

SuperKEKB 電子入射器における誘電体誘起波加速を用いた エネルギー分散補償法の検討

ENERGY EQUALIZATION BY DIELECTRIC WAKEFIELD ACCELERATOR FOR SUPERKEKB ELECTRON LINAC

佐藤大輔^{#A)}, 吉田光宏^{B)}, 林崎規託^{C)}

Daisuke Satoh^{#A)}, Mitsuhiro Yoshida^{B)}, Noriyosu Hayashizaki^{C)}

^{A)} Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Inst. of Technology

^{B)} Accelerator Division, High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

^{C)} Research Laboratory for Nuclear Reactors, Tokyo Inst. of Technology

Abstract

SuperKEKB e^+/e^- linac is required to obtain the high charge and low emittance beams corresponding to the short beam life and small injection acceptance of the SuperKEKB ring. The required beam parameters are 5 nC, 20 mm mrad and 4 nC, 20 mm mrad for the electron and positron respectively. Moreover, the small energy spread of around 0.1 % is also required in the condition of higher bunch charge for the synchrotron injection to the HER of the SuperKEKB. In order to achieve both low emittance and small energy spread, we considered a new method that the emittance growth is suppressed using shorter bunch and the enlarged energy spread is compensated by beam acceleration and deceleration using high gradient slope induced in dielectric wakefield accelerator structure. In this paper, we report simulation studies of compensation for the enlarged energy spread by dielectric wakefield acceleration for SuperKEKB injector.

1. はじめに

現在、KEK では SuperKEKB に向けた KEKB 全体のアップグレードが行われている。SuperKEKB は、KEKB で達成された世界最高ルミノシティの 40 倍に相当する $8 \times 10^{-35} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ というルミノシティの実現に向けて、これまで以上の低エミッタンスビームを必要とする。しかし、ビームの低エミッタンス化に伴うダイナミックアパーチャーの減少とビーム寿命の減少が問題となるため、SuperKEKB 電子-陽電子入射器 (Figure 1) には、ビームの低エミッタンス化と同時に高電荷量が求められている。その具体的な要求性能を Table 1 に示すが、電子ビームにおいては従来の 5 倍の電荷量と、20 mm-mrad 以下の低エミッタンスが必要とされる。さらに、SuperKEKB では、HER への入射方式としてシンクロトロン入射が採用されており、ビームのエネルギー分散が 0.1% という非常に小さい値を実現する必要がある。

ビームの低エミッタンス化に向けては、電子源をフォトカソード RF 電子銃[1,2,3]に改造し、陽電子源にはダンピングリングの設置を行うことで、初期エミッタンスの改善を図っている。しかし、加速管からの横ウェーク場や四重極磁石のミスアライメントなどによりエミッタンスは悪化する。加速管からの横ウェーク場による横方向エミッタンスの増加は、バンチ長を短くすることで抑制可能である。しかし、その一方でバンチ長を短くしすぎると縦ウェーク場による影響が大きくなり、大きなエネルギー分散が生じてしまうため、Table 1 の要求性能を同時に満たすことは困難である[4]。そこで、横方向エミッタ

スが表 1 に示す要求性能を満たすような短バンチ長のビームで加速し、強い縦ウェーク場によって増大してしまうエネルギー分散を誘電体誘起波加速 (Dielectric wakefield acceleration: DWA) という高電界加速方式を用いて後に分散補償する方法を新たに提案する。DWA は数 100 MV/m 以上の高い電場を発生できる特徴を持つ。今回は、その高電場のスロープ部を使って、バンチ内前方の電子を減速し、バンチ内後方の電子を加速することで、数 10cm の加減速距離でバンチ内電子のエネルギー分散補償が可能か否かを検証した。

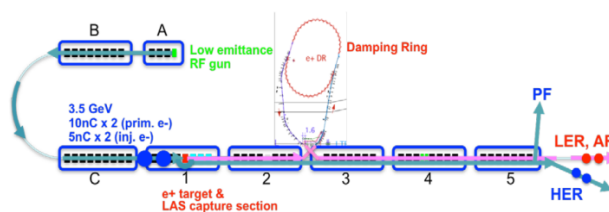


Figure 1: Layout of injector linac at KEK.

