

KEKBは、KEKに建設されたBファクトリー(B工場)加速器です。ここで行われたBelle実験は、ノーベル賞(2008年)の小林・益川理論を実験的に証明する等、多くの素晴らしい成果を挙げました。(関連記事：5頁)

SuperKEKBは、KEKBをアップグレードして約40倍高いルミノシティを目指す加速器です。

もっと
知りたい!

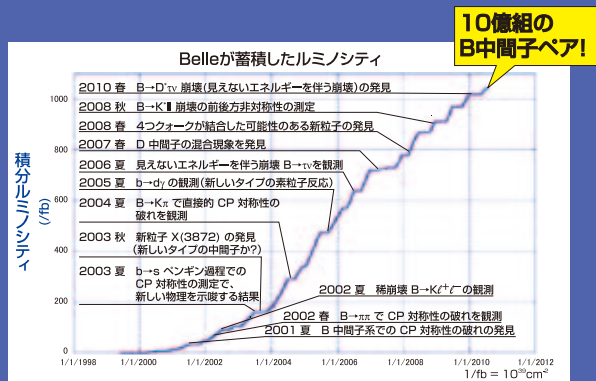
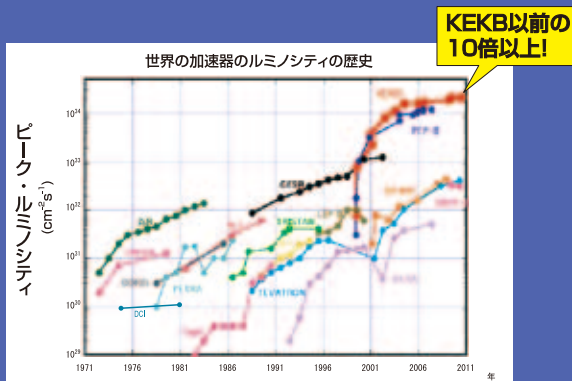
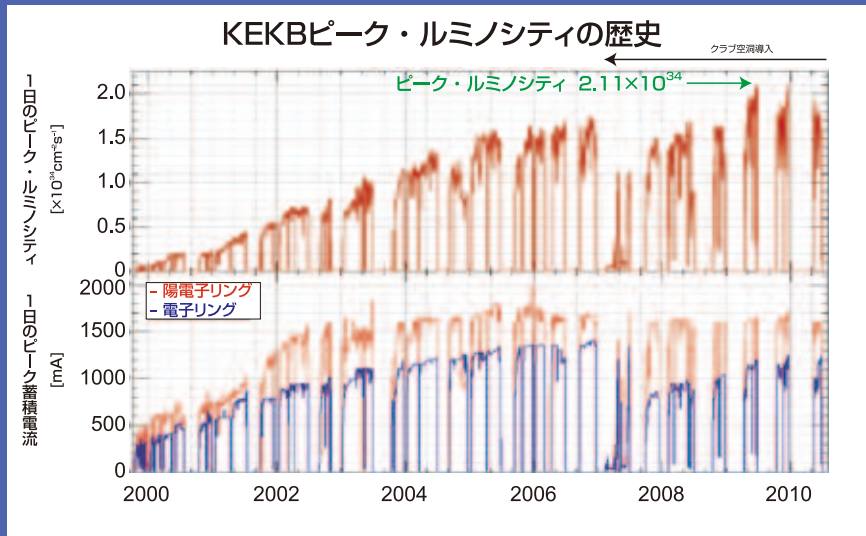
SuperKEKB加速器

目次

CONTENTS

KEKB 加速器の現在までの道のりと最新性能	1
SuperKEKB 加速器 ~飛躍的な性能向上を目指して	2
衝突型加速器って何だろう？	3
素粒子物理学の標準模型（スタンダードモデル）	4
Belle 実験で「B 中間子における CP 対称性の破れ」を測定	5
衝突型加速器の性能とは？ ルミノシティを高くするためには？	6
リングの中でビームはどう加速されているの？	7
これが SuperKEKB 加速器だ！	8
SuperKEKB 加速器のここが素晴らしい！	9
ナノ・ビーム・スキームとは？	10
ビーム衝突点用超伝導電磁石（QCS）とは	11
超伝導加速空洞	12
超伝導加速空洞用大型ヘリウム液化冷凍システム	13
ARES ^{アレス} 空洞	14
UHF 帯連続波クライストロン	16
ここがすばらしい！ SuperKEKB の真空システム	17
SuperKEKB リング電磁石	18
ビーム位置モニタ	19
ビームサイズモニター	20
バンチフィードバックシステム	21
電子陽電子線形加速器（入射ライナック）	22
高周波（RF）電子銃	23
陽電子生成装置	24
ダンピングリング	25
4リング同時入射	26
KEKB ビーム輸送システム	29
制御システム	31
チューン測定	32
加速器が感じる大地の動き	33

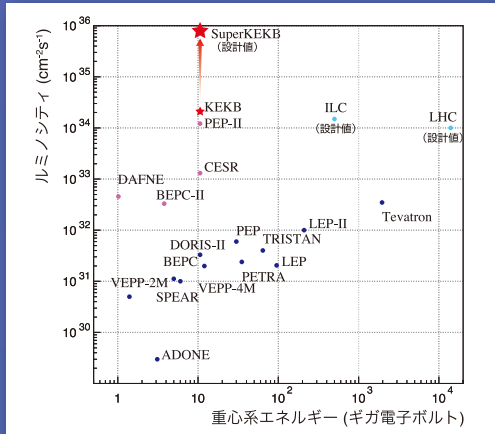
KEKB加速器の現在までの道のりと最新性能



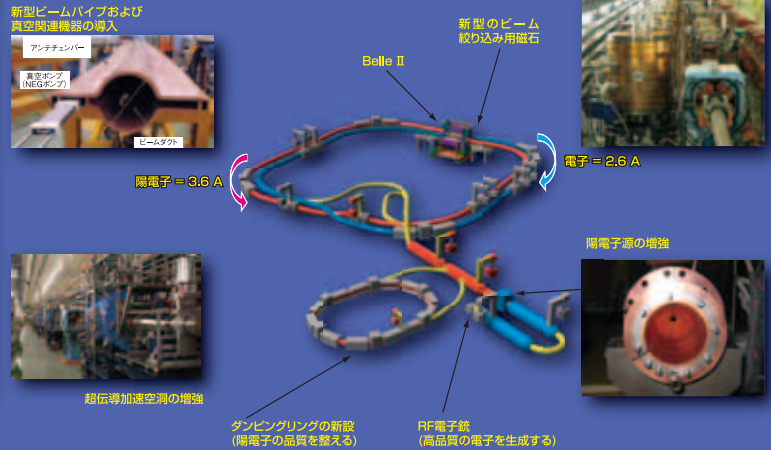
- 1989年 KEKB 加速器の設計作業に着手
- 1994年 建設開始
- 1995年 6月 KEKB デザインレポート完成
- 1997年 9月 入射リアックをKEKB用に改造完成、運転開始
- 1998年 12月 ビーム運転開始
- 1999年 6月 Belle 検出器で最初の素粒子反応観測
- 2001年 4月 当時の世界最高ルミノシティ ($3.4 \times 10^{33} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$) に到達
- 2002年 10月 積分ルミノシティ、100/fb に到達 (世界初)
- 2003年 5月 設計ルミノシティ $10^{34} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ を達成 (世界初)
- 2007年 2月 世界で初めてクラブ空洞を実用化
- 2009年 6月 ルミノシティは $2.11 \times 10^{34} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ を達成 (世界初) (設計値の2倍)
- 2009年 11月 積分ルミノシティ、1000/fb に到達 (世界初)
- 2010年 6月 30日 一旦運転を停止し高度化にむけての改造に着手

SuperKEKB加速器 ~ 飛躍的な性能向上を目指して

世界の加速器の最高ルミノシティ



KEKB加速器を大改造して、ルミノシティを約40倍に上げることを目指しています



SuperKEKBプロジェクトは、陽電子と電子を衝突させて生成されるB中間子等を含む反応実験を詳細に研究することにより、今まで観測されていなかった物理現象を発見することを目的としています。このような新物理現象は、衝突エネルギーが高いほど発見しやすいものですが、必ずしも全てそうではなくSuperKEKBプロジェクトでなければ見えないものもあります。このSuperKEKBプロジェクトで用いられる加速器が、SuperKEKB加速器です。SuperKEKBは、極めて多くのB中間子・反B中間子対を生成するBファクトリー(B工場)であり、しかもこれまでの生成効率を大きく凌駕するので、スーパーBファクトリーと呼ばれます。

SuperKEKBは、電子用と陽電子用の二つのリング型加速器と、リングに電子・陽電子を供給する直線型加速器(入射器)から成り立っています。地下11 mに掘られた一周約3 kmのトンネルの中には、二つのリングが並んで置かれ、それぞれのリングの中を電子ビーム(エネルギーが70億電子ボルト)と陽電子ビーム(40億電子ボルト)が光速に近いスピードで逆方向に周回します。二つのビームは、リングの一点でのみ衝突するように設計されており、衝突点に設置されるBelle II測定器が衝突によって起こる素粒子反応を捉えます。

衝突型加速器の性能は、ルミノシティと呼ばれる量で表されます。素粒子反応の起こる頻度(例えば、電子と陽電子を衝突させることによって生成されるB中間子・反B中間子対の数)は、このルミノシティに比例するので、稀にしか起きない現象を研究するには非常に高いルミノシティが要求されます。

SuperKEKBの前身であるKEKBは、世界最高のルミノシティを達成し、小林・益川理論(2008年ノーベル物理学賞)の検証に貢献しました。KEKBは、2001年以降ルミノシティの世界記録を更新し続けて、最終的には設計値の2倍(KEKBの設計を開始した1989年当時の衝突型加速器の最高記録の200倍)を越えるルミノシティを達成しました。KEKBは、2010年6月末にビーム運転を終了し、現在SuperKEKBへ向けての改造が進められています。

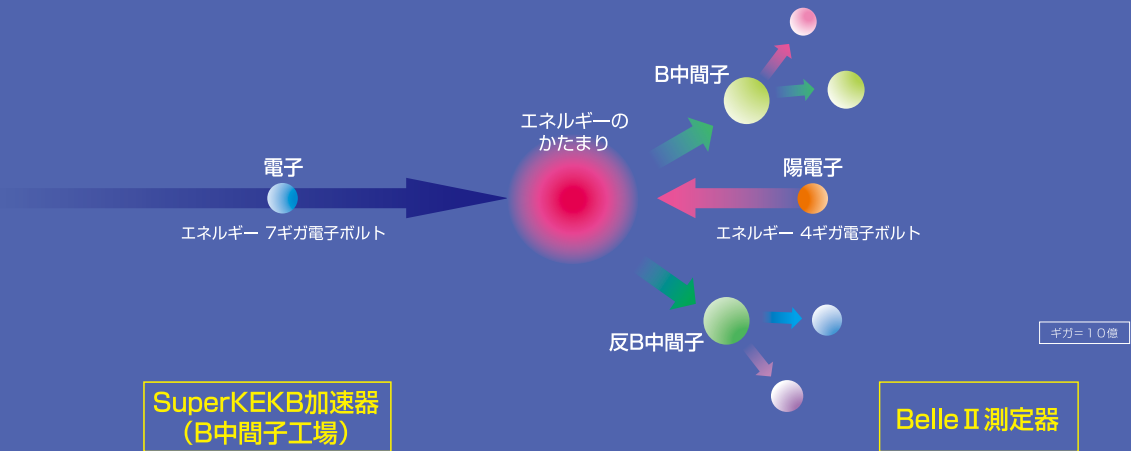
さて、ルミノシティを大幅に上げるには、次の三点：
(1) 衝突点でビームサイズを小さく絞る、(2) ビーム電流を増加し、多数のビーム粒子を衝突させる、(3) 衝突する陽電子ビームと電子ビームの相互作用の限界を高める、のどこかに大きな進歩がなければなりません。

KEKBでは、超伝導電磁石などを用いて衝突点でのビームサイズを横幅110ミクロン、高さ1ミクロン程度まで絞り込みました。これは、リング型加速器における世界最小のビームサイズです。また、大電流を安定に蓄積するために、超伝導加速空洞と、ARESと呼ばれる特殊な常伝導加速空洞を開発し、その実用化に成功しています。

SuperKEKBは、ビームサイズをさらに極小(幅約10ミクロン、高さ50~60ナノメートル)に絞ることでKEKBの20倍、ビーム電流を上げることによってさらに2倍、合わせてKEKBの40倍のルミノシティを目指しています。

衝突型加速器って何だろう？

電子や陽子など小さな粒子の集団を高いエネルギーに加速し何回も衝突させる巨大な装置



自然界に存在しない新しい粒子を大量につくる！

つくられた粒子を徹底的に調べる！

衝突型加速器(コライダー)とは

静止している標的(質量M)に加速した粒子(エネルギーE)を衝突させる固定標的実験では、重心系エネルギーは、

$$\sqrt{s} \approx \sqrt{2ME} \quad E \gg M$$

と表され、実質的な衝突エネルギーはあまり大きくなりません。それならば、加速した粒子同士(エネルギーE)を向かい合わせに衝突させると、どうでしょうか？重心系エネルギーは、

$$\sqrt{s} = 2E$$

となり、全てのエネルギーが衝突のエネルギーに使われるため、高い衝突エネルギーを得ることができます。これが衝突型加速器なのです。固定標的実験では、標的の中には膨大な数の粒子が存在するので、粒子同士が衝突する確率は圧倒的に高くなります。しかし、衝突型加速器では、加速できる粒子の数は固定標的よりも少なく、向かい合わせに衝突させる粒子は、自然界の法則に従って物理反応を起しますが、その確率は小さく、ほとんどが素通りしていきます。これが、衝突型加速器の弱点と言えます。

物理事象数(N)は、反応断面積(s)と衝突頻度(ルミノシティ、L)の積で表すことができます。

$$N = \sigma \times L$$

物理反理事象を増やすためには、衝突頻度(ルミノシティ)を増やすしか手だてがありません。そのためには、粒子を円型加速器の中で何度も周回させ、衝突する粒子の広がりなるべく小さくして衝突させます。また、加速する粒子の数を、できるだけ増やす努力もされます。

いろいろな衝突型加速器

世界には、いろいろな衝突型加速器があります。世界最初の衝突型加速器は、イタリアのINFN研究所に1962年に作られたADAと呼ばれる加速器です(右下：上)周長4mの非常に小さな加速器でした。スイスとフランスの両国にまたがるCERN研究所に建設され、稼働し始めているLHC加速器(右下：中)は、周長27kmもある巨大円型加速器です。米国、スタンフォード線形加速器センターで活躍したリニアコライダー(右下)は、約3kmの直線型加速器です。衝突頻度は低いのですが、加速粒子の放射光放出によるエネルギー損失が少ないので、高い衝突エネルギーを得やすくなります。



SuperKEKB 加速器

目標とする物理反応を得るための重心系エネルギーは約10ギガ電子ボルト。衝突頻度(ルミノシティ)の高さを追求した加速器です。これからSuperKEKB加速器をご紹介します。



素粒子物理学の標準模型 (スタンダードモデル)



素粒子の標準模型

我々の住むこの世界は一体何から出来ているのでしょうか？ 素粒子、すなわち物質を形作っている最も小さなもの、はどういうもので、どのような法則に従って存在しているのでしょうか？それを解き明かそうとする学問が、素粒子物理学です。

例えば、水は細かく見ると水の分子が集まったものですが、その水分子は酸素原子と水素原子が組み合わさってできています。同様に、世の中の物質は全て原子からできています。

しかし、その原子も素粒子ではなく、原子核のまわりを電子が回っている、というような構造をしていることがわかっています。原子核も陽子と中性子が組み合わさってできており、さらにこの陽子や中性子も、「クォーク」からできています。

現代の素粒子物理学では、万物を形作っている素粒子は、6種類の「クォーク」と、電子やニュートリノの仲間であるやはり6種類の「レプトン」であると考えられています。また、それぞれの素粒子には「反粒子」とよ

ばれる粒子が存在します。反粒子は、質量などの性質は全く同じでありながら反対の電荷を持つ粒子のことです。誕生した直後の宇宙には、粒子と反粒子が同じ数だけあったと考えられていますが、現在の宇宙には粒子ばかりが存在し、反粒子はほとんど観測されていません。

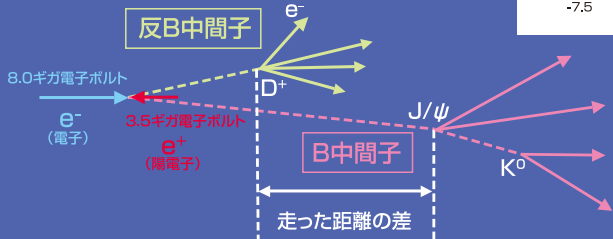
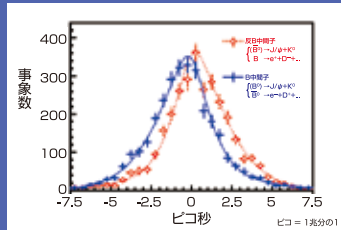
クォークは単体では存在することはできず、バリオン(重粒子)あるいはメソン(中間子)とよばれる状態で存在します。バリオンは3つのクォークが集まった状態で、陽子や中性子がこれに該当します。例えば、陽子は2つのu(アップ)クォークと1つのd(ダウン)クォークから、中性子は1つのuクォークと2つのdクォークから出来ています。これに対して、メソンは1つのクォークと1つの反クォークが組み合わさったもので、 π 中間子などがこれに該当します。

KEKB加速器やSuperKEKB加速器が生成するのは、b(ボトム)クォークを含むメソンであるBメソンです。これらの加速器は大量のBメソンを生成しますので、「Bファクトリー」(Bメソンを作る工場)とも呼ばれています。

