

ATF2 ビームラインでの微小ビームサイズの達成

ACHIEVEMENT OF SMALL BEAM SIZE AT ATF2 BEAMLINE

奥木敏行^{#, A) B)},

ATF 国際コラボレーション

Toshiyuki Okugi^{#, A) B)}, ATF International Collaboration

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

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

Abstract

We confirmed the vertical beam size smaller than 44 nm with low intensity by June 2014 in ATF2 of KEK-ATF (KEK Accelerator Test Facility). A small emittance beam, which satisfies the requirement of ILC (International Linear Collider) emittance, is generated in KEK-ATF damping ring. ATF2 project has been performed by utilizing the small emittance beam of KEK-ATF. The purpose of the ATF2 project is to develop and establish a new final focus method, called "Local Chromaticity Correction", which will be used at ILC. The beam optics of ATF2 is designed to be based on the same method as ILC, with the equivalent beam energy spread (about 0.1%) and natural chromaticity (about 10000), tolerances of magnetic field errors are also equivalent to the ILC final focus system. In this presentation, we will present the beam tuning procedures of ATF2 beamline and the recent ATF2 status.

1. はじめに

International Liner Collider (ILC) [1]は、高い重心系エネルギーを目指した電子陽電子衝突型加速器で、電子ビームと陽電子ビームを直線的に加速して、衝突点で2つのビームを衝突させる。周回毎に衝突の機会がある円形衝突器とは違い、ILCでは電子ビームや陽電子ビームに与えられる衝突のチャンスは1度だけしかない。そのため、ILCで高いルミノシティを実現するためには、衝突点でビームをできる限り小さく絞ることが大切になる。

一般に、衝突点でビームを小さく絞るために重要なことは2つある。1つ目はビームのエミッタンスを小さくすることである。そして、2つ目に重要なことは、収差の少ないレンズ系を使って、衝突点でビームを絞り込むことである。ILCのレイアウトを図1に示す。ILCでは、ダンピングリングと呼ばれる円形加速器を使って、小さいエミッタンスのビームを作る。その小さなエミッタンスのビームを加速して、衝突点直前におかれた最終収束ビーム光学系でビームを絞り込み、ビーム同士を衝突させる。

KEKにある加速器試験施設ATF[2]では、ILCの衝突点でビームを絞るために必要な技術開発をおこなっている。ATFのレイアウトを図2に示す。ATFにはILC同様にダンピングリングがあり、電子ビームのエミッタンスはダンピングリングを使って小さくしている。ATFダンピングリングはILCの前身であるJLC計画[3]に必要なとされるビームエミッタンスを実証するために1997年から運転を開始した。そして、現在ATFはJLCやILCで要求されるエミッタンスと同等の値まで小さなエミッタンスで運



Figure 1: ILC layout.

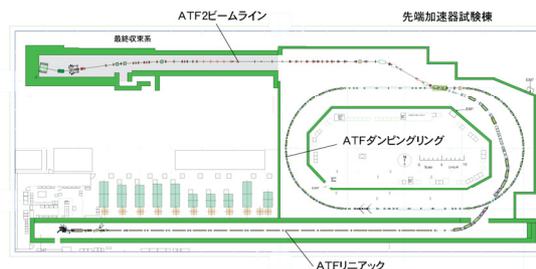


Figure 2: ATF layout.

転している[2]。更に、ATFにはILCの最終収束光学系の研究のためのATF2ビームライン[4]がある。

2. ATF2 ビームライン

2.1 ATF2 ビームラインの概要

リニアコライダの最終収束光学系を試験する施設としては、SLACのFinal Focus Test Beam (FFTB)という施設が1990年代にあった。FFTBではGlobal Chromaticity Correctionという収差補正方法の最終収束光学系でビーム収束試験をおこない、電子ビームを70 nm程度まで絞り込むことに成功した[5]。そして、現在のILCのデザインでは、当時とは違う

[#] toshiyuki.okugi@kek.jp

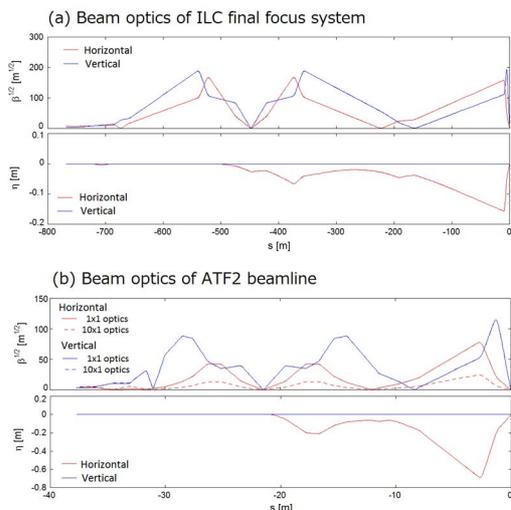


Figure 3: Beam optics of ILC and ATF2. They are based on “Local Chromaticity Correction Scheme”.

