

# SuperKEKB Phase 1 コミッショニング

KEK 加速器研究施設

船越 義裕

yoshihiro.funakoshi@kek.jp

2016 年 (平成 28 年) 8 月 24 日

## 1 はじめに

KEKB は 11 年半にも及ぶ長期のビーム運転の末に、ルミノシティの世界記録を保持したまま 2010 年 6 月末に運転を停止した。運転休止後、直ちに SuperKEKB に向けての大規模なアップグレードの工事を開始し、5 年半の大工事の末に 2016 年 2 月に SuperKEKB の試運転が開始された。SuperKEKB の設計に関しては、参考文献 [1] を参照していただきたい。本稿では、Phase 1 コミッショニング (2 月 1 日~6 月 28 日の 5ヶ月間) について述べるが、より専門的な内容については既に参考文献 [2, 3] に記載されているので、主にそこに書ききれなかった点やどういう点で苦労したかなどのエピソードを紹介したい。

## 2 SuperKEKB のコミッショニングの戦略と Phase 1 のミッション

まず、コミッショニングチームがどんなことを考えてビーム運転に取り組んだかを説明するために、Phase 1 の位置付けとミッションについて説明する。

### 2.1 SuperKEKB のコミッショニングの戦略

SuperKEKB のコミッショニングは、Phase 1, Phase 2, Phase 3 の三段階に分けて行われる。Phase 1 は 5ヶ月間行われ、既に終了した。Phase 1 では、最終収束系の超伝導電磁石群 (QCS と総称) 及び Belle II 検出器は設置されず、ビーム衝突も行わなかった。これは、QCS の建設スケジュールや Belle II をインストールする前に十分な vacuum scrubbing (真空焼き出し) やビーム入射等の基本的なビーム調整を行っておきたいという考えに基づいている。Phase 2 コミッショニングは 2017 年秋に開始予定で、最初に陽電子ビームのエミッタンスを下げるために新設されるダンピングリングのコミッショニングを行い、続いて (または一部並行して) 衝突リング

(主リング) のコミッショニングを行う。この Phase 2 では QCS 及び Belle II 検出器がインストールされるが、Belle II 検出器の vertex detector はインストールされない。これは、ビームバックグラウンドに敏感な vertex detector は QCS を用いた状態で十分な調整を行った後にインストールしたいという考えに基づいている。Phase 2 は加速器サイドから見るとハードウェアの条件としては、ほぼ最終状態に近い状態でのコミッショニングになる。Phase 2 でのルミノシティの目標値は、KEKB の設計値である  $1 \times 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$  である。Phase 2 の期間は約 5ヶ月の予定である。Phase 3 は 2018 年秋から始まる予定で、Belle II の vertex detector も設置され、物理実験も行いながら設計ルミノシティの  $8 \times 10^{35} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$  目指して調整を進めていくことになる。

### 2.2 Phase 1 コミッショニングのミッション

Phase 1 のコミッショニングのミッションは以下の通りである。

- 各ハードウェアコンポーネントの立ち上げ
- ビームオペレーションソフトウェア群の立ち上げと整備
- Phase 2 での Belle II 検出器の設置のための準備
- ビーム電流を増やした時の問題点の発見と対策
- Belle II 検出器 (特にそのソレノイド磁場) と QCS がない状態でのオペティクス補正、特に低い垂直エミッタンスを得るための低エミッタンス調整
- その他のマシンスタディ

これらの内、「Phase 2 での Belle II 検出器の設置のための準備」に関しては、十分な vacuum scrubbing と検出器に対するビームバックグラウンドに関するスタディが重要である。vacuum scrubbing に関しては、Belle II グループから KEKB/Belle での経験に基づいて、Phase 1 の間に 0.5~1 A のビーム電流で 1ヶ月程度の vacuum scrubbing を行うことが要請された。これは、積分のビー

ムドーズにすると 360~720 Ah に相当する。ビームバックグラウンドノイズのスタディに関しては、Belle II 検出器は設置されていないが、BEAST と呼ばれる小さなテスト検出器を設置してスタディを行った。Phase 1 では衝突点付近の電磁石の配置や衝突点でのビームサイズなどが Phase 2 以降とは大きく異なるが、ビームバックグラウンドノイズに関するシミュレーションが実験値と一致するかどうかを調べておくことは重要である。

### 3 Phase 1 コミッショニングの経緯

#### 3.1 立ち上げからビーム蓄積まで

SuperKEKB リングの立ち上げは 2/1(月) に始まったが、最初の一週間は入射器からリングまでのビーム輸送路の調整に充てられた(入射器自体の調整はそれに先立って行われていた)。この調整の主な目標は電子ビームと陽電子ビームを、それぞれ入射器からリングの直前のビームダンプまでできる限りロスなく輸送することである。ビーム輸送路との基本構成は KEKB と変わっていないが、ビームエネルギーが、電子が 8 GeV から 7 GeV、陽電子が 3.5 GeV から 4 GeV に変更になったことに伴って、特に陽電子ラインでは偏向電磁石などに大きな改造を施されたこと、及び東日本大震災の影響も懸念されることなどから、かなりの調整時間が必要なが予想された。実際、ビームを通すにはそれなりの時間を要した。また、ビームを輸送するだけでなく、リングとのマッチングという意味を含めて、質の高いビームをリングに供給することが重要である。その意味では、光学系のマッチングや輸送路で発生するディスパージョンが漏れないようにすることなどが重要で、これらに関する調整も行われた。一つ問題になったのは、陽電子ラインの途中で、設計値とは大きく異なる垂直方向のディスパージョンが観測されたことであった。これは、設計上は存在しない大きな X-Y カップリング(水平と垂直方向の運動の結合)によるものであることが予想されたが、この問題は Phase 1 の間には解決しなかった。但し、この問題のためにその後のリングへの入射に影響が出たという事実はない。Phase 1 の最後で再測定されたが、ラインのアクセプタンスが狭く精度の良い測定ができなかった。また、観測された大きな X-Y カップリングと思われる現象も測定中のビームロスによる見かけ上の問題である可能性もある。

