

## 話 題

KEKB クラブ空洞 RF システムの  
ビームコミッショニング

赤井 和憲\*

## Beam Commissioning of KEKB Crab Cavity RF System

Kazunori AKAI\*

## Abstract

KEKB started the first crab crossing operation in February 2007 with two superconducting crab cavities. After four months operation dedicated for machine tuning, physics run with high-current beams resumed in October with the crab crossing. The crab cavities have been working stably for one and a half years. The crab cavity RF system, commissioning process and performance of the crab cavities with high-current beams are presented.

## 1. はじめに

KEKB は 2007 年 2 月にクラブ衝突実験を開始し、同年 6 月末まではクラブ空洞およびクラブ衝突に関する加速器コミッショニングを集中的かつ継続的に行った。この期間は小電流でのクラブ衝突ビーム調整および加速器スタディに多くの時間を割いたが、他方大電流ビーム蓄積の試験も行った。その結果、クラブ空洞システムが大電流での実用運転に十分使用できる性能を持つことを実証できた。そこで、同年秋から再開が予定されていた Belle 実験のための実用運転（物理ラン）を、クラブ衝突で実施することとなった。以後クラブ衝突での物理ランは 1 年におよび、現在も継続している。この間ルミノシティ向上を目指した加速器チューニングは絶えず続けられ、これまでの最高ルミノシティは  $1.6 \times 10^{34}/\text{cm}^2\text{s}$  に達した。クラブ空洞システムは長期間にわたり安定に働いて、クラブ衝突の KEKB 運転を支えてきた。

クラブ衝突は、有限角度衝突において衝突する両ビームのバンチを進行方向に対して傾け、実質的に正面衝突させる（図 1）。このアイデアは 1988 年にリニアコライダー用に提案され<sup>1)</sup>、その後リング型衝突加速器にも適用できることが示された<sup>2)</sup>。当時、B 中間子を大量に生成して CP 対称性の破れを研究する B

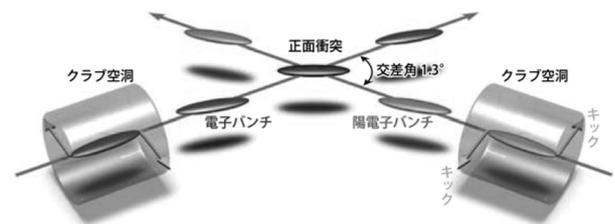


図 1 クラブ衝突の様子。クラブ空洞はバンチの前後で逆向きの横方向キックを与えてバンチを傾ける。有限角度の衝突でありながら正面衝突になる。

ファクトリーの計画が KEK および米国の SLAC や Cornell 大学において検討され始めていた。筆者は 1991~92 年に Cornell 大学滞在中に B ファクトリー用の超伝導クラブ空洞について研究し、クラブ空洞の RF 構造を提案して基本設計を行うとともに、モデル空洞を用いて RF 特性測定および低温での高電界性能測定を行った<sup>3,4)</sup>。米国の B ファクトリー建設は結局 SLAC の PEP-II に決定されたが、KEK でも細山氏のグループによってクラブ空洞の実機に向けた開発が進められることとなり、この基本設計が採用された。

有限角度衝突で  $10^{34}/\text{cm}^2\text{s}$  のルミノシティが得られる光学設計を持つ KEKB において、クラブ衝突の導入は喫緊の課題ではなかった。1998 年に KEKB のコミッショニングを開始して数年を経て、設計値を上回

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

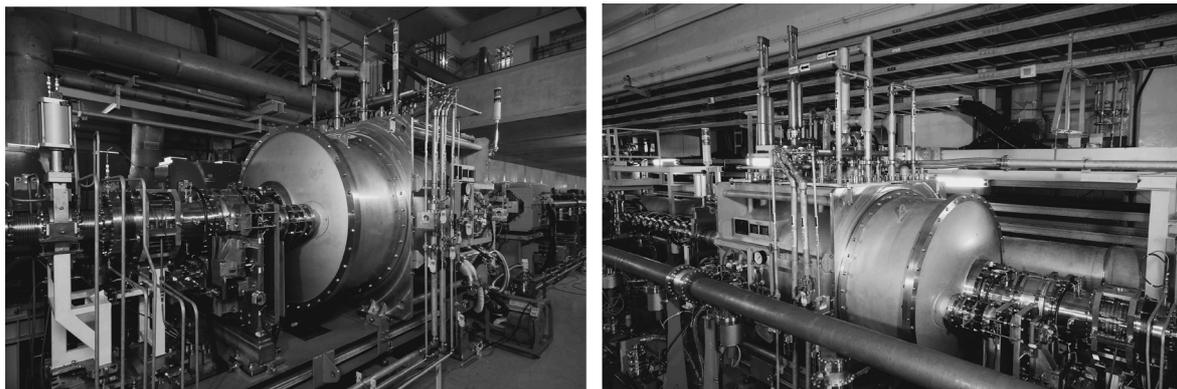


図2 KEKBトンネルにインストールされたクラブ空洞：(左) HER 空洞，(右) LER 空洞。

るルミノシティに達するに至り、もはやクラブ衝突の必要性を想定していた人は少なかったかも知れない。しかし、クラブ衝突がそれまで想定された以上に飛躍的なルミノシティ増加をもたらす可能性がある、とする大見氏のビーム・ビームシミュレーション<sup>5)</sup>が発表されてからは急速に気運が高まり、KEKBでクラブ衝突実験を行うことが決定された。そしてクラブ空洞の実機製作に向けた開発に拍車がかかるとともに、クラブ空洞 RF システムの建設や磁石、モニター、真空等の関連装置の準備ならびに光学設計等を行い、2007年2月のクラブ衝突コミッショニングにこぎつけた。図2はトンネル内にインストールされたクラブ空洞である。実機の製作過程および横測定（インストール前の性能試験）については、本学会誌にすでに報告された<sup>6,7)</sup>。

