

話題

KEKB 加速器が切り開いたルミノシティ最前線

赤井 和憲^{*1}・小磯 晴代^{*2}

The KEKB accelerator: pioneer of the luminosity frontier

Kazunori AKAI^{*1}, Haruyo KOISO^{*2}

Abstract

KEKB stopped the operation on June 30, 2010, and has started to upgrade to SuperKEKB aiming at 40 times higher luminosity to search for new physics beyond the Standard Model. Since 2001 KEKB has been running at the world highest luminosity and has achieved the record of $2.11 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, which is more than twice the design luminosity. This paper describes the history, achievements, and operation experiences of KEKB.

1. はじめに

2010年6月30日、高エネルギー加速器研究機構のBファクトリー KEKB は、1997年の入射器コミショニングから始まったビーム運転を終了し、SuperKEKBに向けて第一歩を踏み出した。KEKBは、2001年にライバルのPEP-IIを追い越し、 $3.4 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ を達成してルミノシティ最前線に立った。以後順調に衝突性能を上げ、最終的には設計値の2倍を上回る $2.11 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ を記録している。Belle測定器が蓄積した総積分ルミノシティは 1040 fb^{-1} である。

KEKBのコミショニングと成果については、小林・益川理論の実証に貢献したことを記念して加速器学会誌に特集が組まれ¹⁾、また最近のクラブ交差によるルミノシティ記録更新についても報告がなされ

ている²⁾。これらの記事と重複する部分もあるが、この機会に、KEKBのこれまでの歩みと到達点を見直してみたい。主な履歴を表1以下にまとめておく。

2. マシン・パラメータの設計と現実

KEKBは3.5 GeV陽電子リング(LER)、8 GeV電子リング(HER)、および入射リニアックから成る、エネルギー非対称な2リング・コライダーである。KEKBの設計が開始された1989年頃は、米国Cornell大学のCESR(5.3 GeVの1リング電子・陽電子コライダー)がルミノシティ最前線に立ち、KEKBが目指すルミノシティ $1 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ は、CESRの100倍に当たるものであった(図2参照)。

衝突型加速器のルミノシティ(L)は、三つの主要パラメータである、ビーム電流(I_{\pm})、衝突点にお



図1 制御室におけるビーム運転終了セレモニー³⁾

*1 高エネルギー加速器研究機構 (E-mail: kazunori.akai@kek.jp)

*2 高エネルギー加速器研究機構 (E-mail: haruyo.koiso@kek.jp)

表 1 KEKB の主な履歴

1989	設計開始
1994	建設開始
1997	入射リニアック改造終了, ビーム運転開始
1998	リングビーム運転開始
1999	Belle 検出器で最初の素粒子反応観測
2001	PEP-II を追い越し, 当時の世界最高ルミノシティ $3.4 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 達成
2002	陽電子 2 バンチ / パルス入射開始
2003	設計ルミノシティ $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 達成
2004	連続入射モード開始
2007	クラブ交差開始
2009	電子・陽電子同時入射開始 クラブ交差以前の記録を更新し, 設計値の 2 倍を超える $2.11 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 達成
2010	積分ルミノシティ 1040 fb^{-1} 達成 アップグレードに着手

る垂直方向 β 関数 (β_y^*), および垂直方向ビームビーム・チューンシフト・パラメータ ($\xi_{y\pm}$) によって以下のように表される (\pm は陽電子および電子ビームに対応, 衝突点の β 関数とビームサイズは両ビームで同じとする).

$$L = \frac{\gamma_{\pm}}{2e r_e} \left(1 + \frac{\sigma_y^*}{\sigma_x^*} \right) \frac{I_{\pm} \xi_{y\pm}}{\beta_y^*} \left(\frac{R_L}{R_{\xi_{y\pm}}} \right)$$

ここで, R_L と $R_{\xi_{y\pm}}$ はそれぞれ, 砂時計効果や衝突点における交差角などによる, ルミノシティと ξ_{\pm} に対する補正係数であり, バンチ長が β_y^* に比べて十分に小さければ $R_L/R_{\xi_{y\pm}} \sim 1$ となる.

