

## 1 はじめに

シンクロトロンは、電磁石系、高周波加速系及真空系である。電磁石系は、ローレンツ力

$$F = q(E + v \times B) \quad (1.1)$$

によって荷電粒子に閉軌道(closed orbit)を与え、また粒子を閉軌道の周りに収束させるはたらきをもつ。閉軌道を作るのは偏向電磁石がつくる双極磁場であり、収束力は四極電磁石がつくる四極磁場によって与えられる。高周波加速系は、高周波加速空洞(胴)中の高周波電場によって荷電粒子を加速し、また粒子を周回方向にバンチする。真空系は、周回する粒子が気体との衝突によって失われないように、ビームが通過する領域を真空に保つ。

シンクロトロンの基本的性質を考える場合、これらの基本要素のみで構成された「純粹リング」を検討すればよい。しかし、実際のシンクロトロンではこれらだけでは不十分で、ビームをどこからかもってきてリングに入れなければ加速できないし、加速したビームは取り出さなければ利用できない。

ビームをリングに入れる過程を入射(injection)と呼称し、加速したビームをリングから取り出す過程を出射あるいは取り出し(extraction)と呼称することとする。

入出射には、セプタム電磁石(septum magnet)、バンプ電磁石(bump magnet)及キッカ電磁石(kicker magnet)等の特徴的な電磁石が使用される。これらはいずれも双極電磁石(dipole magnet)である。双極電磁石とは対向するN極S極をもち、これらの磁極間に均一な磁場を発生させビームを偏向させる役割をもつ電磁石である。入射部や出射部は狭い空間に複雑な構造の装置を詰め込むので、ビームが通過する領域(physical aperture)が十分とれずビーム損失の原因となったり、設計上の無理から故障しやすかったりする。あるいは、入出射用電磁石がリングの軌道上に持ち込む誤差磁場によってシンクロトロンのビーム性能が劣化したりする。これらの問題は、いずれもシンクロトロンの加速器としての性能を左右する。

本講義では、シンクロトロンに関する基本的なことがら、例えばベータトロン振動、高周波加速

やダンピング等についてある程度習得済みであることを前提して、入出射に使用する電磁石について述べる。

なお、特にことわりのない場合、単位は全てSI単位系を使用している。

## 2 入 射

入射は、前段の加速器(ライナックやシンクロトロン)からのビームをリングのアクセプタンス(ビームが障害物に衝突することなく安定に周回できる位相空間上の領域)の内側に入れる過程である。図2.1参照。

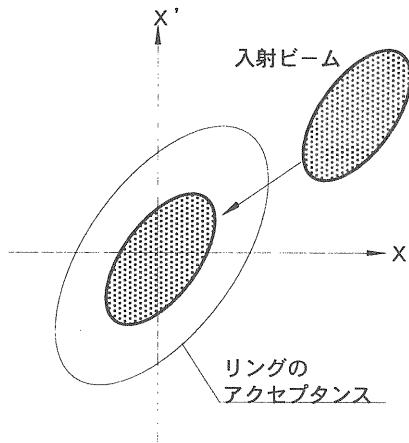


図2.1 リングへの入射

入射において問題となるのは、

入射ビームとリングのアクセプタンスの間にある真空ダクト壁やリングの電磁石等の障害物をどのようにしてよけて入射するか。

Liouville'sの定理に抵触することなく既に周回しているビーム(バンチ)に追加入射するためにはどうしたらよいか。

である。これらの問題を解決するために、on-axis入射、off-axis入射、one-turn入射、multi-turn入射、荷電変換入射、painting入射等が行われている。

### 2.1 on-axis入射

on-axis入射は、最も単純かつ基本的な入射方式で、シンクロトロンのコミッショニング(commissioning)において最初に試される。ちなみに、コミッショニングとは、加速器の建設や大規模な改造工事の後に最初にビームを通し調整する過程である。加速器の運転上の華でもある。

入射ラインからのビームを強引にシンクロトロンに入射できるだろうか？リングには偏向電磁石やら四極電磁石やらが配置されているので、これらを避けながら入射するためにはリングの平衡軌

道に対してある程度大きな角度でビームを打ち込む必要がある。大きな角度で打ち込まれたビームは平衡軌道の周りを大振幅で振動し、図2.1.1のように真空ダクトの内壁(physical aperture)に衝突して失われる。リングのダクト口径は、周回するビームに対して必要十分な程度しか準備しないのが普通である。

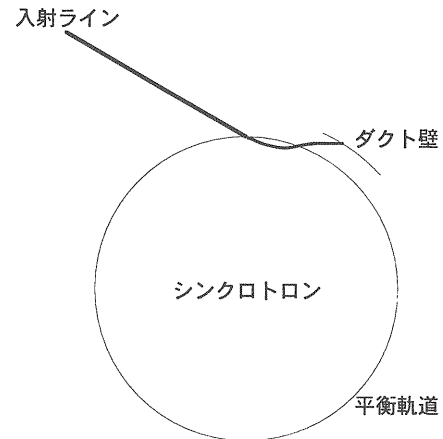


図2.1.1 強引な入射は無理

そこで、図2.1.2のように入射軌道が平衡軌道を横切る位置にビームを蹴る電磁石(キッカ電磁)を配置し、ビームの通過に合わせて励磁すれば、図2.1.3のようにビームを平衡軌道にのせることができる。ビームがリングを1周して戻ってくるまでにキッカ電磁石の励磁をゼロに戻さないと、図2.1.4のようにビームは再び蹴られてダクト壁に衝突して失われる。

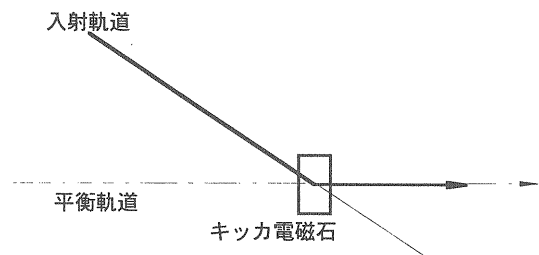


図2.1.2 on-axis入射の原理

このような入射方式をon-axis入射と呼ぶ。この方法では、Liouville'sの定理によって既に周回しているバンチにビームを追加することはできない。

しかし、図2.1.5のように、さらに短いパルス幅のキッカ電磁石を使用して、隣接バンチの間にパルスの立上、立下を行えば、リングの別のRFバケットにビームを入射することが可能になる。

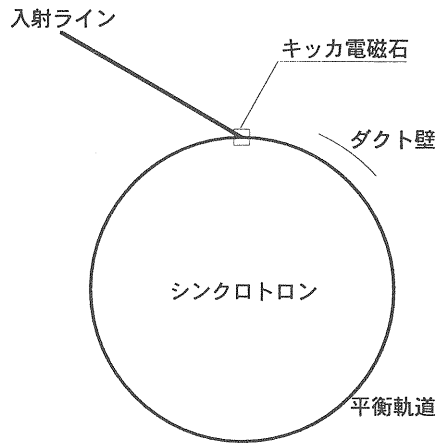


図2.1.3 on-axis入射

以上がon-axis入射の原理であるが、実際のon-axis入射の機器構成はもう少し複雑であり、図2.1.6のようにセプタム電磁石とキッカ電磁石を組み合わせた構成となる。

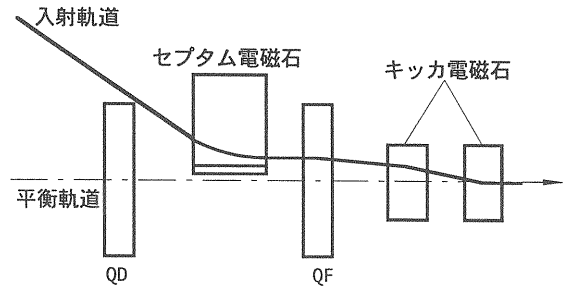


図2.1.6 実際のon-axis入射の例

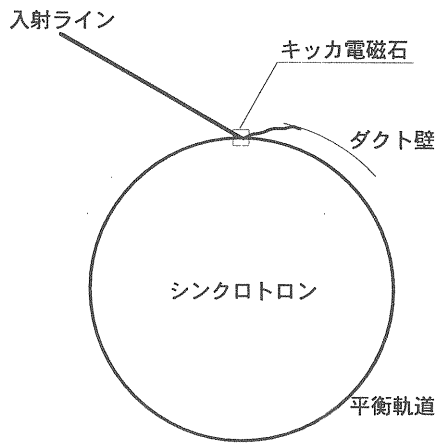


図2.1.4 キッカ電磁石を切らない場合

キッカ電磁石は高速応答(一般にはMHz以上)が要求されるパルス偏向電磁石であるので、鉄芯にフェライトコアを使用する。フェライトの磁気特性(飽和磁束密度)から、gap中磁場は0.2~0.4Tが上限である。また、電源電圧にも上限がありあまり鉄芯長(電圧 $\propto$ 鉄芯長)を長くできない。したがって、磁場強度 $\times$ 磁場長で決まる蹴り角には上限がある。設置スペースが確保できる場合は複数台のキッカ電磁石を使用し合計の蹴り角を稼ぐ場合もあるが、それでも一般にはキッカ電磁石のみで近傍の四極電磁石を回避できるほどの大きな蹴り角は得られない。

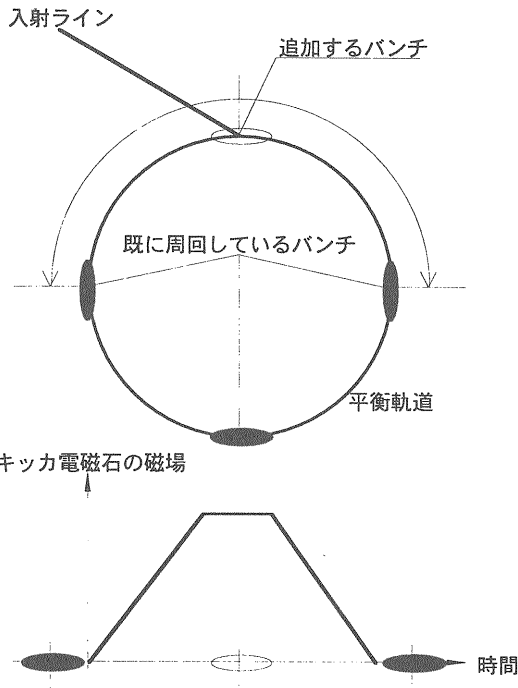


図2.1.5 on-axis入射によるバンチの追加

足りない蹴り角はセプタム電磁石の併用で補う。セプタム電磁石とは、入射軌道上にのみ磁場を発生させてビームを偏向するが、平衡軌道上には磁場を作らない偏向電磁石である。キッカ電磁石のような高速のパルス励磁の必要はない。セプタム導体厚は励磁電流の実効値によって決まるので、セプタム電磁石を何台かに分割し、ビームから離れるにしたがってセプタム導体厚の大きい(=励磁電流台=蹴り角大)ものを使用することが多い。セプタム厚をできるだけ小さくするため(キッカ電磁石の負担を減らすため)、最下流のセプタム電磁石はパルス励磁し真空中に設置することが多い。

入射軌道と平衡軌道の間でセプタムを挟むことになるので、入射ビームと周回ビームの間隔(turn separation)が大きくとれる位置にセプタム電磁石の出口がくるように配置する。図2.1.7参照。キッカ電磁石の蹴り角とturn separationの関係を以下に示す。

$$d = \theta \sqrt{\beta_x \beta_y} \sin \mu - \sqrt{\epsilon \beta_x} - \sqrt{\epsilon \beta_y} \quad (2.1.1)$$

- d [m] turn separation
- $\theta$  [rad] キッカ電磁石蹴り角
- $\beta_k$  [m] キッカ電磁石におけるベータ函数
- $\beta_s$  [m] セプタム電磁石出口におけるベータ函数
- $\mu$  [rad] 位相差

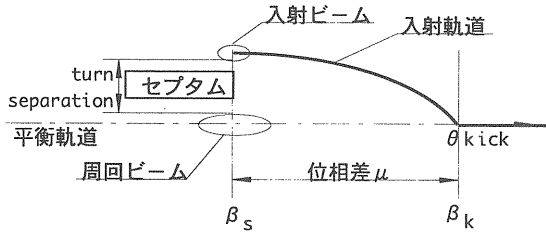


図2.1.7 キッカ電磁石による軌道変位

水平面内の入射の場合、 $\beta_x$ の大きくなる収束用四極電磁石(QF)の直上流にセプタム電磁石を設置するが多い。

以上がセプタム電磁石+キッカ電磁石を用いた on-axis入射の概要である。位相空間で説明すると、「on-axis入射とはアクセプタンスの中心に入射する方法」である。図2.1.6において、最終段のキッカ電磁石を出た位置で、入射ビームはアクセプタンスの中心( $X=X'=0$ )にいる。後述する入射軌道の調整とマッチングが十分なら、リングのアクセプタンスと同程度以下のエミッタンスのビームまで入射できる。

セプタム電磁石+キッカ電磁石の方法以外に、k後述する荷電変換入射によってもon-axis入射は可能である。荷電変換入射の場合、同じパンチ同じ位相空間にビームを追加入射できる。

## 2.2 入射軌道の調整とマッチング

次の入射方式の解説に入る前に、入射軌道の調整とマッチング(matching)について述べる。入射軌道の調整とマッチングの目的は、入射後リング中でのビームの振動(位相空間内での運動)を最小限にして、ビームサイズの増大を抑制したり、入射効率を上げることである。

### (1) 入射軌道の位置と角度の調整

リングに入射された粒子の位置 $X$ と角度 $X'$ が平衡軌道から外れていると図2.2.1に示すように平衡軌道の周りにベータatron振動する。

入射後のビームの運動が最少になるよう(=アクセプタンスの中心に入射するよう)に入射軌道を調

整する必要がある。調整すべきパラメータは、水平垂直各方向の位置と角度： $X, X', Y, Y'$ の合計4個である。水平方向2台と垂直方向2台の合計4台のステアリング電磁石(偏向電磁石の一種で軌道の微調整に使用する)と入射ビームの位置と角度を検出するための位置モニタ2台が必要である。

