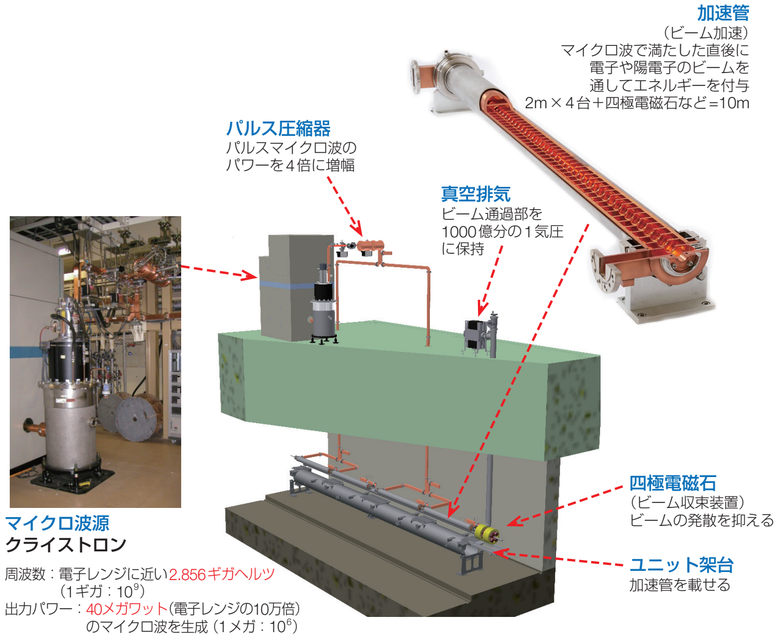
高周波加速管

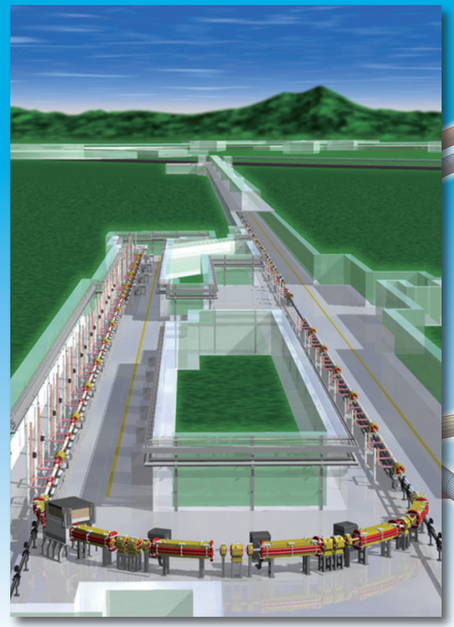
鏡面加工した無酸素銅で作った全長2mのマイクロ波装置

加速管内に充満させたマイクロ波によって、電子(e^-)や陽電子(e^+)を4千万電子ボルトまで加速します。この加速管を複数台使って数十億電子ボルトの高エネルギービームを生成して、素粒子実験用衝突リング(SuperKEKB)や生命・物質の観察用光工場リングへ供給します。



標準加速ユニット (10m)×56ユニット=560m

地上のクライストロンから地下5mにあるトンネル内の加速管4台へマイクロ波を供給し、標準ユニット10mで1.6億電子ボルトのエネルギーを付与します



LINAC リニアック

電子陽電子入射器

5つのリングに高速入射!

高エネルギー加速器研究機構／電子陽電子入射器

第2版
2023.9

電子陽電子入射器LINAC（リニアック）

◆電子陽電子入射器は、5つのリング型加速器（リング）へ電子ビーム・陽電子ビームを供給するための、線形加速器で、LINAC（リニアック）とも呼びます。リングで行われる実験に必要なビームを供給するという重要な役割を担った、5つのリングの大元となる加速器です。

◆5つのリングは、PF、PF-AR、SuperKEKB-HER、-LER、-DR。各リングへは下表のように、異なるエネルギー、異なる電荷量の電子や陽電子のビームを、50Hzという高速で振り分けて供給しています。これは加速電場や電磁石磁場を50Hzで切り替えることにより実現しています。

◆KEKのLINACは全長700mで世界最大級。1日24時間稼働し、年間約250日運転しています。

J型全長700m, 電子70億, 陽電子40億電子ボルト
4リング入射（DRを含めると5リング入射）

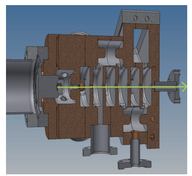
高周波(RF)電子銃

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

SuperKEKBの入射を行っている新型RF電子銃

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。

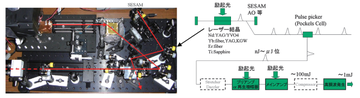


高周波(RF)電子銃とは

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。

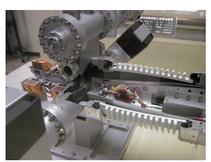
光陰極用の紫外線レーザー

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、赤外線の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。