高ルミノシティを得るには, I_{\pm} と $\xi_{y\pm}$ を大きく, β_y^* を小さくする必要がある. この基本的な方針に沿って, KEKB では, ビームビーム・チューンシフト・パラメータとして当時想定された最大値 $\xi_{y\pm} = 0.052$ を選び, $\beta_y^* = 1 \text{ cm}$ とビーム電流 2.6 A (LER) / 1.1 A (HER) を目標とした.

主なマシン・パラメータについて, 有限角度交差およびクラブ交差で最高ルミノシティを達成した時の値を, 設計値と合わせて表 2 に, また, 衝突開始後の全期間の履歴を図 3 に示す.

2.1 ビーム電流とバンチ間隔

大電流運転については第 4 章で詳しく報告するが, 実用運転でのビーム電流は, 表 2 に示すように, HER では設計値より高く, LER は低い値であった.

KEKB の性能に最も大きな影響を及ぼしたものは,

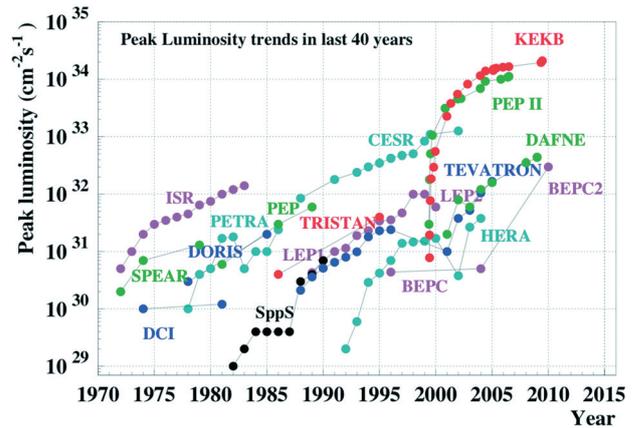


図 2 世界のコライダーのルミノシティ⁴⁾

電子雲不安定性による LER の垂直方向ビームサイズ増大である. 電子雲による結合バンチ不安定性は設計時に考慮され, ビームパイプをアンテナチャンバー型にしなくともバンチ毎フィードバックによって抑制できると予想されていた. ところが, 実際に障害となったのは単バンチ・ヘッドテイル不安定性であり, ドリフト空間にソレノイドを巻き付けるという対策によって電子雲密度を下げ⁶⁾, ようやく 2001 年に当時の世界最高ルミノシティを達成した.

電子雲の影響は, 最後まで完全には排除できず, 設計ではバンチ間隔 1 バケットを想定していたが, 実際は平均 3.06 バケットが最短であった. このため, 設計値と比較して, バンチ数が少なくバンチ電流が大きい状態となり, 大電流を蓄積するに当たって各種ハードウェア機器には大きな負担を強いることになった (入射リニアックとリングの RF 周波数の関係から, 2 バンチ / パルス入射の場合は 49 バケット毎に同じバンチ・パターンにする必要がある. 平均 3.06 バケットは, 3 バケット 15 ヶ所と 4 バケット 1 ヶ所の繰り返しパターンとなる).

2.2 ビームビーム・パラメータ

2.2.1 有限角度交差

KEKB では, 衝突点においてビーム軌道に水平方向 22 mrad の交差角を与えている⁷⁾. 有限角度交差には, 衝突点近傍にビームを分離するための偏向磁石を配置する必要がなく, 衝突点の設計が単純化され, 測定器バックグラウンドも大幅に軽減される, という大きな利点がある. また, 有限角度交差によるシンクロトロン・ベータトロン結合の影響は, ベータトロン・チューンを適切に選べば障害とならないことが, 設計時のシミュレーションで確認されていた.

