

話 題

ルミノシティの限界に挑む KEKB ファクトリー

黒川 眞一*

Challenging Ultimate Luminosity at KEKB

Shin-ichi KUROKAWA*

Abstract

This article introduces KEKB B-factory, which is an asymmetric-energy, two-ring, electron-positron collider for B-physics. The article covers its history, basic scheme and main features, achievements, and the competition with PEP-II, a B-factory at SLAC. SuperKEKB, an upgrade plan of KEKB, is also described.

はじめに

1987年にUCLA(カルフォルニア大学ロサンゼルス校)にて開かれたワークショップにおいて、LBLのPier Oddoneは、世界で始めて、CP不変性の破れを調べるためには、B中間子対を生成できる非対称エネルギー電子陽電子衝突型加速器を用いることが最も有効な方法であるという提案を行った¹⁾。それまでに存在した電子陽電子衝突型加速器は、どれも、同じエネルギーの粒子同士を衝突させるものであった。

この画期的なアイデアについては、発案者のOddone自身も、いささか自信が無かったようであり、

“We developed the concept of the asymmetric B Factory by a combination of inspiration and perspiration. The initial idea was more like a flash... gee, if we could collide asymmetrically then... But colliding asymmetrically with a high rate of events is tough.”と述べている。Oddoneのこのアイデアは、やがて、KEKのKEKBとSLACのPEP-IIという二つのBファクトリーとして実現されることになる。

現在、PEP-IIのルミノシティは、 $1.0 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ にまもなく到達しようという、 $0.92 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ まできており、一方、KEKBのルミノシティは、2003年5月8日に、設計値の $1.0 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ を超え、今は $1.39 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ まであがっている。

る。近年の世界と日本における加速器物理と技術の進歩は、Oddoneの夢を正夢としたのである。図1は、この30年間になされた衝突型加速器のルミノシティの変化を示すものであり、二つのBファクトリーKEKBとPEP-IIが衝突型加速器のルミノシティを上げる上において画期をなすものであることを明確に示している。

KEKBとPEP-IIは1999年6月から物理実験を開始し(KEKBにおける実験はBELLE、PEP-IIの実験はBaBarという名前を持つ)、2001年の7月、

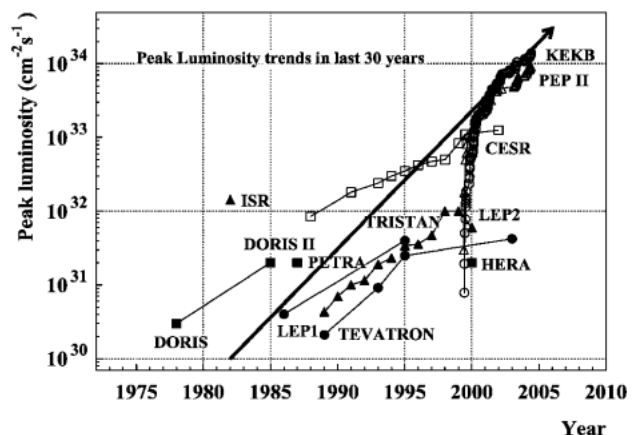


図1 この30年間における衝突型加速器のルミノシティの変遷。KEKBがルミノシティにおいて一気に10倍を超える飛躍を成し遂げたことを示している。

* 高エネルギー加速器研究機構 KEK
(E-mail: shin-ichi.kurokawa@kek.jp)

BELLE²⁾も BaBar³⁾の双方とも、B 中間子において CP が破れているという実験結果を、Physical Review Letters に同時に発表した。1964 年に K 中間子における CP の破れが見つかったから 37 年にして、始めて K 中間子以外で、CP の破れが見つかったことになる。この発見は、SuperKAMIOKANDE による、ニュートリノ振動の発見と並ぶ、日本の高エネルギー物理学における近年の大成果である。

1. TRISTAN から KEKB へ

戦後欧米に遅れて出発することを余儀なくされた日本の高エネルギー物理学と加速器科学にとって、トリスタン (TRISTAN) は画期的なマシンであった。1986 年の TRISTAN の完成から、CERN の LEP と SLAC の SLC が 1989 年に運転を開始するまでの間、TRISTAN は世界最高のエネルギーを持つ電子陽電子衝突型加速器であり続けた。他の研究所と比べて決して大きくない敷地をぎりぎりいっぱいまで使い、さらにエネルギーを高めるために、大規模な超伝導加速空洞システムを世界で初めて実用化したこと⁴⁾により、世界一のエネルギーを達成することが可能となった。TRISTAN の完成により、日本は、米国、ヨーロッパとともに、高エネルギー物理学と加速器科学の分野における世界の 3 極のひとつになったといえる。注 5 に、TRISTAN 建設の直前における日本の加速器に対する世界の認識がどのようなものであったかを示すエピソードを紹介しておく⁵⁾。

TRISTAN において、超伝導技術は、超伝導空洞に加え、3 つの実験 (VENUS, TOPAZ, AMY) の大型超伝導ソレノイド電磁石と、4 衝突点においてビームを極限まで絞るための超伝導 4 極最終収束電磁石⁶⁾にも用いられた。これらの超伝導機器はいずれも設計どおりの性能を示し、TRISTAN の成功に貢献した。TRISTAN は、世界の超伝導技術の進展にとって画期となる加速器であるといえる。超伝導空洞分野においては、その後の LEP-II や CEBAF における大規模超伝導加速空洞システムのさきがけとなり、超伝導電磁石分野でも、例えば TOPAZ のソレノイド製造に用いられた超伝導コイル巻線技術⁷⁾が、BNL におけるミュオン粒子 g-2 精密測定実験用蓄積リングの超伝導コイル製作⁸⁾にいかされ、g-2 実験の測定精度の大幅な向上に貢献することになった⁹⁾。

TRISTAN の建設を始める時点では、トップ・クォークは、TRISTAN で達成できるエネルギー領域で見つかるだろうと思われていた。1973 年に小林と益川は、クォークが 6 種あれば、CP 不変性の破れが

自然に説明できるという、小林益川理論を提出した¹⁰⁾。トップ・クォークは、第 6 番目のクォークであり、これを発見することは、小林益川の予言の正しさを示す最も有効な方法である。実際は、トップ・クォークの質量は約 170 GeV というとても重く重いものであったため、TRISTAN では創り出すことができず、1994 年の TEVATRON での発見を待たなければならなかった¹¹⁾。

そこで、日本の高エネルギー物理学者は、小林と益川が予言した、CP の破れの探求に方向を転換することになり、B ファクトリーの検討を開始することになる。現在の KEKB 加速器は TRISTAN 加速器のトンネル中に設置されている。しかし、この形にいたるまでには、いくつかの設計案の歴史があり、その源は 1980 年代の半ばに遡る。まず、TRISTAN 入射蓄積リング AR を B ファクトリーに改造しようという案が検討され、提案書¹²⁾が作られた。そして、この提案の可能性を検証すべく、AR の電子陽電子衝突型化に向けてのスタディが行なわれた。このスタディの結果は複数の論文にまとめられ、Proceedings of the 14th International Conference on High Energy Accelerators¹³⁾に掲載されている。結局のところ、この提案は採択されることはなかったが、B ファクトリーへの踏み石の役割を果たした功績を忘れてはならない。ちょうどその頃、前述の Oddone による非対称エネルギー衝突型加速器の提案がなされ、KEK を含むいくつかの研究所で検討が始まった。