世界初のクラブ空洞システムのビームコミッショニングにおける最大のポイントは、(1)クラブ衝突によるルミノシティの向上を検証する、(2)クラブ空洞システムが加速器の構成要素として成立すること、特に大電流ビームでの実用運転が可能であることを実証する、の2点である。前者については本学会誌で報告された<sup>8)</sup>。本稿ではクラブ空洞のRF的性能やビーム運転性能の観点から、後者について報告する。

## 2. クラブ空洞 RF システム

### 2.1 クラブ空洞の RF 構造<sup>3)</sup>

ビームに強い横方向キックを与えるために、横方向シャントインピーダンスの高い TM110 モードをクラブモードとして用いる。設計キック電圧 1.4 MV で空洞表面の最大電界は約 20 MV/m となる。

一般に B ファクトリーのような、アンペア級大電流ビームの加速器で使用する空洞では、結合バンチビーム不安定を避けるために、すべての寄生モードを

十分強く減衰させる必要がある。KEKB, PEP-II, DAΦNE, CESR, BEPC-II などの加速空洞はいずれもシングルセルで、高次モード (Higher-Order Mode; HOM) を、加速周波数より高いカットオフの導波管をつけて取り出すか (PEP-II, DAΦNE, KEKB の常伝導空洞)、または大口徑のビームパイプから取り出す (CESR, BEPC-II, KEKB の超伝導空洞) などの減衰構造を採用している。

クラブ空洞の場合には HOM 以外の寄生モードが存在する。TM110 には 2 つのポーラリティがあり、TM110-H (水平偏波) をクラブモードとして使用すれば TM110-V (垂直偏波) は寄生モードである。また、加速モードに相当する TM010 モードはクラブモードより周波数が低く (Lower-Order Mode; LOM)、しかも縦方向インピーダンスが非常に高い寄生モードである。これらのモードを含むすべての寄生モードを十分に減衰させるため、図3のような構造にした<sup>3)</sup>。その特徴は、(1)片側のビームパイプを同軸構造にして、そのダイポールカットオフをクラブモード周波数より高くする。(2)空洞セルをスカッシュ型形状にして TM110-V の周波数を TM110-H (クラブモード) から大きく分離し、かつ同軸の TE11 伝搬カットオフ周波数よりも高くする。(1)および(2)によってクラブモードは空洞内に閉じ込められる一方、TM010 や TM110-V は同軸を伝搬して終端部に設置した吸収体で吸収される。そして、(3)吸収体の空洞側にはノッチフィルターを設置する。同軸のミスアラインメントやセル形状の非対称によってクラブモードの一部が同軸と TEM 結合した場合に、それを空洞側へ戻して同軸からの漏れ出しを防ぐ。(4)他方のビームパイプは大口徑にして、カットオフ以上の周波数の高次モードを取り出す。

クラブ空洞の RF 性能を支える鍵となるコンポーネ

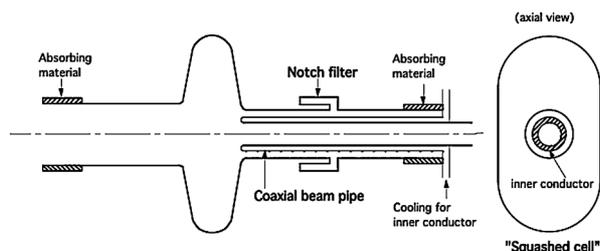


図3 クラブ空洞のRF基本構造. 超扁平(スカッシュ)セル, 同軸ビームパイプおよびノッチフィルターを持つ.

ントとして, 同軸側終端部および大口径ビームパイプ側におかれたフェライト製の円筒型 HOM 吸収体, 水平面内で空洞に結合する入力カップラー, 同軸を機械的に支えるスタブサポート, 空洞の周波数を調整するメインチューナーおよび同軸ビームパイプの水平方向アライメントを調整するサブチューナー等がある. なお, 実機設計の段階で, 同軸部に局在して立つ  $1/4$  波長ダイポール定在波が, 条件によっては高いインピーダンスを持つことがわかった. このモードに対しては, 同軸外導体にテーパーを挿入して吸収体側に向けて径を広げることで, 吸収体とのカップリングが改善して問題なくなった<sup>9)</sup>.

## 2.2 ビームローディングと負荷 Q 値

クラブ空洞は Transverse モードで運転するので, 加速空洞とは異なりビームローディングが空洞内でのビーム軌道に依存する<sup>10)</sup>. 軌道が空洞中心に一致している限りは空洞へのビームローディングを生じないが, 水平方向にわずかでもずれると発生する. 空洞の負荷 Q 値が高いほどこの影響が大きい. この関係を図4に示す<sup>11)</sup>. 安定な運転の観点からは低い負荷 Q 値の選択が望ましいが, 必要な入力パワーは増える. 両者のバランスを考慮して設計値を  $1 \sim 2 \times 10^5$  とした. この場合ビーム軌道が 1 mm 程度ずれても影響は少なく, 入力パワーは 100~200 kW 程度と加速空洞の数分の 1 程度である. 横測定において負荷 Q 値を測定し, この範囲内に入っていることを確認した.

## 2.3 RF ステーション

クラブ空洞用 RF ステーションの建設を 2004 年度に開始した. KEBK 超伝導加速空洞用ステーション 4 台が設置されている D11 電源棟内に, LER と HER の 2 台のクラブ空洞用 2 ステーションを設置した. 1.2 MW 連続波クライストロンおよびその電源, 各種ハイパワー RF 機器等は加速空洞と同じタイプのものを使用している.

