

KEKB 加速器の最近の進展と今後の展望

KEKB 加速器研究施設 KEKB コミッショニング・グループ

船越 義裕

yoshihiro.funakoshi@kek.jp

2004 年 7 月 26 日

1. 序

KEKB のピーク・ルミノシティは、2003 年 5 月 9 日にその設計値でもある $10^{34} / \text{cm}^2 / \text{sec}$ に到達した。ルミノシティのこの値は、B ファクトリの設計が行われていた時代には、世界の加速器研究者の間でも夢の値と思われていたものであり、その記録達成は衝突型加速器の歴史の上で大きな意義を持つものである。しかし、これからも長く続くであろう KEKB の歴史の中では、この記録も一つの通過点に過ぎない。実際、KEKB 加速器は、その後も順調に性能を上げ世界記録の更新を続けている。本稿では、KEKB のデザイン・ルミノシティ到達以降の進展を振り返るとともに、今

後の展望を概観する。ただし、今後の展望については、メジャーなアップグレード計画である SuperKEKB 計画が始まるまでの、比較的小規模なアップグレードまでに限ることとする。SuperKEKB 計画については、もし必要なら稿を改めて述べることにしたい。また、今後の展望については、PEP-II との競争が再び激化する可能性があるので、KEKB と PEP-II の比較を一つの軸として述べる。

2. 最近の進展

表 1 に 2003 年の夏前のマシンパラメータと 2004 年 6 月のパラメータの比較を示す。大局的に見ると、マシンパラ

表 1 KEKB のマシンパラメータ (2003 年 5 月と 2004 年 6 月の比較)

Machine Parameters	June 2004		May 2003		Units
	LER	HER	LER	HER	
Energy	3.5	8	3.5	8	GeV
Circumference	3016		3016		m
Beam Current	1650	1220	1500	1100	mA
Number of Bunches	1294		1284		
Bunch Current	1.28	0.94	1.17	0.86	mA
Averaged Bunch Spacing	2.35		2.33		m
Emittance	18	24	18	24	nm
β_x^*	59	56	59	58	cm
β_y^*	5.2	6.5	5.8	7	mm
Vertical Size@IP	2.1	2.1	2.2	2.2	μm
RF Voltage	8	14	8	13	MV
ν_x	45.505	44.513	45.507	44.512	
ν_y	43.535	41.582	43.546	41.580	
ξ_x	0.113	0.072	0.096	0.065	
ξ_y	0.074	0.057	0.069	0.052	
Lifetime	152	178	127	256	min
Peak Luminosity	13.92		10.57		/nb/sec
Integrated Luminosity/day	0.944		0.579		/fb
Integrated Luminosity/7days	6.01		3.88		/fb
Integrated Luminosity/30days	24.00		12.81		/fb

メータに大きな変更はないが、それでも KEKB の性能はかなり進歩していることが分かる。図 1 は KEKB の約 5 年間の歴史を示している。全体が 4 つの段に分かれており、1 段目はピーク・ルミノシティの履歴を表している。KEKB のルミノシティが設計値に到達した今年の 5 月以降もルミノシティはじわじわ向上して、現在の記録は設計値より 4 割近く高い $1.392 \times 10^{34} / \text{cm}^2 / \text{sec}$ を達成している。次に、2 段目は 1 日当たりの積分ルミノシティの履歴であり、この積分ルミノシティも去年の 5 月に比べて大きく進歩している。ピーク・ルミノシティの向上に比べて積分ルミノシティがより大きく進歩しているのが特徴的だが、その理由については後述する。3 段目は、ビーム電流の履歴で、両リ

ングとも蓄積電流値が少しずつ増えてる。去年の秋以降のピーク・ルミノシティの向上には、このビーム電流の増強も寄与している。最下段(4 段目)は、Belle 検出器が蓄積した全積分ルミノシティで、今年(2004 年)2 月に 200/fb を越え、順調に行けば今年の秋の初めには 300/fb に到達する見通しである。図 2 と 3 に、KEKB とそのライバルである PEP-II とのルミノシティの比較を示す。図 2 がピーク・ルミノシティ、図 3 が全積分ルミノシティであり、今のところ KEKB が PEP-II を大きく上回っている。しかし、PEP-II の性能も最近急速に向上しており、今後また KEKB と激しい競争状態になる可能性もある。これについても後述する。

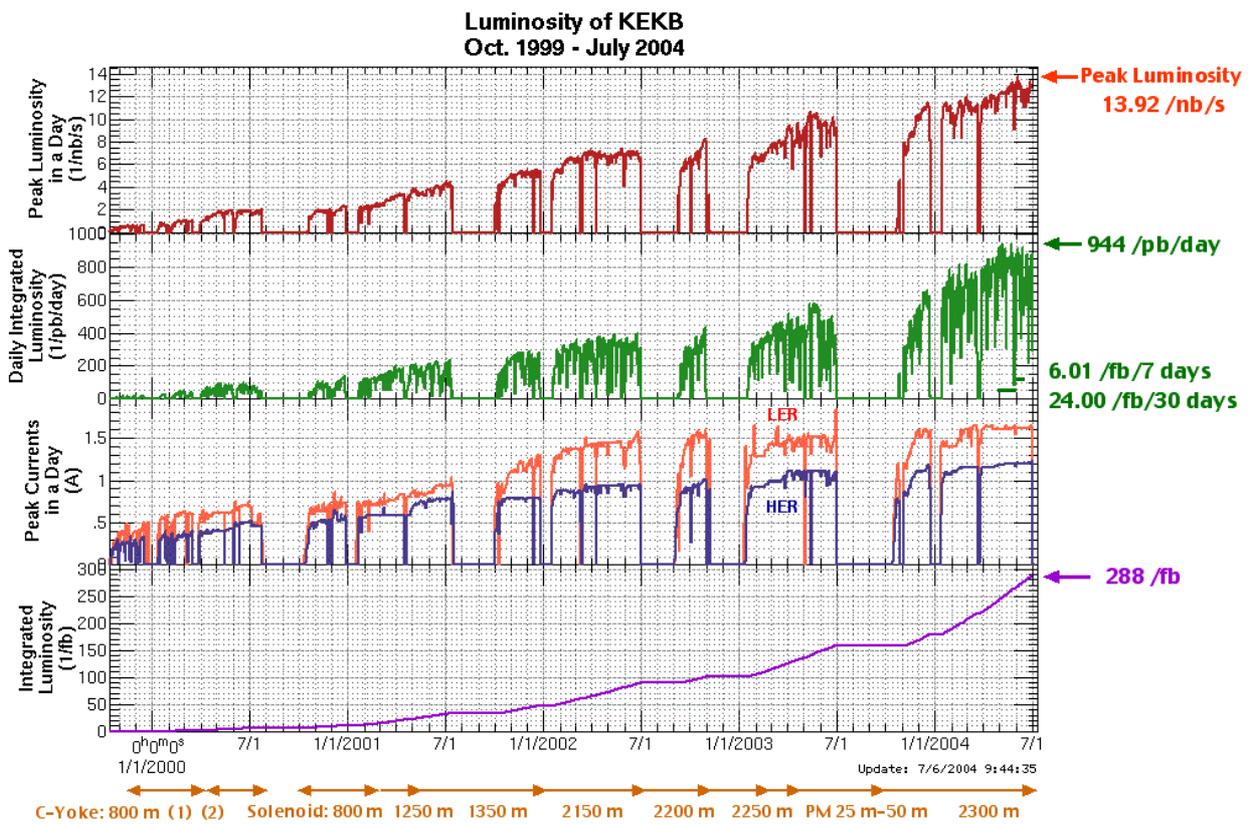


図 1 KEKB の 5 年間の歴史

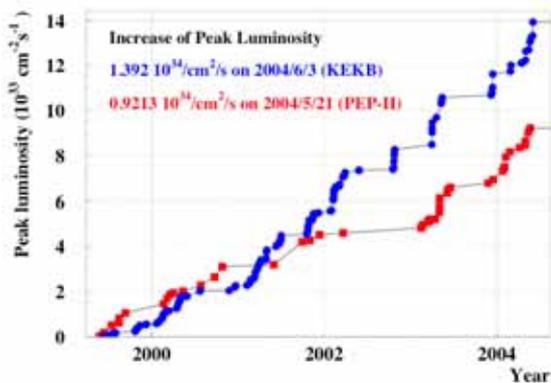


図 2 KEKB と PEP-II のピーク・ルミノシティの歴史

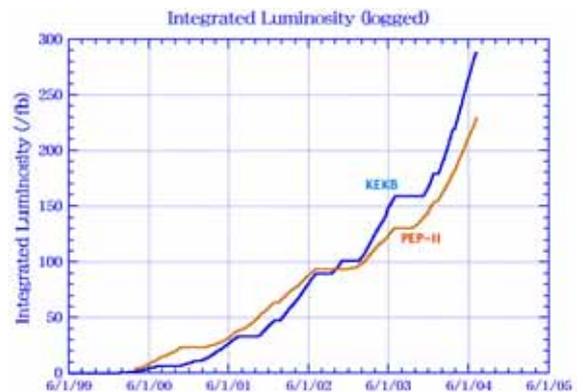


図 3 KEKB と PEP-II の積分ルミノシティの歴史

連続入射方式の実現

去年の夏以降のKEKBの性能向上を見ると、ピーク・ルミノシティの進歩に比べて積分ルミノシティの進歩の方が大きい。その理由は今年の初めから採用した連続入射方式の実現にある。この方式の主な狙いは、ビーム入射に起因するルミノシティの損失をできる限り少なくすることにある。以下、順を追ってこの方式の手順とメリットについて説明する。まず、連続入射方式を採用する前の従来の運転の方法について説明する。

図4に、昨年12月20日の深夜シフトの運転状態が示す。この図も4段に分かれているが、上の2段はHERとLERのビーム電流、真空度、ビーム寿命を表わす。ビーム電流は赤線で表されているが、この場合KEKBは1時間ちょっとを1周期とした繰り返し運転をしていることが分かる。ビームをHER(電子)、LER(陽電子)の順に入射した後、ある程度ビーム電流が減少すると再入射するというサイクルが繰り返されている(この場合、どの程度電流が減ったら再入射を行うかは、ビーム入射に伴うロスなどを考慮して積分ルミノシティが最大になるという条件から決められる)。