非対称エネルギー衝突型加速器を作ろうとするときには、既存の周長の長いトンネルの中にエネルギーの高い方の加速器 (リング) を入れ、周長の短いトンネルを新たに建設して、低いエネルギーのリングを収納し、2 つのリングの交差するところで衝突を行うようにするのが自然であり、また、コストが小さいと考えられた。初期の KEK における非対称エネルギー型 B ファクトリーのデザインも例外ではなかった。しかし、リングの大きさが非常に異なる衝突型加速器をつくりビームを衝突させるときに、ある種のインスタビリティが問題となることがやがて理論的に発見された¹⁴⁾。このため、異なる大きさのリングを用いる案は採用できなくなり、同じトンネル内に周長が等しい 2 リングを設置しようということになった。この考えに基づく KEK の B ファクトリーの設計は、レーストラック型のリングを周長 1.5 km の新たに作ったトンネル中に設置しようというものであり、KEK Report 90-24 にまとめられている¹⁵⁾。その後、1990 年代に入ってから、既存の TRISTAN トンネル中に、2

つのリングを収納する現在の KEKB の案に設計が収束することになった。

TRISTAN は Three Ring Intersecting Storage Accelerators in Nippon の略称であり、もともとは、トンネルの中に、陽子、電子、陽電子を蓄積する 3 つのリングを納める計画として出発した。そのため、トンネルは 3 つのリングを十分に収容できる大きな断面積を持ち、複雑な衝突方式に対応でき、また、多数の加速空洞を設置できるように、200 m におよぶ 4 つの直線部をもっている。エネルギーの異なる電子と陽電子の 2 リングからなり、複雑なビーム衝突領域を必要とする B ファクトリーにとって、これは最適の条件となった。KEKB においては、後述するように、TRISTAN で培われた超伝導技術を多用している。まさに、高エネルギー加速器研究機構の B ファクトリー KEKB は、TRISTAN の基礎の上に造られた、TRISTAN の直系の子供である。

もし、TRISTAN における超伝導技術を始めとする各種の技術の集積と、TRISTAN という巨大加速器を建設し、安定に運転する経験がなければ、そして、先達が用意した、最適なトンネルがなければ、KEK の B ファクトリーは実現されることのない夢物語に終わったであろう。

2. B ファクトリー加速器の概要

TRISTAN によって、世界最高エネルギーでの電子陽電子衝突を実現した日本の高エネルギー物理学研究者は、TRISTAN の資産と TRISTAN で培われた技術を最大限に利用することにより、世界で最も高いルミノシティを持つ電子陽電子衝突型加速器、B ファクトリー KEKB、を 5 年計画で建設する作業に 1994 年からとりかかった^{16,17)}。なお、文献 17 は、KEKB 加速器に関する Nuclear Instruments and Methods 誌の特集号であり、KEKB 加速器の詳細については、この論文集を参照してほしい。

TRISTAN は等しいエネルギーの電子と陽電子の衝突をおこなわせる対称エネルギーの 1 リング型衝突型加速器であるが、これに対し、KEKB は、電子と陽電子のエネルギーが異なる非対称エネルギー、2 リング型の衝突型加速器であることを特徴とする。前節でも紹介したように、TRISTAN の基本思想は、我が国のように土地が狭いところでは、断面が広い、しっかりしたトンネルを一つ造り、そこに貯蔵型加速器を何台か設置し、陽子・陽子、陽子・反陽子、電子・陽子、電子・陽電子などの多様な衝突ビーム実験ができるようにするということであった。この基本思

想は、TRISTAN の子供である 2 リング型衝突型加速器 KEKB において、大きく花開くことになった。

B ファクトリーのような非対称エネルギー型の衝突型加速器では、電子と陽電子は異なったリング中に蓄積されなければならない、2 リングが必要となる。2 リング型の衝突型加速器には、異なったエネルギーの粒子同士をぶつけることができる以外にも大きな利点がある。電子陽電子衝突型加速器のリング中を周回しているものは、バンチとよばれる電子または陽電子が数 100 億個程度集まったかたまりである。1 リング型の加速器においては、電子および陽電子がリング中にそれぞれ N 個のバンチとして周回していれば、リング中の $2N$ 箇所でバンチの衝突がおこることになる。TRISTAN では電子および陽電子のバンチがそれぞれ 2 個ずつ蓄積されており、4 箇所で衝突が起こった。衝突型加速器の性能を大幅に向上させるためには、蓄積されているバンチの数を大きくしなければならない。しかしながら、例えば各ビームあたりに 5000 個のバンチを蓄積するならば、1 リング型であれば、10000 個所でビーム衝突が起こってしまう。バンチが衝突すると、片方のバンチ中の粒子は他のバンチから電気的な力を受け軌道が乱される。乱れが大ききときには、粒子はもはやリング中を回りつづけることができなくなり、失われてしまう。この乱れはリングの中の衝突箇所に比例するから、1 リング型のときは、リング中に蓄積できるバンチ数は、数個から数十個以下にせざるを得ない。これに対し 2 リング型の加速器では、衝突点を 1 つとすることができるため、KEKB のように理論的には最大 5000 にのぼる多数のバンチの蓄積が可能となる。

KEKB においては、既存の周長 3 km の TRISTAN ・トンネルの中に電子を蓄積する 8 GeV のリングと陽電子を蓄積する 3.5 GeV のリングの 2 つのリングを左右に並べて設置する。電子と陽電子はそれぞれのリングの中を反対方向に周回する。2 つのリングは 2 ヶ所で交差するが、そのうちの 1 ヶ所、すなわち衝突点で、電子と陽電子が衝突することになる。他の交差点では、リングは上下にすれ違い衝突を起こすことはない。衝突点を囲んで BELLE 測定器が設置されている。図 2 に KEKB のレイアウトを、図 3 にトンネル内に左右に設置されたリングを示す。8 GeV と 3.5 GeV というエネルギーは $\Upsilon(4s)$ 共鳴 (イプシロン 4 エスとよぶ) に対応し、B 中間子の一対をちょうどつくりだすエネルギーである。

それでは、何故、非対称エネルギーで電子と陽電子を衝突させる必要があるのだろうか。次節でこのことを

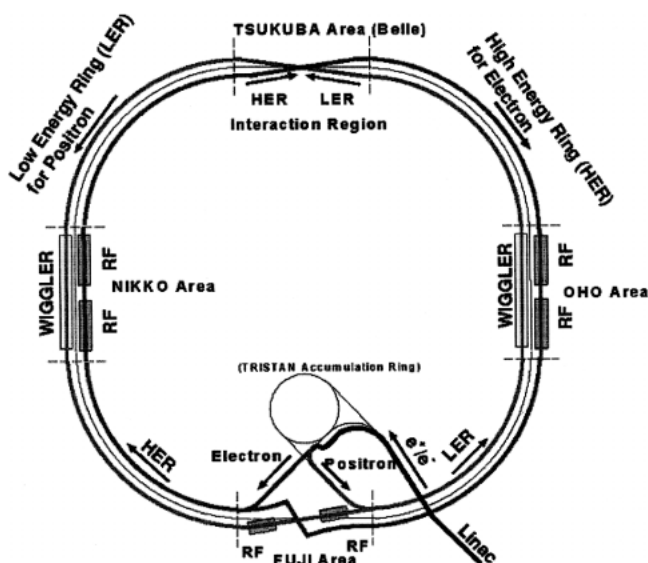


図2 KEKB 加速器のリング配置の概念図。既存の周長 3 km の TRISTAN・トンネルの中に電子を蓄積する 8 GeV のリングと陽電子を蓄積する 3.5 GeV のリングの 2 つのリングを並べて設置される。電子と陽電子は上流の線形加速器から入射され、それぞれのリングの中を反対方向に周回する。2 つのリングは 2 ヶ所で交差するが、そのうちの 1 ヶ所、すなわち衝突点で、電子と陽電子が衝突することになる。他の交差点では、リングは上下にすれ違い衝突を起こすことはない。図中で、 e^+ は陽電子を、 e^- は電子を、また、HER は、電子リング、LER は陽電子リングを意味する。RF と書かれた場所に高周波空洞が設置される。トンネルの半周では、電子リングが外側に設置され、残りの半周では、陽電子リングが外側に設置される。

