

話 題

高輝度ファクトリー加速器の現状と展望

赤井 和憲*

Currents State and Future Prospects of High-Luminosity Factories

Kazunori AKAI*

Abstract

Factories are high-luminosity colliders that provide high rate production of particular particles such as B, Tau-charm, and Φ -mesons. Two B-factories, KEKB and PEP-II, and a Φ -factory DAΦNE have been operating successfully. We discuss present luminosity performance and limitations of these factories as well as upgrade plans and new ideas in view of the next generation of meson factories with ~ 100 -times more luminosity.

1. はじめに

非常に高いルミノシティ（輝度）で特定の間接子対などの粒子を大量に生成する電子・陽電子衝突型加速器は「ファクトリー加速器」とよばれる。ここでは、極めて稀な崩壊確率を持つ素粒子反応において精密な実験統計を得るために、膨大な数の粒子をそれぞれ「工場」のように大量生産する。生成する粒子対によってBファクトリー、タウ・チャームファクトリー、ファイファクトリー等となる。KEKのBファクトリー、KEKB¹⁾は $1.65 \times 10^{34}/\text{cm}^2/\text{s}$ という世界最高のルミノシティを誇り、これまでに 630/fb を超える積分ルミノシティを蓄積してきた。もう一つのBファクトリーであるSLACのPEP-IIのルミノシティはピーク値、積分値ともにKEKBの60~70%程度である。この2つのBファクトリーによってB中間子崩壊のCP非保存の発見がなされた。その後も標準理論を超える現象の探索や新しい粒子の発見など、重要な物理成果が数多く得られている。その他に現在稼働している加速器としては、ファイ粒子を生成する唯一のファイファクトリー、Frascati (INFN-LNF)のDAΦNEがある。また、中国IHEPのタウ・チャームファクトリーであるBEPC-IIやロシアBINPのVEPP-2000が建設中であり、いずれも2006年にビームコミッシングが開始される予定である。

今年6月にEdinburghで開催された国際会議

EPAC2006において、「高輝度中間子ファクトリー加速器の現状と次世代への挑戦」と題する、ファクトリー加速器のレビュー講演を依頼された。筆者はKEKBのR&D、建設および運転に十数年関わってきたが、KEKB以外のファクトリー加速器については詳細に知るわけではない。しかし他のファクトリーについて知るよい機会だと考えて引き受け、3ヶ月ほどかけて情報収集して準備した。本稿はEPACでの講演内容をもとにして、国内の学会誌向けに書き直したものである。

2. 電子・陽電子衝突型加速器

図1は世界の主要な衝突型加速器のルミノシティの

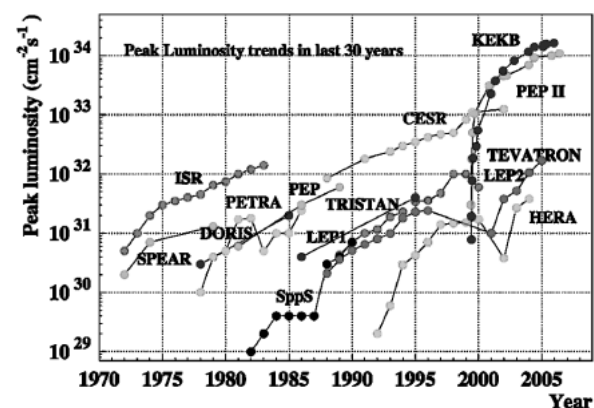


図1 世界の主要な衝突型加速器のルミノシティの変遷

* 高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設
Accelerator Laboratory, KEK, High Energy Accelerator Research Organization
(E-mail: kazunori.akai@kek.jp)

変遷を示したものである。電子・陽電子衝突型以外にも陽子・(反)陽子や陽子・電子衝突型加速器も含め

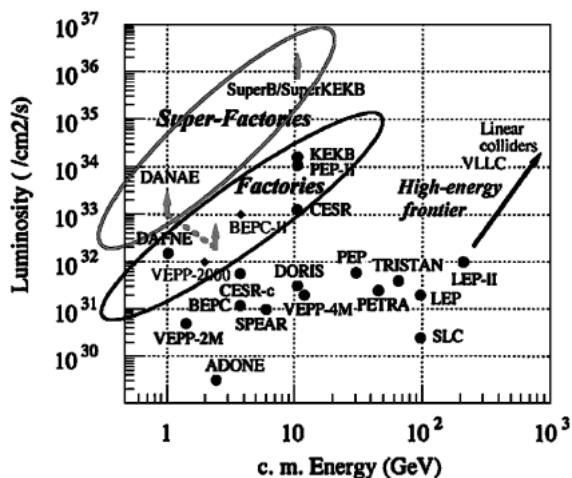


図2 電子・陽電子衝突型加速器の重心系ビームエネルギーとルミノシティ

て記されている。過去30年間、ルミノシティの最高記録はおおむね10年間に20倍程度ずつ増加してきたことがわかる。Bファクトリーはその進歩の歴史を引き継いでさらに発展させている。Bファクトリー以前に世界最高のルミノシティで運転していたCornell大学のCESRが1ヶ月かけて収集したデータ量を、KEKBではわずか2日程度で収集できる。

図2は電子・陽電子衝突型加速器について、ビームの重心系エネルギーを横軸に、ルミノシティを縦軸にとって示したものである。ルミノシティフロンティアであるKEKB, PEP-II, DAΦNE, BEPC-IIなどのファクトリー加速器は、ビームエネルギーとしては1~10 GeV程度の領域にある。ファクトリー加速器の成功を踏まえ、さらに1~2桁高いルミノシティを目指すスーパーファクトリーが検討されている。Bファクトリーのアップグレード計画であるスーパーBファクトリーとDAΦNEのアップグレード計画であるDANAeを図中に表示した。電子・陽電子衝突型加速器