表2 主要なマシン・パラメータ. 垂直ビームサイズ実現値は, 両リングで等しいと仮定して, ルミノシティから推定した

	6/17/2009		11/15/2006		Design		
	LER	HER	LER	HER	LER	HER	
Eff. crossing angle	0 (crab)		22		22		mrاد
Current	1.64	1.19	1.65	1.33	2.6	1.1	A
Bunches	1584		1389		5000		
Current/bunch	1.03	0.75	1.19	0.96	0.56	0.22	mA
Spacing mostly	mostly 1.8		1.8 or 2.4		0.6		m
Emittance ϵ_x	18	24	18	24	18	18	nm
β_x^*	120	120	59	56	33	33	cm
β_y^*	0.59	0.59	0.65	0.59	1.0	1.0	cm
Hor. Size @IP	147	170	103	116	77	77	μm
Ver. Size @IP	0.94	0.94	1.9	1.9	1.9	1.9	μm
Bunch length	~7		~7		5		mm
ξ_x	.127	.102	.116	.134	.039	.039	
ξ_y	.129	.090	.101	.056	.052	.052	
Luminosity	21.08		17.6		10		/nb/s
\int Lum./day	1.479		1.232		~0.6		/fb
\int Lum./7 days	8.43		7.82		-		/fb
\int Lum./30 days	27.2		30.2		-		/fb