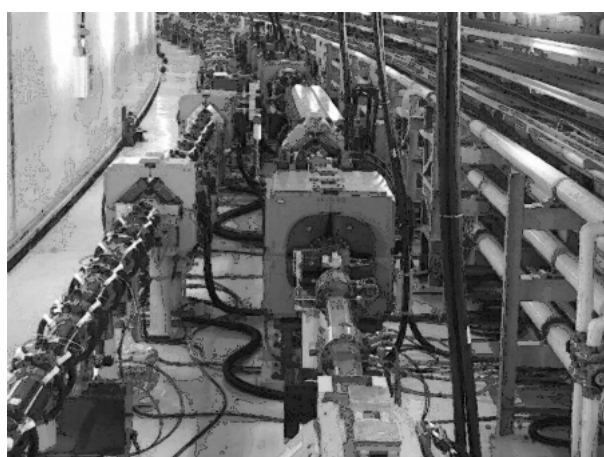


図3 トンネル中に左右に並べて設置された電子リングと陽電子リング。

説明しよう。

3. CP 不変性の破れと非対称エネルギー B ファクトリー

現在私たちが住んでいるこの宇宙は粒子だけからできており、反粒子は存在しない。宇宙が生まれたビッグバン直後には、等しい数の粒子と反粒子が存在したはずなのに、いつのまにか反粒子が消えてしまった。物理学者は、粒子と反粒子間の振る舞いの微妙な違い (CP 不変性の破れ) が、このような粒子と反粒子の間の偏りをもたらしたと考えている。CP 不変性の破れを調べることにより、宇宙はなぜ粒子だけでできているのか、ひいては、物質からできている私たち自身が何故存在するのかという根本的な謎を解くことができる。

CP 不変性の破れは、1964 年に中性 K 中間子において実験的に見つけられているが¹⁸⁾、高エネルギー物理学者の懸命の探求にかかわらず、20 世紀の間は、中性 K 中間子以外のところでは発見されてなかった。1980 年代の後半から、CP 不変性の破れを調べる最も有望な舞台は第 5 番目のクォークであるボトム・クォークを構成要素とする B 中間子であると考えられるようになった¹⁹⁾。電気的に中性な B 中間子には B^0 と、その反粒子である反 B^0 がある。 B^0 は反ボトムクォークとダウンクォークが結び付いてできた粒子で、反 B^0 はボトムと反ダウンが結び付いてできている。 B^0 中間子と反 B^0 中間子の対を大量にたかかも工場 (ファクトリー) のように造りだし、CP 不変性の破れの検出をはじめとする種々の素粒子物理学の研究を行うことを目的とする、電子陽電子衝突型の加速器が B ファクトリーである。

KEKB においては、8 GeV の電子と 3.5 GeV の陽電子を衝突させる。8 GeV の電子と 3.5 GeV の陽電子が正面衝突した状態を、電子の方向に進行する観測者から見ると、電子のエネルギーが小さくなり、陽電子のエネルギーが大きくなって見える。観測者の速度をうまく選んでやると、ついには、この衝突は、5.3 GeV と 5.3 GeV の電子と陽電子の正面衝突となる。このとき電子と陽電子は衝突して消滅し、10.6 GeV の質量を持つ $\Upsilon(4s)$ 共鳴状態を経て、 B^0 中間子と反 B^0 中間子の対が生成される。 B^0 中間子と反 B^0 中間子は、質量がちょうど 5.3 GeV であるため、ほとんど静止した状態で生まれてくる。元の 8 GeV の電子と 3.5 GeV の陽電子が衝突する系に戻って考えると、生成した B 中間子対は、電子の進行方向に飛び出すことになる。(8 + 3.5 = 11.5, 5.3 + 5.3 = 10.6,

11.5 > 10.6 である。11.5 GeV と 10.6 GeV の間のエネルギー差 0.9 GeV が B⁰ と反 B⁰ の運動エネルギーとなる) B⁰ と反 B⁰ は 100 から 200 ミクロンほど飛んだところで崩壊し、いくつかの粒子に変化する。崩壊は確率的に起こるため、一般には、B⁰ と反 B⁰ は異なった場所で崩壊し、崩壊により生成した粒子を測定器により検出すれば、どちらが B⁰ でどちらが反 B⁰ であるかを定めることができる。既に述べたように、CP 不変性の破れとは、粒子と反粒子の間の微妙な振る舞いの違いであるから、CP 不変性を調べるためには、どちらが B⁰ でどちらが反 B⁰ かを特定することが本質的に必要であることが分かるであろう。1 リング型の衝突型加速器では、5.3 GeV の電子と陽電子を衝突させざるを得ず、このような芸当はできない。

4. B ファクトリーに要求される性能

KEKB の特徴は、目標とするルミノシティが 10³⁴ cm⁻²s⁻¹ と非常に大きいことにある (ルミノシティの定義と単位については付録を参照のこと)。これは TRISTAN の最高ルミノシティであった 4 × 10³¹ cm⁻²s⁻¹ の 250 倍にあたり、B ファクトリーができる前の世界最高のルミノシティ 8 × 10³² cm⁻²s⁻¹ を達成している米国コーネル大学の CESR (シーザという) の 10 倍以上である。衝突型加速器において、ルミノシティ L は、次の式によって表される。

$$L = 2.2 \times 10^{34} \xi(1+r)EI/\beta_y^*$$

ここで、 L の単位は cm⁻²s⁻¹ であり、 E はビームのエネルギーを GeV を単位として、 I は蓄積電流をアンペアーを単位として表したものである。また、 ξ はビーム・ビーム・チューンシフトという、衝突時に働くビームビーム力の強さを表す量であり、通常 1 衝突あたり 0.03-0.05 という大きさを持つ。 r は衝突点における垂直方向のビームサイズを水平方向のビームサイズで割った値であり、通常の電子リングにおいては、ビームは非常に扁平であり、 r の値は 0.01-0.03 と小さく無視してよい。 β_y^* は衝突点で垂直方向 (y 方向) にどれだけビームを絞るかをあらわすパラメータであり、cm を単位とする。衝突点におけるビームサイズは、 β_y^* の平方根に比例する。結局、ルミノシティを大きくするためには、 ξ と蓄積電流を大きくし、 β_y^* を小さくすればよいことになる。KEKB の設計においては、 ξ として 0.052 という比較的大きな値を仮定し、かつ β_y^* を 1 cm まで小さく (TRISTAN では 4 cm) するが、それでも必要な電流は最終的なルミノシティ 10³⁴ cm⁻²s⁻¹ に対して、電子リングに