表1 ファクトリー加速器およびそれに準ずる電子・陽電子衝突型加速器の主要パラメータ

	CESR	DAΦNE	PEP-II	KEKB	BEPC-II†	VEPP2000†
Commissioning year	1979	1998	1998	1998	(2006)	(2006)
Present status	running†²	running	running	running	construct	construct
Physics	B	Φ	B (asym.)	B (asym.)	τ-c	Φ
Ring	single	double	LER HER	LER HER	double	single
Particles	e⁺ + e⁻	e⁺ e⁻	e⁺ e⁻	e⁺ e⁻	e⁺ e⁻	e⁺ + e⁻
Beam energy [GeV]	4.7~6.0	0.51 0.51	3.1 9.0	3.5 8.0	1.0~2.1	1.0
Circumference [m]	768.43	97.69	2200	3016	237.53	24.38
Harmonic number	1281	120	3492	5120	396	14
RF frequency [MHz]	499.765	368.26	476	508.89	499.8	172.09
RF voltage, operating [MV]	5	0.15 0.12	4.04 15.5	8.0 15.0	1.5 1.5	0.12
Cavity type	SC	NC	NC	NC+SC	SC	NC
Crossing angle [mrad]	±2.5~3.3	±10~15	<0.1	±11	±11	0
Beta function at IP, βₓ* [cm]	125	160	35~49	59 56	100	10
Beta function at IP, βᵧ* [cm]	1.9	1.7	1.1	0.65 0.59	1.5	10
Emittance, εₓ [nm]	205	340	31~59	18 24	144	129
Emittance, εᵧ [nm]			1.4	0.4	2.2	129
Betatron tune, νₓ*	10.53	.11 .09	.504 .506	.505 .511	6.53	4.05
Betatron tune, νᵧ*	9.61	.19 .167	.58 .64	.535 .577	7.58	2.05
Bunch length, σ_z* [mm]	20	10~25	11~12	6~7	13~15	
Beam-beam parameter, ζₓ*	0.028	0.026	.053 .055	.110 .073	0.04	
Beam-beam parameter, ζᵧ*	0.062	0.025	.064 .046	.092 .056	0.04	
No. of colliding bunches	45	110	1722	1389	93	1
Abort/ion clearing gap [%]		8.3	0.9	5		
Beam current, operating [A]	0.37+0.37	1.4 2.0	2.9 1.87	1.7 1.35	0.91 0.91	0.1+0.1
Beam current, achieved [A]	0.78	1.5 2.4	3.0 1.9	2.0 1.36		
Luminosity [10³²/cm²/sec]	12.5	1.53	120.7	165.2	10	1.0(per IP)
Int. Lum./day [pb⁻¹]†³	73	10	849.6	1231.5		
Total Int. Lum. [fb⁻¹]†³		2.3	410	630		

† Numbers for BEPC-II and VEPP-2000 are design values. Colliding mode of BEPC-II is shown.

†² CESR was converted to CESR-c in 2003. The numbers listed are those for CESR.

†³ Integrated luminosities are delivered values for PEP-II and logged ones for KEKB (delivered > logged).

のもう一方の柱である、TRISTAN や LEP を経て将来のリニアコライダーへと続くエネルギーフロンティアの加速器については、本稿では触れない。

ファクトリー加速器やそれに準ずる高輝度の電子・陽電子衝突型加速器について、それらの主要パラメータを表 1 に示す。多バンチの大電流ビームを蓄積するために、電子と陽電子を別々のリングに蓄積するダブルリングが多くの場合に採用されている。特に、KEKB と PEP-II は非対称エネルギーのダブルリングである。衝突点軌道角度は PEP-II がヘッドオン、CESR が ± 3 mrad の小角度、KEKB, DAΦNE, BEPC-II は $\pm 10 \sim 15$ mrad と比較的大きい角度である。VEPP-2000 はラウンドビームが特徴である。

3. 高いルミノシティを得るには

フラットビームかつ短いバンチ長の衝突型加速器においては、ルミノシティは

$$L \approx \frac{\gamma_{\pm}}{2e r_e} \frac{I_{\pm} \xi_{\pm y}}{\beta_y^*}$$

で表される。これからわかるように、高いルミノシティを得るには(1)ビーム・ビームパラメータ ξ_y を大きくする、(2)衝突点の β_y^* を小さく絞る、(3)ビーム電流 I を高くすることが必要である。また、衝突点 β_y^* が小さいので、hourglass effect によるエミッタンス増大を避けるために、バンチ長を β_y^* よりも短くしなければならない。ファクトリー加速器では、非常に高いルミノシティを実現するために、これらのすべてにおいて極めてチャレンジングである。

ビーム・ビームパラメータをできるだけ大きくし、かつ β_y^* を小さく絞るには、高い性能のビーム光学設計、ビーム光学やビーム軌道の精密な制御、衝突条件の正確な制御が決定的に重要である。また、広いダイナミックアパーチャーを確保して十分長いビーム寿命を保つ必要がある。これらの条件はエネルギーの低いビームに対してはより厳しい要求となる。

数多くのバンチに大電流ビームを蓄積することによりさまざまな困難に直面する。コンベンショナルなインピーダンスに起因する結合バンチ不安定の growth rate はビーム電流に比例して増大する。また電子雲による陽電子ビーム不安定や、イオンによる電子ビーム不安定などの、異種 2 流体間の相互作用に類するビーム不安定も発生する。なかでも電子雲に起因する不安定は近年特に大きな問題となっている。また、短いバンチ長の大電流ビームは強い寄生モード損失をもたらす。コヒーレントシンクロトロン放射 (Coher-

ent Synchrotron Radiation, CSR) は現在のファクトリー加速器では大きな影響を及ぼしていないが、次世代のスーパーファクトリーでは深刻な問題となりうる²⁾。放射光損失や寄生モード損失を補償するために必要な電力も大きい。これらの困難を解決するために、寄生モード強減衰型加速空洞と安定なハイパワー高周波システム、インピーダンスを極力抑え、かつ発熱や放電による破壊を受けにくい頑丈な真空コンポーネント、バンチ毎の振動を測定しその振動を抑制させる高度なフィードバックシステム、そして物理検出器へのバックグラウンドを低減させる工夫、などさまざまな分野での最先端の挑戦が必要である。

4. ファクトリー加速器の現状

4.1 大電流ビームとハードウェア機器

数アンペアもの大電流ビームを蓄積するために、高周波加速空洞はビームに大電力を供給すると同時に、寄生モードについてはできるだけインピーダンスを低くして結合バンチ不安定を抑制しなければならない。そのためファクトリー加速器ではいずれもシングルセルの強減衰型加速空洞を採用している。図 3 にこれらの加速空洞を示す。KEKB では陽電子リングには常伝導空洞を、電子リングには常伝導空洞と超伝導空洞を併用している。PEP-II と DAΦNE では常伝導空洞が、CESR では超伝導空洞が用いられている。BEPC-II には KEBK と同じ型の超伝導空洞が採用された。KEKB 超伝導空洞³⁾は、蓄積ビーム電流 (1.36 A)、ビームへの供給パワー (空洞あたり 400 kW)、寄生モード吸収パワー (空洞あたり 15 kW) のすべてにおいて超伝導空洞として世界最高記録を保持している。