Belle実験で「B中間子におけるCP対称性の破れ」を測定

1. B中間子と反B中間子が崩壊するまでの時間の違いを測定します。
2. 電子と陽電子の衝突後にできるB中間子と反B中間子を、走らせた状態で作り出し、走った距離の差から時間の差を求めます。
3. このため、電子と陽電子は異なるエネルギーで衝突させています。

実際にBelle測定器で観測されたB中間子と反B中間子の壊れ方の違い



崩壊までの時間差 = 走った距離の差 ÷ 粒子の速度

- 2008年のノーベル物理学賞は南部陽一郎氏、小林誠氏、益川敏英氏に与えられました。
- 小林・益川両氏は、クォークが6種類あれば「CP対称性の破れ」が説明できるという理論(小林・益川理論)を提唱しました。
- Belle実験はB中間子におけるCP対称性の破れを初めて観測し、小林・益川理論を実験的に証明しました。
- Belle II 実験ではB中間子のCP対称性の破れをさらに精密に測定することにより、宇宙誕生の謎に迫ります。

B中間子でのCP対称性の破れ

誕生直後の宇宙には粒子と反粒子が同じ数だけあったはずなのに、現在の宇宙にはどうして粒子ばかり存在するのか？ これは現代の物理学の大きな謎の一つで、この謎を解く鍵になるのが「CP対称性の破れ」です(CとPはそれぞれ電荷(Charge)とパリティ(Parity=空間反転)をあらわします)。「CP対称性の破れ」とは、一言で言えば、粒子と反粒子の性質に違いがあることを意味します。

かつては、粒子と反粒子は、(電荷が逆であることなどを除けば)全く同じ性質を持っていると思われていましたが、1960年代にK中間子の崩壊でCP対称性が破れていることが発見されました。1970年代になり、小林誠氏と益川敏英氏により「クォークが6種類存在すれば、クォークの遷移を通じてCP対称性の破れを説明できる」という小林益川理論が提唱されました。当時はクォークは3種類しか見つかっていなかったため、この理論は画期的なものでした。KEKB加速器を用いたBelle実験では、bクォークを含むB中間子を生成し、その崩壊で予想されるCP対称性の破れを測定し、小林益川理論の検証をすることが主な目的でした。

B中間子でのCP対称性の破れは、崩壊の時間分布という形で現れます。すなわち、B中間子がある特定の粒子へ崩壊する時間を調べると、B中間子と反B中間子で崩壊する時間が異なるのです。但し、B中間子は、電子と陽電子を衝突されて作り出してから崩壊するまでの時間が1ピコ秒(1兆分の1秒)と、とても短命(と

も、素粒子物理の世界では長生きな方なのですが)なので、崩壊までの時間を直接測ることはできません。

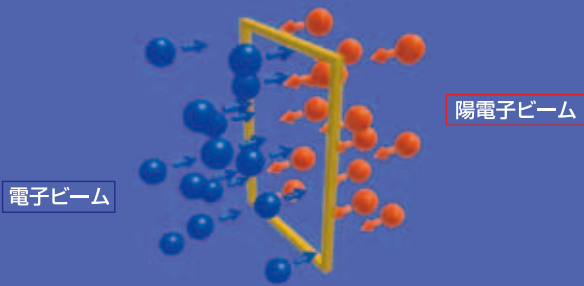
そこで、KEKB加速器では、異なるエネルギーの電子と陽電子を衝突させる、という工夫がしてあります(上図左)。こうすることにより、B中間子は高速で動きながら生成されるため、崩壊までに動いた距離から崩壊までの時間がわかります(実際には、Bと反Bは対で生成され、それぞれの崩壊点から、崩壊までの時間差がわかります)。

このような方法で、Belle実験は2001年にB中間子と反B中間子の間に「CP対称性の破れ」があることを発見しました。上図右は2006年のものですが、B中間子と反B中間子で崩壊までの時間に明らかな差があることがわかります。この発見により、小林益川理論によるCP対称性の破れの説明が正しいことが明らかになり、2008年の小林益川両氏のノーベル物理学賞の受賞へとつながりました。

しかし、これで宇宙誕生の謎が解けたわけではありません。小林益川理論で説明されるCP対称性の破れの機構は、宇宙から反粒子を消し去るには不十分なことがわかっています。SuperKEKB加速器を用いたBelleII実験では、B中間子のCP対称性の破れをさらに精密に測定し、小林益川理論とは別の「CP対称性の破れ」の機構があるかを検証し、反粒子が消えた理由に迫ろうとしています。

衝突型加速器の性能とは?

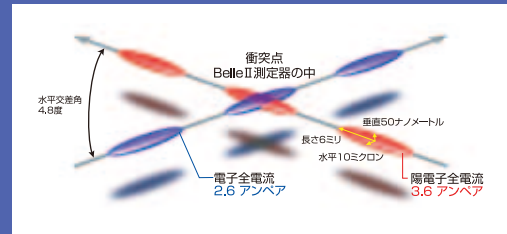
毎秒の反応数 = 反応の断面積 × ルミノシティ
1平方センチメートル当たり1秒間に粒子同士が「出会う」回数
それが、ルミノシティ



ルミノシティを高くすることがSuperKEKB加速器の使命!

ルミノシティを高くするためには?

できるだけ多くの電子、陽電子を
できるだけせまい場所で衝突させる



1かたまりに
650億個の電子

1かたまりに
900億個の陽電子

1かたまりは1秒間に10万回衝突する!
各リングに約2500個のかたまりが入っている

KEKBで生成されるB中間子の数は、ルミノシティ(L)に比例して増えるので、ルミノシティはSuperKEKBで最も重要な量です。Belle II実験が成功するかどうかは、SuperKEKBのルミノシティ次第と言ってもいいほどのです。ここでは、ルミノシティを上げるために、KEKBではどのような努力がなされたかをご紹介します。SuperKEKBでは、KEKB以上に苦勞が予想されます。

ルミノシティを決める量

ルミノシティ(L)は、電子と陽電子のビーム電流と衝突点でのビームサイズで決まります。ルミノシティを上げるためには、(1)ビーム電流を出来るだけ高くする、(2)衝突点でのビームの断面積(水平方向と垂直方向のビームサイズの積)を出来るだけ小さくする、の二つの方法しかありません。

$$L \propto \frac{I^+ I^-}{\sigma_x \sigma_y}$$

I^+, I^- : (陽)電子のビーム電流
 σ_x, σ_y : 衝突点でのビームサイズ

ビーム電流を高くするためには?

ビーム電流を制限する要因としては、(1)大電流ビームが真空チェンバー内に残す電磁場等によって真空機器が破壊される、(2)ビームにエネルギーを供給するRFパワー、(3)ビームが自分自身の作る電磁場の影響等で運動が不安定になる(ビーム不安定性)、等が挙げられます。KEKBのビーム電流は、壊れにくい真空機器を開発する、ビームにパワーを供給するRF空洞の数やパワーを徐々に増やす、ビーム不安定性を抑制するフィードバックシステムを開発し、調整する、などの非常な努力の成果で、少しずつ増えてきたものです。



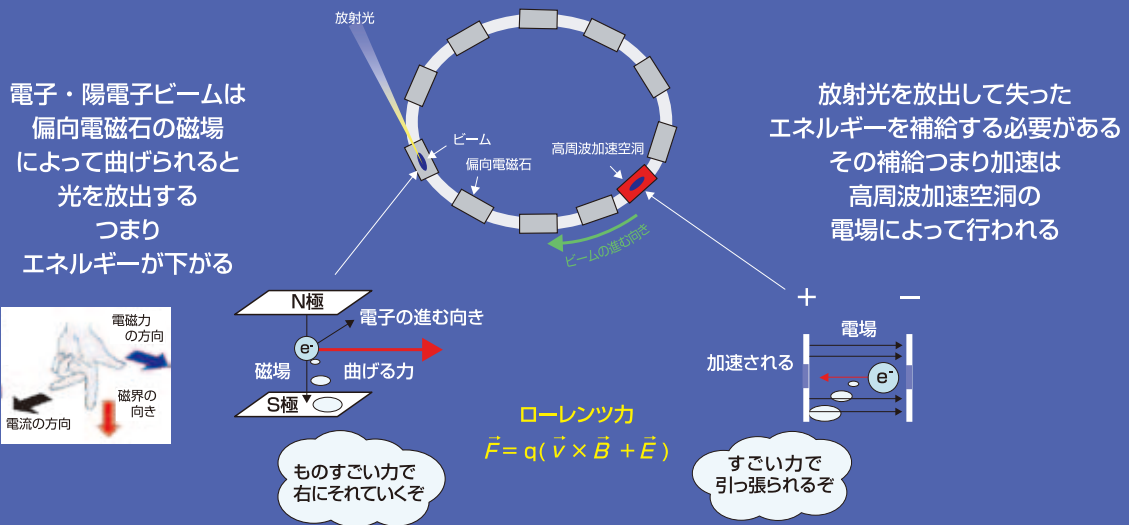
破壊された真空機器(ペローズ)

衝突点でのビームサイズを小さくするためには?

まず重要なことは、衝突点付近に強力な収束(四極)電磁石を配置する等して、衝突点で出来る限り小さくビームサイズを絞り込むことです。この目的で、KEKBでは超伝導四極電磁石を開発し、設置しました。次に重要なことは、せっかく絞り込んだビームサイズの増大を防ぐことです。ビームサイズを太らせてしまうプロセスでKEKBで重要なのは、(1)電子雲によるビームサイズ増大と(2)衝突する際に相手のビームの電磁場の影響(ビーム・ビーム効果)で生じるビームサイズ増大、の二つです。電子雲によるビームサイズ増大を防ぐためには、ソレノイドの設置が効果がありましたが、これについては「ソレノイド」の項を参照して下さい。次に、ビーム・ビーム効果の問題は、非常にデリケートな問題で、非常にわずかなビームの状態(ビームの軌道やビーム光学のパラメータ)の変化で、ビーム・ビーム効果の影響が変わってしまいます。KEKBのルミノシティ向上の歴史は、ビーム・ビーム効果の影響を少なくするようなマシンパラメータの探求の歴史でもあります。KEKBの日々の運転では24時間体制で、マシンのパラメータの調整にあたりましたが、その調整の大部分はこのビーム・ビーム効果の影響によるビームサイズ増大を避けるための調整でした。このように、KEKBの高いルミノシティを維持し、更に高いルミノシティを目指すために、日夜努力が積み重ねられたのです。

SuperKEKBでは、電子雲の問題に根本的にてこ入れするために、陽電子リングの真空チェンバーをアンテチェンバーに変える等の対策を講じます。また、ビーム・ビーム効果の問題も再び問題になることと思います。

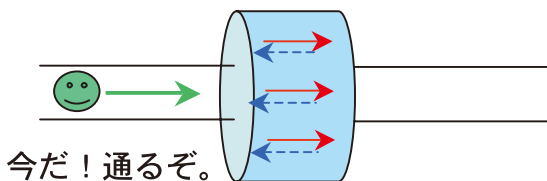
リングの中でビームはどう加速されているの？



高周波加速とは？

ビームを加速する装置は高周波加速システムです。大電力の高周波電磁場をクライストロンという電子管で作成し、加速空洞に蓄積します。SuperKEKBでは2種類の加速空洞(30台のARES型常伝導空洞と8台の超伝導空洞)を使用します。周波数は509MHz、すなわち+/-の極性が1秒間に約5億回交替します。ビームはリングの中を周回しながら、毎回ちょうど良いタイミングで加速空洞を通過して、そのつど加速を受けます。

加速空洞内の電場



蓄積リングでの加速

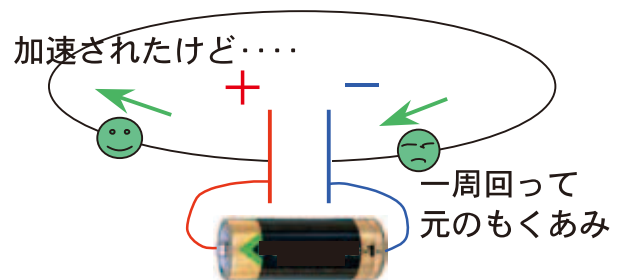
ビームは線形加速器で所定のエネルギーまで加速された後、リングに入射されます。ビームはリングを周回する間に放射光を発生したり、周囲のビームダクトとの相互作用で乱されたりして、エネルギーを失います。SuperKEKBのビーム電流は非常に高いので、失うエネルギーも膨大です。失われた量に等しいエネルギーが加速空洞から補充されて、ビームはリングを周回しつづけます。1台の加速空洞がビームに与えるパワーは約500キロワット、すなわち電子レンジ1000台分もの強力なパワーに相当します。

加速するとどこまでも速度が速くなる？

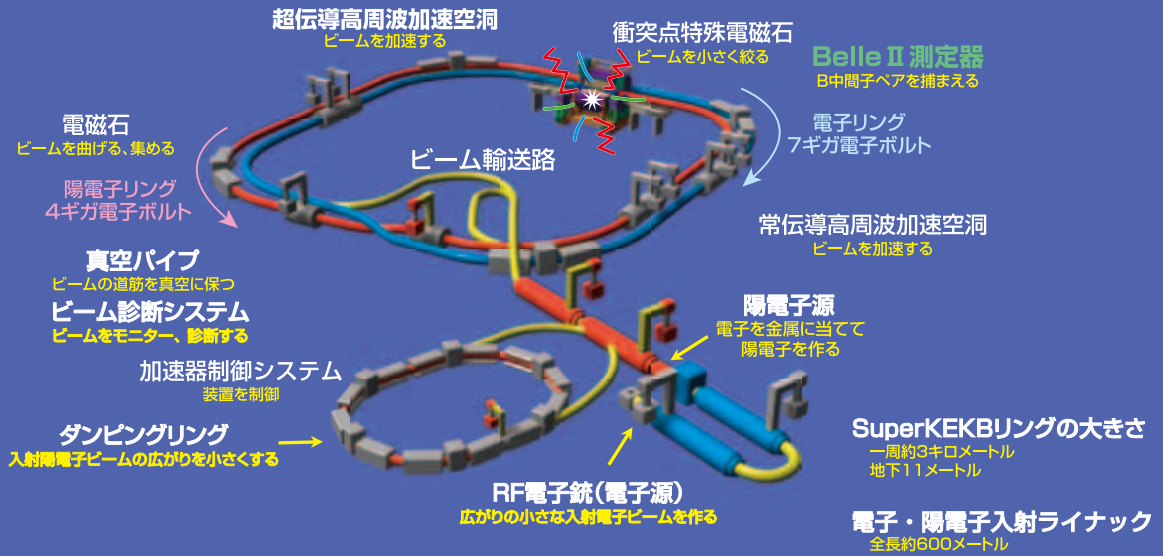
相対性理論によれば、どんな物質も光の速さより速く進むことはできません。電子や陽電子は質量が軽いので、少し加速するとすぐに光速近くまで達します。それ以降の加速においては、速度はほとんど変わりませんが、質量がどんどん重くなります(エネルギーが増加する)。この場合も「加速」ということばを使っています。

静電場でもよい？

2枚の電極の間に電池などで電圧をかけて、そこに電子を通せば、電極間の電場により電子は加速されます。ではその電極を何周も繰り返し通過するとどんどん加速されるでしょうか？ 答えはNOです。静電場(高周波とは異なり時間的に変化しない)では、1周回ると必ずもとの電位に戻るのエネルギー増加が積み重なりません。



これがSuperKEKB加速器だ!



SuperKEKB 加速器とは?

SuperKEKB 加速器は、電子と陽電子を衝突させ、B中間子・反B中間子の対を生成するための衝突型円形加速器で、2014年運転開始予定です。極めて多くのB中間子・反B中間子対を生成することを目的として作られているため、「Bファクトリー」(B工場)とも呼ばれています。SuperKEKB加速器は2010年6月まで運転していたKEKB加速器のアップグレード版で、KEKB加速器の約40倍多くのB中間子・反B中間子対を生成できるように設計されています。地下11メートルに掘られた1周約3 kmのトンネルの中には、電子用リング(HER)^{*1}および陽電子用リング(LER)^{*2}の二つのリングが並んで置かれています。それぞれのリングの中を電子ビーム(エネルギーが7ギガ電子ボルト)と陽電子ビーム(4ギガ電子ボルト)が光速に近いスピードで逆方向に走っています。二つのビームは、リングの一カ所でのみ衝突するように設計されており、衝突点に設置された Belle II と呼ばれる測定器がこの衝突によって起こる素粒子反応を捉えます。

電子と陽電子はどのように作られるの?