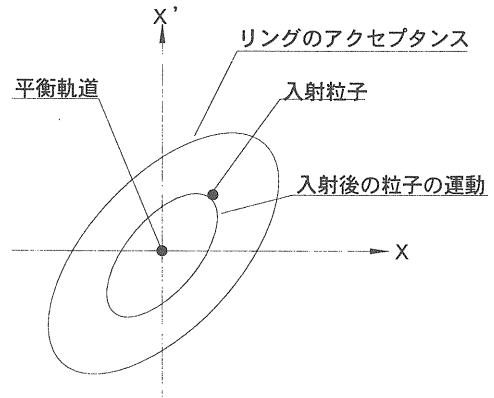


図2.2.1 入射軌道の軌道の誤差

図2.2.2にこれらの機器の配置を示す。図中では、ステアリング電磁石をXY両方向に振れるタイプ(図2.2.3)のものを2台配置した。

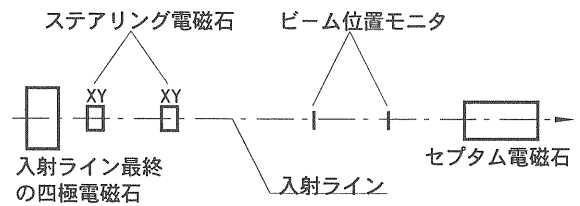


図2.2.2 入射ラインの調整

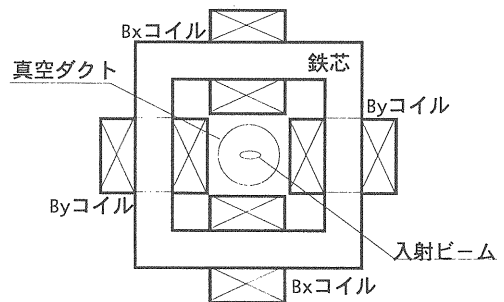


図2.2.3 XYステアリング電磁石

実際には、調整用のステアリング電磁石を四極電磁石をマタイで配置せざるを得ない場合もある。この場合、調整は面倒になる。水平方向のセプタム電磁石を軌道調整に使用する場合もある。キッカ電磁石も調整に参加する場合もあるが、キッカ電磁石は蹴り角がステアリング電磁石やセプタム電磁石に比べて小さいので調整量は微量である。

(2) Twissパラメータ( $\beta, \alpha$ )のマッチング

図2.2.4のように、入射されたビームは位相空間において、リングのアクセプタンスと相似な外接楕円で運動するので、リングの $\beta, \alpha$ と入射ラインの $\beta, \alpha$ がマッチしていないと入射後のビームのエミッタンスが増大する。(楕円の傾きは $\beta$ と $\alpha$ で決まる)

調整すべきパラメータは、水平垂直各方向の $\beta$ と $\alpha$ ： $\beta_x, \alpha_x, \beta_y, \alpha_y$ の4個である。水平方向2台と垂直方向2台の合計4台の調整用四極電磁石が必要である。これらは、後述する分散関数のマッチングと独立に行えるように、 $\eta = \eta' = 0$ の位置に配置することが望ましい。調整が簡単になる。

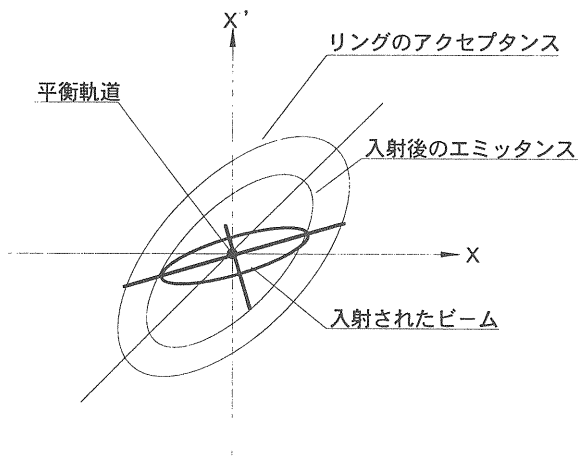


図2.2.4 Twissパラメータのミスマッチ

(3) 分散関数( $\eta, \eta'$ )マッチング

Twissパラメータのマッチングと同様に、リングと入射ラインの分散関数 $\eta$ と $\eta'$ のマッチングも必要である。

図2.2.5に示すように位相空間で考える。リングを周回するビームのうち、運動量 $\Delta P = 0$ の粒子の平衡軌道(ベータトロン振動の中心)は、 $(X, X') = (0, 0)$ である。入射点でのリングの分散関数が $\eta, \eta'$ なら、その場所での運動量 $\Delta P$ の粒子の平衡軌道は $(X, X') = (\eta \Delta P / P, \eta' \Delta P / P)$ である。完全にon-axisで入射されたビームを考える。入射ラインの入射点における分散関数が $\eta_i, \eta'_i$ なら、運動量 $\Delta P$ の粒子は $(X, X') = (\eta_i \Delta P / P, \eta'_i \Delta P / P)$ に入射される。入射後は、平衡軌道 $(\eta \Delta P / P, \eta' \Delta P / P)$ の周りをベータトロン振動する。したがって、 $\Delta P$ に由来するリング中での振動を最少=0にするためには、入射ラインとリングの分散関数をイッ

ちさせ、 $\eta = \eta_i; \eta' = \eta'_i$ とする必要がある。

一般の加速器では、水平方向の偏向のみの場合が多いので垂直方向の分散関数は0で、調整すべきパラメータは水平方向の $\eta, \eta'$ の2個にのみである。セプタム電磁石やその直前の偏向電磁石が発生する分散と合わせて四極電磁石2台で調整する。

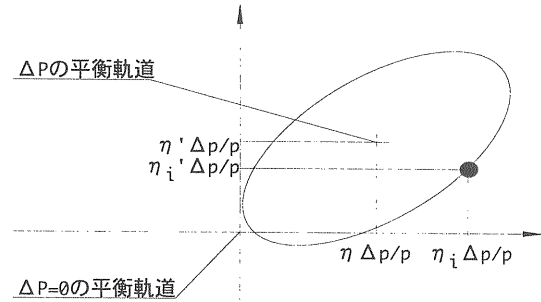


図2.2.5 分散関数のミスマッチ

普通ビームサイズを最少にするために、リングの入射点(最終段セプタム電磁石の出口)では $\eta = \eta' = 0$ と設計する。

(4) 調整の確認

入射軌道の調整誤差は、例えば入射後のリング中でのコヒーレントなベータトロン振動として高速応答の位置モニタ(ワンターンモニタ)等で直接観測できる。一方、Twissパラメータや分散関数のミスマッチは入射効率等から間接的に知る他には、リングで直接観測は難しい。

2.3 バンプ軌道

off-axis入射の解説に入る前に、バンプ軌道について述べる

図2.3.1のように軌道の一部を膨らませた部分をバンプ(bump)軌道という。

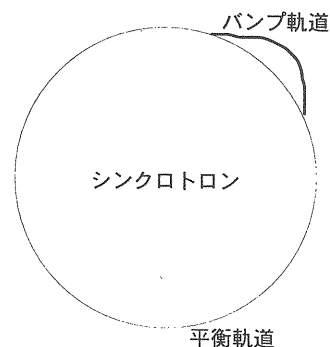


図2.3.1 バンプ軌道

シンクロトロンでは、バンプ軌道は入射や出射

のためだけでなく、ビームのコリメーション(ビームの一部をphysical apertureにあててビームの外形を成型すること)や各種のマシスタディ(加速器の利用ではなく加速器そのものを対象とした実験のこと)等にも使用する。バンプ軌道は専用のバンプ電磁石だけでなく、リングのステアリング電磁石(軌道補正用の双極電磁石)を使用して形成する場合もある。

軌道の膨らみが局在しており、リングの他の部分に影響していない状況を「バンプが閉じている」という。また、バンプが完全に閉じずに影響がリング全周に及んでいる状況を「バンプがしみだしている」という。

図2.3.2のようにベータatron振動の位相が $\pi$ だけ離れた位置に2台の偏向電磁石(バンプ電磁石)を配置すればバンプ軌道を作ることができる。

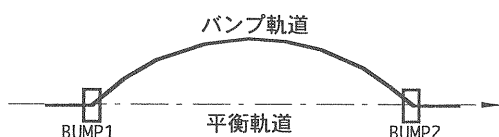


図2.3.2  $\pi$ -バンプ

この場合、リングのoptics(ベータatron振動の位相の進み方)が変化すると、バンプ電磁石の励磁量を調整してもバンプが閉じなくなる。また、このような絶妙の位置にバンプ電磁石を配置できるとは限らない。

図2.3.3のように4台のバンプ電磁石を使用すればバンプ電磁石の設置場所やリングのopticsに関係なく、バンプが閉じる条件を作りだせ、かつBUMP2と3の間では、バンプ電磁石の励磁量の調整によって任意の変位(X)と軌道の傾き(X')を得ることができる。

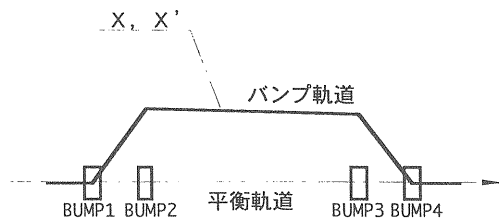


図2.3.3 4台のバンプ電磁石によるバンプ軌道

入出射では、バンプ軌道を一時的(リングの1周回~数百周回のパルス幅)に形成する。パルスの立ち上がりから立ち下りの全ての状態でバンプが閉じていなければならない。最も簡単な方法は、バンプ電磁石を全て同じ構造にして電源に対して

直列接続し、かつすべてのバンプ電磁石を同じドリフトスペースに配置することである。リングのopticsの変更や電源の出力波形のエラーに関係なくバンプを閉じることができる。図2.3.4参照。

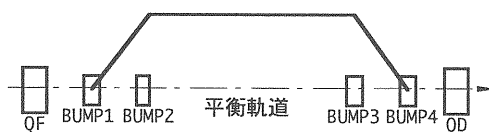


図2.3.4 直列接続の4台バンプ電磁石

しかし、実際にはバンプ軌道が四極電磁石あるいは六極電磁石をマタイだりして、バンプ電磁石の励磁量を個別に調整せざるをえない場合が多い。図2.3.5参照。

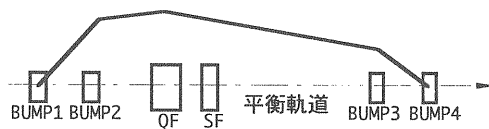


図2.3.5 バンプ電磁石の実際の配置

なお、バンプ電磁石は偏向電磁石の一種なので、精密な検討をする場合、エッジ(端面)の収束力を考慮する必要がある。

## 2.4 off-axis入射

入射ビームのエミッタンスがリングのアクセプタンスに対して十分小さい場合、アクセプタンスの中心を外して入射する方法がある。これがoff-axis入射である。図2.4.1のようにセプタム電磁石とバンプ軌道の組み合わせで、アクセプタンス中にビームを入射する。

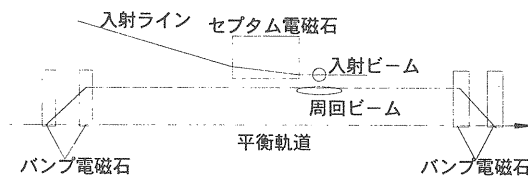


図2.4.1 off-axis入射の構成

off-axis入射の目的は、Liouville'sの定理に抵触することなく同一バンチ内に追加入射することである。電子シンクロトロンの場合は放射減衰を利用して、陽子シンクロトロンの場合は可変バンプを使用したmulti-turn入射によって同一バンチ内に追加入射する。後述するpainting入射も

off-axis入射の一種である。

電子シンクロトロンにおける放射減衰を利用したoff-axis入射(追加入射)の定性的な過程は以下の通りである。

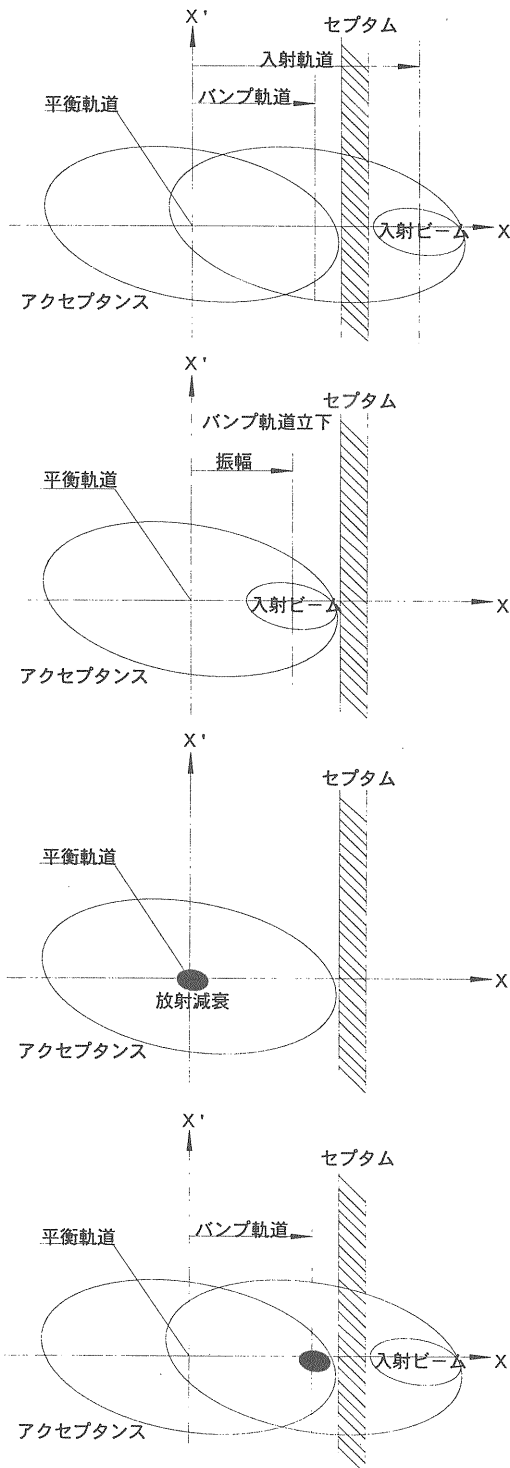


図2.4.2 off-axis入射 電子の場合

図2.4.2最上段のように、バンパ軌道を立ち上げてリングのアクセプタンスが入射ビームを内含するようにする。

入射したビームがリングを一周して再びセプタムの位置まで戻ってくるまでにバンパ軌道を立ち下げれば、ビームはセプタムに衝突することなく周回を続ける。二段目。

入射したビームは(入射軌道-バンパ軌道)の振幅で平衡軌道の周りを振動するが、放射減衰によって振幅は一定値まで小さくなる。最終的なエミッタンスは、放射減衰と量子励起の競合で決まる。

