}, Katsuhiko Mikawa ^{A)}, Fusashi Miyahara ^{A)}, Yoshiharu Yano ^{A)}, Kazue Yokoyama ^{A)}, Mitsuhiro Yoshida ^{A)}, Takashi Yoshimoto ^{A)}, Muhammad Abdul Rehman ^{A)}, Di Wang ^{B)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

^{B)} The Graduate University for Advanced Studies (SOKENDAI)

Abstract

KEK electron positron injector has established simultaneous top-up injections in 2019 for 4 rings of SuperKEKB HER, LER, PF ring and PF-AR as a base of the both elementary particle physics and photon science experiments even under a quite short beam lifetime. It improved the injection stabilities while the SuperKEKB broke the world record of the collision luminosity of the previous project KEKB. As the collision performance improves, the beam-beam effect makes the dynamic aperture shrink, and the beam lifetime reduces further. Thus, it became indispensable to increase the injection beam charge and to lower the emittance in several years. The injector upgrade plan is described.

1. はじめに

KEK 電子陽電子入射器は、SuperKEKB 素粒子衝突実験と PF リング及び PF-AR での放射光科学実験の両分野を支えるために、2019 年から 4 リング同時トップアップ入射を開始し (Fig. 1)、トップアップ入射開始前後を比較すると 237% という比率で SuperKEKB 衝突実験の効率を向上させることに成功した [1]。SuperKEKB 蓄積リングの特に陽電子リングのビーム寿命が短く、2019 年に 30 分程度、さらに 2021 年には 10 分を割るような条件で実験を続けており、この同時トップアップ入射機構は不可欠であった。この入射機構を基礎として、入射器は徐々に入射性能を高めており、SuperKEKB の衝突性能の世界記録の達成にも貢献している。

蓄積衝突リングにおいては、衝突性能の向上のためにビームビーム効果が増大するとともに力学口径が小さくなり、ビーム寿命が当初の設計値よりも大幅に小さくなるのがわかって来た。ビーム寿命に対抗するために、蓄積ビームの口径と入射ビームの

口径を広げる努力とともに、入射ビームを増大させる、つまり大電流化の実現が急がれることになった。単純にバンチあたりの電荷を増大させれば、航跡場効果によりビームのエミッタンスが急激に悪化し、蓄積リングの入射口径を超えてしまうため、並行して低エミッタンス化を進める必要がある。このような蓄積リングにおける衝突性能向上の進展に合わせ

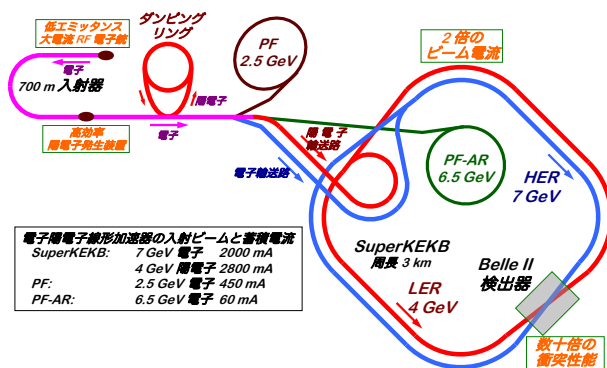


Figure 1: Layout of KEK electron/positron accelerator complex.

* kazuro.furukawa@kek.jp

て、入射器の性能向上を計画しており、装置の改造・増設を含めた計画の概要について述べてみたい。

2. KEK 複合加速器群における入射器

SuperKEKB に向けての入射を実現するために、以前から続けている PF リングと PF-AR の 2 つの放射光実験施設への電子入射を維持しながら、入射器の改造を 2011 年から続けてきた。低エミッタンス大電流電子ビームの実現のために、擬似進行波型軸外結合空洞、イリジウム・セリウム合金光陰極、及び大出力個体レーザーを組み合わせて用いた RF 電子銃を開発し、その安定化を進めている [2]。電子銃近傍での電流値としてはバンチあたり 5 nC も実現しているが、下流でエミッタンスが悪化するため入射ビームとしては現在のところバンチあたり 2 nC が最大である。大電流陽電子ビームについては、熱電子銃で発生させた大電流電子ビームをタングステン標的に照射し、対生成により発生した陽電子をフラックスコンセントレータの約 5 T のパルス高磁場と 0.5 T のソレノイド磁場で捕獲し、大口径 S バンド加速管で減速バンチングした上でダンピングリングまで加速する。当初フラックスコンセントレータの 0.2 mm 間隙での放電が発生し心配されたが、材質として無酸素銅に変えて銅ニッケル合金を採用することによって問題を解決し、さらに加速管の高周波終端器の改善により電流を増強しようとしている [3]。