Local Chromaticity Correction の原理に基づいた最終収束光学系の使用を考えている [6]。Local Chromaticity Correction 方式の最終収束光学系は、かつて、FFTFB で試験された Global Chromaticity Correction 方式の最終収束光学系に比べ、全長が約 1/3 と短く、エネルギーアクセプタンスが広くとれ、かつ、ビームハローが大きく広がらないという特徴がある。しかし、Local Chromaticity Correction 方式の最終収束光学系は、このように多くの利点があるが、ビーム調整が Global Chromaticity Correction 方式に比べて複雑なことや、何よりも実験的に原理証明がされていないという問題もあった。そこで、2004 年 11 月の LCWS2004 で、ILC よりも 2 桁以上低いエネルギーでも、ATF が作り出す低エミッタンスビームを使うことで ILC の最終収束光学系の原理証明が可能であるという提案をした。この ATF のビームを使った ILC の最終収束光学系の試験施設をつくる計画を ATF2 プロジェクト、ATF に新設された最終収束光学ビームラインは ATF2 ビームラインと命名された [4]。

ATF2 ビームラインは ILC の最終収束光学系の原理証明を第一の目的としているので、Local Chromaticity Correction 方式のビーム光学系を採用している。また、電磁石の配置や名前も ILC の最終収束光学系と同じである (図 3)。更に、色収差の強さも ILC と同程度になるように設計されている。ただし、ILC のビームエネルギー 250 GeV に対して、ATF2 は 1.3 GeV と低いので、絞れるビームサイズは、ILC 焦点の 5.9 nm に対して、ATF2 仮想焦点では 37 nm となっている。表 1 に ILC と ATF2、FFTFB のパラメータを比較した。

ATF2 プロジェクトは、アジア、ヨーロッパ、アメリカの 3 地域が同程度の貢献をすることを目指し

て、設計、製造および建設が分担された。そして、ILC 最終収束系の技術開発に興味を持つ世界中の研究者が参加できる枠組みを整備した。世界各国の研究機関との協力のもと、ATF2 ビームラインは建設され、2009 年に運転を開始した。ビーム運転に関しても、ビームラインの建設と同様、世界各国の研究者が参加している。

Table 1: IP Parameters of ILC, FFTB and ATF2

	ILC-500GeV	FFTFB	ATF2
Chromaticity Correction	Local Correction	Global Correction	Local Correction
Beam Energy	250 GeV	46.6 GeV	1.3 GeV
L^*	4.1 m	0.4 m	1.0 m
β_y^*	0.48 mm	0.10 mm	0.10 mm
ϵ_y	0.07 pm	20 pm	12 pm
σ_y^*	5.9 nm	45 nm	37 nm

2.2 ATF2 ビームラインのビーム光学系

ATF2 では実験当初は、ビームライン上の四極電磁石がつくる水平・垂直双方でのクロマチシティが ILC と同等になる 1×1 optics と呼んでいるビーム光学系を使って、仮想衝突点でのビームサイズ調整をおこなっていた。しかし、ビーム調整のシミュレーション等を使った詳細な検討してみると、ATF2 のエネルギーが ILC と比べて極端に小さいため 1×1 optics ではビームライン上の四極電磁石を通過するビームサイズが ILC よりも極端に大きくなり、それに伴い Geometric Aberration の影響も ILC よりも極端に大きくなってしまふ。その為、1×1 optics では、電磁石に求められる多重極磁場誤差の許容値が ILC よりも極端に厳しくなることがわかってきた。その為、現在では仮想衝突点で垂直方向ビームサイズを絞る際に必要な多重極磁場誤差の許