翌週の 2/8(月) から陽電子ビームのリング(LER:低エネルギーリング)への入射の試みが始まった。調整項目としては、入射路のビームダンプからリング直前に設置されているセプタム電磁石の入り口までの軌道調整、このセプタム電磁石(パルス電磁石)のタイミング調整と強さの調整、リングに設置されているキッカー電

磁石(パルス電磁石)のタイミング調整と強さの調整、さらにはリングに設置されている軌道調整用のステアリング電磁石の調整などである。この入射調整で苦労したのは、入射点直後に設置されているコリメータの設定が標準状態ではリングの他の場所より狭く、このコリメータに入射ビームが当たって先に進まなくなっていたことであった。2/8(月)の夜に入射部下流のどこでロスが多いかを調べた際にコリメータのアーチャー(広さ)が狭いことが疑われた。その夜は調整を諦めたが、翌朝コリメータのリミットスイッチを外して可能な限り広げることによってビームが周回し始めた。この調整にはビームが一回通っただけで位置が測定できる single path BPM(Beam Position Monitor)が重要で、最初タイミングを合わせるのにやや苦労したが、single path BPM がなかった KEKB の立ち上げ時に比べて、効率よく調整が進んだ。但し、入射部直下流にもう少し single path BPM を設置すべきであったという反省点はある。2/9(火)の準夜には CT(Current Transformer) でビームがリングを 130 ターン周回していることが観測され、翌朝から RF を投入して位相調整を行いビーム蓄積に成功した。一方、電子リング(HER:高エネルギーリング)への電子の入射は、LER より二週間遅れの 2/22(月)より調整が始まった。このように時間差を付けて立ち上げを行った理由は、二つのリングを並行して調整することに非効率というよりは、電気代の節約の意味合いの方が強い。入射調整は LER の場合と同様のプロセスで行われたが、電子ビームがリングを周回させられるまでにかかった時間は LER よりやや長く、2/25(木)の準夜に 15 ターン周回させることに成功した。入射調整に LER より時間がかかった理由の一つは、HER に新たに導入された入射用のセプタム電磁石の強さが想定より弱く、当初ソフト的に設定されていた蹴り角の上限に引っかかって十分強くできなかったことにあった(LER のセプタム電磁石は Phase 1 では KEKB と同じものを使っている)。この問題は、ソフトの修正で解決した。もう一つの理由は、入射調整の際に富士実験室の放射線モニター(エリアモニター)のモニター値が上昇し、しばしば入射を止めて次の正時まで待たないといけない状況が頻発したことである。ビームロスが生じていると思われる付近に鉛のシートを巻いたりしたが、それほど効果がなかった。この問題はビームの軌道調整である程度軽減した。翌 2/26(金)の朝から RF を投入してビーム蓄積を試みたが蓄積できなかった。半整数共鳴のストップバンドの影響を受けていることが疑われて、水平、垂直チューンをそれぞれ 0.2 上げた状態で入射調整を行ったところ、RF なしで 40 ターン程度周回するようになった。この状態で RF を投入して位相調整を行ったところ、ビーム蓄積に成功した。

## 3.2 ビーム電流の増加

以下、ビーム電流を増やして vacuum scrubbing を進めるに際して問題になったことをまとめる。

### 3.2.1 真空度の電流に対する非線形な振る舞いと垂直ビームサイズの増大

LER において真空度がビーム電流に対して非線形依存性を持ち、ビーム電流が増えると急激に真空度が悪くなるという問題が発生した。また、LER (陽電子リング) において、電子雲の効果によると見られる垂直方向のビームサイズの増大 (ブローアップ) が観測された。これらは、6月初めに TiN コーティングが施されていない LER のベローズ (約 800 個) に永久磁石 (ソレノイドライクな磁場を作る) を設置したところ、かなり軽減した。その詳細については参考文献 [2] を参照していただきたい。ここでは、この永久磁石の写真を載せておく (図 1)。ビームサイズのブローアップに関してはかなり改善されたが、Phase 2 でビーム電流をさらに増やすことも想定すると、まだ十分ではない。さらにブローアップを抑制するためには、アーク部のアンテチェンバー部にもソレノイド電磁石、または今回設置したタイプの永久磁石を設置することが望ましい。コストの面から、ソレノイド電磁石より永久磁石の方が有望と思われる。また、真空度のビーム電流に対する非線形な応答に関連して、4月末頃に LER のビーム電流を増やしていくと急激に真空度が悪くなり、ビーム寿命が短くなった結果、富士実験室の放射線レベルが上がってしまい、これがビーム電流の制限になるという事態が生じた。これは他の3つの実験室 (筑波、日光、大穂) が放射線の管理に関して周辺監視区域に設定されていたのに対して、富士実験室のみ一般区域に設定されていたことで状況が苦しくなっていた。素粒子原子核研究所の了解のもと、5月の連休明けから富士実験室も周辺監視区域に変更した結果、放射線レベルの問題で LER 電流が制限されるということはなくなった。関係者のご理解とご尽力に感謝申し上げたい。