ローレベル RF 制御は超伝導加速空洞用のシステム

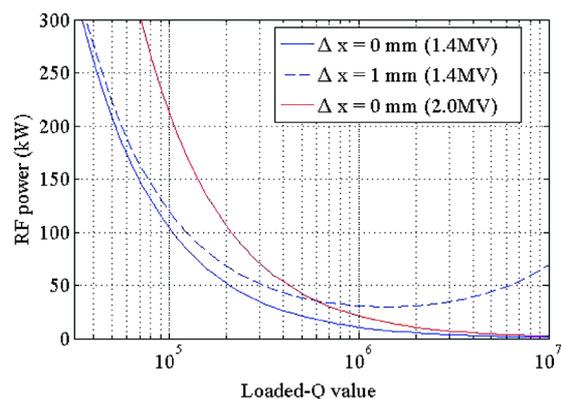


図4 クラブ空洞の負荷 Q 値と入力パワーの関係. 水平方向のビーム軌道のずれはビームローディングを発生させる. 負荷 Q 値が高いとその影響が大きい. ビーム電流 2 A, クラブ電圧 1.4 MV における, 軌道のずれが 0 mm (青実線) と 1 mm (青点線) の場合を示す. また, ビームなしで空洞を 2 MV までコンディショニングする際に必要なパワーを赤で示す.

をベースとして, サブチューナーの制御や同軸部の RF モニタなど, クラブ空洞に必要な機能を追加した. 空洞および RF システムに異常が発生した場合にはインターロックによって RF を OFF するとともに, ビームアポートシステムにトリガを送ってアポートさせる.

## 3. クラブ空洞のビーム運転の経緯

クラブ衝突を開始した 2007 年 2 月から現在に至るまでの KEBK 運転の状況を図5に示す. 同年 6 月末までの第一期においては, クラブ衝突の加速器調整を集中的に行った. この期間中は小電流でのクラブ衝突調整に多くの時間をあてるとともに, 4 月と 6 月に約 2 週間ずつ, ビーム電流増加の試験を行った. 夏期シャットダウン後の 10 月にクラブ衝突での実用運転 (物理ラン) を開始した. それ以降, 同年 12 月までの第二期と, 2008 年 2 月~6 月の第三期の運転において, Belle 実験が必要とする積分ミノシティを供給し続けている. この 1 年半におよぶクラブ衝突運転の経緯について簡単に述べる.

### 3.1 クラブ空洞の立ち上げ調整

2006 年に横測定を無事終えた 2 台のクラブ空洞は, 12 月から翌 2007 年 1 月にかけて KEBK トンネルにインストールされた. RF ステーションの建設も終了して, クラブ空洞と接続した. 1 月末には常温での入力カップラーのコンディショニングを行い, HER 空洞は 200 kW, LER 空洞は 150 kW まで投入した. そ

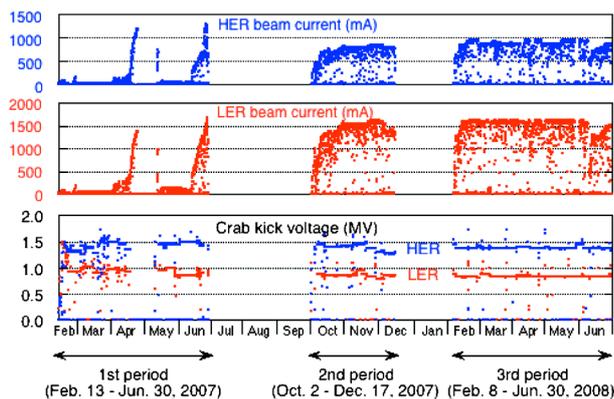


図5 クラブ空洞の運転の履歴：(上) HER ビーム電流，(中) LER ビーム電流，(下) クラブ空洞のキック電圧（青は HER，赤は LER）．運転期間は夏期と冬期のシャットダウンをはさんで，第一期（2007年2～6月），第二期（2007年10～12月），第三期（2008年2～6月）に分けられる．第二期と第三期は物理ランである．

の後空洞の冷却を開始し，1時間あたり2Kでゆっくり慎重に温度を下げていった．2月4日に4Kに達してからは，チューナー動作試験，空洞周波数確認，同軸センター位置合わせなどの空洞関連の各種調整作業，RFシステムの調整と空洞のコンディショニング，空洞をディチューンした状態でのビーム蓄積調整等を経て，2月19日には初めてクラブONでビームを蓄積した．

Transverse モードでビームを水平方向にキックするので，クラブ空洞の位相を変えるとビーム水平方向の軌道（Closed Orbit Distortion, COD）が変化する．このことを利用してクラブ空洞の位相と電圧を調整した．クラブON/OFFでの軌道変化を測定し，クラブ位相設定値にたいしてプロットしたものが図6である．180°間隔で2カ所あるゼロクロス的一方がクラブの基準位相となる．ここではバンチ重心はキックを受けず，バンチ全体が進行方向に対して傾く．さらに，オプティクスから与えられる $\beta$ 関数を用いて，CODの大きさからクラブ電圧を求めた．あらかじめRFパワーと負荷Q値から較正していたクラブ電圧と比較して，1%程度の誤差でよく一致していた．

また前述のように，空洞中心に対するビームの水平軌道のずれによって，クラブモードの電圧が誘起される．クラブ空洞付近にローカルバンチ軌道を作り，その大きさを変えてビーム誘起電圧が最小となる位置を求めた．そこを基準軌道として，クラブ空洞近傍のステアリング磁石を用いた軌道フィードバックシステムによって，常に軌道が維持されている．

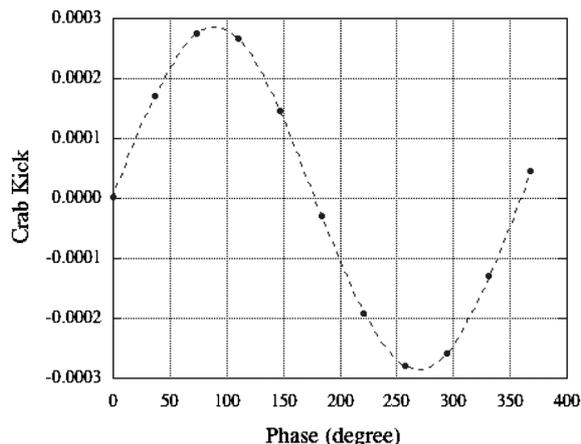


図6 クラブ空洞のキックによるビーム水平方向軌道変化の測定値．クラブ位相は360°変化させた．2カ所のゼロクロスの所では，ビーム重心はキックを受けず，バンチの傾きが最大となる．このうち的一方（図では175°の所）がクラブの基準位相を与える．