おいては 1.1 A、陽電子リングでは 2.6 A となる (TRISTAN の蓄積電流は電子と陽電子をあわせて 20 mA であった)。また、ルミノシティは、両リングに共通した物理量であることから、上の式から明らかのように、蓄積電流とエネルギーの積は両リングで等しくなければならない。このため、エネルギーの低い陽電子リングにより大きな電流を蓄積しなければならないことになる。1 つのバンチが担うことができる電流はせいぜい数 mA であり、このような大きな電流は非常に多くのバンチに分散させなければならない。先に述べたように、KEKB においては、各リングに最大 5000 個のバンチを蓄積することになる。表 1 に KEKB の設計性能と現時点までに達成した最高性能を比較している。

表 1 KEKB の設計値と達成値

Achieved	LER		HER		Design
	LER	HER	LER	HER	
Current	1.58	1.19	2.6	1.1	A
Number of bunches	1289		5000		
Bunch current	1.2	0.92	0.52	0.22	mA
Bunch spacing	1.8-2.4		0.6		m
Emittance ϵ_x	18	24	18	18	nm
β_x^*	59	56	33	33	cm
β_y^*	0.52	0.65	1.0	1.0	cm
Horizontal beam size	103	116	77	77	um
Vertical beam size	2.1	2.1	1.9	1.9	um
Bunch length	8	6	4	4	mm
Beam-beam parameters ξ_x	0.107	0.075	0.039	0.039	
Beam-beam parameters ξ_y	0.070	0.057	0.052	0.052	
Beam lifetime	160	220	220	440	min
Peak luminosity	13.92		10		10 ³³ cm ⁻² s ⁻¹
Integrated luminosity/day	944		~600		L/pb
Integrated luminosity/ 7days	5.94				L/fb
Integrated luminosity/ 30 day	24.0				L/fb
Total Integrated luminosity	288/5 years		100/3 years		L/fb

5. 非線形性を打ち消した、大きなアクセプタンス

KEKB の設計にあたっては、衝突点のビームの絞り具合を表す量である β_y^* として、設計時においては野心的な値であった 1 cm を仮定した。このように強い絞りを衝突点で行うことにともない、大きな色収差 (クロマチシティ) が衝突点近傍に位置する最終収束用の電磁石から発生することになる。この巨大なクロマチシティを有効に補正し、十分大きなアクセプタンスを持ち、かつ、柔軟な調整能力を持つビーム光学系を設計することが、本質的である。KEKB においては、非入れ子型 6 極電磁石によるクロマチシティ補正方式、かつ 1 セルあたりのフェーズの進みが 2.5 π という独創的な光学系、衝突点が存在する直線部における局所クロマチシティ補正などの採用により、非線形性が弱い、大きなアクセプタンスと、柔

軟な調整能力を持つ光学系の設計に成功した。ちなみに、現在の β_y^* は、電子リングにおいては、6.5 mm まで、陽電子リングにおいては、5.2 mm まで小さくなっており、KEKB の光学系の優秀さの一端を知ることができる。

なお、ここで忘れてはならないことは、KEK の加速器研究施設が、この 20 年以上にわたって開発と改良を続けてきた、SAD とよばれる加速器設計用ソフトウェアの存在である。このような独自のソフトウェアがあって、始めて、上記のような独創的な光学系が実現されたといえる。

6. 結合バンチ不安定性とその克服

KEKB に代表される B ファクトリー加速器の難しさは、もっぱら蓄積電流とバンチ数が大きいことによる。高周波加速空洞をバンチが通過するとき、バンチは空洞中に電磁波を励起する。加速空洞中では励起された電磁波はなかなか減衰せず、次にやってくるバンチは先行するバンチによって励起された電磁波によってゆすられ、同時に自分自身も空洞中に電磁波を励起する。ある条件のもとでは、この連鎖が正のフィードバックとなり、バンチの振動が次第に成長し、ついにはビームが失われてしまう。この現象を結合バンチ不安定性という。結合バンチ不安定性における振動の成長速度は蓄積電流に比例するため、KEKB のような大電流蓄積リングでは、この不安定性が非常に深刻な問題となる。

高周波空洞中に励起される電磁波のうち最も周波数の小さいものを基本モードといい、それ以外を高次モードという。基本モードはビームを加速するために用いられる電磁波であり、加速モードともよばれる。

高次モードにもとづく結合バンチ不安定性を克服するためには、バンチが通過しても高次モードが励起されにくい特殊な高周波空洞を開発すればよい。KEKB においては、この目的のために超伝導単一セル単一モード空洞と常伝導の ARES 空洞が開発された。

通常の蓄積リングでは、高次モードのみが結合バンチ不安定性を引き起こすのであるが、KEKB のような大電流を蓄積する周長の長い加速器では、加速モードも結合バンチ不安定性の原因となる。加速モードに基づく結合バンチ不安定性は非常に強く、この不安定性を克服できるかどうか、KEKB の死命を制するといえる。

高次モードにもとづく結合バンチ不安定性のときは、ビームにより励起された高次モード電磁波を空洞から取り除いてやればよかったが、加速モードに基づ

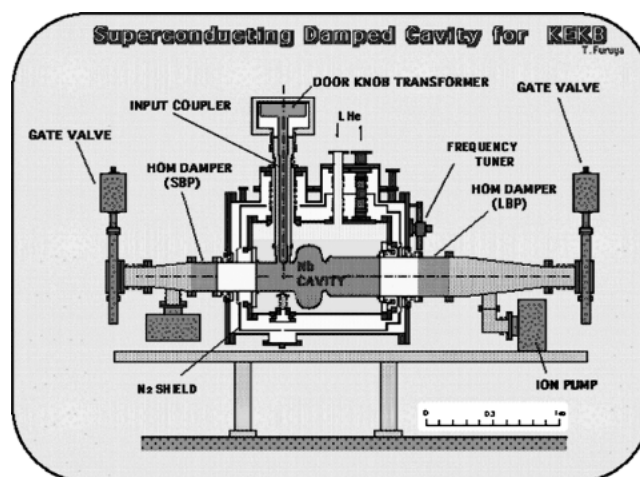


図 4 KEKB の超伝導空洞。超伝導空洞においては常伝導の空洞において加速電場の強さを制限する空洞内壁でのエネルギー損失が無視できるほど小さく、高い加速電場を得やすい。そこで、常伝導空洞では加速電場が小さくなるために採用できない、なめらかな空洞形状をとり、高次モードが励起されにくくすることができる。さらに、空洞に接続されるビームパイプの径を極限まで大きくすることにより、加速モードを除くすべての高次モード電磁波をビームパイプの方向の逃がすことができるようになる。このように加速モードだけが空洞中に保持されるような空洞を単一モード空洞という。高次モードはビームパイプの内壁に張り付けられたフェライトにより吸収され熱に変えられることになる。ニオブで作られた空洞は液体ヘリウムを溜めた槽の中におかれ、ヘリウム槽を囲んで断熱真空槽がある。入力結合器は高周波電磁波を空洞に導く。空洞の共振周波数はチューナーによって調整される。

く結合バンチ不安定性の場合は、加速モードがまさにビームの加速に使われるために、この方法をとることができないという本質的な困難がある。KEKB においては、加速モードによる結合バンチ不安定性を抑えるために、空洞の蓄積エネルギーを大きくする方法をとる。空洞の蓄積エネルギーがビームによって励起される加速モードのエネルギーに比べて十分に大きければ、ビームの影響は無視できるからである。蓄積エネルギーは空洞中の電場強度の 2 乗に比例するため、電場強度の大きい超伝導空洞を使うことによって、蓄積エネルギーを大きくすることができる。常伝導空洞を用いたときには、電場強度を大きくすることは難しく、その代わりに、空洞の有効体積を大きくして蓄積エネルギーの増加をはかることになる。ARES (ACCELERATOR RESONANTLY COUPLED WITH ENERGY STORAGE) とはこのような常伝導空洞の

