

Belle 運転

KEK 素粒子原子核研究所

宇野 彰二

shoji.uno@kek.jp

2011年11月25日

1 はじめに

1999年6月1日にデータ収集を開始し、その後 SLAC の Babar 実験との熾烈な競争をしながら、B 中間子系での CP 非保存の発見などの数々の成果をあげ、Belle-II 実験に向けての改良のために2010年6月30日をもってデータ収集を終了した長きにわたる Belle 実験の運転を振り返る。

2 運転の歴史

最初の日はあまりにもスムーズであった。最初のビーム衝突が始まると加速器屋さんによる調整もほどほどに待ちきれなくなっていた外国人スポークマンから加速器制御室に詰めていた筆者のところに中央飛跡検出器(CDC)の高電圧を早く上げるとの催促がきた。渋々、許可を出して筑波実験棟に急ぐと着いたところにはすでに最初のハドロニイベントが観測されていた。何日も Bhabha イベントさえ見えなかったトリスタン実験の最初を見ていたわれわれにとっては、その違いに驚くとともに本当に高ルミノシティマシンでの実験を開始したという実感のわく1日であった。

その後はつらい日々が続く。現在、Belle 実験は順調にデータを収集し、大成功を収めた実験として内外から認識されていると思うが、最初は色々大変であった。もっとも困難だったことは、時間依存 CP 非保存の測定に欠かさないシリコン崩壊点検出器(SVD)の最内層が最初の2ヶ月の実験で死んでしまったことである(実際のダメージはほんの数日の運転中と推察している)。この原因となったビームバックグラウンドに関しては後述するが、幸いにも予備を用意していたので、最初の夏のシャットダウン中に交換することが出来た。その後ほぼ夏ごとにSVDの交換を行いながら、2003年夏にいわゆる rad-hard なチップを搭載した SVD2 を組み込み、その後は最後まで SVD2 を取り出すことはなかった。後で説明するように他のビームバックグラウンドも最初の2~3年間は相当悩まされたが、色々な角度からの理解と対処を行うことによって、SVD2 の組み込み以降は大きな山は越えたという感じになっていった。

次の問題は、ルミノシティが競合相手である Babar 実験に負けていたことである。Belle と Babar は同じ実験である。そこで統計量が半分くらいしかなく、しかも日々差は広がっ

ていたのだからやりきれなかった。加速器屋さんとけんかしながらの議論をすることもあれば、さる外国人がある程度ルミノシティが出たときに加速器制御室に加速器をこれ以上いじると怒鳴り込んだこともあったと聞いている。そんなこともあって、無用なけんかを避けるために Belle と加速器でどれだけ時間を使うかの取り決めをするようになった。詳しい話は省くが、それは一定の期間ごとに積分ルミノシティを Belle 側に約束するというものであった(加速器の人からは、年貢または税金とも言われていた)。このルールに従って、日々、グラフをつけて加速器に圧力をかけていたわけである。また、その当時は、Belle メンバーもルミノシティの向上の一助になればと思い、色々な加速器の仕事もした。もっとも顕著なことは、陽電子用ビームパイプに電子雲除去のためのソレノイド巻きを手伝ったことである。この甲斐あってルミノシティが順調に伸び、日々の積分ルミノシティが Babar を追い抜くことができた。

B 中間子系での CP 非保存の発見も、積分ルミノシティも Babar を超えて、しかも 100 fb^{-1} に到達し、意気揚々としていた2002年の10月に Belle の衝突点ビームパイプに穴があくという事故が起こった。まさに浮かれているなどという天の声でもあるかのようなようであった。触れることも見ることもできない場所での事故なので、最初は何が起きているのか理解するのに時間がかかった。ビームパイプの冷却に使われているヘリウムガスをアルゴンガスに代えたら加速器の真空側でそのアルゴンが検出され、完全に観念して古いビームパイプに交換することになった。もし交換するビームパイプがなければ相当長期のシャットダウンも覚悟せざる得ない重大な事故であったが、2か月後に復帰することが出来、Babar に積分ルミノシティで抜き返されることもなかった。

2003年5月9日には、ピークルミノシティが KEKB の設計値である $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$ に到達するうれしい日を迎えることになった。設計段階で目標には掲げるが本当に到達できると何人の人が考えていただろうかという数値に実際に到達することができ、KEKB 加速器の人々に感謝するとともにあらかじめ用意してあった15リットルの巨大シャンパンを冷やすのに苦労した日であった。その後もピークルミノ