Table 1: Required Beam Parameters for SuperKEKB[5]

	KEKB (e^+ / e^-)	SuperKEKB (e^+ / e^-)
Beam energy [GeV]	3.5 / 8.0	4.0 / 7.0
Bunch charge [nC]	1.0 / 1.0	4.0 / 5.0
Norm. Emittance (1σ) [mm-mrad]	2100 / 300	20 / 20
Energy spread [%]	0.1	0.1

2. 縦ウェーク場によるエネルギー分散

SuperKEKB が必要とする 5 nC という高電荷量ビームにおいて、横方向エミッタンスの増加の主な原因となるのは加速管のミスアラインメントによる横ウェーク場の影響である。これを減らすためには、高いアラインメント精度と短いバンチ長が重要である。SuperKEKB において、そのエミッタンスの要求値を満たすためには、入射器の各コンポーネントの設置精度としてローカルには $\sigma = 0.1$ mm、グローバルには $\sigma = 0.3$ mm が求められ、バンチ長は 4 ps 以下でなければならないことが分かっている[4]。

しかし、短いバンチ長のビームは強い縦ウェーク場を誘起し、エネルギー分散を増大させてしまう。電子ビームのバンチ長に対する、Figure 1 の 5 セクター終端部のエネルギー分散について、解析的に計算した結果を Figure 2 に示す。Off-Crest の場合、エネルギー分散が最小となる位相でのエネルギー分散の値をプロットしている。Figure 2 より、電子バンチの時間分布がガウシアンの場合、RF の位相を傾けても SuperKEKB の要求値である 0.1% という非常に小さなエネルギー分散を達成することは不可能であることがわかる。

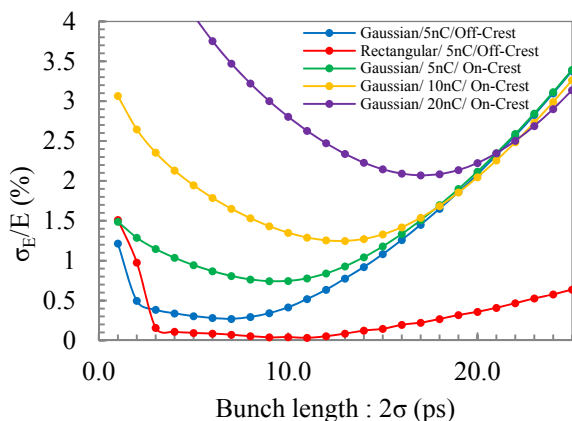


Figure 2: Energy spread at the end of 5-sector as a function of a bunch length.

しかし、電子バンチの時間分布を矩形にして Off-Crest でビームを加速することで、エネルギー分散を大幅に抑えることができる。ただし、RF の位相を傾けることは加速電圧の低下につながるため、加速電圧の-margin がどれだけ存在するのかがによってどの程度位相を傾けることができるのかが決まる。仮にバンチ長を 4 ps とした場合、0.1% 以下のエネルギー分散を達成するためには、RF の位相を約 35 度も傾ける必要がある。これは、加速エネルギーの-margin に換算すると 1GeV 程度に相当し、何らかの方法でエネルギー分散を補償する必要がある。

3. 誘電体誘起波加速 (DWA)

DWA 用加速管とビーム加速の仕組みの概念図を Figure 3 に示す。DWA 用加速管は、誘電体製の円筒構造の外周表面に金属がコーティングされた非常にシンプルな構造をしている。その中空領域を電子ビームが通過する時に、電子ビーム自身が周囲に作る電磁ポテンシャルと、誘電体チューブの媒質が相互作用することによってチェレンコフ放射が誘起される。この誘起波は金属境界で反射し、誘電体と真空境界では全反射するため誘電体チューブ部分に閉じ込められ、全反射する際に真空領域にはエバネッセント波が生じ、その合成波はビーム軸方向成分の電場をもつ。しかも、この誘起波には誘電体チューブが遅波回路として働き、その位相速度が電子ビームの位相速度と等しくなり、進行波のように加速管内部を伝搬するため、追従する電子ビームを入射することで加速 (減速) することができる。すなわち、DWA とはドライブビーム (先行ビーム) を加速管に入射して誘起波を発生させ、その誘起波の作る電場でメインビーム (追従ビーム) を加速 (減速) する、2 ビーム加速方式である。

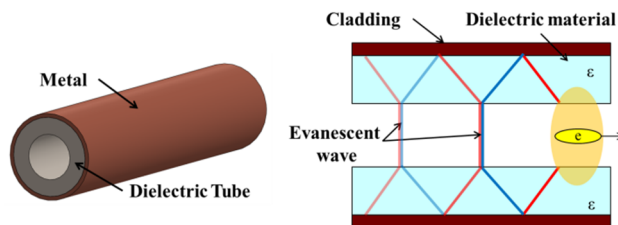


Figure 3: Conceptual illustration of dielectric wakefield accelerator.