SuperKEKB 入射の要求仕様を Table 1 に示す。生成された電子陽電子ビームの特性、特にエミッタンスとエネルギー拡がり、縦方向横方向の航跡場効果やコヒーレント放射光によって悪化させずに蓄積リングまで導いて入射させるためには、バンチあたりの電荷の大きさにより工夫が必要となる。既に低い電荷においても悪化現象は生じており、これまでの研究成果を適用して影響を最小限に抑える必要がある。並行して、装置の短期長期の安定化についても重要性が高い。

Table 1: Required Injector Beam Parameters

Beam	Positron	Electron	
Beam energy	4.0	7.007	GeV
Normalized emittance $\gamma\epsilon_{x/y}$	100/15	40/20	μm
Energy spread	0.16	0.07	%
Bunch charge	4	4	nC
No. of bunches/pulse	2	2	
Repetition rate		50	Hz

SuperKEKB の短いビーム寿命に対応しながら放射光施設を含めた実験を成立させるためには、4 リング同時トップアップ入射は必須と考えられる。その実現のために、パルス電磁石や測定器などのさまざまな高精度のパルス動作機器が開発され、また広域同期ビーム制御機構を活用してパルス毎の独立ビーム運用を実現することに成功している [1]。放射光科学実験を継続しながら SuperKEKB 向けの入射ビームを改善することは容易ではないが、この同時入射機構を最大限活用することによって、放射光実験へ

の影響を与えずに運転中にビーム開発を行うことも可能となる。

3. 低エミッタンス保持

先に述べたように、大電流のビームの低エミッタンスビームを長距離導くためには、エミッタンスを悪化させる要因を取り除いておく必要がある。ビームが加速管の中心を通過しなかった場合の航跡場による横方向エミッタンス悪化が評価されており、加速管のアライメントの誤差を短距離区間では 0.1 mm に、長区間では 0.3 mm に抑える必要がある [4–6]。東日本大震災によって 1 cm 以上アライメントがずれてしまった後、精力的に測定と補正が行われ、現在では、アライメントは改善されてきた [7,8]。下流区間ではエネルギー差を補正する必要からパルス電磁石の設置が進んでいるので、4 リング同時トップアップ入射時のビーム軌道も比較的整っているが、特に上流部では加速管の中心から 1mm 以上の軌道のずれがあり、パルス電磁石の増設による改善が必要と考えられる。

ビーム軌道の悪化の一つの要因としては、建物の歪みが疑われている。入射器の建物はエクспанション・ジョイントで接合された 8 つの区域から構成されているが、年間を通した測量により、ジョイント部で年間 1~2 mm の主に垂直方向の位置偏差が観測されている [9]。

また、ビーム光学関数の誤差により、思わぬ位置で分散関数が大きくなってしまい、加速によりエミッタンスの増大を招く場合がある。特に、180 度アーク部、入射器・ダンピングリング接合部、エネルギー圧縮システムなどで誤差をできるだけ抑制し、エミッタンスの悪化を防ぐ努力を続けている [10]。

ビーム輸送路では、航跡場効果が無視できるのでエミッタンス増大が小さいと期待されていたが、現在のところ大きく増大してしまっている。陽電子輸送路では、KEKB での入射エネルギーの 3.5 GeV から SuperKEKB の 4 GeV へ変更になったために、偏向電磁石の間隔を狭めることによって磁場の増強が行われた。この際に上下対称に修正できなかったために、発生した 6 極成分がエミッタンスを悪化させていることがわかり、ビームの観測結果を用いて、永久磁石による補正が行われている。

電子輸送路では偏向電磁石の修正は行われていないが、エミッタンスの悪化が大きい。エミッタンス測定上の障害により、ビームサイズが正しく測定できていなかったことがわかり一部は説明がついたが、未だ大きな食い違いが解明されていない。期待しない R56 の値によりビームバンチが圧縮され、コヒーレント放射光 (CSR) によるビーム不安定が引き起こされているとの指摘もあるが、暫定的な実験では確認できておらず、検討を続けている。蓄積リングの入射効率も低く、エミッタンスの悪化だけでは説明が付かないと思われ、入射点においても何か解明できていないことがあると考えられている。