シティは順調に伸び、しかも、後述する連続入射スキームの導入もあり、何と1日の積分ルミノシティが 1fb^{-1} を超えることになった(図1)。これは見かけだけになることもあるピークとは違い、実質的に驚異的な高ルミノシティマシンでの実験を印象付ける記録となった。このころから加速器のビーム電流も頭打ちになり、ビームバックグラウンドも安定してきて、全体が安定期に入っていた。

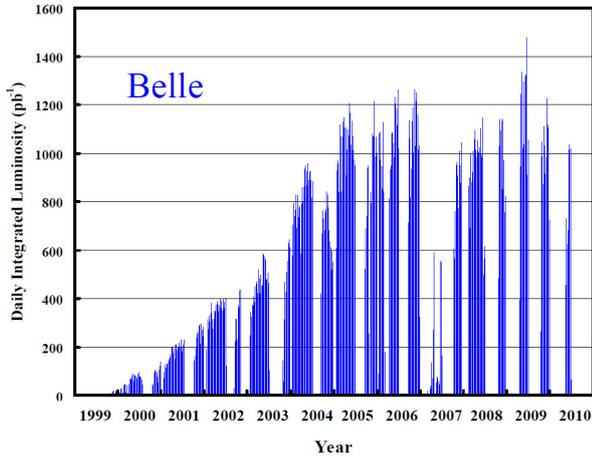


図1 日ごとの積分ルミノシティ

そこで、アップグレードに向けての議論、準備、それに関連するハードウェアの改良などが始まった。ここでは省略するが加速器の crab cavity の導入が大きな改造であった。Belle サイドでは、データ収集システムの改良を手掛けたり、 $\Upsilon(4S)$ 以外のエネルギーでのデータ取得なども行うようになった。最後の2~3年は、実験エネルギーの変更、予算の制約なども関係してルミノシティの積算傾斜は鈍ることになるが(図2)、そんな中でもピークが設計値の2倍を超えたり、積分が $1\text{ab}^{-1}(1000\text{fb}^{-1})$ という新しい単位の大台に載るといううれしい記録を作りながら、無事に最後の日を迎えることができた。図3は、最後のデータ収集を終えた Belle 制御室での記念写真です。

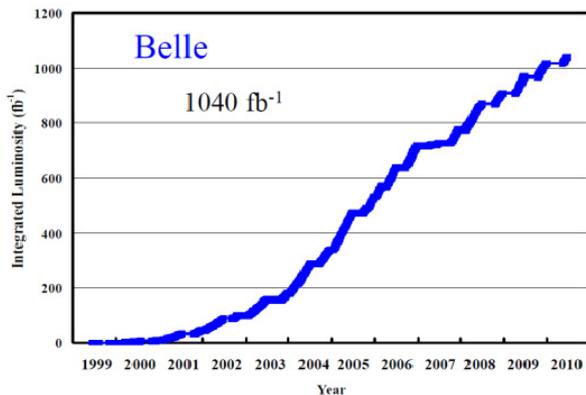


図2 積分ルミノシティ



図3 無事に最後のデータ収集を終えた Belle 制御室での記念写真

3 データ量

Belle で記録した全積分ルミノシティはもちろん世界最大の 1040fb^{-1} に達していて(図2)、その内訳は表1の様である。

表1 各エネルギーでの積分ルミノシティ

On-resonance	5S	121fb^{-1}
	4S	711fb^{-1}
	3S	3fb^{-1}
	2S	25fb^{-1}
	1S	6fb^{-1}
Off-resonance + Scan		$\sim 100\text{fb}^{-1}$

最初は $\Upsilon(4S)$ の共鳴状態に実験エネルギーを合わせて、B中間子からのCP非保存の発見や他の崩壊モードの詳細な研究がなされた。その間もB中間子以外からの物理バックグラウンドを見積もるために約10%程度の時間を共鳴ピークから60MeV低い実験エネルギーでデータ収集を行った。実験の比較的后半になって、 B_s 中間子からの崩壊モードの研究などを目的に $\Upsilon(5S)$ の共鳴状態でも比較的多くのデータ収集を行った。 $\Upsilon(1S)$ からinvisible崩壊の研究のために、比較的短期間だけ $\Upsilon(3S)$ のデータ収集もした。さらに、 $\Upsilon(1S)$ 、 $\Upsilon(2S)$ の共鳴状態でもデータ取得を行った。この期間は比較的短かったが、高いルミノシティのおかげでこれまでの実験のデータ量を上回ることができた。また、 $\Upsilon(4S)$ から $\Upsilon(6S)$ までの間でエネルギーースキャンも行われた。