このようにして片リングずつの調整を終えた後，2月21日には記念すべき両リングのクラブビームによる初のクラブ衝突が達成された．クラブキックでバンチが傾いている様子はストリークカメラによって観測された<sup>12)</sup>．

### 3.2 小電流クラブ衝突調整

小電流ビームでのクラブ衝突調整は，バンチ数は30程度と少ないものの，物理ランに必要なバンチあたりの電流は維持して，バンチあたりのルミノシティ（スペシフィックルミノシティ）増加を目指した加速器調整が続けられた<sup>13)</sup>．

### 3.3 大電流ビーム運転

2007年秋から再開される物理ランを，(1)クラブ衝突，非クラブ衝突のいずれで行うか，(2)非クラブ衝突の場合，クラブ空洞をリングに残したまま運転するかどうか，は大きなポイントであった．もしクラブ空洞が物理ランに必要な大電流ビームと共存できないならば，夏の定期保守期間中にリングから撤去しなければならない．そのため，夏までの運転期間中にクラブ空洞システムの大電流ビームでの性能を見極めておく必要があった．大電流運転は当然ハードウェアのリスクを伴う．最悪の場合にはクラブ空洞に深刻なダメージが発生し，クラブ衝突実験が続行できなくなる恐れもある．4月および6月後半の2度，それぞれ1～2週間かけてバンチ数を徐々に増加させながら慎重に電流を上げていった．

4月に行った第一回目のトライでは，電流増加につれて空洞真空圧力が顕著に悪化し，空洞のトリップ

(後述する、空洞内の放電現象)が頻繁に発生した。放出ガス源としては、クラブ空洞本体や HOM 吸収体以外に、クラブ空洞周辺のビームダクトやゲートバルブ等の真空コンポーネントからのガスが多かった。これらはクラブ空洞とともに新規に設置されたもので、ビームによる焼き出し (スクラッピング) がまだ十分でなかった。そこで、クラブ ON での運転を中断し、空洞をディチューンして、大電流ビームによる真空スクラッピングを約 1 週間実施した。さらに、この脱ガス運転に続いてクラブ空洞を室温まで加温し、空洞表面に蓄積したガスを除去した。

この時期に経験したもう一つの問題は、同軸ビームパイプの内導体の温度上昇である。ビーム電流増加とともに温度が上昇し、ついに 9 K を超えてクエンチ一歩手前となった。同軸内導体はヘリウムで冷却しているが、発熱量に冷却パワーが追いつかなかったので

ある。冷却効率を高めるため、戻りガスラインへのバイパスの設置、ヘリウム内圧を少し高めるなどの対策がとられた。

6 月後半の第二回目の大電流試験は成功をおさめた。徐々に電流を増加させて約 1 週間後には LER 1.3A, HER 0.7A に達し、ルミノシティは  $10^{34}/\text{cm}^2\text{s}$  を超えた。大電流ビームに直接さらされる HOM 吸収体や複雑な同軸ビームパイプ部などは大きな問題もなく機能した。クラブ空洞の HOM や LOM に起因するようなビーム不安定は発生しなかった。これまでに経験したことのないビーム振動が発生して一時は大きな問題となったが、現象を理解し、対処方法を見出すことができた。これについては後述する。クラブ ON の大電流試験が一段落した後は、クラブ空洞を OFF してディチューンし、通常の物理ランの電流値 (LER 1.7A, HER 1.35A) までビームを蓄積した。こ

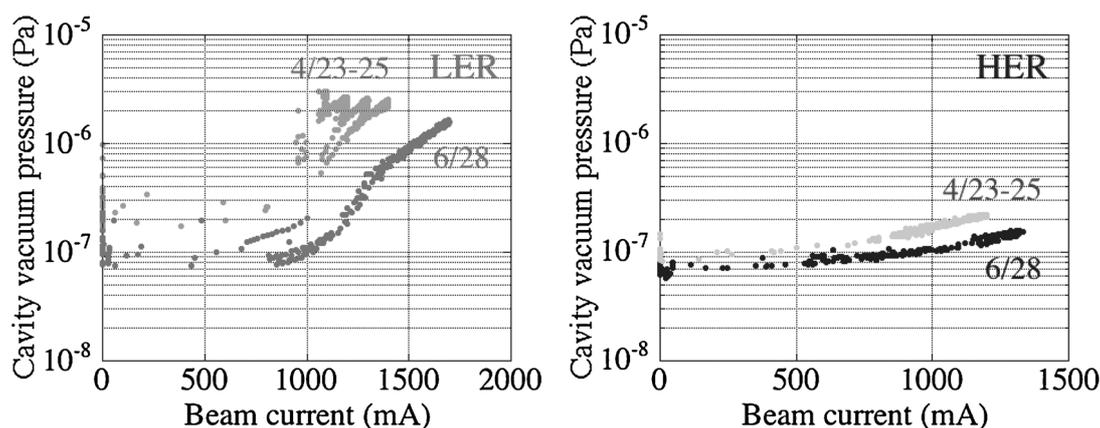


図7 大電流ビーム運転時の空洞真空圧力：(左) LER 空洞，(右) HER 空洞。2007 年 4 月の状態と、ビームによるスクラッピングを行って常温に加温し、再冷却した後の 6 月末の状態を比較した。特に LER 空洞では大きく改善した。

