

放射光リング入射技術と要素開発

1. はじめに

放射光源加速器が放射光光源に特化した役割で専用加速器として建設がなされたのは、古く1980年代にまで遡る。これは、1947年に放射光が観測[1]とその理論背景が解明[2]されてから16年後のことで、日本で世界初の放射光専用設計の蓄積リングであるSOR-ringが建設された。2025年の現在において放射光源加速器は世界的に普及し、その数は50施設に届く勢いである。なお、国内の放射光源加速器施設では、そのうちの20%ほどにもなる10施設が稼働している[3][4]。

本講義での主題となる「放射光リング入射技術」が飛躍的な技術発展を見たのは、1990年にSORTEC-1放射光源加速器[5]において世界初の「トップアップ運転（Top-Up運転：継ぎ足し運転）」の利用開始を皮切りとしている。この特別に命名された入射技術は、2000年代に世界的に広く波及し、現代においては放射光源加速器においては標準的な技術であり、またより高まる要求に対して高度に発展する可能性を秘めた技術領域でもある。放射光の観測がなされてからおよそ50年後に放射光源加速器にとって、加速器技術にとっても革新的な技術の一つとして要素技術の進歩があったと言える。

放射光源加速器は、その加速器性能の発展と共に世代名が与えられており、加速器の分類のなかで一つの特徴である[6]。大まかに1970年代の第一世代（素粒子原子核実験加速器への寄生利用）、1980年代の第2世代（放射光専用リングの登場）、1990年代の第3世代（初期加速器設計において挿入光源の導入）、2000年代の新第3世代（安定性を高めた真空紫外から硬X線までの領域を網羅する普及型リングの登場）と区別される（Fig. 1を参照）。第3世代で周長が1km程度の大型放射光施設の建設が初めて進められ、新第3世代ではリング周長が数100mの中規模の放射光施設が多数建設された。入射技術の発展は、世代発展の歴史と重ねると丁度第3世代放射光源加速器の

時代にあたり、新第3世代においては、放射光施設としてはなくてはならない入射技術としての「トップアップ入射技術」が標準技術として普及し加速器建設の要綱において必ず付帯させられる要素技術として盛り込まれるようになった。

本講義は、放射光リングの入射技術としてのトップアップ入射技術に注目し、それに欠かせない要素技術と加速器技術にとって重要な技術開発について紹介をする。なお、本講義では、難しい理論的な背景は極力避け、直感的な概念によりそれぞれの概要がおおまかに把握できるような説明に努めるつもりである。

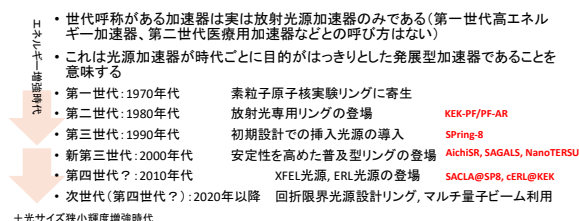


Fig. 1 放射光光源加速器の世代間呼称と具備される要件

2. 加速器の複合とビーム入射

ビーム入射とは、一言で言ったとしてもビームにとっては上流にさかのぼること長い旅路の終着点である。放射光源加速器は、電子加速器に必要とされるいくつかの加速器要素で構成されている。上流から、まず電子ビームを生成する電子源（電子銃：Electron gun）、電子ビームをある一定のエネルギーまで加速する前段加速の線形加速器（Linac）、さらに電子ビームを必要なエネルギーまで加速する後段加速の円形加速器のブースターリング（Booster ring（BR））、そして、最下流に建設される電子ビームから放射光を取り出し利用するための電子ビームを蓄積（貯蔵）する蓄積リング（Storage ring（SR））またはいわゆる放射光リング（Synchrotron radiation ring、Light source ring）などである。加えて、これらの構成要素に加えて、構成要素間をつなぐための電子ビーム輸送路が必要であり、ビーム輸送路を通り電子ビームは加速器要素間を渡っていく。この上流の電子発生点から放射光リングまで一筆

書きで加速器施設が閉じている場合と、電子発生源を一カ所に集約し、そこから多種加速器施設へ分配する場合では、線形加速器後に分岐路としてのビーム分配点が設けられて別の加速器施設へのビーム輸送と利用が行われる。このような複雑な電子加速器の運用の例として、KEK つくばキャンパスでの2つの放射光リングと2つのSuper-KEKBリングを利用する加速器施設や、関西放射光施設のかつて New SUBARU 放射光リングとSPring-8 放射光リングの同時利用[7]や、現在のSACLA XFEL 型放射光施設と SPring-8 放射光リングの同時利用施設が挙げられる[8]。

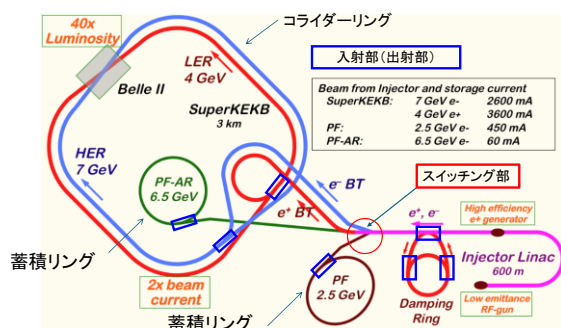


Fig. 2 KEK つくばキャンパスにおける加速器の複合とビーム入射

Fig. 2 に KEK つくばキャンパスにおける加速器の複合例を示す。線型加速器やビーム輸送路の直線と円形加速器の円の「線と円」の組み合わせにより加速器がつけられていることがわかる。「線と円」が接合される部分には Fig. 2 図中に示されるように青い四角で囲まれた入射部というものがある。入射部では輸送路で運ばれてきた電子ビームを円形加速器にビームを入射する装置群で構成され、特別な入射部設計によりそれら装置が配置される。本講義ではこの入射部にかかわる「線と円」をどのように接続し電子ビームを入射させるのかその方法論を議論するとともに、その構成装置の要素開発について紹介するものである。

ビーム入射またはビーム入射器という言葉には広義には最上流の電子ビーム発生点から、最下流の入射部までを指すが、この講義では、円形加速器である放射光リングと輸送路の接続部であ

る入射部を中心にビーム入射についてふれる。ただし、ここまでの説明からもわかるように、電子ビームは電子生成点から線形加速器、ブースターリングを通りながら輸送路を運ばれてくるため電子ビームがそれらを通過することにより電子ビームに与えられた影響は、少なからず最終終着点であるリングの入射部に到達時にも残されることとなる。ゆえに、入射部を中心とした議論においても、電子ビーム生成点の最上流から引き継がれる履歴についても考慮が必要である。

なお、前述したように加速器の複合の構成の一つに後段加速のブースターリングを挙げているが、近年では線形加速器用の敷地を十分に確保できる場合には、加速器技術の進歩と共に線形加速器で必要となる電子ビームエネルギーまでの加速を完了させ、そのまま円形加速器に電子ビームを入射する方法も珍しくなく、Fig. 2 で示されるように KEK つくばキャンパスでは現在、ブースターリングを必要としていない[9]。また、SPring-8 においても同様に、かつてあったブースターリングが廃止され、SACLA の線形加速器からの電子ビームを直接放射光リングへ入射する方式を近年採用している[8]。2024 年よりユーザー利用運転の開始された NanoTerasu[10]もブースターリングを設計段階より採用しないなど、建設及び運転コスト削減に寄与する方向性もあれば、逆に、敷地の確保が難しいところではブースターリングの利用価値が見直され採用されるなど、ビーム入射器の構成の設計には様々な考え方がある。

3. ビーム入射技術

3.1 入射の形態

ビーム入射には2つの入射の形態（モード）がある。一つは電子ビーム蓄積モード、他に、電子ビーム継ぎ足し（トップアップ: Top-Up）モードである。加速器の運転が開始される前段階は、だれもが想像できるように、電子蓄積リングには電子ビームが存在していない。電子生成点で発生させられた電子ビームが輸送されて電子蓄積リングへ到達し、初めて加速器リングの中に電子ビー

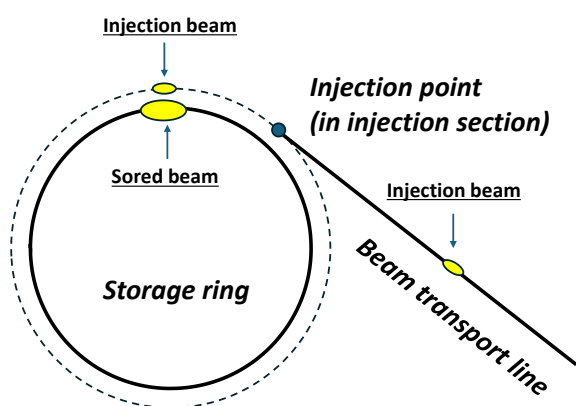


Fig. 3 入射ビームと蓄積ビーム

ムが導入される。電子ビームは加速器リングの中を安定的に周回すれば電子ビームは直流ビーム電流トランスモニターにより「何 mA の蓄積ビーム電流値」とあらわされる。さらに、次の電子ビームが輸送され、電子ビームが電子蓄積リングへ入射されることになれば、ここで初めて「蓄積電子ビーム（蓄積ビーム、蓄積電子）」と「入射電子ビーム（入射ビーム、入射電子）」の概念が生まれ過渡的な共存状態が生まれる（Fig. 3 参照）。

この電子蓄積リングに必要とされる電流値を蓄積する過程を「蓄積モード（Storage mode、stored mode）」と表現する。それ以降、それ以上の入射電子ビームの追加を行わない場合には、蓄積電子ビームが様々な物理事象（真空度、量子揺らぎ的散乱、電子ビーム内散乱など：別講義「放射光加速器の真空システム」を参照）で決まるビーム寿命によって蓄積電流値が減衰をしていく。これを「減衰モード（Decay mode）」と表現する。電子蓄積リングから上流側で何らかの装置故障、トラブル、計画的なメンテナンスなどがあれば入射電子ビームは輸送されてこなくなるため、結果的にもしくは計画的に減衰モードに移行する。逆に、蓄積電流値の減衰を防ぐために、電子蓄積リング内を周回する電子ビームに加えて、必要な蓄積電流値を維持するように電子ビームを継ぎ足す（補充する）場合を、「継ぎ足しモード（トップアップモード）」と表現する。

継ぎ足しモードには、継ぎ足し方によりさらにその方法が分類されている。必要な蓄積電流値を維持する場合に、ある一定時間の間隔で定期的

に継ぎ足す方法と、失われた電流値が一定量に到達した場合に不定期に継ぎ足しを行う方法である（Fig. 4 参照）。前者を「時間間隔優先トップアップ入射」、後者を「電流値優先トップアップ入射」と謂う[11]。ビーム寿命が常に一定である場合、バンチ毎に差異がない場合、前者と後者の方法で蓄積電流値の維持の結果に差はないが、実際には後者の方法がこまやかな電流値維持が可能で、基本的に電流値優先トップアップ入射が入射方法として主流である。

先に、蓄積ビームが存在する状態で、入射ビームが輸送路を運ばれてくる状態において蓄積ビームと入射ビームの概念が存在することは説明した。その入射ビームは最終的に電子蓄積リングに入れば蓄積ビームとなるのであるが、電子蓄積リング内を入射ビームが周回しながら蓄積ビームへと移行するまでの過渡状態で、同じ加速器リング内で蓄積ビームと入射ビームの共存する概念も存在する。これらをまとめると、蓄積モードでは、一つの電子ビームが入射ビーム状態から蓄積ビーム状態へ移行すること、継ぎ足しモードでは、一つの蓄積ビームへ不足する電流値を入射ビームで補うため入射ビームが蓄積ビームへ取り込まれ蓄積ビーム状態へと移行することが想像

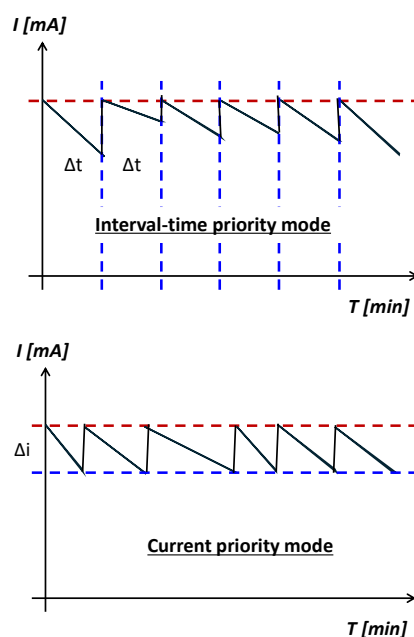


Fig. 4 継ぎ足し入射方法

できる。次の項 3.3 では、その想像される事象を具体的な物理事象としてとらえてみたい。

3.2 ビームフィリング

先に、一つの入射ビームを電子蓄積リング（以降、電子ビームを前提として放射光加速器に特化した蓄積リングと書く）に入射し、その入射ビームの塊が蓄積ビームとなり必要電流値を満たしていない場合、その電子ビームの塊に追加の入射ビームを補充し必要とされる蓄積電流値を満たすように蓄積することを説明した。入射ビームを蓄積リングに蓄積する場合、蓄積リングの「どこに」蓄積することになるのだろうか。

蓄積リングには全周に渡りビームバケットというビームを取り込む時間的なスペースが配置されており、それぞれにはそのバケットを区別するためにアドレスという番地が割り振られている。時間的なスペースのバケット間隔は通常 2 ns で、全周に渡るそのバケットの数は蓄積リング 1 周にかかる周回時間をバケット間隔で割り算すればおおまかにその数がわかる。この数はハーモニック数と言われており、厳密にはビーム周回周波数と加速空洞である RF 周波数が等しくなるような値である。詳細については別講義「放射光源加速器の高周波システム」などを参照されたい。参考に PF リングではハーモニック数は 312 であるので 312 個の番地（アドレス）のついた蓄積ビームの入るバケットが用意されており、いずれのアドレスに入射することも可能であり、原理的には全てのアドレスにビームを蓄積することも可能である。

入射ビームをどのアドレスに蓄積させるかということは、蓄積ビームをどのように配置するかと同じ問である。放射光源加速器における光利用では、電子ビームは光源であるため、蓄積ビームを配置することは光源を光利用の要請に応じて配置することに他ならない。その配置には、光源の光の量に関わる電子ビームの電流値の増減と、光源からの光の来るタイミングに関わる光源の間隔である電子ビームと電子ビームの蓄積間隔の広狭の 2 つのパラメーターがある。これらを組

み合わせて蓄積ビームを配置（蓄積リングに電子ビームを充填）することをビームフィリングと謂う。またその配置の仕方の異なりをフィリングパターンという。

Fig. 5 にその一例を示す。1 つの電子ビームを 1 つのバケットに配置する Single bunch filling（例 PF:<50 mA、AR:<60 mA）や複数の電子ビームを複数のバケットに配置する Multi bunch

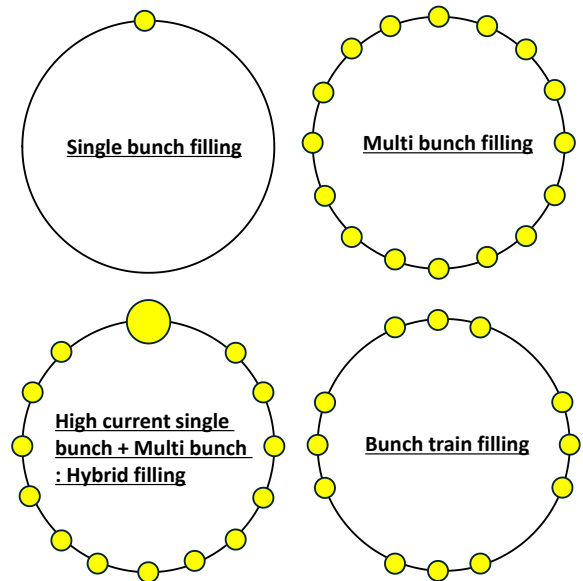


Fig. 5 ビーム（バンチ）フィリングパターン

filling（例 PF:450 mA (280 bunches)、SPring-8:100 mA (203 bunches)）を基本とし、それらを組み合わせる Hybrid filling（例 PF:50 mA+450 mA (130×65/106* bunches)、*65/106 はリング全周のうち 65/106 の領域、SPring-8:5 mA+95 mA (406×11/29* bunches)、*11/29 はリング全周のうち 11/29 の領域）、または、電子ビームを連続的に配置したトレイン状の塊をリングに複数配置する Bunch train filling などがある。それらの時間的な配置の広狭はさまざまで、ユーザー実験を主導するビームライン側からの要請により組み合わせられる。なお、電子ビームと電子バンチは、ほぼ同義でいずれも電子が多数集まり塊（集群）の状態である。特に塊の状態を意識する場合にはバンチを使う。大電流シングルバンチにおいては強度の強い光がパルス的に供給され、小電流の電子ビームのマルチバンチフィリングでは強度はさほど強くなくとも光が途切れることな

く連続的に供給されると想像できる。光の強度と光の到達のタイミング（リズム）が加速器側で光の構造として創造できる。

ビームフィリングパターンを創造することが電子ビームの入射方法と密接に結びついていることは想像に難くない。放射光リング入射の入射技術には、蓄積の必要なバンチのアドレスに正確に入射ビームを入射することだけでなく、ある特定の大電流の電子バンチには、荷重をかけてバンチ電流値を高くするように入射ビームを配分し、他の均一なバンチ電流値の分布には均等に入射ビームを配分することが求められる。さらに、電子バンチはほぼ光速で加速器リングを周回しており、周長 1 km 程度の大型加速器では 3.3 μ s ほどで、周長 200 m 程度の中型加速器では 667 ns ほどで一周して入射点に戻る。この入射点に戻る、丁度その時に、蓄積リングから数 100 m 以上上流（例 PF-Linac 電子銃間で 850 m: 輸送路 150 m+ Linac 700 m）の線形加速器（ライナック）の最上流の電子ビーム生成点から、電子ビームが輸送されて入射点に到達し、電子バンチに不足分の電流値だけ継ぎ足すことが出来なければ、電子バンチ配置による光の構造を生み出すことが出来ない。全ての電子バンチ、電子ビームの挙動が光速に近い運動をしていることを考えるならば、蓄積電流値の不足を検出後、電子を生成し輸送するよう要求信号を送り、生成・輸送されるのに要する時間も十分に考慮せねばならない時間の経過と言える。入射点での蓄積ビームと入射ビームを合流させることの時間的な制御は、極めて装置への精密な要件があることは容易に理解できる。入射技術では、あるアドレスの蓄積電子バンチの電流値の不足を検出し、適時、時間的に正確に、適量の入射ビームを繰り返し入射し、過量なく要求電流値を蓄積することが基本となる。

3.3 入射技術と入射の物理

ここまでで入射ビーム、蓄積ビーム、蓄積バンチのそれぞれの関係性、入射技術に求められる要素と概要を説明し、概念としての把握につとめたが、次にビーム物理の側面から入射の物理として