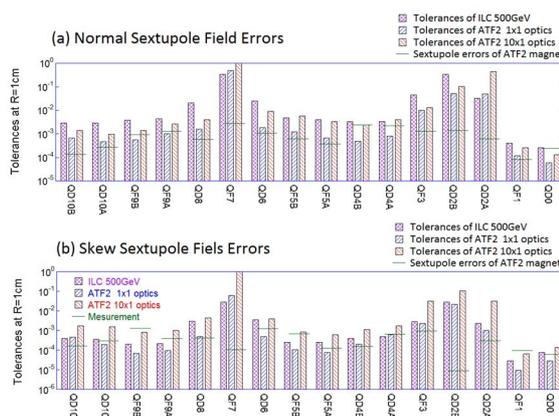


Figure 4: The tolerances of sextupole field errors for ILC and ATF2 quadrupole magnets. 1×1 optics and 10×1 optics are plotted for ATF2. The horizontal lines show the errors of ATF2 magnets. (a) Normal component (b) Skew component.

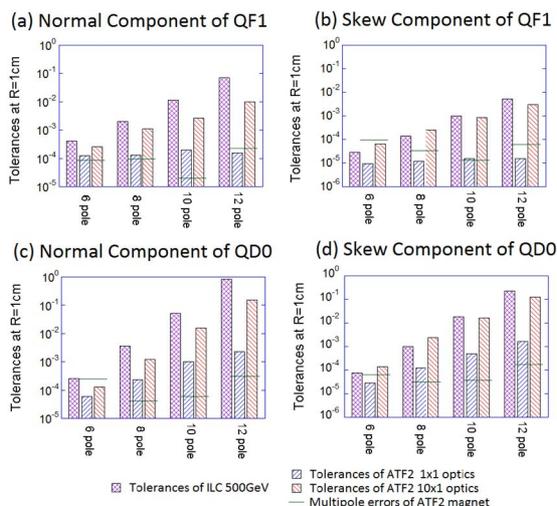


Figure 5: The tolerances of multipole field errors for ILC and ATF2 final doublets. 1×1 optics and 10×1 optics are plotted for ATF2. The horizontal lines show the errors of ATF2 magnets. (a) Normal component (b) Skew component.

容値が ILC と同等になるように仮想衝突点での水平方向ベータ関数が実験開始当初の 10 倍の 10×1 optics を使ってビームサイズ調整を進めている。図 4 に、ILC、および、ATF2 ビームラインの各四強電磁石の六極磁場誤差の許容値を示した。また、図 5 には、ILC、および、ATF2 ビームラインの最終収束電磁石の多重極磁場誤差の許容値を示した。ILC と ATF2 10×1 optics では誤差の許容値が同等になっていることが分かると思う。

3. ATF2 仮想衝突点でのビーム収束

3.1 ビームサイズモニター(IP-BSM)

ATF2 では電子ビームを仮想焦点で 37nm まで絞ろうと考えている。しかし、ビームを小さく絞っても、それを測定できるビームサイズモニターがないと、実際にビームを小さく絞れたことを証明することができない。そのため、ATF2 では、ビームサイズモニター自体も非常に重要である。ATF2 仮想衝突点には、FFTb で使われていたビームサイズモニター IP-BSM (通称、新竹モニター) [7] を譲り受け使用している。ATF2 での IP-BSM の開発および改良は、東大と KEK とで共同で担当している。ATF2 で使用している IP-BSM の写真を図 6 に示した。

IP-BSM は、レーザー干渉縞を利用したビームサイズモニターで、1 台のレーザーから出射された光を 2 つに分け、仮想衝突点で交差させることで、仮想衝突点にレーザー光の干渉縞を作ることができる。この干渉縞に電子ビームが通過するとき、電子ビームとレーザーとのコンプトン散乱により γ 線が生成される。電子ビームのビームサイズが干渉縞に比べ

て小さいときには、干渉縞の位置に応じて生成される γ 線の発生量に変化する (以下、モジュレーションが生じると記す)。一方、電子ビームのビームサイズが干渉縞よりも大きいときには、干渉縞の位置を変えても発生する γ 線数にモジュレーションは生じない。このように、干渉縞の位置を変えたときの γ 線数のモジュレーションの大きさから、ビームサイズを評価することが出来る。測定されたモジュレーションとビームサイズの関係は、

$$\sigma_y = \frac{1}{k_y} \sqrt{\frac{1}{2} \ln \left(\frac{C |\cos \theta|}{M} \right)}, \quad k_y = \frac{\pi}{d} \quad (1)$$