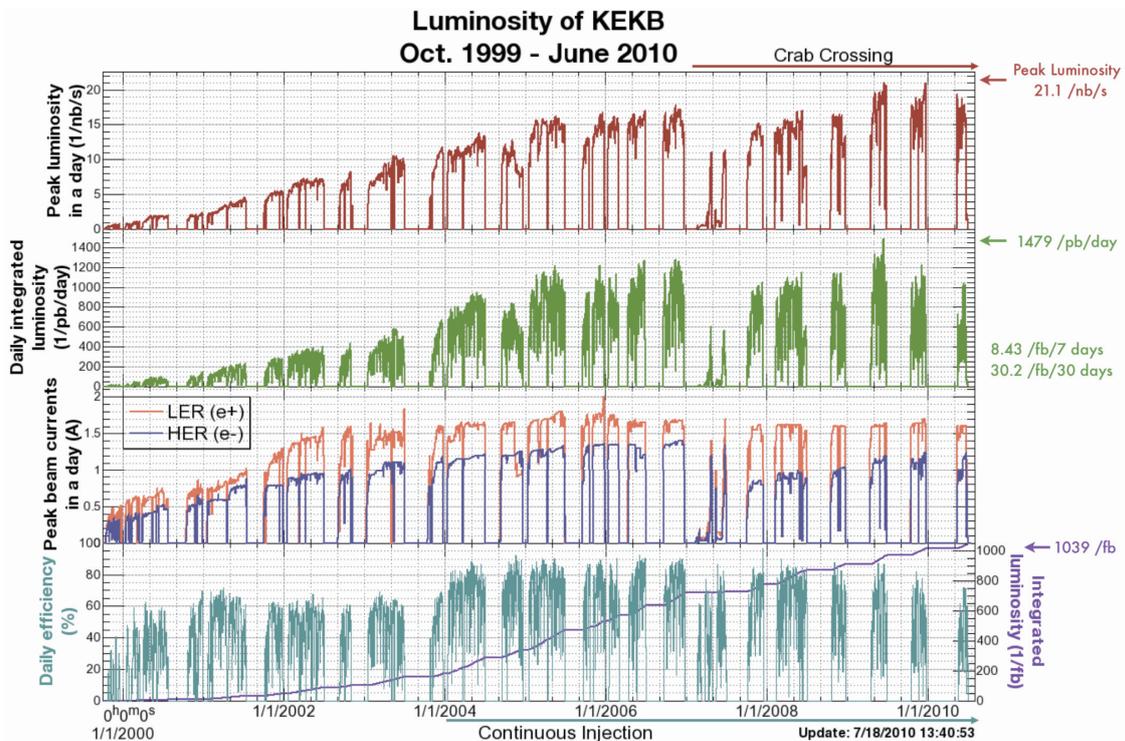


図3 KEKB の履歴⁵⁾: 上段からピーク・ルミノシティ ($1/\text{nb/s} = 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$), 1日当たりの積分ルミノシティ, ビーム電流最大値 (LER および HER), 総積分ルミノシティおよび効率 (1日当たりの積分ルミノシティとピーク・ルミノシティ×24時間の比).

KEKB では実際に、有限角度交差によって設計値を大きく超える $1.76 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ が達成され、ビームビーム・パラメータについても設計値を超える $\xi_y=0.056$ が得られた。

2.2.2 クラブ交差

ビーム軌道の交差角を維持したまま正面衝突と同等の衝突状態を実現できるクラブ交差に注目が集まったのは、正面衝突で飛躍的に大きな ξ_y を達成できる可能性のあることが、ビームビーム・シミュレーションで新たに示されたからである⁸⁾。クラブ交差に必要な超伝導クラブ空洞は、有限角度交差のバックアップとしてKEKBの当初から開発が進められていた。

KEKB では、2007年に両リングに1台ずつクラブ空洞を設置し、クラブ交差によるビーム衝突を開始した。2年間にわたるビーム調整の結果、クラブ設置以前の記録を上回るルミノシティが達成され、これが最終的なKEKBのピーク・ルミノシティ記録となった。

クラブ交差によってビームビーム・パラメータは世界最高値に近い $\xi_y=0.09$ が得られたが、残念ながら、シミュレーションから期待された $\xi_y \sim 0.15$ は達成できず、この経験がSuperKEKBの設計方針を、大電流・クラブ交差方式からナノビーム方式に転換する主要因の一つとなった。

2.3 衝突点 β 関数

KEKBのラティスは、衝突点垂直 β 関数を1 cmまで絞った状態で十分な力学口径を持ち、同時に、水平エミッタンスと運動量圧縮率について各々独立に広い調整範囲を確保できるように、アーク部を「2.5 π セル構造」と呼ばれる特殊なセルで構成している⁷⁾。セル内の六極磁石は、2台の六極間の転送行列が $-I'$ 変換となるようにペアを組み、しかも各ペアが相互に重なり合わないよう配置される。この配置により、六極磁石の非線形性はペアを成す六極間ではほぼ相殺されるので、広い力学口径を得ることができる。さらに、十分な Touschek 寿命を得るために、より広い力学口径を必要とするLERには、衝突点区間にも六極ペアを設置し、「局所色収差補正」を行っている。

KEKBのラティスは、期待どおりの性能を発揮し、両リングとも設計値より小さい $\beta_y^*=0.59 \text{ cm}$ を実現した。バンチ長の実測値は6~7 mmなので、バンチ長から許容される下限近くまで β_y^* を絞ったといえる。

HERの水平エミッタンスは、LERの電子雲対策が不十分だった時点で、LERとのバランスをとって設計値より大きい24 nmに設定され、以後この値で調

整が進められたため、そのままになっている。また、運動量圧縮率は、設計値よりバンチ数が少なくバンチ電流が大きい状態に対応して、バンチ長を長めにするために調整されている。このような2.5 π セル構造のflexibilityは、できる限り少ない変更によってSuperKEKBで要求される低エミッタンスを実現するために、最大限に活用されることになる。