入射が成立する物理要件、入射ビームが蓄積ビームへと移行する過程の理解を深めたい。

ここでビーム物理の用語として「エミッタンス」「ダイナミックアパーチャー」「アクセプタンス」が重要となる。これらの詳細については別講義「ラティスと線形オプティクス設計と運転への適用」を参照されたい。電子ビームは電子バンチであり電子の集群運動の塊である。そのため電子ビームはある一定の塊としての空間的（水平、垂直、進行方向のそれぞれに対して）な広がりを持つ。ただし、広がり蓄積ビームに関しては加速器リング内に配置される水平発散電磁石（垂直収束電磁石）、水平収束電磁石（垂直発散電磁石）の効果により、入射ビームに関しては輸送路に配置される同様の電磁石群により、偏向電磁石で生じる個々の電子ごとのエネルギー偏差に起因する発散をある一定空間内にとどめることが可能である。それら集群の運動は、水平、垂直共に収束と発散を繰り返す振幅（ベーター関数）に基づくビームの空間的な広がりとしてのビームサイズは、リング内、輸送路内の場所、場所によって変わるものの、電子ビームのエネルギー損失とエネルギーの供給による一定条件のもと平衡状態に達した結果、その位相空間上の（個々の電子の位置と運動方向）広がり（面積）は Courant-Snyder の不変量により一定を示す。この不変量をビームエミッタンスと謂う。ビームエミッタンスは場所、場所では変化しない不変量であるため取り扱いがしやすい。個々の電子の発散、収束のリズミカルな集群運動の結果としての電子ビームの広がりの平衡的な重心挙動はリング中心軌道（おおむね真空ダクトの中心を通る軌道）にとどまるのに対して、電磁石の設置の誤差などにより電子ビーム全体の重心位置がこの中心軌道をずれる場合がある。このことから、電子ビームが安定して加速器リングを周回もしくは輸送路を輸送するには、電子ビームの広がりが突発的な擾乱により急激な膨張、収縮を経験したとしても、もしくは、中心軌道から電子ビームの重心位置がずれたとしても、個々の電子ビームが損失することなく真空ビームダクト空間に存在し続ける、ある

一定の広がりを超えない空間領域が存在することがわかる。これをビームアクセプタンスと謂う。まず、ビームアクセプタンスは、電子ビームの加速器内の存在領域である真空ビームダクトとの空間領域と比較できる。この真空ビームダクトは物理口径（フィジカルアパーチャー）と謂い、この隔壁によりビームアクセプタンスは制限される。ビームアクセプタンスは物理口径より小さく物理口径の障壁で電子ビームの損失が起らないように、電子ビームの広がりや、電子ビームが中心軌道からはずれた状態でも、ベーター関数に基づく、水平・垂直の発散、収縮の個々の電子の最大振幅を制限するものでなければならない。真空ビームダクトは電磁石の口径で概ね決まるため、アクセプタンスは、電磁石口径と電子ビームの振動振幅を決定する収束力となる電磁石の磁場の強度で決まるとも考えられる。

さらに、電子損失の指標であるビーム寿命を決定する要素で電子損失を起こすものとして、量子寿命、ガス散乱（主たるラザフォード散乱など）、タウシェック寿命があるように、電子の集群運動で確率的にアクセプタンスを超える振幅を有する電子や、確率的なガスとの衝突による散乱で生じる擾乱でアクセプタンスを超える振幅を得る電子や、電子バンチ内の電子同志の運動エネルギーの授受で確率的にアクセプタンスを超える振幅を有する電子が存在する。これらは大振幅の結果、直接的に物理口径である障壁への衝突で失われる場合や、大振幅の結果エネルギー損失がエネルギー補填・誤差の許容範囲（エネルギーアクセプタンス）を超えて失われる場合がある。これらの要素は、確率的な要素としてアクセプタンスを決定している。

電磁石の設置誤差、電磁石の磁場の分布はアクセプタンスの重要な要素となっており、本来通過すべき電磁石中心から外れた位置を電子ビームが通る場合、本来の効果以外の磁場要素（不整磁場、定められた機能の次数以上の高次磁場成分）がある場合、電子ビームは理想の平衡状態から外れるため、その外れ方の程度によってはビーム寿命と同様に確率的に共鳴的に大振幅を有する電

子を生み出す事となり電子損失へとつながる。ここにアクセプタンスの重要な決定要素がある。この電子ビームが存在し得る領域の上限枠であるビームアクセプタンスは、さまざまな要因で決定されるが、集群動作の確率的な要素となっており、要因を加味した6次元ビームトラッキングシミュレーションにより電子集群の運動を追跡し、統計的な手法により電子の損失が許容される範囲（領域）として決定される。このことからアクセプタンスが電子の経験するベーター関数の最大振幅でも損失しない物理口径に対応するのに対して（これは物理口径に対してベーター関数の振幅が制限された領域とも見られる）、電磁石の誤差成分による共鳴によって引き起こされる振幅は、ベーター関数の最大振幅以下の一定の振幅以上でも損失を引き起こすことが理解されており、ここに真空ダクトの隔壁とは別の障壁があることから、別にダイナミックアパーチャー（力学

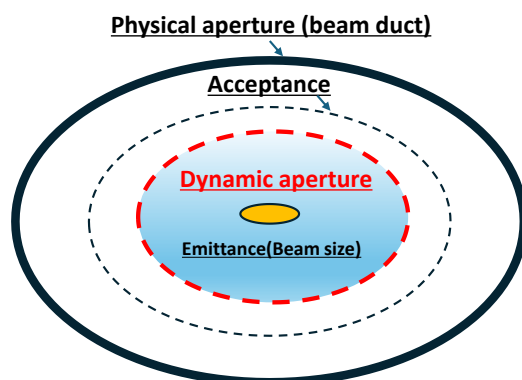


Fig. 6 アクセプタンスとエミッタンス

口径）と謂われる。力学口径に関して詳細は、別講義「非線形オプティクスの最適化」を参考にされたい。力学口径は現代の極小エミッタンスを追求する第3世代以降の放射光加速器ではアクセプタンスよりも小さくなる傾向があり、電子ビームが安定的に加速器リングを周回するビーム安定性は力学口径の領域に制限される。Fig. 6 に概念的なそれぞれの領域の関係性を示す。エミッタンスが十分に小さな電子ビームに対してアクセプタンスを広くとるため真空ビームダクトを大きくするか、エミッタンスの小さくなることで力学口径が小さくなっているため、その大きさに合わせて余分な空間を用意せずにアクセプタンスも

小さく、小さな物理口径の真空ビームダクトとするかは加速器設計の上で重要な設計要件の一つである。

さて、ビーム入射の物理描像はこの2つの用語を組み合わせとして表現できる。蓄積ビームは加速器リングオブティクスで決定されるエミッタンスという広がり、電子ビームが安定的に存在しうる領域であるアクセプタンス内にとどまるようにビーム中心軌道を中心にリング内を周回している。また、ビーム入射以前の状態では、加速器リング（放射光加速器では蓄積リング）の真空ビームダクトの中には蓄積ビームは存在しない。対して、入射ビームは輸送路オブティクスで決定されるエミッタンスで輸送路を運ばれてくるが、蓄積リングと入射ビームの存在する輸送路は、入射部において別々の物理口径の空間として存在し入射ビームは蓄積リングの物理口径の外に存在する。まず、入射ビームを、蓄積リングに入射するには入射ビームを蓄積リングの物理口径の中に入れる必要があるため、物理的に輸送路真空ビームダクトは蓄積リングの真空ビームダクトと接合され2つの物理口径が一つの物理口径に統合される必要がある。このようにして、入射ビームは蓄積リングの物理口径の中に導入される準備が整う。

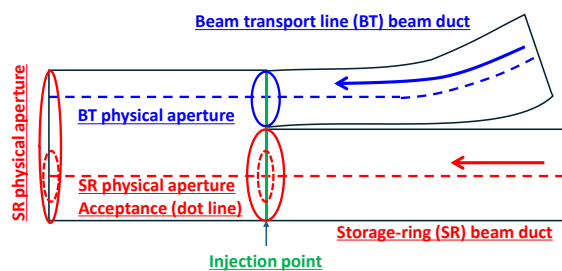


Fig. 7 蓄積リングと輸送路の合流

この状態で、入射ビームは蓄積リングの物理口径内に存在するようになるが、蓄積リングのアクセプタンス、もしくはそれよりも狭小な力学口径内には包含されておらず、このままであれば入射ビームは安定的に周回することはおろか、蓄積ビームへと遷移することが出来ず、蓄積ビームがあれば蓄積ビームに合流させることが出来ない。

Fig. 7 にその視覚的な描像としてとらえた説明を示す。

蓄積リングへの入射ビームの導入を成立させるには、蓄積リングのビームアクセプタンスの中に包含される必要があり、包含されない場合、入射ビームは全損失となり、蓄積されることはない。Fig. 7 で理解できるように、このままでは入射ビームは蓄積リングアクセプタンスからは遠く離れて並行した軌道を進み、アクセプタンスの中に包含することが出来ないため、蓄積リングのアクセプタンスを入射ビームに近づける措置、または、入射ビームを蓄積リングのアクセプタンスへと近づける措置が必要である。電子ビームを安定存在領域に入れることさえできれば、入射ビームは蓄積ビームへと移行し、蓄積リングを周回する。この移行の過渡状態については 3.5 で詳細を説明する。

ここまでのアクセプタンスは電子ビームの水平方向 (x)、垂直方向 (y) の空間的な広がりとして認識でき、水平、垂直の運動方向 (x' , y') の角度広がりに加えそれぞれ位相空間上の広がりとなる。さらに電子ビームは運動しているため進行方向に対する位置 (z)、これは時間的な要素としてバンチアドレスのバケットタイミングである。電子ビームはエネルギーを有するためビーム進行方向にはエネルギーに依存した空間的な広がりもあり、これらは中心エネルギーに対して許容されるエネルギー偏差 ($\Delta p/p$) に対応するエネルギーアクセプタンスも意識せねばならない。空間 (x, y, z)、時間 (t)、エネルギー (p) の全ての制約領域に入射ビームが包含されたときに入射が成立する。

3.4 標準的な入射方法：バンプ軌道生成入射

次に入射ビームを蓄積リングのアクセプタンスに包含させる具体的な技術について説明したい。通常、加速器リングは水平面に設置され、電子ビームは同一平面上の水平面を輸送され、水平面をリング内で周回することから、ここでは簡単に電子ビームの運動を水平運動に注目し考える。もちろん、輸送路と加速器リングが相対的に地面

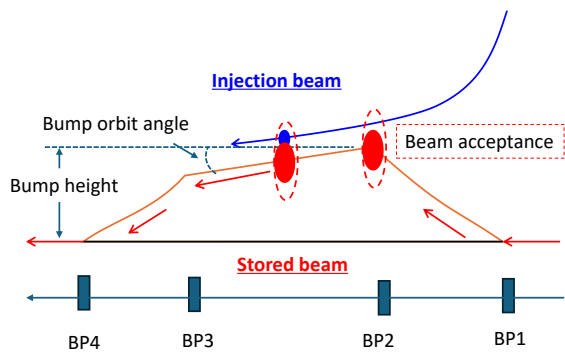


Fig. 8 バンプ軌道生成入射

レベルを異なる場合には垂直方向の運動を考慮する必要があるが省略する。

入射ビームに蓄積リングのアクセプタンスを近づける方法がこれまでの加速器の歴史でもっとも標準的な入射方法である。その方法をバンプ軌道生成入射という (Fig. 8 参照)。図中の蓄積リング側の軌道は、入射がない場合には黒線の加速器リング中心軌道を通っており、「入射の時に」、「バンプ (Bump: こぶ、隆起)」状に軌道を輸送軌道側の入射ビームに寄せるように膨らませ、概念的には蓄積リング軌道のアクセプタンス (または力学口径) 内におさまる空間的な距離まで近づける。このバンプ軌道は、BP1~4 までの 4 台の正負の偏向を生む偏向電磁石 (バンプ電磁石: Bump magnet: BP) で生成される。ただし、蓄積リング内に設けられる入射部 (加速器リング光学設計での入射セル、セクション) には、全周に渡る他のノーマルセルとの対称性 (共通性、整合性) が求められる。BP2~3 の間には輸送路との物理的なビームダクトの接合空間が必要なため電磁石のない空間となるが、BP1~2 間、BP3~4 間においては、ノーマルセル光学の電磁石列 (偏向電磁石、4 極電磁石、6 極電磁石) が配置されるため、バンプ軌道はこれら電磁石の電磁石中心から外れた場所での各磁場成分の磁場の影響も加えられて、軌道のふくらみ高さ (Bump height: バンプ高さ) が決定する。ここで用いられるバンプ電磁石は、バンプ軌道を入射の時のみ生成する必要があるため (後程説明する)、瞬間的に必要なタイミングでパルス磁場を生成するキッカー電磁石 (パルス電磁石) でなければなら

ない。BP1 と BP4、BP2 と BP3 は同方向の磁場向きとなっており、軌道を蹴り上げて、入射ビーム軌道に近づいたところで蹴り戻し、入射ビームと平行にし、再び、入射ビームと共に蹴り返してそれぞれを蓄積ビーム軌道の方へ向かわせ、最後に蓄積ビーム軌道と平行になるように、入射ビームと蓄積ビーム軌道が蹴り戻される。このバンプ軌道の生成には、必ずしも、4 台のバンプ電磁石を必要とはしない。バンプ電磁石の配置数を減らせば、設置コストも空間も節約でき、加速器リング光学の対称性も高めることが出来る。バンプ軌道の生成の方法として他の事例を Fig. 9 に示す。バンプ電磁石のキックの方向も図中に垂直矢印で示す。4 台バンプでは、台形軌道が生成でき、入射ビーム軌道とバンプ軌道の並行を得ることが可能なバンプ軌道角 (Bump orbit angle: Fig. 8 中) を制御できるのに対して、3 台

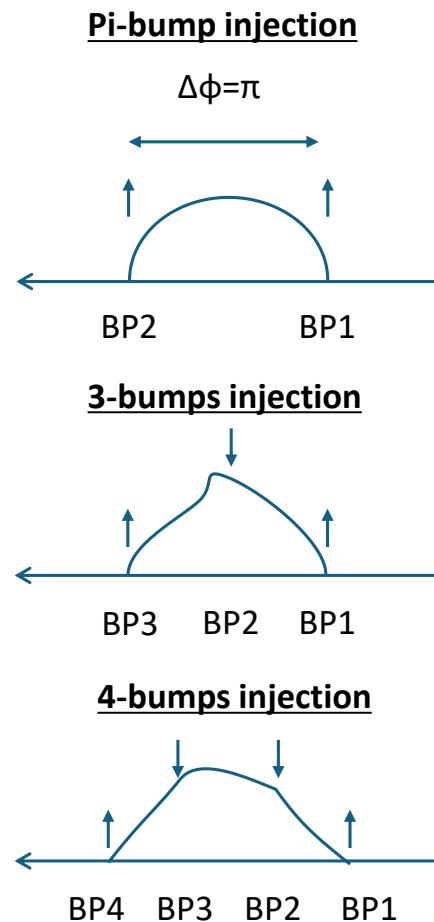


Fig. 9 バンプ電磁石配置事例

バンプでは、三角形軌道の生成となり並行軌道や入射ビーム軌道との相対角の制御はできないデメリットがある。特異的なものとして2台のバンプ電磁石のみで成立する π (Pi) バンプ入射では、蹴り上げた軌道の位相が180度進んだところで蓄積リングオブティクス電磁石の磁場で放物線を描くように蓄積ビーム軌道まで自然と戻ることを利用し、蹴り戻して蓄積ビーム軌道に並行とする方法で、バンプ軌道生成の究極的な洗練された形となっているが、バンプ軌道の形を決定するノブが少なくバンプ軌道高さのみ保証する。

具体的に蓄積リングの入射セルにバンプ電磁石が配置されたオブティクスを KEK の PF、PF-

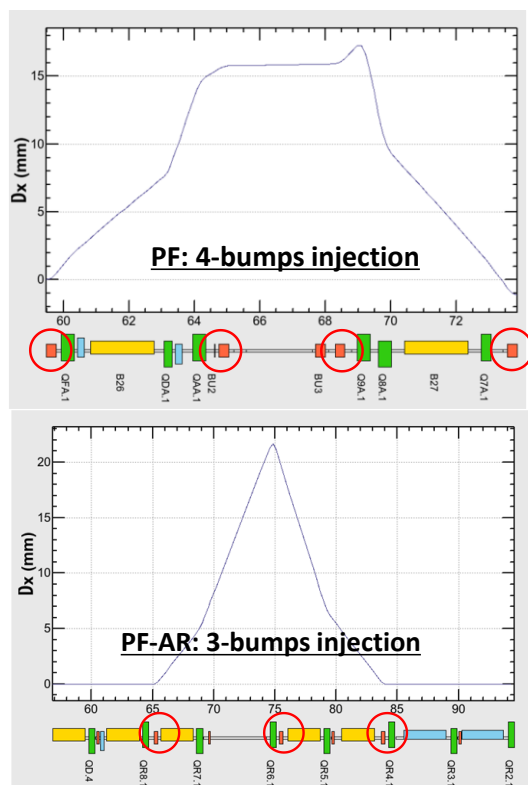


Fig. 10 PF (上) 及び PF-AR (下) のバンプ電磁石配置 (○囲みが BP 電磁石)

AR 加速器リングの入射セルを例に Fig. 10 に示す。シミュレーションで示されるバンプ設計軌道が他電磁石の蹴り角の効果を加味して描かれている。それぞれ、台形バンプ軌道、三角形バンプ軌道生成の好例であり、実際に運転に利用されている。Fig. 3 では入射部で入射ビーム輸送軌道が、加速器リングの外側より合流する概念 (PF や PF-

AR) としていたが、こればかりでなく Fig. 11 (右図) に示されるように加速器リングの内側より合流することも可能で SPring-8 がその好例である。

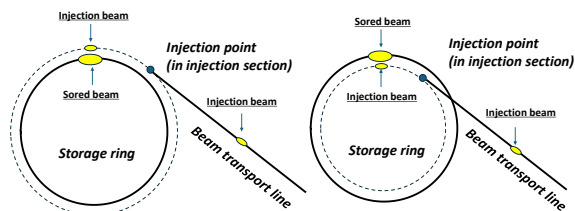


Fig. 11 リング外側入射と内側入射

3.5 バンプ軌道生成入射の物理描像

空間的、概念的にバンプ軌道生成入射について説明を進めてきたが、バンプ軌道生成を位相空間でとらえ、「入射の時」に限りバンプ軌道を生成する必要の理由について考えてみたい。