B ファクトリーの場合には加速モードに起因する強い結合バンチ不安定への対策も重要である。リング周長が長く、かつビーム電流が大きいので、ビーム負荷にマッチングさせるための空洞のディチューニング周波数が周回周波数と同程度かまたはそれを超えてしまう。そのため加速モードのインピーダンスにより極めて強い結合バンチ不安定が発生する。KEKB では ARES 空洞 (Accelerator Resonantly Coupled with Energy Storage) と名付けられた特殊な常伝導加速空洞および超伝導空洞を用いて、空洞内の蓄積エネルギーを高めてこの不安定を軽減することに成功した。ARES 空洞は高い Q 値をもつ TE013 モードのエネルギー貯蔵空洞と加速空洞とを結合空洞を介して共鳴的に結合させたものである⁴⁾。これに加えて、不安定を起す周波数成分のインピーダンスを選択的に軽減す

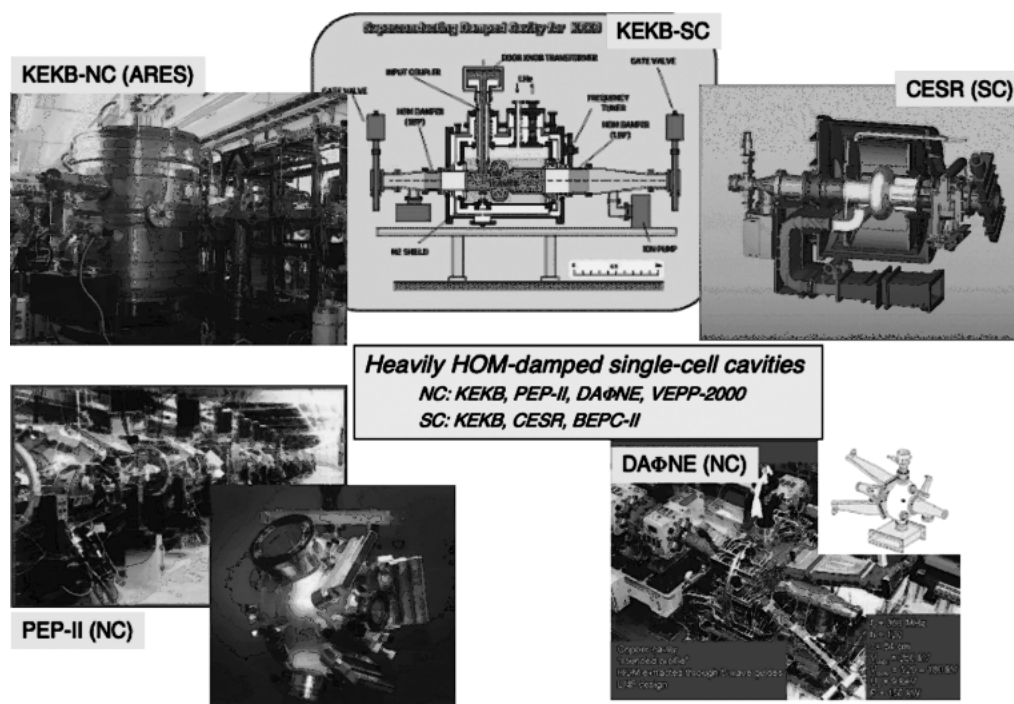


図3 ファクトリー加速器で用いられているシングルセル強減衰型加速空洞

るフィードバックを併用して不安定を抑制している⁵⁾。一方、コンベンショナルな常伝導空洞を用いている PEP-II では、全面的に高周波フィードバックに依存している⁶⁾。

大電流ビームに直接さらされる各種の真空コンポーネントは強烈な発熱や放電等による破壊と常に戦ってきた。とりわけ可動マスクやベローズ等、ウェイクを発生しやすい構造をもつ真空コンポーネントにとっては過酷な環境にあり、どのファクトリー加速器でもさまざまな故障を経験しながら、改良につぐ改良を重ねてきた⁷⁾。

バンチ毎フィードバックシステムも大電流蓄積に不可欠なシステムである⁸⁾。PEP-II と DAΦNE では longitudinal と transverse の両方のフィードバックシステムが用いられている。KEKB では transverse フィードバックのみが用いられ、これまでのところ longitudinal は必要とはなっていない。ダンピングタイムはいずれも transverse では十ターン程度、longitudinal は百ターン程度の速さである。

4.2 シングルバンチ電流とバンチ数の増加

シングルバンチ電流を高めていくにつれ、マイクロウェーブ不安定に起因するバンチ長やビームサイズの増大、ビーム・ビーム効果によるビームサイズ増大などが問題となってくる。また、HOM パワーは全電流が一定ならばバンチ数に反比例するので、なるべくバンチ数を増やして HOM パワーを低く抑えることが

望ましい。一方、バンチ間隔がある程度より狭い場合には電子雲不安定に起因する陽電子ビームサイズ増大が発生し、陽電子リングや陽子加速器等で大きな問題となっている。電子雲不安定はビームからの放射光がチェンバーダクトをたたいて光電子を発生し、それがさらに二次電子を生成し、これらが陽電子ビームポテンシャルにとりこまれてビーム軌道付近に集まりビームと相互作用を起こす現象である。

KEKB のスペシフィックルミノシティ (バンチ当たりのルミノシティをバンチ電流の積で除した値、衝突点ビームサイズの指標となる) は 4 rf バケット間隔では良好であるが、バンチ間隔を狭めるにつれて劣化するという問題に長年悩まされてきた。その主要原因が電子雲不安定の問題であることは、垂直ビームサイズ増大の観測やベータatronチェーンのシンクロトロンサイドバンドの観測等により確認された (図 4)⁹⁾。放射光をビームダクト外側に逃がすスリットをもつ、いわゆるアンテチェンバーを装着している PEP-II に比べて、KEKB の電子雲不安定はより深刻である。そこでビームダクトにソレノイドを巻いてビーム軌道付近の電子雲密度を減少させる対策をとってきた。例えば 2004 年には 3.77 rf バケット間隔 (49 バケット中に 13 個のバンチを入れる) の場合に比較して 3.5 rf バケット間隔 (同 14 バンチ) では 15% もスペシフィックルミノシティが低かった (図 5a) が、ソレノイド区間を延長することで 2005 年には 3.5 rf バケ