3. ルミノシティ調整

KEKBの性能を支える主要な項目の全てが、設計時に想定されていたわけではない。ビーム運転の試行錯誤の中から生まれてきたものも多い。そのいくつかを以下で紹介する。

3.1 入射方式

表1に主要なステップとして挙げた、「2バンチ/パルス入射」、「連続入射モード」、「同時入射」も、当初の計画にはなくビーム運転の過程で開発されてきたものである^{9,10)}。特に2004年に実用化された連続入射モードは、Belle測定器のデータ収集を行いながら、同時に入射器からリングへのビーム入射を行う運転モードであり、ビーム電流を一定に保って高ルミノシティを維持できるため、積分ルミノシティを飛躍的に高めた(図3の2.4段目参照)。このとき、PEP-IIもほぼ同時に連続入射モードを実用化している。

3.2 マシン・エラーの補正

加速器が設計どおりの性能を発揮するには、ビームを使ったマシン・エラーの補正が必須である。特にKEKBでは、高ルミノシティを追求して、水平ベータatron・チューンの動作点を半整数共鳴線に近づけていったために、オプティクスはエラーに敏感になり、補正はますます重要になった。

補正の基本的な方針は「ステアリング磁石によるキックやRF周波数シフトに対するビーム軌道の応答が、モデルに近くなるようにする」という単純なもので、磁石電源の微調整と六極磁石に立てる水平・垂直バンパ軌道がコレクターとして使われた。 $-I'$ 変換で結合された六極ペアは、垂直方向の対称バンパで水平垂直カップリングを、反対称バンパでディスパージョンを、それぞれほぼ独立に調整できるため、大変有効な補正ツールとなった。

3.3 IPノブ調整

高ルミノシティを達成するには、リング全周のオプティクスを補正した上で、さらに衝突点の光学系パラメータを調整する必要があった。ここでも六極バンパが活躍し、衝突点の両側各8台の六極磁石に

バンプ軌道をつくって、衝突点の水平垂直カップリング・パラメータ、垂直ディスパージョンなどの微調整を行った。調整すべきパラメータは30以上あり、通常はパラメータを1つずつスキャンして、ルミノシティ、ビームサイズ、ビーム寿命、チューン、入射効率、等々の限られた観測を総合的に判断して、最適値を求めた。加速器の状態は刻々と変化していくので、物理ランを行っている間、常に調整が続けられた。

3.4 カップリングの運動量依存性

クラブ交差におけるルミノシティ記録更新の突破口を開いたのは、歪六極磁石による水平垂直カップリングの運動量依存性の補正である²⁾。Belle 測定器のソレノイド磁場は、逆極性の補償ソレノイドによって、衝突点の両側でそれぞれ積分値がゼロになるように補正されている。しかも、衝突点から最終収束磁石までのドリフト空間内で、積分値がゼロに近くなっているため、水平垂直カップリングの運動量依存性は本来小さい。したがって、それまで水平垂直カップリングの運動量依存性補正は行ってこなかった。

クラブ交差によるルミノシティ調整を行っている過程で、水平垂直カップリングの運動量依存性がルミノシティを制限している可能性が指摘され、急遽小型の歪六極磁石を製作・設置し調整に用いたところ、明らかな効果を発揮した。この歪六極磁場による調整は、少数バンチ（～100バンチ、電子雲の影響を受けない）の衝突実験で、有限角度交差の場合にもクラブ交差と同程度の効果があることが確認された。

4. 大電流運転

KEKB の設計ビーム電流値 2.6A (LER) /1.1 A (HER) は、前身の TRISTAN 加速器に比較して二桁高い。KEKB と同時期に建設された PEP-II とともに、未踏のビーム電流領域での運転は、ハードウェア機器にとって大きなチャレンジであった。

蓄積電流が高く、かつ周長の長いリングで特に問題となる、加速モードに起因する縦方向結合バンチビーム不安定への対策として、KEKB では ARES 型常伝導空洞および超伝導空洞を採用した。ARES 空洞は、加速空洞に Q 値の高い電磁場エネルギー貯蔵空洞を結合空洞経由で共鳴的に結合させた三空洞系である。一方、超伝導空洞は加速電圧が高く、いずれの場合も空洞内の貯蔵エネルギーが高いので、ビーム負荷に整合させるための離調周波数が小さく、し