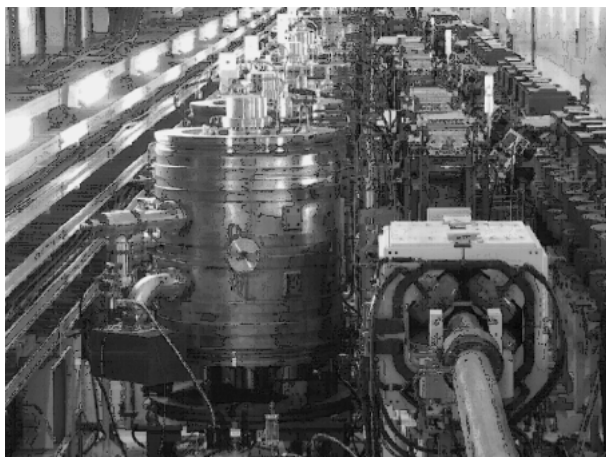


図5 トンネル内に設置された ARES 空洞。常伝導空洞である ARES では加速空洞を結合空洞を介して低損失のエネルギー貯蔵空洞に接続することにより、系の有効体積を大きくし、全蓄積エネルギーを増大させる。ARES も単一モード空洞でなければならず、加速セルに高次モードを取り出すための導波管が4本取り付けられている。取り出された高次モードは、導波管の終端にとりつけられた SiC (シリコンカーバイド) 吸収体により熱に変えられる。

ことである。ARES では、加速空洞を結合空洞を介して低損失のエネルギー貯蔵空洞に接続することにより、系の有効体積を大きくし、全蓄積エネルギーを増大させる。高次モードを減衰させるためには、ARES も単一モード空洞でなければならず、加速セルに高次モードを取り出すための導波管が4本取り付けられている。取り出された高次モードは、導波管の終端にとりつけられた SiC (シリコンカーバイド) 吸収体により熱に変えられる。

TRISTAN では、世界に先駆けて大規模な超伝導空洞システムを実用化した。KEKB の超伝導空洞は、世界最高の蓄積電流 1.22 A を達成し、超伝導加速空洞の大電流応用において世界の最先端を走っている。図4に KEKB の超伝導空洞を、図5に ARES を示す。

7. 有限角度衝突

KEKB で、電子と陽電子のバンチは正面衝突ではなく、 $\pm 11 \text{ mrad}$ (約 ± 0.7 度) という有限の角度をもって衝突する。有限角度衝突の場合は衝突後電子と陽電子を分離するための偏向電磁石が不要となり、バンチ間隔は 0.6 m まで小さくすることができ、蓄積バンチ数を 5000 まで大きくできる。また、衝突点近傍にビーム分離用の偏向電磁石を置く必要がないため

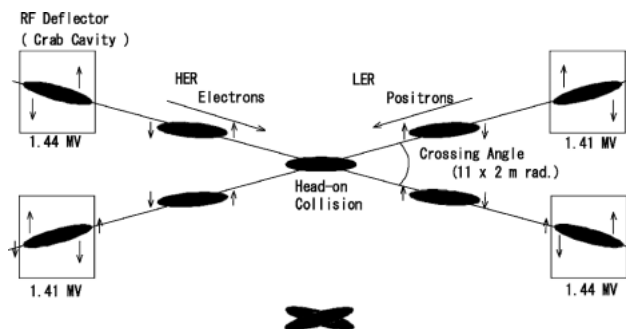


図6 クラブ衝突の概念図。各リング毎に、衝突点をはさんで一对の超伝導クラブ空洞が設置される。バンチは衝突前にクラブ空洞により水平方向に傾けられ、衝突点では、正面衝突する。衝突後もう一つのクラブ空洞により、元のバンチの傾きに戻る。

に、偏向電磁石から発生する放射光を気にしなくてよいことになり、衝突点付近を大幅に簡略化できることになる。

有限角度衝突においては、粒子のバンチ内の前後方向の位置 (バンチの前、中央、あるいは後部) によって相手のバンチから受ける電氣的な力が異なることになり、シンクロベータトロン共鳴が励起されることになる。

計算機シミュレーションによれば、この程度の有限角度衝突によるルミノシティの減少は起こらないはずであるが、ビーム衝突は非常に複雑な現象であり、シミュレーションを信頼しきるわけにはいかない。有限角度衝突でありながら、バンチ同士を正面衝突させることができれば、有限角度衝突の利点を保持しながらビーム衝突に由来するシンクロベータトロン共鳴を回避することができる。これを実現するものがクラブ衝突方式である。

クラブ衝突方式²⁰⁾では、衝突点に向かう電子および陽電子のバンチはクラブ空洞とよばれる特殊な高周波空洞によってバンチの長手方向の軸が水平方向に傾けられ、衝突点では正面衝突をすることになる。衝突後もう一つのクラブ空洞を通過することにより、傾けられた軸はもとにもどされる。この衝突はあたかも蟹が横這いをしているようにみえるのでクラブ衝突とよばれる。図6にクラブ衝突の概念を示す。

クラブ衝突を実現するためには、クラブ空洞によって大きな横方向の蹴りをバンチに与えなければならず、非常に強い電場が必要となる。KEKB においては、超伝導クラブ空洞の開発が進行中であり、2006年には2台のクラブ空洞がリングに設置される予定である。

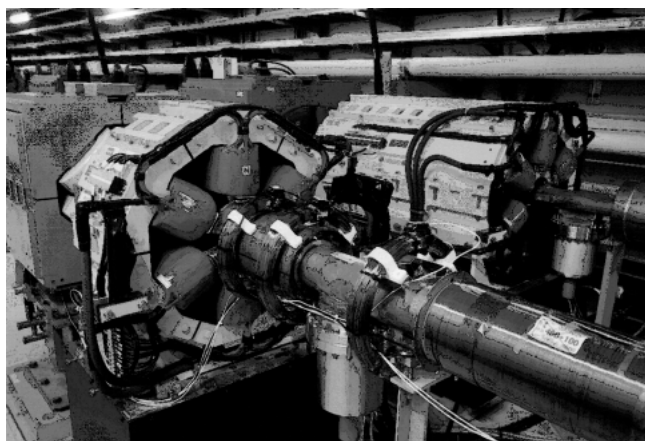


図7 陽電子リングの真空ダクトへ巻かれたソレノイド。陽電子リングの真空ダクトのほとんどにソレノイド巻き線を行うことにより、光電子不安定性によるビーム・サイズの増大を押さえ込むことに成功した。

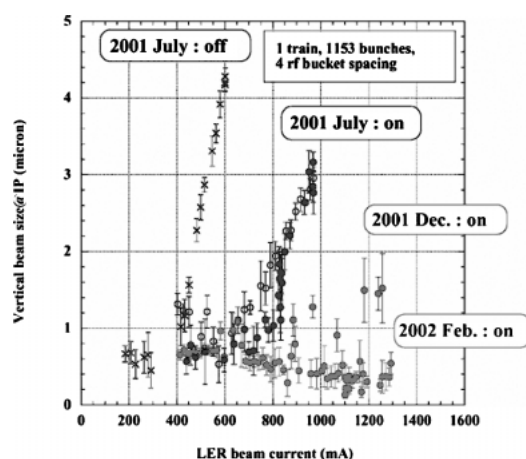


図8 2001年7月，2001年12月，および2002年2月における陽電子リングに蓄積された電流を横軸にとったときの，垂直方向のビームサイズの変化。2001年夏および2002年1月に行われたソレノイドの追加の効果が明確に見える。