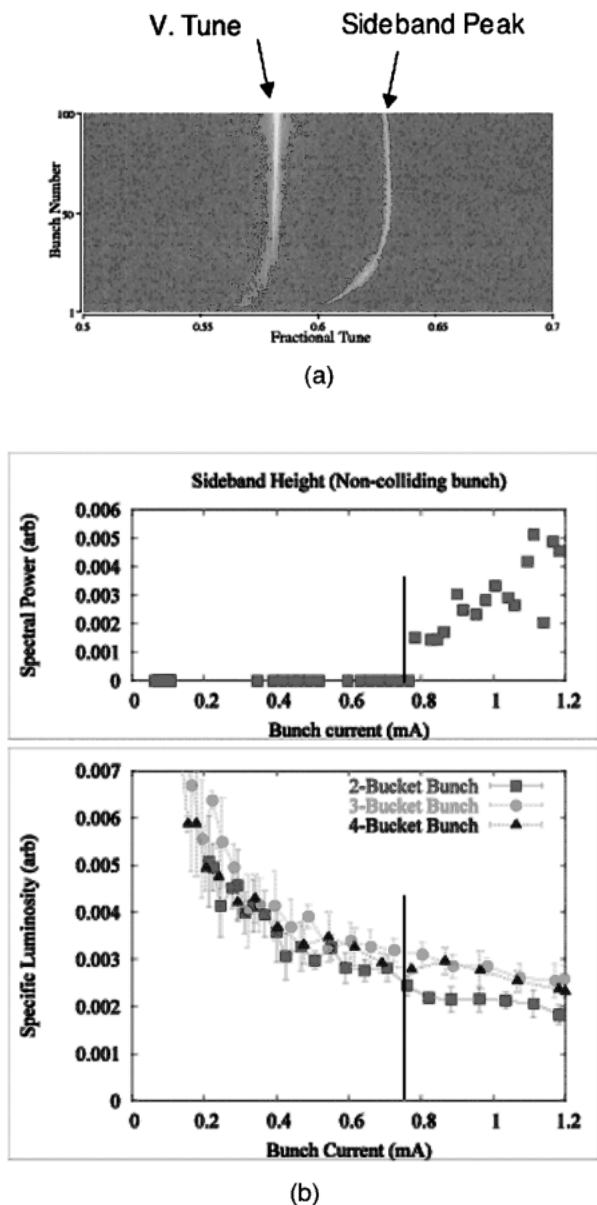


図4 (a)電子雲不安定に起因するKEKB陽電子ビームのシンクロトロンサイドバンドの観測, および (b)サイドバンド強度とスペシフィックルミノシティ⁹⁾

ット間隔でのルミノシティが大きく改善した (図5b)¹⁰⁾. しかしバンチ間隔がより狭い3.27 rfバケツ間隔 (同15バンチ) では依然としてスペシフィックルミノシティが劣化する. Q電磁石内部にまでソレノイドを巻いたが, 顕著な改善は見られていない¹¹⁾. このように, 電子雲問題は長年の努力によって大きく改善してきているが, KEKBの性能向上を阻む要因の一つとして依然として残っている.

PEP-IIはアンテチェンバーを持つが, それでもなお電子雲に起因するらしいマルチパッキングやバンチトレイン後部でのルミノシティ減少などが見られ

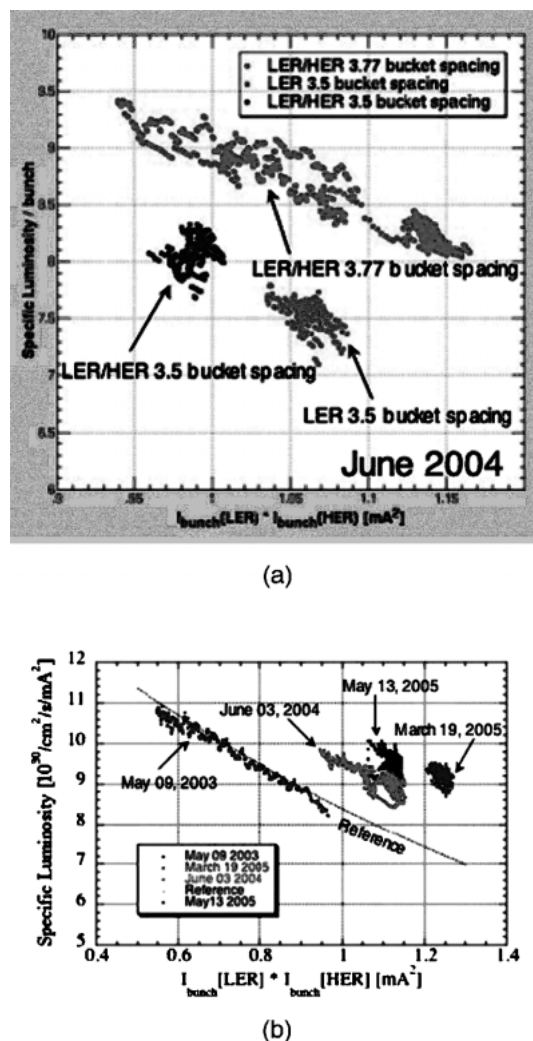


図5 (a) 2004年におけるKEKBの3.77および3.5 rfバケツ間隔でのスペシフィックルミノシティの比較, (b) 2005年の3.5 rfバケツ間隔でのルミノシティ改善の様子¹⁰⁾

た. しかし年月をかけて4 rfバケツ間隔から3 rfバケツ間隔, そして2 rfバケツ間隔と次第にバンチ数を増やすことが可能となった. これは, ソレノイド巻きによる電子雲対策に加え, KEKBと同様に半整数チューンに移行したことや, 加速器チューニング技術が向上したことなども貢献していると考えられている¹²⁾. 現在は2 rfバケツ間隔で安定に運転されている.