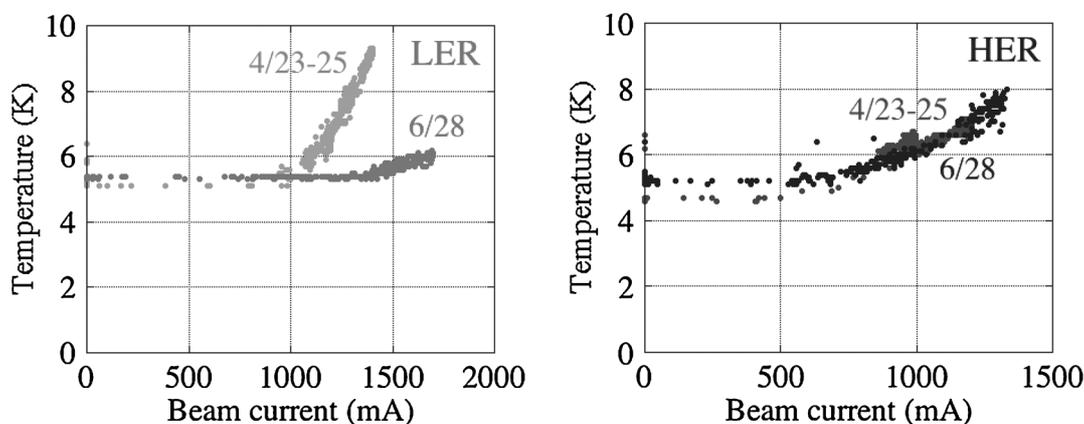


図8 大電流ビーム運転時の同軸部内導体の温度上昇：(左) LER 空洞，(右) HER 空洞。同軸部のヘリウム冷却効率を高めて、LER 空洞の温度上昇が改善された。

れも問題はなく、大電流試験を無事終えた。4月の試験に比較して空洞真空圧力や同軸内導体の温度が改善した様子を図7と図8に示す。この間のビーム運転におけるクラブ空洞システムのRF性能についても、次章にまとめて報告する。

### 3.4 物理ラン

大電流試験の成功をうけ、期待されたようなルミノシティ増加は得られていなかったものの、Belle実験グループの要求する積分ルミノシティをクラブ衝突で供給可能との見通しを得た。そこで10月の第二期運転からは、クラブ衝突での物理ランを行いながら、さらにクラブ衝突性能を上げていくこととなった。その後、最高ルミノシティは $1.6 \times 10^{34}/\text{cm}^2\text{s}$ に達し、クラブ衝突なしの最高値 $1.7 \times 10^{34}/\text{cm}^2\text{s}$ にあと一步に迫ってきた。さらに性能を上げて、クラブ衝突による真のゲインを現実のものとするよう、KEKBチームは努力を続けている。クラブ衝突の積分ルミノシティは1日あたり1092/pb、1ヶ月あたり23.0/fbを記録し、物理側の要求をほぼ満たしている。このことはトリップ頻度(後述)が許容範囲であり、長期的にも安定な性能を維持していることを示す。なお、クラブ衝突ではHERビーム電流が非クラブ衝突の約75%程度であり、ルミノシティあたりのRFパワーが少ないため、KEKB全体の電気使用量の節減に寄与している。

## 4. クラブ空洞システムのRF性能

通算1年半にわたり加速器調整運転および物理ランにおいて発揮してきた、クラブ空洞RFシステムの性能について述べる。この間の主要な実績を表1にまとめる。

### 4.1 クラブ電圧

HER空洞は設計値1.4 MVに対して、運転電圧は1.3~1.5 MVを維持してきた。ビームの無い保守日や立ち上げ調整時には1.8 MV程度まで上げて空洞をコンディショニングしている。

一方、LER空洞は横測定では1.9 MV、インストール直後は1.5 MVまで出せたが、運転開始後1ヶ月経過時にヘリウム圧力上昇をとまなう大きなクエンチが発生し、1.0 MV以上に上がらなくなった。1週間後に80 Kまで加温して脱ガスするとわずかに回復したものの、1.1 MV止まりである。そのため設計値より低い約0.9 MVでの運転を余儀なくされてきた。幸い、クラブ空洞の $\beta x$ を40 mから約80 mに広げることで、必要なクラブキックは維持できている。しかし $\beta x$ 変更でクラブ空洞部のビームアパーチャーが狭く

表1 クラブRFシステムのビーム運転実績

|                      | LER                      | HER               | 単位   |
|----------------------|--------------------------|-------------------|------|
| ビームエネルギー             | 3.5                      | 8.0               | GeV  |
| RF周波数                | 508.9                    |                   | MHz  |
| 衝突角度                 | $\pm 11$                 |                   | mrاد |
| ビーム電流<br>(クラブON)     | 1620                     | 950               | mA   |
| ビーム電流<br>(クラブディチューン) | 1700                     | 1350              | mA   |
| クラブ電圧(最大)            | 1.5→1.1→1.27             | 1.8               | MV   |
| クラブ電圧(運転)            | 0.8~0.95                 | 1.3~1.48          | MV   |
| $\beta x$ @衝突点       | 90                       | 90                | cm   |
| $\beta x$ @クラブ       | 85                       | 170               | m    |
| 負荷Q値                 | $2.0 \times 10^5$        | $1.6 \times 10^5$ |      |
| 入力RFパワー@運転電圧         | ~30                      | ~90               | kW   |
| 寄生モードパワー@<br>最大電流    | 12(ferrite) +<br>15(SiC) | 12<br>(ferrite)   | kW   |
| チューナー位相安定度           | $\pm 15$                 | $\pm 1$           | deg. |
| クラブ位相安定度<br>(>1 kHz) | $\pm 0.01$               | $\pm 0.01$        | deg. |
| (<1 kHz)             | $\pm 0.1$                | $\pm 0.1$         | deg. |
| 平均トリップ率(1日あたり)       |                          |                   |      |
| (第一期:2007年2月~6月)     | 1.6                      | 1.3               | /day |
| (第二期:2007年10月~12月)   | 0.4                      | 2.7               | /day |
| (第三期:2008年2月~6月)     | 0.4                      | 1.2               | /day |
| (全期間通算)              | 0.7                      | 1.4               | /day |

なり、LERビームライフタイムに悪影響を及ぼしている可能性がある。このため、電圧回復をめざして、ヘリウム槽を減圧して4.2 K以下に温度を下げるシステムがこの夏に導入された。また、夏前のエージングにおいては電圧回復のきざしが見えてきたこともあって、秋からの運転では性能回復を期待したい。