では、電子と陽電子はどのように作られて加速され、衝突するのでしょうか。電子と陽電子はライナックと呼ばれる線形加速器で作られます。電子はライナック最上流のRF電子銃で作られ、広がり小さな電子のかたまりとなって加速され、ライナック出口で7ギガ電子ボルトのエネルギーになります。陽電子は、3.5ギガ電子ボルトまで加速した電子を金属標的に当てて作ります。この陽電子のかたまりもライナックで加速され、1.1ギガ電子ボルトで一旦取り出されてダンピングリングに入射され、ここで周回させることで広がり小さなビームにします。再びライナックに戻し4ギガ電子ボルトのエネルギーまで加速されます。こうして作られた電子と陽

電子のビームは別々のビーム輸送路を通して、それぞれ SuperKEKB 加速器の二つのリングに反対方向に入射されます。別々のリングに入射された電子と陽電子のビームは、Belle II 測定器の内部にある衝突点で衝突します。

SuperKEKB 加速器を構成するもの

電子銃で作られてから衝突するまで、電子や陽電子は超高真空中に保たれた真空パイプの中を進みます。このパイプ内をビームをロスさせることなく導くのが、電磁石です。ビームの進行方向を変えたり、ビーム軌道が発散しないようにします。特に Belle II 測定器内部の衝突点では、衝突点の前後にビームを小さく絞る特殊電磁石が設置されています。電子や陽電子が円形加速器を回ると放射光を放出し、エネルギーの一部を失います。これを補充するために、高周波加速空洞を用います。SuperKEKBでは、常伝導加速空洞と超伝導加速空洞が使われます。また、ビームがどのような状態であるかを常に観測するビーム診断システムとして、ビーム位置モニター、ビームサイズモニター、チューン測定装置等が随所に設置されます。ビーム不安定を抑制するためのパンチフィードバックシステムもあります。これらモニターからの情報を使って加速器制御システムは、常にビームを観測し必要に応じて電磁石や加速空洞、真空システム等の制御を行います。

世界最高性能の加速器

衝突型加速器の性能はルミノシティと呼ばれる量で表されます。KEKB加速器は2009年、設計値の2倍を越える $2.11 \times 10^{34} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ というルミノシティ(現在も世界最高値)を達成しました。SuperKEKBでは、KEKBで達成されたルミノシティの約40倍の $8 \times 10^{35} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ が達成される見込みです。

*1 High Energy Ring
*2 Low Energy Ring

SuperKEKB加速器のここが素晴らしい!



ARES空洞
巨大な蓄積エネルギー
で大電流を安定に加速
KEKB独自のアイデア!

大電流ビームを蓄積する



クライストロン

世界最高出力
の高周波源!



世界初のナノビーム・スキーム!

有限交差角衝突
衝突後の2つのビームを容易に分離
KEKBの4倍大きな交差角
超伝導最終収束電磁石群

円型加速器としては世界
最小ビームサイズを達成!



真空システム
超高真空でビームを保持
1兆分の1気圧!



ビームを小さく絞って衝突させる

冷凍機システム
超伝導加速空洞を4Kで運転
He液化装置
1万2千リットルの
液体ヘリウムを貯蔵!

世界をリードする日本の超伝導技術!

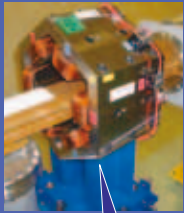
超伝導加速空洞
高加速電圧を効率よく発生

超伝導空洞で世界最高蓄積ビーム
電流2.6アンペアを目指す!



: 見学コースでご覧になれます!

: 見学コースでご覧になれます!



スキュー六極電磁石

ルミノシティ・アップに不可欠!



電磁石群

約1000台の四極磁石(凸、凹レンズ)
約220台の偏向磁石(プリズム)
約200台の六極磁石(色収差補正)
約1100台のビーム軌道制御磁石



制御点数
数十万チャンネル!

制御室

ビームを自在に操る



ビーム位置モニター

精度1ミクロン!



ソレノイド電磁石

電子雲の発生を抑制

陽電子ビームサイズ増大を防ぐ!



バンチ毎フィードバック
ビーム不安定性を抑制



ビームサイズモニター

SuperKEKB独自のアイデア!



ビーム入射路

高効率のビーム入射!



電子・陽電子入射ラインック

連続的に電子・陽電子ビームを供給!

ナノ・ビーム・スキームとは？

ナノ・ビーム・スキームとは？

SuperKEKBでは、ビームの衝突に関して従来にない新しい方式を採用しています。この衝突方式は、KEKBではナノ・ビーム・スキームと呼んでいますが、最初、イタリアのSuperB計画においてP. Raimondi氏が提案したものです。その要点は、バンチ(電子、または陽電子の塊)同士の衝突の際、衝突する部分を小さくして、従来の衝突方式でルミノシティの制限要因だった砂時計(hourglass)効果を和らげることにあります。

従来の衝突方式(正面衝突)

従来の衝突方式(正面衝突)の概念図を図1に示します。従来の衝突方式でルミノシティを制限する要因の大きなものに砂時計(hourglass)効果と呼ばれるものがあります。ルミノシティを上げるためには、衝突点でのビームサイズ(特に垂直方向)を小さくする必要があります。そのために衝突点付近に強力な四極電磁石を置いて、ビームを絞り込みます。しかし、絞りが強すぎると設計上の衝突点でビームサイズが小さくなくても、進行方向にその点の前後でビームサイズが広がってしまいます。図1に示されているように、衝突点の前後でビームサイズが広がる現象は、砂時計(hourglass)効果と呼ばれます。これは、例えばカメラのレンズで本当の焦点は一点だけであることを考えれば理解できると思います。衝突する各バンチの中の電子や陽電子は、水平、垂直、進行方向の3方向ともにほぼガウス分布(正規分布)していますが、進行方向の分布の 1σ (標準偏差 σ_z)はバンチ長と呼ばれます。このバンチ長の範囲で、垂直方向のビームサイズ(σ_y)があまり広がらない程度にしかビームを絞れないことになり、これがルミノシティの制限要因になります。

新しい衝突方式(ナノ・ビーム・スキーム)

ナノ・ビーム・スキームの概念図を図2に示します。この方式の特徴は、バンチがぶつかる領域が極端に狭い(図の長さLの範囲)ことです。こういう風にすると、バンチの中の粒子のすれ違いが増えて、ルミノシティが低下すると思いがちですが、実はこの狭い領域にフォーカスしてビームを強烈に絞り込むことにより、ルミノシティが上がるのです。SuperKEKBではこのナノ・ビーム・スキームの採用により、KEKBに比べて約20倍高いルミノシティを得ることをもくろんでいます(SuperKEKB全体ではこの20倍に電流増強による2倍のアップを合わせて約40倍のルミノシティアップになります)。この

方式が成り立つためには、垂直方向にビームを強烈に絞り込むことに加えて、衝突点での水平方向のビームサイズも従来よりずっと小さくし、かつビームが交差する角度をかなり大きくする必要があります。衝突点でのビームサイズ(1σ)は、KEKBでは100ミクロン(水平)、2ミクロン(垂直)程度でしたが、SuperKEKBでは10ミクロン(水平)、50ナノメートル(垂直)程度になります。ナノメートルはミクロンの1/1000です。「ナノ・ビーム・スキーム」の名前の由来は、この垂直方向のビームサイズがナノメートルの単位になることによります。次に、交差角はKEKBでは22mrad(ミリラジアン)でしたが、SuperKEKBでは約4倍の83mradにします。このように、KEKBでも交差角があり、クラブ空洞を使わない場合は交差角衝突でしたが、図3に示すように、ナノ・ビーム・スキームとはほど遠い衝突方式でした。

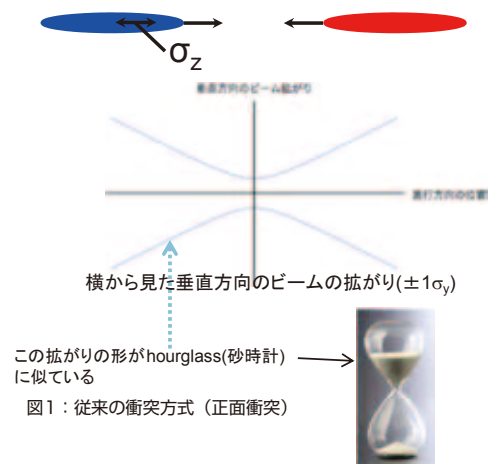


図1：従来の衝突方式(正面衝突)

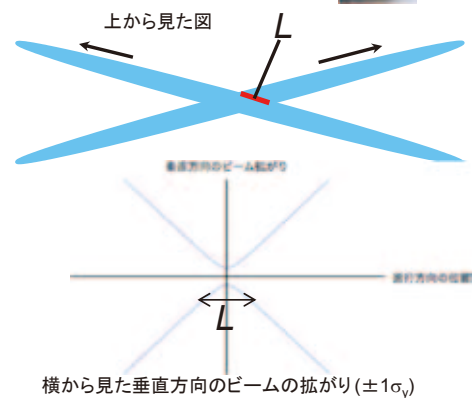


図2：新しい衝突方式(ナノ・ビーム・スキーム)

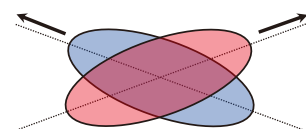
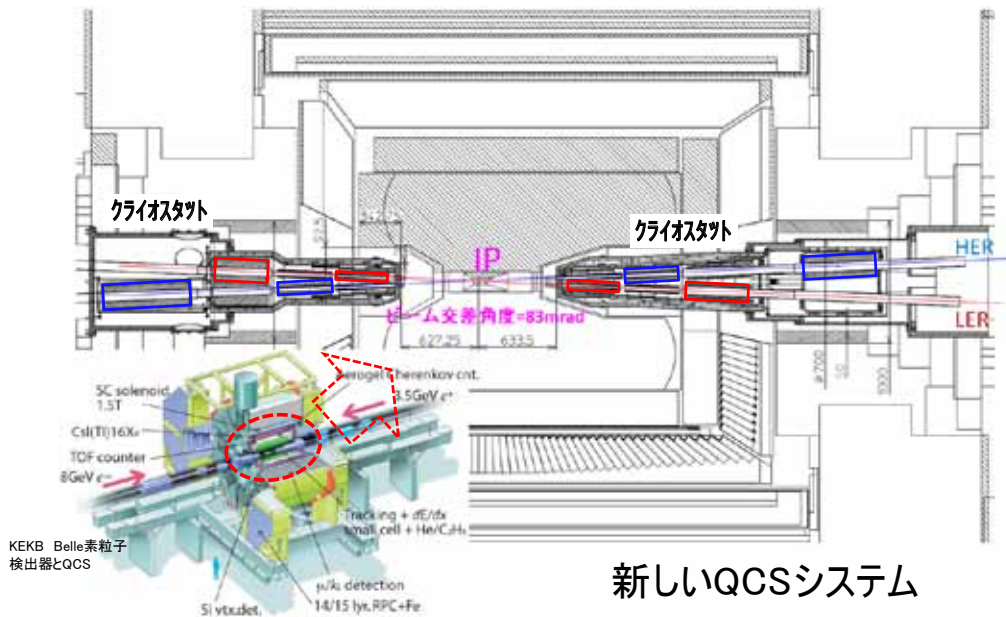


図3：KEKBの衝突方式(クラブ空洞を使わない場合)

ビーム衝突点用超伝導電磁石(QCS)とは



新しいQCSシステム

KEKBよりも更に小さくビームを絞る

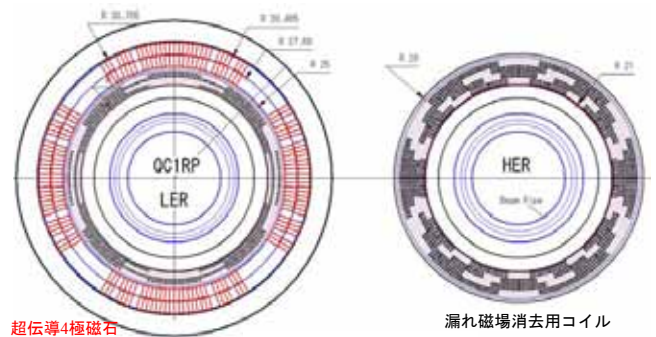
SuperKEKBでは、電子と陽電子ビームの衝突性能(ルミノシティー)をKEKBの40倍まで向上させることを目標としています。この為に2つのビームは縦方向に陽電子/電子=48/62ナノメートルまで絞られます。これを実現する為に、衝突点の一番近い位置に沢山(いろいろな種類)の超伝導電磁石が設置されています。

KEKBでは、ビームが衝突する場所(IP)の左右に超伝導4極電磁石と超伝導ソレノイド磁石が各1台ずつ、また超伝導補正コイルが3台ずつ1台の金属の容器(クライオスタット)に組込まれていました。この磁石の中を電子と陽電子の2つのビームが通過していました。SuperKEKBでは、ビーム衝突点の左右にクライオスタットが1台ずつ配置されるのは同じですが、各クライオスタットの中には超伝導4極電磁石が4台、超伝導ソレノイドが1台、超伝導コイルが20台組込まれます。

上に示したSuperKEKBの衝突点付近の図の中で、クライオスタット内部に青と赤で縁取られた長方形がありますが、これらが超伝導4極電磁石に対応します。赤が陽電子ビーム(LER)、青が電子ビーム(HER)用です。

8台の超伝導4極電磁石のうち、IPに最も近い超伝導4極電磁石の断面を上図に示しました。超伝導4極磁石(左側)は赤い短冊状で示した部分です。コイル内半径が25mm程度の大変小さな超伝導コイルです。1つの短冊が超伝導ケーブル1本に相当します。大きさは幅1mm、高さ2.68mm程度の小さなケーブルですが、1600Aの電流が流れます。磁石の内筒部には4種類の超伝導コイル

が組込まれます。電子ビームラインには、この4極磁石からの漏れ磁場を消す為の超伝導コイル(右側)が設置されます。



超伝導電磁石断面



開発された漏れ磁場消去用コイル

クライオスタット
超伝導電磁石は、電気抵抗がゼロの電磁石です。この超伝導現象をつくり出す為に、電磁石は絶対零度近くの -269° まで温度を下げます。磁石は液体ヘリウムで冷やされます。超伝導電磁石を -269° に保つためには外気からの熱を防ぐ必要があり、磁石は金属製の非常に精巧な魔法瓶の中に入れて運転されます。この魔法瓶のことをクライオスタットと呼びます。

超伝導加速器空洞

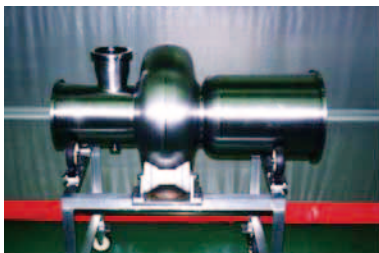
加速空洞は空洞内に電圧を発生させて電気を持った粒子(電子、陽電子など)を電磁力で加速する装置です。超伝導体(ニオブ)は銅などの金属に比べてはるかに効率よく高い電圧を発生することができます。この性質を利用して超伝導加速空洞が作られました。

KEKB 加速器では8台の超伝導加速空洞が1.4アンペアの電子ビームを加速することに成功しました。SuperKEKB 加速器では2倍の2.6アンペアの電流を加速します。大電流ビームを安定に加速する技術が求められています。

大電流加速のポイント(その1)

超伝導ニオブ空洞(赤色)

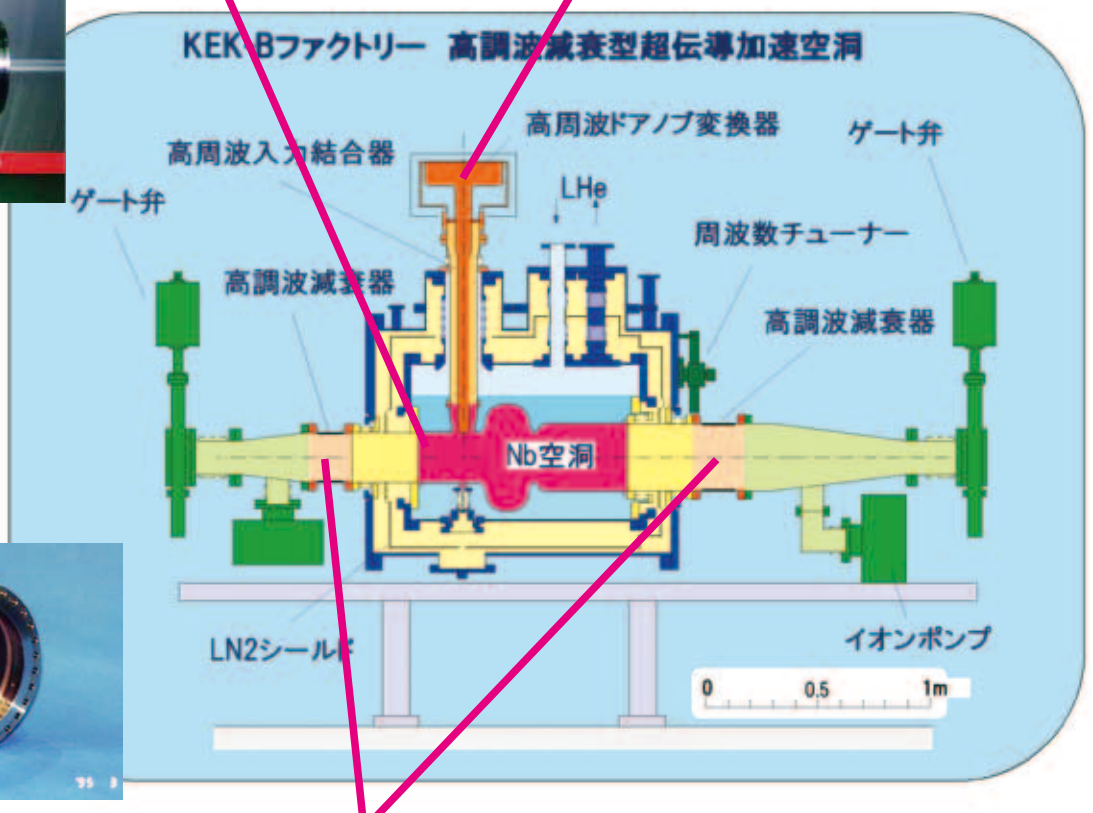
高性能な魔法瓶(クライオスタット)の中で液体ヘリウムによって-269℃に冷却された超伝導ニオブ空洞は、2メガボルトの高電圧(乾電池130万個分)を安定して発生させます。



大電流加速のポイント(その2)

アンテナ型入力結合器(オレンジ色)

大電流粒子ビームを加速するためには大きな電力を必要とします。SuperKEKBでは空洞1台あたり400キロワット(家庭用電子レンジ800個分)の電力を空洞に供給するものが入力結合器です。



大電流加速のポイント(その3)

HOM減衰器(ピンク色)