4 ビームバックグラウンド

Belle 実験の最初のころの運転は、ビームバックグラウンドとの戦いであったといっても過言ではないものでした。きちんと書くと長くなるので比較的簡単に記述する。

最初に示すのが放射光によるバックグラウンドである。それは高いエネルギーのビームからの放射光だけが問題で2つの成分がある。1つ目は前方散乱と呼んでいるもので、ビームが衝突点に届く前に放射されるエネルギーの低い成分(数 keV 以下)である。これは SVD の最初の層だけで止まってしまうものであるが、その数があまりにも多かったためほんの数日間で SVD に致命的なダメージを与えてしまった。この放射光は、最初の夏にビームパイプの外側に 20 μm の金の薄板を入れることによって防いだ(次の年の夏以降はビームパイプを新作したので内側に 10 μm 厚の金を入れた)。2つ目は後方散乱といわれる成分で、ビームが衝突点を通過した後に2つのビームを分離するための強い磁場で発生する放射光が数メートル離れたビームパイプの壁に当たって跳ね返ってきて Belle に入ってくるエネルギーの高いもの(数十 keV)である。これは、放射光が最初に当たる場所のビームパイプの材質をアルミから銅に代えることと形状を変えてより遠くに当たるようにすること、さらに衝突点ビームパイプの周りでアクセプトランス以外のところに厚めの金を張り巡らすことによって解決した。この成分は、SVD の全層と CDC にヒットを作るものであるが、最後まで完全に消し去ることはできなかった。

次は、いくつかの理由によって周回しているビーム粒子の一部が衝突点付近でビームパイプに当たって、シャワーとなって Belle に入射してくる成分である。その影響はすべての検出器におよび、カロリメーターでは全エネルギーを足すと 0.5 GeV/event にもなる。この成分を改善するためには加速器の真空がよくなることももっとも重要であったが、Belle 側からも色々なデータの解析やわざと真空を劣化させるなどの実験を通して、どこの真空を特に改善してほしいかを要求していったりした。また、加速器内に 32 台設置されている可動マスクの調整や衝突点付近に設置してある固定マスクの追加などもこの成分を減らすのに大きく寄与していた。

3番目はダストトラップという現象であった。これは Belle の受けるバックグラウンドという意味では2番目と同じであるが、バックグラウンドは瞬間的に増大するが、すぐに元にもどるものである。しかし、CDC がトリップしてしまうと、また電圧を印加するのに時間ロスが大きというものであった。この現象は電子ビームだけをビームパイプ内で周回させている場合にだけに起こるもので(これまでの電子・陽電子衝突型加速器では、1つのパイプ内に電子と陽電子がともに周回していたので起こらない)、真空パイプ内にあるダストがたまたまビーム近くに落ちてきて、局所的に真空が悪くなったのと同じことが起こるものと解釈できた。実は同じような現象は放射光リングでも起こっていて、その場合は継続時間がもっと長く(トラップという名にふさわしい)、その間はビーム寿命が短くなるというものであった。

これを解決するために CDC の高電圧をトリップさせるのではなく、その間だけ電圧を少し下げると同時にデータ収集を中断するようなモジュールを追加することによって、ロス時間を短くするようにした。また徐々に真空パイプ内のダストが少なくなり、この現象の頻度は減っていった。ここで用意したモジュールは、後に示す連続入射スキームの入射時の瞬間的に増えるビームバックグラウンドに耐えるのにも有用であった。