### 4.2 クラブ位相の安定度

クラブ空洞の電圧と位相はRF制御系のフィードバックによって制御されている。クラブ空洞の位相がゆらぐと、パンチの重心が横方向にキックを受けて軌道が影響を受ける。衝突点での両ビームの相対位置を安定に維持するために、高い位相安定度が求められる。図9にピックアップ信号のスペクトルを示す。RF周波数のサイドバンドの大きさから位相揺らぎを見積もると、1 kHzより速い成分で $\pm 0.01^\circ$ 以下、数百 Hz以下の遅い成分で $\pm 0.1^\circ$ 以下である。位相検出器を用いた測定でも、同様の結果が得られた。この位相変動量

は、クラブ衝突のシミュレーションから要求される精度を満たしている。

### 4.3 チューナー

クラブ空洞の周波数は、ステップモーターとピエゾを併用したチューナー機構で、同軸ビームパイプの空洞セルに対する突き出し量を制御して調整している。HER 空洞のチューナーには問題はないが、LER 空洞のチューナーには何らかの機械的なバックラッシュ的振る舞いがあることが横測定で見いだされた<sup>7)</sup>。フィードバックをかけると、ヒステリシスのためにチューニング位相が約 $\pm 15^\circ$ も変動する。サポートの改良などの対策が施されてきたが、解決には至っていない。ただし、ビームが感じる位相はチューニング位相

ではなく空洞位相であり、後者は安定に制御されているので、クラブ衝突性能を損うものではない。

ピエゾ素子が絶縁破壊をおこす故障がたびたび発生した。ピエゾに引っ張り応力がかからないよう、ドライバーシャフトにバネをつけて、常にピエゾに圧縮応力がかかるように改良したところ、それ以降は一度も故障は起きていない。

### 4.4 空洞トリップ

空洞トリップは空洞内部や入力カプラー等での放電や、発熱による超伝導破壊（ブレイクダウン）などの現象である。クエンチ検出器、真空圧力計、アークセンサー等により検出されて、入力 RF を OFF するとともにビームをアボートする。クラブ空洞のトリップ以外にも、加速空洞のトリップ、各種真空コンポーネントの真空圧力や温度の異常、ビーム不安定によるビームロス、Belle 検出器への異常な放射線などが発生すると、ビームがアボートされる。アボートの頻度が多いと積分ミノシティのロスをもたらす、安定な運転に支障をきたす。そこで、アボートのイベント毎にその振る舞いを解析して原因を特定し、必要な場合には対策を講じている。

一週間毎に平均した、1日あたりのクラブ空洞のトリップによるビームアボートの統計を図 10 に示す。全運転期間を通じた平均回数は HER 空洞が 1.4 回/

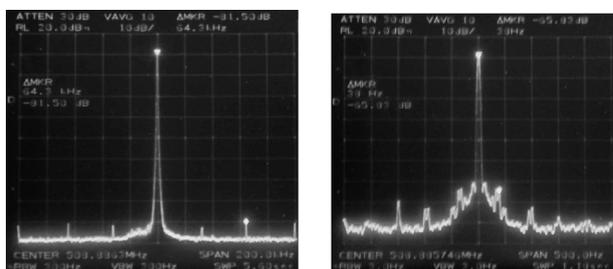


図 9 RF 周波数付近のビームスペクトル：(左) スパン 200 kHz, (右) スパン 500 Hz.

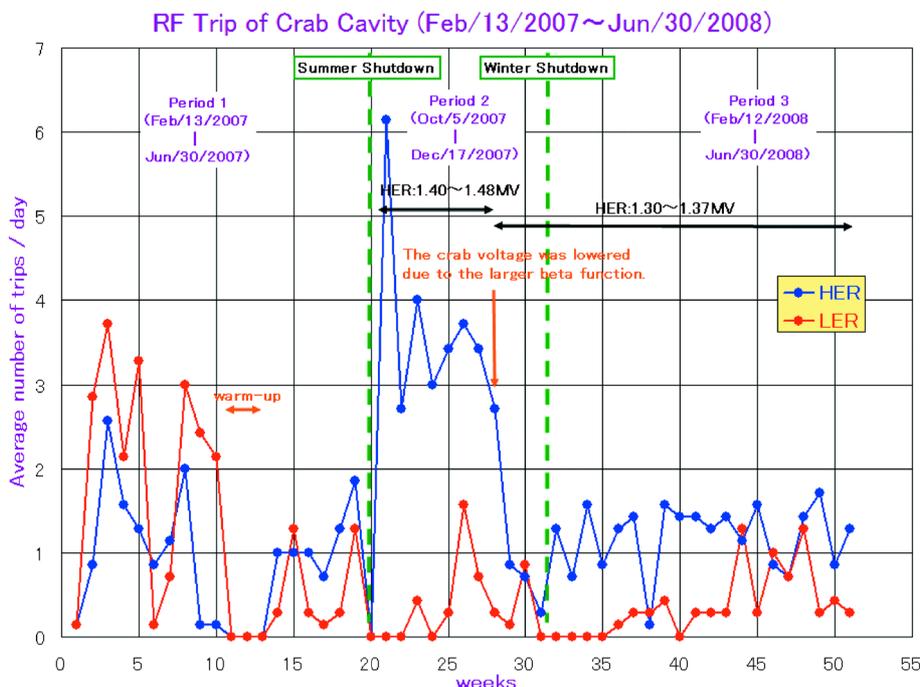


図 10 一週間毎に平均した、一日あたりのクラブ空洞のトリップ回数の履歴。第二期と第三期は大電流での物理ラン。第二期の初めは HER 空洞のトリップ率が高かったが、運転電圧を 0.1 MV 下げると安定になった。全期間を通じての平均トリップ率は HER 空洞が 1.4 回/日、LER 空洞は 0.7 回/日。