DAΦNEはイオン除去のためのバンチギャップを除いて全バケツにビームをつめている. 2003年のシャットダウンの後, 陽電子ビームは, 非常に速く成長する水平方向不安定が発生するようになり, 蓄積電流が1.4 Aを超えられなくなった. 大きな水平方向のチューンシフトや異常な圧力増大, ソレノイドやフィルパターン変更による変化, シミュレーションとの一

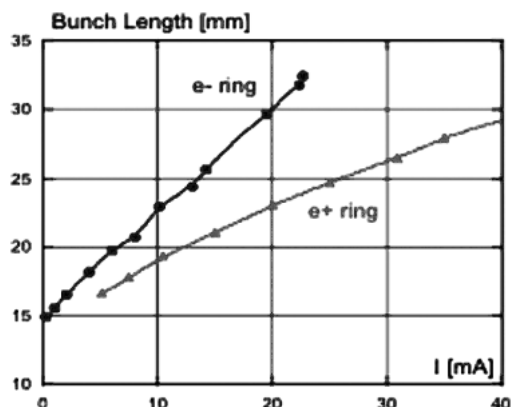


図6 DAΦNEのマイクロウェーブ不安定に起因するバンチ長増大¹³⁾

致などから、原因は電子雲であると考えられている¹³⁾。この年のシャットダウン時にウィグラー電磁石の磁極の変更作業が行われているが、なぜその後から問題となり始めたのか、その理由はよくわかっていない。もう一つの問題はマイクロウェーブ不安定によるバンチ長増大と垂直方向のブローアップである。図6に示すように、この問題は電子リングにおいて特に深刻である¹⁴⁾。電子リングにはイオン除去のための電極がとりつけられており、カップリングインピーダンスが陽電子リングより2倍程度大きいためである。

4.3 オプティクスおよびビーム・ビーム効果

表1に示したように、ファクトリー加速器においては大きなビーム・ビームパラメータと小さな衝突点 β_y^* が達成されているが、オプティクスに関してここでは以下の要因をあげておきたい。(1) Beta 関数, dispersion, coupling 補正などの線形オプティクスパラメータの正確な測定と精密な補正, (2) 6 極磁石等による非線形ダイナミクス補正の向上, とりわけ衝突点で発生する chromaticity をその近傍で効果的に補正する局所 chromaticity 補正スキーム, (3) KEKB で採用されている non-interleaved 6 極ペアをもつ 2.5π ラティス¹⁵⁾。

KEKB のように衝突点 β_y^* を 6 mm 程度に絞ってもなおビーム・ビーム効果によるビームサイズ増大が抑えられているのは、オプティクスに加えて、加速器の運転状況を常に最適状態に保ちつつさらに向上させる絶え間ない地道な調整によるところが大きい。KEKB では以下のような調整が継続的に行われている。(a) x-y coupling, dispersion, beta 関数など、リング全体のオプティクスの測定と補正 (頻度はおよそ週1度), (b) 衝突点付近のオプティクスパラメータやビーム軌道の最適化およびベータトロンチューンや6極設定値などのサーベイ (各シフトクルーの重要な役

割), (c) ルミノシティに影響を与えない測定とフィードバックにより常に最適値に保持される全周のビーム軌道, 衝突点位置, チューンの制御ならびにビーム・ビーム効果の観点からのビームサイズの最適化。

4.4 今後の性能向上の取り組み

それぞれのファクトリーの性能を現時点で制限している要因とその対策について、ここにまとめる。KEKB の性能をさらに向上させるには、(1) LER 電子雲の改善, (2) HER ビーム電流増強, そして(3) クラブ衝突が鍵となる。まず、電子雲については将来的にはアンテチェンバーへの交換を視野に入れて、まず直線部の一部区間について来年度の試験的導入を検討している。次に、HER ビーム電流の増加によってルミノシティが増加する傾向は今なお見えているので、RF システム増強と真空コンポーネントの発熱対策を行ってさらに HER ビーム電流を増強していくことも重要である。クラブ衝突については次節で述べる。

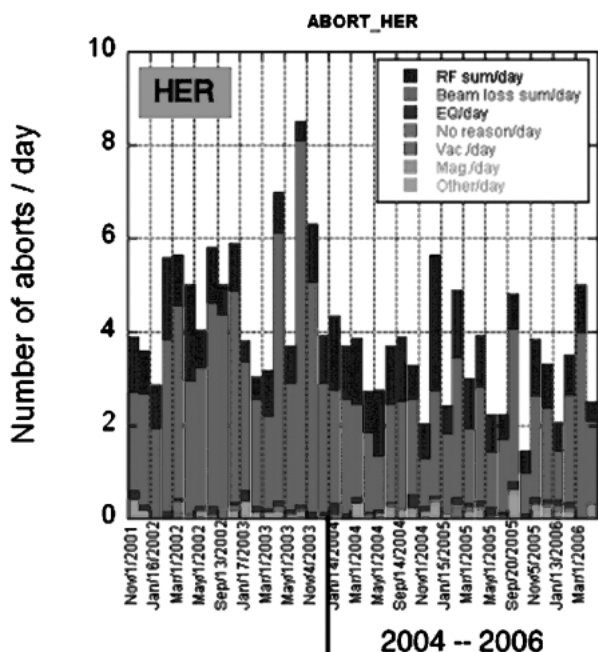
PEP-II は両リングのビーム電流を 40% 増やす、衝突点の β_y^* を 11 mm から 8.5 mm に絞る、ビーム・ビームパラメータを 10% 増やす、などの改善を行ってルミノシティを現在の2倍に高めたいという計画を示している¹⁶⁾。このために RF システムの増強、衝突点付近の真空コンポーネントの改良、HOM 発熱による脱落故障が頻繁に起きているビーム位置モニター電極の改良、そしてオプティクス測定と補正方法の改良などが必要である。

DAΦNE はマイクロウェーブ不安定によるバンチ長と垂直方向のサイズ増大の問題を改善させるために、電子リングのウィグラー部のイオン除去電極が取り除かれる予定である。また、現在の入射キッカーよりも格段に速い立ち上がりを持つキッカーを開発中である¹⁷⁾。

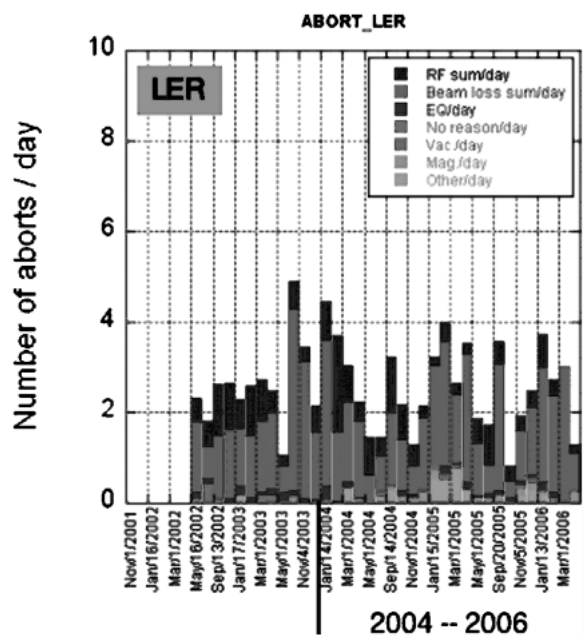
4.5 積分ルミノシティ

ファクトリー加速器の使命は膨大な数の生成粒子、すなわち非常に大きい積分ルミノシティを得ることであるから、ピークルミノシティに対する平均ルミノシティの比率をできる限り高くすることも重要である。この観点から(1)入射時間の減少あるいは連続入射, (2) ビームアポートの頻度の低減, (3) 長期間の安定な運転について述べる。

連続入射とは物理測定器を OFF せずに物理データ取得を行いながら常にビームを入射してビーム電流値を一定に保つ入射方式であり、2003 年から 2004 年にかけて KEKB と PEP-II で実用化された。常に高いビーム電流を維持し、かつその電流値に最適なビーム調整を行うことにより、同じピークルミノシティに



(a)



(b)

図7 KEKBの1日あたりビームアボート頻度(2001年11月から2006年6月までの月毎の統計), (a) HER, (B) LER²⁰⁾

対して平均(積分)ルミノシティが20%から40%程度も増大した^{18,19)}.