3段目は、ルミノシティを表しており。黄色線が各瞬間のルミノシティで、電流値が減少するに従ってこのルミノシティも減少している。緑線と薄緑線はともに積分ルミノシティで、薄緑はKEKB加速器が Belle 検出器に供給したルミノシティ、緑は Belle 検出器が実際に取得したルミノシティである(ビームの入射があると、これらの積分ルミノシティはゼロから数え直す)。何らかの理由で、Belle 検出器がルミノシティを取得できなかった場合は、緑線が薄緑線を下回ることになる。ここで重要なことは、ビームの入射中は、緑線は増えていない、つまりデータを取っていないということである。これは、ビーム入射中はバックグラウンド・ノイズが大きく、検出器の回路系の一部を壊してしまうことがあるためである。この問題を防ぐために、ビーム入射中は Belle 検出器の光電子増倍管などのバイアス電圧(高圧)を降ろすことが行われていた。その結果、ビームを入射している間はデータを取れないことはもちろんだが、それ以外にも入射の開始前と終了後にこの高圧の上げ下げの時間を取る必要があり、これがロスタイムになっていた。また、電子を入射した後、入射器のモードを陽電子に切り替える必要があるが、これもロスタイムになる。

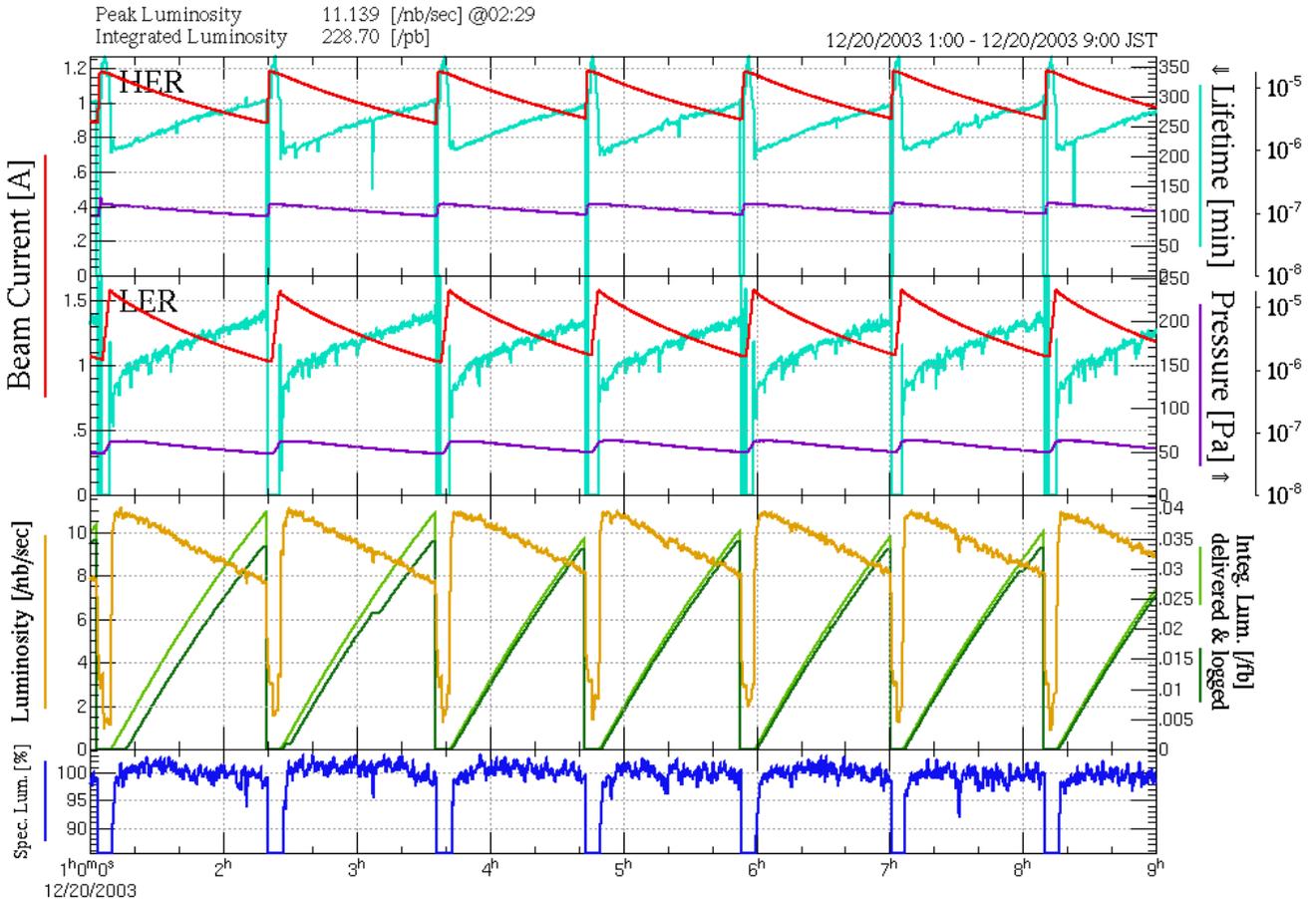


図4 従来の入射方式(2003年12月20日)

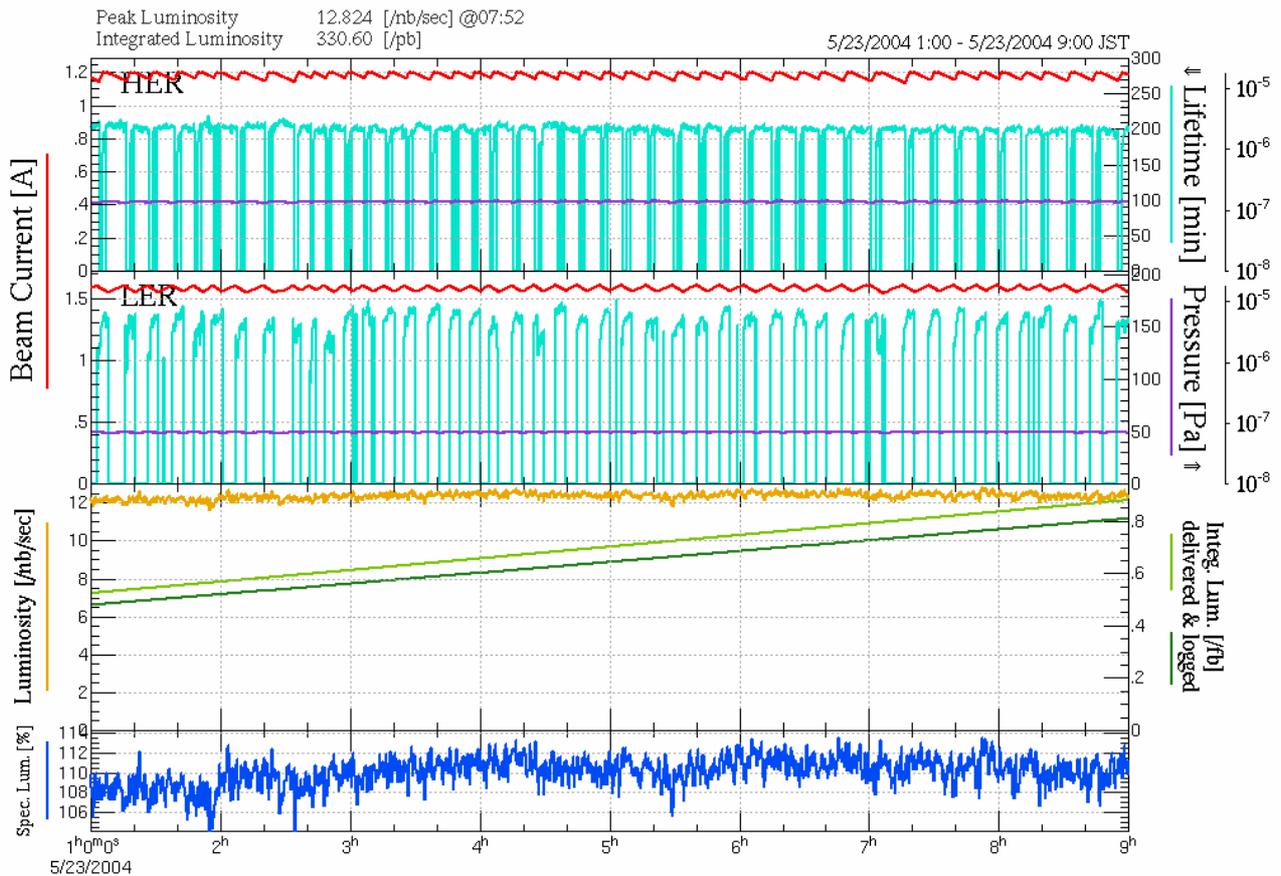


図5 連続入射方式 (2004年5月23日)

これに対して、図5に示されている連続入射方式を考えてみよう。この方式では、ビームを少しずつ継ぎ足してHER、LERの両方ともほぼ一定の電流に保っている。その結果、ルミノシティも最大値に近い高い値に保つことができる。また、この方式ではビームの入射中も Belle 検出器はデータを取り続ける。従って、高圧の上げ下げの必要もなく、また、もちろん入射器のモード切り替えの間もデータ取得を続けることができる。これらのことから、この連続入射方式は非常に効率のよい運転方式であることが分かる。

この様に、連続入射方式はもし実現できれば積分ルミノシティを増やすのに非常に有効な方法であるが、もちろん問題は入射中のビーム・バックグラウンド・ノイズの問題を回避できるかどうかにある。この問題は、それほど簡単に解決できる問題ではなく、最初に連続入射のアイデアが提出されてから実際に定常運転でこの方式が使えるようになるまでに、結局二年以上の時間を要した。