不思議に思うかも知れませんが、電力をもらって加速される粒子は、同時に余計な電力を空洞に残して行きます。この余計な電力(HOMパワー)は加速電圧を乱したり、熱となって機器をこわしたりするので、ニオブ空洞の両側にあるHOM減衰器によって取り除きます。SuperKEKBのような大電流加速器ではHOMパワーが大きくなるので特別な対策が必要で、いま研究開発が行われているところです。

超伝導加速空洞用 大型ヘリウム液化冷凍システム

1. 概要

大型ヘリウム冷凍システムは、1988年(昭和63年)にトリスタン加速器計画の超伝導加速空洞の冷却システムとして日光実験室に設置されました。当初は、冷凍能力【4 kW at 4.4 K】の設備としてスタートしましたが、1989年(平成元年)に超伝導加速空洞が増設されたことに伴い、国内初の超臨界タービンを装備した冷凍能力【8 kW at 4.4 K】の冷凍システムに増強され、その間7年間安定に運転されました。その後、1998年(平成10年)からは、Bファクトリー(KEKB)の超伝導加速空洞の冷却用に再利用・運転され、2007年には世界で初めてKEKBで実用化された超伝導クラブ空洞の冷却にも使用されました。2010年(平成22年)のKEKB運転停止までに、本ヘリウム冷凍システムの総運転時間は22年間で110,000時間を超えました。引続き、SuperKEKBでも超伝導加速空洞の冷却に使用するため、長期間の安定した運転を目指して冷凍システムの保守・点検を行っています。

2. 特徴

- (1) 超臨界タービンの採用による優れた冷凍効率の実現
- (2) 高温タービンを装備し、定常運転時の省液体窒素運転の実現
- (3) 超伝導加速空洞や高性能トランスファーラインの80K熱シールドの冷却に液体窒素の循環装置を採用し、安定で経済的な運転を実現
- (4) 80Kでの活性炭内部吸着器を装備し、長期間の安定した連続運転を実現
- (5) KEKB超伝導加速空洞用トランスファーラインに新型シールド構造を採用し、侵入熱低減を実現



超伝導加速空洞用ヘリウム冷凍システム

3. 本ヘリウム冷凍システムの主要な諸元

- (1) コールドボックス : 8 kW at 4.4 K 膨張タービン5台
- (2) ヘリウム圧縮機 : 主圧縮機 10,820 Nm³/h 増強圧縮機 3,825 Nm³/h
- (3) 液体ヘリウム容器 : 12,000 ℓ
- (4) ヘリウム中圧タンク : 100 m³ × 9基
- (5) 液体窒素貯槽 : 50,000 ℓ

アレス ARES空洞

Accelerator Resonantly coupled with Energy Storage

アレス(ARES)とはギリシャ神話の戦いの神様。天空においては赤く輝く火星★を指します。アレス空洞はKEKBの「エンジン」として2010年までの10年余にわたって活躍しました。更なるフロンティアを切り開くべく、KEKBはその刃先を研いでSuperKEKBに変身中ですが、将来にわたってもアレス空洞はその原動力として期待されています。

高周波加速空洞とは？

電子レンジは電磁波のエネルギーを熱エネルギー(水分子の乱雑な運動)に変換して食品を加熱します。一方、高周波加速空洞は電磁波エネルギーをビームの運動エネルギー(ビーム粒子の整然とした運動)に変換する装置。その構造は高精度な金属製の電磁波共鳴器(アレス空洞の場合、周波数はUHF帯の509MHz)で、内部に励振される強い高周波電場によって電子(陽電子)ビームを加速します。当然、ビームが通る空洞内部は超高真空に保たねばなりません。

大電流ビーム加速への挑戦

ビーム加速という作用に対するビームからの反作用、これが大電流ビーム加速のときには大問題となります。小電流ビームをピンポン玉に例えると大電流ビームは鉄球。卓球のラケットで鉄球を打ち返す場合と同様、通常の加速空洞では大電流ビームを安定に加速することが非常に困難になります。鉄球を打ち返すには鬼の金棒が一番。金棒と卓球のラケットの違いは、振り回すときの打棒の持つ運動エネルギーの大小。高周波加速の場合、空洞中に貯えられている電磁波エネルギーの総量が打棒の運動エネルギーに相当します。大電流ビームを安定に加速するには、電磁波エネルギーを空洞の中にたくさん貯め込んでビームからの反作用に打ち勝てばよいのですが...

アレス空洞の特徴

★ 大型円筒の電磁場エネルギー貯蔵空洞

通常の銅製の加速空洞では、内部に貯め込める電磁波エネルギーの総量は壁面電流の熱損失によって制限されてしまいます。アレス空洞(次ページ上図参照)では、低い壁面熱損失で大きな電磁波エネルギーを貯め込むために専用の大型円筒空洞(内径 1.1 m、軸長 1.2 m の鋼製円筒構造で表面に電気伝導に優れる銅めっきを施工)、即ちエネルギー貯蔵空洞を用います。貯蔵空洞が加速空洞のおよそ9倍の電磁波エネルギーを貯えることにより、

ビームからの反作用の影響は約 1/10 に軽減されます。

★ 要の結合空洞と $\pi/2$ モード

アレス空洞の最大の売りは、加速空洞と貯蔵空洞の間に要(かなめ)となる第三の空洞、即ち結合空洞を配して共鳴的に電磁気結合させている点にあります。加速、結合、貯蔵空洞、これら三つの空洞から構成されるアレス空洞系と等価な三連振子力学モデルを次ページ下に示します。三つの振子がバネで結合されている系の固有振動モードは次の三つ。まず、各振子が同位相で振動する 0 モード(ゼロモード: 隣の振子との位相差が 0 度)。次に、静止している中央振子を挟んで両端の振子が互いに反対の位相で振動する $\pi/2$ モード(にぶんのパイモード: 隣の位相差が $\pi/2$ ラディアン、即ち 90 度)。最後に、隣合う振子が互いに反対の位相で振動する π モード(パイモード: 隣の位相差が π モード、180 度)。アレス空洞では 2 番目の $\pi/2$ モードをビーム加速に使います。この $\pi/2$ モードの特徴は、振子間のエネルギーのやりとり(空洞間の電磁波エネルギーの流れに相当)が最もスムーズ、かつ両端の振子(加速空洞と貯蔵空洞)の振幅・位相の関係が中央の不動振子(結合空洞)によって安定化されている点にあります。

★ 結合空洞減衰器

三連振子系モデルを見ると、結合空洞に相当する中央振子にダンパー(減衰装置)が取り付けられています。これは、ビーム加速に不要であるばかりか、ビーム加速を不安定にする 0 モードと π モード(寄生モードと呼ばれます)を速やかに減衰させるためです。都合の良いことに、ビーム加速に使用する $\pi/2$ モードは、結合空洞に相当する中央振子が静止していますから、ダンパーの影響は受けません。実際の結合空洞には、寄生モードの電磁波エネルギーを速やかに空洞外部に取り出すために同軸アンテナ型結合器が取り付けられています。

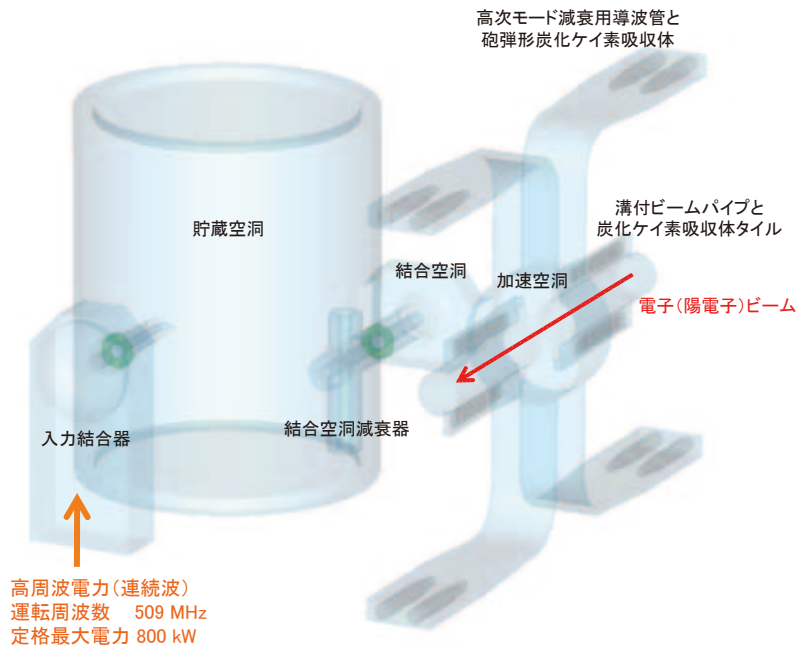
★ 加速空洞は高次モード減衰式

大電流ビーム加速の場合、ビームが加速空洞を通過した後に残していく航跡電磁場(加速空洞のような共鳴器の中では長時間にわたって後々まで尾を引く)によって

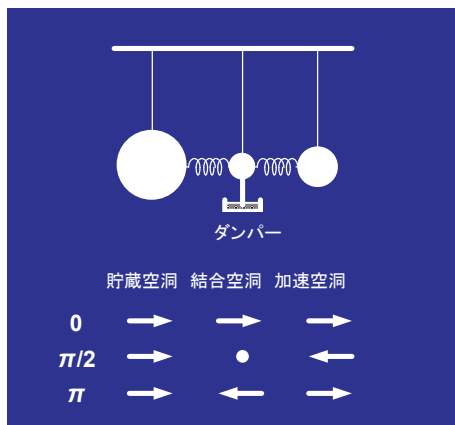
引き起こされるビーム不安定(結合バンチ不安定)の問題も無視できません。これは、一列縦陣で港内(空洞)を航行する船団(バンチ列)において、先行する船(バンチ)の航跡波が港の岸壁(空洞壁面)で反射されて航路に戻り、後続の船を揺らしてしまう現象に例えられます。

アレスの加速空洞には、ビームによって励振された高次モードの電磁波エネルギーを空洞外部に速やかに取り

出すために、扁平な矩形導波管が加速空洞上下に計4本、そして上下に溝を設けた特殊なビームパイプが前後に計2本取り付けられています。外部に引き出された電磁波は導波管終端部の砲弾形炭化ケイ素吸収体や、ビームパイプの溝内部に取り付けられている炭化ケイ素吸収体タイルの中で熱エネルギーとなって吸収されます。

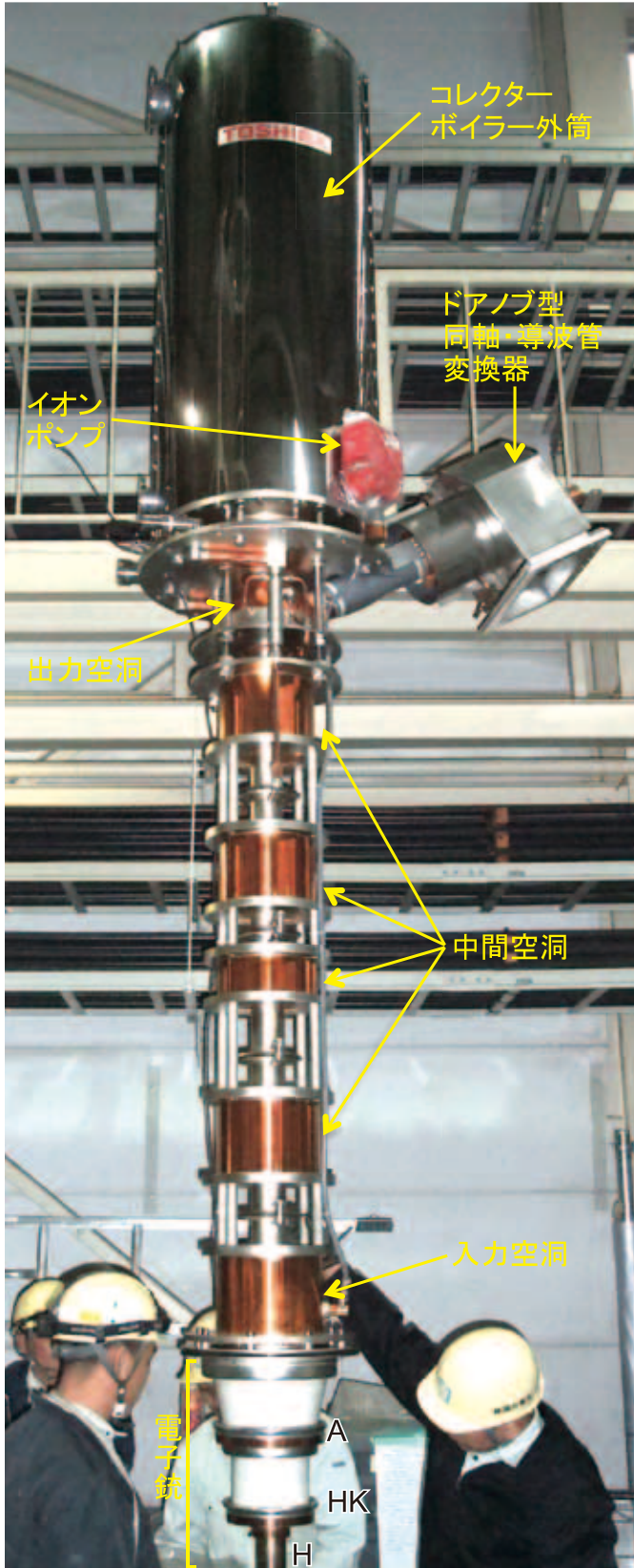


アレス空洞系(透視図)



アレス空洞系と等価な三連振子力学モデルと三つの固有振動モード

UHF帯連続波クライストロン



SuperKEKB加速空洞で、電子、陽電子の加速に用いられる 509 MHz の高周波 (RF) は真空管の1種である連続波クライストロンより供給される。加速空洞が電子、陽電子を繰り返し蹴飛ばして加速する筋力とすれば、クライストロンはそれに絶えずエネルギーを供給する心臓であり、直流高電圧で加速された電子の運動エネルギーを高周波交流電力に変換する電子の云わば加・減速器である。電子銃部を下に、コレクター・ポイラー部を上にしてコイル・ソケットに挿入し垂直に立てて運転する。

SuperKEKBリングには、1周にわたって8ヶ所の高周波装置専用の建家(クライストロン電源室)があり、内6ヶ所に、LERで18本、HERで18本、合計36本のクライストロンが設置され、計算機制御により運転される。大電力 RF は出力結合器からサーキュレーターを介して導波管(WR1500)により地下約10メートルのトンネル内の各加速空洞に導かれ入力結合器を通して供給される。

他に入射器のダンピング・リング用に1本、ARES及び超伝導空洞の開発エージング用に2本、クライストロン自身を含む大電力 RF の研究開発用に2本、大強度放射光(PF-AR)の運転及びバックアップ用に4本の計9本があり、都合45本もの大電力クライストロンが使用される。

ここが素晴らしい!

世界最高の出力達成とこれに耐える大電力機器の数々

連続出力1.35メガワット(135万ワット)は世界一、水冷空冷ハイブリッド方式の出力結合器、水負荷、サーキュレーター

最先端薄膜コーティング技術を駆使

マルチパクターリング放電を抑える窒化チタン被膜、低温動作のイリジウム被覆カソード、放電による銅やバリウムの飛散を抑えアノードの安定動作に寄与する酸化クローム被膜

世界トップレベルの安定性能

長期安定な運転性能とそれを支える電源、RF機器、技術、そして人

高い効率と驚く程の長寿命(最高齢は11万時間)

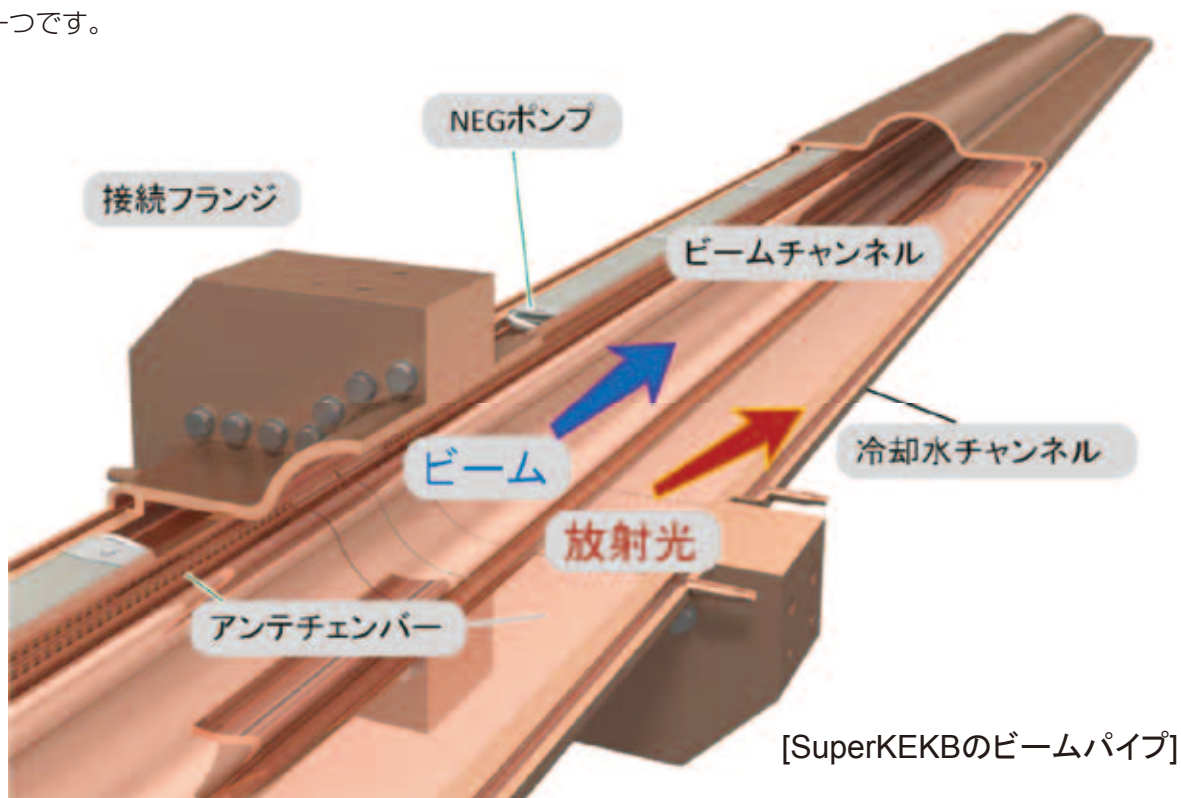
ここがすばらしい! SuperKEKBの真空システム

加速器真空システムの役割

SuperKEKBのようなリング型加速器では、電子や陽電子はビームパイプの中を回っています。電子や陽電子は、パイプ中にある気体の分子と衝突すると、方向が曲がったりして失われます。そこで、ビームパイプ内の気体分子を減らし、真空状態にする必要がとなります。例えば圧力を1兆分の1気圧にすると10時間以上リングを回ることができます。このように、ビームパイプを真空にし、安定に維持することが加速器真空システムの大きな役割です。圧力が低いと、ビームを安定に保つ効果もあります。真空システムは、加速器の基本となるシステムの一つです。