4番目はルミノシティに比例した成分である。ルミノシティの大小がランダムヒット的なビームバックグラウンドに関係があるとは想像を絶するのですが、実際にエンドキャップの K_L 中間子ミューオン検出器(KLM)のヒットレートはルミノシティに比例していた。他の検出器ではこれまでに書いたバックグラウンドの成分の方が大きく、この影響はわずかなものであった(実験終了近くなってルミノシティも上がり、他のバックグラウンドも減少したので、この影響が多少見える程度になった)。電子・陽電子衝突の素粒子反応がどのようにバックグラウンドに影響していたかは次のように解釈している。光子放出 Bhabha イベントというのは前方散乱に非常に大きな断面積を持つ。いくら大きな断面積があっても、通常ならビームパイプ内を抜けていくので問題とならない。ところが、放射光のバックグラウンドのところの説明したとおり2ビーム分離のための強い磁場があるので、光子放出でエネルギーを失った電子(または、陽電子)は軌道はずれ、ビームパイプに当たって電磁シャワーを起こす。また光子は直進するので、やはりビームパイプに当たり電磁シャワーを起こす。電子シャワーだけならまだよいが中性子も発生する。これが、鉄をもすり抜けて KLM にバックグラウンドヒットを残す結果となったのである。この成分を低減するためにポリエチレンの壁を設置したが、最外の2層は最後まで使用することができなかった。幸いに Belle の場合は強い磁場が衝突点より比較的離れていたためこの影響がエンドキャップ KLM だけで済んだが、競争相手である Babar はこのバックグラウンドが比較的大きかった。

5 連続入射スキーム

Belle の運転という意味において大きな変化があったのは、データ収集中にもビームを入射し続けるという連続入射スキームの導入であった。これは設計段階ではまったく検討していなかった方式であるが、積分ルミノシティを蓄積するという意味で大きな寄与をしている。

多くの衝突型加速器実験では検出器側は待機した状態でビーム入射を行い、ビームが十分に蓄積されたら入射を止めてから加速し、実験のエネルギーに到達したら、検出器の高電圧などを印加してデータ収集を行う。その間はビー

ム入射がなく、ビーム電流は徐々に低下していく。ある程度ビーム電流が低下したら、データ収集をやめ検出器の高電圧などを下げてからビームを捨てて再入射するというのを繰り返す。せっかく蓄積されているビームを捨てるのは無駄であるので、設計段階から実験エネルギーで入射できるようにしたのがBファクトリーなどの高ルミノシティ実験であった。これによって、加速やビームを捨てるという無駄を省くことができ、全時間平均のルミノシティは飛躍的に向上した。しかし、それでもデータ収集中にビーム入射を行わないという意味では旧来の方式と同じであった。

以前は、ビーム入射中はビーム状態が不安定でビームバックグラウンドが高く、検出器に高電圧を印加していたら検出器が壊れてしまうというのがある意味で一般的な常識であった。筆者も加速器の人に何か言われても、「そんなことができるはずがない。CDCのワイヤーが切れる」と一蹴していた。しかし、SLACには強大な入射用線形加速器があり入射時間が短いので、せっかくピークルミノシティで勝っていても積分ルミノシティでは負けてしまうという時期があった。これを克服するには連続入射しかないということで2001年12月より恐る恐るそのテストを始めた。最初は、より入射時間がかかっていた陽電子入射中にどのようなバックグラウンドが来ているかをオシロスコープで生信号を観測するところから始めた。その信号は図4に示すようにKEKBの1周回に相当する $10\mu\text{sec}$ ごとに現れるが、それ以外の時間は静かである。この観測からわかったことは、ビームバックグラウンドはどうにもならないほど大きなものではないということと入射したビームからこぼれ落ちる粒子によるバックグラウンドは大きいながらもともと回っているビームからのバックグラウンドは入射がない状態と同じということであった(入射キッカーは周回しているビームもけているので軌道がずれる可能性があり、そこからのバック

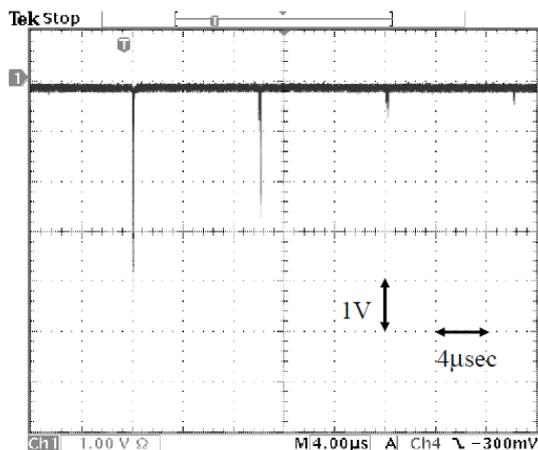


図4 ビーム入射中にTOFカウンターによって観測されたバックグラウンド信号波形。このオシロスコープ画面は、加速器から入射タイミング信号でトリガーされている。きれいに 10 msec 毎にバックグラウンドが増大していることがわかる。