容易に想像されるように、連続入射を実現するためには、ビーム入射中のバックグラウンド・ノイズを減らす加速器側の努力が重要であった。具体的には、入射器からリングへ供給されるビームのクオリティをよくすること(バンチ内のエネルギー広がり小さくすることなど)、入射されるビームと既にリングを周回しているビームとのマッピン

グ(軌道、タイミング、オプティクスなど)をうまく取ること、リング内に設置された可動マスクで衝突点から遠いところでビームのテイルをうまく除去することなどが重要であった。これらのチューニングは、連続入射を行う前の従来の入射方式の場合でも重要なものであったが、連続入射の場合はバックグラウンド・ノイズへの要求水準が高い。また従来の入射方式では入射時になると、物理実験を行う動作点(水平および垂直方向のベータatron振動数)とは異なる(入射を安定させるのに有利な)場所へ動作点を移動するという手法を用いていたが、連続入射ではこの手法を用いることができないなど、より困難な条件で入射を行う必要がある。これらのことから、当初、連続入射方式による実験を可能にする入射条件を見つけることにはかなりの困難が予想されたが、さまざまな粘り強いチューニングにより、(多少入射効率は犠牲になるが)連続入射を実現できそうな入射条件を見つけることができた。しかも、当初の予定では経験的にバックグラウンド・ノイズが大きな電子ビームの連続入射は当面諦めて、陽電子ビームのみの連続入射を行うつもりであったが、実際にやってみると電子ビームのバックグラウンド・ノイズもかなり小さくすることができた。KEKBで何度も経験したことであるが、ここでも案ずるより産むが易しの例を見ることができる。

このように、加速器側の努力によって連続入射ができそうな入射条件を見つかることができた。しかし、これらのビーム調整で、ビーム入射の検出器への影響を完全に無くすることができたわけではない。ビームの入射を行う場合、既にリングを周回しているビームに対して新たにビームを継ぎ足すという方式を取るのを、新たに入射されるビームが、入射エラーと呼ばれる振動をすることを、原理的に避けることができない。この入射エラーと呼ばれる振動は、パンチの振動を押さえるフィードバックシステムなどにより次第に収まるが、入射後数ミリ秒の間は振動が続く。また、新たに入射されるビームのビームサイズは、既に周回しているビームのサイズより一般に大きい。この大きなビームサイズも放射減衰（減衰時間は約 40 ミリ秒）と呼ばれるメカニズムで次第に減衰し、最終的には周回ビームと融合して一つのパンチとしてまとまる。このように、入射直後は入射ビームの振動や大きなビームサイズ、さらに入射ビームの持つテイルのために、検出器に対してある程度大きなノイズをもたらすことを避けることができない。先に述べた、加速器の努力はこの入射直後の影響を最小限に抑え込むものであった。

この様な理由から、実際に連続入射が実用になるには、これらの加速器側の努力だけではなく、Belle 検出器側の努力が必要であった。まず、入射直後はどうしてもノイズがやや高くデータのクオリティが悪くなるので、入射後 3.5 ミリ秒の間 veto をかけて、データ取得を休むということが行われている（この 3.5 ミリ秒という数字は経験から決められたものである）。連続入射では、通常の場合入射は 10Hz で行われるので、入射の間隔は 100 ミリ秒である。従って、この veto によるロスは 3.5% である（連続入射といっても、実際には常に入射が行われているわけではなく、図 5 から分かるように、一端最大電流まで入射したらしばらく休み、ある程度電流が減ったらまた入射というように、こまめに入射蓄積を繰り返すというやり方を取っているので、veto によるロスは実質的にはさらに小さくなる）。しかし、この veto だけでは、すべての問題を解決することはできなかった。検出器のフロントエンドの回路系が、入射直後の大きなビームノイズに曝され、このため動作異常が起こる場合があった。連続入射を実現するのに最も大きな障害になったのは、TOF カウンターのデータ異常の問題であった。この問題は、入射器からリングへ入射される 1 パルスのビームでは問題がないが、5Hz または 10Hz で連続的に入射する場合に問題になるものである。この連続入射の場合、TOF カウンターの信号が、定常信号（0.2V 程度）の 100 倍以上に（20V）になることが起こった。いろいろ調査の結果、TOF のデータの異常は大きな信号が 10Hz 程度の繰り返しで入力すると、TOF のプリアンプの出力レベル安定化回路に誤動作が起こるために生じるが判

明した。この問題を回避できる高時間分解能プリアンプが新たに開発設計され、連続入射テストで性能確認された後に全数交換が行われた。このプリアンプの全数交換は 2003 年の夏のシャットダウンに行われたが、その直後の秋のランで連続入射の総合試験が行われ、連続入射の条件下でもこの新開発のプリアンプが問題なく動作することが確認された。このプリアンプの問題とは別の問題として、連続入射の条件下で Belle 検出器のデータ取得系で「イベント・スリップ」と呼ばれる現象が頻繁に生じるという問題が起こった。この問題は現象としては、FASTBUS の TDC の間で event を指すポインターにずれが生じてしまうことがあるという問題であった。この問題はその根本原因については結局特定できずに終わったが、2003 年夏にデータ取得系のアップグレード（このアップグレードによりデータ取得系の dead time が約 1/4 になった）が行われ、このアップグレードに付随して行なわれた、FASTBUS system の読み出しタイミングの見直しと簡素化により、このイベント・スリップの頻度も圧倒的に減少し、実質的に問題が解決した。これらの努力の結果、2004 年 1 月から通常の物理ランで連続入射の実用運転を始めることができた。

このようにして、実用化された連続入射方式であるが、この連続入射の実現による積分ルミノシティへの寄与はどのくらいであろうか？ 昨年末（従来の入射方式）と今年（連続入射方式）でそれぞれ成績がよかったシフトの積分ルミノシティを比べて、ピーク・ルミノシティの違いの分を補正すると、連続入射方式の成功による寄与は約 23% である（後述するように、連続入射ではビームの実効電流が高くなることを考慮すると、その寄与は 30% 近くにもなる）。これだけでも大きな進歩であるが、これに加えて連続入射方式を取ると、マシン運転の安定性の向上ももたらされる。たとえば、従来の入射方式では入射と物理実験で動作点を変えていたが、この動作点の移動の際に、時々ビームがアポートされるという問題があった。この問題は、連続入射では避けることができる。このように、連続入射ではほぼ同じ条件で運転を続けるため、運転の安定性が向上する傾向にある。この安定性の向上も、連続入射方式のメリットとして挙げるができる。表 1 には一日、7 日間、30 日間の積分ルミノシティの記録が示されているが、期間が長くなるほどこの 1 年間での進歩が大きく、30 日間記録では 90% 近くも進歩している。この積分ルミノシティの向上は、さまざまな努力の積み重ねによるものではあるが、連続入射の採用もこの進歩の大きな要因の一つである。

この連続入射方式のアイデアは、元々は PEP-II の人々が提出したものである（ただし、連続入射というアイデア自身は PEP-II のオリジナルではなく、一部の放射光マシンで既に実績がある）。この連続入射の実用化についても、

KEKB と PEP-II の間で競争になったが、先行したのは PEP-II で昨年 12 月の初めから連続入射で物理ランを行えるようになった。ただし、この時は陽電子ビームのみの連続入射で、電子ビームは検出器のノイズが大きいため、連続入射を行うことができなかった。これに対して、KEKB では今年の初めから電子、陽電子の両ビームの両方の連続入射を実用化することができた。その後、PEP-II も 3 月に入って電子ビームの連続入射に成功した。ここで一つ注目すべきことは、PEP-II と KEBK を比較した場合、連続入射のメリットは KEBK の方が大きいということである。PEP-II の入射器は、元々 SLC で用いられていたもので、ビーム強度も強く、また電子、陽電子の同時入射もできる強力なものである。したがって、従来の入射方式の場合、ビームの入射時間や入射器の（電子、陽電子間の）モードの切り替え時間などのロスが大きい KEBK の方が、積分ルミノシティに関して不利な状況にあった。しかし、連続入射方式では、これらのロスの影響がほとんど見えなくなるために、入射器の性能の違いがほとんど積分ルミノシティに影響しないという状況が生じるにいたった。この様に、PEP-II との競争という観点から見ても、連続入射の実現は大きな意味を持つものといえる。

ピーク・ルミノシティの向上

連続入射の成功と並んで、最近の KEBK の進歩として挙げられるのは、ビーム電流の増強などによってもたらされたピーク・ルミノシティの向上である。昨年 5 月のピーク・ルミノシティの記録は、 $1.06 \times 10^{34} / \text{cm}^2 / \text{sec}$ であったが、現在は $1.39 \times 10^{34} / \text{cm}^2 / \text{sec}$ と約 32% 向上している。この期間に、ビーム電流のほうは HER が 1.10A から 1.20A、LER は 1.50A から 1.65A へそれぞれ約 10% 程度増えている。ただし、このビーム電流は運転時の最大電流であって、必ずしもこの最大電流で最大ルミノシティが出るわけではない。具体的に言うと、2003 年夏前のピーク・ルミノシティの記録が出た瞬間のビーム電流は HER が 1.050A、LER は 1.377A であった。2004 年の夏前の（したがって現在の）記録が出た瞬間のビーム電流は HER が 1.200A、LER は 1.580A であった。したがって、（ルミノシティ最大を与える）実効電流の増加は約 14% ということになる。このように実効電流の伸びが最大電流の伸びより大きな理由は、やはり連続入射の採用にある。図 6 は、この事情を説明している。この図は 2003 年の夏前のピーク・ルミノシティが出た時のフィル（グラフの緑色のプロット）と、2004 年の夏前のピーク・ルミノシティの記録に対応するフィル（赤色のプロット）を比較したものである。グラフの横軸はバンチ電流の積、縦軸は衝突するバンチ当たりのスペシフィック・ルミノシティ（ルミノシティを衝突するバンチの数で割り、かつバンチ電流の積で割ったもの）である。この図