たがって、当該不安定の発生する電流閾値が高い。従来型常伝導空洞を使用し、フィードバックで不安定を抑え込もうとする PEP-II とは対照的な、KEKB の特長の一つである。

高次モード (higher order mode; HOM) などの寄生モードに起因する結合バンチビーム不安定や局所発熱を抑制するため、加速空洞、可動マスク、ベローズなど、ビームとの電磁的な相互作用の特に強い機器においては、高い Q 値のトラップモードを除去し、インピーダンスを十分に低減するよう、工夫した。

ビームがリング内で放射光や寄生モードロスによって失うエネルギーは、RF システムから補給される。KEKB では低い RF 電圧で高いビームパワーを供給するため、各空洞の運転パワーが高い。ARES 空洞 2 台に供給する RF ステーションでは連続波 700 kW 程度での定常運転となり、大電力機器の地道な維持・保守も大電流運転を支えていた。

ビーム電流が高いほど、ビームからの放射光やウェイク電磁場が強くなり、ビームにさらされる各機器には放電の発生や発熱によるリスクが増す。機器の異常やビーム不安定によって、正常な軌道から外れたビームに直撃されることもある。これらは、真空リークや機器の破損を引き起こす場合が往々にしてある。このようなリスクを考慮して設計された機器ではあるが、ビーム電流を上げていく過程で、予測していなかったさまざまな問題が発生した。故障のたびに深夜でも担当者が対処して、最速の復旧作業を行うとともに、より高い電流に耐えられるよう、機器の改良を続けた。このようにして、次第に KEKB 全体として大電流に対して robust なものへと成長していった。ビーム電流増強の観点から、**図 3** の三段目、両リングのビーム電流の履歴を参照しつつ、運転を振り返ってみたい。

4.1 運転開始から 2003 年頃まで

コミッションはまず小電流でスタートし、加速器調整を行いながら、約 3 年程度かけて徐々にビーム電流を増加させた。この期間は、大電流ビームからの影響を最も強く受ける機器、たとえば可動マスクやベローズ等の真空機器、RF 空洞の入力カップラーや HOM ダンパー、フィードバックのキッカーなどにおいて、数多くのトラブルが発生した。故障の状況、原因と対策について、加速器学会誌の KEKB 特集記事等¹¹⁻¹⁴⁾ に詳しく報告されているので、ここでは割愛する。

この他に印象に残っている事例として、Belle 検出器の衝突点ビームパイプが異常発熱し、あわや大

事故, と肝を冷やしたことがある. 通常は4ないし3バケット間隔のフィルパターンでビームを蓄積しているが, この時は加速器スタディのため5バケット間隔で積んでいた. 衝突点ベリリウムパイプを放射光から保護するためにつけた突起状の光マスクによって囲まれた領域が空洞形状をなし, 5バケット間隔のビームスペクトルのピークの一つに非常に近い周波数に共振モードが存在し¹⁵⁾, それが共鳴的に成長したことが原因とわかった. その後, 衝突点ビームパイプを改造する際に, 空洞形状を作らないように, 下流側のマスクが取り除かれた.

ある機器に問題が発生すると, 原因を調査して改良を行い, そこを超えて新しい電流領域に入ると別の問題に直面する, という「もぐらたたき」を繰り返しながらも, 次第に高い電流領域に進んでいった. この間, PEP-II との競争というプレッシャーが, 大きな力となっていたことも確かであろう.

新しい電流領域に入る時に慎重を期すため, また不注意な操作等により過大なビーム電流を積むことのないように, 全電流, 全電流の2乗/バンチ数, 全電流/バンチ数の三つのパラメータの上限値を, 管理しながら運転した. 全電流は主として放射光パワーによる発熱に対して, 全電流の2乗/バンチ数は HOM パワー (共鳴の影響は別として) に対して, 全電流/バンチ数は主としてビームモニタ電極への過大な入力に対して, それぞれ機器の保護を目的として, 状況に応じて設定された.