### 3.2.2 真空バーストを伴うビームアポートの頻発

SuperKEKB では、機器を保護するために、マシンに何らかのトラブルが生じた場合に、ビームをアポートしてビームダンプに導くアポートシステムが存在するが、問題になったアポートは、いわゆるロスモニターアポートであった (ロスモニターアポートは全周に設置されたビームロスモニターのいずれかがビームロスの兆候を捉えた場合に、大きくビームロスが起こる前にビームアポートするためのものである)。このアポートが起こった際には、LER のどこかで、真空度の急激な上昇 (真

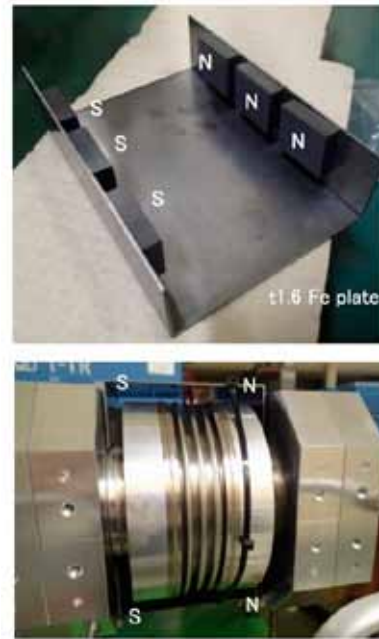


図 1: ベローズに設置された永久磁石。ベローズの中の軸方向の磁場は 60~120 Gauss 程度である。

空バースト) が生じており、この真空バーストの結果、LER の粒子 (陽電子) のエネルギーロスが生じて、ビームロスが起こりロスモニターアポートを引き起こしたものと考えられる。この場合、ロスを検知したのは、ほとんどの場合ビームコリメータ部あるいはビーム入射部のロスモニターであった。アポートの頻度は、ビーム電流を増やした時に増えて、ビーム電流を維持していると減る傾向があるので、エージング効果はあるものと思われる。典型的な頻度は1シフト (8時間) に2回程度であった。真空バーストの原因としては、真空チェンバー内の放電と真空チェンバー内のダスト粒子とビーム粒子の衝突の二つの可能性が考えられるが、真空チェンバーを強く叩く装置を設置して動かしてみると、問題になっている真空バーストを伴うアポートが再現性よく発生した。このことから、このアポートはダスト粒子によるものの可能性が高いと考えられている。図 2 にリングの

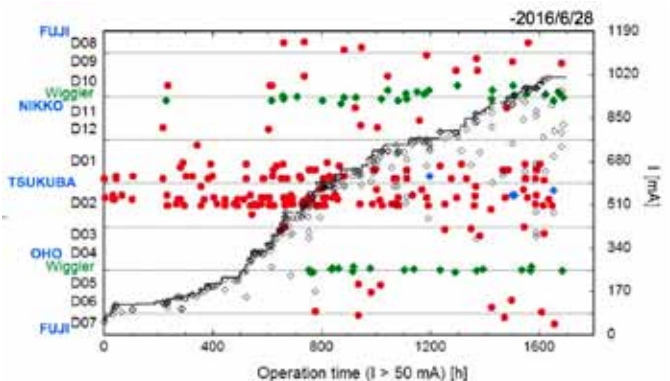


図 2: LER で真空バーストが起こった場所と、その時のビーム電流の履歴。

中で真空バーストが起こった場所とその時のビーム電流の履歴を示す。バーストが発生する場所は、当初、ほぼ筑波直線部近傍 (Local correction 部) だったが、次第にアーク部やウィグラー部でも発生するようになった。ほとんどの場合 (ウィグラー部を除き)、偏向電磁石用ビームパイプの中、あるいは端で発生している。偏向電磁石内のビームパイプには、ビームチャンネルの上下にグループ構造があり、アルミ合金製グループは押し出しで成型されていて、その後の加工や溶接でダストが紛れ込みやすく、また長さ約 5 m のビームパイプで洗浄が難しいことからダストが残っていると考えられている。エージング効果があるので、次第にこの真空バーストを伴うアポルトは収まるものと考えられる。

### 3.2.3 ビーム不安定性

ビーム不安定性もビーム電流制限の原因になり得る。そして、電流制限の原因になるのは、多くのバンチの運動が結合して不安定になる結合バンチ不安定性である。結合バンチ不安定性は、transverse 方向と longitudinal 方向に分けて考える必要がある。まず、transverse 方向の不安定性に関しては、原因として重要なのは LER では電子雲の効果、HER ではイオンの効果である。LER では上述の永久磁石をベローズに設置する前から、電子雲による結合バンチ不安定性はバンチ毎フィードバックシステムによって十分に抑制されており、電流制限の要因になることはなかった。SuperKEKB では KEKB の立ち上げ時に比べて、約 3 倍程度速いペースでビーム電流を増やすことができたが、それにはこのバンチ毎フィードバックが立ち上げの早い時期から安定に働いたことが大きく貢献した。HER のイオンの効果によるビーム不安定性に関しては、イオントラッピングではなくファーストイオン不安定性が問題になるが、真空度が悪い場合は、バンチ毎フィードバックでは抑制しきれない状況もあった。しかし、ある程度 vacuum scrubbing が進むと不安定性はバンチ毎フィードバックで抑制できる状況になり、この不安定性が問題になることはほぼなかった。