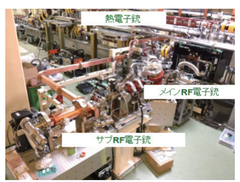
熱電子銃

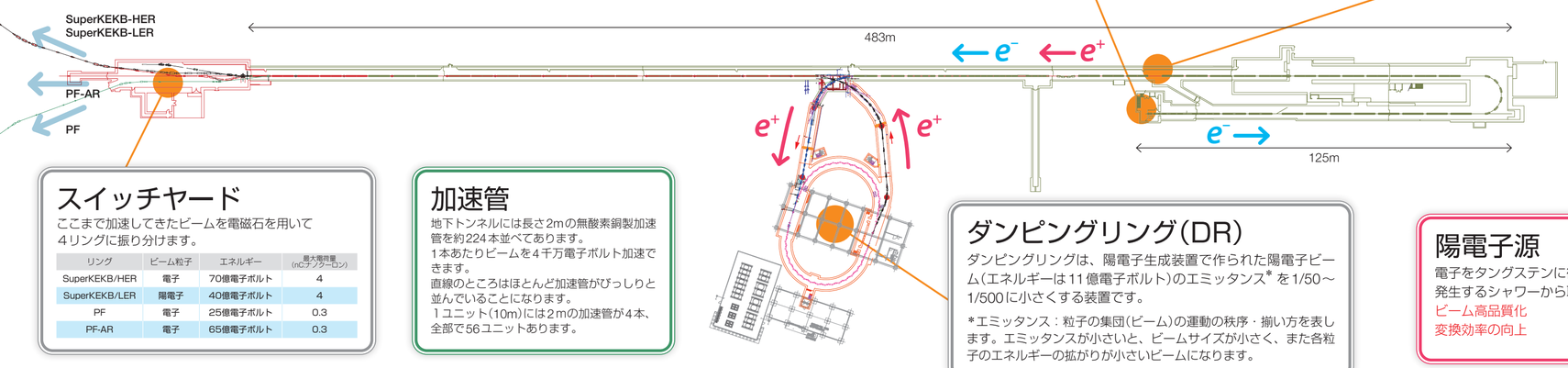
SuperKEKB用パルス電子ビームを発生させます。
電流値は最大で14アンペア（ピーク値）にもなります。



電子源

熱電子銃と2台のRF電子銃があり、それぞれ陽電子の生成とSuperKEKBへの電子の入射に使われています。





スイッチヤード

ここまで加速してきたビームを電磁石を用いて4リングに振り分けます。

リング	ビーム粒子	エネルギー	最大電荷量 (nCナノクーロン)
SuperKEKB/HER	電子	70億電子ボルト	4
SuperKEKB/LER	陽電子	40億電子ボルト	4
PF	電子	25億電子ボルト	0.3
PF-AR	電子	65億電子ボルト	0.3

加速管

地下トンネルには長さ2mの無酸素銅製加速管を約224本並べてあります。
1本あたりビームを4千万電子ボルト加速できます。
直線のところはほとんど加速管がびっしりと並んでいることになります。
1ユニット（10m）には2mの加速管が4本、全部で56ユニットあります。

ダンピングリング（DR）

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（エネルギーは11億電子ボルト）のエミッタンス*を1/50～1/500に小さくする装置です。

*エミッタンス：粒子の集団（ビーム）の運動の秩序・揃い方を表します。エミッタンスが小さいと、ビームサイズが小さく、また各粒子のエネルギーの拡がりが小さいビームになります。

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

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。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。これは宇宙の謎の一つですが幸いな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、フラックスコンセントレータと呼ばれるパルスソレノイド（図3）を開発しています。これにより5テスラの強い磁場が得られ、捕獲できる陽電子の数が、これまでの4倍以上になりました。

電磁シャワーの概念図

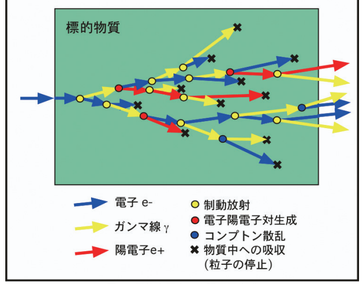


図2. 標的金属内での陽電子生成

図1. 陽電子生成標的

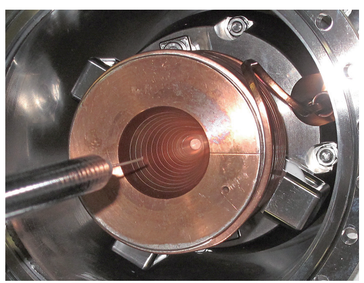


図3. 陽電子収束用フラックスコンセントレータ