4.2 2003 年から 2006 年頃まで

この期間の LER ビーム電流の増加は 1.6 A から 1.8 A 程度までと小さい. この理由は, 電子雲によるビームサイズ増大のため, それ以上 LER 電流を増やしてもルミノシティ増加に結びつかなかったからである. 前述のように, ソレノイドによる対策を講じ大きく改善したが, 電子雲は完全には解消されず, 1.8 A を超えると深刻な影響を及ぼす状況は最後まで続いた. なお, 2005 年末の加速器スタディにおいて, LER に試験的に 2 A (3バケット間隔) を蓄積し, この電流でもハードウェアとして問題のないことを確認した.

一方, HER は設計値 1.1 A を超えてさらに電流を増やせばルミノシティが増加する傾向が見られていた. そこで, RF ステーションを増設するとともに, HOM ダンパーの冷却能力を増強した. また, 超伝導空洞の入力カプラーの突き出し量を変えて負荷 Q 値を下げ, より大電流にマッチングさせるとともに, ドアノブ型同軸・導波管変換部の冷却強化などを行い, 空洞あたりのビームパワーを設計値の 250 kW か

ら 400 kW 程度まで高めた. このようにして, 最大 1.4 A まで HER ビーム電流を高めることができ, ルミノシティ向上に大きく貢献した.

初期に多発した, ビームの影響による機器の故障はこの時期には激減した. また, ビームアポートの頻度は, 大電流との関連の有無にかかわらず全てのアポートを合計しても, 1日あたり平均わずか2~3回程度である. 故障が少なく, アポートの少ない安定な運転を長期間続けることで, 積分ルミノシティが飛躍的に増加した.

4.3 2007 年から 2010 年 6 月まで (クラブ交差運転)

クラブ交差運転開始後, 最初の約半年間はもっぱら小電流 (通常と同程度のバンチ電流で, バンチ数を減らす) での加速器ビーム調整を続けていた. しかし, スペシフィック・ルミノシティがなかなか期待されたようには上がらず, コミッシュニングは苦戦していた. Belle 実験グループとの約束で, 秋からは大電流ルミノシティランに戻すことになっていたが, それをクラブ交差で行うかどうか, 議論的となった. クラブ空洞をディチューンして, 非クラブ交差に戻してはどうかという意見があった. そもそも, 大変複雑な構造を持つクラブ空洞が大電流に耐えられるか, 疑問視する見方もあった. たとえディチューンしても, クラブ空洞のために大電流を蓄積できない恐れがあるならば, 夏のシャットダウン中にリングから撤去すべし, というわけである.

そこで, クラブ空洞の大電流蓄積試験を4月と6月に各2週間かけて行った. 4月の試験では空洞真空圧力の悪化, 同軸ビームパイプの発熱等の問題が起きた. 前者は空洞周辺の新しい真空機器から発生するガスが空洞表面に吸着されるため, 後者は同軸部の冷却が不足しているためと考えられた. そこで, まず空洞をディチューンして, ビームによる真空スクラッピングを十分に行い, その後室温まで加温して脱ガスを行った. また, 冷却系を改造して, 同軸部のヘリウム流量を増やした. この結果, 6月の試験ではクラブ空洞運転時およびディチューン時の両方で, クラブ空洞が大電流での実用運転に十分耐え得ることを確認することができた¹⁶⁾. そこで, 10月からの大電流ルミノシティランをクラブ交差で行うこととなった. その後2010年6月の運転終了に至るまで, クラブ交差でのビーム調整が継続された.