から分かるように、2003 年夏前のフィルでは、ビーム入射終了後しばらくはスペシフィック・ルミノシティが低く、ルミノシティが最大になるのは、ビーム電流が少し減ってからであった（緑線の直線部分）。しかし、2004 年夏前のフィルでは、最大電流の近くでルミノシティ最大になっている。このような違いが出てしまう原因については、完全に理解されているとは言えないが、連続入射の採用と関係があるのはほぼ確かである。つまり、連続入射モードではほぼ最大電流の付近でビーム電流が維持され、この状態で種々のチューニングにより最適な条件が見つけれられる。これに対して、従来の入射モードでは最大電流付近にビーム電流が留まる時間は非常に短く、この状態でのチューニングが十分できない。このことは、ビーム電流に応じてチューニングを変える必要があることを意味しているが、その原因については今後まだ研究が必要である（少なくとも、ビーム電流が変化するとビームの軌道やベータatron 振動数が変化することは確かであり、これらはビーム電流に依存する発熱現象と関係があると思われる）。

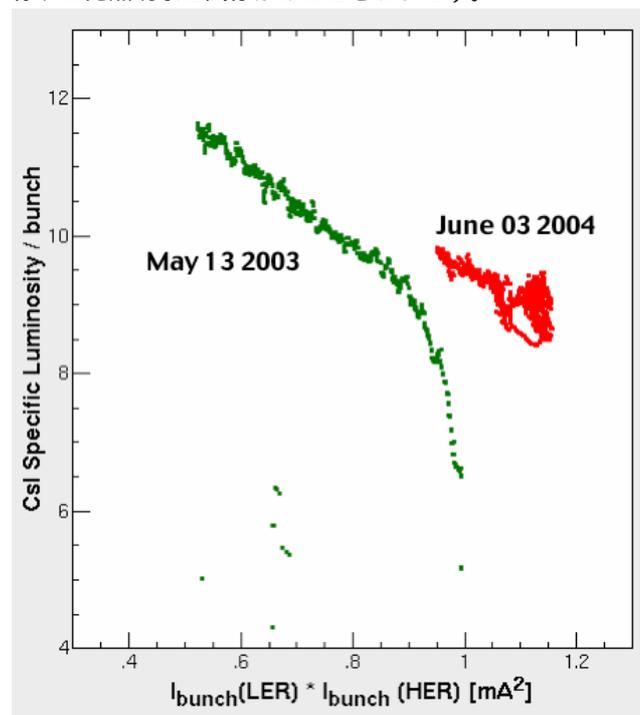


図 6 この 1 年間のスペシフィック・ルミノシティの進歩

ルミノシティの向上を考える場合、ビーム電流の増強による向上と、それ以外の要因による向上に分けて考えることができる。後者は（バンチ数が変わらない場合）図 6 のスペシフィック・ルミノシティで評価できる。図 6 を見ると同じぐらいのバンチ電流でもスペシフィック・ルミノシティが今年の方が高いということが分かるが、去年と今年でバンチ数には大きな違いがないので、このことは同じビーム電流でも去年より今年の方がルミノシティが高いということの意味する。このスペシフィック・ルミノシティの

進歩はどれくらいであろうか？ ビーム電流が重なる範囲が少ないので、計算がしにくいが去年のスペシフィック・ルミノシティのグラフの直線部分を外挿して今年のグラフと比べると、この1年間で約17% ぐらいの進歩が見られる。これに対してピーク・ルミノシティの進歩は約32% ぐらいなので、残りの13% ぐらいがビーム電流の増加による進歩ということが言える。このことはビーム電流の増加（約14%）にほぼ比例してルミノシティが増加していることをも意味する。

次に、この1年間でピーク・ルミノシティ向上のために、どのような努力がなされたかについて述べる。まず、ビーム電流の増強について考えると、上述のように、この一年間の実績ではルミノシティはビーム電流にほぼ比例して向上している。ビーム電流増強は、ルミノシティ向上の手段としては最も直接的なものであり、この一年間もいろいろな努力を積み重ねてきた。ビーム電流を制限する要因はいくつかあるが、その主なものとしては、

- 1) 真空チャンバーの発熱などのハードウェアの大電流ビームに対する耐性
- 2) ビームに供給できる RF パワーの制限
- 3) ビームインスタビリティ

などが挙げられる。まず、真空チャンバーの発熱などの問題については、昨年夏前の運転では衝突点付近のベローズの発熱の問題が生じ、これがビーム電流を制限していた。夏のシャットダウン期間中に、問題のベローズを予備品と交換し、その後問題は起こっていない。この作業以外にも、この年の夏期シャットダウンは Belle 検出器の SVD の更新作業のため三ヵ月半と長かったため、この間に加速器の方も大電流運転のための対策をいろいろ行った。具体的には、衝突点付近のチャンバーの徹底した発熱対策、発熱が問題になっていた両リングの入射用セプタムのチャンバーの作り替え、HER の可動マスクの新バージョンへの更新、その他発熱が問題になったベローズやゲート弁の冷却強化、などである。2) の RF パワーの制限については、現在 HER のビーム電流の制限は、この RF パワーから来ている。昨年夏のシャットダウン中に、D4-A に二台の ARES 空洞を増設し、電流制限を約 100mA 上げることが出来た。しかし、今年はじめの運転開始の直前に D10-C の超伝導空洞に真空リークが発生し、現在もこの空洞なしで運転を続けている。この空洞を運転から外した結果、電流のリミットは約 100mA 下がり去年の夏前の状態に戻ってしまったが、その後、超伝導空洞に供給するパワーを少しずつ増やすことに成功し、現在では電流の上限を 1.2A 程度まで上げることに成功している（D10-C の空洞は今年の夏のシャットダウン中に復帰の予定）。3) のインスタビリティについては、去年の夏前の運転で、（インスタビリティのために）HER の

ビーム電流が RF パワーの制限値まで積めないという状況が生じた。この際に feedback の調整などによって、このインスタビリティ（主に水平方向の coupled bunch instability）を押さえ込む努力を行ったが成功しなかった。夏のシャットダウン中に調査を行った結果、旧バージョンの可動マスクの一部にダメージが発見され、このダメージを受けたマスクがインスタビリティの原因であると推定された。このマスクは（上述のように）新バージョンに交換された。この作業の後の秋からの運転では、このインスタビリティが大きな問題になったことはない。LER のビーム電流については、現在は再び入射セプタム部の真空チャンバーの発熱で制限されているが、今年の夏に冷却強化の作業を行い、この制限は取れるはずである。LER については、RF パワーの観点からは電流の設計値である 2.6A までは問題がないはずである。LER のビーム電流に関してもう一つ注意すべきことは、ルミノシティとの関係であるが、この点については後述する。

次に、ビーム電流の増強以外の理由によるピーク・ルミノシティの向上についてであるが、これについても、いろいろな努力が積み重ねられている。ベータトロン・チューン（動作点）の微調整、衝突点での垂直方法の β 関数のさらなる絞り込み、その他衝突点でのオプティックス・パラメータの微調整、ビーム軌道の最適化による垂直方向のエミッタンスの低減などで、ルミノシティが向上することがある。また、LER に少しずつ巻き足した電子雲除去用のソレノイドがルミノシティに寄与している可能性もある。これらの中では、（表 1 に示されている）動作点の微調整と β 関数の絞り込みの効果が大きいと思われるが、日々のチューニングなどによって少しずつ進歩しているために、これらの努力がどの程度ルミノシティに寄与したかを明確にすることはそれほど簡単ではない。

3. 今後の展望

KEKB の今後について考える場合、そのメジャーなアップグレード計画である SuperKEKB 計画を外すわけには行かない。しかし、SuperKEKB 計画が始まる前にも、比較的小規模なアップグレードを行うことが必要な状況が出てきている。これは、PEP-II の性能が最近急速に改善されており、国際競争の観点からも KEBB へのてこ入れが重要になってきたためである。以下では、この比較的小規模なアップグレード計画を中心に、KEKB の今後のルミノシティ向上の可能性について述べる。ここで考えるのは、最大でも数十億円の予算規模のアップグレードである。

1) Crab 空洞

本格的なアップグレードなしに、現時点でルミノシティを向上させる手段としてもっとも有効だと考えられている

のは、crab 空洞の導入である。本来この crab 空洞は、現在 KEKB で導入された有限角度衝突 (horizontal crossing angle) の方式に何か思わぬ問題が発生した場合のバックアップ・プランとして想定されていたものである。この horizontal crossing angle の導入は、これまでのところ設計段階で期待されたとおり有効に機能し、KEKB の性能向上に貢献している。特に設計段階に一部で心配されていた synchro-betatron 共鳴による beam-beam parameter の低下は問題になっておらず、有限角度衝突の状態でも beam-beam parameter が設計値 (0.05) を上回っている。

しかし、最近になって設計段階には気づかれなかった新しい可能性が開けてきた。それは、現在 KEKB で用いられているような極端に半整数共鳴に近い動作点 (特に水平方向の tune) で運転する場合、head-on collision (衝突角ゼロの衝突) を用いると、通常のマシンで達成されている beam-beam parameter の 2 倍程度の値 (≥ 0.1) にまで到達できるという可能性である。このことは、ルミノシティも 2 倍程度に上昇することを意味する。有限角度衝突方式をとっている KEKB で head-on collision を実現するためには、crab 空洞を導入することが必要である。この可能性は、beam-beam 効果に関するシミュレーションで見つかったものであり、そのメカニズムについて今のところ十分理解が進んでいるとはいえないが、これまでの経験でシミュレーションの有効性はかなり確立していると思われるので、この可能性についても追求する価値が十分あるものと考えられている。

元来の設計では筑波衝突点付近のそれぞれのリングに衝突の前後それぞれ 1 台の crab 空洞 (従って、両リングで合計 4 台の空洞) を設置することが想定されていた。しかし、現在のプランでは、2005 年 12 月 ~ 2006 年 1 月に、日光直線部において、それぞれのリングに 1 台 (両リング合計で 2 台) の crab 空洞を設置することを計画している。これはコスト低減のためである。元来の設計の方式を取ると、空洞台数が 2 倍になるとともに、冷凍機のある日光地区から筑波地区へ液体ヘリウムの輸送ラインを建設することが必要になり、大幅なコストアップが避けられない。Crab 空洞を各リング 1 台で済ます方式の場合、両ビームはそれぞれ全周を crabbing motion をしながら運動することになる。この場合、ビームが異常なふるまいをする可能性も考えられるため、この crabbing motion を考慮したビームの運動に関するシミュレーションが進行中である。これまでのところ、この全周の crabbing motion に関して大きな問題は見つかっていない。