Fig. 12 に上、中、下と位相空間内での入射ビームと蓄積ビームの配置について順に遷移する様子を示す。水平平面上の運動のみを考慮している。上図では、蓄積ビームが位相空間に入射点でのベータatron振動の傾き α で傾いた楕円状に広がるビームアクセプタンスを纏っている。蓄積ビームはゼロ点の蓄積ビーム軌道上にあり、入射ビームはある入射角にて蓄積リングの物理口径の外に配置されており、蓄積ビームとの相対的な位置は、蓄積リングのビームアクセプタンスの外にある。このままでは、入射ビームが蓄積ビームダクトの中へ導入されたとしても蓄積リング内を1周回後には蓄積リングの物理口径の障壁に衝突し損失してしまうことを示している。そこで、中図に移行し、バンプ軌道生成入射では、蓄積ビームを蓄積リングの物理口径に接触しない程度に、かつアクセプタンス内に入射ビームが包含されるように蓄積ビームを入射ビームに近づける。この時の蓄積ビームの位置の変位がバンプ高さとなり、その時の角度が必要なバンプ蹴り角となる。入射ビームの角度と蓄積ビームの角度には相対的に差があり、この差がバンプ軌道角となる。4 台バンプ軌道生成ではこの角度を制御することが可能で、ゼロとするように入射ビームとの並行

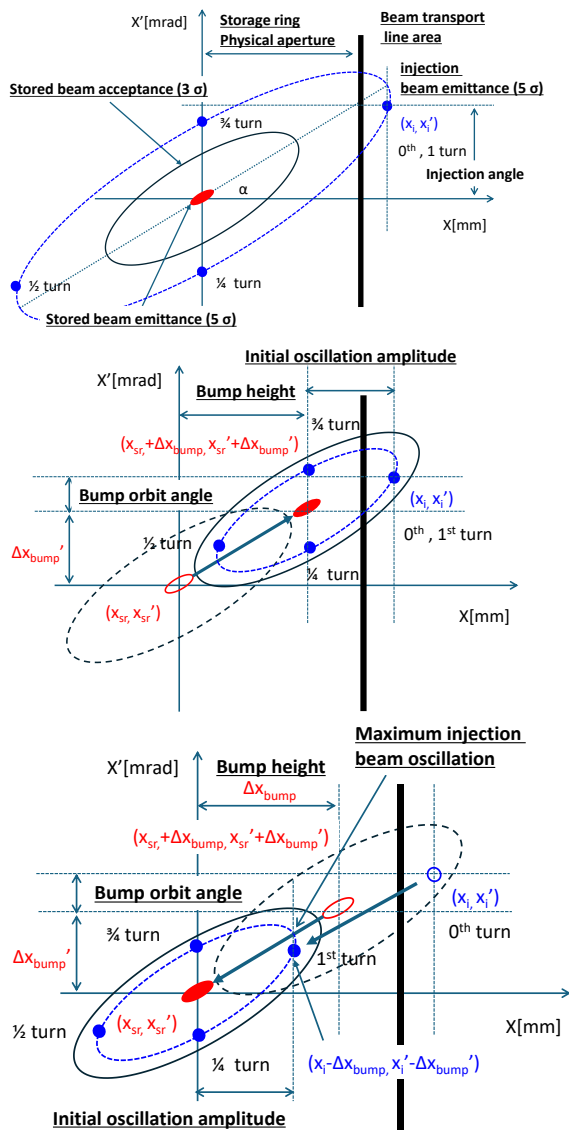


Fig. 12 位相空間内での入射及び蓄積ビーム

軌道を作ることが可能である。中図のなかでは、アクセプタンス内に包含された入射ビームがその中で未来に周回する軌道が点線で示されており、この時点ではこのままでは1周目には先程と同様に蓄積リングの物理口径に衝突し損失してしまう。そこで、下図のように生成したバンプ軌道が蓄積リング軌道に戻ることで、アクセプタンスに包含された入射ビームも蓄積ビーム軌道を中心にバンプ軌道上の蓄積ビームとの相対的な距離を初期振幅 (Initial oscillation amplitude) に入射ビームの最大振動 (Maximum injection beam oscillation) を青点線の軌道の楕円の頂点と

して、安定的に蓄積リングの物理口径内で周回するようになる。4 台バンプ入射では中図のバンプ軌道を立ち上げる、立ち下げる役割を入射ビームの到達の時間と同時に行う。

さて、バンプ軌道生成は、「入射の時」その時のみ生成される必要があると先に述べた。それは Fig. 12 において何を意味するのか。バンプ電磁石が常時軌道を生成したままであると、周回後の入射ビームはあらためてバンプ軌道に乗ることになるため、物理口径の障壁にぶつかり失われてしまう。よって、パルス磁場を生成するバンプ電磁石は、入射ビームをパルス磁場の頂点において作用させる必要があるため、リング 1 周回時間後には、磁場出力をゼロとするようにパルス磁場の片側半分の幅がリング周回時間の 1 周回分以内とする必要がある。

入射ビームをある入射角 (x_i') で入射する場合、この入射角を調整し、バンプ軌道で近づく蓄積ビームのビームアクセプタンスに入りやすいように調整することも可能である。具体的には蓄積ビームアクセプタンスの α の傾き直線状に乗せるような調整である。また、蓄積ビームアクセプタンスの楕円形状の傾きである α を、蓄積リングのオプティクス設計の段階で入射ビームの導入しやすい傾き (ゼロとすることも可能) に加えて、 α を正や負 (今回は $\alpha > 0$) と採用することも可能である。

入射ビームのビームエネルギー偏差が大きい場合、入射ビームは蓄積リング内のディスパージ

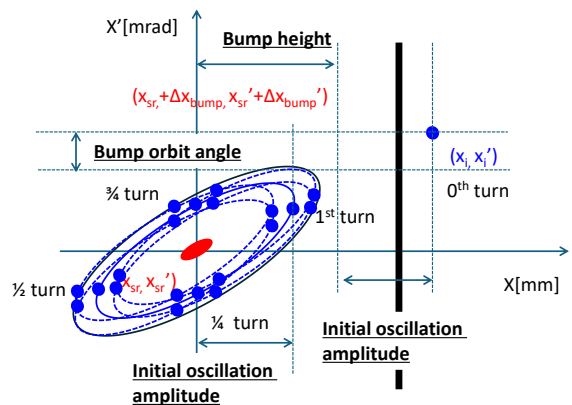


Fig. 13 エネルギー偏差とベータートロン振動

ヨン (η_x, η_x') によりその偏差分 ($x=\eta_x \times \Delta p/p$, $x'=\eta_x' \times \Delta p'/p'$) だけベータートロン振動を引き起こす。それは、バンブ軌道を生成し近づけた時の入射ビームと蓄積ビームとの軌道の位置の差によるベータートロン振動（これを入射ビームの初期振幅と謂う）に加味されることになり、蓄積リングアクセプタンス内で周回する入射ビームの位相空間で作る楕円がアクセプタンスより外にはみ出る危険性ははらむこととなる (Fig. 13 にその楕円軌道の蓄積ビーム軌道中心からのふらつきを示す)。

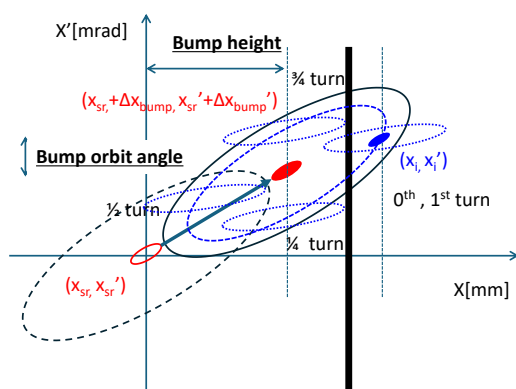


Fig. 14 入射ビームのマッチング

また、Fig. 12 においては、入射ビームエミッタンスは円形の広がりがかつ十分に蓄積リングのアクセプタンスや蓄積ビームエミッタンスよりも小さいように示したが、エミッタンスが Fig. 14 の点線で示すように大きく、非相似の場合、アクセプタンスよりもはみ出し、入射ビーム損失の危険性がある。この時には、入射ビームのエミッタンスを輸送路にて十分に小さくするだけでなく、蓄積リングのアクセプタンスと相似形状に成型するような (Fig. 14 図中の青ドット線の入射ビーム形状の状態のものを青塗り潰しのものへ)、輸送路のオプティクスと蓄積リングの入射点でのオプティクスとの整合をとるマッチングが必要となる。

3.6 放射減衰

入射ビームは蓄積リング内に導入されてから、リング中心軌道の周りをバンブ軌道生成の結果縮小された入射ビームと蓄積ビーム軌道との距

離による初期振動振幅 (Fig. 12 中 Initial oscillation amplitude) とするベータートロン振動により、蓄積ビームがあれば蓄積ビームの周りを振動しながら蓄積リングを周回し始める。電子ビームには放射光の放射によりエネルギーを失う性質があるため、蓄積ビームエミッタンスの広がりを生じるベータートロン振動に比べ大きな初期振動振幅を伴うベータートロン振動は放射光の損失も大きく、結果放射減衰の効果も大きい。ため、放射減衰で決まる時間スケールで初期振動振幅は減衰し、最終的に蓄積ビームエミッタンスと混合し蓄積ビームエミッタンスとしての平衡状態となる。放射減衰については別講義「ラティスと線形オプティクス設計と運転への適用」や「放射光源加速器の高周波システム」などを参照されたい。蓄積ビームにまわりついた状態の入射ビームは、ここで完全に蓄積ビームと一体化する。放射減衰の時間スケールは、PF リングにおいては水平/垂直が 7.8/7.8 ms、SPring-8 では水平/垂直がともに 8.3 ms である。トップアップ運転では、次の入射までに空けなければならない時間間隔としては、この放射減衰の時間スケールを基本とし、最大でも 100 ~ 200 ms の間隔で 5Hz から 10Hz 程度の繰り返しが一般的である。

3.7 入射ビームの電荷量と入射効率

入射ビームの電荷量は PF リング用に線形加速器から輸送されてくる電荷量は、0.1 nC である [12]。これは PF リングの蓄積リングに導入された場合、蓄積電流値としておよそ 0.15 mA である。1 Hz の繰り返し入射で PF リングの運転蓄積電流値 450 mA を蓄積するには 50 分で蓄積が完了する。ここで、入射ビームが、前節で述べたようになんらかの損失が生じ、輸送されてきた入射ビームの電荷量の 6 割程度しか蓄積ビームの導入とならなかったとしたら、83 分の蓄積時間を必要とすることになる。この入射時の入射ビームの損失を入射効率と謂う。放射光加速器では、ユーザー実験のための光源提供を任務としており、実験の継続性を保証するため、不測の蓄積ビームの損失時の回復やトップアップ運転において入射

ビームを出来る限り迅速に蓄積することが求められている。

このことから、重要な放射光加速器へのビーム入射の具備すべき要素として、3つある。

- 高い入射効率の維持
- 入射ビームの電荷量の維持と増強
- 早い入射繰り返し可能性

1つ目に入射効率を高くし入射ビームの損失を防ぐ必要がある。第2世代放射光加速器では40~60%程度の入射効率と謂われているが、第3世代放射光加速器では、挿入光源のギャップ閉止がなければ95%以上が実現されている[13]（ただし、挿入光源のギャップ閉止による磁場変調、力学口径の縮小、物理口径の垂直方向の縮小で80%まで下がる[14][15]）。重要な入射の要素として、2つ目に輸送されてくる入射ビームの電荷量の増加が挙げられる。これは、輸送路最上流にある電子源において入射ビームの生成電荷量を増加させるだけでなく、輸送路上の入射ビームの輸送損失をなくす必要がある。3つ目の重要な入射の要素としては、放射減衰時間のスケールで繰り返すことが出来るバンパ電磁石などの入射装置の高繰り返し対応化である。世界的に標準となる繰り返し数は50Hzから60Hz程度を上限とし、運用では最大10Hz程度と考えられている。

1つ目の入射効率を悪化させる要因には、もっともすぐに考えられるものとして蓄積リングのアクセプタンスへの導入自体、もしくは初期では導入出来ていたがその再現性が確保できていない場合がある。アクセプタンスに入射ビームに導入するための技術要素それぞれの初期設計の整合性、再現性が取れていない場合、アクセプタンスから取りこぼし、つまりのところビーム損失が生まれる。下記にその項目を上げる。すべての項目にはその「設計と再現性」の意味が追記される。

- 物理口径
- アクセプタンスまたは力学口径
- バンパ軌道
- 入射ビーム軌道
- 入射ビームのエネルギー変動

● 入射ビームのエミッタンス

物理口径は蓄積リングビームダクトで決定されるため基本的には加速器リング建設時の設計次第である。しかしながら、加速器リングは、建設後も常に高度化要求にこたえるため装置の増設改修が行われていくため、統一されていた物理口径値よりも狭小な物理口径の思わぬ導入が行われる時がある。このようなことはビーム入射設計の基本前提を崩すことになるため、入射点で入射ビームにバンパ軌道を近づけるための入射部の物理口径よりもリング全周に渡り狭小な物理口径が存在しないこと（ただし各処ベータートロン振動振幅で規格化して比較）に注意が必要である。アクセプタンスや力学口径についても同様に、加速器リングのオプティクスの高度化の要請により改修が行われていく。アクセプタンスや力学口径がビーム入射の基本設計から外れて思わぬ過程で縮小していないように注意が必要である。加速器リングのオプティクスを決定するのは電磁石の磁場であるから、電磁石の磁場の生成源である電流の安定性（通常 10^{-4} 、0.01%、100 ppm以下）が再現性に重要であることは謂うまでもない。さらにしいて言えば、電磁石の設置のアライメントも同様に物理口径とアクセプタンス、力学口径に密接に関係していることから、入射効率を左右する要因であり、求められる設置誤差は第3世代放射光加速器においては40 μm （70~80 mm程度の電磁石ボア径の寸法スケールに対して 10^{-4} の水準）にまで制限される。別講義「放射光源で必要なDC電磁石電源」を参考にされたい。

バンパ軌道は、入射ビーム導入後のアクセプタンス内でのベータートロン振動の初期振幅を決めるため、蓄積ビームを入射部の物理口径の障壁で損失しない程度のギリギリまで入射ビームに出来る限り近づける必要がある。そのためには、バンパ高さを高く持ち上げる必要があるが、パルス磁場を生成するバンパ電磁石の装置へ要求される電力は増加する。そこで、バンパ高さを低くしたい場合には、入射部の水平の物理口径を小さくすればよいが、蓄積リング1周に渡り局所的にバランスを欠いた狭い物理口径の場所が存在す

ることは不測の蓄積ビームの擾乱振動などによる損失への許容度が低下するため、極端な狭小化は難しい。ここに、バンブ電磁石の装置側からの現実的な要求と加速器リングのオプティクス設計とのバランスの取れた設計が存在する。バンブ軌道の生成に必要なバンブ電磁石のパルス磁場には、常に安定したアクセプタンス内への入射ビームの導入を確保するための軌道の再現性を保証するために 1%以下の安定度が求められる。具体的には一般的なバンブの高さの 10 数 mm を仮定すると、100 μm 程度の軌道変動しか許容されない。第 3 世代放射光源加速器でアクセプタンスが水平片側 20 mm 程度、第 2 世代放射光源加速器でその倍程度が確保されているとすると、バンブ軌道生成の結果初期振動振幅が、それ以下の 10 数 mm 程度と設計される。対して、第 4 世代放射光リングでは 0.1%以下の安定度要求となっており、これは、アクセプタンスよりも一桁下がるより狭小な力学口径（3~5 mm など、10 mm 以下）への入射が求められる時代となったことによるもので後程また詳細について説明する。

ここまでは蓄積ビーム側での入射効率の悪化要因を示してきたが、入射ビーム側での入射効率を悪化させる要因は、入射ビームのアクセプタンス内での初期振動振幅を決定する、入射ビーム軌道（蓄積ビームとの相対距離、入射角度）、エミッタンス、エネルギー偏差の 3 つである。これはビーム入射の具備すべき要素の 2 つ目とも関係する。これらが、入射ビームの初期振動の振幅を大きくする方向、アクセプタンス内をはみ出すような方向で、初期設計値通りでない場合や、再現性が取れない場合に入射ビームの損失は増え入射効率が悪化する。電子銃で生成された電子ビームが線形加速器で加速され輸送路を通り、そのまま入射ビームとなる場合には電子銃、線形加速器で生じたエミッタンス、エネルギーの履歴を引き継ぐ。エネルギー偏差の増大に加え特に中心エネルギーの変動が起きた場合には、エミッタンスのみならず、ディスパージョンのある輸送路での軌道変動にもつながる。軌道変動は、最終的には入射ビームの入射点での位置の変動となるだけでな

く、輸送路途中の 4 極電磁石の中心を通らなくなることによるエミッタンスの変動にもつながる。これらに対し、エネルギー変動の抑制、またはフィードバック、それでも残留する入射ビーム軌道の変動にはビーム軌道補正のフィードバックなどにより、入射ビーム軌道を定位置に維持する試みが必要で、エミッタンスの変動には、コリメーターなどによる物理的なビーム形状の整形[13]などで広がり抑制する方法などもとられる。ただし、コリメーターは入射ビームの電荷量を減少させることにつながるためビーム入射の具備すべき要素の 2 つ目と関連し避けることが望ましい。

入射ビームの電子源から線形加速器までのパラメーター履歴による不定性を除く方法としてブースターリングの利用がある。ブースターリングではエネルギー加速によりブースターリングのオプティクスで決定される再現性の高い、エミッタンスとエネルギーの平衡状態が生み出される。このため、中心エネルギーを決定する偏向電磁石の磁場精度（つまり偏向電磁石電源の出力安定度）とリングオプティクスのエミッタンスを決定する 4 極、6 極電磁石の磁場精度が保証されれば、線形加速器までの履歴が一度ここでリセットされ、入射ビームの変動は蓄積リングの入射点までの輸送路のビーム軌道の安定度（輸送路電磁石の磁場（電源出力）の安定度など）を残すのみとなる。この観点からブースターリングは、建設コスト、運転コストを考慮したとしてもビーム入射を安定させる上では重要な加速器設計の要素となっており、放射光加速器の全体を設計する上で、どこに費用をかけ安定性の高い加速器を作ればよいかなどの十分な議論が必要である。

3.8 ビーム入射に必要な電磁石の配置

入射ビームと蓄積ビームが出会う点をビーム入射点と謂い、その入射点より上流側の入射ビーム軌道側には、輸送路を運ばれてくる入射ビームを蓄積リングの入射点へ蓄積ビーム軌道と平行な軌道に誘導するようにゆるやかに偏向させながら導入する（Fig. 15）。そのために必要な偏向電磁石群をセプタム電磁石（セプタム：分離壁を