さらに、1 パルス 2 バンチの運転においても、96 ns 離れた 2 バンチ目の入射効率が悪く、この解明も

急がれる。1バンチ目の作る航跡場の影響が観測されており、両バンチの軌道差を抑える方策も必要となる [11]。上流の適当な場所でマイクロ波のタイミングを調整し、エネルギー差を積極的に付けることで軌道を揃え、入射器終端での両バンチの均質化を図ってはいるが、この方策だけでは安定な運転は困難と思われる。

現在のところ衝突調整が続いており要求ビーム電流が仕様値の半分程度であるために、これらの課題は致命的にはなっておらず、衝突実験データ取得に時間を割くことが優先されているが、遠くない将来解決が必要である。

3.1 パルス電磁石

入射器内の下流部分においては、4つの蓄積リング加速器の入射エネルギーが、2.5 GeV から 7 GeV と大きく異なり、ビーム光学整合を取るためには異なるビーム収束力が必要となるため、パルス四重極電磁石の運用が重要となる。ちなみに KEKB 計画時には蓄積リングの入射条件が厳しくなかったために、入射器内では曖昧な光学条件でビーム輸送を行い、各蓄積リングへのビーム輸送路に別れてから光学整合を確立し直していた。しかし、SuperKEKB の入射光学条件の精度要求が高く、さらに航跡場の影響も避けなければならない、KEKB 時と同じ戦略を取ることはできない。



Figure 2: Example of pulsed magnets installed in the linac.

SuperKEKB 運転開始時には、バンチあたりの電荷が少なかったため、まずは下流部のビームサイズの小さい領域で、ボア径が小さい、つまりインダクタンスの小さく設計できるパルス四重極電磁石を 30 台ほど、軌道補正を行うパルス補正電磁石を 40 台ほど設置した [12, 13]。しかし、電流が徐々に大きくなるに従い、エネルギー差の小さい上流部においてもビーム整合やビーム軌道の精度を上げる必要があり、パルス電磁石の増設を進めている (Fig. 2)。ビーム光学整合の精度が高くないと、ビーム分散関数の設計値から差異によって、予想以上のビームエミッタンスと軌道への影響が現れることがわかってきている。上流部においてはビームサイズが大きいので、ボア径が大きくインダクタンスも大きな電磁石に対応する電源が開発された。

当面の設計目標の 4 nC のビームについて、エミッ

タンスを悪化させないためには、100 μm 以下の精度でビーム軌道を制御する必要がある。さまざまな機器の安定性から軌道の変動が観測されており、パルス電磁石の増設によりビームの安定化が計画されている。

3.2 高速補正電磁石

パルス電磁石は 20 ms 間隔の入射器のビームパルス毎に異なる磁場を発生し、ビームの光学整合や軌道を制御するために用いられる。そのため、パルス幅約 1 ms の磁場を発生する¹。一方、1 パルス 2 バンチの加速運転において、2 バンチ目の軌道を制御するためには、さらに高速のキッカー補正電磁石が必要となる。そこで、セラミクス埋め込み電極を用いるキッカー電磁石とパルス電源の開発を始めている [14]。96 ns 間隔の 2 バンチを区別して補正するために、100 ns 程度の立ち上がりを期待している。

3.3 架台駆動機構

先に述べたように、エクспанション・ジョイントでの年間 2 mm に及ぶ装置の偏差は影響が大きいと考えられ、電磁石による軌道補正を施しても、影響が残るかもしれない。そこで、加速管と収束電磁石の架台を遠隔操作する駆動架台を内製して用意している [15, 16]。今後、必要性を見極めながら設置を進める予定である。

4. 低エネルギー拡がり

大電流でありながら小さなエネルギー拡がりの電子ビームを加速するために、当初の計画では、時間方向に方形のビームを RF 電子銃から供給する予定であった [2]。そのために、周波数応答の優れたイッテルビウム添加の YAG レーザーのファイバーレーザーと固体レーザーの開発を行い、時間方向の波形整形を進めていた。低電流においてはビーム試験が進められたが、残念ながら現在のところ安定した大電流ビーム加速には至っていない。

光陰極としてはアルカリ金属を避け、東日本大震災の教訓から震災時に真空が破れても回復が容易であるように、真空悪化に耐性があり量子効率も高い合金を探し、現在のところイリジウム・セリウム合金を採用している [17]。アルカリ金属よりも量子効率が低いために大出力のレーザーを必要とすることになっているが、安定性を重視して使用を続けている。