と表せる。ここで、 d はレーザー干渉縞のピッチ、 θ はレーザーの交差角となる。

ATF2 では、レーザーの波長を FFTb で使われていた 1064 nm から 532 nm に変更することで、小さなビームサイズでの感度を高くなるようにしている [8]。ATF2 の IP-BSM は、レーザー光の交差角を最大にしたとき (174 度)、25-90 nm の範囲のビームサイズの測定が出来る。また、2-8 度、30 度とさらに 2 つの小交差角モードを用意することで 25 nm から 6 μ m までの広い測定範囲を実現している (図 7)。

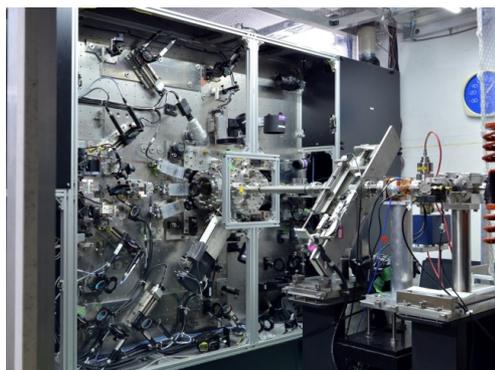


Figure 6: IP-BSM at ATF2 virtual interaction point.

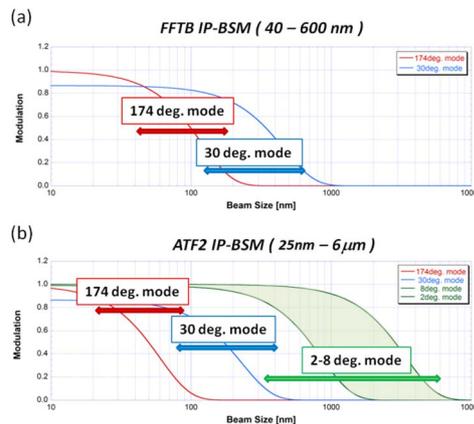


Figure 7: Dynamic range of IP-BSM for FFTb and ATF2.

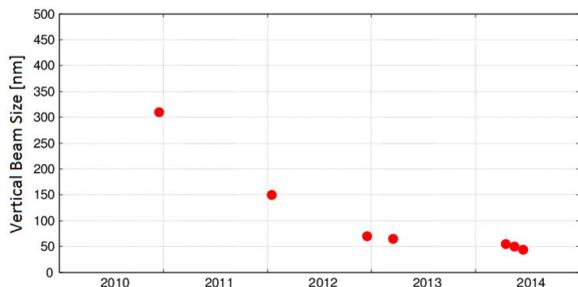


Figure 8: History of the vertical beam size at ATF2.

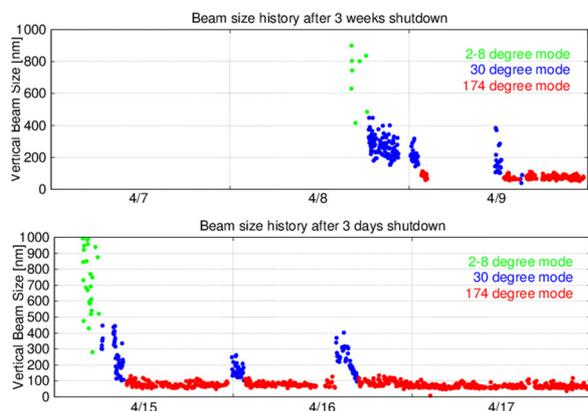


Figure 9: Example of the beam size trend in the ATF2 IP beam size tuning (2014 April). Upper figure shows the beam size trend after 3-weeks shutdown. Lower figure shows the beam size trend after 3-days shutdown.

3.2 ATF2 でのビーム調整の経過

ATF2 ビームラインのすべての四極電磁石および六極電磁石は、電磁石ムーバーの上に設置されている。仮想衝突点でのビームサイズ測定は、電磁石ムーバーで六極電磁石の位置を変えることで、線形光学系の調整をおこない、2 次の非線形光学系の調整は、六極電磁石、スクュー六極電磁石の強さを変えることでおこなっている[9]。2012 年 12 月の運転で KEKB から借りた合計 4 台のスクュー六極電磁石を使うことで、衝突点でビームを約 70nm まで絞ることができた[10]。また、強いスクュー六極磁場が必要だったのは、1 台の六極電磁石のコイルの短絡が原因であることがわかった[11]。異常が判明した六極電磁石の交換した後は、強いスクュー六極電磁石磁場を使わないで仮想衝突点でビームを絞ることが可能になった。