ビームアボート頻度の低減は長年にわたる地道な努力の積み重ねの結果である. 図7にKEKBの6年間にわたるアボートの統計データを示す²⁰⁾. 2004年以

降についてみると, 1日あたりのアボートの頻度はLERで約2回, HERで約3回と, PEP-IIの同種の統計に比べて格段に少ない. すべてのアボートの原因は直ちに解析される. それによると約60%はさまざまな理由によるビームロスが原因, 約28%はRFトリップが原因である.

2004年度および2005年度のKEKBの年間運転統計を図8に示す²¹⁾. 予定された運転時間のうち, 何らかの加速器トラブルで停止した時間(物理測定器の故障を除く)の割合は2004年度には3.9%, 2005年度には4.5%であった. 最先端の性能で運転している加速器としては非常に少ない故障率といってよいであろう.

5. 次世代のファクトリー加速器

現在のファクトリー加速器の1桁から2桁高い超高ルミノシティを目指すスーパーファクトリーが検討されている. 大電流ビーム, 小さい衝突点 β^* , 大きいビーム・ビームパラメータがルミノシティを決めるのはファクトリー加速器と同様であるが, それらを現在のファクトリー加速器の性能を超えてさらに飛躍的に向上させる必要がある. 一方, 革新的な衝突方式のアイデアがいくつか提案されており, シミュレーションや加速器での実験が行われようとしている. その成否は現在のファクトリー加速器のさらなる性能向上や次世代のファクトリー加速器のデザインに大きな影響を与えるであろう.

5.1 ビーム電流

ビーム電流については, これまで述べたようにファクトリー加速器によって2~3アンペアが十分に実用域となった. しかし次世代のファクトリーに向けて10アンペア程度以上を目指すには, RFや真空コンポーネント等の開発・改良をさらに重ねていく必要がある. また, バンチ長を短くする(例えば3mm程度)場合には, HOM発熱やCSRの条件が相当厳しくなることが予想される. なお, 蓄積できる最大バンチ数はRF周波数で決まっており, 表1にあるように多くのファクトリー加速器において370~509MHzである. このRF周波数を2倍に上げれば最大バンチ数を2倍に増加できる. 1GHzで1MW級連続波のRFハイパワーシステム開発は大きなチャレンジであるが, ビーム電流増加の観点からは魅力的な選択肢である.