この期間のビーム電流はクラブ導入以前よりも低い. 初期のころ電流制限となった主要因は, 高いバンチ電流積でのビーム寿命低下である. これはク

クラブ空洞付近の物理口径によるものと考えられた。LER はクラブ空洞の場所ではなく、その周辺で水平ベータ関数が最大になっていたため、付近の四極磁石の配線を大幅に変更して、クラブ空洞でベータ関数が極大になるように改善した。また、衝突点の水平ベータ関数をゆるめて、両リングのクラブ空洞のベータ関数を下げた。これらによりビーム寿命が改善し、バンチ電流積を増加させることができた²⁾。このほか、LER 電流が 1.6 A 以下に制限されていたのは、クラブ空洞下流側テーパ部におかれた SiC 製 HOM ダンパーの吸収パワーがテストスタンドでの試験の実績値を上回っていたので、発熱による故障が心配されたためである。2009 年夏に HOM ダンパーを追加して HOM パワーを分散化させる対策をとり、その後 1.7 A まで上げることができた。

なお、クラブ交差では非クラブ交差に比較して低いビーム電流で、同等以上のルミノシティが得られている。同じルミノシティで比較した場合、運転電力約 50 MW のうち半分を占める RF 系の電力消費の約 1 割、2 MW 程度の電力節減に相当する。

5. ま と め

ルミノシティ記録が、終盤の 2009 年になって、なお更新されたように、KEKB の運転は最後まで「コミッショニング」であり、新たな試みが続けられてきた。KEKB で実用化されたクラブ交差は、LHC のアップグレードや次世代電子ハドロン・コライダー等のキー・コンポーネントとなっている。また、この記事で直接には取り上げていないが、ギリギリの性能要求を受け止めつつ改良を重ね、確実に動作してきたハードウェア機器 / システムが、他に数多く存在することは言うまでもない。

KEKB が TRISTAN の資産を最大限活用して建設

されたように、SuperKEKB は、現在の曲線部 2.5π セル構造を基本的に保持し、ARES 空洞および超伝導加速空洞など、KEKB の資産をより一層活用して、40 倍のルミノシティに向かって歩み始めている。

参考文献

- 1) 加速器第 6 巻 1 号, pp. 1-95 (2009).
- 2) 船越義裕, 「KEKB のルミノシティの最近の進展について」, 加速器第 6 巻 3 号, pp. 222-230 (2009).
- 3) <http://www.kek.jp/ja/news/topics/2010/KEKBfactory.html>
- 4) http://www-acc.kek.jp/KEKB/Commissioning/trend/peak_trend.jpg
- 5) <http://www-acc.kek.jp/kek/History/index.html>
- 6) 福間均, 川本崇, 「KEKB での電子雲対策」, 加速器第 6 巻 1 号, pp. 90-93 (2009).
- 7) 生出勝宣, 「KEKB の切り拓いたもの」, 加速器第 6 巻 1 号, pp. 28-34 (2009).
- 8) K. Ohmi et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams, Vol. 7, 104401 (2004).
- 9) 榎本收志 et al., 「KEKB 電子陽電子入射器の 16 年」, 加速器第 6 巻 1 号, pp. 69-75 (2009).
- 10) 菊池光男 et al., 「KEKB-HER, KEKB-LER, RF の三リングへの同時入射に成功」, 加速器第 6 巻 3 号, pp. 231-239 (2009).
- 11) 赤井和憲, 高エネルギーニュース第 21 巻 5 号 (2003).
- 12) 赤井和憲, 「RF システムの立ち上げ」, 加速器第 6 巻 1 号, pp. 54-57 (2009).
- 13) 金澤健一, 末次祐介, 「運転開始後の真空システム」, 加速器第 6 巻 1 号, pp. 58-63 (2009).
- 14) 飛山真理, 「バンチフィードバックシステムの立ち上げ」, 加速器第 6 巻 1 号, pp. 83-85 (2009).
- 15) 影山達也, private communication
- 16) 赤井和憲, 「KEKB クラブ空洞 RF システムのビームコミッショニング」, 加速器第 5 巻 3 号, pp. 227-236 (2008).