DWA 方式の特徴は、誘電体チューブの内径が小さく、誘電率が小さいほど、高い周波数の電磁波が誘起されることである。誘電体チューブ内部に誘起される $TM_{0,n}$ モードの電磁波の周波数は、以下の方程式を解くことで求めることができる[6]。

$$-s^3 \left(\frac{kS'_0(sa)}{S_0(sa)} + \frac{sI'_0(ka)}{I_0(ka)} \right) \left(\frac{sI'_0(ka)}{I_0(ka)} + \frac{\epsilon kR'_0(sa)}{R_0(sa)} \right) = 0 \quad (1)$$

$$\left[\begin{array}{l} k^2 = \frac{\omega^2}{v^2} (1 - \beta^2) \\ s^2 = \frac{\omega^2}{v^2} (\epsilon \beta^2 - 1) \end{array} \right. \left. \begin{array}{l} R_0(sr) = N_0(sb)J_0(sr) - J_0(sb)N_0(sr) \\ S_0(sr) = N'_0(sb)J_0(sr) - J'_0(sb)N_0(sr) \\ R'_0(sr) = N_0(sb)J'_0(sr) - J_0(sb)N'_0(sr) \\ S'_0(sr) = N'_0(sb)J'_0(sr) - J'_0(sb)N'_0(sr) \end{array} \right]$$

ここでは、誘電体チューブの内径を $2a$ 、外径を $2b$ 、比誘電率を ϵ とし、 ω は電磁波の角周波数、 β は光速に対する電磁波の速度比とした。また、 J_0 , N_0 , I_0 はそれぞれ、第一種ベッセル関数、第二種ベッセル関数、変形ベッセル関数を表す。

誘電体チューブの各パラメータ (a, b, ϵ) と誘起波の放射周波数の関係を、式 (1) により計算した結果について述べる。誘起波の放射周波数について、誘電体の比誘電率が 9.5 の場合の形状依存性を Figure 4 に示す。また、 b/a が 2.0 の場合の比誘電率依存性を Figure 5 に示す。これらの結果より、誘電体チューブの形状を小さく、また厚みを薄くし、比誘電率が小さい材料を用いることで高い周波数の誘起波が発生することがわかる。

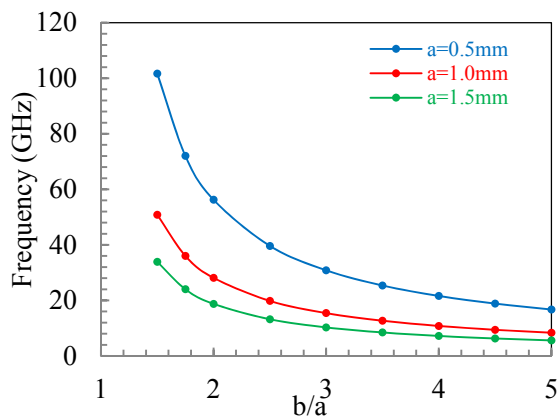


Figure 4: Dependence of radiation frequency on a and b/a , with $\epsilon = 9.5$.

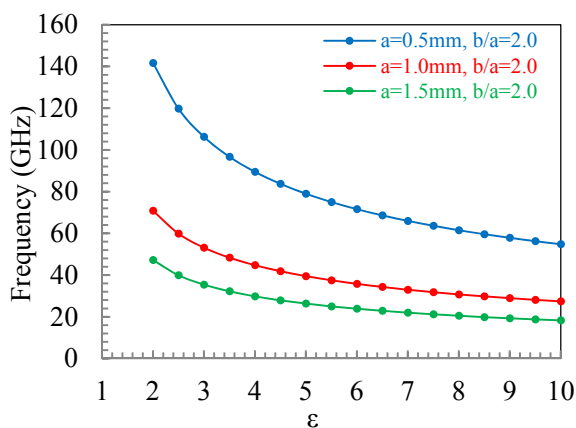


Figure 5: Dependence of radiation frequency on ϵ and a , with $b/a = 2.0$.