8. 電子雲不安定性

KEKBの性能を制限する最大の要因は，陽電子リングにおける，電子雲不安定性とよばれるビーム不安定性である。陽電子リングに蓄積された陽電子は偏向電磁石によって曲げられるときに放射光を発生する。この放射光が真空ダクトの内壁をたたくことで発生した光電子は，陽電子ビームに引き寄せられ，ビームの周りに電子雲が形成される。蓄積電流が大きくなり，電子雲の濃度が高くなると，陽電子ビームがこの電子雲と相互作用することにより，垂直方向のビーム・サ

イズが増大してしまう。

発生した光電子を真空ダクト内壁付近に閉じこめ，電子雲不安定性を抑制するべく，陽電子リングの真空ダクトにソレノイドを800 mにわたって巻く作業が，2000年の夏休みに行われた。その後，シャットダウンの機会毎にソレノイドを追加する作業が行われてきており，現在では，可能な場所のほとんどすべてのところ（全長では2300 m）にソレノイドが巻かれている。

壁からでてきた光電子は，壁と平行するソレノイド磁場の磁力線に巻き付くため，壁から離れることができず，ビームのまわりに電子雲を形成することができない。この対策は，非常に有効であり，ビーム・サイズの増大を抑制することができた。この結果，KEKBのルミノシティは，対策開始前の2000年夏に比べて，2002年7月の段階で， $2 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ から $7 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ へ3.5倍に向上した。図7に陽電子リングにまかれたソレノイドの様子を，また，図8に，2001年7月，2001年12月，および2002年2月に行われた，陽電子リングに蓄積された電流にともなう垂直方向のビーム・サイズの変化を示す。ソレノイドの巻かれた長さが長くなるにともない，ビーム・サイズの増大が抑制されていく様子をはっきりと分かるであろう。

9. KEBKのコミッショニング

KEKBは，予定より早く1998年11月に建設を終了し，12月からコミッショニング（総合運転）が始まった。コミッショニング開始当初は，加速器単独で運転を行ったが，1999年5月1日にはBELLEが衝突点にロール・インされ，5月25日からは，BELLEをともなった運転が始まった。6月1日には，最初のハドロン事象の観測に成功した。

KEKBの性能は，1999年と2000年は，前節で述べた電子雲不安定性のため，性能向上に足踏みが見られたが，ソレノイド巻線によるこの不安定性の克服がされてからは，着実に向上し続けた²¹⁾。まず，2002年4月4日には，ついに，先行していたPEP-IIルミノシティを超える， $3.31 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ に達した。その後，前節で述べたソレノイドによるビーム・サイズ増大の抑制と，加速器の調整が進んだことにより，ついに2003年5月8日には設計ルミノシティである $1.0 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ を達成した²²⁾。現時点では，ピーク・ルミノシティは $1.39 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ まで増大し，BELLEに供給する1日あたりの積分ルミノシティも数回にわたって1/fbを超えた。積分ルミノシティ1/

fb とは、 10^{39} cm^{-2} のことであり、 $1.16 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ というルミノシティを一日の間連続で供給しつづけることに相当する²³⁾。また、2004年1月以降は、連続入射モードを実用化することにより、積分ルミノシティが著しく向上した。図9に、物理実験開始から2004年7月までのルミノシティと一日あたりの積分ルミノシティを示す。この図からKEKBは運転開始から順調に性能向上を続けていることがわかる。129ページに示した表1には2004年7月末の時点におけるKEKBの性能がまとめてある。KEKBは、名実ともに世界最高性能を持つ電子陽電子衝突型加速器である。

図10に、KEKB 加速器の責任者である生出勝宣による、KEKB の積分ルミノシティの増加のシナリオ

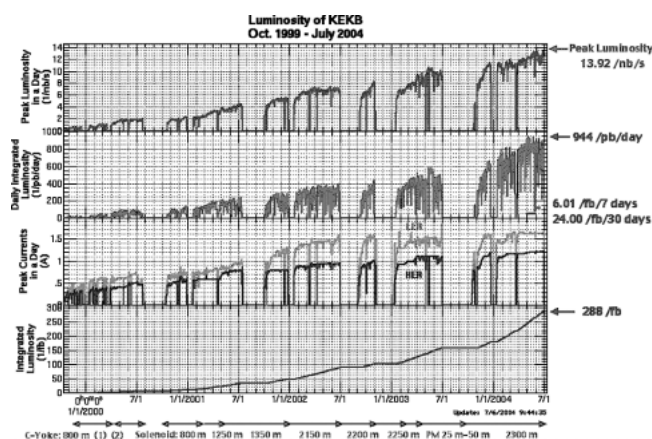


図9 1999年6月の実験開始から2004年7月までの、KEKBのピーク・ルミノシティ、一日あたりの積分ルミノシティ、HERとLERの蓄積電流、およびBELLEが集積した積分ルミノシティの変遷を示す。なお、最上段のピーク・ルミノシティの単位1/nb/sは $10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ に相当する。

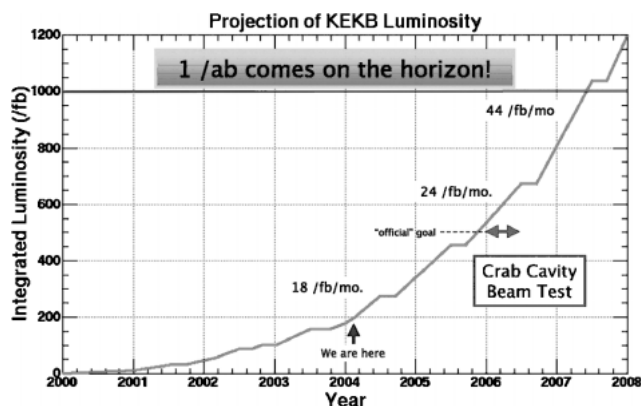


図10 生出勝宣による、KEKB 積分ルミノシティの増加シナリオ。

を示す。近い将来に、1000/fb という積分ルミノシティを得る蓋然性の高さが理解いただけると思う。

10. PEP-II との競争と B 中間子における CP 不変性の破れの発見

米国のサンフランシスコの郊外にある SLAC (スタンフォード線形加速器センター) に PEP-II とよばれる B ファクトリーがあり、2000年5月から BaBar とよばれる測定器による物理実験が始まっている²⁴⁾。

PEP-II も KEKB と同様な、非対称エネルギー 2 リング型電子陽電子衝突型加速器であり、9 GeV の電子と 3.1 GeV の陽電子を衝突させる。この加速器は、SLAC にかけて存在した PEP という 15 GeV の 1 リング型電子陽電子衝突型加速器のトンネル (周長 2.2 km) 中に PEP を改造して建設されたため、PEP-II とよばれている。表2に KEKB と PEP-II の比較を示す。

KEKB と PEP-II は、熾烈な競争を行っているまただなかにある。PEP-II は、1997年7月にまず、電子リングが完成し、1年後の1998年7月には、陽電子リングも完成した。これに対して、KEKB はようやく1998年11月に両リングが同時に完成をみた。このため、1999年と2000年は、加速器の性能では、PEP-II が先行し、KEKB がその後をほぼ半年の遅れで追うという状態であった。2001年になってからは、PEP-II の性能が足踏みを続けるなかで、KEKB の性能は急速に向上し、2001年4月にはピーク・ルミノシティにおいて、KEKB が PEP-II を抜くことになった。2002年10月には、積分ルミノシティにおいても、KEKB は PEP-II を追い抜いた。図11に KEKB と PEP-II のルミノシティの変遷を、図12に BELLE (KEKB) と BaBar (PEP-II) が蓄積した積分ルミノシティの変遷を示す。