再びバンパ軌道を立ち上げて入射の過程を繰り返すが、先に入射したビームの振動は減衰しているのでセプタムにはぶつからない。

入射は、バンパ軌道が最も立ち上がったタイミングで行うので、位相空間上の同じ場所に繰り返し入射することになるが、放射減衰によって最終的にはビームは平衡軌道の近傍に蓄積していく。この方法での入射の繰り返し間隔は、リングの放射減衰の時定数程度となる。

$$\begin{aligned} &\text{ベータatron振動の放射減衰の時定数[msec]} \\ &\sim 75.4 \times \text{軌道半径[m]} \times \text{周長[km]} / \text{電子エネルギー[GeV]}^3 \\ &\hspace{15em} (2.4.1) \end{aligned}$$

## 2.5 one-turn入射

入射の過程がリング1周回で完了する入射で、同じバンチへの追加入射は行われぬ。2.1節で説明したキッカ電磁石を使用するon-axis入射と同じ意味である。

## 2.6 multi-turn入射

multi-turn入射はoff-axis入射の一種で、時間的に変化するバンパ軌道を使用して、リングの1周回より長いバンチトレインをリングのアクセプタンスの中に次々と並べてゆく入射である。放射減衰のおきない陽子リングで、同一RFバケット内に少しでも多くのビームを積み上げる苦肉の入射方式である。同一バンチ内へビームを追加入射していくが、同じ位相空間には積み上げられないので、入射終了時のエミッタンスは入射ビームに比べてだいぶ大きくなる。

バンパ電磁石の励磁波形は、効率良くアクセプタンスをビームで埋めてゆけるような函数とする。アクセプタンスの中心付近から入射しはじめ、外周の入射で終わる場合、バンパ軌道は徐々に立ち下がっていく。

図2.6.1に機器配置を、図2.6.2に位相空間での概略状況を示す。

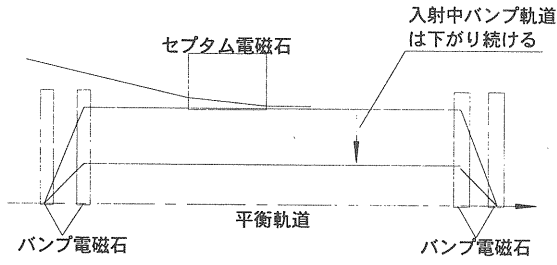


図2.6.1 multi-turn入射の機器配置

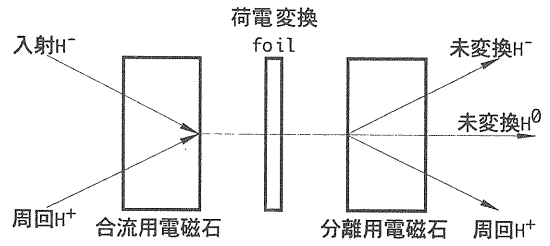


図2.7.1 H<sup>-</sup>荷電変換入射の原理

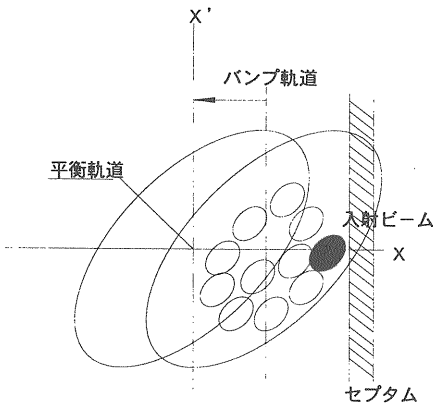
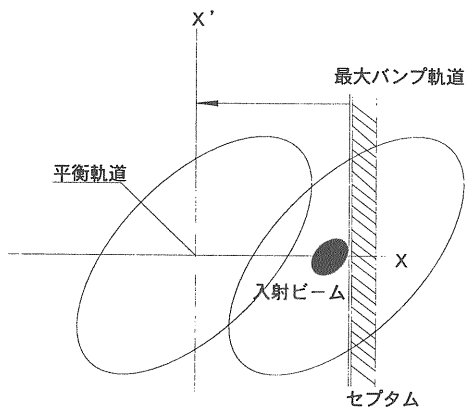


図2.6.2 multi-turn入射の状況

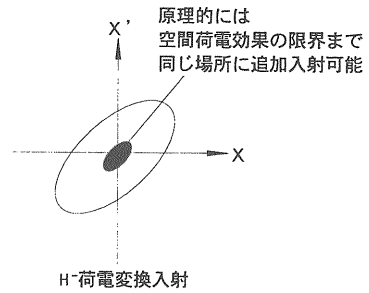


図2.7.2 H<sup>-</sup>荷電変換入射による追加入射

空間電荷効果の限界及周回ビームのfoilによる散乱の限界まで、同じRFバケットの位相空間上の同じ位置にビームを追加し続けられる。図2.7.2。

実際には周回ビームがfoilを通過する際に発生するエネルギー損失と角度発散を最小限にするために、図2.7.3のように入射時のみバンブ軌道によって周回軌道をfoilによせる。この場合、BUMP2が合流用電磁石である。

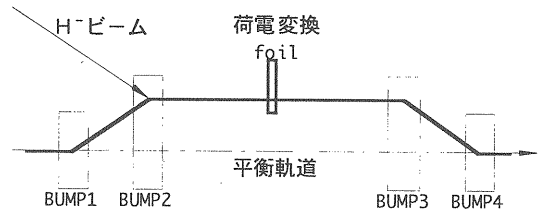


図2.7.3 入射中のみバンブ軌道を立てる  
セプタム電磁石や未変換ビーム廃棄ラインは省略している

未変換ビームは下流に設置した荷電変換foilで全てH<sup>+</sup>に変換したうえリング外のビームダンプへ廃棄する。

foilの厚さや材質は、変換効率(厚いほど効率は大きい)、周回ビームのエネルギーロス(薄いほど小さい)や角度発散(薄いほど小さい)及び製造性の観点から決める。大強度陽子加速器施設3GeV陽子シンクロトロン計画の場合、運動エネルギー400MeVの入射H<sup>-</sup>ビームに対して厚さ300 μ

## 2.7 H<sup>-</sup>荷電変換入射

H<sup>-</sup>荷電変換入射(charge exchange injection)を用いれば、Liouville'sの定理に抵触することなくon-axisで周回ビームと同じ位相空間にビームを追加入射することができる。

図2.7.1にH<sup>-</sup>荷電変換入射の原理を示す。入射H<sup>-</sup>ビームと周回H<sup>+</sup>ビームは、運動量がほとんど同じで電荷が反対なので、合流用電磁石によって同一の軌道に乗せられる。荷電変換foilの通過によってH<sup>+</sup>に変換された入射ビームは、以後周回ビームと同じ軌道上を運動する。



$\text{g/cm}^2(150\ \mu\text{m})$ の蒸着炭素膜を使用し、 $\text{H}^- \rightarrow \text{H}^+$ 荷電変換効率99.6%を得る予定である。

$\text{H}^-$ ビームの入射系を設計する場合、ローレンツストリッピング(Lorenz stripping)を考慮する必要がある。 $\text{H}^-$ の電子の束縛エネルギーは0.755eVと小さいので、電磁石の磁場中を通過すると $\text{H}^-$ ビームは容易に電子をはぎ取られて中性水素になってしまう。入射用電磁石の設計ではローレンツストリッピングを考慮しないと不必要なビーム損失を発生させることになる。陽子の運動エネルギー400MeVの場合の単位軌道長あたりのローレンツストリッピングによる $\text{H}^-$ ビームの損失率を別添図に示す。

## 2.8 painting入射

$\text{H}^-$ 荷電変換入射とmulti-turn入射の考え方を組み合わせると、位相空間においてリングのアクセプタンスの内側に任意の密度分布でビームを充填することができる。これによって、空間電荷効果の影響を最少にするような電荷密度分布でビームを入射できる。図2.8.1参照。

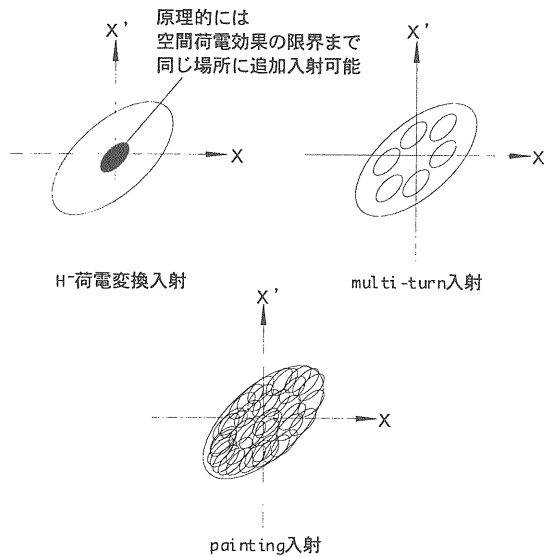


図2.8.1 painting入射

図2.8.2にpainting入射の機器構成の例を示す。主な構成機器は、荷電変換foil、shift用バンパ電磁石及びpainting用バンパ電磁石である。簡単のためにここでは水平方向のpaintingのみを扱う。

shift用バンパ電磁石は、 $\text{H}^-$ 荷電変換入射に必要なバンパ軌道を形成するためのもので、入射中は一定の励磁量を維持し、入射が終了すると立ち下げる。台形波駆動である。

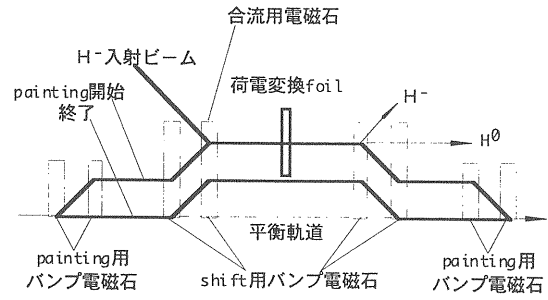


図2.8.2 painting入射の機器構成の例  
セパタム電磁石や未変換ビーム廃棄ラインは省略している

painting用バンパ電磁石は、入射中動的に変化させ、入射ラインとバンパ軌道の位置関係を変えることによって、位相空間内の任意の位置にビームを入射する。

入射ビームがfoilにあたる位置を一定にし、かつ未変換ビームの廃棄ラインを一定にするためにshift用バンパ電磁石を図のようにpainting用バンパ電磁石の内側に配置している。入射ラインはpainting中も一定の軌道である。

図2.8.2のようにバンパ軌道が最大に立ち上がった状態で、ビームは位相空間上の中心付近に入射され、painting用バンパ電磁石が立ち下がるにしたがって、周辺に入射されていく。図2.8.3参照。

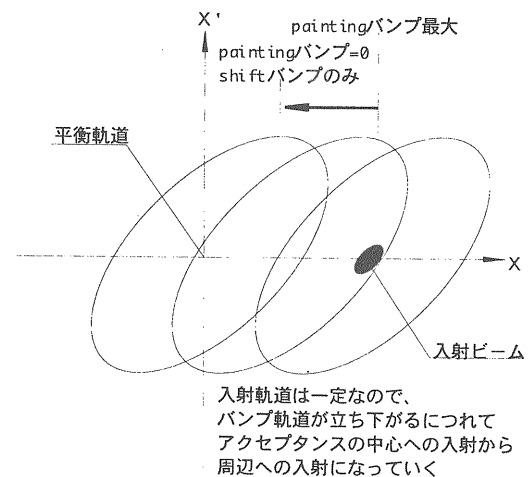


図2.8.3 paintingの様子

painting用バンパ電磁石の励磁波形は、位相空間内の電荷分布を均一にするため、 $\sqrt{t}$ ライクは波形とする。図2.8.4参照。

ところで、foil位置でのバンパ軌道の制御(位置と角度)に必要な十分なバンパ電磁石の台数は4台である。入射中に磁場が変わらない合流用電磁石を準備できればバンパ電磁石は4台でも可能である。

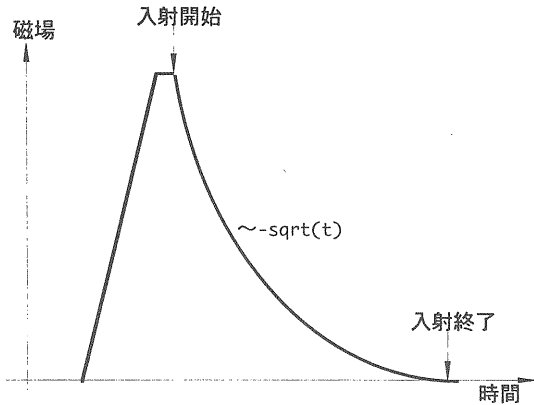


図2.8.4 painting用バンパ電磁石励磁波形

大強度陽子加速器施設3GeV陽子シンクロトロンでは、リングの四極電磁石を合流用電磁石として使用する計画である。四極電磁石は25Hzの正弦的な励磁であるが、入射時間～数百 $\mu$ secの間では一定磁場と考えられる。図2.8.5に機器配置の概念、図2.8.6にバンパ電磁石の励磁波形案を示す。