真空の作り方

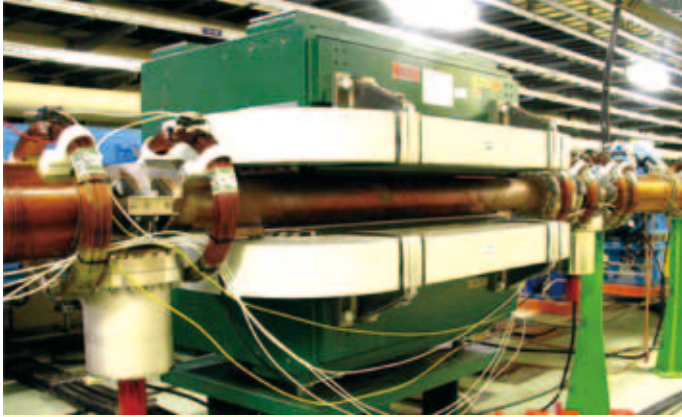
では、一周3 kmの細長いビームパイプをどうやって真空にするのでしょうか? SuperKEKBでは、ビームパイプに沿って真空ポンプを並べてパイプを真空にします。主に使う真空ポンプは、非蒸発型ゲッター(NEG)ポンプというもので、パイプ内の気体分子をきれいな(活性な)金属の表面に化学的にくっつけてしまうものです。その他、不活性なガス(アルゴンなど)を排気するために、スパッターイオンポンプも使用しています。真空度(圧力)は冷陰極真空計で測定します。



SuperKEKBのビームパイプ

SuperKEKBのビームパイプは、アルミや銅などの金属で作られていて、適材適所で用いられています。また、圧力を下げるために、パイプの内面は化学的に洗って綺麗にされています。加速器のビームパイプが他の真空容器と大きく違うのは、その中に高エネルギーの電子や陽電子が通っているという点です。そのために、ビームから出る放射光や、ビームがつくるパルス的な電流、電磁波がその中にあります。ですから、加速器のビームパイプは、単純なパイプではなく、放射光から機器を守る突起を設けたり、余分な電磁波がつかられにくい滑らかな断面にしたりと、様々な工夫を取り入れた構造になります。SuperKEKBのビームパイプは、ビームが通る部分の両側に小部屋(アンテチェンバー)がある、“土星”のような独特な断面を持っていて、このような要求にしっかり対応できるようになっています。

SuperKEKBリング電磁石



偏向電磁石 (Dipole magnet)

荷電粒子を一定の角度曲げ閉じた軌道を作る。光学系でのプリズムの役割に相当する。SuperKEKB陽電子リングではKEKBの約4倍の長さの偏向電磁石へ置き換える予定です。



四極電磁石 (Quadrupole magnet)

周回している荷電粒子が中心軌道の近くから離れない様に収束力を与える。光学系での凸／凹レンズの役割に相当する。



六極電磁石 (Sextupole magnet)

周回している粒子は有限のエネルギー幅を持つので四極電磁石から受ける収束力が異なってしまう。これを補償するのが六極電磁石の役割。光学系での色収差補償レンズの役割に相当する。

KEKBトンネル内には電子／陽電子リング合わせて約300台の偏向電磁石、約900台の四極電磁石、200台以上の六極電磁石がある。この他に上の写真の四極電磁石のとなりに見えるような小型の偏向電磁石(補正電磁石)が多数ある。これらの電磁石はすべて精度よく加工／測定／据え付け／アライメントされている。



KEKB建設時のアライメントの様子

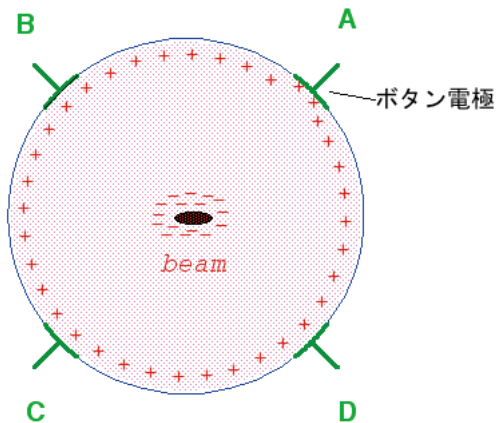
ビーム位置モニタ

SuperKEKBのような精密な加速器では、高い性能を実現するために、ビーム位置モニタが重要な役割を果たします。

ビームの軌道を測る

加速器のビームは真空容器の中を光とほぼ同じ速度で移動しています。ビームを安定に周回させるために、ビームの軌道を数十秒毎に調整しており、多数のビーム位置モニタを用いてビーム軌道を測定しています。

その測定原理は、電荷を持つビームからの電磁場によって、真空容器壁に誘導された電荷をボタン電極を用いて、電圧信号として検出します。



上の図のように真空容器に付けられた4個の電極の信号の強さの差をとってビーム位置を測定します。

$$x = k_x \frac{(V_A + V_D) - (V_B + V_C)}{V_A + V_B + V_C + V_D}$$

$$y = k_y \frac{(V_A + V_B) - (V_C + V_D)}{V_A + V_B + V_C + V_D}$$

尚、 k_x 、 k_y はビーム位置モニターの形状で決められる係数です。

位置モニタの台数は

SuperKEKBのビーム位置モニタは全ての四極電磁石に設置されており、HER(電子リング)の約490台、LER(陽電子リング)の約460台で合計951台です。LERのビーム位置モニタは写真のようなアンテナチャンバーという空間を持つ形状を採用します。



測定性能は

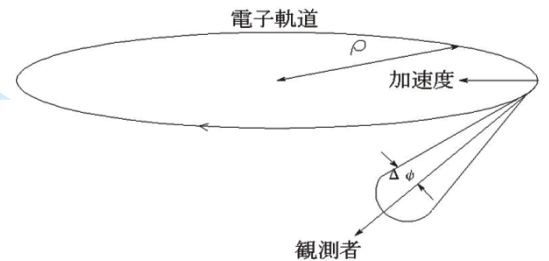
リング全周のビーム位置を約1~3 μ mの高精度で、3秒以内に測定できます。ビームが最適な軌道からわずかに外れると、高性能コンピューターが瞬時に計算し、補正電磁石を用いて軌道の修正を行います。

サブミクロンの精度

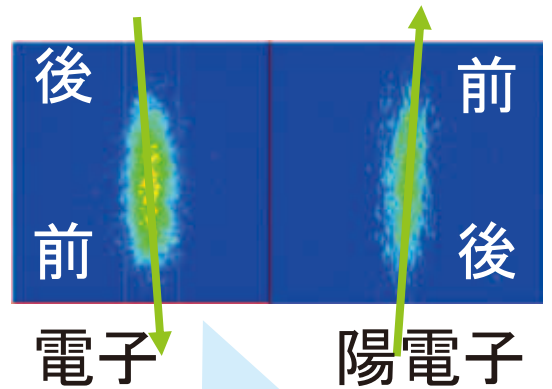
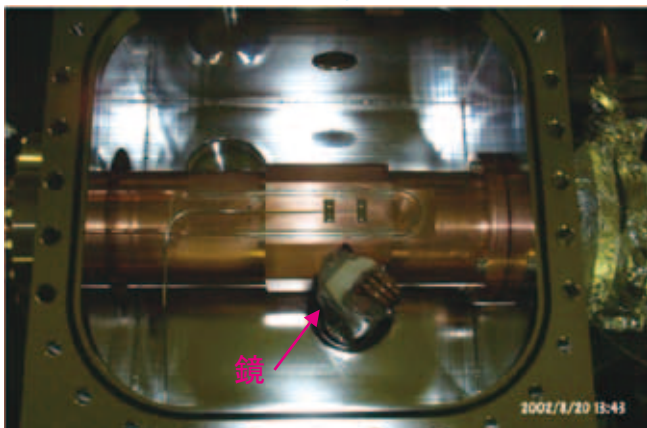
電子ビームと陽電子ビームが衝突する場所では、最適な衝突条件を維持するために、特別な信号処理回路で、0.1 μ m以下の精度でビーム位置を測定します。

ビームサイズモニター

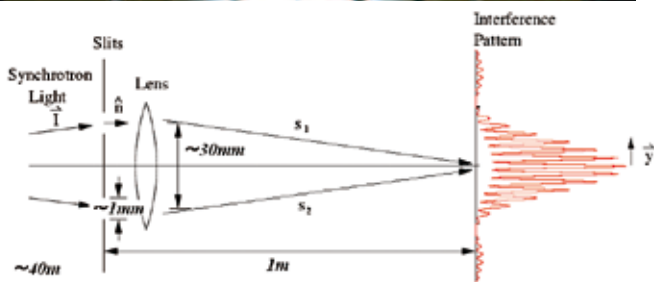
加速器のリング中で加速される電子や陽電子は塊(バンチ)になっているため、効率よくお互いを衝突させるためにはバンチの形つまりビームサイズを知ることが必要です。運動するこれらの素粒子が磁場中でリングに沿って軌道を曲げられるとき、運動の接線方向に光(電磁波)を放出しますが、この光を観測するとバンチの形がわかります。観測する光には可視光(目に見える光)とより波長の短いX線が含まれていて、バンチの進行方向の長さ、水平方向の幅を可視光の成分で、垂直方向の高さは小さいのでX線の成分を用いて測定します。



リングの途中で特別な鏡を仕込んだチェンバーを設置し、電磁石で曲げられた電子と陽電子から出てくる光を外に取り出します。



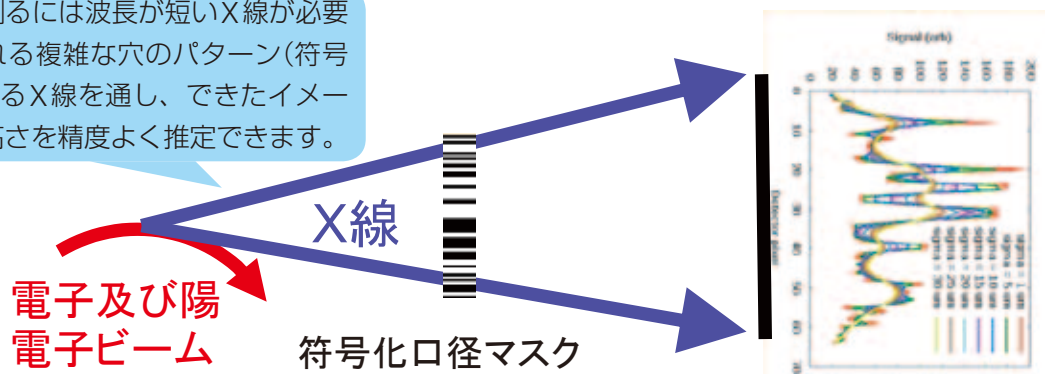
取り出した光を特別なカメラ(ストリークカメラ)で観測するとバンチはこのように見えます。ストリークカメラでは光の到着時間が測れるため、バンチの先頭部から出た光と後方部から出た光の到着時間差からバンチの長さを測定できます。



バンチの幅を精密に測るためには、天文学で使われる干渉計を使います。光を2つのスリットに通すと、少し離れたところにおいたスクリーン上に干渉縞が見えます。ビームサイズが小さくなると、干渉縞の深さが深くなることを利用して、バンチの幅を知ることができます。

バンチの垂直方向の高さを測るには波長が短いX線が必要です。X線天文学で使用される複雑な穴のパターン(符号化口径マスク)に光に含まれるX線を通し、できたイメージを解析するとバンチ毎の高さを精度よく推定できます。

ポイント：加速器のビームサイズ測定と天文学の星の測定には共通点がある。



バンチフィードバックシステム

ビーム不安定

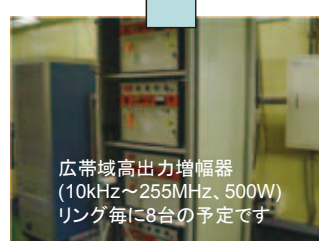
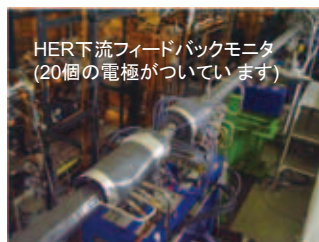
加速器の真空容器の中をほぼ光速で走っている電子、あるいは陽電子ビームは、バンチというかたまりになっていて、まわりに電磁波の形でエネルギーを出しています(バンチは今建設中のSuperKEKBでは長さ6mm程度、横幅0.3mm、高さ0.01mm程度のうすいヒモのような形をしていて、ふつうの運転ではリングの中に2500個程度ある予定です)。もしも、真空容器がこの電磁波がたまりやすい形をしていて、しかもバンチが来るタイミングと、たまった電磁波がバンチをけっ飛ばすタイミングが、ちょうどブランコをどンドンこいでいくようにビームの振動を大きくする関係になっていけば、はじめはごく小さな振動でも、前を走っていったバンチの振動が、後ろのバンチではどンドン大きくなっていき、ひどい場合にはビームが真空容器の壁に当たって無くなってしまったり、バンチの大きさが大きくなってルミノシティが下がり実験がうまくいかなかったりします。このような現象をビーム不安定と呼びます。ビーム不安定が起きると、加速器の本来の性能が出ませんので、ぜひともビーム不安定は退治しなければなりません。

バンチフィードバック

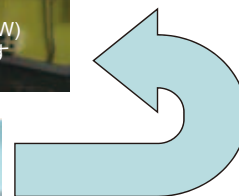
不安定をおさえこむため、SuperKEKB加速器に強力なバンチフィードバックシステムを建設する予定です。フィードバック(負帰還)とは、ある値、あるいは状態を保つため、結果(出力)を原因(入力)から差し引く働きをするもので、たとえば自動車のスピードを一定にたもつため、スピードメータを見ながら、スピードが出すぎていればアクセルをゆるめる、スピードが低ければアクセルをもっとふむ、といったものです。こうすれば、例えば上り坂になっても、風が吹いても、ある程度スピードを一定にたもつことができます。

SuperKEKBのバンチフィードバックシステムは、バンチごとの振動を別々に測定し、おさえこむものです。中身は

- (1) バンチの位置(重心)を測定するモニター部
 - (2) その信号からいらぬ成分を取り除き、必要なけり戻し量を計算し、同じバンチをけり戻すためのタイミングを調整する高速デジタル信号処理部
 - (3) 信号を増幅してバンチをけりもどす高周波増幅器とキッカー部
- からできています。



フィードバックキッカーの内部
対向する4つの電極からの電磁波でビームを水平鉛直にキックします。



電子陽電子線形加速器 (入射ライナック)

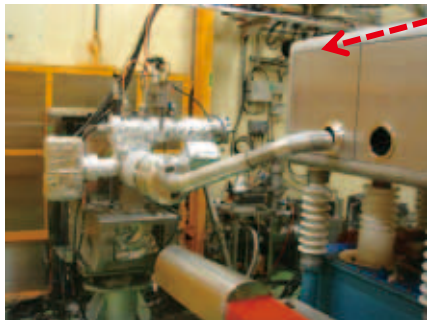
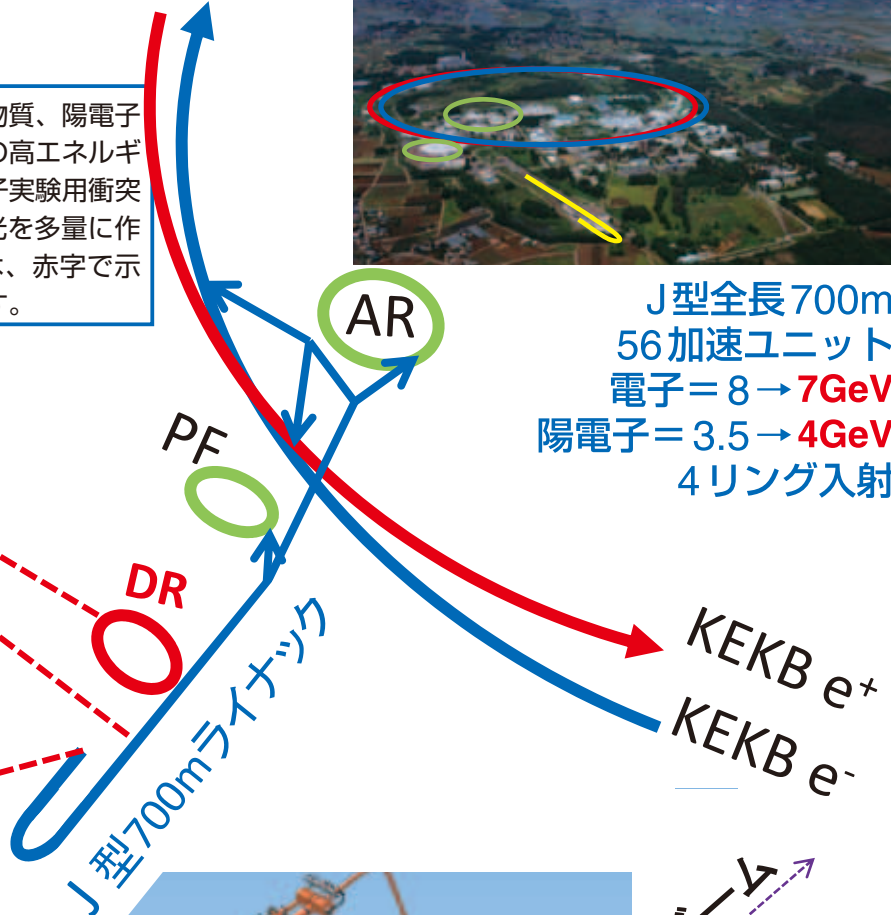