持つ電磁石)と謂い、一般的には2台~3台の静的磁場を発生させるDCセプタム電磁石と1台のパルスセプタム電磁石よりなる。名前の由来となっている磁場を分離し外へ磁場を漏らさない目的のためのセプタム壁はパルスセプタムのみが有しているが、DCセプタム電磁石にも蓄積ビーム軌道への漏れ磁場の影響を軽減するためにパーマロイ(Permalloy)、ミューメタル(ニッケルを78~80%含有するパーマロイ)などを使い磁気シールド壁を設置するため、パルスセプタム電磁石と構造は似ており磁場の時間変化があるかないかの区別である。

パルスセプタム電磁石は、バンプ軌道により寄せられる蓄積ビームがセプタム壁に最近接する電磁石となる。図中でも示されているが電磁石による偏向角の向きがセプタム電磁石と最近接させるバンプ電磁石では逆となっており、もしセプタム電磁石の偏向磁場が蓄積ビーム軌道側に漏れた場合、寄せているはずのバンプ軌道を遠ざける結果となってしまう。そのため、セプタム壁からの漏洩磁場は極力低減すること(絶対値指標として数Gと地磁気レベル程度までを目標とする)が重要で、セプタム壁を導電性の高い遮蔽効果の高い銅製の板で作ることでパルスの漏洩磁場を、渦電流による渦電流磁場を発生させることで相殺し漏洩を防ぐ。これをパーマロイ、 μ メタル、などによる透磁率の高い磁気シールドで静的に磁場を吸収する方法と異なり、動的磁気シールドと謂う。パルスセプタム電磁石も入射時以外に磁場を発生し続け蓄積ビーム軌道への影響を持ち続けることを避けるためパルス電流による駆動

となっていて、入射時以外にパルス磁場が存在しない。DCセプタム電磁石のうち、下流側のものがより蓄積ビーム軌道に近い場合には、動的磁気シールドを利用した漏洩磁場低減のために、パルスセプタム電磁石を2台とする場合もある。

バンプ電磁石がパルス磁場を発生している時間幅は、蓄積ビーム2周回分以内との時間的制約があり、PFリングのような短周長リングでは、 $1.2\mu\text{s}$ 以内、SPring-8のような 1.5 km の大周長リングでは1周回時間が $4.7\mu\text{s}$ であるため、2周回以内が $9.4\mu\text{s}$ 以内と比較的短いのに対して、パルスセプタム電磁石は、渦電流を発生させるのに十分な時間変化となる周波数で良いためSPring-8では $45\mu\text{s}$ 、PFリングでは $12\mu\text{s}$ と比較的長い。

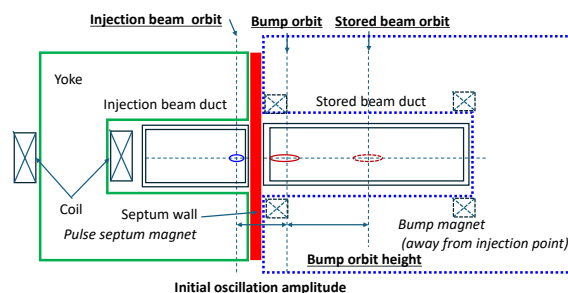


Fig. 16 入射点におけるビーム位置断面図

Fig. 16 に入射点における断面から見える入射ビームと蓄積ビームの位置関係を示す。入射ビームと蓄積ビームの間には、セプタム壁に加えて、入射ビームの輸送路の入射ビームダクト、蓄積ビームの蓄積ビームダクトの壁面が重なり、この厚みが、入射ビームの初期振動振幅の最小条件

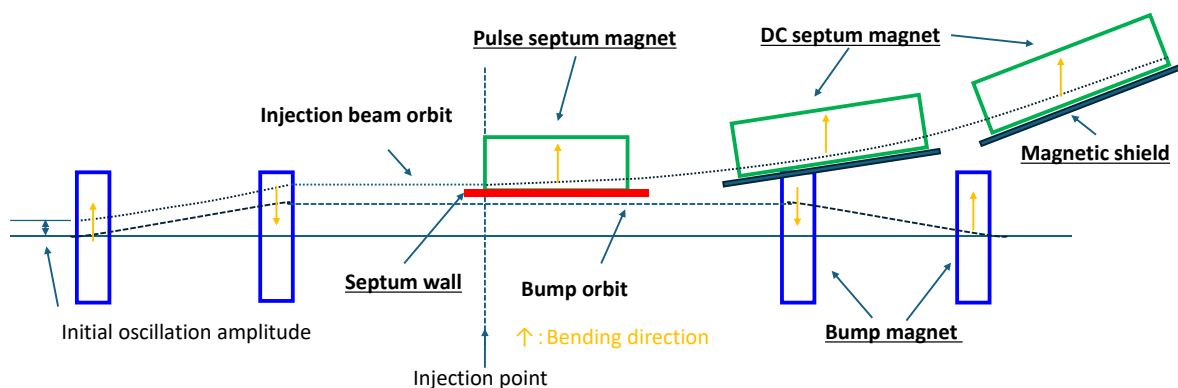


Fig. 15 ビーム入射に必要な電磁石配置

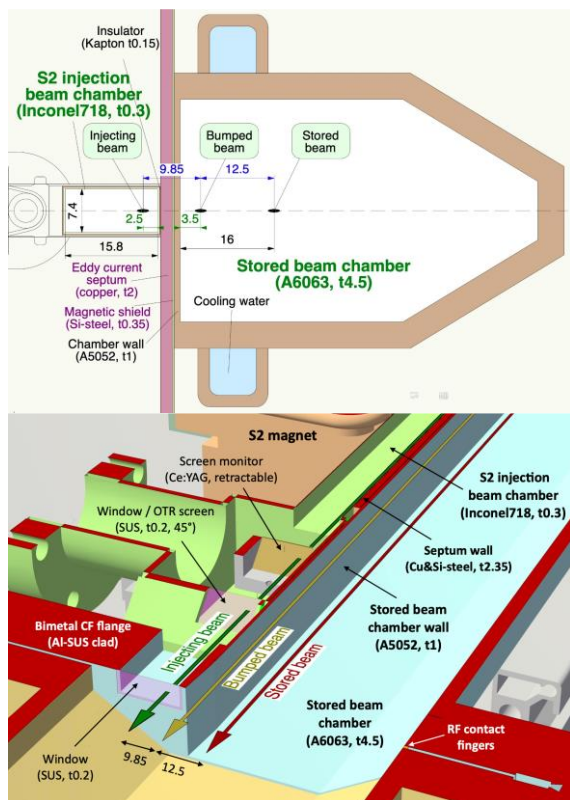


Fig. 17 PF リング最新入射点断面図

となっていることがわかる。セプトラム壁を薄くすることはセプトラム材の体積抵抗率を上げることとなるため薄さに限界はあるが、パルス時間を短くすることで周波数を上げ渦電流をより発生しやすくすることで薄くとも効果的に漏洩磁場の抑制につなげることも可能である。PF リングでは、セプトラム壁を最新の改造で 2.35 mm まで薄くしており、より入射ビームと蓄積ビームを近づけたい第 4 世代放射光加速器では 1 mm を検討し

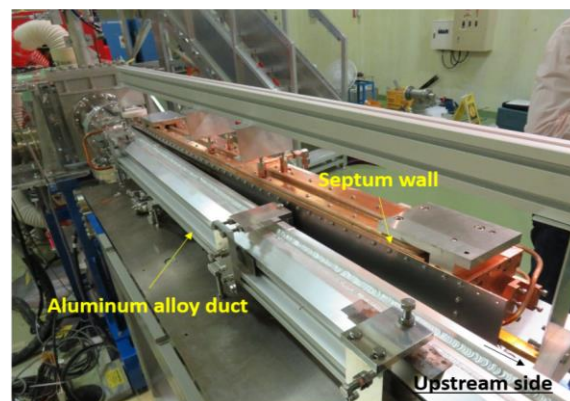


Fig. 18 PF リング入射点近影

ている。入射ビームダクトは導電性の高いもので製作すると渦電流が発生し本来のセプトラム電磁石磁場が減衰して入射ビームに十分な偏向角を与えられない問題もある。そこで、蓄積ビームダクトをなくすことはできないが、入射ビームダクトはなくすことが出来る。このような方法の一つにセプトラム電磁石内に真空ビームダクトを設けずに大気開放し気中輸送する方法、セプトラム電磁石自体をすべてを真空容器に入れ真空ビームダクトを用いなくても輸送路を真空に接続した状態にする方法がある。前者は、気中でのビーム散乱をある程度考慮すると本来のビーム入射の具備すべき要件である通り、出来る限り多くの電荷の入射ビームの入射の観点から外れ、気中散乱による入射ビームのエミッタンスの増加は、第 4 世代放射光加速器では避けたい。後者は、一挙両得であるが、様々な材料で製作される電磁石を真空容器内に収め、超高真空 (10^{-9} Pa) を必要とする蓄積リングと接合することは電磁石のデガスを

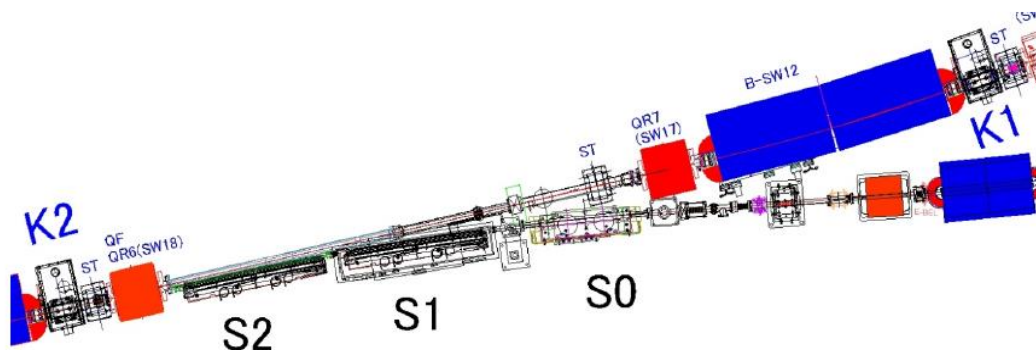


Fig. 19 PF-AR における入射点電磁石配置図。K1,2 がバンプ電磁石。S0 (DC) ,S1 (DC) ,S2 (パルス) 電磁石がセプトラム電磁石。入射ビーム進行方向は、紙面右手から左手に向かって運ばれる。

極力減らす必要があるなど技術的に難しさが伴う。これに対して、最新の PF リングでは、極めて導電性が悪く剛性の高いインコネルダクトを入射ビームダクトに採用し、セプタム電磁石のパルス磁場の減衰効果も低減し、かつ 0.3 mm の非常な薄肉とすることでセプタム電磁石に真空ビームダクトを使用する新たな試みに成功している。入射ビームダクトの厚みをゼロとは出来ないが、画期的な試みである[16]。Fig. 17 に最新の PF リングの入射部断面構造を具体例として示す[17]。Fig. 18 にその実写を示す。ビーム上流側から入射点を眺めたものである。手前側が蓄積ビームダクトで、置く側にセプタム壁を挟み入射ビームダクトが見え、左手奥に向かい、これら 2 つのビームダクトが入射点に向かい合流、接合されているのがわかる。最後に PF-AR での 3 台バンパ軌道生成入射の具体的な電磁石の配置を Fig. 19 に示す[18]。機器装置が近接し入り組んでおり、構造設計時に十分な検討が必要で、定義される入射点位置のアライメントによって入射点を中心に厳密に各装置が設置され、設計通りの入射ビーム軌道を実現できる。

4. 入射技術と開発要素

4.1 セプタム電磁石とその電源

4.1.1 セプタム電磁石の分類と真空ダクト

前節に大方の入射の技術的な要素を具体的な数値を織り交ぜながら機器配置とともに紹介を行った。本節では、それぞれの機器装置について改めて分類し、必要とされる開発要素についてまとめる。

- パルスセプタム電磁石（鉄芯型、空冷）
 - 真空封止型パルスセプタム電磁石
 - ◇ 真空ビームダクト無
 - 蓄積リング-輸送路直接接続
 - 蓄積リング-輸送路間隔壁有
 - 大気開放型パルスセプタム電磁石
 - ◇ 真空ビームダクト有
 - 蓄積リング-輸送路直接接続

- 蓄積リング-輸送路間隔壁有

- ◇ 気中ドリフト型

- DC セプタム電磁石（鉄芯型、水冷）
 - 電磁石型（直流安定化電源励磁）
 - 永久電磁石型（無電力）

パルスセプタム電磁石には、電磁石そのものを真空容器に格納するか、大気開放とするかで分類され、大気開放型では真空ビームダクトの有無で分類される。真空ビームダクトの有無にかかわらず、輸送路ビームダクトの真空度 (10^{-6} Pa) と蓄積リングビームダクトの真空度 (10^{-9} Pa) との圧力差は大きな課題であるため、そこに入射ビームエネルギーに対してエネルギー損失と散乱が無視できる程度の軽金属（アルミニウム箔 20 μ m など）もしくは体積密度の低い材料（ベリリウム窓 6 mm など）を隔壁として輸送路と蓄積リングとの間に設置する場合もある。材料の選定と厚みは、隔壁による入射ビームエミッタンスへの影響を事前に GEANT4[19]や EGS[20]シミュレーションにより評価し決定する。隔壁を設置しない場合には差動排気システムにより圧力差を緩和する方法がとられる。気中ドリフト型では、すでに輸送路と蓄積リングはそれぞれ隔壁で閉止されており、その間の大気中を入射ビームが進む。この場合には、大気の放射化について留意する必要があり、EGS などのシミュレーションにより問題の有無を判断し、気中ドリフト距離を決定する必要がある。真空ビームダクトをセプタム電磁石内で設置する場合、セプタム電磁石磁場を減衰させる遮蔽磁場を生む渦電流の存在に注意が必要であることは先に述べたが、蓄積リングダクトと直接接続される場合には、渦電流が大きなループとなり電氣的に接続される蓄積リングダクトの方へ回り込み偏向磁場成分として蓄積ビームへ影響を及ぼすことが知られている[21][22]。このため、蓄積リング側の真空ビームダクトの接続には絶縁管を挟み、そのループを遮断する必要がある。

4.1.2 セプタム電磁石の構造

パルスセプタム電磁石の構造設計上で注意すべき点は、蓄積リングの外側からの入射の場合、蓄積リングの入射部に配置されている偏向電磁石からの放射光の照射による入熱である。放射光がアブゾーバーである程度照射角を狭められ全面的に放射光が当たるわけではないが、入射点近

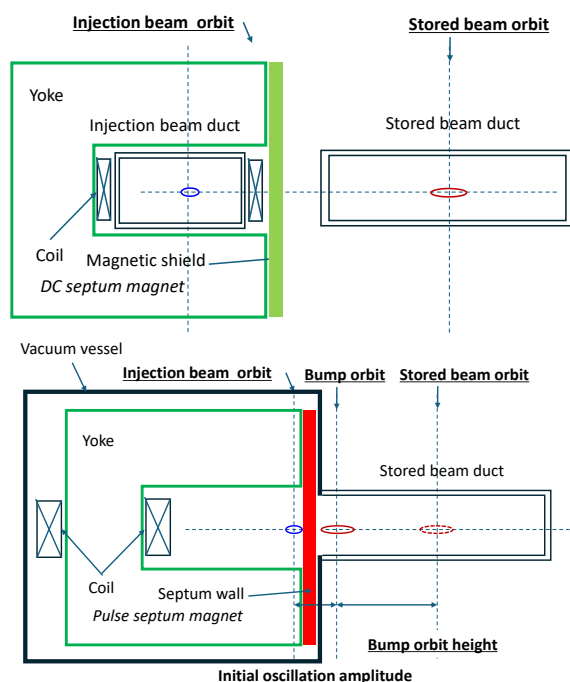


Fig. 20 DC セプタム電磁石 (上図)、真空封止パルスセプタム電磁石 (下図)

傍に置ける放射光を遮るアブゾーバーはバンブ軌道の持ち上げの障壁となってしまうため、挿入量はその邪魔にならない程度まで引き抜かなければならない。そのため、セプタム電磁石と接する蓄積ビームダクトには数 100 W 程度[17]の放射光が照射され、セプタム壁に熱として伝わる。蓄積ビームダクトが放射光で溶融することは避ける必要があるため蓄積ビームダクトをアルミニウムや銅製の熱伝導度の良いものにし、更に冷却水で水冷することは当然であるが、パルスセプタム電磁石が真空封止型である場合、セプタム壁を伝わる熱は真空容器内に蓄熱されるため、真空封止容器内に冷却水の水冷機構をも必要とする。真空封止内での冷却水の漏水などの事故を想定すると配管の設計には注意が必要である。なお、

蓄積リングの内周側からの入射については、以上の懸念させる材料はなく、内側入射の利点である。

真空封止型セプタム電磁石では、開発要素が多い。電磁石はパルス駆動のためパルス磁場による電磁石内での渦電流損を抑制するため、50~150 μm 厚み (パルス長に応じて最適化) の珪素鋼板

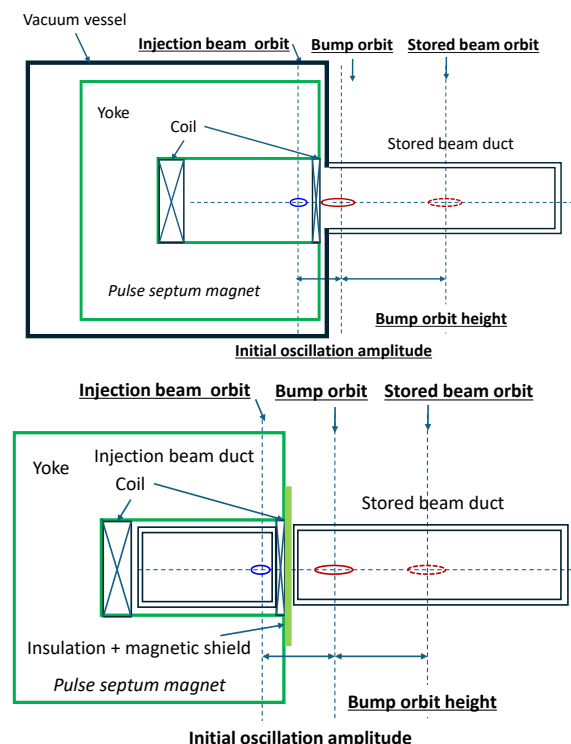


Fig. 21 パルスセプタム電磁石の派生型

の積層で作られる。鋼板の積層間には電気的な接合を防ぐために絶縁材を挟む必要がある。ポリイミド、ポリエチレン、ポリマー系有機接着剤やシート、セラミックスなどの候補材があるが、絶縁強度が高く、デガス量が少なく、耐放射線性の高いものでなければならない。また積層間の残留ガスの排出速度も高いような構造設計が必要である[23]。Fig. 20 に一般的なセプタム電磁石構造の断面図を示す。Fig. 21 にその派生型を示す。パルスセプタムには渦電流型シールドのセプタム壁 (パッシブセプタム) とセプタム導体型のセプタム壁 (カレントセプタム) の 2 種ある。渦電流型シールドのセプタム壁は動的磁場を発生するパルスセプタム電磁石でしか利用できないが、セプタム導体型のセプタム壁は、DC セプタム電磁石