バンパ電磁石は全て真空中に設置し、フェライトコアの鉄芯とする予定である。最大磁場強度～0.2T、有効磁場長～0.6m。

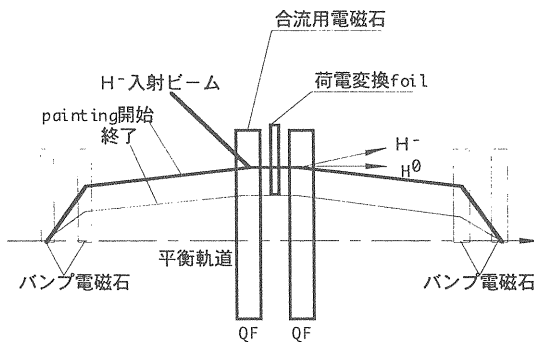


図2.8.5 大強度陽子加速器施設3GeV陽子シンクロトロンの場合の例

セプタム電磁石や未変換ビーム廃棄ラインは省略している

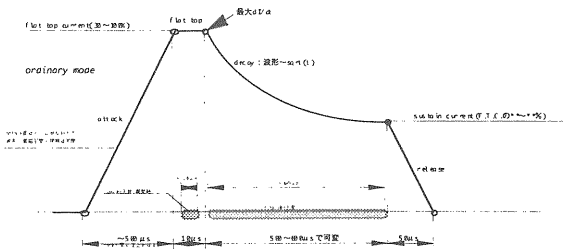


図2.8.6 バンパ電磁石の励磁波形案  
25pps出力、電磁石4台に対し電源4台

最後に各入射方式の特徴について簡単にまとめておく。

**on-axis入射**

アクセプタンスの中心へ入射する  
入射ビームのエミッタンス $\leq$ アクセプタンス  
セプタム電磁石+キッカ電磁石方式

=one-turn入射

陽子でも電子でも可能

同一バンチへの追加入射は不可

**H<sup>-</sup>荷電変換入射方式**

H<sup>-</sup>ビームが準備できる場合のみ

同一バンチ同一位相空間への追加入射可

**off-axis入射**

アクセプタンスの中心を外して入射する

入射ビームのエミッタンス $\ll$ アクセプタンス  
セプタム電磁石+固定バンパ軌道

放射減衰が期待できる電子の場合のみ可

同一バンチ同一位相空間への追加入射可

セプタム電磁石+可変バンパ軌道

=multi-turn入射

陽子の場合のみ、電子では普通やらない

同一バンチへの追加入射可

同一位相空間への追加入射は不可

**painting入射**

H<sup>-</sup>荷電変換入射+可変バンパ軌道

位相空間内へ任意の密度で入射、追加入射可

### 3 出射

出射には、速い出射(速い取り出し ; fast extraction)と遅い取り出し(slow extraction)がある。

#### 3.1 速い出射(キッカ電磁石+セプタム電磁石)

速い出射は、on-axis入射の逆の過程を行う。

キッカ電磁石を使用し、周回するバンチを丸ごと蹴り出してリングのアクセプタンスの外側へ取り出す。さらにセプタム電磁石を通過させて、リングの機器(四極電磁石等)を回避しながらビームを導いていく。既に加速されているので、入射用電磁石に比べ同じ偏向角に得るのに必要な電磁石のBL積(磁場強度×有効磁場長)を大きくしなければならない。蹴り角とBL積の関係を以下に示す。

$$\theta = BL / B\rho \quad (3.1.1)$$

$$B\rho = \text{sqrt}(T(T+2m_0c^2)) / c \quad (3.1.2)$$

$\theta$	[rad]	偏向角、蹴り角
B	[T]	磁場強度
L	[m]	有効磁場長
$\rho$	[m]	偏向半径
T	[MeV]	運動エネルギー
$m_0$	[MeV]	静止質量
c	[Mm/sec]	光速=2.99792458×10 <sup>8</sup>

例：運動エネルギー3000MeV, 静止質量938.27MeVの陽子のBρ (magnetic rigidityという)は、12.758Tmである。

一方で、加速によるベータトロン振動の減衰(電子の場合は放射減衰もある)のため、ビームサイズは、入射直後(あるいは加速途中)よりむしろ小さくなっている場合もある。アクセプタンスに比べて十分ビームサイズが小さくなっている場合、バンパ軌道を立ち上げて、キッカ電磁石の蹴り角の分担を小さくすることができる。図3.1。

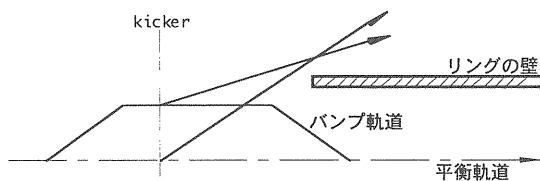


図3.1 出射用バンパ軌道

#### 3.2 遅い取り出し(共鳴+静電セプタム)

速い出射では、シンクロトロン運転繰り返し周期毎に、バンチ長程度の時間長の粒子ビームがターゲットに当てられる。

一方、原子核実験等では、検出器のパイルアップやタギングシステムにおけるアクシデンタルコインシデンスを避けるために、ビームのピーク電流値を下げ、デューティファクターを上げたいという要求がある。

ベータトロン振動に共鳴現象を引起し、共鳴によって振幅の増大した粒子から極薄セプタムによってとりだしてゆく方法がある。詳細は本書末の参考文献を参照されたい。各バンチはすこしずつ林檎の皮を薄くむくように取り出される。キッカ電磁石を使用した出射と違い、ビームの振幅は連続的に増大するので、セプタム厚の分はビームの損失になる。セプタムに高圧ワイヤを使用し、磁場でなく静電場でビームを偏向させる静電セプタムが使用されている。この場合、セプタム厚は100 μm以下が可能である。

大強度陽子加速器施設3GeV陽子シンクロトロンはブースターシンクロトロンなので、速い出射のみ計画している。出射部の構成は、11×分布定数型キッカ電磁石(in vacuum)+4×DCセプタム電磁石(out vacuum)である。ビームハローがアクセプタンス一杯に広がっている可能性があるため、出射バンパは使用しない。

## 4 入出射用電磁石

### 4.1 電磁石について

入出射に使用するセプタム電磁石、バンク電磁石及キッカ電磁石はいずれも偏向電磁石(双極電磁石)の一種であるので、偏向電磁石の設計に関する一般的な話からはじめる。

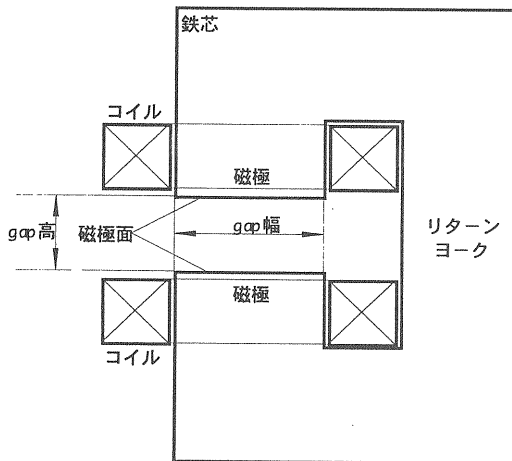


図4.1.1 偏向電磁石の例(C型)

#### (1) ラティス設計からやって来る仕様

- 磁場強度
- 磁場波形(励磁波形)
- 磁場有効長
- 磁場均一度(空間的な均一度、多極成分の限界)
- 磁場安定度(時間的な安定度、再現性)
- good field region(磁場均一度の必要領域)
- 磁極端面角(エッジ角)
- physical aperture(ビームから見た口径)
- 漏磁場の限界(セプタム電磁石の場合)
- 入射ビームのvertical error kickの限界

#### (2) その他の設計条件

- 空間的制約、他の機器との干渉
- 最大外形、質量...クレーン能力等から決まる
- コイル冷却水に関する条件
  - 管内最大流速(例: 2m/sec以下)
  - 最大温度上昇(例: 30℃以下)
  - 供給圧力 (例: 9kgf/cmcm)
  - 圧損 (例: 5kgf/cmcm以下)
  - 比抵抗 (例: 1MΩcm以上)
- 耐放射線性(例~10<sup>8</sup>Gy/30年)

#### (3) 設計項目

(1)(2)から電磁石を設計する。設計の結果によっては、ラティス設計に修正をセマル場合もある。電磁石は、鉄芯部、コイル部及架台部から構成される。それぞれの設計項目は以下のとおり。

##### 鉄芯部

- gap高
- gap幅
- 鉄芯長
- 磁極面形状
- 磁極面精度
- リターンヨークの幅
- 鉄芯形状
- 鉄芯材質
- 磁気シールド(セプタム電磁石の場合)

##### コイル部

- 起磁力
- コイル電流
- コイル巻数
- コイル素線導体材質
- コイル素線導体断面形状、冷却水孔径
- コイル電圧
- コイルインダクタンス
- コイル冷却水供給温度、温度上昇
- コイル絶縁
- コイル固定
- 冷却水絶縁継手
- インタロック素子

##### 架台部

- 架台構造体
- 位置調整機構

#### (4) gap高

真空ダクトを使用する場合のgap高は、

$$\begin{aligned} \text{gap高} &= \text{physical aperture} \\ &+ \text{ダクト厚} + \text{ダクト加工精度} \\ &+ \text{ダクト据付精度} \end{aligned} \quad (4.1.1)$$

となる。

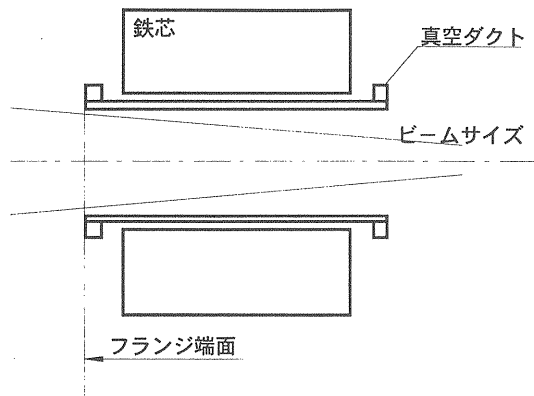


図4.1.2 gap高と真空ダクトの関係

電磁石を真空ダクトが貫通する場合は、図4.1.2のようにダクトの端面でのphysical apertureを使用する必要がある。

(5) gap幅と磁極面形状

後述する窓枠形やセプタム型(セプタム導体に電流を流すタイプのもの)の場合、鉄芯が飽和していないかぎりコイルに挟まれた空間の磁場均一度はかなり良いので、gap幅は簡単に決められる。

一方、C型やH型の偏向電磁石の場合、gap幅はgap高、磁場均一度、good field region等から磁場解析コード(2次元：poisson等、3次元：TOSCA等)によって計算しなければならない。いきなり計算コードを走らせるのは見通しが悪いので、以下経験式(JAERI private communication)を示す。図4.1.3参照。鉄芯中が飽和していない状態で概算値として使用すること。

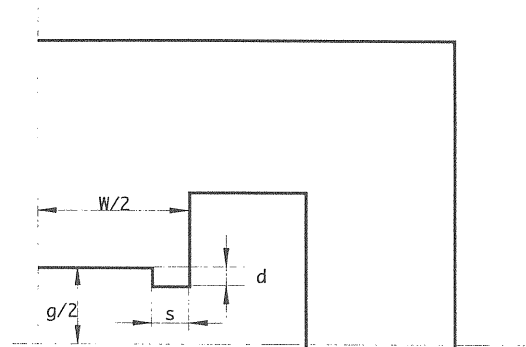


図4.1.3 good field regionとシム形状

なお、鉄芯を直線型で作る場合、要求されているgood field regionにsagitta分を加えて計算しなければならない。

$$\text{sagitta} = (\text{偏向半径}) \{1 - \cos(\text{偏向角}/2)\} \quad (4.1.3)$$

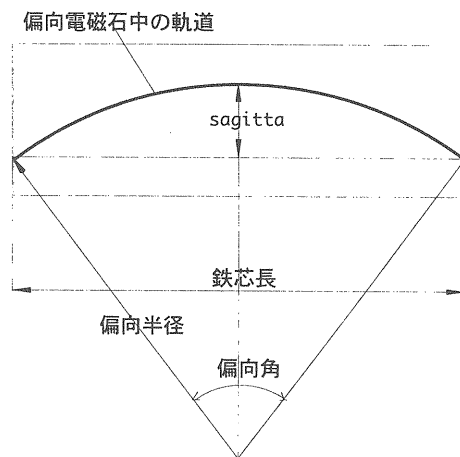


図4.1.4 sagitta

シムのない場合のgood field width(全幅)

$$\begin{aligned} \Delta B/B \leq 1\% & \quad \text{good field width} = W - g \quad (W \geq 2g) \\ \Delta B/B \leq 0.1\% & \quad \text{good field width} = W - 2g \quad (W \geq 3g) \\ \Delta B/B \leq 0.01\% & \quad \text{good field width} = W - 3g \end{aligned}$$

シムのある場合のgood field width(全幅)

$$\begin{aligned} \Delta B/B \leq 1\% & \quad \text{good field width} = W - 0.5g \quad (W \geq 2g) \\ \Delta B/B \leq 0.1\% & \quad \text{good field width} = W - g \quad (W \geq 3g) \\ \Delta B/B \leq 0.01\% & \quad \text{good field width} = W - 1.5g \end{aligned}$$