次に、longitudinal 方向の結合バンチ不安定性であるが、KEKB で問題になったのは、加速空洞の基本モード (加速モード) に起因する不安定性であった。この不安定性は、バンチ毎フィードバックで押さえ込むのは困難で、空洞自体に特殊なフィードバック (-1 モードダンパー) を装備して抑制していた。SuperKEKB の Phase 1 では、ビーム電流が 1 A 程度と低く、加速空洞の基本モードに起因する不安定性は起きないと思われていたが、実際には故障や電気料金の節約のためにリングには設置されたが RF パワーを投入せずに、共振周波数をずらして (デチューンして) 運転していた幾つかの空洞が、不安定性を起す場合があり、その対策としてずらす周波数

の量を色々変えて不安定性を避けるのが大変であった。HER では結局 -1 モードダンパーも投入して不安定性を抑えた。また、LER では空洞の加速モードに起因するものではない不安定性が発生した。最初 660 mA 付近で発生し、その原因は分からなかったが、longitudinal 方向のバンチ毎フィードバックで抑制することができた。原因については、この不安定性はやはり加速空洞に起因している可能性が高いことがその後判明した。ARES 空洞は加速用の空洞に加えて、エネルギーを貯蔵する貯蔵空洞とそれらを結合する結合空洞の 3 空洞からできているため、加速に用いる  $\pi/2$  モードに加えて、0 モードと  $\pi$  モードが存在する。0 モードと  $\pi$  モードは  $\pi/2$  モードに比べてインピーダンスが低く抑えられている上、それらの共振周波数が RF 周波数に対して左右対称に近いので、不安定性に対する寄与がお互いに打ち消しあって、結果としてあまり強い不安定性を起さないように設計されている。しかし、Phase 1 ではデチューンして運転していた ARES 空洞の数が多く、デチューンの量も大きかったために、この対称性が崩れて、不安定性の原因になったと考えられる。そもそも、longitudinal 方向のバンチ毎フィードバックは、SuperKEKB の設計ビーム電流では、ARES 空洞の 0 モードと  $\pi$  モードのインピーダンスによるビーム不安定性を抑制するためにも必要とされていたものであったが、その効果を前倒して実証することになったと思われる。

### 3.2.4 機器のトラブル

機器のトラブルがビーム電流の制限要因になることがあった。一つは、HER の富士直線部にあるアポルトキッカーの上流に設置されたテーパー管のフランジ部からの真空リークである。5/27(金) にリークが発生したが、リーク箇所を開けて調べてみると、このテーパー管の内壁の水平面外側に「筋」が存在することが見られた (リーク箇所はその線上にあるヘリコフレックス部であった)。この筋はビームの直撃によるものである可能性が高いが、もう一つの可能性としては上流部の偏向電磁石からの放射光によるものであることも考えられる。但し、直接光はテーパー管の内側に当たるはずであり、外側に当たるとすると反射光である。この真空リークは、ビームアポルト時ではなく、ビームを 740 mA 蓄積して、vacuum scrubbing を行っていた時に発生したが、ビームアポルト時に付近で圧力バーストが観察されたこともあったので、一時期ビーム電流を 600 mA に制限して運転を行った。その後、リングのコリメータを大きく閉めたり、リーク箇所の直下流に PIN ダイオードのロスモニターを設置してロスを検知してビームをアポルトするなどの対策を講じて、最終的には HER の電流は 870 mA まで増やした。但し、この付近での圧力バース