J型全長 700m
56加速ユニット
電子 = 8 → 7GeV
陽電子 = 3.5 → 4GeV
4リング入射

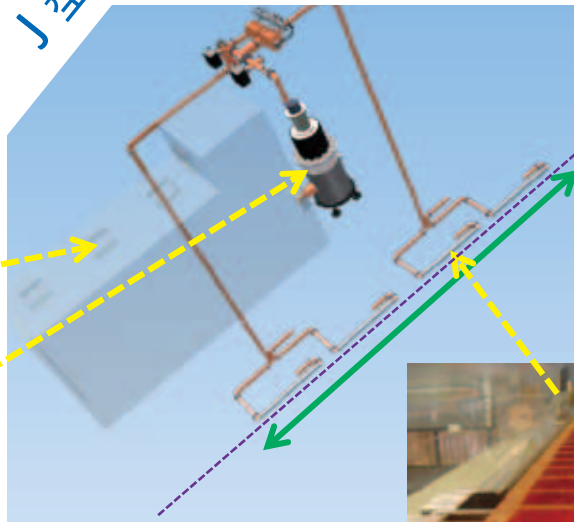
入射ライナックでは、電子(e⁻)とその反物質、陽電子(e⁺)をつくり、それらを数十億ボルト級の高エネルギーまで加速します。このビームを、素粒子実験用衝突リング(SuperKEKB)や物質を観察する光を多量に作りだす光工場(PF)へ供給します。現在は、赤字で示した高度化を目指して開発を進めています。

陽電子源
電子をタングステンに衝突させて発生するシャワーから取り出す
ビーム高品質化
変換効率の向上

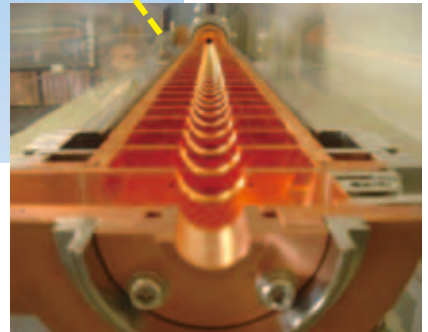
電子源
熱電子を高圧パルスで引出
光電子引出+高周波加速



モジュレータ(パルス電源)
クライストロン(真空管)
電子レンジとほぼ同じ周波数(3GHz)、
パワー 10万倍のマイクロ波を生成する



標準加速ユニット
地上クライストロンから地下の4台の加速管へ高周波を供給し、この10mユニットで160MeV(1.6億ボルト)の加速をします



加速管
クライストロンからのマイクロ波で加速管が満たされた直後にビームを通して加速します

高周波(RF)電子銃

【物質中の電子を真空中に取り出すには】

物質の中には大量の電子が存在しますが、電子を真空中に取り出すには仕事関数という電位差を超えなければいけません。そのためには

- ・寿命が長く仕事関数の低い陰極の開発
- ・仕事関数を超える方法：熱 / 光 / 電界 等で、光による方法が最も強力

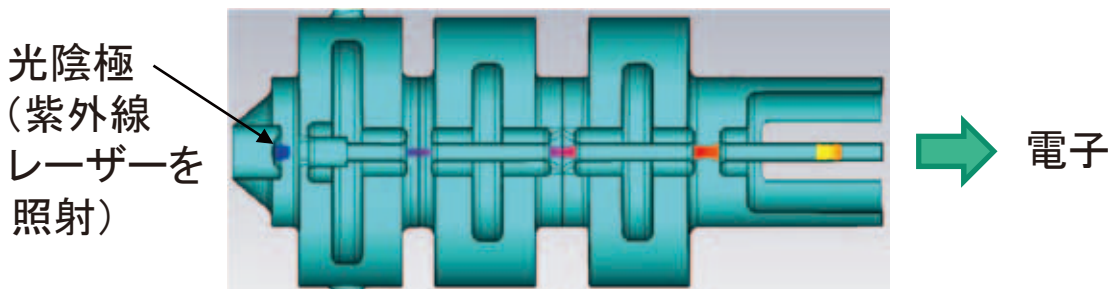
【高周波(RF)電子銃とは】

電子陽電子入射器で必要な電子バンチ1発の電子の数は数百億個で、真空中に出た電子は電荷により斥力で広がります。

これを広がる前に相対性理論により電子間の斥力を緩やかにするために超高電界で急速に加速するのが高周波(RF)電子銃です。

【SuperKEKB 用に開発中の新型RF電子銃の一例】

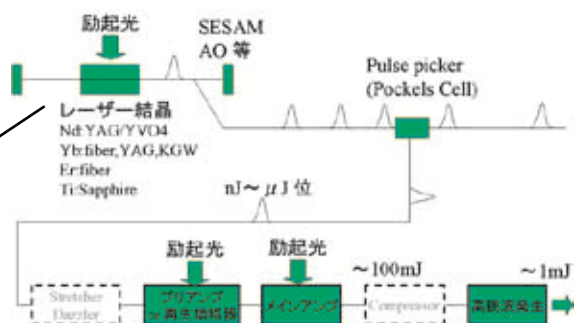
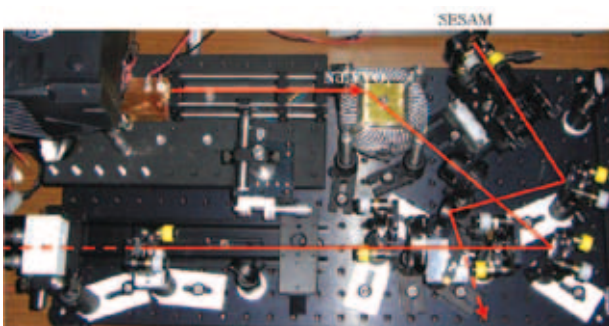
電子の電荷の斥力に打ち勝って空間的にも時間的にも収束させるタイプの新しい方法の高周波(RF)電子銃を開発しています。



【光陰極用の紫外線レーザー】

加速器のバンチの長さは非常に短く瞬時に数百億個の光電子を出すには瞬間的な数百万ワットという強力な紫外線が必要です。

現在は、赤外線レーザーが強力なため、赤外線のモードロックレーザー(下図：波長毎の位相が揃った光)という短パルスの光の玉を増幅した後、赤外線→可視光→紫外線と結晶を用いて変換して得る方法が一般的です。



陽電子生成装置

陽電子って、何でしょう？

今から約80年前、アメリカのカール・アンダーソンは空から振ってくる宇宙線により、それまで誰も見たことがなかった粒子が生成されているのを発見しました。その質量は電子と全く同じでしたが、電子とは逆のプラス(陽)の電荷を持っていたために“陽電子”と呼ばれました。電子と陽電子のような双子の対の一方を“粒子”、そのパートナーを“反粒子”と呼びますが、陽電子の発見以後、物質を構成する陽子や中性子などの素粒子には全てそれに対応する反粒子が存在することが分かってきました。

粒子と反粒子が衝突すると消滅してエネルギーのかたまりに変化します。逆に十分に高いエネルギーを持ったエネルギーのかたまりからは粒子と反粒子の対を作り出すことができます。このような反応を“対生成”と呼びます。

陽電子を創る、捕まえる

われわれの身の回りには電子はたくさんありますが、陽電子はありません。これは素粒子物理学が解くべき宇宙の謎の一つですがBelle実験をしている人たちはこの答えを知っているかもしれませんね。しかし辛いことにわれわれはどうすれば陽電子を創ることができるかについてはよく知っています。先ほどの対生成反応を用いるのです。

まず電子をなるべく高いエネルギーまで加速します。次にこれをなるべく重い金属の標的(図1)にぶつけます。そうするとこの金属中で電子は持っているエネルギーの一部をガンマ線の形で放出します(図2)。このガンマ線が金属中の原子核の近くを通ったときに電子と陽電子を対生成します。標的内ではこれらの反応がねずみ算的に次々と起き多数の陽電子を生成することができます。

生成された陽電子はそのままではいろいろな方向に飛び去ってしまいます。これをなるべく逃がさないように捕まえるにはソレノイドマグネットによる強い磁場が必要で、現在は2テスラの磁場を作れるパルスソレノイド(図3)を使用しています。SuperKEKB計画に向けてこれの3倍強い6テスラの磁場を作れる新型ソレノイドを開発中で、これにより捕まえらる陽電子の数が4倍に増える予定です。

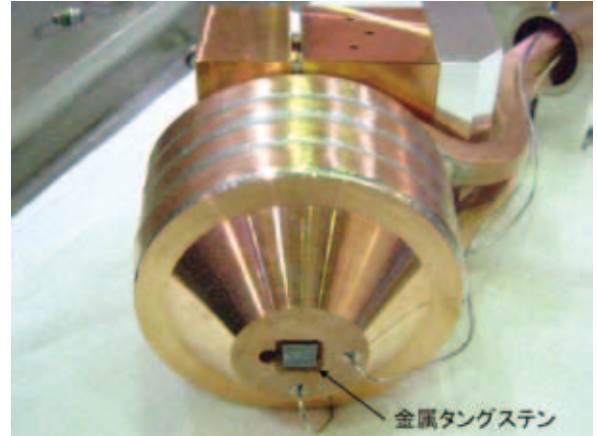


図1. 陽電子生成標的

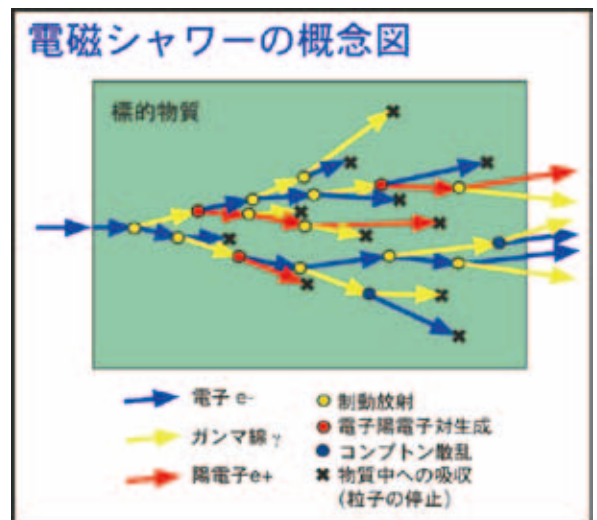


図2. 標的金属内での陽電子生成

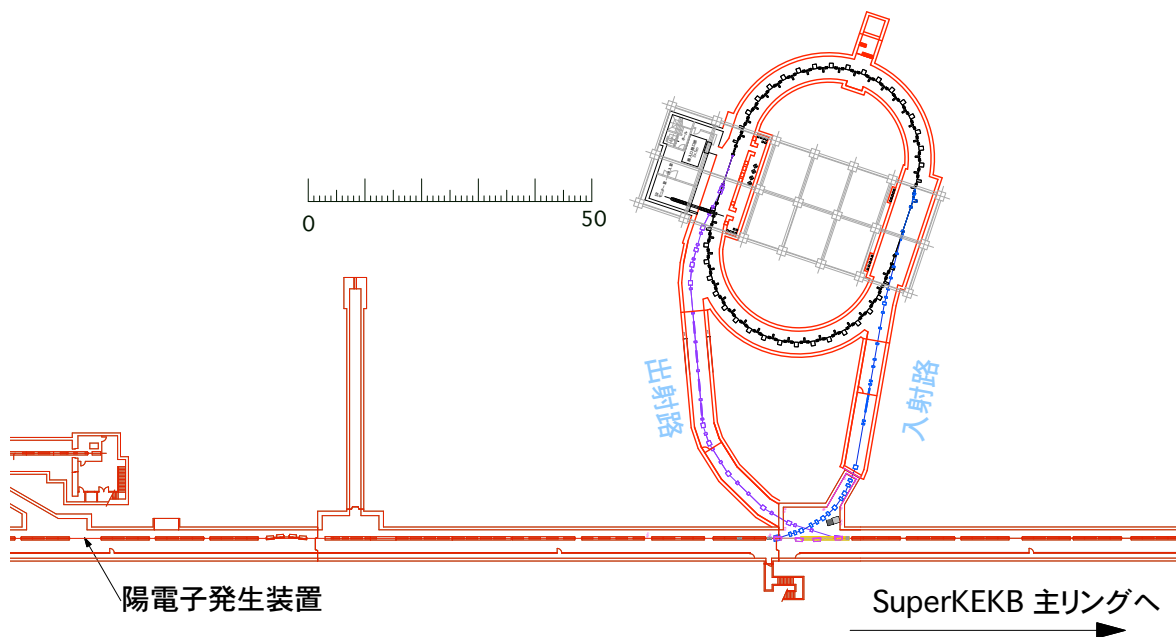


図3. パルスソレノイド

ダンピングリング

ダンピングリングとは

SuperKEKBはそのエミッタンスを極限まで小さくし、衝突点でビームを絞ることでルミノシティを上げます。これに入射するビームもまた、それに応じてエミッタンスが小さくしなければなりません。電子ビームは新型RF電子銃という新しいタイプの電子発生源を使うことにより、この要求を満足させることができますが、陽電子は電子ビームをターゲットに当てたときに発生する電磁シャワーの中から捕獲収集するため、そのエミッタンスは巨大な値になります。ダンピングリングは、陽電子生成装置で作られた陽電子ビームのエミッタンスを1/50～1/500に小さくする装置です。



●ダンピングリングは電子陽電子線形加速器(ライナック)の途中に設置された周長135 mの小さな蓄積リングです。陽電子発生装置で作られた陽電子ビームは1.1 GeVまで加速されたのち専用の入射路を通して、ダンピングリング(以下ではDRと略記します)に入射されます。入射されたビームはDRの中で40 ms(ライナックの繰り返し周期の2倍)の間、周回する内にエミッタンスが減衰し、水平方向のそれは1/50に、垂直方向は1/500になります。エミッタンスの小さくなったビームはDRから取り出され、専用の出射路を通してライナックに戻り、4 GeVまで加速されてLERリングへ向かいます。

●ビームが取り出されるときに十分にエミッタンスが減衰していることが、まず第一に重要となります。減衰時間は周長に比例し、放射光の放出により失う一周当たりのエネルギーに反比例するので、できる限り周長を短く、

磁場値の大きい偏向電磁石を多数配置することが求められます。DRの設計では、通常の偏向電磁石と反対向きの偏向電磁石を組み合わせ配置し、これらをコンパクトにリングに詰め込むことにより、放射光の放出により失うエネルギーを大きくする工夫をしています。

●第二に、減衰時間が短くできたとして、十分に減衰したときのエミッタンスはリング固有のエミッタンスとほぼ同じになるので、その値が充分小さくなるような光学設計もまた重要です。

●KEKBで問題になった陽電子ビームに伴う光電子不安定性は、DRでも問題になり得るので、アンテチェンバーの採用等、不安定性の閾値を下げる工夫をしています。またコヒーレント放射光によるビーム不安定性を考慮した真空チェンバーの設計も進めています。

4リング同時入射

KEKでは、KEKB加速器の他にも放射光専用電子リングとしてPFリング、およびPF-ARリングが運転されています。これらは皆貯蔵型電子リングと呼ばれる円形加速器です。貯蔵型リングでは通常、入射器と呼ばれる他の加速器で所定のエネルギーまでビームを加速しておき、これをビーム輸送ライン(P.29:KEKBビーム輸送システム)を通してリングに入射します。入射器には線形加速器が使われますが、KEKには世界第二位のエネルギーを誇る大型の電子陽電子線形加速器(P.22:電子陽電子線形加速器)があります。この入射器から、KEKB加速器の2つのリング、PFリングおよびPF-ARリングの4つのリングに入射しなければなりません(図1)。さらに4つのリングのエネルギーや強度は共通ではありません。このことから、従来時間的に入射器の運転を手動で切り替えて運転してきました。その切り替えにかかる時間は、2分にもなっていました。

しかし、どのリングにおいても効率的に物理実験を行うためには素早い入射が必要です。KEKBリングでは蓄積電流をできる限り一定にして衝突性能を上げるために実験中も常にビームを追加入射しながら運転してきました(これを「連続入射」とよんでいます)。この場合いちいち入射器の運転モードを切り替えていては、衝突性能が下がってしまいます。また、PFリングやPF-ARリングに入射している間はさらに性能が下がってしまいます。PFリングにとっても連続入射は放射光実験の性能を上げるために必要です。

この問題を解決するために考案されたのが「同時入射」です。通常入射器は最大1秒間に50回ビームをリングに打ち込みます。つまり、打ち込みの間隔は最短で0.02秒です。この0.02秒という短い時間に入射器から、電子を送るか陽電子を送るか、またどのリングに送るかをスイッチし、求めに応じて望むリングに打ち込めるようにするのが同時入射です。しかし、そうひとこと言ってもそれはとても困難な仕事です。まず、それぞれのリングが要求するビームのエネルギーが異なります。それを同じビームラインを通して加速しなければな