シムの形状(上記のgood field widthを得るための式)

$$sd = 0.021(g/2)^2 \quad (0.2 \leq s/(g/2) \leq 0.6)$$

以上(4.1.2)

(6) 鉄芯長と端部カット

端部効果によって磁場有効長は鉄芯長よりも長くなる。端部効果はコイルの張出、端部の磁極形状、鉄芯の飽和の状況、端部磁気シールド等によって大幅に変わるので、3次元磁場解析コードによって鉄芯長を決める。経験的には、鉄芯中が飽和していない状態で以下のような概算値になる。

$$\text{磁場有効長} \sim \text{鉄芯長} + 1.4 \times \text{gap高} \quad (4.1.4)$$

励磁量を変える電磁石の場合、上下流の端部での飽和の状況の変化によって有効磁場長が変化するのを防ぐため(特にバンプ電磁石などのように電磁石毎の磁場波形の相似性を求められる場合)、あ

るいは長手方向に発生する磁場成分による発熱を低減させるため、磁極の上下流の端部を曲線状にカットする。ロゴスキーカットあるいは熊谷カット等の形状が考案されている。また、パルス励磁の場合、端板の渦電流による発熱を防ぐため端板にスリットを入れる。詳細は、本セミナーの谷先生の講義を参照されたい。

#### (7) リターンヨークの幅

コイルがつくる磁束が全てリターンヨークを通るとして、鉄芯中平均磁束密度<飽和磁束密度(純鉄で約2.2T)でなければならない。電磁石軟鉄や電磁石鋼板の場合、飽和の影響を無視する範囲で使用しようとすれば、鉄芯中平均磁束密度~1.3Tあたりが上限である。

#### (8) 磁極間吸引力

リターンヨークは磁極間の吸引力に抗せなければならない。

磁極間の吸引力

$$\sim (\text{磁場強度})^2 \times \text{磁極面積} / (2 \times \text{真空の透磁率})$$

磁極面積~磁場有効長×(鉄芯幅+0.5gap高)

以上(4.1.5)

#### (9) 鉄芯形状

偏向電磁石の鉄芯(磁極)形状については、セクタ型、レクタアンギュラ型、直線型、湾曲型等の名称が使用されている。

磁極端面角(エッジ角)による分類がセクタ/レクタアンギュラで、鉄芯全体の形状による分類が直線/湾曲である。図4.1.5参照。

セクタ型は、磁極端面角(エッジ角)が0、言い換えれば上下流の磁極端面のなす角が偏向角に等しい形状である。レクタアンギュラ型は、磁極端面角(エッジ角)が偏向角/2、言い換えれば上下流の磁極端面が平行な形状である。実際には、optics設計からの要請で、セクタとレクタアンギュラ以外のエッジ角もつくる。

直線型は、鉄芯全体が長手方向に直線状である。磁極幅は、sagittaの分湾曲型より大きい。湾曲型は、鉄芯がビーム軌道に沿って湾曲している。

それぞれの形状について特徴を述べる。

#### 電磁石質量

直線型>湾曲型(sagitta分の磁極幅)

セクタ型とレクタアンギュラ型ではあまり差はない。

#### 電源電圧

パルス励磁の場合、インダクタンス分電圧は磁極幅に比例するので直線型>湾曲型(sagitta分)となる。DC励磁の場合ほとんど差はない。

セクタ型とレクタアンギュラ型ではあまり差はない。

#### コイルの製作性

直線型セクタ型や湾曲型レクタアンギュラ型では、鉄芯端に鋭角部があり、他の場合に比べやや困難。また、湾曲型では内周側にネガティブ巻がありやや困難。

#### ブロック鉄芯の場合の製作性

直線型が最も作りやすいが、あまり差はない。

#### 積層鉄芯の場合の製作性

積層鉄芯は抜型で打抜いた電磁鋼板を積層してつくるので、直線状に積層する方が簡単である。また、上下流磁極端面が平行でないセクタ型の場合、形状が少しずつ異なる鋼板を準備しなければならないので、さらに困難である。製作性のよい順に、

直線型レクタアンギュラ型

>湾曲型レクタアンギュラ型

>直線型セクタ型、湾曲型セクタ型

となる。

#### (10) 起磁力

$$NI = (B/\mu_0) (g + l_{iron}/\mu_{iron}) \quad (4.1.6)$$

NI	[Aturn]	起磁力
B	[T]	gap中磁場
g	[m]	gap高
$\mu_0$		真空の透磁率= $4\pi \times 10^{-7}$
$l_{iron}$	[m]	鉄中の磁路長
$\mu_{iron}$		鉄の比透磁率

$\mu_{iron}$ は飽和していなければ数千になるので第2項は無視できる。

$$NI = (B/\mu_0) g \quad (4.1.7)$$

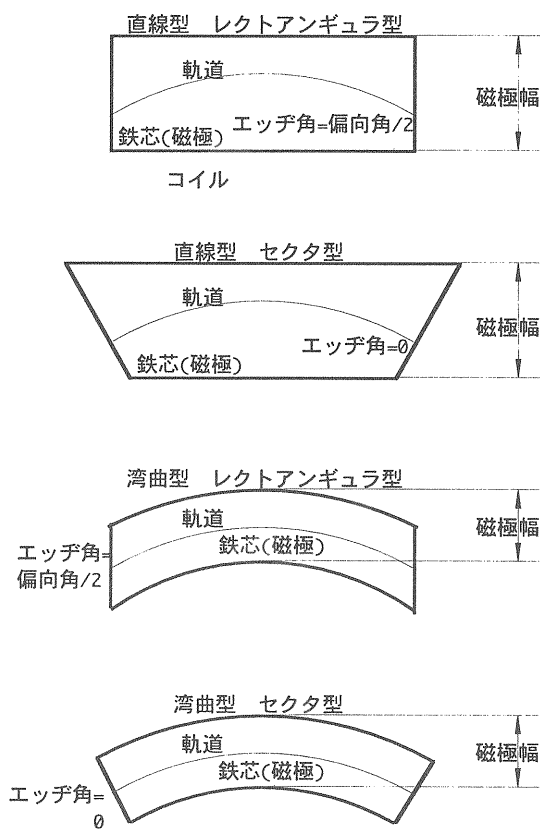


図4.1.5 鉄芯形状

(11) インダクタンス経験式

$$L = \mu_0 N^2 l (w+0.5g) / g \quad (4.1.8)$$

L	[H]	インダクタンス
$\mu_0$		真空の透磁率= $4\pi \times 10^{-7}$
N	[turn]	コイル巻数
l	[m]	磁極長
w	[m]	gap幅
g	[m]	gap高

(12) コイル巻数、電流、電圧

$$(\text{電圧}) = (\text{電流}) \times (\text{抵抗}) + L \, dI/dt \quad (4.1.9)$$

入出射電磁石の場合、パルスものではインダクタンス分の電圧を下げるためにできるだけ巻数を減らす。  
また、パルス、DCを問わず、コイルの構造を

簡単にするために巻数を減らす。耐放射線性の観点からコイルの層間絶縁に無機絶縁(セラミック溶射)を行う場合もあり、信頼性、コストの観点からも巻数を減らすべき。

なお、パルス励磁の場合、コイルはその周波数帯域における表皮厚分程度しか電導に寄与しないのでコイル抵抗を計算する際は注意する。

$$\text{表皮厚} = \sqrt{2/\text{角振動数}/\text{電気伝導率}/\text{透磁率}}$$

$$\text{角振動数} = 2\pi \times \text{周波数}$$

以上(4.1.10)

(13) コイル材質と絶縁

一般に銅を使用する。真空中に入れる場合は放出ガス低減の観点から、冷却水を直接通す場合は腐蝕の観点から、ローズケする場合は水素脆化防止の観点から無酸素銅を使用する。

大強度陽子加速器施設3GeV陽子シンクロトロンの入出射電磁石の場合、 $10^8$ Gy/30年程度の耐放射線性を要求されるので、絶縁は全てセラミック溶射等の無機物とする。

(14) コイル冷却と絶縁継手

真空中では、原則として水冷とする。

大気中では、水冷または空冷とする。

水冷にする場合、管内流速は原則2m/sec以下。

耐久性・耐食性を考慮して、大強度陽子加速器施設3GeV陽子シンクロトロンでは、熱伝導では不利であるが配管をできるだけSUSにしている。

コイルを直接水冷にする場合、充電部と冷却設備の間で電氣的に絶縁しなければならない。冷却水は純水を使用するので絶縁体と考える。通常この部分はEPゴムホースが使われるが、大強度陽子加速器施設3GeV陽子シンクロトロンの入出射電磁石では、耐久性・耐放射線性からセラミック絶縁継手を使用する。

(15) コイル固定

電磁力と熱応力に耐えうるよう、断面方向の固定は強固に、長手方向の固定は方端を自由端にする。局所的な応力集中が起きないように配慮する。特にパルス電磁石の場合。

(16) 温度スイッチ、流量スイッチ

流量スイッチ(冷却水用)はとかくトラブルが多いが、大強度陽子加速器施設3GeV陽子シンクロトロンでは、耐放射線性流量スイッチの開発を進めている。

#### (17) 鉄芯材と磁気シールド材

加速器用(鉄芯)電磁石は、磁極間隙(gap)中に発生する磁場分布を鉄芯の磁極面形状によってを決定し、gap中の磁場強度を励磁用コイルによって決定するように設計する。したがって、鉄芯材には軟質磁性材料を使用する。軟質磁性材料とは外部磁界の変化によく追従して磁化し、保持力の小さいことを特徴とする材料である。

鉄芯材選定に関する磁気特性には、透磁率、飽和磁束密度、保持力及び鉄損(交流・パルス電磁石の場合)等がある。磁気特性ではないが、交流・パルス電磁石の場合は、材料の大きさ(厚さ)や電気抵抗も重要である。

使用する磁場強度(鉄芯中磁束密度)と周波数帯域において以下に注意しながら鉄芯材を選定する。

##### 透磁率

大きいほどgood(鉄芯からの磁束の漏れが小さい)。gap外への磁束の漏れはおおまかに $\sim 1/(\text{鉄芯の比透磁率})$ 程度である。交流・パルス励磁する場合は、その周波数帯域において一定かつ大きいこと。

##### 飽和磁束密度

使用磁場強度<飽和磁束密度。鉄芯中の局所的な磁束密度についてもこの関係を満たしていること。純鉄の場合で約2.17Tである。フェライトの場合0.2~0.4T程度

##### 保持力

低い磁場での使用が予想される電磁石ではコイルのつくる磁場の他に保持力がつくる磁場が加わるので、保持力の小さい材料を選択する。

##### 鉄損

鉄損は、電磁石を交流励磁した場合に鉄芯内で消費される電力で、渦電流損とヒステリシス損か

らなる。電磁石のインダクタンスに並列に加わる抵抗として勘定する。図4.1.6参照。

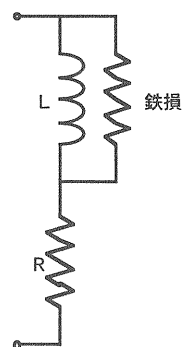


図4.1.6 電磁石等価回路

加速器の(鉄芯)電磁石によく使用する鉄芯材としては、構造用鋼材、低炭素鋼、電磁軟鉄(純鉄)、電磁鋼板、フェライト等がある。

直流電磁石であれば、構造用鋼材、低炭素鋼、電磁軟鉄(純鉄)等を使用する。構造用鋼材、低炭素鋼及び電磁軟鉄の磁気特性は後者ほど良く、構造用鋼材にいたっては磁気特性の(JIS)規定がない。

鉄芯内部の渦電流による磁場変化の遅れを嫌う場合は、電磁鋼板の積層で鉄芯を形成する。

電磁鋼板は、表面を絶縁処理した薄板で0.1mm程度のもので入手できる。表面の絶縁は無機物のものを選ぶ。交流用に開発された鉄芯材である。

パルス電磁石では、電磁鋼板を積層して鉄芯を形成する。鋼板の厚さは、パルスの周波数帯域における表皮厚以下とする。

100kHz以上応答性を要求される場合、フェライトコアを使用する。フェライトは電気的には絶縁体で、数十MHzまでの応答特性が期待できる。フェライトコアは飽和磁束密度が0.2~0.4Tとあまり大きくない。