なお、この crab 空洞設置の問題を考える上で、ひとつのポイントとなるのは PEP-II との関係である。PEP-II は head-on collision 方式を取っており、また最近その動作点が

かなり半整数共鳴に近づいてきている。つまり、われわれが crab 空洞導入で作りたいと考えている条件が、PEP-II では crab 空洞の導入なしに既に整ってきているということになる。したがって、もし我々の推測が正しいと仮定すると、PEP-II は (現在の状態のままでも) マシン・チューニングなどでまだ 2 倍程度ルミノシティが向上する潜在能力を秘めているということになる (PEP-II の現時点での beam-beam parameter は KEKB よりやや低い程度である)。最近、PEP-II でも (われわれの指摘に基づいて) beam-beam parameter の向上を目指すチューニング (衝突点でのオペティックス・パラメータのスキャンなど) を精力的に行うようになったが、現在までのところまだ大きな成果にはつながっていないようである。

2) 電流増強

ルミノシティ増強の方法として、最も直接的な方法の一つはビーム電流を増強することである。KEKB のルミノシティの増強を考える上でも、このビーム電流の増強が一つの大きな柱となるものである。具体的に電流増強の計画を述べる前に、まず電流増強に関連する二つの問題について述べる。

第一の問題は、電流を増やした場合のルミノシティへの寄与の効果の問題である。実験的には、以下のことがわかっている。すなわち、現在運転しているビーム電流の近傍で見ると、HER のビーム電流が変化するとルミノシティも変化するが、LER のビーム電流に対してはルミノシティの変化が小さいように見える。このことは、HER の電流を今後増やすと、ルミノシティは増えそうだが、LER の電流を増やしてもルミノシティの向上にはあまり寄与しないかもしれないことを示唆している。このような傾向は、最近のものではなくかなり以前から続いているものである。現在の運転電流は HER (1.2A)、LER (1.65A) 付近であるが、KEKB の設計値は HER (1.1A)、LER (2.6A) である。つまり、HER は設計値を既に越えているが、LER の方はまだ設計値の 2/3 弱であり、LER と HER の電流比が設計値と大きく異なる。設計値で HER と LER のビーム電流が大きく異なるのは、ビームエネルギーの非対称性に由来する。二つのビームで、ビーム・ビーム効果の大きさを等しくするという条件からビーム電流の設計値が決まっている。エネルギーの高いビームほど、質量が重くビーム・ビーム力による攪乱の影響を受けにくいので、相手のビーム電流を高くできる。したがって、ビーム電流の設計値はビームエネルギーの逆数に比例することになる。しかし、現実の (二つのビームの) 電流比は、HER 電流が高くなる方に設計値から大きくずれており、それにもかかわらずさらに HER 電流を増やす方向がルミノシティ向上には効果的であるように見える。こうなってしまう理由については、完全に理解

されているとは言えないが、以下の二つの理由のどちらか、または両方によるものと考えられる。第一の理由は、LERの電子雲の効果である。現在の運転電流の領域ではLERの単独ビームの場合には、あまり大きなビームサイズの増大は見られないが、電子雲の効果とビーム・ビーム効果の相乗作用でビームが太りやすくなるという可能性がある。第二の理由は、何らかの理由で、ビーム・ビーム効果によってHERビームが太りやすくなってしまっているという可能性である。たとえば、ベータトロン振動数（動作点）についてはLERの方が（水平方向のチューンが）半整数に近い。HERの動作点をLERと同等のところまで持っていくと、HERのビームサイズの増大が収まってルミノシティが約20%向上するというシミュレーションの結果も得られている（実際にHERの動作点をLERと同等の場所に移動しようとする、ビーム寿命が短くなってしまい事実上その動作点では今のところ運転ができない）。このようにビーム・ビーム効果に対する環境が違うために、HERビームがビーム・ビーム効果に対して弱くなっていて、相手の（LERの）ビーム電流が増えるとビーム・サイズが増大してしまうという可能性である。この第二の理由の場合、HERビームに対してよりよい運転条件を見つけることができれば、LERをさらに高い電流にしてもルミノシティが向上する可能性がある。LER電流のハードウェアの上限がまだまだ高いことを考えると、HERに対する運転条件を改善する努力を続けることには意味がある。これらの二つの理由（可能性）のうち、どちらが主なルミノシティの制限要因になっているかについては、普段の運転時のビームの振る舞いの観察やマシンスタディなどで実験的に調べられているが、今のところそれぞれどちらの可能性を示唆するデータも存在するというのが現状である。この問題に関しては、今後さらに調査が必要である。

電流増強に関連する第二の問題は、バンチの数に関連するものである。この問題を論じる前に、通常よく用いられるルミノシティの表式について説明する。

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

ここで、suffixの+または-は陽電子または電子を表す。したがって、この式は陽電子または電子のどちらを用いても成り立つことになる。Lはルミノシティ、 γ はLorentz factor、Iはビーム電流、 ξ_y は垂直方向のbeam-beam parameter、 β_y^* は衝突点での垂直方向の β 関数、 r_e は電子の古典半径、eは素電荷をそれぞれ表す。ここでは、ビームはフラットビーム（垂直方向のビームサイズは水平方向に対してずっと小さい）であることを仮定し、幾何学的な理由によるルミノシティとbeam-beam parameterのreduction factorは無視した。また、衝突での垂直方向の β

関数は二つのリングで等しいと仮定した。さて、この式を見るとルミノシティはほぼ三つのパラメータで決まることが分かる。すなわち、

- 1) ビーム電流
- 2) 垂直方向のbeam-beam parameter
- 3) 衝突点での垂直方向の β 関数

である。ここで一つ注目すべきことは、この式にはビーム電流は含まれるが、バンチ数は含まれないことである。このことは、 ξ_y が同じならルミノシティは（全）ビーム電流に比例し、バンチ数によらないことを意味する。非常に低電流では ξ_y はバンチ電流に比例するので、この領域ではルミノシティはビーム電流の二乗をバンチ数で割ったものに比例するが、KEKBの現在の電流領域では ξ_y はほぼ一定になっているのである（一般に、バンチ電流が高くなると、beam-beam parameterはある値で飽和して（ビーム電流を増やしても）それ以上大きくならないことが知られている。現在のKEKBのバンチ数は設計値の約1/4であるのでバンチ電流は設計値より何倍も大きいことに注意）。過去一年間でKEKBのビーム電流は約14%増え、これに伴うルミノシティの向上は、約13%と推定される。これは図6における緑の線（2003年5月に対応）の直線部分を今年の最大電流まで外挿した場合に対応する。このことはこの緑の線の直線部分では、 ξ_y がほぼ一定であることを表している（他方、緑線と赤線の違いは表1に示されている β_y^* の絞り込みと、tune変更などによる ξ_y の向上による）。一方、もしルミノシティがビーム・ビーム効果だけで制限されるとすると、バンチ電流を一定に保ってバンチ数を増やすとバンチ数に比例して（ビーム電流に比例して）ルミノシティが向上するはずである。上記の式はこのことも表現している。したがって、このルミノシティの式を見る限りKEKBのようにバンチ電流が高く ξ_y がリミットに達しているマシンでは、ルミノシティはバンチ数によらずビーム電流に比例して増えることになる。しかし、現実はこの式ほど簡単ではない。バンチ数を変えずにビーム電流を増やした場合、ルミノシティがビーム電流にほぼ比例して増えることは既に述べた通りであるが、バンチ数を増やした場合（従ってバンチ間の距離の平均値を短くした場合）、同じバンチ電流で比べるとバンチ当たりのルミノシティが低下することが実験的に知られている。このことは、バンチ数を増やして電流を増やしても電流に比例してルミノシティが増えないことを意味する。このことはまたビーム・ビーム効果以外のルミノシティの制限要因が存在することをも意味している。このバンチ間隔が短くなった時にルミノシティが期待通り上がらないことに関しては、実験的にはLER側に原因がありそうなことが示されている。この現象を生むメカニズムについては、今のところ電子雲の効果（または

電子雲の効果とビーム・ビーム効果の相乗作用)が有力視されている。KEKBの歴史において電子雲除去用のソレノイドを設置すると、このバンチ間隔の効果が弱くなったという事実もこの説明を支持している。この様に、電流を増やす場合はバンチ数を増やさない方が効果大きい。しかし、一方バンチ数を増やさずにビーム電流を増やすとビームが加速器の構造体を作る電磁場による発熱などの問題がより深刻になる。したがって、ハードウェア上のトラブルを減らすという観点からはバンチ数を増やして電流を増やすことが望ましい。この様に、電流を増やすに当たってはバンチ数の選択は慎重に行う必要がある。また、根源的には電子雲除去用のソレノイドの強化などの方法で、バンチ間隔を縮めてもスペシフィック・ルミノシティ(バンチ当たりのルミノシティを両ビームのバンチ電流の積で割ったものとして定義される)が低下しないようにすることが重要である。