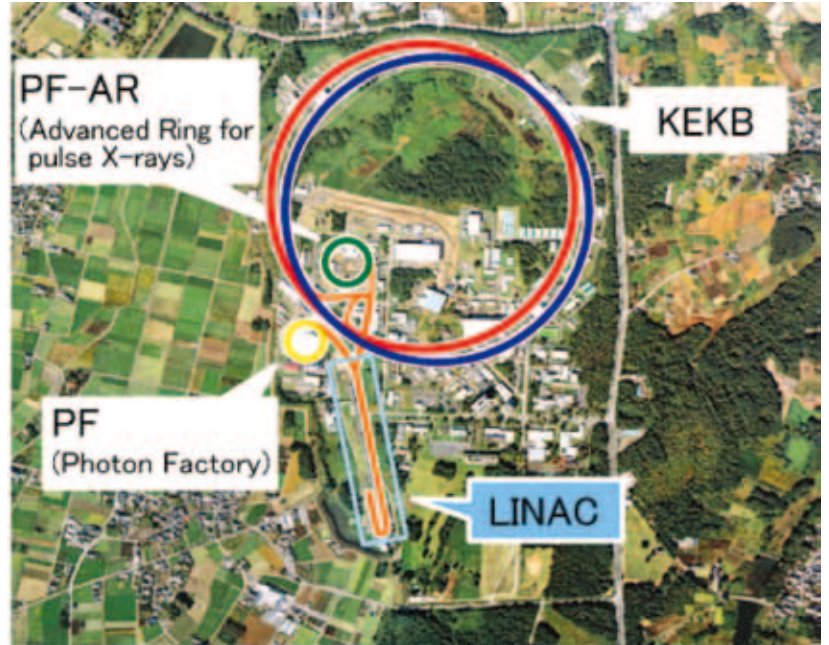


図1. KEKの航空写真に電子・陽電子加速器群を重ねた図です。全ての加速器は地下トンネルに設置されています。KEKBの2つのリング(HERとLER)は1つのトンネル内にあります。LINACと呼ばれる電子陽電子線型加速器(図の青色の枠の部分)が4つの円型加速器にビームを供給しています。

りません。また、電子と陽電子の切り替えもしなければいけません。

ここで陽電子がどのようにつくられるかを簡単に紹介しましょう(P.24参照)。陽電子は自然界には存在しませんから、数GeVに加速された電子ビームを原子番号の大きい物質にぶつけて人工的に作り出します。この物質は「標的」と呼ばれます。そして発生した陽電子は電磁場を使って巧みに集め、さらに加速してビームにします。いかに能率よく陽電子をつくりビームとして取り出すかは現代の加速器科学のなかで主要な研究課題のひとつです。

さて、こうしてつくられる陽電子ビームのために標的が必要なわけですが、電子を加速する際には必要ないものです。どちらの粒子を加速するかによってこの標的を出し入れすればよいのですが、これを0.02秒で動かすことは不可能です。そこで標的に穴をあけ、電子を加速する場合にはビームの軌道を横方向にずらして、この穴を通り抜けるようにしました(図2)。一方陽電子がほしい時にはビームはそのまま標的に当たり陽電子を発生します。標的の出し入れを0.02秒で行うことは無理です

が、ビームの軌道を数ミリメートルだけ0.02秒の間に
 変えることは技術的に可能なわけです。

次にエネルギーの違いの問題も解決しなければなりません(図3)。PFリングのエネルギーはKEKBリングに比べて比較的低いので、加速しておいたビームを線型加速器の途中から逆に減速することにしました。このようにして、短い時間には変化させることが難しい電磁石の設定を変えずに異なるエネルギーの粒子を供給することに成功しました。しかし、これらのいくつかの異なるエネルギーのビームを共通の磁場の中を通してうまく加速・減速するにはいろいろな試行錯誤が必要でした。ビーム輸送ラインの方の動きも複雑です。ビーム輸送ラインというと単なるビームの通り道のように聞こえますが、多くの電磁石が配置されたものです。同じ磁場の強さでもエネルギーの異なる粒子に対する効果は同じではありません。そこでビーム輸送ラインの磁石はどちらのエネルギーについても結果的にうまくビームを誘導できるような強さに調節しなければなりません。

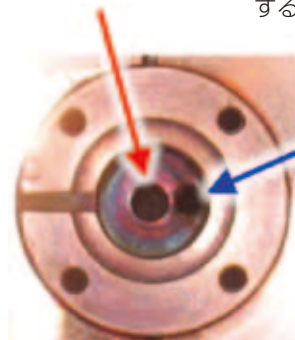
さらに入射器からのビームを各リングにスイッチするインテリジェントなビーム切り替えをつかさどるシステムが必要です。このシステムはイベントシステムと呼ばれますが、これが扱う時間の精度は上に説明した0.02秒よりずっと短く10ピコ秒(ピコ=1兆分の1)ほどです。

イベントシステムは600mの長さの入射器に沿って置かれたたくさんの装置を同時に制御してリングの求めるビームを送り出します(P.22：電子陽電子線形加速器)。

こうした困難の末、2009年4月、KEKBのLER, HERそしてPFへの3リング同時入射に成功しました(図4：同時入射前、図5：同時入射後)。4リング目のPF-ARも含めた同時入射については新しくビームラインを建設し、SuperKEKBではこれを実現する計画です。もちろん0.02秒ごとにビームが入れ替わっているので、正確に言うところ「同時」ではありません。しかし、我々人間が加速器の運転制御をしていると、複数のリングのビーム電流があたかも「同時に」増えていくのを見ることができるとのことです。かつてアメリカの研究所SLACで類似するシステムが稼働したことがありますが、エネルギーが全く違うビームを同時に手玉にとるように加速、振り分けする手法は世界初めのものです。この技術は、高いクォリティーのビームを常に必要とする現代の加速器施設において大きな貢献となっています。

SuperKEKBでは、高いルミノシティを得るために蓄積ビームの寿命が600秒と大変短くなり、他のリングへの入射を気にすることなく常にビームを補充し続けることのできる4リング同時入射は、不可欠なものとなります。

標的：一辺 5mm KEKB-LER 入射時に、陽電子を生成するために電子ビームを当てます。



孔：直径 5 mm
 KEKB-HER と PF への入射時に、電子ビームを通すための孔です。

図2. 陽電子ビームを作るための標的の写真です。電子ビームは、図のこちらから向こう側に通ります。銅のブロックの中に、標的として一辺5mmのタングステンという金属が埋め込まれています。また、その隣に電子ビームが標的を避けて通るように孔を空けてあります。

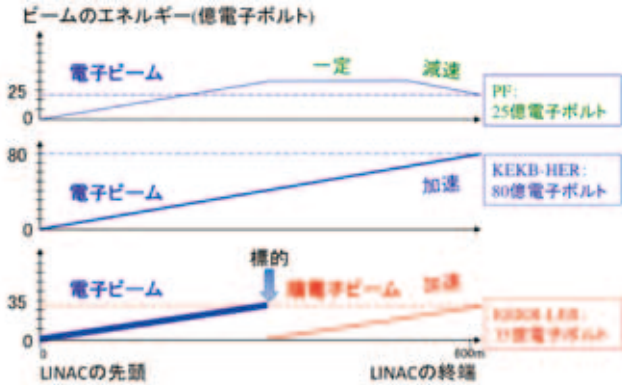


図3. 三つのリングに供給されるビームがLINACで加速される様子を表しています。横軸はLINACの先頭からの距離です。エネルギーは、億電子ボルトという単位で表しています。陽電子を作るための標的まではいずれも同じエネルギーですが、その後ろからはビームのエネルギーを加速したり減速したりして、LINACの終端ではそれぞれのリングに合ったエネルギーにしています。

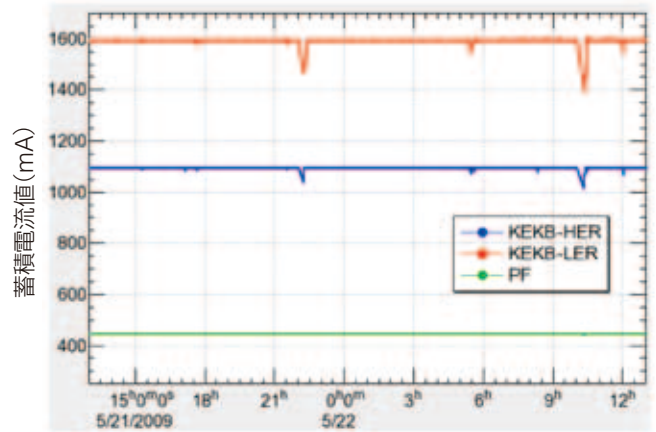


図5. 3リング同時入射が実現された後のある一日における、蓄積電流値の変化を示しています。各々のリングの蓄積電流値は1mA以下の精度で一定に保つことができました。KEKBのリングで時々蓄積電流値が落ちているのは、もう一つのリングであるPF-ARへの入射や、KEKBの状態が変わったことによるものです。PFへも常にビームを供給できるようになりました。

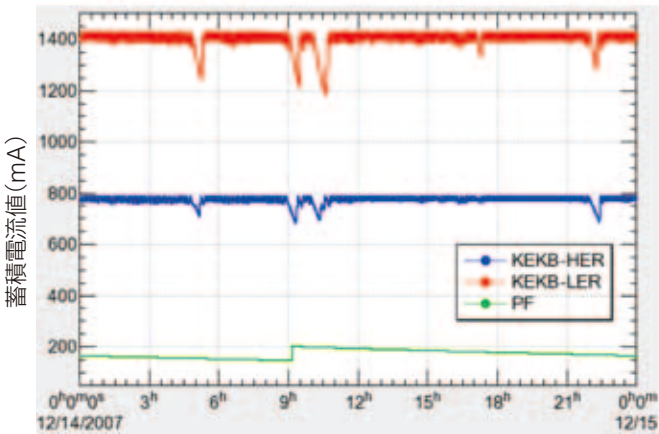


図4. 三つのリングに蓄積された電流値の、ある一日における変化を示しています。このときはまだビームモードを数分おきに切り替えながら入射していたので、KEKBの二つのリングの蓄積電流値は50mA程度の幅をもっています。またPFリングへは一日に一回入射しますが、そのときにはKEKBリングの蓄積電流は大きく下がっています。そのほかに蓄積電流が落ち込んでいるのはPF-ARリングへの入射や、KEKBリングの運転状態の悪化によるものです。

KEKBビーム輸送システム



ビーム輸送システムの役割

衝突リング(HER、LERの2つの円形加速器)には電子および陽電子を蓄積します。線型加速器で加速された電子および陽電子を衝突リングまで運び、入射することがビーム輸送システムの役割です。

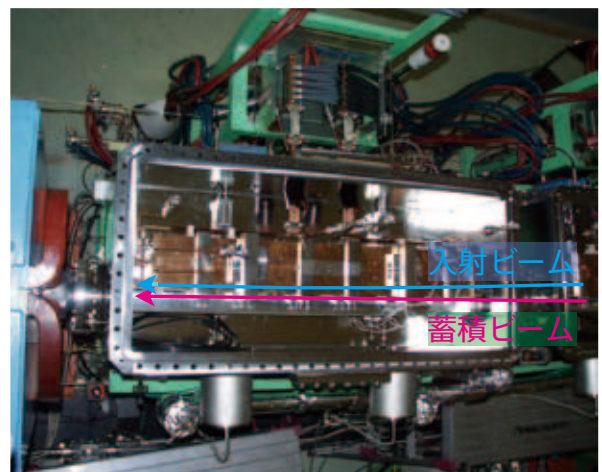
ビーム入射路

線型加速器の終端から衝突リングの入口まで、およそ470mにわたり電子・陽電子ビームを運びます。入射路トンネルには電子・陽電子ビームそれぞれのために独立したビームラインがあります。大部分の場所では上の写真のように、一方のビームラインの上に他方がのる2階建て構造になっています。ビーム輸送路は単にビームを運ぶだけでなく、ビームの質(エミッタンス、エネルギー拡がり、軌道の変化)を観測し、その情報を使って常に線型加速器のビームの質を保つ、ビーム診断部の役割も果たしています。そのための観測装置(ワイヤーモニター、スクリーンモニター、ビーム位置検出器、ビーム損失モニター)が入射路の適切な場所に設置されています。



ビーム入射部

ビーム入射部には、ビームをリングに入射するための特殊な電磁石が設置してあります。ビーム入射路の最下流部にはビームをリング側に近づけるためのセプタム電磁石(上の写真: 上から見たところ)、リング側には、すでにリング内を回っている周回ビームを入射ビームに近づけるためのキッカー電磁石、これらの2種類のパルス電磁石を使って、入射ビームをリング内のビームに合流させます。



もう少し詳しく

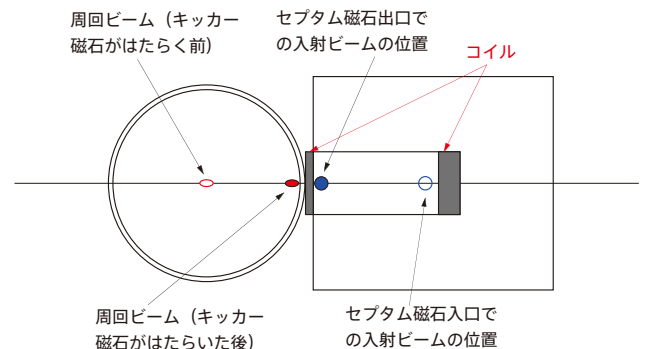
ビーム入射のしくみについてもう少し詳しく見てみましょう。HER、LERの両衝突リングには約2500個のバンチが蓄積されます。ここでバンチというのは電子または陽電子の集団のことで、長さ5 mm、幅0.2 mm、高さ0.01mm程の大きさです。リングの周長は約3000 mですから $3000/2500=1.2$ mおきにバンチが並んでいることになります。これらが光速でリング内を回っているわけです。1個のバンチの中には最大 9×10^{10} 個(9かける10の10乗個即ち900億個)の粒子(電子または陽電子)があります。一方線型加速器からやって来るビームは例えば電子ビームの場合長さ4 mm、幅0.2 mm、高さ0.2 mm程度の大きさのバンチで、1個のバンチには 2.5×10^{10} 個の粒子があります。線型加速器はこのバンチを50Hzすなわち1秒間に50個供給する能力を持っています。リング内の周回ビームのバンチの粒子数は入射ビームのバンチの粒子数の3.6倍あるので、1つのバンチに粒子を詰めるのに大体4回の入射が必要となります。

ビームをリングに入射するには周回ビームのバンチに入射ビームのバンチを合流させます。これらのバンチは光速で動いているわけですが、入射の際には向きは同じ向きなので、バンチの進行方向の位置さえ合わせられれば、合流は問題ありません。(高速道路の本線に合流するようなもの、ただし、今の場合には相手の車に合流したい!)。問題は横方向の距離と角度差(車同士の横方向の距離と進行方向の角度の差)をできるだけ小さくしたい、ということです。というのは、入射バンチがリング内に入った後、この「横方向の距離と角度差」を初期振幅(これを入射振幅といいます)として周回バンチの周りで振動を始めるからです。この振動によってバンチが真空ダクトの内壁に当たると入射ビームが失われてしまいます。横方向の距離と角度差を両方ともゼロにすることは原理的にできません。もしできたとすると、時間を逆にたどってみるとわかることですが、粒子が同じ電磁場を感じて運動しているにもかかわらずある場所から先の軌道が異なる、ということになってしまいます。したがって入射振幅を完全にゼロにすることはできません。入射振幅がより小さくできればダクト径を小さくできる、あるいは衝突点でビームをより絞ることができる(したがってルミノシティが上がる)など衝突型加速器にとってメリットが大きいので、入射振幅をできるだけ小さくする

ことが入射の仕事のすべてといっても過言ではありません。入射バンチはリングに入った後、周回バンチの周りを振動し続けるわけですが、この振動はリング固有の減衰時間(約0.05秒)がたつとおさまって周回バンチに一体化し、「合流」が完成します。この減衰はリングを周回する間に電子あるいは陽電子が放射光を出してエネルギーを失うこと、およびその失ったエネルギーを加速空洞による加速によって回復する、という過程で生じます。

キッカーとセプタム

では入射振幅は何によって決まるのでしょうか。次の図は入射ビームと周回ビームが合流する付近の断面図です。ビームは紙面に垂直にやって来るとして下さい。



ビーム輸送路の最下流、すなわちリングの入射ポイントのすぐ横にあるのがセプタム磁石と呼ばれる電磁石です。入射路上流からやってきたビームはリングの接線方向に平行になるように曲げられます(つまり角度差を小さくします)。セプタム磁石の特徴は輸送路側には強い磁場を発生するが、リング側の磁場はゼロにすることです。このため、図のようにリングとの狭いすき間に薄いコイルを配置します(これをセプタムといいます)。薄いコイルに大電流を流すため、加速器のいろいろな電磁石の中でもむずかしい磁石の一つです。一方周回ビームと入射ビームの横方向の距離を小さくするため、キッカー磁石と呼ばれる電磁石を使い、入射ビームがやってきた瞬間だけ周回ビームをセプタム磁石側に寄せます。キッカー磁石は一对の持続時間の短い(約 2×10^{-6} 秒)パルス電磁石です。これら2種類の磁石を使うことによって入射振幅を最小にします。以上見てきたように、入射振幅はセプタムの厚さで決まります。セプタムには大きな電磁力がかかるのでこれに打ち勝ってできる限り薄いセプタムを作るのが「腕の見せ所」となります。