誘起波が軸上を作る加速 (減速) の電場強度は、ドライブビームのバンチ長が短く、電荷量が大きいほど極端に高くなる[6]。誘電体チューブの内径サイズ $2a$ に対する、誘起波の放射周波数と軸上加速 (減速) 電場強度の依存性を、3 次元 PIC シミュレーションにより計算した結果を Figure 6 に示す。計算条件は、 $\epsilon = 3.75$ 、 $b/a = 1.5$ の誘電体チューブ内に $Q = 5 \text{ nC}$ 、 $2\sigma_z = 2 \text{ ps}$ の電子ビームを 1 バンチ入射した場合とした。

Figure 6 より、内径ができるだけ小さい誘電体チューブを用いて、高い周波数の誘起波を発生させ

ることで、高い加減速電場が得られることがわかる。例えば、直径 1 mm の誘電体チューブでは 300 MV/m 以上が得られ、従来の高周波加速管の数倍以上の大きさとなる。

同じ計算条件で直径 1 mm の誘電体チューブを利用し、ドライブビームのバンチ長を変えた場合に誘起される加減速電場を Figure 7 に示す。この結果より、バンチ長を短くすることで加減速電場が高くなるのがわかる。

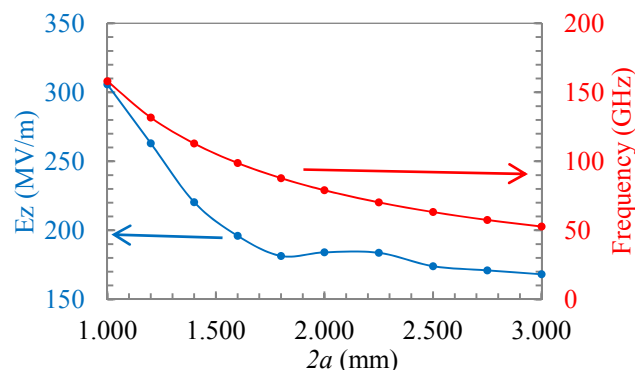


Figure 6: Dependence of longitudinal field and radiation frequency in wake simulations on inner diameter of dielectric tube, with $b/a=1.5$, $\epsilon=3.75$ and beam parameters $Q = 5 \text{ nC}$, $2\sigma_z = 2 \text{ ps}$.

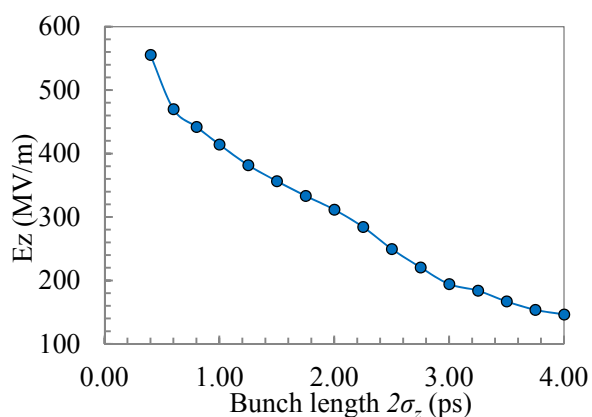


Figure 7: Dependence of longitudinal field in wake simulations on bunch length, with $2a = 1.0 \text{ mm}$, $b/a=1.4$, $\epsilon=3.75$ and beam parameters $Q = 5 \text{ nC}$, $2\sigma_z = 2 \text{ ps}$.

以上より、DWA では比誘電率が小さい材料を用いて、なるべく内径の小さい誘電体チューブを製作し、高電荷・短バンチ長のドライブビームを入射することで高い加減速電場を得ることができ、放射周波数はメインビームのバンチ長に応じた決定が必要になる。

4. DWA によるエネルギー分散補償の検討

SuperKEKB 電子入射器では、Figure 1 に示した A セクターの最上流部にフォトカソード RF 電子銃が導入されている。この電子銃からドライブ及びメインビームの 2 バンチを加速し、5 セクターエンドで DWA を用いたエネルギー分散補償が可能かどうかを検討した。

前節の Figure 6 で示した計算結果をもとに決定した、DWA 加速管のパラメータを Table 2 に示す。また、Table 2 の加速管について 3 次元 PIC シミュレーションを行い、メインビームのエネルギー分散が最小となるように最適化したときの、ドライブ及びメインビームのパラメータを Table 3 に示す。