さて、長々とビーム電流を増やすことに関連する問題について説明を行ったが、次に具体的にビーム電流を増やす計画について述べよう。まず、今年度行える短期的な見通しについて述べる。HERビーム電流については、現在最も強い制限を与えているのはRFパワーの制限である。このRFパワーに関しては、まず(上述のように)現在運転から外れているD10Cの超伝導空洞は、今年の夏のシャットダウン中に復帰の予定である。さらに、現在マルチパクティングの問題を抱えるD4CのARES空洞の入力カブラーを新バージョンに交換することにより、この空洞へのパワーを増やすことが出来るようになる予定である。これらの努力などで、今年の秋からのランではビーム電流をさらに200mA程度増やすことが出来る見込みがある(全電流の目標値は1.4A程度ということになる)。また、HERのビーム電流を増やす上で、(現在分かっている範囲で)問題になりうるものとして挙げられるのは、DCCT部付近の真空度悪化の問題と、ビーム入射中のRF位相の変動の問題である。この両者とも原因が完全には理解されていないが、前者は何らかの放電現象、後者は入射器ビームの位相変動が原因と考えられている(後者については現在も調査が続行中である)。これらの問題は、ビーム電流が大幅に増える可能性がある秋までには解決することが求められている。次に、LERのビーム電流については、現在問題になっている入射セプタム部の冷却強化を夏に行えば、現在分かっている範囲では電流増強に関しては、それほど大きな問題はない。秋の運転の一応の目標電流として、2A程度を考えている。現状ではバンチ間隔を縮めると、スペシフィック・ルミノシティが低下する傾向があることから、バンチ間隔は、できれば現状(平均で3.77RF buckets)のまま電流を増やすことが望ましい。しかし、ハードウェアのトラブルを避けるという観点からは、バンチ間隔を短くして運転す

る必要があるかも知れない(この場合は、ルミノシティをやや犠牲にしてマシンの安定な運転を優先するということになる)。また、LERの電子雲除去用のソレノイド磁石の強化に関しては、夏のシャットダウン中に永久磁石の大規模な追加を予定している。

次に、電流増強のやや長期的な計画について述べる。まず、どのぐらいの規模の電流増強をどのぐらいの期間で考えるかを設定する必要がある。まず期間については、2007年ぐらいまでを想定する。これは、この年ぐらいまではJ-PARCなど他のプロジェクトとの関係でSuperKEKB計画が本格的には始動しないだろうという見通しに基づく。もちろん、もっと早期に同計画が始まる場合は、今考えようとしているアップグレード計画を見直す必要が出てくることはいうまでもない。次に、電流増強の規模についてはPEP-IIの動向を注視する必要がある。現在のところ、KEKBの性能がかなりPEP-IIを上回っているために、われわれの中で国際競争の意識が薄れてきているが、最近PEP-IIもその存亡を賭けてアップグレード計画に取り組んでおり、われわれが地道なアップグレードを軽視すると、そう遠くない将来、PEP-IIがKEKBをピーク・ルミノシティで抜き返す可能性も出てきている。われわれのプロジェクトの存在意義を揺るがしかねないこのような事態を是非とも避ける必要があるということは、言うまでもないであろう。PEP-IIも2007年ぐらいまでのルミノシティのアップグレード計画を明らかにしている。表2にKEKBとPEP-IIの現在と2007年のルミノシティに関連するパラメータを示した。

表2a 現在のパラメータ(KEKBとPEP-IIの比較)

Parameters	KEKB		PEP-II	
	LER	HER	LER	HER
Ibeam [mA]	1650	1220	2234	1380
β_y^*	5.2	6.5	11	11
σ_l [mm]	~7	~6	12	12
ξ_y	0.074	0.057	0.069	0.044
L [/nb/sec]	13.92		8.34*	

* PEP-IIの最新の記録は9.21/nb/secであるが、対応する他のパラメータが手元にないので、少し古いデータを示す。

表2b 2007年のパラメータ(アップグレード計画)

Parameters	KEKB		PEP-II	
	LER	HER	LER	HER
Ibeam [mA]	2600	2000	4500	2200
β_y^*	5	5	8	8
σ_l [mm]	~5	~5	9	9
ξ_y	>0.1	>0.1	0.078	0.056
L [/nb/sec]	40		24	

まず、大づかみにこの表について説明しよう。先に述べたように、大ざっぱに言って、ルミノシティは三つのパラメータ、

- 1) ビーム電流
- 2) 垂直方向の beam-beam parameter
- 3) 衝突点での垂直方向の β 関数

によって決定される。KEKB と PEP-II を現時点で比較すると、これらの三つのパラメータのうち、衝突点での垂直方向の β 関数が大きく違うことが分かる。KEKB で PEP-II より小さい β_y^* が実現できている理由はいくつかあるが、いずれも KEBK の設計の優秀さに由来している。まず、KEKB での水平方向の有限角度衝突 ($\pm 11\text{mrad}$) の方式を取っているが、この方式の導入により衝突点付近の設計の複雑化を避けることができ、より小さい β_y^* の実現に寄与している。また、KEKB では TRISTAN の経験をもとに最終収束用四極電磁石として超伝導電磁石を用いているが、これも β_y^* を絞ることに寄与している (PEP-II では建設期に超伝導の技術を持っていなかったのが最終収束用四極電磁石として永久磁石を用いているが、収束力が弱く β_y^* を絞るという点からは不利である)。さらに、 β_y^* の最小値はバンチ長との関係で制限を受ける。これは二つのビームの衝突点は (原理的に) バンチ長程度の広がりを持つために、衝突の分布の中心点 (これを通常衝突点と呼ぶ) で β_y^* を小さな値まで絞っても、バンチ長の範囲で β_y^* が大きく広がってしまうと絞った意味がなくなってしまう。一般に、 β_y^* を絞って意味があるのはバンチ長程度までであり、それを大きく越えて絞ってもルミノシティは上がらない。したがって、バンチ長の程度まで小さな β_y^* が実現できた場合、より小さな β_y^* を目指すには、まずバンチ長をより短くする必要がある。この意味で、 β_y^* の最小値はバンチ長によって制限を受ける。表 2 に示されているように、KEKB のバンチ長は PEP-II より短く、 β_y^* を小さな値まで絞るのに適している。KEKB でより短いバンチ長が実現できるのは、momentum compaction factor と呼ばれる量を小さくできることに由来しているが、この量を小さくできるのは、KEKB で採用された 2.5π cell lattice と呼ばれる特殊なラティス設計に由来している。これに対して、PEP-II では conventional なラティスを採用しているために、フレキシビリティがなく momentum compaction factor を大幅に縮める様なことができない。従って、(将来にわたって) バンチ長を大幅に短くすることができるという展望がない。次に、ビーム電流については、現在のところ PEP-II の方が、KEKB をかなり上回っている。現時点でのこの差は、HER については、RF パワーの差によるものである (KEKB でのビーム電流は現時点では主に RF パワーで制限されている)。LER 電流については、KEKB の現時点でのもっと大きな問題は、電流を上げてルミノ

シティが向上しないという問題であり、(入射セプトラム部の発熱の問題を除くと) この問題が主要な電流制限の原因になっている。ルミノシティを決めるもう一つの要因である beam-beam parameter については、現在のところ KEBK の方がやや PEP-II を上回った性能を達成している。

以上のような現状認識を踏まえて、次に 2007 年までのアップグレード計画について考える。KEKB のアップグレードは、PEP-II の計画をも念頭において計画を行うという方針を取るので、まず PEP-II の計画を概観する。PEP-II の場合、RF 電圧を上げるなどの方法でバンチ長を短くして β をさらに絞る方針ではあるが、これによるルミノシティの向上はそれほど期待できない。また、beam-beam parameter の増加も多少考慮されているが、あまり多くは期待されていない PEP-II でルミノシティ増強計画の主要な柱になっているのは、電流増強である。電流を HER では 1.6 倍、LER では 2.0 倍に増強することが計画されている。これらの結果、ルミノシティが約 3 倍の $24/\text{nb}/\text{sec}$ まで向上するというのが PEP-II のルミノシティ増強計画である。KEKB のルミノシティ増強計画を考える場合は、以上の様な PEP-II の増強計画をも考慮して、あらゆる可能性を追求する必要がある。まず、crab 空洞を 2005 年の 12 月末から 2006 年の 1 月にかけて導入し、beam-beam parameter を 2 倍程度増やすことを計画している。この計画がうまく行くと、ルミノシティも約 2 倍向上することになる。しかし、PEP-II との競争という観点から考えると、この crab 空洞の導入も KEBK のメリットとはならないかもしれない。既述のように crab 空洞導入の目的は、head-on collision の実現にあり、この head-on collision と半整数に非常に近い horizontal tune の二つの条件がそろると、beam-beam parameter が非常に高くなるということが、simulation で示されているのである。この二つの条件は PEP-II では既に整って来ており、われわれの simulation が正しければ、近い将来に PEP-II で 0.1 を越えるような高い値の beam-beam parameter が得られる可能性がある。もし、このことが現実になると PEP-II のルミノシティが、2 倍程度向上することになり KEBK にとっては、非常に厳しい事態になる。このような事態にも備えて、crab 空洞導入前にも他のアップグレードの手段を考える必要がある。電流増強以外でルミノシティを上げる可能性も最大限追求すべきなのはいうまでもない (衝突点の β 関数をさらに絞るなどの可能性については次のセクションで述べる) が、アップグレードの柱はやはり電流増強に求めるべきであろう。

さて、長期的な電流増強の計画であるが、増強の規模は PEP-II と同程度の 1.6 倍程度を考える (これぐらいの規模を考えないと PEP-II には対抗できない)。具体的には、HER を 2A、LER を 2.6A に増強する。このことは、HER