2001年の7月、BELLE²⁾も BaBar³⁾の双方とも、B 中間子において CP が破れているという実験結果を、

表2 KEKB と PEP-II の比較

	KEKB	PEP-II
Institute	KEK	SLAC
Energy	3.5(e ⁻) x 8.0 (e ⁺) GeV	3.1(e ⁻) x 9.0 (e ⁺) GeV
Circumference	3.0 km	2.2 km
Tunnel	TRISTAN tunnel	PEP tunnel
Construction period	JFY1994-1998	USFY1994-1998
Experiment	BELLE	BaBar
Collision scheme	Finite angle (2 x 11 mr)	Head-on
Design luminosity	10 $10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	3 x $10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
Achieved luminosity	13.92 x $10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	9.22 x $10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
Logged luminosity	288/fb	245/fb

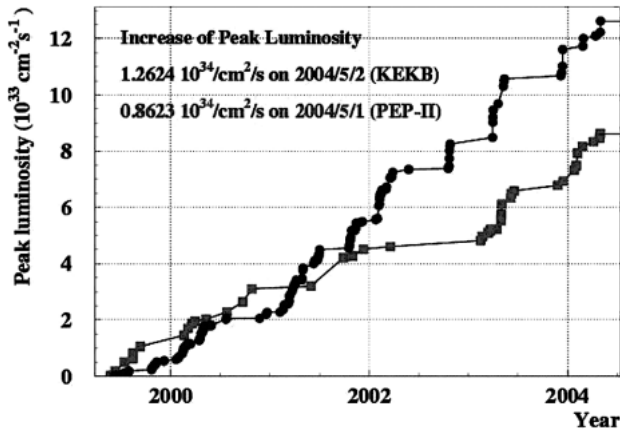


図11 実験開始以来の、KEKB と PEP-II のピーク・ルミノシティの変遷.

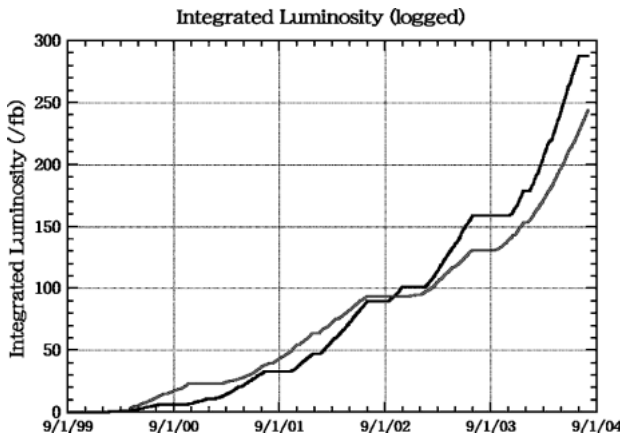


図12 実験開始以来の、KEKB の実験である BELLE と PEP-II の実験である BaBar が蓄積した積分ルミノシティ. 青は BELLE (KEKB) 赤は BaBar (PEP-II) を示す.

Physical Review Letters に発表した. 1964 年に K 中間子における CP の破れが見つかったから 37 年にして、始めて K 中間子以外で、CP の破れが見つかったことになる. CP の破れの大きさを表す量である A (CP) の値は、BELLE では、 $0.99 \pm 0.14 \pm 0.06$ 、また BaBar では、 $0.58 \pm 0.15 + - 0.05$ であり、前者では、99.999% 以上で、また後者でも、99.997% 以上の確率で、CP 対称性が破れていることになる. 小林益川の理論は、大きな CP 対称性の破れを予言しており、この観測結果を支持するものである²⁵⁾.

この発見は、電子の発見以来の過去 100 年にわたる素粒子物理学研究において、日本の加速器によってなされた最初の大発見である. トリスタンによって大きな飛躍を遂げた、日本の高エネルギー物理学と加速器科学は、KEKB と BELLE において、加速器科学

の先達である米国と堂々と太刀打ちできるまでに成長を遂げたといえる. KEKB の性能が順調に向上し、BELLE の積分ルミノシティがほぼ運転時間の 2 乗に比例して増加し、現時点までに 288/fb に達したことにより、BELLE は数多くの物理の結果を得ているがこの解説記事の範囲を超えるので、ここでは割愛する.

11. SuperKEKB

KEKB の性能を大幅に向上し、 $2.5 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ というルミノシティを目指す、SuperKEKB の検討が KEK において進んでおり、すでに Letter of Intent²⁶⁾ が、提出されている. このような高いルミノシティを達成するためには、第 4 節で説明したように、 ξ と蓄積電流を大きくし、 β_y^* を小さくしなければならない.

この間の計算機の進歩により、ビーム・ビーム効果の詳しいシミュレーションを行うことができるようになった. 最近のシミュレーションは、クラブ衝突を採用した有限角度衝突において、 ξ として 0.14 という値を達成できる可能性を示唆している. また、ビーム光学系を工夫することにより、 β_y^* を 3 mm まで小さくすることができるであろう. このとき、エネルギーの高い方のリングに 4.1 A、低い方のリングに 9.4 A を蓄積することにより、 $2.5 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ というルミノシティを達成できることになる. 電子と陽電子のどちらをエネルギーの高い方のリングに蓄積するかは、陽電子リングにおける電子雲不安定性と電子リングにおけるイオン不安定性のどちらがより深刻であるかによって決まることであり、決定までには今後の研究を待たなければならない.

β_y^* を 3 mm まで小さくするためには、パンチの長さも 3 mm まで短くしなければならない. 衝突点においてビームを絞ったときに、パンチの形状は、砂時計の形を持ち、もし、パンチの長さがは、 β_y^* の値より長くなれば、砂時計の端におけるビームサイズの増大が無視できず、ルミノシティの減少を引き起こすためである. パンチ長が短くなれば、必然的に強い高次モード電磁波が発生することになる. また、蓄積電流も増大するために、高次モード電磁波によるヒーティングと放電が深刻な問題となると考えられる. 現在、この問題に対処するべく精力的な R & D が行われており、いずれ解決策が見いだされるであろう.