##### 磁気シールドについて

シンクロトロンの入出射部で使用する磁気シールド材は、電磁鋼板や電磁軟鉄で十分である。パーマロイ等の高透磁率材は飽和磁束密度が小さく、普通は実用にならない。

材質よりも、いかに確実に(磁氣的な)隙間なくシールドを組むかである。

#### (18) 磁極面精度、コイルのわたり

磁極面や鉄芯の上下対称性がくずれたり、電磁石の据付けが水平から傾いていたり、導体の配線が上下対称でないと、ビーム軌道上に水平磁場が



発生しerror kickの原因になる。以下に留意すること。

- 上下磁極面間の平行度
- 据付基準面と磁極面間の平行度
- 鉄芯の構造の上下対称性
- 導体の上下対称性

(19) 架台

鉄芯と直接接する部分は、鉄芯の磁気的な上下対称性を維持するために非磁性材を使用する。鉄芯と直接接しない部分は構造用鋼材でかまわない。

位置調整機構は電磁石を精密アライメントする際に使用する。一般にはボルトの押し引きによるものが多いが、モーター駆動の自動化されたものもある。

4.2 セプタム電磁石

セプタム電磁石のポイント：

- セプタム部を如何に薄く作るか
- セプタム部を如何に確実に固定するか
- 周回軌道上への漏れ磁場を如何に減らすか

(1) 構造と原理

セプタム電磁石は図4.2.1のような構造の電磁石で、gap中には一様な磁場を発生させるが、セプタム導体の外側には磁場を作らない電磁石である。

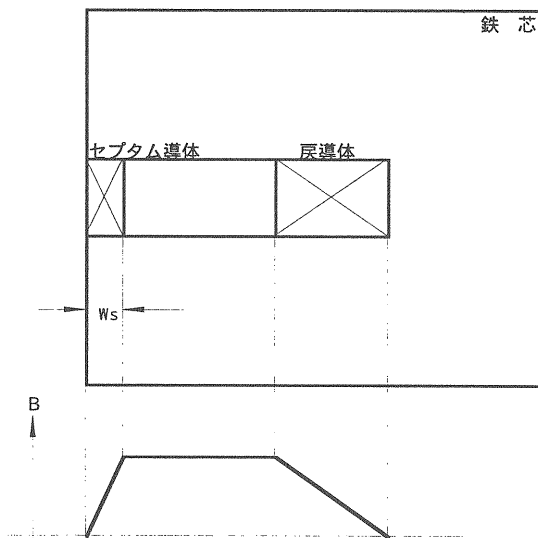


図4.2.1 セプタム電磁石

鉄芯の比透磁率が無限大で、セプタム導体の厚さ $W_s$ が無限に薄い場合、原理的にセプタム導体の外側に漏れる磁場はゼロである。

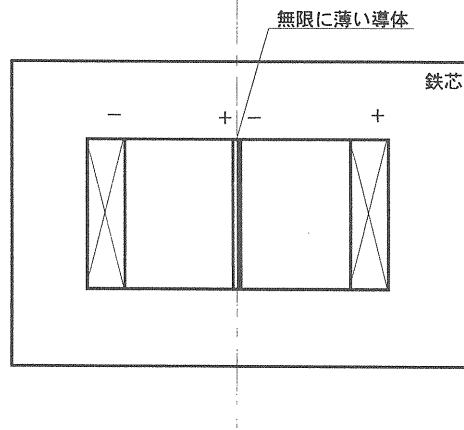


図4.2.2 窓枠型電磁石を真ん中で分離したもの

セプタム電磁石は図4.2.2に示すように、窓枠型電磁石の中心に一对の無限に薄い導体を設置し、図のような反転電流を流した状態で、中心面に沿って左右に分離した片割れと考えることができる。

したがって、できるだけ鉄芯中を飽和させず、セプタム導体はできるだけ薄く、かつ導体上下を鉄芯に密着させることを考えると漏れ磁場が小さくなる。

(2) セプタム導体の固定

セプタム導体は、gap中の磁場から電磁力(磁場×電流×長)を受けるので強固に、かつ応力が集中しないように固定しなければならない。また、鉄芯をフェライトで作る場合を除いて、導体と鉄芯の間の電気絶縁も必要になる。図4.2.3にセプタム導体部の例を示す。セプタム導体押板はクランプ等によって鉄芯に固定する。導体固定用の切り欠きの形状は、gap内磁場の均一性と漏磁場の低減を図って磁場計算コードによって最適化を図る。

(3) 磁気シールド

図4.2.2に示したような理想的なセプタム電磁石は製造できないので、周回軌道上へ磁場が漏れる。セプタム部から周回軌道上へ漏れる磁場は、gap中の磁場と反対方向である。上下流の端部開口部からも周回軌道上へ磁場が漏れるが、これらの磁場の向きgap中と同じである。これらをシールドするために、図4.2.4に示すようなセプタム面磁気シールド及端部磁気シールドを取付ける。シールド

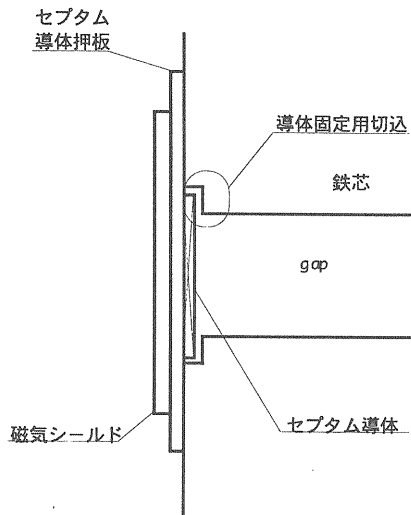


図4.2.3 セプタム導体部の例

ド中で磁場が飽和しないようにシールドの厚さに注意する。シールドの接合部等からの漏れ磁場にも注意する。

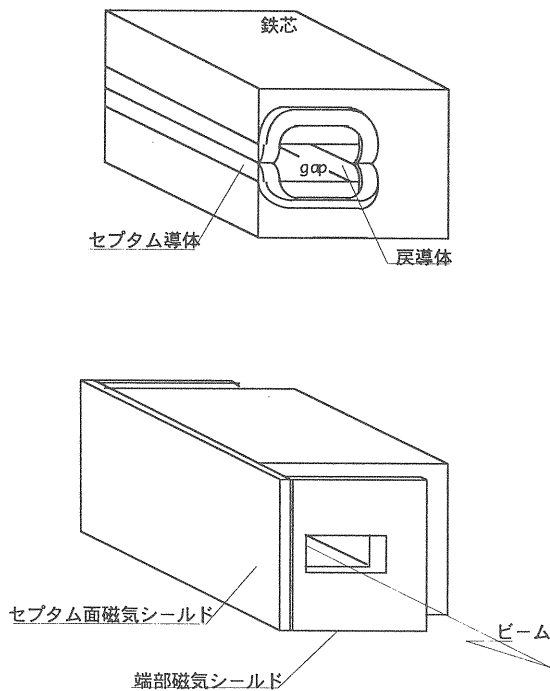


図4.2.4 磁気シールド

#### (4) 上下対称性

入射軌道や周回軌道へ水平方向の磁場成分を作らないようにするため、鉄芯、磁気シールド及導体は上下対称に作る。水平方向の磁場成分は vertical error kick の原因となり有害である。

### 4.3 バンプ電磁石

バンプ電磁石は偏向電磁石(双極電磁石)の一種である。バンプ電磁石とはその構造ではなくバンプ軌道を形成するという機能に対する名称である。

入出射ではリング1周回~数百周回にわたってバンプ軌道を立ち上げる。バンプ電磁石は高速応答のパルス電磁石とする必要がある。したがって、鉄芯は電磁鋼板(硅素鋼板)の積層鉄芯あるいはフェライトコアとし、コイルはインダクタンス(概ね巻数の2乗に比例)の低減(=電圧低減)のために1~2ターン程度とし、電源は高電圧のパルス電源となる。また、電磁石を大気中に設置する場合、gap中に真空ダクトを貫通させなければならないが、パルス励磁によってダクトに発生する渦電流を抑制するという観点からダクトはセラミック製とする。

#### (2) 設計上のポイント

バンプ電磁石にとって最も重要な性能は、バンプ軌道の立上りから立下りの間において常にバンプが閉じていることである。

この条件をできるだけ容易に実現するために、電磁石の形状をそろえ、鉄芯端は曲線でカットし励磁電流による有効長の変化を小さくする。

(3) バンプ電磁石の断面形状は、目的や周囲の状況によって決定する。図4.3.1によく使用されるバンプ電磁石の断面形状を示す。いずれも真空ダクトの断面寸法は同じであり、磁極幅とヨーク幅の比率(図では2:1.5)を同じ(ヨーク中の平均磁束密度が各型で同じ)にしてある。

窓枠型が最もコンパクトである。また、gap中の磁場分布は窓枠形が最も均一になる。ただし、真空ダクトをクワエコンデいるので、電磁石の交換の際に真空を破る必要がある。また、近傍に入出射ラインがある場合、ヨークがジャマになる。なお、窓枠型の電磁石をフェライトコアで作る場合、コアの周波数応答は10MHz以上までであるので、ビームが作る磁場ループをコア中に入れなため渦電流シールドを設ける必要がある。図4.3.2

C型は、gap中の磁場分布という観点からは不利であるが、真空ダクトをそのままにして電磁石の交換が可能である。図では左側に近接して入出射ラインを配置できそうであるが、gapからの磁場が漏れていることに注意する必要がある。

セプタム型の磁場分布は窓枠形に準じて均一である。構造上gap外への漏れ磁場が小さく隣接して入出射ラインを設置することが可能になる。配

置によっては上下流の開口部から入射ラインへ漏れる磁場が問題になる可能性がある。

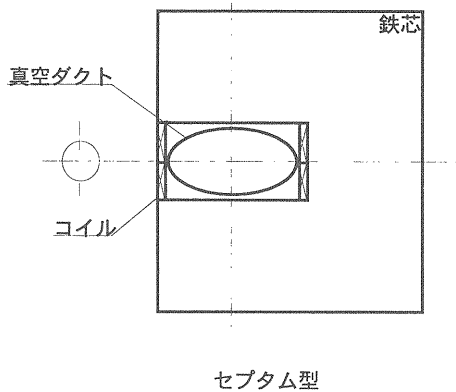
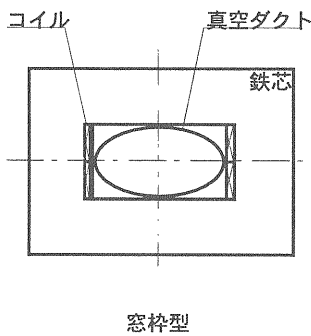
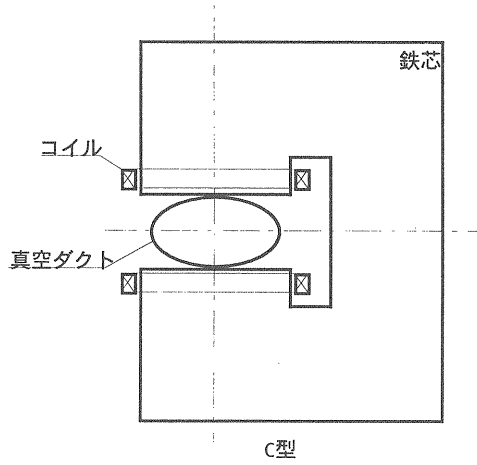


図4.3.1 バンプ電磁石の断面形状

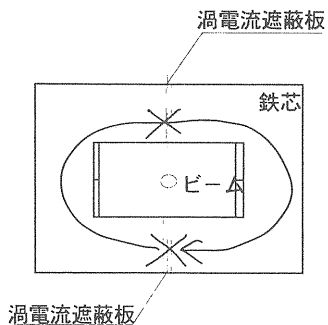


図4.3.2 ビームとコアの相互作用を防ぐ

#### (4) 電 源

painting入射等の特別な入射をのぞき、入射用バンプ電磁石は、図4.3.3に示すような電源を使用して正弦半波励磁する。

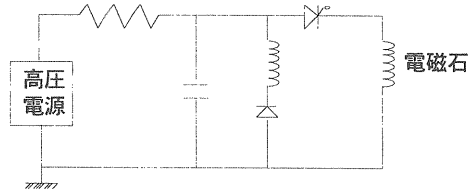


図4.3.3

#### 4.4 キッカ電磁石

キッカ電磁石とは、リング軌道上に配置し、リングの周回時間以下のパルス状励磁をしてビームを蹴る(kickする)高速応答のパルス偏向電磁石である。キッカ電磁石という名称は、電磁石の構造というよりその用途あるいは運転方法に対するものである。

##### (1) 励磁波形

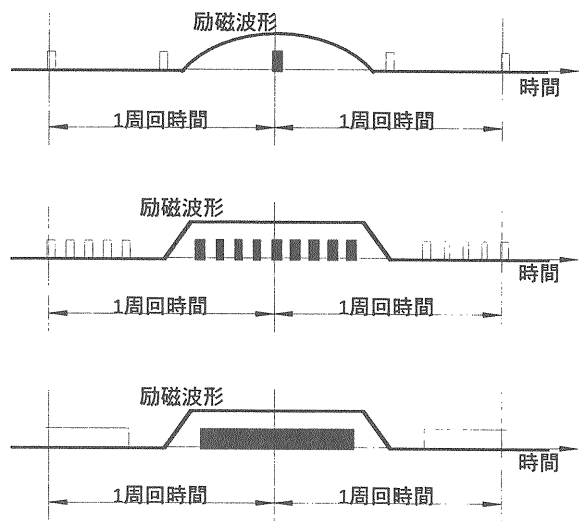


図4.4.1 キッカ電磁石の励磁波形の例

図4.4.1にキッカ電磁石の励磁波形の例を示す。最上段のようにパルスの立ち上がり、立ち下がり時間に対して要求される平坦部(flat top=蹴られるべきビームが通過する時間)が短い場合は、正弦半波励磁でよい場合もある。図の中段あるいは下段のようにフラットトップに対して立ち上がり、立ち下がり時間が短い場合は、台形波励磁しなければならない。正弦半波励磁に関しては、バンプ電

磁石の項を参照されたい

## (2) 台形波励磁

高速の台形波励磁(立ち上がり数十nsec程度以下)を行うためには、PFN+分布定数型キッカ電磁石を使用する。図4.4.2のように、PFNの充電を高速でスイッチ(通常サイラトロン)し、発生した台形波をインピーダンスマッチした電磁石へ送る。