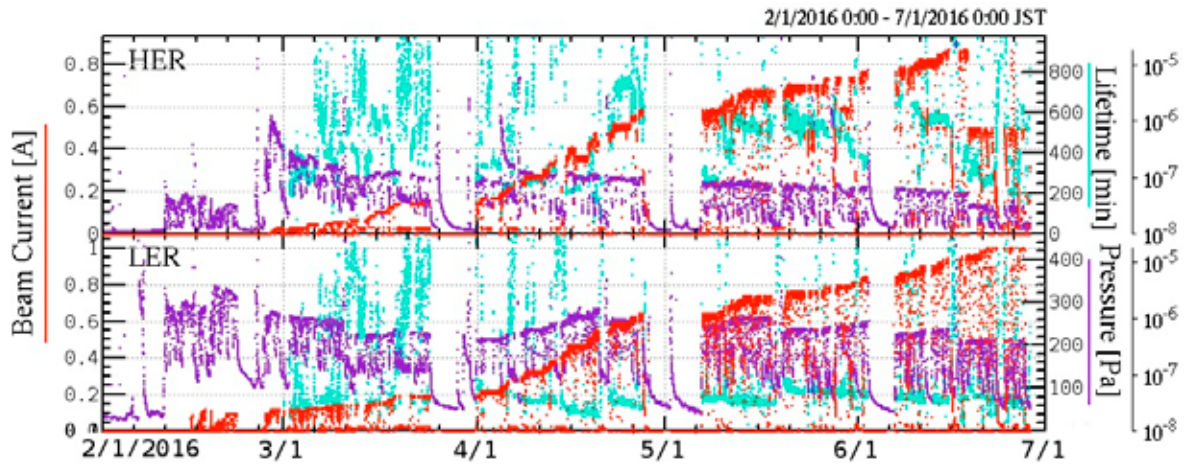


図 3: SuperKEKB の 5ヶ月の運転の履歴。

トが完全になくなったわけではない。Phase 2に向けて、このテーパー管のリング外側にフランジを守るマスクを設け、またリング内側の放射光マスク表面を粗くし、リッジを設けるといった対策を講じる予定である。もう一つのトラブルは、やはり HER で transverse 方向のバンチ毎フィードバックの kicker の電極に関するものであった。6/18(土)に kicker #5 のアンプの反射が増えて、実測した電極の抵抗値もおかしく、電極のフィードスルー部の不良などが疑われた。この kicker は 4 本の電極からなるストリップラインタイプのものであるが、KEKB でも使っていた旧タイプと SuperKEKB で新たに追加した新タイプの 2 セットある。トラブルがあったのは、新タイプのものである。#5 系統のアンプを切り離した上で、事態が悪化することを恐れて、これ以降ビーム電流を 500 mA に制限することにした。但し、マシンスタディで必要がある場合は、870 mA を最大にして電流を増やしたことはある。運転終了後調べたところ、高パワー減衰器の故障が見つかったが、kicker 本体には大きな問題はないようであった。

## 4 Phase 1 での到達点

ここでは、SuperKEKB の目標から見て、Phase 1 での到達点をまとめておく。まず、Phase 1 の運転の履歴を図 3 に示す。ところどころ運転していない期間があるのは、作業の都合で止めたところ (3 月末の期間) もあるが、基本的には運転費用の節約が目的であった。ところどころにブレイクを入れるのではなく、予定の 6 月末より早く運転を止める方が良いという意見もあったが、やってみると、今回のようにところどころに休みを入れると、(永久磁石の取り付けなど) 作業を組み込んだり、休んでシミュレーションを行ったりなど、短いブレイクを有効に利用できたと思う。

### 4.1 Vacuum scrubbing

ビーム電流と積分ビームドーズの履歴を図 4 に示す。上述のように、Belle II グループからの要請は、Phase 1 の間に 0.5~1 A のビーム電流で 1ヶ月程度の vacuum scrubbing を行うことで、積分のビームドーズにすると 360~720 Ah に相当する。360 Ah と 720 Ah の線も図に書き込まれている (図中の点線) が、ほぼこの要請は満たされたと言える。次に、加速器から見た vacuum scrubbing の到達点を見てみる。より詳しくは、参考文献 [4] を参照していただきたい。

LER の真空チェンバーは、KEKB で使われていたものの 98% が新しい真空チェンバーに入れ替えられた。アーク部では、KEKB で問題になった電子雲の効果を抑制することと KEBB より強くなる放射光によるチェンバーの発熱を軽減する目的で、アンテナチェンバーが採用されている。HER に関しては、アーク部の真空チェンバーはほぼ全て KEBB のものが再利用されている。全周では、約 18% のチェンバーが新しいものに入れ替えられた。このため、LER の方が長い時間の vacuum scrubbing が必要だと思われたので、2 月の立ち上げでは LER から調整を始めた。図 5 は LER の真空チェンバーの vacuum scrubbing の進行具合を示している。横軸は積分ビームドーズで、縦軸は電流に対する圧力上昇係数 ( $dP/dI$ ) 及びそれを光刺激脱離係数 ( $\eta$ : photon 一個あたりにチェ