そこで、ネオジウム添加の YAG レーザーを固体レーザーの媒体として採用し、電流を向上させてきた。しかし、時間方向の波形整形が可能となる応答が無いので、生成したビームは時間方向にガウシアン形状を持ち、結果として大電流においてはエネルギー幅が大きく拡がると思われる [5]。現在はバンチあたりの電荷が 2 nC 以下なので、入射は可能であるが、早い内に解決策を用意する必要がある。

¹ 四重極電磁石については、電力の 80% がパルス毎に回収されている。

エネルギー圧縮システム 陽電子ビームはダンピング・リングとバンチ圧縮システムを経由して加速され、入射器終端においてはエネルギー幅が大きくなっているため、当初から6台の偏向電磁石によるシケインと加速管を配置したエネルギー圧縮システムを利用している。上に述べたように大電流の電子についてもエネルギー圧縮システムが必要と考えられる。そこで、入射器からビーム輸送路に入った区域の偏向電磁石によるR56を利用して、エネルギー圧縮システムの構築を計画している。

先に述べたビーム輸送路でのエミッタンス悪化の原因が特定できていないため、CSRの影響などさまざまな可能性を考慮した上で、蓄積リングの時間方向の口径ともバランスを取りながら、設計を進めている。さらにマイクロ波源から設置場所への距離が大きくなるために、マイクロ波の減衰をできるだけ抑えた伝送路を構築すべく計画している。

5. 大電流ビーム

低エミッタンスと低エネルギー拡がりを達成することができれば、Table 1に示したSuperKEKB入射ビームを用意できるものと期待しているが、今後の衝突運転の進み方によっては、特に陽電子ビームの寿命が短くなる可能性もあり、将来の可能性として、バンチあたり6nC程度まで陽電子を加速することも想定しなくてはならないかもしれない。

先に述べたように、陽電子捕獲磁場を発生させるフラックスコンセントレータの放電の問題が解決され、さらに陽電子ビーム損失を減らすべく標的直後で直ちに高電界で加速するために電界を上げる必要がある。加速管の高周波終端器における放電が懸念されており、その改善により設計値電圧に近づけるよう正常化できると期待している。

陽電子標的部では、標的脇の直径2mmの穴に電子を通過させて加速管に通す際に、航跡場効果を抑えるために電子ビームが加速管の中心を通るように装置を配置している。つまり、直径4mmの陽電子標的自体は中心からずれて、中心からの偏差が3.5mmとなっており、これを中心に近づけることが好ましい。標的直後に設置可能なビーム位置モニタが最近開発されたので、このモニタで陽電子を観測しながら調整を行えば、陽電子の収量を上げられるのではないかと期待される[18]。

6. 最大エネルギー

SuperKEKBの衝突実験は、通常B中間子のうち $\Upsilon(4S)$ 状態を生成するようなエネルギーで行っているが、重心エネルギーで440 MeVほど高い $\Upsilon(6S)$ 状態での実験にも期待がある。

入射器に設置されている約230本の加速管のうち、約150本は製造から40年経過したものであり、また当初の設計加速勾配は8 MeV/mであったところ、現在は20 MeV/mで使用されている。そのため劣化が激しく、徐々に印加電圧が下がっており、また電子ビーム溶接部から水漏れを起こすものも多くなって

いる。そこで、2023年までに全体の7%に当たる16本の加速管を交換し、 $\Upsilon(6S)$ 状態での実験にも備えようとしている[19]。しかし、今後も劣化は進むと考えられ、どの程度の数の加速管の交換が必要か見極めようとしている。

また、大電力パルス・クライストロン電源に使用されているパルス形成回路のコンデンサが製造から30年を超えており、微量のPCBを含んでいる可能性があり、さらに破壊検査が必要となるために、対象の約700台の交換を予定している。これらのコンデンサは性能と安全のためにセラミック容器を使用しているため、製造に時間を要することに注意を払い、交換を始めているところである。

7. まとめ

このようにKEKの電子陽電子入射器は、今後も複数装置の更新を行いながら、素粒子物理と放射光科学の両分野の実験を支えていく予定である。特にSuperKEKB向けのビーム性能の向上を図るために、引き続きさまざまな技術研究開発をもって、各分野に貢献したいと考えている。