とパルスセプトム電磁石のいずれでも利用が可能である。セプトム導体壁セプトムは、1 ターンコイルの片側がセプトム壁を兼ねており、コイル

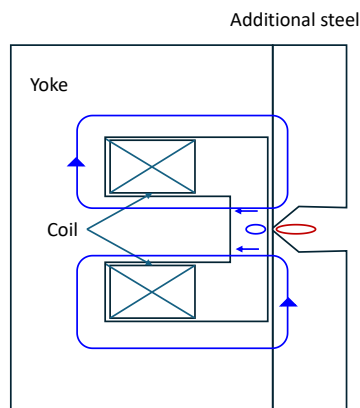


Fig. 22 ランバートソン型セプトム電磁石

内で生じる磁場を C 型セプトム電磁石のギャップ内に封止する。原理的には 1 ターンコイル内で発生する磁場はセプトム電磁石のヨーク内に磁場経路を持ち、ほとんどの磁場が飽和しない限りヨーク内に保持されるため、空気の透磁率と鉄の透磁率の比率からギャップ内の磁場に対してギャップ外に漏洩する磁場は 1/1000 程度に軽減される。派生型にはセプトム導体型のセプトム壁を示している。完全に漏洩磁場をなくすることが出来ないため漏洩磁場の低減のため磁気シールドを併用する。セプトム導体壁は直接電流が流れるため、電磁石鉄心との間や他導電性のある材質との接触部には絶縁が必要となる。絶縁材の隙間などからも漏洩磁場が発生し、導体の断面積の確保や絶縁材量の厚みを考慮すると大きくはセプトム壁を薄肉化させることが難しい。他に、一種独特な形状の電磁石のセプトム電磁石への利用としてランバートソン型セプトム電磁石がある[24]。磁場の向きは一般的なセプトム電磁石と逆の水平磁場となるものの隣接するビームラインに漏れる磁場が追加されるリターンヨークで十分に閉じ込められるため漏洩磁場がほぼゼロとすることが出来る。Fig. 22 に模式図を示す。青い磁力線の経路が蓄積ビーム側に漏れることなく閉じるようになっている。ただし、磁場の向きが水平であるため入射ビームには図中では垂直方向に

偏向角を与えられる。輸送路が蓄積リングとの水平面が異なる場合に水平方向入射でなく垂直方向入射が必要とされる場合などに利用価値がある。

4.1.3 セプトム電磁石電源

パルスセプトム電磁石はパルス駆動の電流源であるパルス電源が必要である。電磁石は磁極長 1 m 程度で通常 1 ターンのコイルが巻かれており、要求されるパルス幅も数 10 μs ~100 μs の長めのパルス長である。パルス電源には 2~5 kV の電圧でおよそ 4 kA~8 kA の電流出力が求められる。この条件下での 1 例の規模として 0.5 T 程度、20~30 mrad の偏向角を実現するような出力となる。駆動電圧は比較的低い出力電流は高くなっている。これは、パルスセプトム電磁石が短い磁極長（出来る限り蓄積ビームへの影響及ぼす領域を狭めるために）で、輸送路からの急角度の偏向角を戻し蓄積ビーム軌道と平行にする必要があり、強い磁場が要請されるためである。輸送路からの急角度の偏向角を、パルスセプトム電磁石と複数台の DC セプトム電磁石とで分割し、なるべくパルスセプトム電磁石の負荷を減らす最適化が必要で、その場合、各電磁石の磁極長、磁場強度、蓄積リングとの近接距離、漏洩磁場の抑制率と蓄積ビームへの影響度の評価を考慮し、入射ビーム軌道を輸送路との接続の間で設計しながら、バランスよくパラメーターを決定する必要がある。パルス電源は比較的長めのパルス長であることから、IGBT やサイリスターなどの半導体スイッチングパワーデバイスが用いられ、電磁石のインダクタンス成分との間で共振回路を構成し、正弦半波波形を出力させる。電流出力のピーク点での安定度は 1%以下が必要であるが、パルス幅が長いとピーク点が入射ビームに対して平坦度があるため、パルス出力の時間ジッタは厳しい要請がなくサブ μs で十分である。半導体パワーデバイスを使う限り時間ジッタの要求に応えることは難しくはない。

パルスセプトム電磁石への負担軽減を兼ねた DC セプトム電磁石への出力電流は、2 kA~3 kA

程度である。コイルのターン数は 4~10 ターン程度で強い偏向角を実現する。磁極長は 1 m 程度で磁場強度を 1.2 T と出力させる例をとれば、およそ 40 mrad の偏向角の設計となる。直流大電流であるため、電磁石コイルはホローコンダクター（ホロコン）を利用した水冷式である。出力電圧は数 10 V 程度であるが、電力は単純に数 10 kW になるため、昨今の省電力化要求に改善の余地がある。そこで、DC セプタム電磁石には永久磁石を用いた電源を必要としない派生型が近年見受けられる[25]。第 4 世代放射光加速器では、サステナブル、グリーテクノロジーがキーワードとなっており、ネオジウム (Nd) 磁石や、サマリウムコバルト (Sm-Co) 磁石を用いたセプタム磁石の利用が検討されている。入射点はこれまでの議論でも理解できるように、蓄積リング内でも電子ビームの損失が多い箇所であるため、永久磁石の利用には放射線減磁の影響評価が必要である。また、セプタム磁石による入射ビームの入射角調整のノブを確保するため永久磁石に磁場出力の調整機構を設けることや温度補償機構を設けた安定度の確保なども必要で開発要素となる。

4.2 バンプ電磁石とその電源

4.2.1 バンプキッカーの分類と構造

バンプ電磁石はセプタム電磁石と同様にビームに対して偏向角を生む偏向電磁石（ダイポール型、2 極型電磁石）である。セプタム電磁石と違い、漏洩磁場を抑制する機能を持たせるなどの特別な機能を必要としないため入射の用途に見合うパルス磁場の生成のみが求められるので、構造は比較的簡潔である。

- キッカー電磁石（磁場型）
 - コア形状による分類
 - ◇ 窓枠型
 - ◇ C 型
 - ◇ H 型
 - コア材質による分類
 - ◇ フェライトコア型

◇ 珪素鋼板型

- 空芯型キッカー
- 伝送線路型（分布定数型）キッカー
 - ストリップラインキッカー（電場型）

キッカーには電流型と電場型があり、電流型はコイルに電流を流しファラデーの電磁誘導の法則を利用し磁場により電子ビームにローレンツ力を与え偏向するもので、電場型は、極板間に正負の電圧をかけガウスの法則を利用し電場により電子ビームにクーロン力を与え偏向するものである。電流型の 2 極型電磁石形状は Fig. 23 に示されるように鉄芯（コア）形状により 4 タイプあり、それらとコア材質を組み合わせた場合のそれぞれと、コアを使用しないコイルのみの空芯型キッカーに分けられる。キッカー電磁石は熱負荷の少ないパルス電流による励磁であるため、ある程度の電流路の断面積が確保されようようにコイルは銅製のバーやロッドで製作されており、自然空冷である。高速性追求のためコイルインダクタンスを低減する必要がある、コイルの巻き数は基本的には 1 から 2 ターンで、全体のインダクタンスは 4~5 μH である。バンプキッカー電磁石は、バンプ軌道の高さと軌道の生成・回復時間の要求を満たすように設計される。つまり、軌道の高さとなるキッカーの蹴り角であるパルス磁場の強度と磁場の継続時間となるパルス幅のパルス電流を出力するパルス電源の性能に大きく依存する。パルス電源の定格出力は、蓄積リングが短周長であればあるほどパルス出力電流の短パルス化す

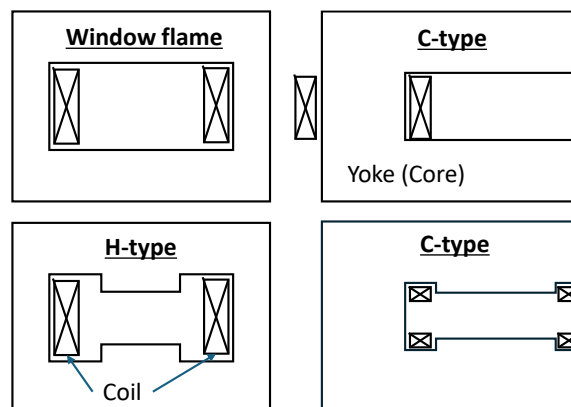


Fig. 23 キッカー電磁石形状

る必要があり、蓄積ビーム軌道をより入射ビームに近づけるためにはより大きな蹴り角が必要となるため磁場強度の増加が求められる。電磁石側で高速性と磁場強度の増強を両立させるために、透磁率が高く、周波数応答のよい（透磁率の周波数特性がよい：高周波 1 MHz 以上（パルス磁場の時間幅、1 μ s 相当）での透磁率の低下が少ない）コア材、フェライトコアの採用や、同様の目的で高い透磁性を確保しつつ高周波での渦電流損を防ぐための珪素鋼板の薄肉化（50 μ m）などコア材料の選定は重要である。また、設計上は、磁場強度を増強させるために電磁石の垂直ギャップの狭小化は必要で、真空ダクトの厚みを考慮しながら垂直方向の物理口径をどこまで狭小化できるか蓄積リングのオプティクス設計との連携が必要である。電磁石の磁極幅は 2 極磁場の平坦度の広がりを持決定しており、4 台バンパ入射での入射点より下流に設置される 2 台のバンパ電磁石は、蓄積ビームと初期振動振幅分離れた入射ビームの双方に同じ強さの偏向角を与える必要があるため、バンパ軌道高さに初期振動振幅を加えた大きさの 2 倍以上の磁極幅を設計する必要がある（Fig. 24 参照、図中に模式的に垂直磁場分布を示す）。要求の広い範囲を網羅する磁場の平坦度を考慮する場合、コア形状や磁極形状をいずれとするかキッカー電磁石形状の採用の候補があり、磁極形状の設計検討を必要とする。

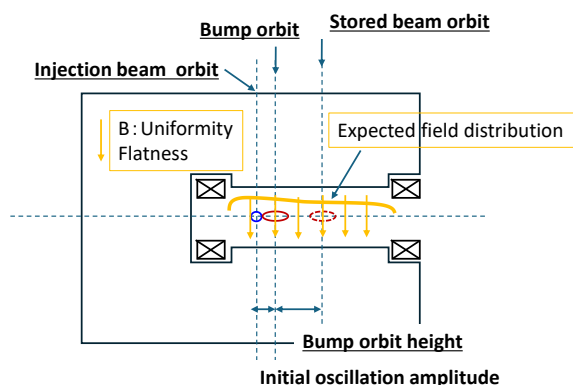


Fig. 24 バンパ電磁石磁極とビーム位置

バンパキッカー電磁石の蹴り角を出来る限り小さく済ませるためには、入射部のオプティクスの設計にて、バンパキッカー電磁石でのキック点

での B 関数を大きくすることが考えられる。水平ベータートロン関数 (β_x) での誤差キックに対する振動振幅は $\Delta x \sim \beta_x @ bump \times \Delta \theta_{kick @ bump}$ (θ : バンパキッカーの蹴り角) の関係式があることからバンパハイトを立ち上げる蹴り角を、水平の B 関数を大きくすることで小さくすることも可能である。バンパキッカー電磁石の標準的な蹴り角はパ

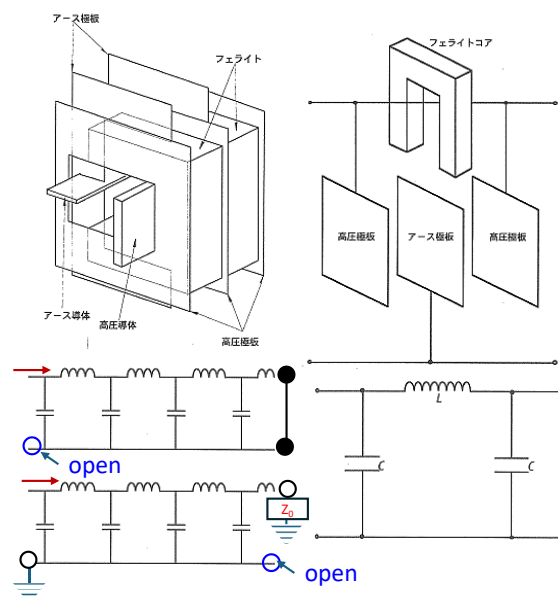


Fig. 25 分布定数型キッカー構造と等価回路

ルス電源規模との兼ね合いで 2~3 mrad 程度である。

パルス幅の高速性能の追求の結果、電流型の特殊な形状の電磁石として伝送線路型キッカーがある。Fig. 25 にその形状と等価回路を示す。これまでの一般的なバンパキッカー電磁石は、1 ターンコイルと鉄芯（コア）の組み合わせで等価回路は基本的にインダクタンスのみの集中定数回路となっている。もちろん鉄芯との相互容量成分は必要に応じて考慮する必要がある。これに対して伝送線路型キッカーは分布定数型で、電磁石コア自体が L と C 成分の π フィルターのラダー構造となっており、こうすることでパルス電流波形の幅広い周波数範囲で周波数特性が良い、インピーダンスが低い固有インピーダンスを持つ伝送線路として考えられる。つまり、特性インピーダンスが制御された同軸ケーブルの等価回路と同じである。L は電極のブスバーの構造で C 成分は容量

性材料の選択や電極構造で1セル当たり（Fig. 25 図中の右上のフェライトコア1区画）の固有インピーダンスを決めることが出来るため、セル数を重ねた結果の磁極全長での固有インピーダンス

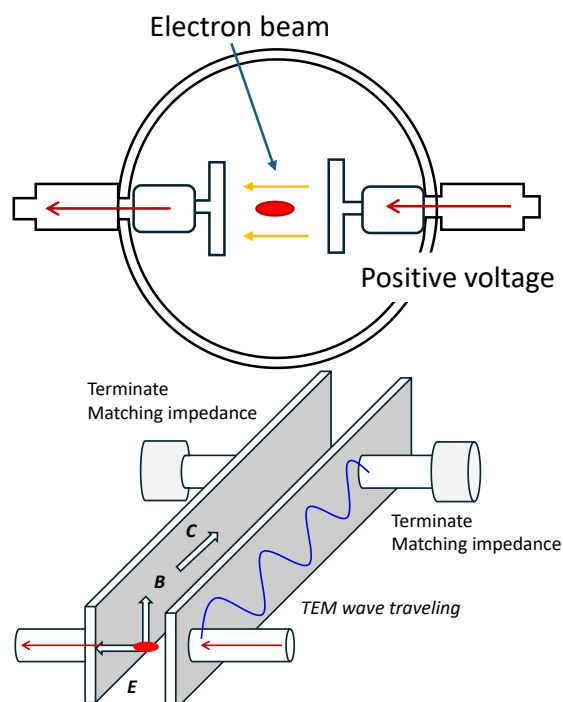


Fig. 26 ストリップライン型キッカー

($Z_0 = \sqrt{\frac{L}{2C}}$, $0 < \frac{\omega}{\omega_c} \leq 0.5$, $\omega_c = \sqrt{\frac{2}{Lc}}$ の周波数 ω の範囲で成立) も設計で一意 (10Ω 以下の低インピーダンス) に低い値で決定することが可能である。電源の入力は高压導体バスバー（高压側板も電氣的に接続、低压側板はアース導体バスバーに接続）の入力側と接続し、その電磁石の高压側出力端は特性インピーダンス Z_0 の抵抗で終端接地もしくは低压側（アース導体）とショートする。その場合低压側の入力は開放端となり、逆に高压側が終端接地の場合、低压側入力（アース導体側）はオープンで低压側終端は接地される。高压側板と低压側板の絶縁には絶縁材料を使用する場合と一般的には真空容器内に格納し真空絶縁を利用する場合がある。この1セル分の伝搬速度は $v = \sqrt{2LC}$ (数 ns オーダー) となっているため、パルス電源のスイッチング速度のオフセット時間 (20~30 ns) に加えてセル数を適切な磁極長 (300

mm 程度) とすれば 100 ns 以下のパルス幅のパルス磁場を生成することも可能である。数 100 ns のパルス幅を必要とするようなキッカー電磁石に適用されている。電磁石を分割し構造と材質の組み合わせによりインピーダンスを低くでき高速化が可能な長所がある反面、欠点として実際には構造、使用材質の均質性の確保の難しさもあり完全な整合をとることが出来ないことによる反射からの波形の歪があることや、経年劣化による歪の変化・増長なども懸念材料となる点にも注意が必要である。

電流型に対して電場型のストリップラインキッカーは、電磁石ではないが伝送線型電磁石よりもより高速性能 (<10 ns) を必要とするキッカー利用において有効であるため簡単に紹介したい。Fig. 26 にストリップライン型キッカーの模式図を示す。インピーダンス Z の並行平板のストリップラインを特性インピーダンス Z のパルス電源回路の正の電極を片方の平板にもう片方の平板に負の電極につなげストリップラインの終端は整合の取れた同じく Z のインピーダンスで終端する。この構造により平板間には電場 E がかかりその垂直方向に磁場がある TEM 波として平板間を光速で進行する。この平板間に存在する電子ビームは電場の方向と逆に平板に引き付けられる形

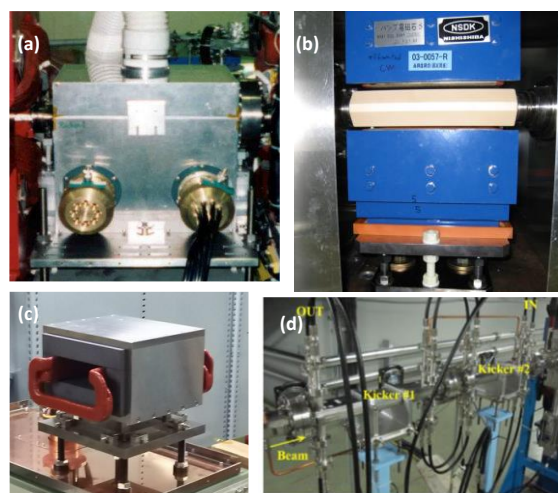


Fig. 27 (a):PF リング用伝送線路型キッカー、(b): Spring-8 蓄積リング用セラミックスタクトを抱えるキッカー、(c):PF-AR 用窓枠型キッカー、(d):PF-AR 用フィードバック用キッカー