Table 2: Design Values of DWA Structure

Parameters	Design value
Dielectric Material	Quartz
ϵ	3.75
Inner radius [mm]	0.5
Outer radius [mm]	0.7
Length [mm]	< 300

Table 3: DWA Beam Parameters for Energy Equalization

Parameters	Drive beam	Main beam
Bunch charge [nC]	5	5
Bunch length [ps]	1.35	3
Delay time [ps]	—	8.7
Bunch shape	Rectangular	Rectangular

メインビームの電子バンチ内での電子の進行方向位置 d (電子バンチ内で先頭にいる電子の位置を $d = 0$ とした) を横軸とし、エネルギーゲインを縦軸としたときの、DWA の効果に関するシミュレーション結果を Figure 8 に示す。なお、SuperKEKB のエネルギーマージンを考えて、メインビームを RF のクレストから 15 度傾けた加速位相で 5 セクターエンドまで加速し、その後、約 280 mm の DWA 加速管によりエネルギー分散補償を行うものとした。

Figure 8 より、DWA によるエネルギー分散補償がない場合は、加速管からの縦ウェーク場の影響で電子バンチ内に約 1 % のエネルギー分散が生じている。これに対して、Table 2, 3 に示した DWA 加速管とドライブビームを用いてエネルギー分散補償を行った場合は、電子バンチ内のエネルギー分散を約 0.106% まで改善可能なことがわかった。

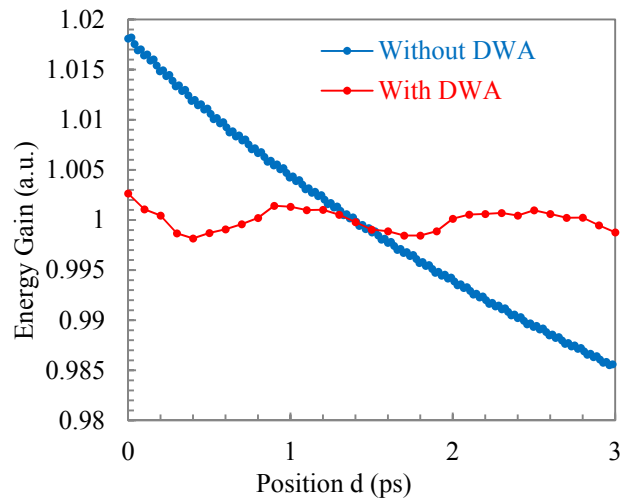


Figure 8: Normalized Energy gain of electrons in main beam with/without DWA.

5. まとめ

SuperKEKB に必要とされる低エミッタンス・低エネルギー分散の電子ビームの実現に向けて、DWA を用いたエネルギー分散補償法について検証した。石英製の誘電体チューブ (内径 1 mm, 長さ 280 mm) を使用した DWA 加速管によりメインビームを 3 ps のバンチ長で加速することで、エミッタンスの要求性能を満たし、エネルギー分散に関しては目標性能の約 0.1% が実現できる見通しが得られた。今後は、DWA 加速管内でのミスアライメントによる横方向エミッタンスの増加や、ドライブ及びメインビームのタイミングジッター等の影響についても検証していく予定である。

参考文献

- [1] T. Natsui *et al.*, "Commissioning of High-Charge, Low-Emittance, RF Gun for SuperKEKB", Proceedings of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aomori, Aug. 9-11, 2014.
- [2] X. Zhou *et al.*, "Laser system upgrade for RF gun at SuperKEKB", Proceedings of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aomori, Aug. 9-11, 2014.
- [3] D. Satoh *et al.*, "Research and Development of High-Temperature Operating Photocathode Electron Source for High Brightness Electron Gun", Proceedings of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aomori, Aug. 9-11, 2014.
- [4] S. Kazama *et al.*, "Emittance Preservation in SuperKEKB Injector", Proceedings of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aomori, Aug. 9-11, 2014.
- [5] M. Yoshida *et al.*, "Temporal Manipulation of Low Emittance and High Charge Electron Beam for SuperKEKB Injector", Proceedings of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagoya, Aug. 3-5, 2013.
- [6] M. Rosing *et al.*, "Longitudinal- and transverse-wake-field effect in dielectric structures", Phys. Rev. D, 42, 5, 1990.