と LER のビーム電流の比を現在のまま大きくは変えないということの意味する。LER の場合、RF パワーの増強なしでも設計値の 2.6A の蓄積が可能である。したがって、ビーム電流増強計画の中心は、HER のビーム電流増強である。ルミノシティが HER 電流に敏感である KEKB の現状から考えると、電流増強は HER を中心に考えざるを得ない。HER 電流増強のためには、RF システムの増強が必要であるが、そのアップグレードとしては RF 空洞の数は増やさず、klystron などの増強を考える。具体的には大徳直線部に設置されている 12 台の ARES 空洞の内 8 台を 1 空洞 1 klystron に変更する（現在は 1 台の klystron で 2 台の ARES 空洞をドライブしている）。この増強のためには、RF ステーションを 4 ステーション増設する必要がある。この増設には、4 台の新しい klystron の増設、2 台の klystron 電源の増設（うち 1 台は現行品の改造）、4 ステーション分の制御系などを含む。また、空洞当たりの RF パワーが倍増されるため、ハイパワー用の入力カプラーを開発製造する必要があるが、これについては現在 R&D が進んでおり、2004 年の夏に実機に導入してテストを行う予定である。ここで注意すべきことは、この入力カプラーは SuperKEKB でも必要であり、今回の導入はその R&D の意味合いを持つ。また、このアップグレードで増設されるものは、すべて SuperKEKB でも使用可能であり、その一部となるものである。このように、電流増強の計画の中心は HER の RF システムの増強であるが、この電流増強に伴って増強が必要な項目がいくつか存在する。まず、このようにビーム電流をその設計値（HER 1.1A, LER 2.6A）を大きく越えて増強する場合、真空チェンバーの冷却水系の強化を行う必要がある。既設の 4ヶ所の冷却システムのそれぞれにおいて、空冷の冷却塔（既設）を水冷の冷却塔（新設）への変更、熱交換器の更新、それらに伴う配管系の取り回し工事、を行うことが計画されている。これらの改造も SuperKEKB の一部になる。次に、真空システムも大電流化のために一部弱い部分をアップグレードする必要がある。大電流に対して弱点があるのは、ベローズやゲート弁の RF コンタクトの部分で、これらの内特に弱いと思われるもの（衝突点付近のベローズや LER の HOM absorber のベローズ、衝突点付近の大口径ゲート弁など）を櫛歯式 RF コンタクトを使用したものに交換することを計画している。また、もし必要があれば衝突点付近の銅チェンバーの交換も行う。SuperKEKB では、真空チェンバーはすべて作り替える予定なので、このアップグレードで製作したものは、使えなくなるが、大電流蓄積のための R&D として考えれば、このアップグレードは非常に大きな意味を持つものといえる。また、LER 電流を増やしてルミノシティを上げるためには、電子雲対策も非常に重要で、この目的では電子雲除去用のソレノイドの電源をアップグレードすることにより、ソレ

ノイド磁場を大幅に強くすることなどの対策を予定している。また、これまでソレノイドを巻くことができなかった、電磁石の中に電子雲が蓄積する可能性も最近指摘されており、この対策も考える必要がある。場合によっては、光電子が多く放出される wiggler 部の真空チェンバーを ante-chamber に作り替える可能性も検討する余地がある。

3) マシンの潜在能力を引き出す努力(スペシフィック・ルミノシティの向上の可能性)

以上で考えたのは、新しいハードウェアを導入することによるルミノシティの増強計画である。PEP-II のアップグレード計画に対抗するためには、どうしてもこれらのアップグレードは必要だと思われる。しかし、もちろんこれらのアップグレードを準備するとともに、現在の KEKB の持つ潜在能力を最大限に引き出す努力も引き続き重要なのは言うまでもない。表 2 に戻ってルミノシティのアップグレードを考える。一つの可能性として、パンチ長をさらに短くすることが考えられる。現在の KEKB でのパンチ長はビーム電流の関数で変化し、パンチ電流が増えるとパンチは伸びる傾向にある（現在の運転電流でのパンチ長は表 2a に示されている）。このパンチ長がパンチ電流に依存して伸びるのは、potential-well distortion と呼ばれる現象であるが、この現象の場合 momentum compaction factor と呼ばれるパラメータの符号を変えると、パンチ電流が増えると逆にパンチが縮むようになることが理論的に示されており、また実験的にも確かめられた（ただし、実験的にはパンチ電流があるところまではパンチ長が縮むが、さらに電流が増えると今度はパンチが伸び始めるという現象が観測されており、この現象の解明が必要である）。このように、momentum compaction factor がその符号を含めて大きく変えられるのが、KEKB の特徴の一つで、PEP-II ではこのような芸当はできない。表 2b に示されているように、momentum compaction factor の変更により、パンチ長 5mm を目指したい。また、これに対応して β_y^* の方も、5mm まで絞ることを目指す。この他、シミュレーションでルミノシティの向上に対して、効果があることが示されているものとして、HER のベータトロン振動数を LER と同じところまで持ってくること、両リングの β_x^* を絞ること、両ビームのエミッタンスを小さくすることなどがあり、それぞれ追及する価値がある。ただし、これまでの運転で簡単に試せることは既に試されており、残っているのはそれほど簡単ではない課題ばかりであることにも注意する必要がある。日々の運転でルミノシティを出しながら、これらの課題も追及することはそれほど簡単なことではない。もちろん、それなりの困難は覚悟の上で KEKB の潜在性能をさらに引き出す努力が重要なのは言うまでもない。

さて、以上に述べたアップグレードを通じて、どのぐらいのルミノシティの向上が見込めるかを考える。表 2b に示されたパラメータがすべて実現し、かつ予想外の困難がもしなければ、2007 年のルミノシティは、 $5 \times 10^{34} / \text{cm}^2 / \text{sec}$ ($50 / \text{nb} / \text{sec}$) に達することが予想されるが、何か未知の問題が生じる可能性も考慮して目標ルミノシティを $40 / \text{nb} / \text{sec}$ とした。一方、PEP-II の目標は $24 / \text{nb} / \text{sec}$ であり、KEKB の目標よりずいぶん低いように見えるが、これは公平な比較ではない。すなわち、既述のように KEBK のルミノシティ増強計画には crab 空洞導入でルミノシティが約二倍になるという仮定が入っているが、この仮定が正しければ PEP-II は現状のままのチューニングによりルミノシティが約二倍になることになる。従って、この場合 PEP-II のルミノシティの目標値は $50 / \text{nb} / \text{sec}$ 程度とすべきである。従って、KEKB が電流増強を怠ると、ピーク・ルミノシティで PEP-II に大きく水をあけられる可能性があることを銘記すべきである。

4) 積分ルミノシティの向上の可能性

最後に、積分ルミノシティの向上の可能性について簡単に触れよう。連続入射が確立した現在、積分ルミノシティを大幅に改善する方法は存在しない。色々な地道な努力で、少しずつ積分ルミノシティを稼ぐ（または積分ルミノシティの低下を防ぐ）というイメージでの改善になるだろう。以下に、積分ルミノシティに関係する要因を列挙し、それぞれどういう努力が行われており、今後どういう努力が必要かを簡単に述べる。

(a) メンテナンスなどの後の立ち上げ

KEKB のルミノシティを長期間観察すると、常に一定値を維持しているのではなくて、かなり変動があることが分かるだろう。これはもちろんわざとやっているわけではなくて、ルミノシティを最高値のまま維持するのが難しいということを物語っている（テスト的に運転条件を少し変えて多少ルミノシティが落ちることを覚悟で運転を行う場合もあるが、これは例外的なものである）。ルミノシティの変動の仕方も色々なパターンがあるが、今のところ一番目立つのは、定期メンテナンス時やビームエネルギーを変える場合 ($\Upsilon(4s)$ 共鳴から外して運転する場合やこれを戻す場合) などに電磁石の初期化をした後、マシンを立ち上げて初期化前のルミノシティに復帰するまでに時間がかかる (1~2 日程度) という問題である。加速器の各機器の設定値をまったく同じにしても、ルミノシティの値は再現しない。試行錯誤の末現在取られている方法は、電磁石初期化後、ルミノシティの各種チューニングノブ (衝突点の x - y coupling や vertical dispersion) をいったんクリアした後 optics

correction を行い、correction 後チューニングノブをもとに戻すというものであり、この方法を採用するようになってから、ルミノシティの再現性はやや改善した。しかし、この経験的に最良と思われる方法を用いても、ルミノシティの回復のスピードは十分ではないし、また場合によってはマシンを止める前のルミノシティの最高値が回復しないこともある。また逆にマシンを止める前にルミノシティが低下していた場合に、定期メンテナンス後にルミノシティが回復する場合もある。この様にルミノシティの調子が落ちてきた場合には、メンテナンス時の電磁石初期化とその後の optics correction が待ち望まれる場合がある。なお、定期メンテナンス時には電磁石の初期化が必ずしも必要なわけではなく、ルミノシティの調子がいい場合は初期化をやらなくてもそのまま運転を続ける場合もある。しかし、ARC 部の NEG の活性化を行った場合などは初期化は避けられないし、またメンテナンス後にルミノシティの向上を目指してオプティクス関係の新しい試み (たとえば衝突点の β 関数をさらに絞る様な試み) を行う場合も多く、このような場合も、optics correction は必要である。以上述べたように、ルミノシティのチューニングは、現在のところすべて理詰めで行えるわけではなく、経験則や試行錯誤、場合によっては偶然に頼る面もある。もちろん、将来に渡ってこういう状態が続いてもよいわけではなく、ルミノシティ変動の要因や再現性の悪さの原因などの究明が重要であることは言うまでもない。

(b) ビームアポート

ビームアポートとは、ビーム運転中に何らかの目的でビームをビームダンプに蹴り出すことをいうが、ほとんどの場合加速器のいずれかの機器か Belle 検出器を保護することが目的である。アポートの原因は色々なものがあるが、頻度が高いものとしては、RF 空洞内での放電でその空洞に適正な加速電場が立たなくなることが原因のアポートや何らかの理由でビームロスが生じることが原因のアポートなどがある。前者はビーム位相の変化を常時モニタすることによりビームロスが生じる前にビームはアポートされるが、アポートしないで放置すると可動マスクや Belle 検出器にダメージを与える可能性がある。後者のビームロスの原因は色々であるが、ビーム不安定性による振動が起こる場合、tune の設定が不適切な場合、何らかの原因で起こる真空チェンバー内での放電によると思われるもの、所謂 dust trapping が原因と思われるものなどが多い。このようにビームロスと一言で言っても、原因が色々あるためアポートの頻度を減らすためには、それぞれの原因に対して異なった対策を立てる必要があり、地道な対策を行っている。ビーム不安定性の原因としては、真空度悪化によるイオンとビームの相互作用によるもの、ペローズなどのダメージに