で偏向する。平板の片側線路にパルス電圧を印加する形となるが、コイルに電流を流す磁場型と異なり、平板の抵抗成分のみのインダクティブな位相遅れがないためスイッチングデバイスのONと同時にそのスイッチングスピードでパルス電圧の早い立ち上がりスピードを可能とし、OFFと同時に早い立下りでパルス幅を閉じることが出来る。電圧波形は抵抗負荷のみのハードスイッチによる出力波形となるため矩形波に近い形となる。TEM 波の磁場成分も電子ビームに影響を与えるため、磁場成分と電場成分が共に同方向の偏向力とするには、電子ビームの進行方向と TEM 波の進行方向は逆にする必要がある。Fig. 26 中の電子ビームは紙面奥から読者手前に向かって進行しており、TEM 波が紙面奥に向かって進行している。これらの関係が逆の場合、偏向力は、ローレンツ力 ($F_{\text{lorentz}}=evB$) とクーロン力 ($F_{\text{coulomb}}=eE$) が相殺しほぼゼロとなる。全偏向力 $F=(1\pm\beta)\times F_{\text{coulomb}}$ ($\beta=v/c\approx 1$: v は電子ビーム速さ、 c は光速) で表せるため、TEM 波と電子の進行方向を正規の方向に揃えさえすれば、電子ビームは電場のみの場合に比べ 2 倍の偏向力を得る。ストリップライン型キッカーはパルス電源のスイッチングスピードの高速性通りの高速化を追求できる重要な長所がある反面、磁場型キッカーに比べ、大きな偏向角を得ることが難しい。キック力の弱さの短所を補うために電場長を長くする必要があり、同じビームエネルギーの電子ビームに対し、ギャップを電場型と同程度の現実的なパルス電磁石構造とパルス電源を用意した場合、同じキック力を得るためには、磁場型キッカーの電磁石 (30~40 cm 程度) の磁極長の 10 倍以上が必要となる。放射光加速器は世代が進むにつれ、蓄積リングオブティクスで決まる電磁石配置は高密度となっており、このような差による設置スペースの問題は適用上の不利な点となるため適用には工夫が必要である。

最後に代表的なキッカーそれぞれの具体例を写真 Fig. 27 に示す。

4.2.2 セラミックス真空ダクトの必要性

バンプキッカー電磁石のギャップ内に挿入される真空ダクトは非金属であることが求められる。これは高速なパルス磁場に対して、金属ダクトである場合、渦電流発生による渦電流磁場の遮蔽効果が大きいためである。磁場の減衰により必要となる磁場のほとんどが相殺され電子ビームに到達しない。そこで、熱耐性、放熱特性、絶縁性、真空気密度、デガス量、放射線耐性の観点から非金属性のダクトとして通常セラミックスダクトが利用される。

電子ビームが蓄積リングを周回する状態を俯瞰的に見ると、蓄積リングの真空ビームダクトの金属管の中を周回する電子ビームは、加速器リング一周の導体に囲まれた真空中を移動する電子の塊と見立てることが出来る。セラミックスダク

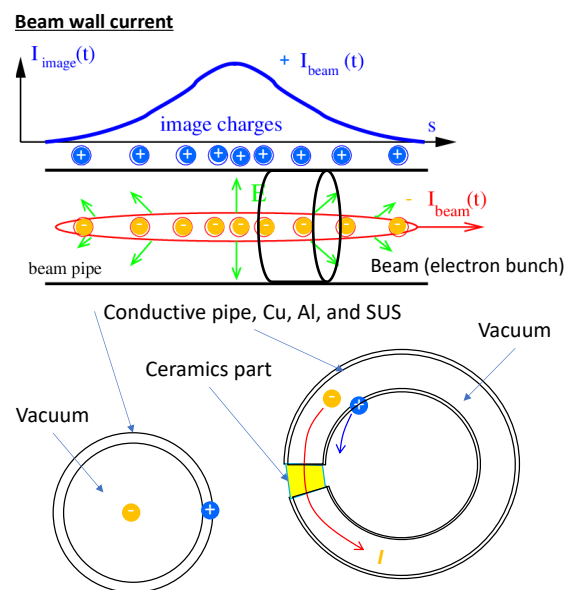


Fig. 28 ビーム壁電流とセラミックスダクト

トは絶縁材料であるため、蓄積リングの入射部にセラミックスダクトが挿入された場合、加速器リング1周を一つの導体の輪と見立てれば、導体の一部が途中途切れた状態が生まれたように見える (Fig. 28 参照)。電子ビームは、真空ビームダクトの金属管の導体内に極性が逆の鏡像電流を流すことで電氣的に安定しているため鏡像電流 (ビーム壁電流と謂う) が飛び越えられない途切

れた箇所がある場合、電子ビームの不安定性が誘発され蓄積することが出来ない。

そのためセラミックスの内側表面には、3~5 μm の導体被膜、一般的にはチタン膜や窒化チタン膜（光脱離のデガスを低減する膜）などを蒸着させコーティングを施す。チタンは渦電流の発生を阻害できる程度の導電性の低さがあり、さらに膜材に対するパルス磁場の周波数に応じて磁場が渦

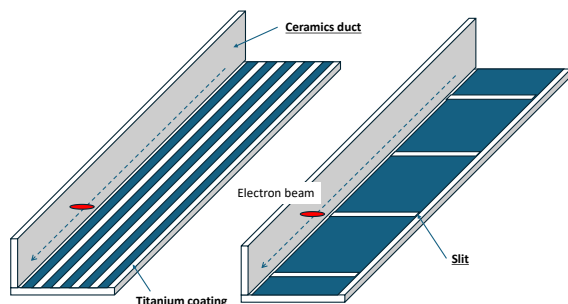


Fig. 29 セラミックス内面コーティング

電流の効果により $1/e$ にまで減衰してしまう表皮深さ ($d = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}}$; ρ (電気抵抗率), ω (パルス周波数), μ (透磁率)) 以下に薄くすることで磁場の減衰量を抑制する。導電性がゼロではないため、ビーム壁電流のセラミックスダクト内の通過も保証できる。

均一にコーティングした場合薄膜導体としても 30~40% 程度のパルス磁場の減衰が生じるため、渦電流による発熱も大きい。そのため、薄膜蒸着に細いスリットを入れ、セラミックスが剥き出しになるのには目をつぶり、大きなループの渦電流の発生を抑制する対策もとられる (Fig. 29 参照)。

ビーム壁電流に対しては、薄膜コーティングはその断面積の狭さから十分な導電性を確保できていないため、セラミックスダクトの内表面はビーム壁電流による発熱についても留意する必要がある。セラミックスダクトは磁場強度を上げるための電磁石の狭小ギャップに挿入されるため、放熱特性も悪い。そのため、電子ビームのヒートロードに対応するため電磁石全体をフードで囲い雰囲気ファンにより強制排気し冷却する方法もとられる。電磁石のギャップを出来る限り狭小にしたい要請に対してセラミックスダクトの

厚みは無視できない厚みとなっている点からも、セラミックスダクトを用いない真空封止型の電磁石の検討の余地はあるが輸送路に設置される真空封止セプタム違い、真空度を極めて低く保つ必要がある蓄積リングでは、ビーム壁電流に対する課題と共に不向きである。

4.2.3 バンプキッカー電磁石電源

バンプキッカー用電磁石電源は、これまでも触れてきたように高速性を追求することが求められている。単純に $V = -L \frac{di}{dt}$ による誘導起電力の式を想定したとしても、PF リングにおけるパルス長が周回時間の 2 周回以内である 1.3 μs 以内である必要を考えれば、インダクタンスが 5 μH 程度、必要最大電流値が 5 kA としてパルス電圧は 40 数 kV の入力電圧が必要そうであると想像できる。バンプパルス電源の開発は高速性と大電流出力の共立を目指すものとなっており、その際に高電圧生成、耐圧性能、パルス大電流生成が重要である。高速性能の追求には先の項で紹介した電磁石側的高速性能の追求も重要であると同時に、パルス電源のパルス電流を生成するために瞬間的に回路を開閉するスイッチング速度がオフセットとしてパルス幅の中に含まれていることから、パルス電源側でのスイッチングスピードの高速性能の追及も求められる。電磁石のインダクタンス負荷に対して高速性の追求とパルス電圧の関係は表裏一体であるため電磁石側でのインピーダンス、インダクタンスの低減の重要性はパルス電圧の低減につながり、電源、電磁石の絶縁耐圧要求を下げることにつながる。同様に電源自体が高いインピーダンスを持つ場合、負荷との抵抗分割で負荷側へ出力させる電圧を目減りさせてしまう、このことから電源自体の低インピーダンス化も電源小型化とともに重要な開発要素となっている。以上をまとめると以下の通りに技術要素を整理できる。

- 高圧出力
 - 電圧増幅回路
 - 耐電圧性能
 - 電源自己インピーダンス

- 大電流出力
 - 電流増幅回路
 - 高繰り返し充電性能
- スイッチングデバイスの高速化
 - 高耐圧スイッチングデバイス
 - 大電流容量スイッチングデバイス
- 短パルス整形
 - パルス圧縮回路
 - パルス整形回路

パルス電源開発の詳細については、別講義「放射光源加速器の入射パルス電磁石電源」に譲るとし、ここでは一般的な例を示しながら、パルス電源性能に求められるものを紹介する。

パルス電源の出力にはパルス波形の形状には近似的な矩形波または正弦半波波形が用途に応じて採用される。矩形波の生成には PFN (Pulse Forming Network) または PFL (Pulse Forming Line) 回路を用いる。電磁石の分布定数型と原理は同様に、特性インピーダンスが正確である同軸ケーブルなどを使いそのケーブル長さによってパルス幅を制御できる。パルス電流は特性インピーダンスと電磁石負荷のインダクタンス (L) で決まる時定数 ($\tau=L/Z_0$) でほぼ矩形上に立ち上がり、PFN 回路の線路長で決まるパルス継続時間後、同様の時定数で立ち下がる。ビーム入射でバンチトレインのような入射ビームが一つでなく連続して列となってくる場合には、ピーク電流が平坦な領域（フラットトップ）をもつパルス形状はバンチトレイン全体に均一の蹴り角を与えられるため利用価値が高い。ただし、蓄積リングのような蓄積ビームがすでにリング周回にマルチフィリングで蓄積されている時には、利用することは難しい。なぜなら、矩形形状の波形の立ち上がり部、立下り部の傾斜部と平坦部のつなぎ目に蓄積ビームが存在する場合に、それらの蹴り角（与える磁場強度）を精密に制御できないためである。定常的に蓄積ビームが存在しない、加速するだけの役割である小周長の高速性が必要なブースターリングや、バンチトレインでのビーム入射を必要とする場合などでの利用価値が高い。

正弦半波波形の生成には、電磁石負荷のインダクタンス (L) と電源回路内のコンデンサー (C) を利用した LC 共振回路が使われる。共振周波数 ($f=\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$) であることから得られる正弦半波波形のパルス長は $\pi\sqrt{LC}$ である。特性インピーダンスは $Z_0=\sqrt{\frac{L}{C}}$ である。コンデンサーの充電電圧と特性インピーダンスにより最大のピーク電流が求まる。正弦半波波形は、最大蹴り角を得られるピーク点が 1 点しかないため、基本的にシングルバンチの蓄積に適用される。入射ビームは蓄積ビームともに、バンプ電磁石の通過のタイミングとこのピーク電流のタイミングを合わせるようにして

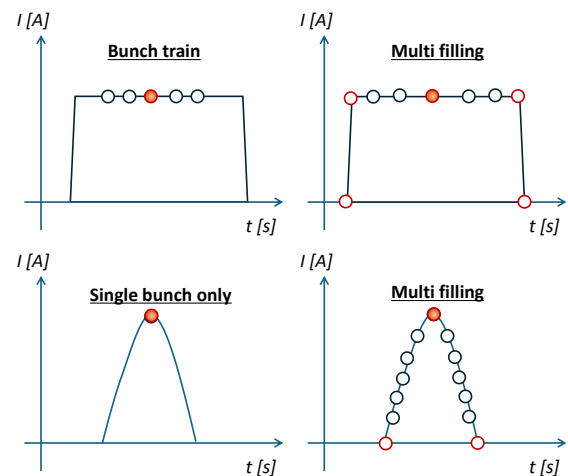


Fig. 30 入射ビームとパルス波形

最大の蹴り角を得る。蓄積リング内に蓄積ビームが存在する場合、正弦半波の波形上には蓄積ビームが存在することになるが、理想の正弦半波波形であればなめらかな波形上に蓄積ビームが分布し蹴り角が不定となることが少ない。バンプ電磁石波形のほとんどが正弦半波波形である。Fig. 30 にパルス電流波形の違いによるビーム入射の様子を示す。

バンプ電源のスイッチングデバイスは重水素を充填したガス封入型熱陰極管アンプであるサイクロトロンが主流である。最大 70 kV の耐圧性能があり、20 kA 程度の出力まで可能な要求仕様に応じた多くのラインナップがある。スイッチング速度は平均して 50~100 ns で、タイミングジッターは 5 ns である。タイミングジッターは、熱陰極管内部構造の経年劣化や充填ガス圧の低下によ

り使用継続時間とともに大きくなる傾向があり、使用頻度に応じてリザーバ電圧による調整が求められる。1 Hz 程度の繰り返し開閉の使用頻度で、調整しながら使用し初期性能を保証できる寿命は 5~7 年程度といわれている。出力電流安定度 (Fig. 32 中の ΔI) は、1%の要求に対しては問題なく対応できるものの、長期に渡り 0.1%の要求にこたえるには難しい。第 4 世代放射光加速器での要求を満たすには、初期性能選別に加え短寿命での交換を継続する必要がある。サイラトロンの製造メーカは世界で Teledyne e2v 社 (英)、L3 communications (米) の 2 社のみとなっており供給元が絞られているため非常に高額な放電管となっている。そのため長寿命でかつタイミングジッターがサブナノ領域 (<200 ps) となる高耐圧半導体素子への移行が検討されている。この分野の研究開発はすでに 20 年以上が経過しているがサイラトロンの半導体化置き換えは汎用的な実用化水準ではいまだ実現に至っていない。パワーデバイスである半導体素子の耐圧性能は飛躍的に向上し、電流容量も増大しているが、1 素子では 10~20 倍以上の定格の開きがあるため、素子の多積層化が技術開発の要となっており困難さが伴っているためである。近年、グリーンテクノロジーとして主流となる SiC 半導体は、ON 抵抗が 50 m Ω 程度と大変小さく、スイッチング速度は 20 数 ns の速さで 1 MHz の高繰り返しが可能で、サイラトロン (<100 Hz)、IGBT (数 10 kHz) を超える長所がある。外観の比較を Fig. 31 にしめす。電源の高速化、長寿命化、高安定化、小型化に寄与するあらたな技術開発の行く末に期待が出来る。詳細については別講義「放射光源加速器の入射パルス電磁石電源」を参照されたい。

5. 放射光加速器の入射技術の高度化要求

放射光加速器での入射技術は常に高度化・進歩しており、第 3 世代放射光加速器においてトップアップ入射が革新的な技術となった。これにより放射光実験ユーザーにとっては、実験中の光フラックスの減少による実験精度の低下や実験中断の不便さから解放され、常に一定の光量で実験が

可能となった。SPRING-8 では時間間隔優先の定期入射による蓄積電流値安定度が 0.1%_{peak-peak} から電流値優先による不定期入射で 0.03%_{peak-peak} まで大きく改善された。それに加え機器トラブルによる入射中断率は全ユーザータイムの内 1%以下

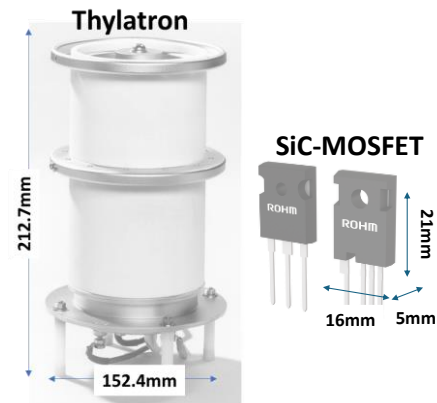


Fig. 31 サイラトロンと SiC-MOSFET 外観

で、99%以上の時間で蓄積ビーム維持が可能となっている。まさに、第 3 世代放射光加速器は、蛇口をひねれば水が出るようにいつでも同じ量、同じ質の光が安定供給される光源加速器となった。それでは、第 4 世代放射光加速器では、入射技術にどのような革新が求められているのだろうか。結論から述べると、それらは以下 2 つである。

- 入射時蓄積ビーム水平振動を抑制した透明入射（無摂動入射）
- 狭小ダイナミックアパーチャーへの直接入射

5.1 入射時蓄積ビーム水平振動の抑制

バンプ軌道生成入射では、ビーム入射時に蓄積ビーム軌道がビーム中心軌道から水平に大きく膨らまされる。バンプ軌道はパルス磁場の出力の終了と共に立ち下げられる。ここで、バンプ軌道を生成する 4 台のキッカー電磁石のパルス電流のピーク電流が要求値通りでなかった場合、パルス出力波形がそれぞれのキッカー電磁石で異なっていた場合どのようなことが起こるだろうか。まず、パルス電流出力のピーク電流値は、バンプ電磁石電源で正確に制御されていることは前述した通りであるが、もし異なる場合には、蓄積ビー

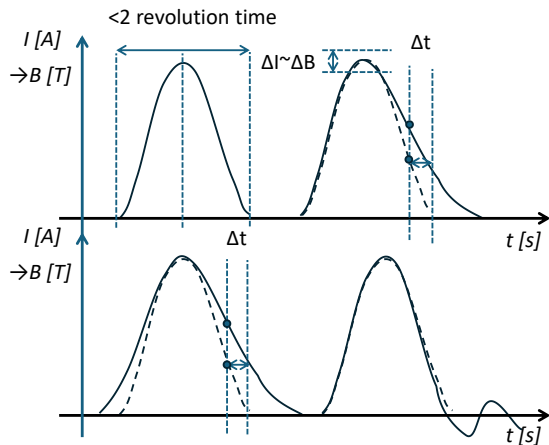


Fig. 32 パルス電流波形の非相似性の例

ムはバンプ軌道上で、最後に蓄積ビーム軌道に戻るべきところへ戻らなくなる。つまり、バンプキッカー電磁石 4 台の蹴り角 (θ) は、蓄積ビーム軌道に戻るように、 $\theta_{bp1} + \theta_{bp2} + \theta_{bp3} + \theta_{bp4} = 0$ (各キッカー電磁石の B 関数が一致しているとしている場合) でなければならないところがいずれかが、入射のたびにずれた場合、バンプ軌道は閉じずに $\theta_{bp1} + \theta_{bp2} + \theta_{bp3} + \theta_{bp4} \neq 0$ となり BP4 のキッカー電磁石後に残留角が残る (バンプ漏洩軌道とも謂う: Bump leakage orbit)。つまり、本来、入射では、入射ビームと蓄積ビームの初期振動振幅による入射ビームの振動のみが発生するはずであるが、電源の安定度に応じてランダムに蓄積ビームの振動も発生することとなる。これを「入射時蓄積ビーム水平振動」と謂う [26]。入射時蓄積ビーム水平振動が発生すると、トップアップ入射時のたびに、振動が発生し、蓄積ビームは放射光を放射する光源でもあるため、光源の振動へと帰着する。ユーザー実験を行うビームライン側では、仮想スリットによる光整形をしている場合、光源の光軸振動はスリット内に光束が漏れ外れることになるため入射時毎に光の強度変動が生じ実験精度の低下を招く。次に、パルス電流波形のそれぞれが、キッカー電磁石毎に異なる場合を考えてみる。この場合、蓄積ビームがマルチフィリングモードで蓄積されているとすると、電流波形の隅々に蓄積ビームが存在していることとなる。パルス電流波形上の蓄積ビームもパルス電流のピ