5.2 新しい衝突方式の試み

クラブ衝突²²⁾はビームを進行方向に対して傾けることにより, 軌道は有限角度で交差するがビーム同士

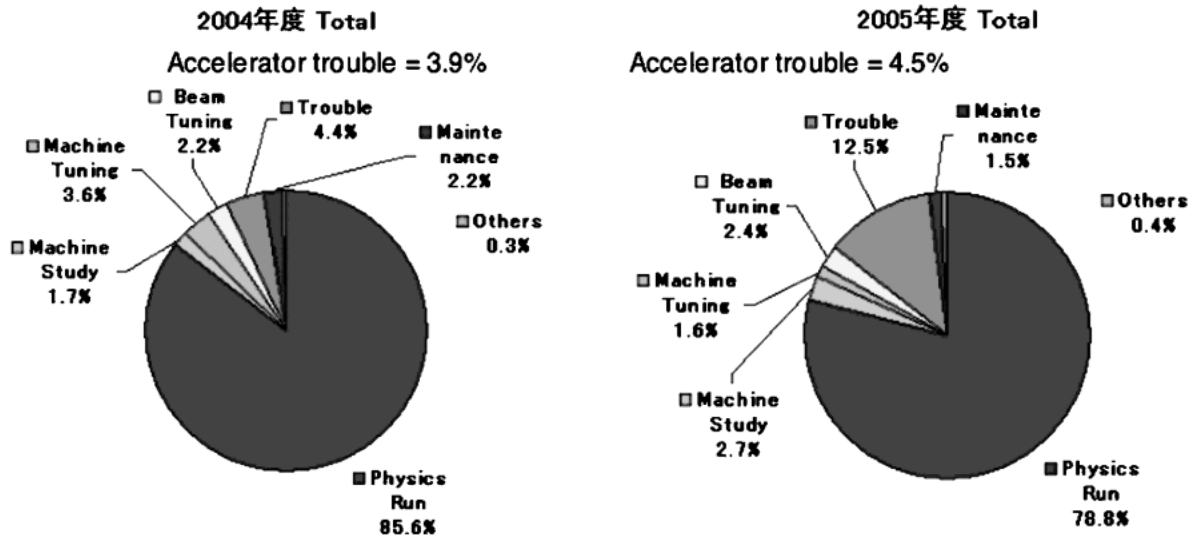


図8 KEKB年間運転統計 (2004年度および2005年度)²¹⁾

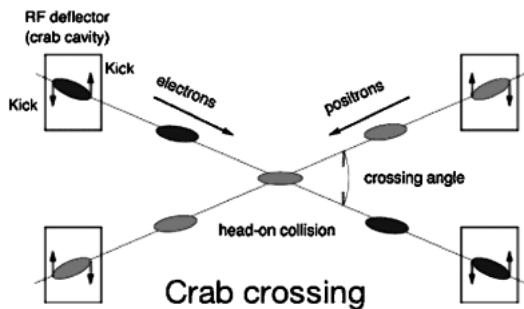


図9 クラブ衝突

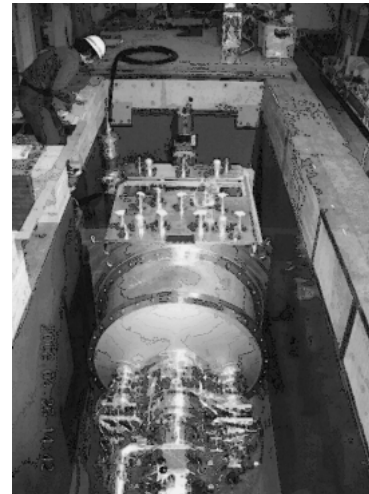


図10 組み立てを終え測定ピットに設置された KEKB 超伝導クラブ空洞

は実質的にヘッドオン衝突となる (図9)。シミュレーションにより、クラブ衝突は有限角度衝突に起因する幾何学的なミノシティ損失を回復させるにとどまらず、ビーム・ビーム効果の劇的な改善によりビーム・ビームパラメータを2倍以上高めることが示された²³⁾。KEKBでは世界初のクラブ衝突実験が行われる予定である。ビームを横方向に傾けるための2台の超伝導クラブ空洞^{24,25)}の製作は最終段階に入った。1台目のHER用クラブ空洞は横測定 (運転用クライオスタットに組み込んでの最終性能試験 (図10)) を今年6月に行い、必要なキック電圧1.4 MVを超える1.67 MVまで到達した。機械的サポート部の若干の改造、2台目のLER用クラブ空洞の組み立ておよび横測定を経て2006年度中にKEKBリングにインストールされる予定である。

最近、クラブウェイストという新しい巧妙なアイデアがLNFで提案された²⁶⁾。クラブ衝突と名前は似ているがそれとは異なる。これは6極電磁石のx-z couplingを利用して、バンチ内の水平方向の場所に

よって衝突点における焦点つまり β_y^* が最小となる場所を変化させる (図11)。この方式がもしうまくいけば、比較的長いバンチ長のビームを大きな有限角度を持つ軌道にそって衝突させ、しかも衝突点 β_y^* を極めて小さく絞れる可能性がある。長いバンチ長はHOM発熱やCSRの問題を回避する点でも非常に魅力的である。このスキームが現在や次世代のファクトリー加速器に適用できるかどうかを探るシミュレーション研究が精力的に行われている。また、加速器において実験的検証を行うことがKEKBやDAΦNEで検討されている。

5.3 スーパーファクトリー

物理実験のために予定された運転を数年以内に終了

する DAΦNE は, DANAE (DAΦNE New Adjustable Energy) へのアップグレードが提案された (図 12)²⁷⁾. DAΦNE と同じファイ粒子生成 (重心系で 1 GeV) から n-nbar を生成する 2.4 GeV までエネルギーを可変とする. ファイにおいてはルミノシティを 1 桁上げ $10^{33}/\text{cm}^2/\text{s}$ 以上のスーパーファイファクトリーを目指す. 現在の建屋や大部分の電磁石や入射器などは再使用されるが, エネルギー増強のためのダイポール磁石およびルミノシティ増強のための真空チェンバーや RF システムは新しく置き換えることを想定している.

スーパー B ファクトリーについては, KEKB をアップグレードして SuperKEKB とする提案が行われ, Letter of Intent が 2004 年に出版された²⁸⁾. Super-

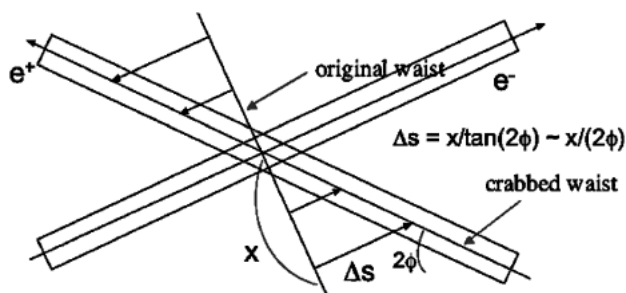


図 11 クラブウェイスト概念図²⁶⁾

KEKB の概念図を図 13 に示す. LER で 10 A 程度, HER で 4.4 A と KEKB の 4~5 倍のビーム電流を蓄積し, クラブ衝突を採用する. RF システムは KEKB のものをベースとして再使用するが, HOM ダンパーの増強や加速空洞の改良を行う. またステーションの規模は 2 倍以上となる. 真空ダクトは全周アンテナンバー化する. 以上がベースラインデザインであるが, その後提案されたクラブウェイストを適用する可能性や 1 GHz の RF システムの導入の可能性など, 今後の検討と R&D 次第で流動的な要素もある.

LNF と SLAC でも Super-B ファクトリーの検討が行われている^{29,30)}. 当初検討されていた案では, リニアコライダーのように極限まで β^* を絞って衝突させ, その後ダンピングリングでエミッタンスを回復することをもくろんでいた. しかしダンピングリングでの非現実的な電力消費量やビームブローアップなどの問題が明らかとなって断念された. 結局やはりリング方式に落ち着いたが, クラブウェイストの採用および 1 nm 程度の低エミッタンスダンピングリングと 0.1 mm 以下の衝突点 β^* を組み合わせて, ビーム電流は現在の B ファクトリー程度に抑えて高いルミノシティを得ようとしている.

このように, 2 つのスーパー B ファクトリーが独立に検討されており, いずれも現在の B ファクトリーのルミノシティを 2 桁程度上回る $10^{36}/\text{cm}^2/\text{s}$ 程度を