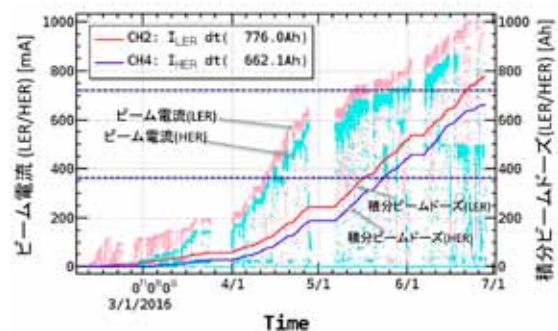


図 4: ビーム電流と積分ビームドーズの履歴。

ンバー表面から脱離によって生じるガス分子の数)に焼き直したものである。アーク部の平均と全周平均がそれぞれ示されている。全周平均で一時期悪化しているのは、ウイグラー電磁石の励磁を始めた時であるが、急速に改善しているのがわかる。積分ドーズが780 Ahの時に、圧力上昇係数 ( $dP/dI$ ) は、 $8 \times 10^{-7} \text{PaA}^{-1}$  であり、光刺激脱離係数 ( $\eta$ ) は  $6 \times 10^{-6} \text{ molecules photon}^{-1}$  程度であった。加速器で目標にしているのは、 $\eta \sim 1 \times 10^{-6} \text{ molecules photon}^{-1}$  であるので、Phase 2 以降さらに vacuum scrubbing が必要である。同様に、図6は HER の真空チャンバーの vacuum scrubbing の進行具合を示している。積分ドーズが660 Ahの時に、アーク部平均では、 $dP/dI$  が  $4 \times 10^{-8} \text{PaA}^{-1}$  であり、 $\eta$  は  $1 \times 10^{-7} \text{ molecules photon}^{-1}$  程度であった。HER のアーク部に関しては、加速器の目標から見て十分に真空が枯れていると言える。これは、アーク部のチャンバーはほぼ KEKB の再利用であり、KEKB の運転終了以降大気にさらされた時間もあつたが、KEKB での vacuum scrubbing がかなり生きていた結果である。HER でも筑波直線部など新しく導入された真空チャンバーに関しては、LER と同様さらに vacuum scrubbing が必要である。vacuum scrubbing が強く求められる理由は、Phase 2 で Belle II 検出器がインストールされた後のビームバックグラウンドを低く抑えるためであるが、Phase 1 では Beast 検出器を用いてマシンスタディが行われた。このマシンスタディでは、リングの幾つかの場所の真空度をわざと悪くする vacuum bump のスタディ、垂直方向のビームサイズを変化させて主に Touschek 効果 (バンチ内の粒子同士のクーロン散乱による粒子のエネルギー変化) によるバックグラウンドの変化を見るスタディ、ビーム入射条件をわざと悪くしてビーム入射に起因するバックグラウンドの変化を見るスタディ、さらにビームのテールを切るためのコリメータの位置を変化させてバックグラウンドの変化を見るスタディが行われた。これまでのところ、観測されたバックグラウンドは概ねシミュレーションと一致しているようであるが、シミュレーションとの定量的な比較はこれから行われる。Phase 1 での vacuum scrubbing の進展を踏まえて、Phase 2 で予想されるビームバックグラウンドのシミュレーションを行う必要がある。

## 4.2 オプティクス補正

オプティクス補正はマシンオペレーションのベースになるものであり、またその成否が到達できるルミノシティの上限に大きく影響する重要な補正である。ルミノシティを上げる上で最も重要なのは、ナノビーム衝突方式で衝突点の垂直方向のベータ関数 ( $\beta_y^*$ ) をどこまで絞れるかであるが、Phase 1 では衝突点でビームを絞るた

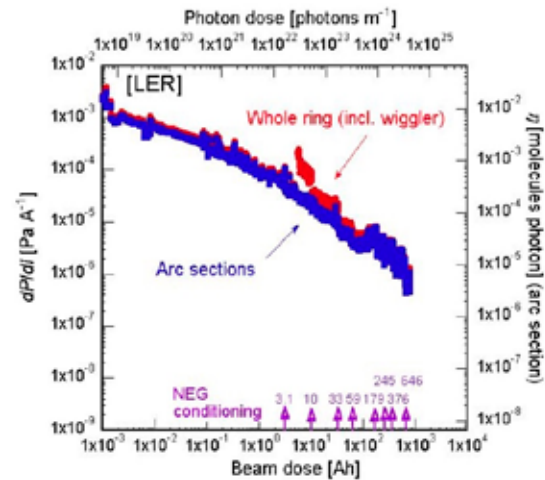


図5: LERにおける電流に対する圧力上昇係数と光刺激脱離係数の改善の履歴。

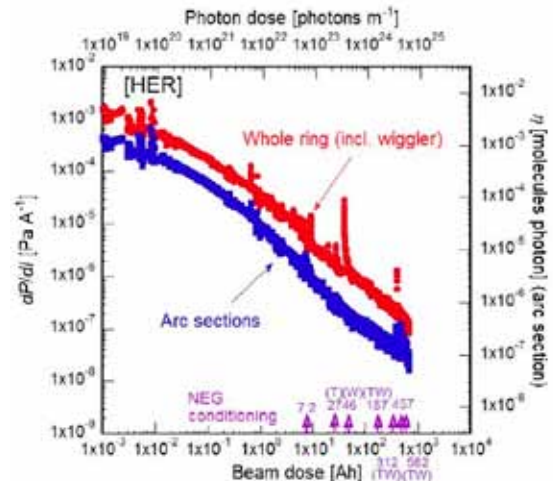


図6: HERにおける電流に対する圧力上昇係数と光刺激脱離係数の改善の履歴。

めの電磁石 (QCS) がインストールされていないので、これについては Phase 2 以降の課題になる。次に重要なのは、垂直方向のエミッタンスを十分小さくすることである。これができないとナノビーム衝突方式ではビームビームパラメータを十分大きくできず、ルミノシティが上がらない (他にバンチ電流を上げてビームビームパラメータを上げる方法があるが、その場合は HOM ロスが増えて大電流ではハードウェアへの負担が増す)。Phase 1 では垂直方向のエミッタンスを小さくするための調整 (低エミッタンス調整) がオプティクス補正の最重要課題として位置付けられた。垂直エミッタンスを下げるためには、オプティクスの線形補正のうち、垂直ディスパージョン補正と X-Y カップリングの補正が重要である。Phase 2 以降 Belle II 検出器が設置され、ビームを絞ってルミノシティを上げようとする、Belle II 検出器のソレノイド磁場や局所クロマチシティ補正用の電磁石が X-Y カップリングや垂直ディスパージョンを悪化させる原因になり得る。まず第一ステップと