図8にATF2の仮想衝突点で測定された最小ビームサイズの履歴を示す。ATF2では現在44 nmまでビームサイズを絞れている[12]。ただし、現在のところIP-BSM の系統誤差を完全には把握できていないため、44 nmという数値はIP-BSMの系統誤差が全くな

いと仮定のもと、式(1)で $C = 1$ としてビームサイズを算出した上限としての数値である。つまり、ATF2 の仮想衝突点では、垂直方向ビームサイズを44 nm以下まで絞れたことが実証された。

また、仮想衝突点でビームサイズを繰り返し、比較的短時間の調整で小さく絞ることが出来るようになったことも、これまでの重要な成果の一つである[13]。図9にビームサイズ調整の様子を示す。上図は3週間の運転休止後、下図は3日間の休止後のビームサイズの推移を示している。各点は調整を通してIP-BSMで測定されたビームサイズ1点ずつを表している。

3.3 ビーム強度依存性

ATF2の仮想衝突点では、目標値に近いビームサイズを確認できているが、ビーム強度を上げたときビームサイズが大きくなってしまっている。これまで測定されたビームサイズのビーム強度依存性を図10に、フィッティング結果を表2に示す。図10からバンチ辺りの粒子数が増えると、ビームサイズが増加(IP-BSMで測定されるモジュレーションが低下)していく様子が見て取れると思う。

Table 2: Fitting Results for the Intensity Dependences

	Intensity Dependence	Beam Size at Zero-Intensity
2014/06/13	9.7 nm/1e9	42 nm (M=0.609)
2015/06/20	17.1 nm/1e9	46 nm (M=0.550)

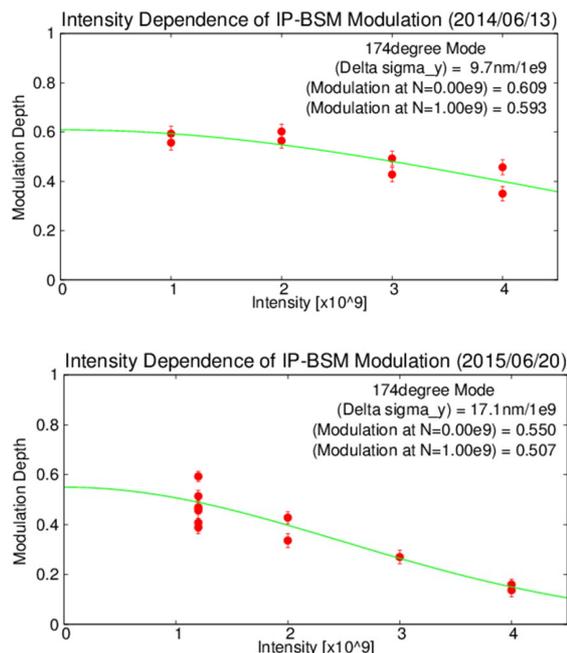


Figure 10: Example of the intensity dependence of IP-BSM modulation. Upper figure shows the result at 2014/6/13. Lower figure shows the result at 2015/6/20.

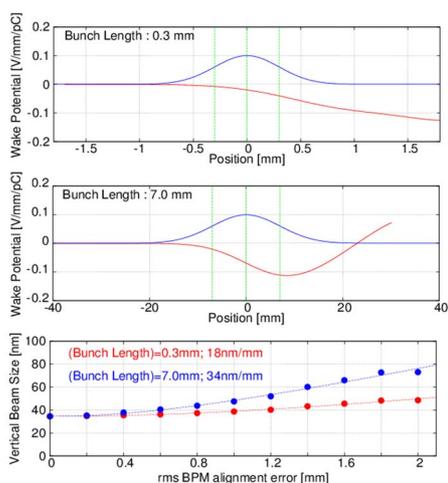


Figure 11: Transverse wake potential of C-band BPM. Upper figure and middle figures show the wake potentials for bunch lengths of 0.3 mm and 7.0 mm[14]. Lower figure shows the simulation result of IP vertical beam size growth for the BPMs. In the simulation, the bunch population was assumed to be $N = 1 \times 10^{10}$.