日、LER 空洞が 0.7 回/日である。これは 1 日あたり合計一時間弱相当の積分ミノシティのロスとなるが、まず許容範囲といえよう。

第二期の初め、2007 年 10 月から 11 月にかけては、HER 空洞のトリップ率が高かった。このため、しばしば運転を中断して空洞エージングを行った。この時期は大電流での物理ランが始まった直後であり、空洞内部や周囲のコンディショニングがまだ十分でなかったことに加え、1.40~1.48 MV とやや高めのクラブ電圧での運転がトリップ率を上げていたようだ。11 月末にクラブ電圧を 1.3 MV 程度に下げると、トリップ率は 1 回/日程度に激減した。それ以降は、第三期の最後に至るまで 1.30~1.37 MV で安定な運転を続けている。クラブ電圧の減少分は空洞の  $\beta_x$  関数を広げることで補償され、必要なクラブキックを維持している。

LER 空洞のトリップ率は初期には 3 回/日程度とやや高かったが、2007 年 4 月の加温後からは 1 回/日以下と少なくなった。

#### 4.5 HOM および LOM

ビームによって励起される HOM は大口径側 (240  $\phi$ ) および同軸側のフェライト吸収体によって吸収される。LER 空洞の場合は、大口径側と外部の 94  $\phi$  ビームダクトとの間のテーパ部に 150  $\phi$  の SiC 吸収体を追加している。LOM および同軸パイプに局在して立つモードは、同軸側吸収体によって吸収される。LER 空洞の各吸収体の、冷却水流量と温度上昇から求めた吸収パワーとビーム電流の関係を図 11 に示す<sup>14)</sup>。SiC 吸収体のパワーが大きいのは、それ自身のロスファクタが比較的大きいことも一因である。フェライト吸収体のパワーはこれまでに最大で大口径側 10 kW、同軸側 2 kW に達しているが、特に問題は生じていない。

LOM は加速空洞の加速モードに相当するので、ビームとの結合インピーダンスが高い。同軸ビームパイプはこのモードの Q 値を十分に低く減衰させる働きをもつ。ビームによって励起された LOM のスペクトルの測定データを図 12 に示す。この幅から求まる Q 値は 140 であり、設計値および横測定での測定結果とよく一致している<sup>14)</sup>。

このように LOM は十分に減衰されているが、特定のビームフィルパターンでは LOM 周波数のバンド幅内にビームのスペクトルの一つが合致し、共鳴的に励起されることがある。小電流衝突から大電流への移行期にこの現象が観測された。バンチ間隔を N バンチとすると、ビームスペクトルのメインピークが

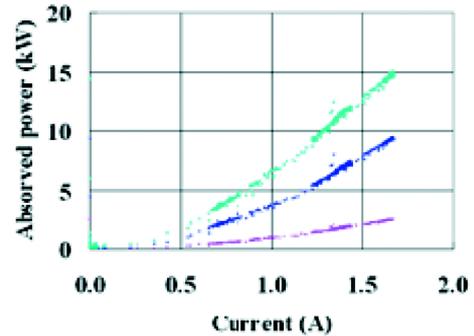


図11 クラブ衝突物理ランにおける、LER クラブ空洞 HOM ダンパーで吸収された寄生モードパワーのビーム電流依存性。水色は SiC 吸収体、青は大口径側フェライト吸収体、赤は同軸側フェライト吸収体。この時のバンチ数は 1585。

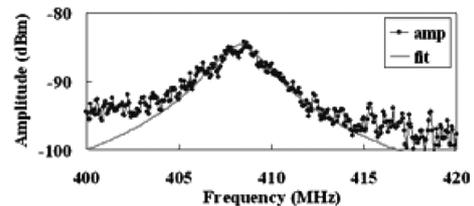


図12 ビームによって励起された LOM のスペクトルの測定データ。バンド幅から求めた Q 値は 140 で、設計値および横測定での測定とほぼ一致している。

508.9 MHz/N の間隔でたつ。160 バンチ間隔では 410.3 MHz、49 バンチ間隔では 410.2 MHz にピークがあり、これが LOM 周波数 (408.4 MHz) に近い。LOM が共鳴的に励起されて真空圧力の悪化が観測されたが、数時間から 1 日程度で次第に治まった。物理ランにおいてはバンチ数が多いので、このような共鳴的な励起はみられない。

その他の高次モードについても、十分に減衰されていることがビームスペクトルの観測によって確認された。このように、クラブ空洞の寄生モードは設計通り十分に減衰されており、これに起因するビームの結合バンチ不安定は、これまでに観測されていない。

#### 4.6 大電流クラブ衝突で発生したビーム振動とその対策

2007 年 6 月の大電流試験で遭遇したビーム振動について述べる。ビーム電流が LER 1A, HER 0.5A 程度を超えたあたりから、衝突点の軌道の不安定、ビームライフタイムの減少、そしてミノシティの著しい低下に悩まされた。この時、クラブ空洞の電圧と位相が約 540 Hz で振動しているのが観測された (図 13)。

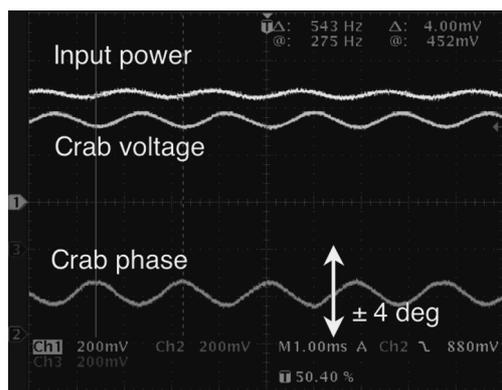


図13 大電流クラブ衝突運転時に観測された振動. 上からクラブ空洞への入力パワー, クラブ電圧, クラブ位相を表す. HER と LER 両方の空洞がコヒーレントに振動した. ビーム水平軌道にも同じ周波数の振動が観測された.

驚いたことに, 両リングのクラブ空洞が同期して振動していた. さらに, ビーム水平軌道にも同じ周波数の振動が観測された. ちなみに, ビーム軌道フィードバックは 1 秒から 20 秒程度と遅いので, この速い振動を引き起こす原因ではない.