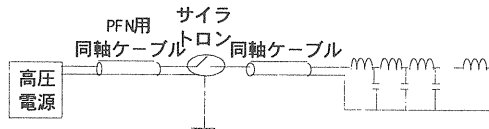


図4.4.2

電磁石は、図4.4.3~4.4.4のような構造と等価回路をもつ。

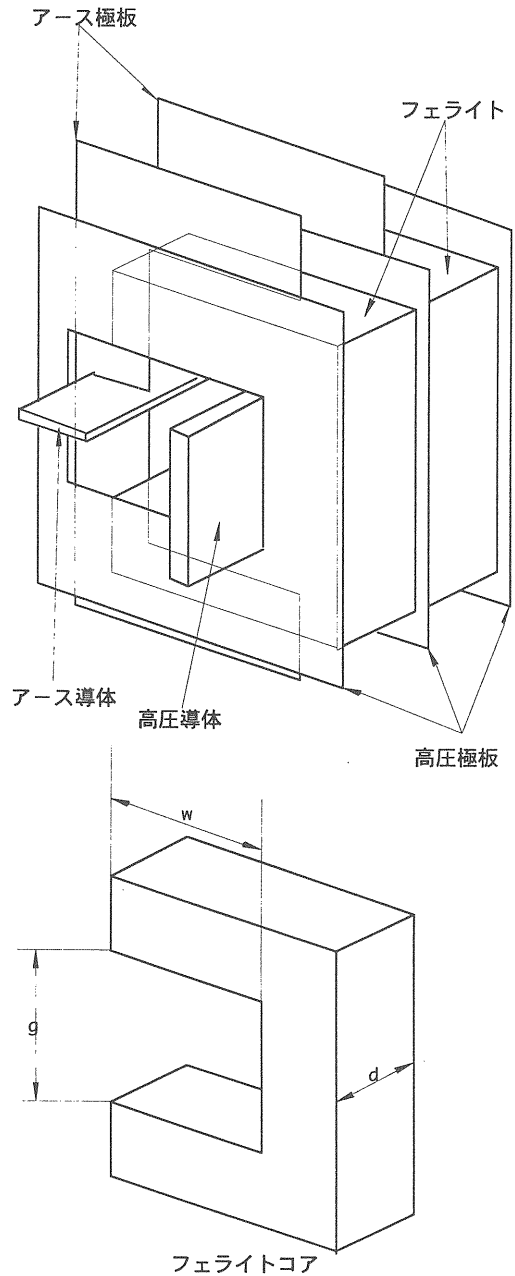


図4.4.3 分布定数型キッカ電磁石

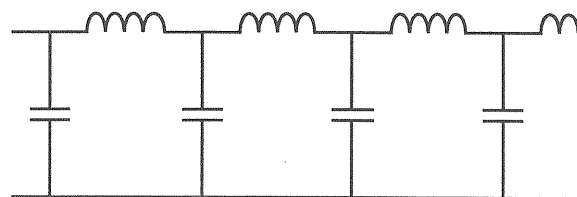
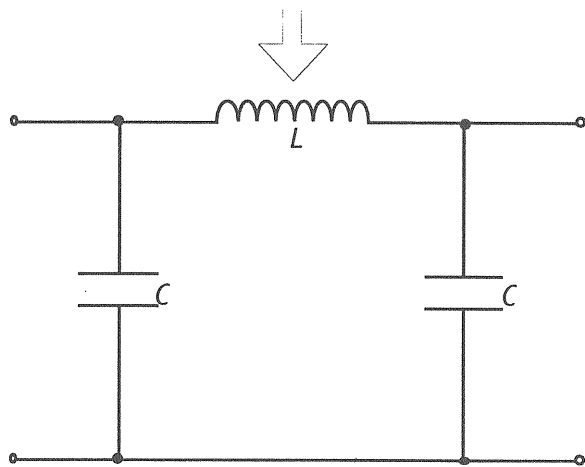
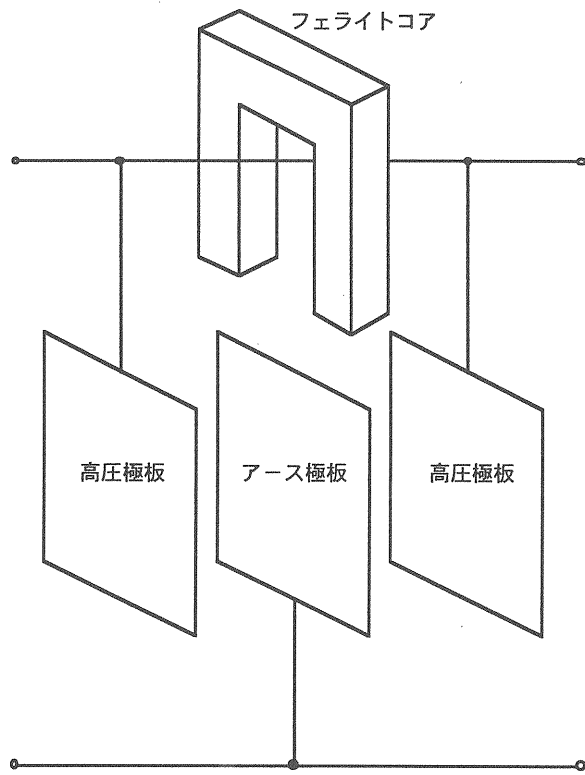


図4.4.4 分布定数型キッカ電磁石等価回路

## 5 入出射用電磁石の設計

### 5.1 セプタム電磁石の設計

#### (1) ラティス設計から機器へ要求される項目

磁場強度  
磁場有効長、配置  
磁場均一度  
good field region(磁場均一度の必要領域)  
入射ビームのvertical error kickの限界  
磁極端面角(エッチ角)  
physical aperture(入出射ビーム)  
physical aperture(周回ビーム)  
turn separation  
=入出射ビームと周回ビームの間隙  
周回軌道への漏磁場の限界  
CODの原因  
特に磁場勾配はバンブ軌道に有害  
vertical error kickの限界

#### (2) セプタム電磁石設計の方針

大強度陽子加速器施設3GeV陽子シンクロトロンの場合、入出射用セプタム電磁石の設計は、以下の方針で行う。もちろん、ラティスはこの方針に合致するべく設計する。

- (a) ビーム損失を最小限にする。
- (b) 絶縁は全て無機物とする。
- (c) 可能なかぎり電磁石を真空外に出す。
- (d) 可能なかぎり直流励磁とする。

(a) 機器の放射化と遮蔽厚を最小限にするために、セプタム電磁石部におけるビーム損失を最大限減らす。具体的には、後述するBSCを完全にカバーするphysical apertureを確保する。

(b) 耐放射線性( $10^8$ Gy)を考慮して、絶縁物は無機物を使用する。

(c) ガス放出源をできるだけ真空中に入れなため、また真空中でのトラブル、特に冷却水漏等のトラブルを避けるために可能な限り電磁石を真空外に出す。

(d) パルス励磁にともなう導体周りのトラブル(絶縁損傷等)を避けるため可能な限り直流励磁とする。また、直流励磁によって、コイルに加わる電圧は抵抗分のみとなり、パルス励磁に比べて端子間電

圧が大幅に下がる。

#### (3) BSC(Beam Stay Clear)

BSCについて確認しておく。

ここでは、BSCを「通常の運転でビームが通過する可能性がある領域」と定義し、

$$BSC \leq \text{physical aperture} \quad (5.1.1)$$

となるように設計する。BSCをどう想定するかは、セプタム電磁石部におけるビームの損失と製造コストに直接影響する問題である。過不足があってはならない。

大強度陽子加速器施設3GeV陽子シンクロトロンの入出射部設計においては、下式を使用する。

$$\begin{aligned} \text{半幅BSC} \\ = \sqrt{\epsilon \beta} + \eta (\Delta p/p) \\ + \text{軌道安定性} + \text{軌道調整幅} + \text{error} \quad (5.1.2) \end{aligned}$$

$\epsilon$  は、コリメータキリノコシを含む外接楕円値(コリメーション以降の空間荷電効果によるビームの広がりを含む)、ショット毎安定性及長時間安定性を含む。

$\Delta p$  は、コリメータキリノコシを含む値で、運動量中心値の変動、ショット毎安定性及長時間安定性を含む。

$\beta$  と  $\eta$  は、optics調整幅を含む。

軌道安定性は、軌道の位置と角度のerrorである。入射部においては、前段のライナックの安定性やビームトランスポート系における軌道の安定性(電磁石電源の安定性)に由来する。出射部における軌道安定性は、出射時の閉軌道の安定性とキッカ電磁石(本計画では出射キッカ電磁石を11台使用する)のerror kickで、キッカ電磁石電源のショット毎安定性、励磁波形フラットトットの平坦性に由来する。

軌道調整幅は、入射点(本計画では荷電変換foil)あるいは出射点(出射用第1セプタム電磁石上流側端面)における軌道の位置と角度の調整幅である。

errorは、リングのCODに追従する値で、本計画ではリングの最大CODの3mmとしている。

#### (4) セプタム部に使用できる領域の確認

リング軌道に最も近い断面(出射の場合上流端、入射の場合下流端)において、セプタム部に使用で

きる領域(厚さ)を確認する。

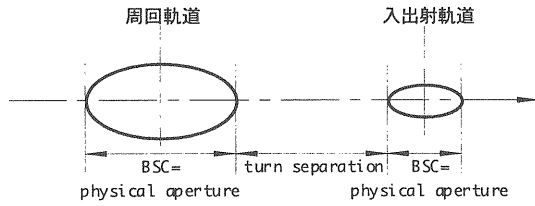


図5.1.1 セプタム部に使用できる領域(厚さ)

図5.1.1のturn separationの間に以下のものを入れなければならない。図5.1.2参照。

- リングの真空ダクト厚
- リングの真空ダクト厚加工誤差
- リングの真空ダクト据付誤差
- セプタム面磁気シールド厚
- セプタム面磁気シールド厚加工誤差\*
- セプタム導体クランプ
- セプタム導体幅
- セプタム導体幅加工誤差\*
- 出射ラインの真空ダクト厚
- 出射ラインの真空ダクト厚加工誤差\*
- 出射ラインの真空ダクト据付誤差\*

真空ダクトは電磁石を真空中に設置する場合不要となる。入出射軌道は、リングから徐々に離れていくので、\*の項目はセプタム電磁石とリングの最近接部のみを考慮すればよい。

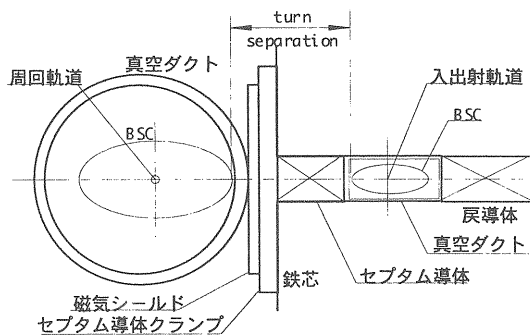


図5.1.2 セプタム部詳細

(5) ダクト

大強度陽子加速器施設3GeV陽子シンクロトロンの出射部の場合、gapを貫通する真空ダクト材質は、強度、残留放射能、非磁性材(低透磁率)の観点からチタンとする。

(6) 設計の例

大強度陽子加速器施設3GeV陽子シンクロトロン出射用セプタム電磁石(第4セプタムの設計例を以下に示す)

通過粒子・エネルギー	陽子 3GeV
磁場強度	1.0053T
沿軌道有効長(=鉄芯長として計算)	900mm
偏向角	70.918mrad
偏向半径	12.691m
端面エッチ角	レクタングュラ
Sagitta	8mm
磁場平坦度 $\Delta B/B$	$\pm 0.1\%$
励磁電流波形	直 流
鉄芯部最大BSC( $\epsilon = 216 \pi \text{ mmmrad}$ $\Delta p/p = 1\%$ $COD = 3\text{mm}$ )	
水平/垂直	169.0/79.2mm
磁極間隙高(gap高)	100mm
磁極間隙幅(gap幅; 導体部分も含んだ鉄芯の切れ込み幅)	580mm
鉄芯長	900mm
鉄芯断面寸法	幅×高=972×882mm <sup>2</sup>
鉄芯質量	約5.7ton
鉄芯形状・構造	直線型・上下2分割ブロック
鉄芯材質	電磁軟鉄SUYIP1相当品
磁極間吸引力	156kN
セプタム面磁気シールド	10mm厚電磁軟鉄SUYIP1相当品
端部磁気シールド	30mm厚電磁軟鉄SUYIP1相当品
コイル電流(直流励磁)	5000A
コイル巻数	16turn
コイル起磁力(AF=1)	80000Atturn
セプタム導体部	
素線導体材質	
冷却水と接触する部分	無酸素銅
それ以外	タフピッチ銅
素線導体断面積	0.9×(幅×高-水路部)
	0.9×(14.5×44.5-φ8)mm <sup>2</sup>
導体部長	900mm
辰導体部	
素線導体材質	
冷却水と接触する部分	無酸素銅
それ以外	タフピッチ銅
素線導体断面寸法	0.9×(幅×高-水路部)
	0.9×(29×44.5-φ8)mm <sup>2</sup>
導体部長	900mm
渡導体部	
素線導体材質	
冷却水と接触する部分	無酸素銅
それ以外	タフピッチ銅
素線導体断面寸法	0.9×(幅×高-水路部)
	0.9×(12.5×44.5-φ8)mm <sup>2</sup>
導体部長	590mm
電磁石全体直流抵抗(65℃)	2.19mΩ/電磁石]
電磁石全体電圧降下	10.95V/電磁石
電磁石全体消費電力	54.75kW/電磁石
電磁石全体インダクタンス	1.132mH/電磁石
電磁石全体冷却水路数	16水路/電磁石
電磁石全体冷却水流量(温度上昇15℃)	52l/分/電磁石
導体に加わる電磁力	36190N
電磁石設置雰囲気	大気中(ダクトが電磁石内を貫通)

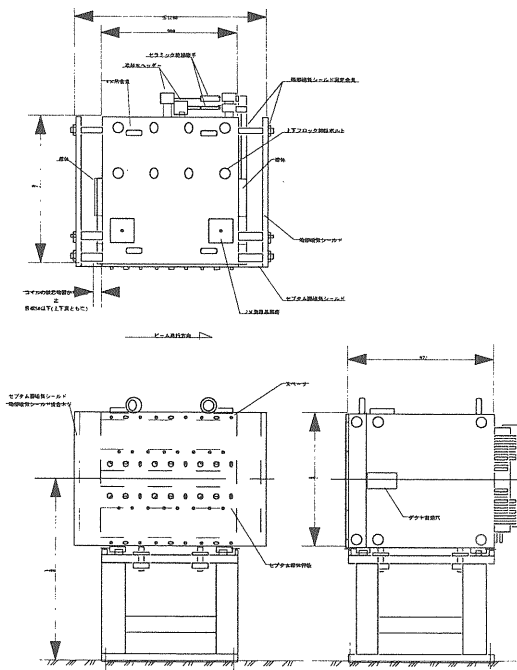


図1 電磁石外形図(参考図)