参考文献

- [1] K. Furukawa *et al.*, “Advanced acceleration mode switching for simultaneous top-up injection at KEK electron/positron injector linac”, in *Proc. PASJ2020*, Matsuyama, Japan, 2020, pp.1-6.; https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2020/proceedings/PDF/WE00/WE00P01.pdf
- [2] M. Yoshida *et al.*, “Generation and Acceleration of Low-emittance, High-current Electron Beams for SuperKEKB”, in *Proc. LINAC2014*, Geneva, Switzerland, 2014, pp.21-25.; <https://epaper.kek.jp/LINAC2014/papers/moiob03.pdf>
- [3] Y. Enomoto *et al.*, “A new flux concentrator made of Cu alloy for the SuperKEKB positron source”, in these proceedings, THOB04.
- [4] H. Sugimoto *et al.*, “Design Study on KEK Injector Linac Upgrade for High-current and Low-emittance Beams”, in *Proc. IPAC2012*, New Orleans, USA, 2012, pp.1206-1208.; <https://epaper.kek.jp/IPAC2012/papers/tuppc021.pdf>
- [5] S. Kazama *et al.*, “Emittance Preservation in SuperKEKB Injector”, in *Proc. IPAC2015*, Richmond, USA, 2015, pp.239-241.; <https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2015-MOPWA053>
- [6] Y. Seimiya *et al.*, “Investigation of Beam Variation and Emittance Growth Simulation with Both Misalignments and the Beam Jitter for SuperKEKB Injector Linac”, in *Proc. IPAC2017*, Copenhagen, Denmark, 2017, pp.1304-1307.; <https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2017-TUPAB005>
- [7] M. Tanaka *et al.*, “The geoid distribution of KEK electron/positron injector linac”, in these proceedings, WEP008.
- [8] Y. Okayasu *et al.*, “Survey report for KEK Tsukuba Campus injector”, in these proceedings, WEP006.
- [9] M. Tanaka *et al.*, “Measurement of floor movement in the KEKB injector LINAC tunnel (2)”, in *Proc. PASJ2015*, Tsuruga, Japan, 2015, pp.891-894.;

- https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2015/proceedings/PDF/WEP1/WEP137.pdf
- [10] Y. Seimiya *et al.*, “Low Emittance Beam Transport for e-e⁺ LINAC”, in *Proc. IPAC2017*, Copenhagen, Denmark, 2017, pp.1304–1307.; <https://doi.org/10.18429/JACoW-eeFACT2018-TUPAB02>
- [11] M. Satoh *et al.*, “Two-Bunch Orbit Correction Using the Wake Field Kick”, in *Proc. PAC2003*, Portland, USA, 2003, pp.3368–3370.; <https://epaper.kek.jp/p03/PAPERS/FPAB035.PDF>
- [12] Y. Enomoto *et al.*, “Pulse-to-pulse Beam Modulation for 4 Storage Rings with 64 Pulsed Magnets”, in *Proc. LINAC2018*, Beijing, China, 2018, pp.609–614.; <https://doi.org/10.18429/JACoW-LINAC2018-WE1A06>
- [13] Pulsed magnets and pulsed power supplies for simultaneous top-up injections; <https://www-linac.kek.jp/linac-com/pulsed-magnet/>
- [14] C. Mitsuda *et al.*, “Adaptive development of ceramics chamber with integrated pulsed magnet for future light source in KEK-PF”, in these proceedings, WEP013.;
- [15] S. Ushimoto *et al.*, “Development of motorized movable structures for accelerator girders and magnet supports”, in these proceedings, TUP007.
- [16] Y. Enomoto *et al.*, “Motor control of magnet support frame 1”, in *Proc. PASJ2019*, Kyoto, Japan, 2020, pp.657–660.; https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2019/proceedings/PDF/THPH/THPH025.pdf
- [17] D. Satoh *et al.*, “Research and development of iridium cerium photocathode for SuperKEKB injector linac”, *Energy Procedia* vol. **131**, 2017, pp.326–333.; <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.430>
- [18] T. Suwada *et al.*, “First simultaneous detection of electron and positron bunches at the positron capture section of the SuperKEKB factory”, *Sci. Rep.* vol. **11**, 2021, pp.12751.; <https://doi.org/10.1038/s41598-021-91707-0>
- [19] H. Ego *et al.*, “New S-band accelerating structure for the KEK electron and positron injector LINAC”, in these proceedings, WEOA04.