ークにある蓄積ビームと全く同様の原理で、パルス電流波形が各キッカー電磁石で異なると、ある蓄積ビームに着目すればその蓄積ビームが 4 台のキッカー電磁石で残留蹴り角が発生することとなる。パルス電流波形のどの部分に蓄積ビームがあるかどうかで残留蹴り角の影響の度合いが異なり、また、パルス電流波形の歪の度合いでもパルス波形上のそれぞれの蓄積ビームの残留蹴り角の影響が異なる。このパルス波形の 4 台間の相違を「波形の相似性」と謂い、入射時蓄積ビーム水平振動を引き起こさないために波形の相似性の保証が必要である。Fig. 32 に波形の相似性が崩れてしまった場合の例を示す。1 台のキッカー電磁石の波形 (左上) を基準としている。図中に示されるとおり、蓄積ビームが同じタイミングでパルス波形上にあったとしても歪がある場合には、大きく異なるパルス電流値の蹴り角を与えることになる。こうでなければならないという基準のパルス電流波形はなく、それぞれのキッカー電磁石間で相似性が補償されていればよい。さらに特に注意しなければならないことは、パルス電流波形は、キッカー電磁石でパルス磁場波形へと変換された場合に、必ずしもパルス電流波形通りでない点である。それは、キッカー電磁石の材質、構造の均質性、誤差に由来するだけでなく、セラミックチェンバー内面コーティングで発生する渦電流磁場の影響も避けることが出来ないため、それらすべてを合わせた評価として、パルス電流波形の最低限の相似性の保証から最終的には、パルス磁場波形の相似性の保証がされる必要がある [27]。そこでパルス磁場の計測手法が重要であり積分磁場により磁極広範囲に渡りパルス磁場波形の相似性を評価する。キッカー電磁石とパルス電源との不整合からくる反射などにより波形が歪んでいる場合には、電源側及び負荷側で同時に整合の調整を調整用インダクタンスを用いて実施する。キッカー電磁石の構造からくる要因には特に磁極、電極バスバーからの予期せぬ渦電流磁場が考えられ、パルス磁場計測にて原因箇所を精査する必要もある。セラミックス内面コーティングの厚みの均一性などにも留意が必要であるこ

とは想像に難くない。電流の継ぎ足しのターゲットとなる蓄積ビームは電流波形のピークに乗るためこの部分は、電源の出力電流安定度 (Fig. 32 中の $\Delta I \sim \Delta B$) で保証されやすい。しかしながら、第 3 世代放射光加速器では相似性の度合いは、Fig. 32 で示されるところの Δt が 1~2 ns が許容される程度である。このずれにより平均して 20~30 μrad の残留蹴り角が生じる。特にパルス電流の急峻な立ち上がり、立下り点で相似性が崩れやすい。この付近では 50 μrad 以上の残留蹴り角が発生する可能性がある。キッカー電磁石 1 台にパルス電源 1 台を接続させる「Individual drive」方式でパルス電源とキッカー電磁石の調整で出来る相似性の追求の限界レベルがここにあるといっても良い。

入射時蓄積ビーム水平振動は、垂直振動へ回り込むことも観測されている。それには原因がバンブキッカー電磁石の設置誤差によって傾きをもって設置された結果による場合と、蓄積リングの全周に渡る 4 極電磁石の設置誤差による傾きをもって設置された結果のカップリングによるものである。前者は、バンブキッカー電磁石がチルトすることにより水平キックのための垂直磁場が水平磁場の成分となるもので実際に垂直キックを与えることになる。後者は、全周に渡る 4 極電磁石のうち一部の電磁石が傾いていた場合、電磁石中心から外れた磁場にスキュー 4 極成分が発生させられた結果、入射時蓄積ビーム水平振動の大きさだけ 4 極電磁石の中心から外れた軌道を通ることで垂直キックを与えられることになる。

第 3 世代放射光加速器では、2000 年代初頭の革新的なトップアップ入射技術の確立後、ユーザー実験への光軸振動への影響を解決するための入射時蓄積ビーム軌道水平振動の抑制技術の開発が盛んに議論、検討、開発がなされてきた [28][29]。それらは「無摂動入射」の検討、もしくは、ユーザー実験にとって無摂動入射が行われれば入射時の光軸振動が起きないためトップアップ入射の存在にさえ気づかない状態となることから、「透明入射」の検討と謂われている。前述したとおり、特に注力された点は、パルス磁場波形

の相似性の追求とバンブ電磁石の傾き改善である。相似性の追求の結果、入射時蓄積ビーム水平振動は 0.2~0.3 mm の水準にすることが可能で [30]、バンブ電磁石の傾き補正で 30 μrad の精度で補正することで 0.005 mm 以下の入射時蓄積ビーム垂直振動の抑制を実現することが可能である [31]。

第 4 世代放射光加速器に向けられた開発されている入射技術について次節 6 ではそれらについての議論を行う。

5.2 狭小ダイナミックアパーチャーへの入射

入射技術の重要な役割は入射ビームを蓄積リングのアクセプタンスに導入する事である。蓄積リングのアクセプタンスは、第 3 世代放射光施設では、標準的な電磁石ボア径 70 mm 程度とし物理口径を 50 mm 程度とするとボア径の 60~70% (平均 45 mm 程度) と謂われているが、力学口径は、最大半径 15 mm 程度である [32]。そのため入射ビームの導入領域は、アクセプタンスよりも力学口径に制限されている。セプタム壁を含める隔壁の厚さが 3~5 mm で、入射ビームサイズ、蓄積ビームサイズをセプタム壁で削ることがないようにそれぞれ考慮すると、初期入射ビーム振動振幅は 10 mm 程度が最小である。力学口径への入射ビームの導入の裕度はさほどないと言える。このため、力学口径がさらに 10 mm 以下に縮小する場合、バンブ軌道生成による入射ビームの導入は、セプタム壁を挟んだ初期入射振動振幅を 10 mm 以下を実現せねばならない。真空封止パルスセプタムを前提としセプタム壁の薄肉化、入射ビームサイズの縮小 (入射ビームのローエミッタンス化) がバンブ軌道生成入射で考えられる対応である。もちろん蓄積リングオプティクス設計での力学口径の拡大の努力も必要である。また、入射部にはバンブ電磁石間にノーナルセルオプティクスの電磁石群も同居混在するため、6 極電磁石の非線形磁場を持つ電磁石の磁場中心から外れたバンブ軌道への非線形効果の影響は大きく、6 極電磁石を利用しない、もしくは、利用するもその非線形効果の影響を軽減する措置など、やは

り蓄積リングオブティクスの設計での検討が重要である。

第4世代放射光加速器では力学口径が5 mm以下になると想定されている。この場合、上述の対応以外に検討と開発が進んだ入射技術について次節6で議論を行う。

6. 新たな入射技術の開発

6.1 バンプ磁場波形の相似性の追求

バンプ電磁石の相似性の追求の一つに、電源の駆動方式の変更がある。前述した方式では、バンプ電磁石毎に電源が接続されていることを想定した「Individual drive」方式であったが、ここで、出来る限り相似性を追求する労力を避けるためにバンプ電磁石の数を減らした π バンプ入射の2台の電磁石を同じ電源で駆動する「Common drive」方式を考えてみる。電磁石側は2台同時に駆動するとのことで「Twin kicker:ツインキッカー」方式[23]とも謂う。この場合、電磁石を直列接続すると、電源からのパルス出力電流はインピーダンスの不整合がない限り、2つの電磁石に同じ電流量が流れる。電源の出力誤差は、同じように2つの電磁石に影響を与えるため、水平B関数が同じで互いに蹴り角の方向が逆向きで接続されれば、電源由来の非相似性の誤差キックは相殺する。これらは4台のバンプキッカー電磁石を1台の電源の励磁する場合にも同様の原理である。しかしながら、前提としては、個々の電磁石においてのパルス磁場出力波形の相似性が保証されていなければならない。利点としては、電源台数を減らすことが出来、電源の安定性の許容度を緩めることが可能である。欠点としては電磁石毎の蹴り角の調整ノブが減るためバンプ軌道の台形波形の自由度が下がる。バンプ電源の定格電圧も電磁石負荷が2倍となることで増加する。それに対して、2台のキッカー電磁石のそれぞれを電源に対して並列に接続する方法で、電源の定格電流は倍となるものの駆動電圧を半分とすることが出来る。電磁石の負荷インピーダンスを完全に同一にすれば、電源からのパルス電流は全く同じ出

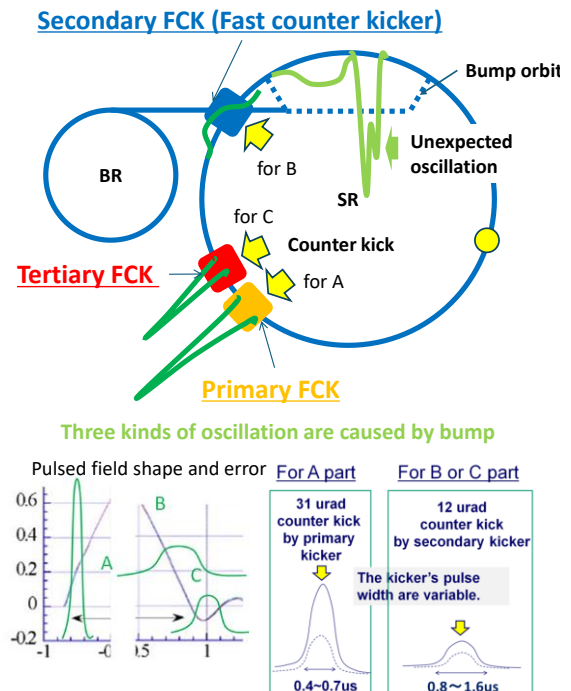


Fig. 33 カウンターキッカーシステム

力となるため、直列接続と同原理で残留蹴り角をなくすることが可能である。

6.2 カウンターキッカーによる水平振動の抑制

バンプ電磁石の修正しきれない非相似性による誤差キックを別のキッカー電磁石により補正する方法として「カウンターキッカーシステム」の導入がある[33][34]。

$\theta_{\text{error}} = \theta_{\text{bp1}} + \theta_{\text{bp2}} + \theta_{\text{bp3}} + \theta_{\text{bp4}} \neq 0$ として生じた θ_{error} を蹴り効率の高い入射部とは別のベーター点に、その点でのビーム位相に合わせた向きの同等の蹴り角を与えて相殺させる方法である。誤差キックが生じたベーター点の場所と異なるベーター点の場所での蹴り角には次の関係式があるため、
$$\theta_{\text{counter}} = \sqrt{\frac{\beta_{\text{bump}}}{\beta_{\text{counter}}}} \theta_{\text{error}},$$
 残留蹴り角 (θ_{error}) が既知であれば、準備したカウンターキッカーでその通りの蹴り角 (θ_{counter}) を与えることで Feed forward で振動を理想的にはゼロとすることが可能である。カウンターキッカーシステムには、残留蹴り角で生じる振動の幅と高さ、位相に合わせられるパルス幅可変型かつ正方向、負方向のいずれにも蹴ることが出来る双極型のパルス電源が

用意される。これは、残留蹴り角が、季節変動、蓄積リングオプティクスの変更、サイクル毎のバンプ軌道調整により変化するため、その結果の振動幅、振動振幅に対してカウンターキッカーシステムの出力を調整する必要があるからである。相似性を追求した結果で残る水平振動幅は、サブマイクロ秒の次元をもつため、パルス電源には高速性が追及されるだけでなく、双極型やパルス幅可変の機構を備えなければならない開発課題がある。パルス電流出力は磁極長 0.3 m のキッカー電磁石を用意すれば、残留蹴り角はさほど大きくないためパルス電源の定格として 5 kV/500 A 出力のパルス電流を生成できれば十分である。ビーム位相合わせには、ベータートロン振動数のビームチューンがあるのでカウンターを当てる周回を遅らせることで整数値 1 をチューン端数で割って計算できる周回数以内 (10 ターン以内) に適度に蹴り効率の良い周回数のタイミングでカウンターを与えることが可能である。バンプ軌道調整の結果によってはビーム位相の変化が大きいこともあるため、カウンターキッカーの設置点は、スペースがあること、水平 β 関数が大きいことを優先し、厳密な位相の追求は緩和し、周回遅延で合わせることが肝要である。加速器調整では、バンプ軌道調整が終了後に、周回ごとのカウンターキッカー点での水平振動の振動幅、振動高さ、ビーム位相を観測し、ビーム位相が 0 度または 180 度に近くとなる周回数に遅延タイミングを合わせて、カウンターキッカーに必要な蹴り角 (パルス出力電流) を、選択した極性、パルス幅とともに出力させる。システム概念図を Fig. 33 に示す。第 4 世代放射光施設では、残留蹴り角の発生を見越しカウンターキッカーシステムの導入を前提とする蓄積リングオプティクスの設計も進められている。カウンターキッカーシステムの有用性も認められているが[35][36]、難点として+入射時即座の入射時水平振動の抑制とはいかない点、位相によっては入射時水平振動をゼロとしきれない点が挙げられる。

6.3 新入射方式の提案

「透明入射」と「狭小力学口径への入射」をどちらも実現できる入射方式の検討・開発が進んでいる。それらは、以下の通りである。

- パルス多極電磁石入射 (Off-axis 入射)
- スワップアウト入射 (On-axis 入射)
- 長手方向オフエネルギー入射 (On-axis 入射)

Fig. 34 にパルス多極電磁石入射の概念図を示す。入射ビームがパルスセプトム電磁石を通り蓄積ビーム軌道と平行に蓄積リングへ導入されるのはバンプ軌道生成入射と同じであるが、蓄積ビーム軌道は On-axis にとどまり、入射ビームをパルス多極電磁石を使い蓄積ビームへと寄せる。この方法により、蓄積ビーム軌道の軌道シフトがないことから「無摂動入射」が実現できると同時に、パルス多極磁場の強度が十分であれば、入射ビームの入射角の制御により狭い力学口径内に入射ビームを導入することが可能である[37][38]。パルス多極磁場の磁場の次数の選択には、短所を解決するように 4 極、6 極と高次化が進み、現在パ

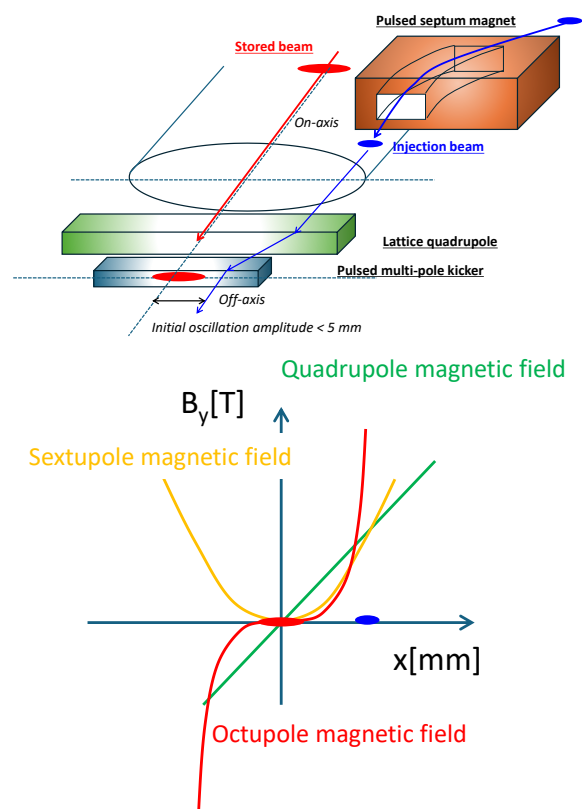


Fig. 34 パルス多極電磁石入射の概念図

ルス 8 極磁場が最も標準的となっている。高次磁場となれば同じ入射ビーム位置で比較した場合 Off-axis を通る入射ビームに与えられる磁場強度が強くなることが出来、また、蓄積ビームの通る磁場中心位置でのゼロ磁場近似領域が広がることで蓄積ビームのビームサイズへの変動を抑制することが可能である。しかしながら、8 極以上のパルス多極電磁石は、コア型電磁石で製作する場合、磁場強度の増強のためのボア径の縮小と飽和を考慮した磁極の配置の両立性が難しくなるため、空芯型電磁石の採用が一般的である。コイルだけとなる空芯型とすることで、無飽和で電磁石コアからの渦電流磁場による不整磁場が蓄積ビームへ与える影響を排除できるだけでなく、インダクタンスを小さくし、パルス電源の電圧定格を下げ高速性を追求しやすくする利点がある。8 極磁場の場合、鉄芯型では 8 磁極のポールで磁場を生成していたが、コイルの配置の角度によれば 4 コイルのみでも 8 極磁場の生成は可能である。しかしながら、鉄芯型に比べ、鉄の寄与を望めない空芯型では磁場の強度はさがるため、ボア径を狭小化する方法が取られる。第 4 世代放射光加速器では、極低エミッタンスを目指すため、力学口径は縮小するもののエミッタンスも極小 (<100 pmrad など) となるため、必要となる物理口径は 30 mm 以下と小さくすることが可能で、その結果、空芯型パルス多極電磁石のボア径も同程度とすれば、磁場の弱さを補うことが出来る。様々な派生型空芯型パルス多極電磁石 (6 極以上を非線形磁場でかつ完全な次数磁場でないため Non-linear Kicker: NLK とも謂う) があり、基本構造に BESSY-II モデルがある[39][40]。KEK PF で独自に開発を進めるモデルはそれらとは異なる独自モデルを追求しており、CCiPM (Ceramics Chamber with integrated Pulsed Magnet) [41][42]をダイポール型を 8 極型に展開したものとなっている。Fig. 35 に KEK PF での CCiPM-O (CCiPM-Octupole) [43]を示す。空芯型コイルになることで、セラミックスチェンバーの内面コーティングの渦電流磁場の不整磁場の影響も受けやすくなるため、内面コーティング形状の検討