クグラウンドを気にしていたがそれは杞憂であったということである)。この大きなバックグラウンドもある時間経過すれば小さくなることもわかった。そこで、その時間だけ(最初は 2 msec 、後の本格的なランでは 3.5 msec)データ収集を止めればよいという単純な結論となり、2002年1月に早速テストランを行った。しかし、そのデータを解析したところ、飛行時間計測シンチレーションカウンター(TOF)のアンプが最初のビームバックラウンドの巨大信号にうまく対応しきれないという問題があることがわかった。結局、これを全数交換するのに1年半を要した。その間に電子ビームの入射中のテストも行い、陽電子ビーム入射と本質的には同じ状態であることもわかった。そこで最終的なテストランでデータが健全であることを確認後、ようやく、2004年1月から本格的な連続入射実験を開始した。通常は 10 Hz の入射頻度であれば、ビームの減少割合に追いつき、最大ビーム電流を維持できた。この状態で連続入射による不感時間の割合は 3.5% であり、十分小さな値であった。この連続入射スキームを成功させたことは、KEKBの弱点(入射用線形加速器の強度がSLACのものよりも弱い)を克服すると同時に、ビーム電流が一定になり、より加速器が安定し、ピークルミノシティの向上という大きなおまけ(本来の目的は平均ルミノシティをあげることである)もついてくることにつながった。

6 Belleのシフト体制

Belleの運転はもちろんシフト体制で行われた。通常の日データ収集は、EXPERTといわれる人とNON-EXPERTといわれる人の二人で行われていた。EXPERTは博士課程の学生やポスドクなどの比較的若手の人(もちろん、年を召された方もおられた)が中心に、データ収集の専門家から講習を受けた人で構成されていた。このシフトは申し出制であったので(博士課程の学生だけは、卒業までに務めないといけないシフト数は決まっていた)、いつもぎりぎりまでリストが埋まらないという問題をかかえていた。何度もグループ内の議論はあったが、結局、最後まで強制的なルールを作ることなくのりきった。NON-EXPERTはメンバー全員が務めるシフトで地域ごとに枠が決められ、その中でそれぞれシフト要員を割り振っていた。これとは別に実験当初は各検出器にシフト要員がいて、筑波実験棟内につめていた場合が多かった。しかし、比較的早い段階で検出器そのものは安定化してきて、オンコールシフトになり、さらにSVD以外はこのシフトそのものもなくなっていった。これも後で示す読み出しシステムが統一されていたからこそできたことかもしれない。

さらに、Belleには別のシフトもあった。それらは安全シフトとBelle Commissioning Group(BCG)シフトといわれるものである。安全シフトは、筑波実験棟の安全に関するシ

フトで棟内の見回りも行っていた。これは技術職員も含めて KEK の職員だけで行う正式なシフト(勤務時間として扱う)であり, Belle の実験シフトとは独立に扱われていた。BCG シフトは加速器制御室に常時詰めていて, 加速器との連絡役を果たし, ビームバックグラウンドから Belle 検出器を守る役割のものであった。実際に, 可動マスクの調整もその仕事の 1 つであった。連続入射スキームが採用される前には加速器の人と相談して, 入射のタイミングを決めることも行っていた。このシフトは大学の研究者の協力を得ていたが, ほとんどは安全シフト(つまり, KEK 職員)と兼ねていた。ということで, EXPERT と名はついていても実際には頼りないシフト要員もいて 加速器制御室にいる BCG シフトからの助言はデータ収集の円滑な遂行に役に立っていたという実情もあった。