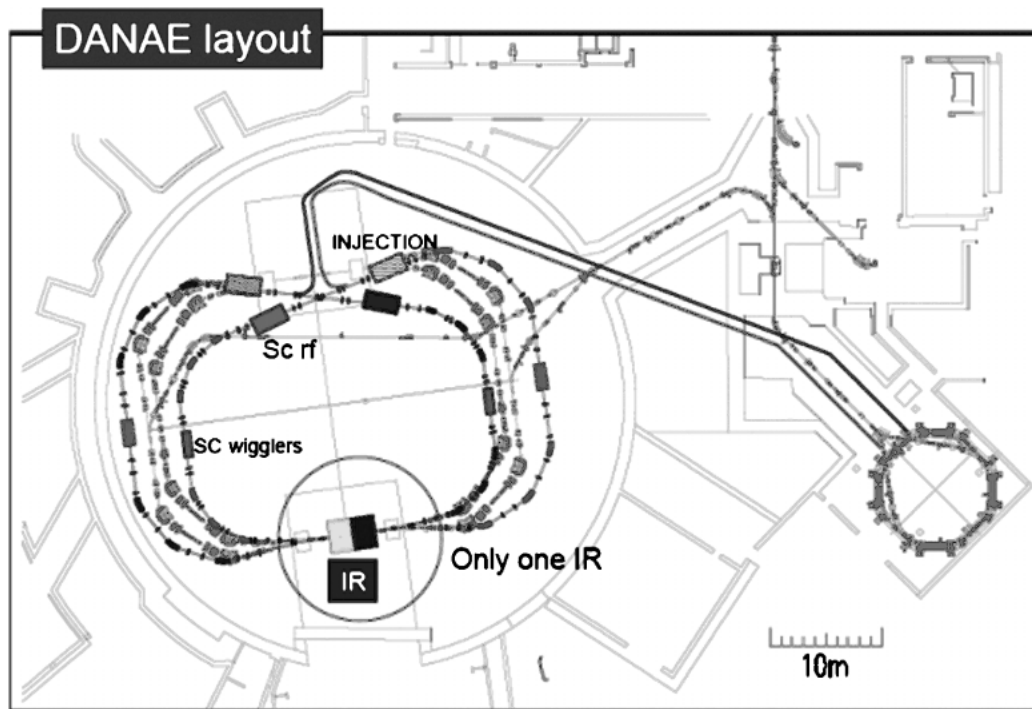


図 12 DANAE レイアウト²⁷⁾

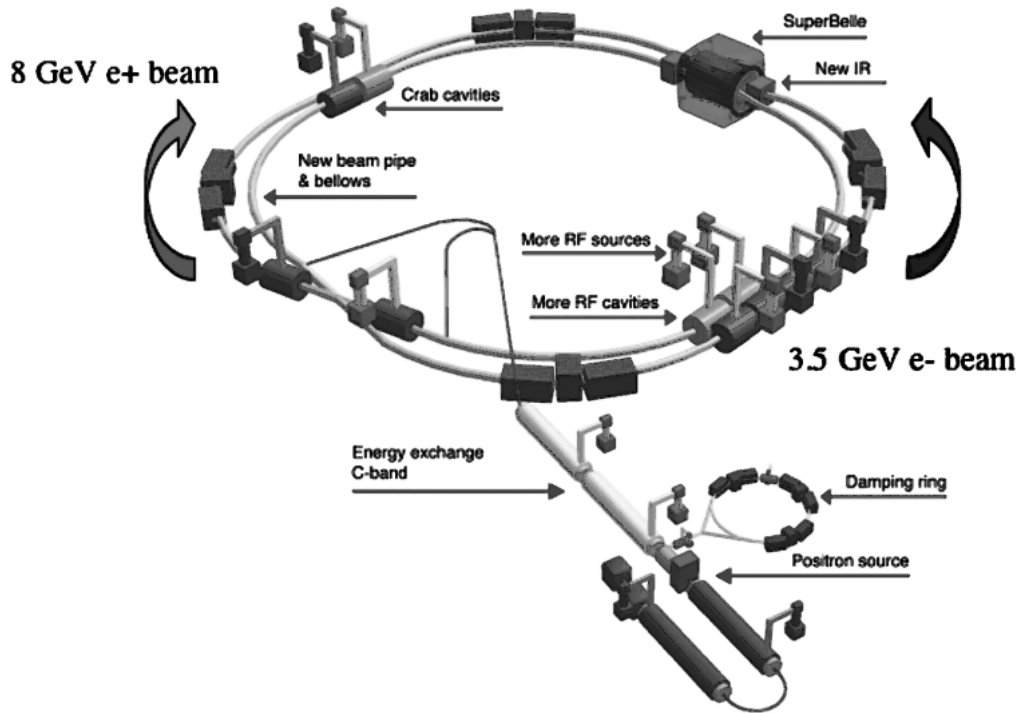


図13 SuperKEKB 概念図

ターゲットとしている。今後研究協力をさらに進展させ、良いものはお互いに取り入れて、より高い性能を目指す努力が続けられていくであろう。

6. おわりに

ファクトリー加速器は高いルミノシティで安定に運転を続け、膨大な積分ルミノシティを物理測定器に供給して多くの重要な成果をもたらしてきた。引き続きルミノシティフロンティアとしてさらなる性能向上を目指し、スーパーファクトリーの実現に向けて活発な研究活動が行われている。

本稿をまとめるにあたり、多くの方々からデータや情報の提供および助言をいただいたことに感謝します。また、KEKBに関する記述はKEKB加速器チームの長年にわたる成果であることを書き添えます。

参考文献

- 1) “KEKB Accelerator Papers”, Nucl. Instr. Meth. A 499 (2003).
- 2) T. Agoh, Ph. D. theses, Univ. of Tokyo (2004).
- 3) S. Mitsunobu et al., Proc. 7th RF Superconductivity, p. 735 (1995).
- 4) Y. Yamazaki and T. Kageyama, Part. Accel. 44, p. 107 (1994).
- 5) S. Yoshimoto et al., Proc. 14th Symp. Accel. Sci. and Tech., p. 323 (2003).
- 6) P. Corredoura et al., PAC95, p. 2672.
- 7) Y. Suetsugu, PAC03, p. 612.
- 8) M. Tobiyama and E. Kikutani, PRST-AB 3, 012801 (2000).
- 9) J. Flanagan et al., Phys. Rev. Lett. 94, 054801 (2005), J. Flanagan et al., PAC05, p. 680.
- 10) Y. Funakoshi et al., PAC05, p. 1045.
- 11) H. Fukuma et al., EPAC06, p. 2901.
- 12) F.-J. Decker et al., EPAC04, p. 842.
- 13) M. Zobov, private communication.
- 14) M. Zobov, PAC05, p. 112.
- 15) H. Koiso and K. Oide, PAC95, p. 2780.
- 16) J. Seeman, PEP-II MAC06, SLAC, January (2006).
- 17) A. Gallo, private communication.
- 18) Y. Funakoshi et al., EPAC04, p. 707.
- 19) U. Wienands, PAC05, p. 149.
- 20) H. Ikeda et al., EPAC06, p. 1139.
- 21) 三菱運転員による KEKB 運転統計
- 22) K. Oide and K. Yokoya, Phys. Rev. A40, 315 (1989).
- 23) K. Ohmi et al., PAC03, p. 353.
- 24) K. Akai et al., HEACC92, p.757.
- 25) K. Hosoyama et al., APAC98.
- 26) P. Raimondi, SuperB Meeting, Frascati, March 2006.
- 27) C. Biscari et al., “DANA Letter of Intent”.
- 28) “SuperKEKB Letter of Intent”, KEK Report 2004-4, June 2004.
- 29) 1st and 2nd SuperB workshop, LNF, November 2005 and March 2006.
- 30) 3rd SuperB workshop, SLAC, June 2006.