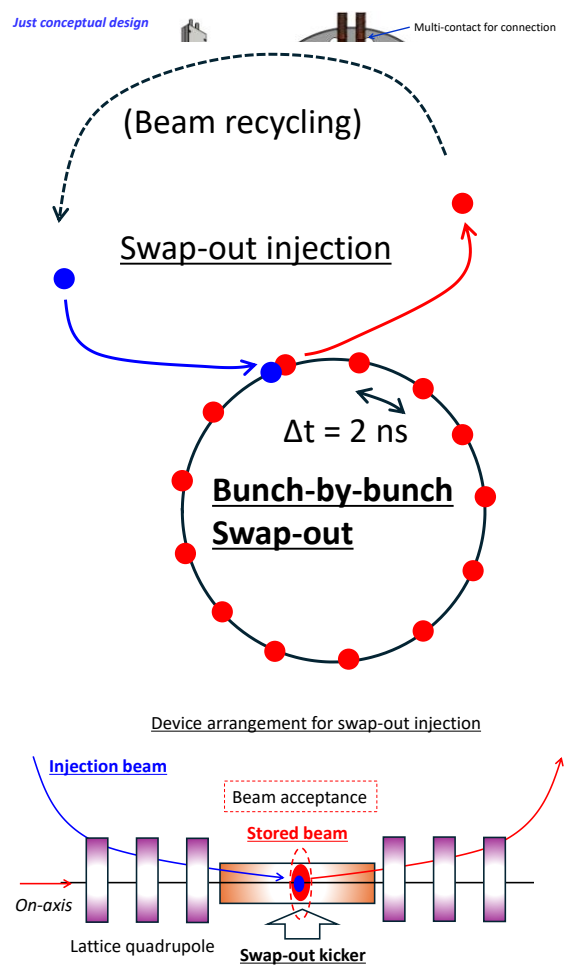


Fig. 36 スワップアウト入射の概念図

は重要となる[44]。KEK PF は多極入射技術の先駆の開発施設であり、現在もその開発の流れは続いている。

Fig. 36 にスワップアウト入射の概念図を示す[45][46][47]。入射ビーム一つに対して、蓄積ビームの一つを入れ替える On-axis 入射である。蓄積ビーム軌道を入射ビームにシフトさせる必要がないため、「透明入射」が可能で、On-axis 入射であるため、入射ビームは蓄積ビーム軌道に直接導入されアクセプタンス、力学口径の狭さに依存せずに「狭小力学口径への入射」の同時実現が可能である。スワップアウトキッカーは、ストリップライン型キッカーで先述した通り、TEM 波による高速性能の追求が可能なることにより、マルチバンチフィリングのバンチ間隔の 2 ns 以内のパルス電場を与え、バンチ毎に蓄積ビームと入射ビームを入れ替えることが可能である。蓄積ビームも

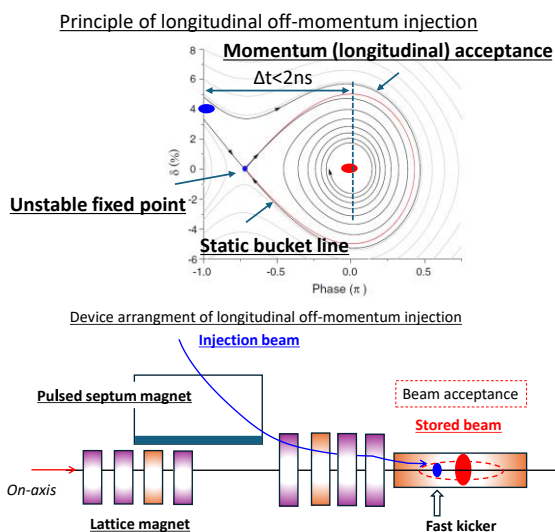


Fig. 37 長手方向オフエネルギー入射

入射ビームも同方向の蹴り角を与えられるため、入射ビームは蓄積ビーム軌道上に並行軌道となり、蓄積ビームは入射ビームと逆に蓄積ビーム軌道から外に向かって蹴りだされる。蹴り出された蓄積ビームは、その先のダンプラインのダンプ点（厚いコンクリート壁の壁、または地中内のコンクリート壁）で受け止め捨てられる。ダンプ点の放射化の問題や、蓄積ビームの損失を無駄ととらえる場合には、外に向かい蹴り出された蓄積ビームをブースターリングに合流させ回収する方法も検討がされている[48][49]。ストリップライン型キッカーは十分な蹴り角を得るために、長大な入射部と 50 kV 近くの高電圧パルス電源が必要なため、キッカーと電源の双方に開発課題は大きい。また、入射ビームの電荷量が蓄積ビームと同水準である必要もあるため、最上流の電子源の電子銃で大電流電子ビーム生成と損失の少ない輸送が必要など課題は多い。それでも狭い力学口径への入射が容易であることから第4世代放射光加速器では有力な入射技術の一つである。

最後に長手方向入射[50]について紹介したい。これまでの入射ビームは、蓄積ビームの水平方向へのアクセプタンスへの入射を中心とした議論であった。アクセプタンスにはエネルギー（運動量）アクセプタンスも存在することは、しばらく前に議論している。このアクセプタンスを利用した入射を、運動量広がりやがビーム進行方向、長手

方向広がりとなるため長手方向オフエネルギー入射 (Longitudinal off-energy injection) と謂う。電子ビームの放射減衰の効果を利用するもので、中心ビームエネルギーに比べて高いエネルギーの電子ビームは、加速時に Fig. 37 に示されるとおりのゴルフクラブヘッドのような等高線上を徐々に中心エネルギーへとぐるぐるとたどりながら遷移し中心エネルギーを中心にエネルギー振動の安定した平衡状態に至る。蓄積ビームはこのゴルフクラブヘッドの安定点に存在し、入射ビームをクラブヘッドの不安定点を避けてエネルギーが数%とやや高いクラブヘッドの領域に導入する。この時に、横軸の Phase 軸は、長手方向の時間軸ととらえても良いため、蓄積ビームとは別に蓄積ビームと蓄積ビームの間の丁度真中のクラブヘッドのシャフトつなぎ部分で時間的に入射ビームだけにキックを与えて、クラブヘッドのアクセプタンスに導入すれば、自然と蓄積ビームと合流することとなる。高速キッカーには、マルチフィリングの前後の蓄積ビームの間に入れる際に蓄積ビームとの時間差が 2 ns 以下と非常に短いパルス幅を要求されるため、ストリップラインキッカーが利用される。長手方向入射の技術的なハードルも、前述のスワップアウト入射とほぼ同じくしている。蓄積ビームの軌道シフトもない「透明入射」が可能で、力学口径を考慮しなくてよい「狭小力学口径への入射」も実現できる。高速キッカーの技術がそろえば、第4世代放射光加速にとって有力な入射技術の一つである。

7. おわりに

駆け足であったが、放射光加速器における入射技術について網羅的に紹介を行った。図解を中心とし、理論的な数式をのぞき、直感的に概念としてとらえるように考慮したつもりである。また、具体的な数値も併記し、描像のスケール感についてイメージが付きやすいようにした。入射技術については様々に良書、論文がある。それらを参考にしたい。本講義で触れられたキーワードをもとに興味のある部分の理論的な背景、より高度な検討についてのさらなる知識の深化につなげ

てもらえたらと願っている。最新の技術は実際に新たな加速器の建設や高度化で導入が進んでいる[47][51]。本講義を通じて、少しでも放射光加速器の入射技術についての興味や理解が深まるための一助となれば幸いである。

参 考 文 献

- [1] F. R. Elder, et al., “Radiation from Electron in a Synchrotron”, Phys. Rev. 71 (1947) 829,
DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRev.71.829.5>
- [2] J. Schwinger, “On the Classical Radiation of Accelerator Electrons”, Phys. Rev. 75 (1949) 1912,
DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRev.75.1912>
- [3] mext.go.jp/component/b_menu/shingi/toushin/_ics_files/afildfile/2014/01/15/1342517_9_1.pdf
- [4] https://jsrr.smoosy.atlas.jp/ja/sr_japan
- [5] H. Ohkuma, “Top-Up Operation in Light Source”, Particle accelerator. Proceedings, 11th European Conference, EPAC 2008, Genoa, Italy, June 23-27, 2008
- [6] 石川哲也, 第 100 号記念特集〈第 II 部 放射線化学の現状と展望〉2. 放射線照射装置 (線源) の進歩: 自由電子レーザー・放射光, 2015 年 100 巻 p. 56,
DOI: https://doi.org/10.32157/jsrc.100.0_56
- [7] SPring-8-II に向け SACLA を高性能入射器として利用 ―グリーンファシリティ実現への第一歩― (プレスリリース) ,
http://www.spring8.or.jp/ja/news_publications/press_release/2021/211123/
- [8] 花木博文, “SPring-8 線型加速器におけるビーム安定化”, 「加速器」 Vol. 2, No. 3, 2005 (317-329),
DOI: https://doi.org/10.50868/pasj.2.3_317
- [9] 佐藤政則, “KEK 電子・陽電子入射器による 5 リング同時トップアップ入射”, 「加速器」 Vol. 17, No. 3, 2020 (169-173) ,
https://doi.org/10.50868/pasj.17.3_169
- [10] [202412 NanoTerasu パンフレット 2024 年版 2.pdf](https://www.nanoteras.jp/pamphlet/2024/2.pdf)
- [11] SPring-8 年報 2007 年度, “施設の現状と進展”,
http://www.spring8.or.jp/pdf/ja/ann_rep/07/016.pdf
- [12] H. Ego, et al., “SuperKEKB 入射性能向上への KEK 電子陽電子入射器アップグレード”, Proceedings of the 21st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, July 31 - August 3, 2024, Yamagata
- [13] K. Fukami, et al., “BEAM COLLIMATION SYSTEM FOR THE SPring-8 TOP-UP OPERATION” Proceedings of APAC 2004, Gyeongju, Korea, 103-105
- [14] M. Takao, et al., “大型放射光施設 SPring-8 の現状とビーム性能改善”, Proceedings of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 9-11, 2014, Aomori, Japan
- [15] M. Takao, “CORRECTION OF NONLINEAR COUPLING RESONANCE IN THE SPRING-8 STORAGE RING”, proceedings of IPAC2015, Richmond, VA, USA, TUAB1, ISBN 978-3-95450-168-7
- [16] A. Ueda, et al., “PF 入射部更新用新セプトム電磁石の特性評価”, Proceedings of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 9 - 12, 2021, QST-Takasaki Online, Japan
- [17] C. Mitsuda, et al., “INJECTION SECTION UPGRADING WITH THE SEPTUM-MAGNET REPLACEMENT IN KEK-PF RING”, IPAC 2021, IPAC 2021, 342-345, DOI: 10.18429/JACoW-IPAC2021-MOPAB091
- [18] A. Ueda, et al., “PF-AR 用新キッカー及びセプトム電磁石の磁場測定”, Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 8-10, 2016, Chiba, Japan
- [19] <https://geant4.web.cern.ch/>
- [20] <https://rcwww.kek.jp/research/egs/>
- [21] Y. Shoji, et al., “UNUSUAL EDDY CURRENT STRAY FIELD OF PULSE SEPTUM OF NEWSUBARU”, The 14th Symposium on Accelerator Science and Technology, Tsukuba, Japan, November 2003
- [22] C. H. Chen, et al., “PRELIMINARY STUDY OF INJECTION TRANSIENTS IN THE TPS STORAGE RING”, Proceedings of IPAC2017, Copenhagen, Denmark, ISBN978-3-95450-182-3
- [23] 小原侑平, 他, “3GeV 次世代放射光施設ナノテラスの蓄積リング 電磁石及び入射部電磁石の設置と試運転状況”,
https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2023/proceedings/PDF/THOB/THOB11_oral.pdf
- [24] M. Johansson, et al., “IN-VACUUM LAMBERTSON SEPTUM FOR SPEAR3 LOW EMITTANCE INJECTION”, 9th International Particle Accelerator Conference, IPAC2018, Vancouver, BC, Canada, doi:10.18429/JACoW-IPAC2018-THPAL078
- [25] T. Taniuchi, et al., “dc septum magnet based on permanent magnet for next-generation light sources”, Phys. Rev. Accel. Beams 23, 012401,

DOI:<https://doi.org/10.1103/PhysRevAccelBeams.23.012401>

- [26] H. Tanaka, et al., “Suppression of injection bump leakage caused by sextupole magnets within a bump orbit”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 539 (2005) 547–557,
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2004.10.038>
- [27] J. Keil, et al., “OPTIMIZATION OF THE INJECTION KICKER BUMP LEAKAGE AT PETRAIII”, Proceedings of IPAC2018, Vancouver, BC, Canada
- [28] S. White, et al., “Damping of injection perturbations at the European Synchrotron Radiation Facility”, Phys. Rev. Accel. Beams 22, 032803,
DOI:<https://doi.org/10.1103/PhysRevAccelBeams.22.032803>
- [29] H. Tanaka, et al., “Stable top-up operation at SPring-8”, JOURNAL OF SYNCHROTRON RADIATION, Volume 13, Part 5, September 2006, Pages 378-391,
<https://doi.org/10.1107/S0909049506022862>
- [30] T. Ohshima, et al., “SUPPRESSION OF STORED BEAM OSCILLATION EXCITED BY BEAM INJECTION”, proc. of EPAC'04, Lucerne, Switzerland, (2004), p414.
- [31] K. Fukami, et al., “Beam-based alignment of injection bump magnets using remote-controlled tilt adjustment system at SPring-8”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 694 (2012) 1–5,
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2012.08.009>
- [32] B. Riemann, et al., “Efficient algorithms for dynamic aperture and momentum acceptance calculation in synchrotron light sources”, Phys. Rev. Accel. Beams 27, 094002,
DOI:<https://doi.org/10.1103/PhysRevAccelBeams.27.094002>
- [33] C. Mitsuda, et al., “SUPPRESSION OF STORED BEAM OSCILLATION AT INJECTION BY FAST KICKER IN THE SPRING-8 STORAGE RING”, Proceedings of IPAC2014, Dresden, Germany, ISBN 978-3-95450-132-8
- [34] C. Mitsuda,
https://indico.cern.ch/event/635514/contributions/2660454/attachments/1513848/2370449/twiss_2017_v6_pub.pdf
- [35] Y-G. Son, et al., “Suppression of stored-beam oscillation and observation of flux improvement during top-up injection”, Phys. Rev. Accel. Beams 20, 082803,
DOI:<https://doi.org/10.1103/PhysRevAccelBeams.20.082803>
- [36] R. T. Fielder, et al., “REDUCTION OF STORED BEAM OSCILLATIONS DURING INJECTION AT DIAMOND LIGHT SOURCE”, 10th Int. Particle Accelerator Conf., IPAC2019, Melbourne, Australia, doi:10.18429/JACoW-IPAC2019-WEPMP042
- [37] K. Harada, et al., “New injection scheme using a pulsed quadrupole magnet in electron storage rings”, Phys. Rev. ST Accel. Beams 10, 123501,
DOI:<https://doi.org/10.1103/PhysRevSTAB.10.123501>
- [38] H. Takaki, et al., “Beam injection with a pulsed sextupole magnet in an electron storage ring”, Phys. Rev. ST Accel. Beams 13, 020705 (2010).,
DOI:<https://doi.org/10.1103/PhysRevSTAB.13.020705>
- [39] T. Atkinson, et al., “DEVELOPMENT OF A NON-LINEAR KICKER SYSTEM TO FACILITATE A NEW INJECTION SCHEME FOR THE BESSY II STORAGE RING”, Proceedings of IPAC2011, San Sebastián, Spain
- [40] R. Ollier, et al., “Toward transparent injection with a multipole injection kicker in a storage ring”, Phys. Rev. Accel. Beams 26, 020101,
DOI:<https://doi.org/10.1103/PhysRevAccelBeams.26.020101>
- [41] C. Mitsuda, et al., “Development of the Ceramic Chamber Integrated Pulsed Magnet Fitting for a Narrow Gap”, in Proc. 6th Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC'15), Richmond, VA, USA, May 2015, pp. 2879-2882. doi:10.18429/JACoW-IPAC2015-WEPMA049
- [42] C. Mitsuda et al., “Development of the Ceramic Chamber Integrated Pulsed Magnet Fitting for a Narrow Gap”, in Proc. IPAC'15, Richmond, VA, USA, May 2015, pp. 2879–2882.
doi:10.18429/JACoW-IPAC2015-WEPMA049
- [43] Y. Lu, et al., “DEVELOPMENT OF AN OCTUPOLE CERAMICS CHAMBER WITH INTEGRATED PULSED MAGNET FOR BEAM INJECTION”, 14th International Particle Accelerator Conference, IPAC2023, Venice, Italy,
doi: 10.18429/JACoW-IPAC2023-WEPM038
- [44] C. Mitsuda et al., “Suppression of eddy-current effects in beam injection using a pulsed sextupole magnet with a new ceramic chamber”, Phys. Rev. ST Accel. Beams, vol. 25, p. 112401, 2022.
doi:10.1103/PhysRevAccelBeams.25.112401
- [45] M. Borland, “On-Axis Swap-Out Injection”,
<https://indico.ihep.ac.cn/event/2825/contributions/60168/attachments/29041/33531/Borland-SwapOut.pdf>

- [46] [Chapter 2 - Accelerator Upgrade.pdf](#)
- [47] [World's first successful multi-bunch swap-out injection demonstrated at the Advanced Photon Source | Advanced Photon Source](#)
- [48] [HEPS_swap-out_injection_v2.pdf](#)
- [49] Z. Duan, et al., "THE SWAP-OUT INJECTION SCHEME FOR THE HIGH ENERGY PHOTON SOURCE", 9th International Particle Accelerator Conference, IPAC2018, Vancouver, BC, Canada, doi:10.18429/JACoW-IPAC2018-THPMF052
- [50] M. Aiba, et al., "Longitudinal injection scheme using short pulse kicker for small aperture electron storage rings", Phys. Rev. ST Accel. Beams 18, 020701, DOI:<https://doi.org/10.1103/PhysRevSTAB.18.020701>
- [51] L. Liu, et al., "STATUS OF SIRIUS OPERATION WITH USERS", 14th International Particle Accelerator Conference, Venice, Italy, doi: 10.18429/JACoW-IPAC2023-WEOGA2

参 考 図 書

- [52] OHO text 1987-I,
<http://accwww2.kek.jp/oho/OHOtxt/OHO-1987/txt-1987-%E2%85%A0.pdf>,
- [53] OHO text 1987-II,
<http://accwww2.kek.jp/oho/OHOtxt/OHO-1987/txt-1987-%E2%85%A1.pdf>
- [54] OHO text 1993-I,
<http://accwww2.kek.jp/oho/OHOtxt/OHO-1993/txt-mokuji-1993-%E2%85%A0.pdf>
- [55] OHO text 2001-15
<http://accwww2.kek.jp/oho/OHOtxt/OHO-2001/txt-mokuji-2001-15.pdf>
- [56] OHO text 2009-II,
<http://accwww2.kek.jp/oho/OHOtxt/OHO-2009/txt-mokuji-2009-2.pdf>
- [57] OHO text 1984-II,
<http://accwww2.kek.jp/oho/OHOtxt/OHO-1984/txt-mokuji-1984-%E2%85%A1.pdf>
- [58] 木原元央、亀井亨、パリティー物理学コース「加速器科学」