よるインピーダンスの増大によるもの、ビーム不安定性を抑制するフィードバックシステムの調整のズレによるものなどがあるが、さまざまな努力の結果マシンの立ち上げ直後や真空作業の直後などの真空度が悪い場合を除いて、これらのビーム不安定性は最近ではあまり問題にならなくなっている。Tune の設定の不適切性の問題はソフトウェアの改良で頻度は激減した。また、連続入射の成功でビームの運転コンディションの変化が減ったこともビームロスによるアポートの頻度を減らすことに貢献している。また、ビームアポートは長期シャットダウン後の立ち上げの直後は頻度が高いが、運転を続けるに従って頻度が減る傾向がある。これは運転の継続で真空度が改善された結果イオンが原因のビーム不安定性が緩和されることや、RF 空洞や真空チャンバーがエージングされ放電の頻度が減ることによるものである（しかし、ビーム電流を増やすとこれらのアポートの頻度は増えることが予想されるので、アポートの頻度がこのまま低減を続けるとは考えられない）。2004 年の夏前の運転では、安定な月（5 月）で HER のアポートの頻度は 2 回/日程度、LER は 2 回/日を少し下回る程度であった（スタディの都合などでわざとビームをアポートする場合は除いている）。この頻度は、従来からの平均に比べるとかなり減っているが、さらに頻度を減らすためには踏み込んだ対策が必要であろう。また、運転を続けているとある時期に何らかの原因でアポートが頻発することがある。たとえば、クライストロンの保護回路である crowbar システムの誤動作によるアポートや電磁石冷却水系の異常によるアポートなどがその例であるが、現在のところ問題が起こるたびにそれぞれ対処している。これらは、機器の老朽化や経年劣化によって起こると考えられる。Crowbar システムの問題や冷却水系の異常などは抜本的な対策が講じられた結果、発生頻度は激減しているが、今後機器の老朽化や経年劣化が進むと新しいタイプのアポートが増えてくる可能性もあり、機器の老朽化対策やマシンのメンテナンスの重要性が増してくることも考えられる。

(c) 故障

機器の故障が起こると、その対処が終わるまでビーム運転ができなくなる。このような事態は、できうる限り未然に防ぐことが重要なほうでもない。機器の故障の原因としては、一応ビームが関与するものと純粋な機器の故障とに分けて考えることができるが、この両方の要素が混ざった場合も多い。KEKB の歴史を見るとビームが関与した故障は非常に深刻で、その歴史は真空機器の大電流との闘いであったという側面を持つと言えるほどである。真空機器がビームによって壊れるメカニズムも色々であるが、これまでの長期にわたる粘り強い努力によってかなりの部分は克服されている。今年になって起きた真空リークのトラ

ブルは、合計すると 9 回にのぼる（内 LER ウィグラー部が 3 回）が、内 1 回はビーム軌道の異常により放射光が真空フランジの真空シール部に当たったことが原因であり、今後ビーム軌道の管理強化が必要である。ウィグラー部のトラブルも放射光が関与している（放射光を受けるマスクの溶接部でリークが起きている）と思われるが、溶接の製作工程上の問題もありそうで、今後さらに踏み込んだ対策が必要である。対処療法としては、ウィグラー部の冷却水系の経路の変更により、局所的に温度が上がる部分をできるだけなくすという対策がとられた。また、真空リークが起きた時にリーク個所に簡易排気装置をかぶせて真空を引き、そのまま運転を続行するというような試みもなされている。これら以外の真空リークに関しても、ビーム電流の増減で発熱具合が異なることによる heat-cycle の繰り返しが金属疲労を進めるといような経年劣化が想定されるが、今のところ問題が生じるたびに対策を講じるというやり方で対処を行っている。これまでの努力でかなり真空トラブルは減ったが、今後ビーム電流が増えると再びトラブルが増えてくることも考えられる。既に述べたように、電流を増やさず場合はベローズやゲート弁などの弱い部分の対策が重要になってくる。次に、純粋な機器の故障（たとえば電磁石電源の故障など）であるが、これは今のところそれほど目立たない（今年になってからの故障で目立つものとしては、たとえば Belle 検出器のソレノイド電源の故障などがある）。しかし、KEKB で使用している機器は TRISTAN 時代からのものも多く、今後老朽化が進むに従って故障の頻度も増えてくる可能性がある。この故障の頻度の増加を食い止めるには、機器の老朽化対策が重要になってくるものと思われる。最近 KEBB では、このまま 5 年間運転を行う場合に必要となる老朽化対策のリストアップを行った。リストアップされた老朽化対策をすべて行うには、13 億円程度予算が必要になる。このうち規模が大きなものとしては、クライストロン本体と電源の更新と大型電磁石電源の更新が挙げられる。これらはいずれも TRISTAN で用いたものを再利用しているものである。

(d) 入射器のアップグレード

連続入射方式の確立により、入射器の性能向上への要求は以前ほど切実ではなくなったが、さらに細かく見ると入射器の性能向上が積分ルミノシティへ寄与する余地がなくなったわけではない。一つは、入射器のビーム強度の増強である。連続入射ではビーム寿命で失われる分を補えばよいから、入射ビームの強度が強くなれば入射時間は短くなる。ビーム入射時には、DAQ システムの veto のために dead-time が 3.5% だけ増えるので、入射時間が短くなれば（veto している時間が減る分だけ）積分ルミノシティが増えることになる。また、ビームのアポート後は、できるだけ

早くフル電流まで蓄積したいので、この場合は入射器のビーム強度は非常に重要である。また、ビームのチューニングの条件によっては、ビーム寿命を多少犠牲にするとより高いルミノシティが得られることもある。このような場合は、入射器のビーム強度への要求が強くなる。入射器のビーム強度増強については、色々方法が考えられるが、最近入射器のアップグレードのためのワーキンググループが発足し、このビーム強度増強の課題も含めて検討を開始したところである。また、連続入射方式では入射器のトラブルが積分ルミノシティに直接影響する(以前はトラブルがあっても、次の入射までに直せば積分ルミノシティへの影響は見えなかった)。従って、連続入射時代に入ってから、入射器の場合も老朽化対策やメンテナンスの重要性が以前より高くなるという状況が生まれた。さらに、連続入射を行いながらビームのクオリティを維持するという過酷な課題も抱えることになったが、これについては今のところ手探りで試行錯誤を繰り返しているという段階にある。また、連続入射時代の別の問題として、PF、ARの入射とKEKBの連続入射の干渉の問題がある。これも以前は、KEKBの入射の合間にPF、ARの入射を行えばKEKBへの影響は見えなかったが、連続入射ではこれが直接KEKBの性能に影響するようになった。特に、PF、ARのマシスタディで長時間入射器を占有するような場合は影響が大きい(PF、ARの立場から見ると、KEKBの連続入射のためにマシスタディのための入射に対する制限が強くなった)。このような状況を受けて、関係 6 主幹の間でKEKBとPF、ARの(準)同時入射を可能にするために努力するという合意がなされ、現在そのための入射器のアップグレードの方法について検討が進められている。早ければ、2005年の夏にもアップグレードのための工事を行うというスケジュールで検討がなされている。

(e) Detector dead-time

Delivered luminosity と logged luminosity の差をKEKB/Belle と PEP-II/BaBar で比較すると、KEKB/Belleの方がかなり悪い。その理由の一つは、DAQシステムの本来的な性能の差に由来するものであり、この差を埋めるためにはシステムの大規模なアップグレードが必要である。これは長期的な課題である。しかし、それ以外にもDAQシステムのトラブルによって、Belleが本来取れるデータをみすみす逃してしまうケースがかなり目立つ。この点に関しては、Belleグループのさらなる努力を期待したい。

5) 今後の展望のまとめ

以上述べたことを、時間順に整理してまとめを行う。まずは(特別な予算措置なしで)当面できることに力を注ぐ

ことが重要である。既に述べたように、ピーク・ルミノシティに関しても積分ルミノシティに関しても、努力の余地は残されている。次に、やや規模が大きなアップグレードを推進する。現在進行中のアップグレード計画のうち予算の目処が立っているのは、crab 空洞の導入と PF、AR、KEKB の準同時入射を目指す入射器のアップグレード計画である。Crab 空洞は 2005 年 12 月～2006 年 1 月に設置予定である。入射器のアップグレードは、早ければ 2005 年の夏のシャットダウン中にも行われる。これらはいずれも KEKB の将来にとって大きなステップになることは確かだと思われるが、PEP-II のアップグレード計画に対抗してその追撃を振り切るには不十分である。PEP-II に対抗するための手段として、HER のビーム電流増強と LER の電子雲除去のための対策を行いたい。現在計画しているものをすべて行くと、20 億円程度の追加予算が必要となり、この予算の目処は立っていないが、PEP-II の追撃を振り切るという意味では是非必要なものと考えられる。KEKB がアップグレードの努力を怠っても、PEP-II が KEKB に追いつくには多少の時間の余裕はあるものと思われる。しかし、RF の増強などの電流増強を行うにはやはり 1 年程度の準備期間が必要であり、PEP-II に並ばれてからでは手遅れになる可能性もある。もう一つ議論になりうるのは、これらのアップグレード計画と SuperKEKB 計画の整合性である。この問題に関しては、既に述べたようにここで問題にしているアップグレード計画の大部分は、SuperKEKB 計画の構成要素になるものであり、マクロに見れば SuperKEKB 計画の一環であるとも見ることができると強調しておきたい。また、これらのアップグレードを先行して行うことは、SuperKEKB 計画の R&D という立場からも重要であり、少なくとも理論上は SuperKEKB 計画と十分整合性がとれたものであると考える。もちろん、早期に SuperKEKB 計画が始まる場合は、話が別になる。最後にもう一つ別の問題を指摘すると、KEKB をこのまま何年か(たとえば 5 年)運転し続ける場合は、機器の老朽化対策が必要になってくる。現在の見積もりでは、13 億円程度の予算が必要であるが、この予算をどうやって確保するかも今後の課題になる。

4. 謝辞

連続入射方式の実現に向けての Belle グループの努力に関して、同グループの吉見弘道、伊藤領介の両氏にご教鞭願った。また、小川雄二郎氏には原稿全般について貴重なコメントを頂いた。これらの方々には、謝意を表したい。