制御システム



中央制御室

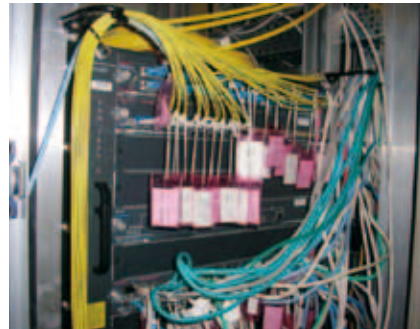
制御システムはなにをしているの？

電子と陽電子が衝突してたくさん**B中間子**が作られるように、多数の装置を瞬時に調整しています。加速器の各装置と中央制御室の間の橋渡しをしているとも言えます。装置の数が約1万、**制御情報の数は20万**にもなるので、指令を確実に伝え、情報を有効に利用するために複雑な制御システムが必要となります。

サーバ計算機群



高速ネットワーク装置



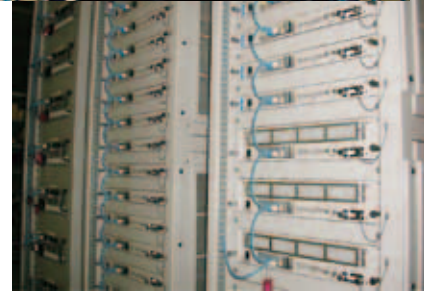
さまざまな測定装置



大容量記憶装置



実時間処理計算機



装置とのインターフェース

制御システムにはなにが使われているの？

制御は計算機が得意とする分野なので、**数多くの計算機**を使っています。サーバ計算機10台、全体操作用計算機20台、実時間自動処理用計算機100台、それらをつなぐ大容量高速ネットワーク装置、さらに数千台のマイクロコンピュータを使っています。国際的に共同開発されているEPICSというソフトウェアも使っています。

加速器本体装置



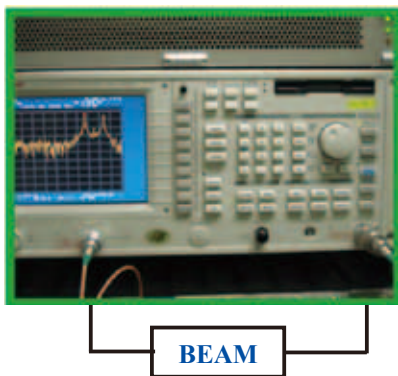
チューン測定

チューンとは

ビームの中の荷電粒子(電子とか陽電子)は主に四極電磁石で収束力と発散力を交互に受けながら中心軌道の周りをおよそ一定の振幅で振動しながら安定にリングを回っています。それぞれの粒子の水平・鉛直方向の運動をベータatron振動とよび、一周あたりの振動数をベータatronチューンと呼びます。ビームの進行方向では、それぞれの粒子は高周波加速電圧のある位相(平衡位相)の周りにおさまって振動をしています。この進行方向の運動をシンクロtron振動と呼び、一周あたりの振動数がシンクロtronチューンです。これらのチューンは、円形加速器の重要なパラメータです。

軌道を診断する

円形衝突型加速器の性能を最大限に発揮させるためには、ビームの軌道、収束状態を出来るだけデザインの状態に近づける必要があります。何も補正をしていない状態では、電磁石の強さや設置位置などにより、ビームの中心軌道はゆがみ、ビームの収束状態(ベータatron関数)も大きくゆがみます。ベータatronチューンが分からない状態では、ベータatron関数をもとよりゆがんだ中心軌道(閉軌道)の補正もままなりませんので、リングにビームが蓄積出来たあとまず第一にベータatronチューンを測定する必要があります。このような測定では、当然蓄積電流は低く、ごく小さなバンチ電流のバンチが多く回っています。そのため、リングの中にある全部のバンチをベータatronチューンに近い周波数付近を周波数を変えながら励振(スイープ)し、一番良く反応するところを高感度のスペクトラムアナライザを使って探す、という方法をとります。



一般にベータatronチューンはリングのある一箇所ですべて測定されます。この振動測定はビームの振動をビームの周回周波数でサンプリングしていると言えますので、測定出来る周波数の上限は周回周波数の半分になります(サンプリング定理)。従って、この測定の有効範囲はチューンの小数点以下の部分で、かつ0.5より下の部分に限られます。チューンの整数部は閉軌道の山を数える事でわかり、チューンが0.5より上か下かについては、収束磁石の収束を少し変えてみて、測定値がどちらに動くかによって判別する事ができます。チューンが整数、あるいは0.5に近いあたりはビームが不安定で、知らないうちに超えてしまう事はありませぬので、チューンの端数測定だけで大丈夫です。

ダイナミックに変化するベータatronチューン

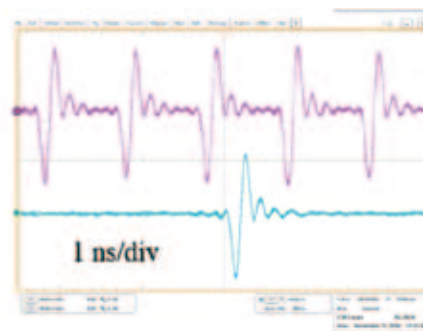
荷電粒子が密に集まったバンチになると、バンチは四極電磁石以外にも様々な電磁力を受け、そのためベータatronチューンが変化します。

- (1) バンチの電磁場が真空容器の凸凹で反射し、反射電磁場がバンチに作用するとき
- (2) 真空容器が円筒形でないため、壁に流れる壁電流のアンバランスがおき収束発散作用が生じるとき
- (3) 陽電子リングで作られた電子雲や電子リング中に存在するイオンなどが引き起こす空間電荷力による収束発散作用が大きいつき
- (4) 陽電子バンチと電子バンチとの衝突によってお互いを収束する力(ビームビーム力)が働くと、など

これらの効果によって変化するベータatronチューンを測定する事は、ビームを安定に衝突させるのに必須であるばかりでなく、ビームの集団効果を研究するのにも大いに役立ちます。この研究のためには、一つ一つのバンチのベータatronチューンを別々に測定する必要があります。

バンチ毎のベータatronチューン測定

大電流蓄積中のビームは、バンチフィードバックシステムによって安定化されているため先に述べた方法で励振しチューン測定するのは非常に困難です。また、衝突中のビームは強力なビームビーム力のため複雑な振る舞いをします。このため、リング中に衝突しないバンチ(パイロットバンチ)を入れておき、パイロットバンチだけを励振、測定する事をします。こうすることで、衝突中でも連続的にチューンを測定でき、ルミノシティが高いが不安定な境界に近いベータatronチューンでも安定して運転できています。



高速スイッチによるバンチ信号の切り出し

SuperKEKBにむけて

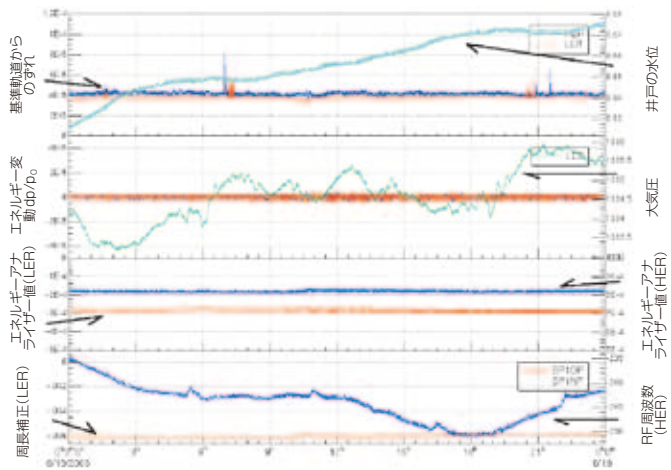
SuperKEKBではこれらの装置に加えて、リング内の多くの箇所で一つのバンチだけ切り出してビームの位置を毎回毎に観測する装置を追加する予定です。パイロットバンチをベータatron振動数で連続的に励振し、その振動を多くの地点で観測する事によりモニター間のベータatron振動の位相の進みがわかりますので、リングのベータatron関数の変化を衝突実験中でも観測、補正することが可能となり、さらに精密な軌道の制御、高いルミノシティの維持が可能になると期待しています。

加速器が感じる大地の動き

加速器は素粒子実験の道具でもあるが、加速器自身が大地の振動検出器にもなるということをご存知でしょうか。直接大地を揺るがす地震はもとより、大気圧による大地の揺らぎ、潮汐力による揺らぎまで観測されます。

加速器のエネルギー変動

KEKB加速器の場合ビームの位置は約450個のボタン電極(BPM)により常時観測されています。ビームの位置とその場所のディスページョンの内積をとると、リング全体のエネルギーが求められる。それを時間を追って表示したのが図1の上から2番目のグラフで、その変動の内、速い成分(周期1-2分程度)は dp/p_0 で 5×10^{-6} 程度が常時観測されている。KEKBではエネルギー変動を、RF周波数を変えて約20秒に1回、周長補正することによって一定に保っている。図1の4番目のグラフがその補正量で15-20 Hz、全長3000 mのKEKB加速器において、周長換算で90-120 m程度補正している。この dp/p_0 およびその補正のRF周波数などを見ていると、加速器のいろいろな変動を観測することが出来る。



地震

図2は2005年3月29日に、KEKから6000 km離れたスマトラ地震(M 8.7)の時の理想軌道からのずれ、 dp/p_0 および周長変化などを示している。人間にはまったく感じないが加速器では dp/p_0 最大振幅 1.5×10^{-4} がかんそくされ、しかも揺れが数時間持続しているのがわかる。つまり地球を何周もしているのが広帯域地震計を使わなくとも、加速器の状態から観測される。図3は

2006年5月16日に、8000 km離れたニュージーランド地震(M 7.5)を観測したもので、大きな地震なら(M 7クラス)地球上どこで起こっても観測することが出来る。

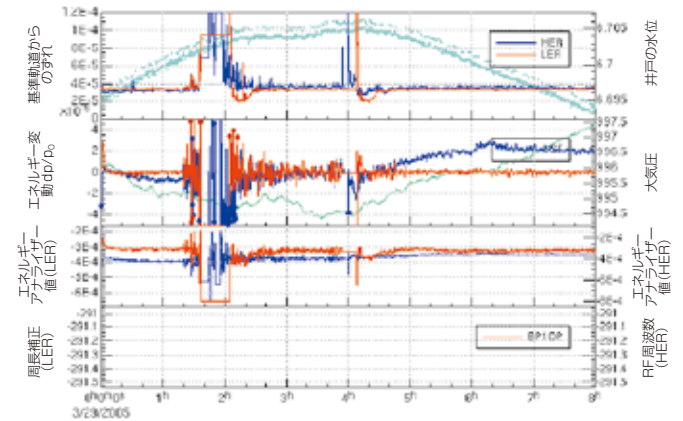


図2 スマトラ地震

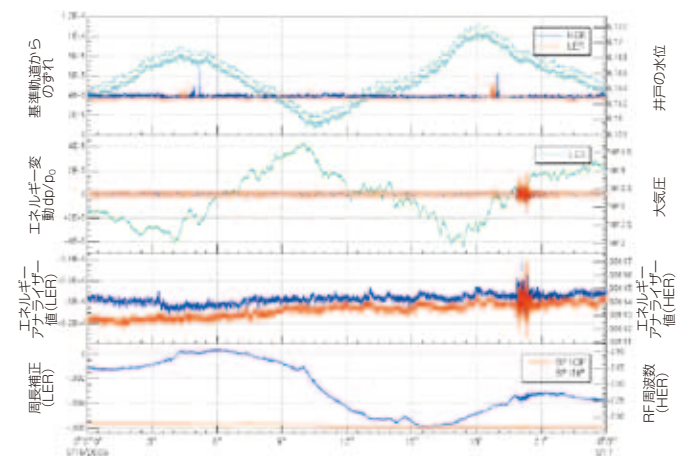


図3 ニュージーランド地震

台風

図4は2004年10月20日の台風(990 hPa)の通過による加速器の dp/p_0 および周長変化を示したものです。25 hPaで周長が450ミクロン増加している。図4の周長は符号を変えて相関がよく分かるようにしている。KEKBリングを支えている大地を一体のものとして変化率をヤング率で表すと20 GPaとなる。大気圧の変化にも敏感に反応している。

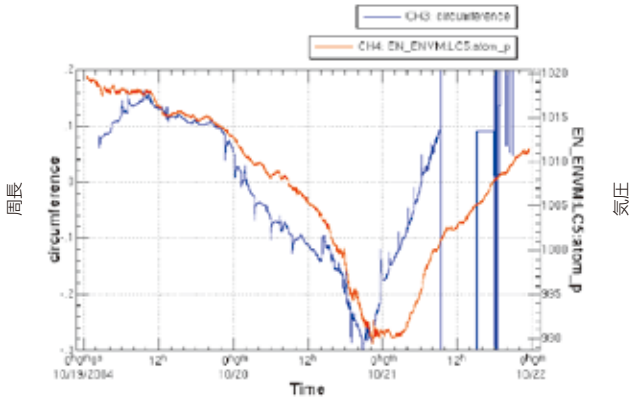


図4 台風による気圧変動と周長変化

潮汐力

図5は2006年5月15日の銚子港の潮の満ち引きと加速器の周長変化を示した。よく一致しているのがグラフから読み取れる。これからヤング率を出すと22 GPaで、大気圧から出した20 GPaとよく合っている。図6は2002年3月から6月の4ヶ月間の周長変化の周波数分布を生田氏が示した。当然ではあるが、月による潮汐の周期とよく合っている。また太陽と月による潮汐力の強さの比が計算値とぴったり一致している。

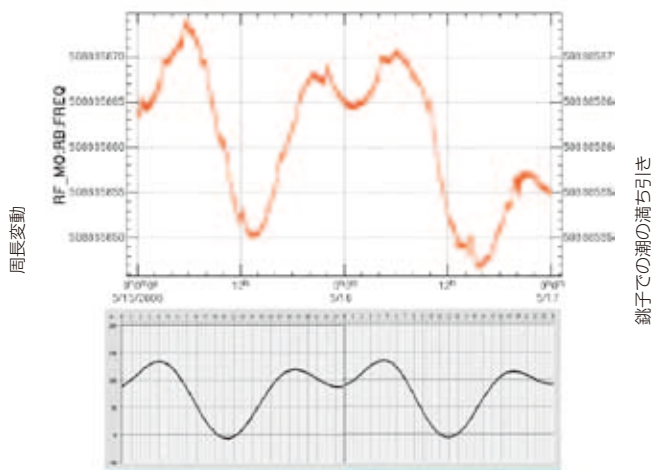


図5 周長変動と銚子での潮の満ち引き

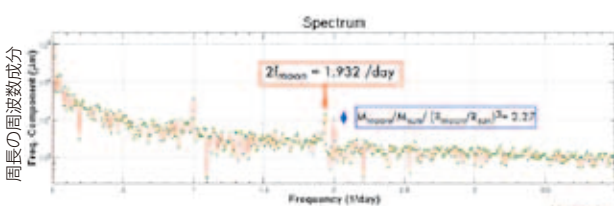


図6 周長の周波数成分

大潮、小潮

図7のRF周波数補正值を見ると約5時間置きに2 Hz程度の三角形のとんがりが見られる。この原因はまだ明らかにされていないが常時観測されている。2 Hzといえば周長換算で10 μ m程度の変化でまったく問題はないが原因を特定したいとは常々思っている。しかしこのお陰で別のものもグラフから読み取れる。図8のRF周波数補正值を見てもらいたい。図7と違って例の三角形が小さくなっているのがわかる。よく見ると何のことはなくただ縦軸がオートスケールのために2 Hzが小さく見えるだけのことである。どうして全体の変化が大きくなったかという大潮のため潮汐力が目立っているからで、逆に言うところこの三角形が大きく見える時が小潮で、あまり目立たない時が大潮である。いつも加速器だけに没頭していても外界の動きが見てとれる。

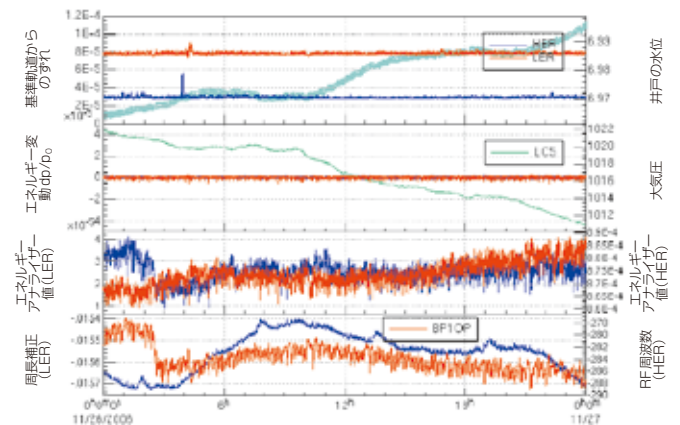


図7 小潮時

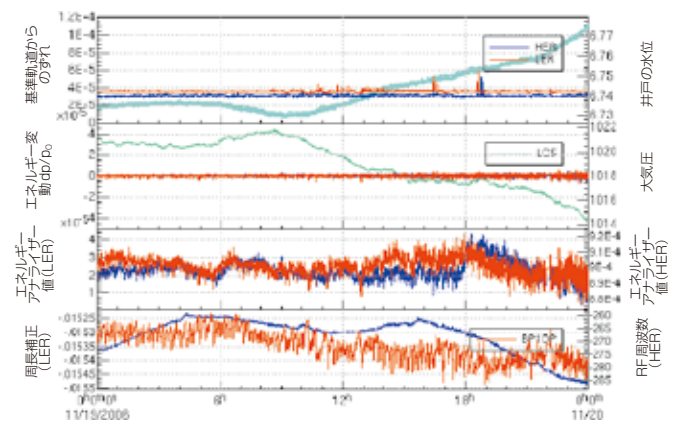


図8 大潮時

もっと
知りたい! SuperKEKB加速器