して、Belle II 検出器のソレノイドやビームを絞るための QCS などが無い状態で、十分小さい垂直エミッタンスが得られることを実証しておくことは、非常に重要であると考えられる。HER の垂直ディスパージョン補正や X-Y カップリング補正は比較的上手くいったのに対して、LER の方はやや苦労した。問題になったのは、ビームのアポート時に用いられる DC のセプタム電磁石 (Lambertson セプタム) の漏れ磁場が周回ビームに影響して、X-Y カップリングや垂直ディスパージョンを悪化させるという状況が生じた。この問題は、KEKB でも問題になったが漏れ磁場補正用の永久磁石でほぼ補正されていた。SuperKEKB では、LER のビームエネルギーが高くなったこともあり、漏れ磁場が大きくなり、また補正磁石を設置した場所がアンテチェンバーになり、KEKB と同様の磁石の設置方法では、漏れ磁場補正用の永久磁石がビームに近寄せられずに実質的に弱くなったことなどのために補正がうまくいっていなかった。この漏れ磁場に対する対策として近傍の収束 6 極電磁石 (SF 電磁石) に巻いた skew-Q コイルに電源をつないで使うこと及び、永久磁石を用いた skew-Q 磁石を設置して補正に用いることを試みた。これらはどちらも有効で、これを用いることにより LER の垂直エミッタンスは劇的に小さくなった。LER の垂直エミッタンスの測定値の改善の経緯を図 7 に示す。目標の 5 pm には届かなかったが、8 pm 程度の低エミッタンスが実現できほぼ目標は達した。これに対して、HER の低エミッタンス調整はオプティクス補正自体は上手いきき、その結果から予想される垂直エミッタンスが 10 pm 以下と比較的小さな値であるにもかかわらず、X-ray モニタによる測定値は 120 pm 程度となり大きな不一致がある。X-ray モニタの校正など様々な検討、スタディが行われたが、現時点ではこの不一致の原因は完全には理解されていない。一つの可能性として X-ray モニタの測定に大きなオフセットが乗っている可能性がある。これは、X-ray の発光点の垂直ベータ関数を変更してビームサイズを測定したスタディから示唆されるものであるが、ビームサイズはベータ関数の平方根に比例せずに変化が小さかった。オフセットがどのぐらいかは、解析に用いる仮定やモデル式、測定データの処理方法などに依存するが、オフセットを差し引いた垂直エミッタンスとしては、20~80 pm ぐらいの値が得られる [5]。但し、このオフセットの原因は分かっておらず、Phase 2 に向けて今後の課題の一つになっている。表 1 に、エミッタンスに関して、Phase 1 での達成値を Phase 2, 3 での目標値と比べて示す。水平エミッタンス ( $\epsilon_x$ ) に関しては、すべて設計値で intra-beam scattering は無視した場合である。Phase 1 では水平エミッタンスを測定することも試みたが、干渉計の整備が間に合わず断念した。しかし、

表 1: エミッタンスの比較。

	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Units
$\epsilon_x$ L/H <sup>*</sup> )	1.8/4.6	1.9/4.4	1.9/4.4	nm
$\epsilon_y$ L/H <sup>*</sup> )	8/9 ~ 120	38/88	8.6/11.5	pm

\*) LER/HER。

少なくともバンチ電流があまり高くない領域では、設計値から大きくずれることはないと思われる。したがって、水平エミッタンスに関しては、Phase 1 ですでに設計値に到達したものと思われる。垂直エミッタンスについては、HER の測定値に問題があり、Phase 2 以降、測定上の問題を解決する必要がある。LER の 8 pm は Phase 3 の設計値より小さい。しかし、Phase 2 と Phase 3 の値は、ビームビーム効果によるエミッタンスの増大 (ビームビームブローアップ) を含んだ値であり、Phase 2, 3 でシングルビームでの垂直エミッタンスがどれぐらい低く抑えられるかに加えて、ビームビーム効果をいかに抑制するかが大きな課題になる。

マシンは完全には作れず設計値からずれ (マシンエラー) が必ず存在するものであるが、オプティクス補正は、マシンエラーを補正してオプティクスをできる限り設計値に近づけるために行われる。垂直エミッタンスは重要なパラメータであるが、補正の直接の目標値はディスパージョンや X-Y カップリングなどである。これらに加えて、オプティクスとしては全周のベータ関数の補正も重要である。これらは線形オプティクスと呼ばれるが、線形オプティクスの補正がどれくらいうまくいったかをまとめた表を表 2 に示す。

X-Y カップリングはビームをステアリング電磁石で水平方向に蹴って (いわゆるシングルキック)、どれだけ垂直方向に回り込むかで測定されるが、表に示されている値は、水平と垂直方向の軌道のズレ (全周の r.m.s.) の比を示している。表から分かるように、KEKB に比べて十分良い補正が行えた。KEKB より良い補正が行えた理由の一つは、QCS, Belle ソレノイドがないことであるが、水平方向のベータトロンチューンが KEBB

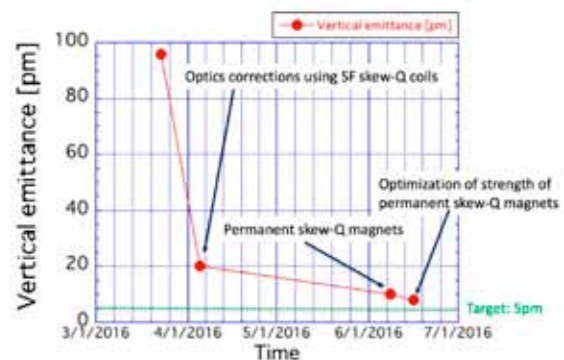


図 7: LER の垂直エミッタンスの改善の履歴。

表 2: Phase 1 における線形オプティックス補正の到達点。

	LER	HER	LER KEKB	Units
X-Y coupling <sup>*)</sup>	9	6		$\times 10^{-3}$
$\Delta\eta_x$ r.m.s.	8	11	10	mm
$\Delta\eta_y$ r.m.s.	2	2	8	mm
$\Delta\beta_x/\beta_x$ r.m.s.	3	3	6	%
$\Delta\beta_y/\beta_y$ r.m.s.	3	3	6	%