そのため、前節で説明したビームサイズの結果は、バンチ辺りの粒子数が $N = 1 \times 10^9$ と少ない電荷量で測定した結果である。このようなビーム強度依存性は、ビームライン上のwakefieldによるものと思われる。ただし、ILCと比べてATF2のビームはバンチ長が長いので、ATF2では、よりwakefieldの影響を受けやすくなる。ATF2での主なwakefield源である空洞型BPMのwake potentialを図11に示した。図11上図にはATF2の典型的なバンチ長(7 mm)の時の、中図にはILCのバンチ長(0.3 mm)のときのwake potentialを示している。また、図11には、空洞型BPMのwakefieldがATF2仮想衝突点でのビームサイズに及ぼす影響のシミュレーション結果も示した。更に、ATF2とILCでの条件の違いによるwakefieldの影響の受けやすさを表3にまとめた。ATF2の $N = 1 \times 10^9$ の粒子数でのwakefieldの影響は、ILCの $N = 2 \times 10^{10}$ での影響と同じオーダーになっている。そして、ATF2においてwakefieldは、 $N = 1 \times 10^9$ の粒子数では極端に問題になってないことから、ILCにおいてもwakefieldの影響は大きな問題にならないだろうと考えている。

Table 3: Comparison of Wakefield Effects of Cavity BPM Misalignments for ATF2 and ILC Beamlines

	ATF2	ILC-500GeV	ILC/ATF2
Energy ($1/E$)	1.3 GeV	250GeV	0.0052
N	1×10^9	2×10^{10}	20
Bunch Length	7 mm	0.3 mm	0.5
Emittance ($1/\sqrt{\epsilon_y}$)	12 pm	0.07 pm	13.1
Beta Function ($\sqrt{\sum \beta_y}$)	241 m ^{1/2}	557 m ^{1/2}	2.31
Total			1.57

ATF2では、これまでに実験・理論計算の両面からの検討を進め、ビーム強度依存性に対する改善もおこなっている[15]。例えば、ビームライン中に多数存在するベローズでのwakefieldが問題となり得ることがわかり、ほぼすべてのベローズにシールドを付けた。また、ベータ関数の比較的小さな上流部にある4台のビームサイズモニター (OTRモニター) のチャンバーのwakefieldが最終収束点でのビームサイズに影響を与えることが実験的に観測されたため、現在はwakefieldの影響が最小になるようにOTRチャンバーの位置を調整している。

4. まとめ

ATF2 ビームラインは ILC の最終収束系の実証試験のため、KEK の ATF に作られた。ATF2 は ILC と同様の色収差補整方法で、仮想衝突点で垂直方向のビームサイズを絞る難しさも ILC の衝突点での難しさと同等になるように決められている。また、ATF2では $N = 1 \times 10^9$ の電子数でビーム収束試験をおこなっているが、これも ILC の規定値の $N = 2 \times 10^{10}$ と同等の難しさになっている。このように、ATF2でのビームのパラメータは ILC でのビーム収束を睨んで決められている。そして、現在 ATF2 の仮想衝突点ではビームサイズを 44 nm 以下まで絞ることができている。これは設計ビームサイズの約 1.2 倍の大きさである。

5. 謝辞

今回、ATF2 グループを代表して発表することになりましたが、運転、解析にかかわった多くの方々との協力のもと多くのデータをまとめることができました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- [1] “ILC Technical Design Report”, <https://www.linearcollider.org/ILC/Publications/Technical-Design-Report>
- [2] ATF Collaboration, Phys. Rev. Lett., **88**, 194801 (2002).
- [3] “JLC design study”, KEK Report 97-1 (1997).
- [4] “ATF2 Proposal”, KEK Report 2005-2(2005).
- [5] V.Balakin *et al.*, Phys. Rev. Lett., **74** 2479 (1995).
- [6] P.Raimondi and A.Seryi, Phys. Rev. Lett. **86**, 3779 (2001).
- [7] T.Shintake, Nucl. Instru. Meth., **A311**, 455 (1992).
- [8] T. Suehara *et al.*, Nucl. Instrum. Meth., **A616**, 1-8 (2010).
- [9] T.Okugi *et al.*, Phys. Rev. ST-AB **17**, 023501 (2014).
- [10] G.White *et al.*, Phys. Rev. Lett. **112**, 034802 (2014).
- [11] 奥木敏行, 高エネルギーニュース **32**, 16 (2013).
- [12] K.Kubo, Proc. of IPAC14, WEZA01, Dresden (2014).
- [13] S.Kuroda, Proc. of ICHEP14, Valencia (2014).
- [14] A.Lyapin, Private communication.
- [15] K.Kubo, A.Lyapin and J.Snuverink, ICFA Beam Dynamics Newsletter **61** (2013).