SuperKEKB が実際に建設されるかどうかは、今後日本の高エネルギー物理学がどのような方向に進んでいくか、特にリニアコライダー計画の進展と深くかかわっているが、いずれにしても、今後数年のうちに結

論がでると考えられる。

参考文献および注

- 1) P. Oddone, Proceedings of the UCLA Workshop: Linear Collider and B Factory Conceptual Design, D. Stork, ed., World Scientific, p. 243 (1987).
- 2) K. Abe et al., Phys. Rev. Lett. 87, 091802 (2001).
- 3) B. Auber et al., Phys. Rev. Lett. 87, 091802 (2001).
- 4) Y. Kojima et al., “Superconducting RF Activities at KEK”, Proceedings of the 4th Workshop on RF Superconductivity, KEK Report 89-21, pp. 85-96.
- 5) TRISTAN が、建設を開始する直前に Scientific American 誌の 1980 年 1 月号に掲載された、フェルミ研究所所長の Robert Wilson の論文, “Particle Accelerators in the World” には,
 “The impression should not be given that the only interesting high-energy-physics laboratories are in the U.S. and Western Europe. In Japan a 12-GeV proton synchrotron, has been operating for several years and a 200-GeV synchrotron, TRISTAN, is planned.”
 と書かれている。あの Wilson にして、日本が加速器の分野で勃興しつつあることは理解していたが、TRISTAN を陽子シンクロトロンであると誤解していることがわかる。TRISTAN の建設開始以前の世界の加速器科学の分野における日本に関する認識の度合いを示す典型的な例であろう。ちなみにこの論文の日本語訳がのった日経サイエンスではこの部分は、
 「日本の KEK では 12 GeV 陽子シンクロトロンが数年来稼動しており、さらに TRISTAN と呼ぶ計画が検討されている。これは同一のトンネル内に 3 台のリングを併設するもので、主に高エネルギー電子陽電子衝突ビーム実験を目標としている。既設のシンクロトロンから入射された陽子は、新しいブースターによって 50 GeV まで加速された後、超伝導磁石からなる陽子貯蔵リングに転送され、350 GeV まで加速された上で貯蔵される。(サイエンス 1980 年 2 月号)」
 というように正しく直されている。
- 6) K. Tsuchiya, K. Egawa, K. Endo, Y. Morita and N. Ohuchi, “Performance of the Eight Superconducting Quadrupole Magnets for the TRISTAN Low-Beta Insertions”, IEEE Trans. Magn. MAG-27 (1991) 1940.
- 7) A. Yamamoto et al., J. Phys. C1 (1984) 1337.
- 8) G. T. Danby et al., “The Brookhaven muon storage ring magnet”, Nucl. Instr. and Meth. A457 (2001) 151.
- 9) H. N. Brown et al., g-2 collaboration, Phys. Rev. Lett. 86 (2001) 2227.
- 10) M. Kobayashi and T. Maskawa, Prog. Theor. Phys. 49 (1973) 652.
- 11) F. Abe et al., Phys. Rev. D50 (1994) 2966.
 F. Abe et al., Phys. Rev. Lett. 73 (1994) 225.
- 12) “Proposal for study of B physics by a detector with particle identification and high resolution calorimetry at TRISTAN Accumulation Ring”, (KEK Internal 88-1).
- 13) H. Koiso, Y. Funakoshi, T. Kawamoto, E. Kikutani, H. Nakayama, H. Ozaki, R. Sugahara and J. Urakawa., “Measurement of the Coherent Beam-beam Tune Shift in the TRISTAN Accumulation Ring”, Particle Accelerators 27 (1990) 83-88.
- 14) E. Kikutani, Y. Funakoshi, T. Kawamoto, H. Koiso, H. Nakayama, H. Ozaki, R. Sugahara and J. Urakawa, “Measurement of Luminosity in TRISTAN Accumulation Ring”, Particle Accelerators 31 (1990) 171-176.
- 15) J. Urakawa, Y. Funakoshi, T. Kawamoto, E. Kikutani, H. Koiso, H. Nakayama and H. Ozaki, “Performance of the Accumulation Ring e^+/e^- Collider with Beam Separation at North Interaction Region”, Particle Accelerators 31 (1990) 165.
- 16) K. Hirata, E. Keil, “Barycenter motion of beams due to beam-beam interaction in asymmetric ring colliders”, Nucl. Instr. Meth. A292 (1990) 156.
- 17) “Accelerator Design of the KEK B-Factory”, KEK Report 90-24, March 1991.
- 18) KEKB B-Factory Design Report, KEK Report 95-7, August 1995.
- 19) KEKB B-Factory, Nucl. Instr. Meth. A499, 2003.
- 20) J. H. Christenson, J. W. Cronin, V. L. Fitch and R. Turlay, Phys. Rev. Lett. 13 (1964) 138.
- 21) A. B. Carter and A. I. Sanda, Phys. Rev. D23, 1567 (1981).
 I. I. Bigi and A. I. Sanda, Nucl. Phys. B193 (1981) 85.
 クラブ衝突は R. B. Palmer によりリニアコライダーのために提唱され、KEK の生田と横谷が、リング型衝突型加速器への適用を提案した。
 R. B. Palmer, SLAC-PUB 4707 (1988).
 K. Oide and K. Yokoya, Phys. Rev. A40 (1989) 315.
- 22) Nature の Vol. 403, February 10, 2000 号に, “Stanford accelerator takes lead in race to quantify CP violation” という記事が掲載された。この記事によれば、KEKB は電子雲不安定性を克服できないために性能がでないだろうということであった。加速器の性能を向上させ、設計値に到達するためには、数年の地道な努力が必要である。本格的な運転開始から半年強しかたっていない時点で、早急な判断をしてはいけないことを示す典型的な例である。
- 23) CERN Courier Vol. 43 No. 6 記事 “KEKB Scales Peak Luminosity”, July 2003.
- 24) CERN Courier Vol. 44 No. 6 記事 “B-factory Improvements Deliver 1/fb a Day to BELLE”, July 2004.
- 25) PEP-II An Asymmetric B Factory, SLAC-418, June 1993.
- 26) その後 BELLE が蓄積した積分ルミノシティの増大にともない、A (CP) の測定精度は次第に向上し、2004 年 8 月に北京にて開かれた高エネルギー物理学国際会議における測定値は、 0.736 ± 0.049 である。この値は、小林益川理論の予言と非常に良く一致する。
- 27) Letter of Intent for KEK Super B factory, KEK Report 2004-4.

付録 ルミノシティと積分ルミノシティの単位について

ルミノシティとは、衝突型加速器の性能を表す物理量であり、通常記号 L で表される。ある現象の生成断面積を σ 、この現象の生成する頻度を N としたとき、ルミノシティ L は

$$N = L\sigma$$

によって定義される。生成断面積 σ の単位は cm^2 、 N の単位は s^{-1} であることから、ルミノシティの単位は $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ となる。

積分ルミノシティとは、ルミノシティの時間積分のことであり、衝突型加速器におけるデータ蓄積量に比例する量である。積分ルミノシティの単位は、 cm^{-2} であるが、これは生成断面積の単位のちょうど逆数に

なっていることから、生成断面積の単位 nb, pb, fb の逆数を用いて、 $1/\text{nb}$, $1/\text{pb}$, $1/\text{fb}$ と表されることが多い。ここで b とはバーンとよばれる量である、 10^{-24}cm^2 を意味する。nb, pb, fb はそれぞれ、 b (バーン) の 10^{-9} , 10^{-12} , 10^{-15} のことであり、それぞれ、 10^{-33}cm^2 , 10^{-36}cm^2 , 10^{-39}cm^2 となる。これから、 $1/\text{nb}$, $1/\text{pb}$, $1/\text{fb}$ は、 10^{33}cm^{-2} , 10^{36}cm^{-2} , 10^{39}cm^{-2} となる。

例えば、平均ルミノシティが $1 \times 10^{34} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ で1日連続して運転したときの積分ルミノシティは、 $1 \times 10^{34} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1} \times 86400 \text{s} = 8.64 \times 10^{38} \text{cm}^{-2}$ 、すなわち $0.864/\text{fb}$ となる。また、平均ルミノシティが $1 \times 10^{34} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ で 10^7 秒連続して運転したときは (ちなみに、1年間の秒数は、 3.15×10^7 秒であり、 10^7 秒はほぼ1/3年に相当する)、積分ルミノシティは 10^{41}cm^{-2} 、すなわち $100/\text{fb}$ となる。