\*) 水平軌道と垂直軌道の r.m.s. の比。

に比べて半整数から遠いことも影響しているものと思われる。Phase 2 以降で衝突点でビームがどれぐらい絞れるかが課題になるが、その時に重要なのが Touschek 効果によるビーム寿命をどれぐらい長くできるかである。その場合に重要なのはダイナミックアパーチャー（ビームが安定に運動できる 6 次元位相空間の大きさ）であるが、特に重要なのがエネルギーが設計値からずれた場合に transverse 方向（特に水平方向）のアパーチャー（いわゆるエネルギーアパーチャー）がどれぐらい広くできるかである。このエネルギーアパーチャーには、電磁石の配置や設計を決めると原理的に避けられない制限も存在するが、マシンエラーで決まる部分もある。Phase 2 以降、このマシンエラーがダイナミックアパーチャーに影響する部分をどれぐらい補正できるかが重要になる。Phase 1 ではエネルギーがずれた場合のオプティックス（オフモーメントムオプティックス）についても調べられた。ビームエネルギーをずらした状態で、線形オプティックスを測定したが、その際に一つ問題になったのは、エネルギーのずれの関数としてのベータトロンチューン（クロマチシティ）である。線形クロマチシティの値（水平/垂直）が、HER は設定値が 2.63/1.64 に対して、実測値が 1.60/2.36 で比較的よく合っているのに対して、LER は設定値が 0.98/5.79 に対して、実測値が 3.13/2.35 でやや食い違いが大きかった。LER でのずれが大きい理由としてウイグラー電磁石のモデルなどが疑われたが、ウイグラーをオフして測定してもこの食い違いに変化はなかったため、ウイグラー電磁石が原因ではないことは分かった。今のところ、原因は不明であり、Phase 2 以降の課題になる。但し、この食い違いがどれぐらい重要かについての評価は存在しない。

#### 4.2.1 その他のコミッショニング

Phase 1 のコミッショニングでは、その他にも色々な努力が行われ大きな進歩があったが、紙面の関係や執筆時間の関係で書ききれなかったものも多い。以下に、ごく簡単にご紹介する。まず、入射器のコミッショニングはリングのコミッショニングに先立って行われ、大きな進歩も得られている。これについては、参考文献 [6] を

参照していただきたい。次に、リングの全電流やバンチ電流を制限するシステムがソフトウェア上またはハードウェア上の不具合でうまく働かず、意図しない高い全電流やバンチ電流がリングに蓄積されてしまうというトラブルが発生した。特に、3/8(火)には HER にシングルバンチで 4.7 mA 入射されてしまうという事態が生じた。バンチ電流が高いと多数の BPM の回路が一度に壊れてしまう可能性があり、バンチ電流は 1.5 mA までに抑えるという制限で運転を行っていたが、プロテクションシステムに不備があり、大きなバンチ電流が入射されてしまった。現在までのところでは、多数の回路が壊れるという事態は生じてはいないが、プロテクションシステムの有効性をよく確かめてから運転を行うべきだったというのは大きな反省点である。HER のビームアポートシステムは、SuperKEKB 仕様に変更され、立ち上がり速度が速いアポートキッカーが導入され、アポートギャップが KEBK の約半分の 200 ns 程度に縮めることができた。これにより、大電流運転時の RF 空洞の過渡的なビームローディングの影響が緩和され、またバンチ数が増えることによりルミノシティの上昇も期待できる。その他、様々なハードウェア上のトラブルも生じたがほぼ全て対処された。Phase 2 に向けて一つ気になるのは、Phase 1 の運転の最後の方で頻度が増えていた、ビーム輸送路の電磁石が冷却水流量の不足で落ちるトラブルで、Phase 2 に向けて対処が必要である。電磁石設定システム（コントロールソフトウェア）のトラブルもあったが、ほぼ対処された。Phase 1 では実現できなかった同期設定（複数の電磁石を同期を取って設定する）も上手くいかない原因が Phase 1 終了後に分かってきたので、Phase 2 では実現できるものと期待される。

## 参考文献

- [1] T. Abe *et al.*, Technical Design Report of SuperKEKB, in preparation and to be published as a KEK report. A preliminary version is seen in “<https://kds.kek.jp/indico/event/15914/>”.
- [2] 船越義裕, 「加速器」Vol. 13, No. 2, 2016 (91-97).
- [3] 船越義裕 他, 第 13 回日本加速器学会年会, 千葉, 2016 (MOOL02).
- [4] 末次祐介 他, 第 13 回日本加速器学会年会, 千葉, 2016 (TUP105).
- [5] 杉本寛 他, 第 13 回日本加速器学会年会, 千葉, 2016 (MOP062).
- [6] 紙谷琢哉 他, 第 13 回日本加速器学会年会, 千葉, 2016 (MOOLP02).