詳細な調査を行い, 以下のことがわかった. (1)この振動は大電流での衝突時に限って発生する. 小電流衝突や, 大電流であってもシングルビームにおいては発生しない. (2)両クラブ空洞および両ビームがコヒーレントに振動する. (3)図 14 に示すように, 両クラブ空洞の位相やチューニング位相の値によって, 振動が発生したり治まったりする. 前述のように, LER 空洞チューニング位相は常に  $\pm 15^\circ$  程度ゆらいているが, それが閾値を超えた時に振動する. さらに, その閾値はクラブ空洞位相に依存する. (4)RF 制御系のフィードバックは, この振動を引き起こしているわけではない. 逆に, ある程度はフィードバックにより抑え込まれている.

これらの事実から, 衝突点で両ビーム間に働くビーム・ビーム力と, 両リングのクラブ空洞内のビームローディングとが相乗的に関与して, 振動が発生すると結論づけられる<sup>11)</sup>. このメカニズムを図 15 に示す. 衝突点でのわずかな軌道のずれはビーム・ビームキックを発生させる. これはクラブ空洞での軌道のずれをもたらし, ビームローディングを変化させる. その結果クラブキックの電圧と位相が変化し, バンチがキックを受ける. このキックによりビーム軌道が変化して衝突点での軌道のずれをもたらし. これら全体がループとなり, 位相などの条件によっては系が不安定になるのである.

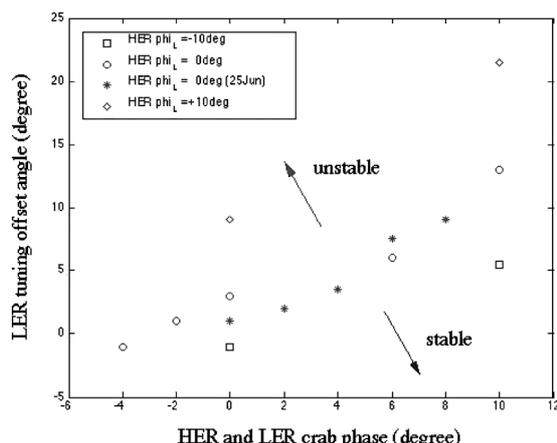


図14 クラブ衝突のビーム振動の閾値のクラブ位相依存性 (LER 1150 mA, HER 650 mA で測定). 縦軸で示される LER tuning offset angle が閾値を超えると振動が発生する. 閾値は HER tuning offset の値によって異なる. クラブ位相を+側にシフトさせると安定領域が広がる. 第二期以降は, 常にクラブ位相を  $+10^\circ$  に設定して振動を回避している.

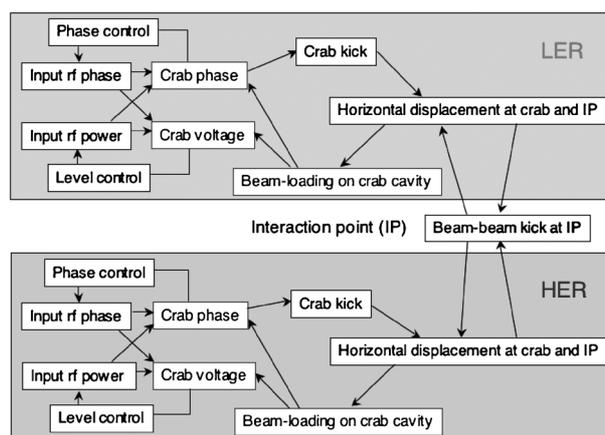


図15 クラブ衝突の振動を発生させるメカニズム. 衝突点のビーム・ビーム力と両クラブ空洞のビームローディングが相乗的に関与する現象である.

図 14 からわかるように, クラブ空洞位相を+側 (位相を進ませる方向) にシフトさせるほど安定領域が広がって, この振動を回避できる. この対処法を用いて, 第二期運転からはクラブ空洞位相を  $+10^\circ$  に設定して, LER 1.7 A, HER 1 A で安定にクラブ衝突運転を行なっている. 位相オフセットによりバンチの重心がキックされるが, それはクラブ空洞近傍のステアリング磁石により補償されるので問題ない.

## 5. おわりに

KEKB は 1 年以上にわたり, 物理実験のための実

用運転をクラブ衝突で行ってきた。この間、クラブ空洞システムは大電流ビームで長期間安定にその機能を果たしてきた。リニアコライダーやLHCアップグレード、そして短パルスX線源などへのクラブ空洞の応用が検討されている状況において、KEKBが世界に先駆けてクラブ空洞を開発し、実用化に成功したことは大きな意義を持つ。

クラブ空洞システムのビームコミッショニングはクラブ空洞、RF、冷凍機のメンバーならびにコミッショニンググループの密接な協力のもとに行われてきた。最後に、KEKB加速器チームおよびBelle測定器の方々から多大なサポートを受けてきたことを感謝します。

### 参考文献

- 1) R. B. Palmer, SLAC PUB-4707 (1988).
- 2) K. Oide and K. Yokoya, *Phys. Rev.*, **A40**, 315 (1989).
- 3) K. Akai *et al.*, Proc. of the 15th HEACC, 757 (1993).
- 4) K. Akai *et al.*, Proc. of the 1993 PAC, 769 (1993).
- 5) K. Ohmi *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **92**, 214801 (2004).
- 6) 細山謙二, 加速器学会誌, **4**(3), 188 (2007).
- 7) 山本康史, 加速器学会誌, **5**(2), 150 (2008).
- 8) 船越義裕, 加速器学会誌, **4**(4), 309 (2007).
- 9) Y. Monira *et al.*, Proc. of the 2nd Annual Meeting of Part. Accel. Soc. of Japan and the 30th Linear Accel. Meeting in Japan, 630 (2005).
- 10) K. Akai and Y. Funakoshi, Proc. of the EPAC96, 2118 (1996).
- 11) K. Akai *et al.*, Proc. of the 13th SRF workshop, WEP57 (2007).
- 12) H. Ikeda *et al.*, Proc. of the 2007 PAC, 4018 (2007).
- 13) K. Oide *et al.*, Proc. of the 2007 PAC, 27 (2007).
- 14) Y. Morita *et al.*, Proc. of the 13th SRF workshop, WEP55 (2007).