7 統一されたデータ収集システム

Belle のデータ収集システムは, SVD 以外の検出器はすべて同じマルチヒット TDC モジュールを使用することによって簡便化されていた。信号の大きさは電荷時間変換チップを利用して, 時間情報に直してから読み出していた。また, 時間精度がある TOF は特殊な時間拡大モジュールを使って, 他の検出器と同じ 1nsec 程度の時間分解能をもつ TDC モジュールを使えるようにしていた。このシステムはいわゆるパイプライン方式ではないので, データ収集時に不感時間が生じる。正直に言って, われわれの建設当時の実力からすればこの方式を採用したことは成功であり, これによって数少ないデータ収集グループの人数でも Belle 全体をうまく運転し続けることが可能になった。そうはいつでも, データ収集システムの常であるボトルネックを探し, それをつぶしていくたゆまぬ努力は必要であった。さらに, Belle-II に向けての準備という意味も含めて, 実験の後半になってからパイプライン方式の TDC へ置き換えるという作業も進めた。

8 トリガー条件の維持

Belle 実験では KEKB 加速器のルミノシティが $10^{32} \text{cm}^{-2} \text{sec}^{-1}$ 台から始まり, 最終的には設計値の 2 倍の $2 \times 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{sec}^{-1}$ にまで達したが, 全実験期間にわたってトリガー条件はほとんど同じというすばらしい状態でデータ収集ができた。これにより均一のデータとなり, どの物理をやるのにもすべてのデータが同じように使えるということを実現した(もちろん, どの共鳴状態のデータであるかは気にする必要がある)。トリガーは, 主に CDC による荷電粒子トリガー(トラック 2 本以上など)と電磁カロリメーターによるエネルギートリガー(4GeV 以上など)の 2 本立てで, ハドロンイベントに対してはリダグダンシーがあり, タウ対はもちろん, 2 光子過程までも網羅していた。

図 5 にトリガー頻度を示す。実験開始当初は加速器の真空状態が十分に良くないということもありビームバックグラウンドからの影響が大きい, その後本当の素粒子反応(ルミノシティに比例している成分)の割合が大きくなっていることがわかる。実験が終了するころには, 何とその割合が 80% にも達した。若い人にはこれは当たり前のことに感じられるかもしれないが, トリスタン実験を経験した筆者らにはトリガー頻度はバックグラウンドだけで決まっているというのが常識であった。ルミノシティが上がるとトリガー頻度が上がることを心配しないといけないということを経験するとは思ってもよらなかった。

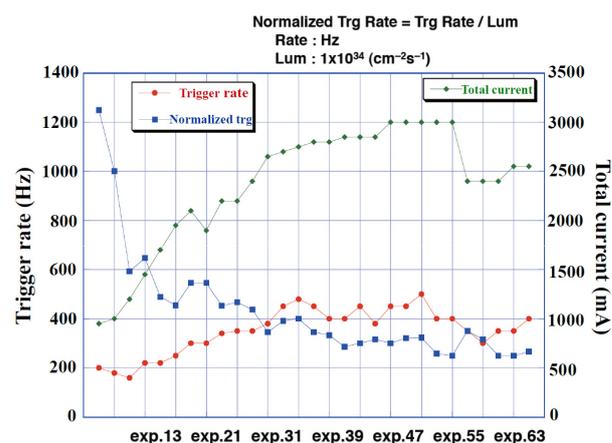


図 5 トリガーレートの変遷。横軸は Belle 固有の実験番号で, 最初から最後までを表している。赤(左端で一番下のグラフ)が実際のトリガーレートで, 青(左端で一番上)がルミノシティで規格化したものである。緑(左端で真ん中)は全ビーム電流を表す。最初, バックグラウンド成分が多いが, 時間とともにルミノシティに比例する成分が多くなっている様子がわかる。

長い実験期間中には, 真剣にトリガー条件を変更しようという議論を Belle グループ内でしたことが何度もあった。しかし, それを何とか切り抜けてきたのは, バックグラウンドの低減とともにトリガーグループの各種ハードウェアの改良, さらに, データ収集グループによる高いトリガー頻度まで耐えられるようにする改良などの結晶であった。

9 まとめ

Belle 実験は, 強大なビームバックグラウンドと闘いながら, それを克服する多くの地道な努力を続けることにより, 11 年間にわたって高ルミノシティ下でも均一なデータ収集を成し遂げた。

10 謝辞

Belle の長きにわたる運転とその収集データから得られた物理成果は, KEKB 加速器(入射器を含む)の皆様の大変な努力によって与えられた驚異的に高いルミノシティと低く抑えられたビームバックグラウンドの環境があってこそなし得たものと感謝しています。また, Belle 実験への KEK 内外の多くの皆様のご支援に厚く感謝いたします。