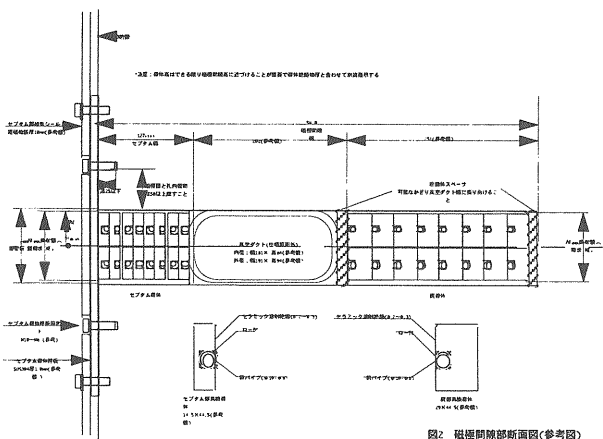


図2 磁極間隙断面図(参考図)

図5.1.3 セプタム電磁石の例

## (7) 通電試験

直流励磁にしるパルス励磁にしる、セプタム導体には大きな力( $F=B \times I \times L$ )が加わるので、通電試験によってセプタム導体の耐久性(導体の固定や電気絶縁等)を確認する必要がある。直流励磁の場合でも、運転/停止による電磁力の変化や熱応力の変化はセプタム導体の固定及其の電気絶縁層に損傷を与える可能性がある。

励磁による磁極間の吸引力による変形や熱変形は、電磁石の磁場中心面を傾け、vertical error kickの原因になるので、実測によって変形・変位量を計測しておく必要がある。

また、導体各部の局所的な温度上昇にも注意する。

## (8) 磁場測定

磁場測定は、B-I特性(励磁電流とgap中磁場強度の関係)、gap内部と端部のマッピング(磁場分布測定)及周回軌道上への漏磁場分布の測定を行う。上下流の開口部ぶから漏れてくるgap中磁場や磁気シールドの継目からの漏磁場に注意すること。磁気シールドは、実際にリングに設置した場合と同様に配置して測定する必要がある。磁場の垂直成分だけでなく、水平成分(vertical error kickの原因)も測定しておくこと。

直流励磁の場合、最近では低磁場(地磁気レベル)まで測定できる比較的精度の良い3軸テスラメータが市販されており便利である。

## 5.2 バンプ電磁石の設計

### (1) ラティス設計から要求される項目

磁場波形

磁場波形の相似性、同期性(tracking)

磁場有効長

磁場均一度

good field region(均一度が必要な領域)

vertical error kickの限界

磁極端面角(エッジ角)

physical aperture

### (2) バンプ電磁石設計の方針

大強度陽子加速器施設3GeV陽子シンクロトロンの入射用バンプ電磁石の設計は、以下の方針で行う。

できる限りphysical apertureを確保しビーム損失を減らす。真空中へ電磁石を入れる。→鉄芯はベーキング可能なフェライトコアとする。

形状をそろえ、トラッキング(励磁波形の同期性、相似性)を確保する。

入射ラインがバンプ電磁石の近傍を通過するので、漏れ磁場対策からセプタム型とする。

コイル巻数はできるだけ1ターンとする。

painting波形はIGBTスイッチを使用した電源で形成する。



(3) 配置

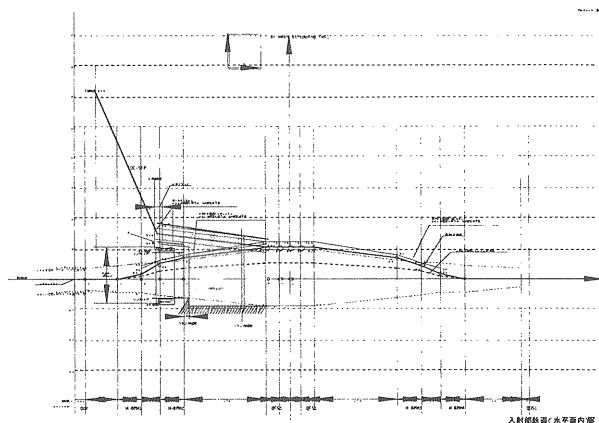


図5.1.4 4バンプpaintingの例

- 磁場波形
- 波形精度
- 蹴角
- 有効磁場長、配置
- 磁場均一度
- good field region(磁場均一度の必要領域)
- physical aperture(周回ビーム+出射ビーム)
- vertical error kickの限界

(2) 設計方針

高電圧パルス電磁石であるから、電磁石・電源系での上限電圧を設定する。

大強度陽子加速器施設3GeV陽子シンクロトロンの出射用キッカ電磁石では、過去の実績等から上限電圧を80kVに設定し、電磁石・電源系の各部でこれを越えないように設計する。

(4) physical aperture

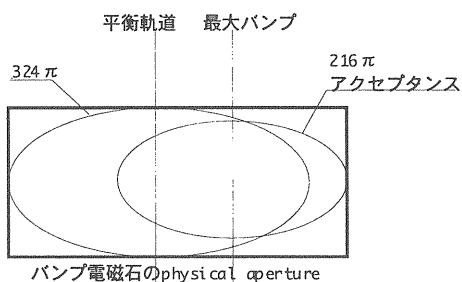


図5.1.5 バンプ電磁石のphysical aperture

(3) BSCとgood field region, physical aperture

$$BSC \leq \text{good field region} \leq \text{physical aperture}$$

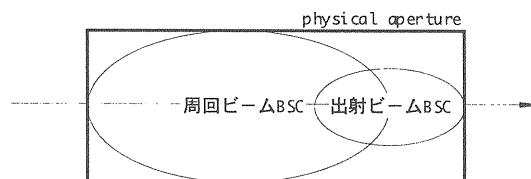


図5.3.1 キッカ電磁石部でのphysical aperture

(5) BUMP2の例

gap高=0.2m gap幅=0.25m B=0.2T

leff=0.8m lturn

導体断面200mm×10mm; Cu

peak di/dt=dI<sub>max</sub>/2/50 μs

波形帯域~10kHz→Cu表皮~0.7mm

→NI=31.8kAT→I=31.8kA

→L=1.76 μH, di/dt=31.8kA/2/50 μs

Lによる電圧: V=L di/dt=560V

→R~0.143mΩ(65°C)

Rによる電圧~4.5V

+鉄損+渦電流損

(4) 磁場波形

キッカ電磁石の磁場波形は、周回しているバンチとバンチの間で立上げ、必要なバンチを蹴り出す間は一定磁場(flat top)である必要がある。1回の出射で全てのバンチを取り出さない場合は、バンチとバンチの間の時間に立ち下げなければならない。

大強度陽子加速器施設3GeV陽子シンクロトロンの場合の磁場波形を図5.3.2に示す。1回の出射で全てのバンチ(2バンチ/1周)を蹴り出すので、立下り時間は規定しない。この磁場波形を得るために、キッカ電磁石は分布定数型とする。

5.3 キッカ電磁石の設計

(1) ラティス設計から要求される項目

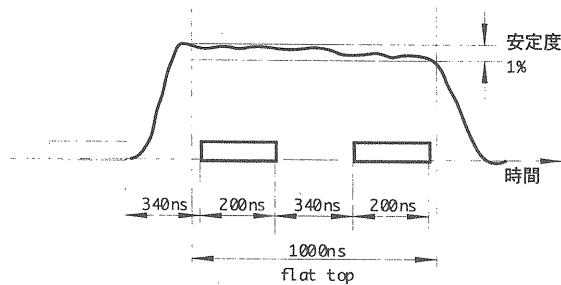


図5.3.2 磁場波形とバンチの関係の例

(5) gap高、幅

分布定数型キッカ電磁石は、真空中で使用するのでgap中を真空ダクト貫通させる必要はなく、gap高、幅は以下となる。

$$\begin{aligned} \text{gap高} &= \text{physical aperture} + \text{鉄芯加工精度} + \text{据付精度} \\ \text{gap幅} &= \text{physical aperture} + \text{高圧導体部幅} + \text{据付精度} \end{aligned}$$

(6) 設計例

双子型分布定数型

...セプタム型のキッカを向合せた構造  
必要なgap空間を2台の電源で受持ち、  
インダクタンスを半分にして  
電流立上時間を低減する。

終端短絡(反射波による電流倍増)

gap高170mm

gap幅280mm

電磁石長620mm

kick2.16mrad

特性インピーダンス10Ω

電流立上時間80ns

電流伝搬時間

$$= \text{電磁石長} \times \text{真空の透磁率} \times \text{gap幅} / (\text{特性インピーダンス} \times \text{gap高})$$

$$= 128\text{ns}$$

磁場立上時間(10-90%)

$$= \text{電流立上時間} + \text{電流伝搬時間}$$

$$= 208\text{ns}$$

PFN充電電圧

$$= \text{kick} \times B_{\rho} \times \text{gap高} \times \text{特性インピーダンス} / (\text{電磁石長} \times \text{真空の透磁率})$$

$$= 60\text{kV}$$

PFNケーブル長

$$= \text{電流パルス長}(1200\text{ns}) / 2 / 5E-09$$

$$\begin{aligned} &= 120\text{m} \\ \text{ケーブル容量} &= \text{パラ数} \times \text{電流パルス長}(1200\text{ns}) / \text{特性インピーダンス} \\ &= 120\text{nF} \\ \text{PFNケーブルへのパワー} &= 0.5 \times \text{ケーブル容量} \times \text{PFN充電電圧}^2 \times \text{繰り返し} \\ &= 5400\text{W} \\ \text{陽子運動エネルギー} &= 3\text{GeV} \\ B_{\rho} &= 12.758\text{Tm} \\ \text{磁場強度} &= 0.044\text{T} \end{aligned}$$

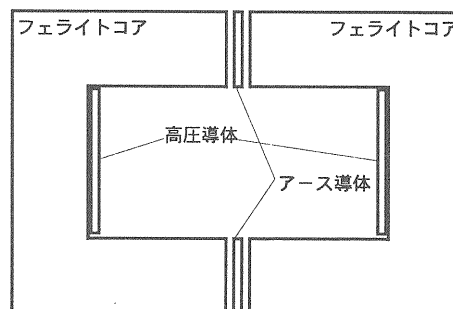


図5.3.3 双子型分布定数キッカ電磁石

(7) vertical error kick

vertical error kickは、キッカ電磁石より下流でのビーム損失につながるため限界値以下にしなければならない。vertical error kickの原因は、磁極中心面の水平からの傾きと導体配置の上下非対称性から発生する水平方向の磁場成分である。

$$\text{vertical error kick} =$$

$$\text{キッカ電磁石の蹴角} \times \text{磁場中心面の傾誤差}$$

磁場中心面の傾きは、磁極面の加工精度と据付誤差によるものである。

(8) 真空タンク、真空導入端子

分布定数型キッカ電磁石は、コイルが放電しないように真空中で使用される。キッカ電磁石を入れる真空タンクが必要になる。大強度陽子加速器施設3GeV陽子シンクロトロンの出射用キッカ電磁石の場合、要求される真空度は1μPa以下である。

真空中のキッカ電磁石に高圧同軸ケーブルをつなぐために、真空導入端子が必要になる。真空導入端子は、インピーダンスをマッチさせた同軸構

造とし、絶縁部分は耐放射線性の観点から全てセラミック製とする。真空導入端子は、現在、KEK-原研の共同チームで開発中である。

#### (9) ビームとキッカ電磁石の相互作用

大強度陽子加速器施設3GeV陽子シンクロトロンの出射用キッカ電磁石は、周回するビームをバンチ単位(実際には2バンチまとめて)でビームを蹴る電磁石であるから、鉄芯・コイル・ケーブルの応答周波数帯域は、周回バンチが作り出す電磁場の帯域と重なる。ビームと電磁石の相互作用を個領する必要があり、検討中である。

## 6 参考文献

加速器に関する日本語の参考書として、

- ・加速器科学 丸善.

電子のリング加速器の入門として、

- ・ M.Sans "The Physics of Electron Storage Rings", Proc. of International School of Physics "Enrico Fermi" course 46.

電子シンクロトロンのoff-axis入射に関して詳しくは、

- ・JAERI-M 89-109 梶沢他.

セプタム電磁石についての詳細な検討については、やや古いが

- ・CERN 74-13 DIPOLE SEPTUM MAGNETS.

原研とKEKで建設中の大強度陽子加速器施設についての概念設計は、

- ・KEK Report 97-16 JHF ACCELERATOR DESIGN STUDY REPORT (通称緑本).

関連するOHOテキストとして、

- ・OHO'84 高エネルギー加速器入門  
...シンクロトロン、電磁石
- ・OHO'87 高エネルギー加速器セミナー  
...陽子シンクロトロンの入射、出射
- ・OHO'89 高エネルギー加速器セミナー  
...陽子シンクロトロン、遅い取り出し
- ・OHO'93 高エネルギー加速器セミナー  
...放射光用リング、入射
- ・OHO'96 高エネルギー加速器セミナー  
...荷電変換入射、分布定数型キッカ電磁石.

その他、電磁石・電源に関する参考書としては、

- ・磁気工学の基礎I,II 共立全書
- ・交直電磁石の設計と応用 森北出版株式会社
- ・金属学会セミナー磁性材料入門 日本金属学会
- ・磁性材料選択のポイント 日本規格協会
- ・高電圧パルスパワー工学 森北出版
- ・磁気工学の基礎と応用 コロナ社 等.

以 上

# 別添図

H<sup>-</sup>ローレンツストリッピング  
陽子の運動エネルギー400MeVの場合の単位軌道長あたりの損失率

