

小型高輝度硬 X 線源開発一 (3) 電子蓄積リング及び光共振器

野村 昌弘^{1,A)}、平野 耕一郎^{A)}、山崎 良雄^{A)}、奥木敏行^{A)}、浦川順治^{A)}

高野 幹男^{B)}、酒井 いずみ^{B)}、本田洋介^{C)}

^{A)}高エネルギー加速器研究機構

〒305-0805 つくば市大穂 1-1

^{B)}放射線医学総合研究所

〒263-8555 千葉市稲毛区穴川 4-9-1

^{C)}京都大学大学院理学研究科

〒606-8502 京都市左京区北白川

概要

電子線を用いて、単色で指向性のある X 線を発生させる方法としてレーザーコンプトン散乱による方法が実用化され始めている。しかしこの方法では、電子と光子の反応断面積が小さいため、X 線の強度を強くすることが難しく、利用範囲は限られている。小型高輝度硬 X 線源開発計画では、X 線の強度を強くすることにより、その利用範囲を医学利用まで広げ、33keV の X 線を発生させ動的血管造影写真測定を行うことを開発の目的としている。

1. はじめに

この計画の主要コンポーネントは、入射用の 200MeV 電子線形加速器[1,2]、電子とレーザーとの相互作用の頻度を高める為の電子蓄積リング、リング内に設置されレーザーパワーを蓄積するための光共振器である。以下に加速器の主な仕様を示す。

- ・ 加速最大エネルギー 200MeV
- ・ 加速電荷 (リング内) 1nC/Bunch
- ・ 加速バンチ数 20 Bunch
- ・ バンチ間隔 2.8nsec

ここでは、重要な開発項目である電子蓄積リング及び光共振器について述べる。以下の章で、先ずこの計画で求められるリングに対する要求について述べ、次に、これらの要求を満足させる為のリングの Design、検討結果について述べる。また、光共振器についてはその必要性や目標等の開発方針について述べ、次にレーザーに対する要求と予備測定の結果について述べる。

2. 電子蓄積リング

2.1 リングに対する要求

リングに対する要求としては、先ず第 1 にリングの小型化である。これは今後加速器の普及を考えた

場合に重要な要求である。具体的なリングの大きさとしては、核燃料サイクル開発機構・大洗工学センター内にある量子工学試験施設(QTF:11m x 7.5m)に設置できる程度の大きさとした。

第 2 の要求としては、電子は、レーザーと相互作用し X 線を発生した後もリング内の軌道を回り続けることである。これは、放射線遮へい上の問題からも、エネルギー効率、つまり一個の X 線を発生させるために 200MeV の電子を一個消費するのはエネルギー効率が悪いことから当然の要求である。具体的には、エネルギーアクセプタンスを数パーセント以上にし、ダイナミックアパーチャーの大きさを十分確保し、ディスパージョンは 0.3m 程度に抑えなければならない。

第 3 の要求としては、発生させる X 線の強度を強くするためにリング内の衝突点でのビーム径を絞ることである。エミッタンスを x-y full coupling で $10^{-9} \text{ m} \cdot \text{rad}$ 程度にし、レーザーとの衝突点では 100 ~ 150 μm 程度までビームを絞る必要がある。

その他の要求としては、製作コストを下げるということが挙げられる。加速器の普及を考えた場合にある意味で最も重要な要求である。そこで、この計画では、リングを形成する全ての四極及び六極電磁石のそれぞれの形状を同じにし、長さは全て同じにすることによりコストの低減を図った。

2.2 Design

第 1 の要求であるリングの小型化のためには、コンポーネントの数、特に偏向電磁石の台数が制限を受ける。レーストラック型リングを仮定し偏向電磁石間の距離を 1.2m 程度必要と考えたと、設置場所の大きさから偏向電磁石はアーク部当たり 4 台程度となる。しかし、一般に偏向電磁石の台数を少なくすると、一台あたりの偏向角が大きくなりディスパージョンが大きくなる。つまりディスパージョンを 0.3m 程度に抑えることが難しくなる。そこで、ディスパージョンを 0 にする直線部と接しているアーク部分の両端の偏向電磁石の偏向角を中央部分の半分にし、ディスパージョンを抑えるようにした。従っ

¹ E-mail: mnomura@post.kek.jp

て、ひとつのアーキ部分は2種類の偏向角を持った計4台の偏向電磁石で構成されている。(図1参照。)

次に、偏向電磁石間に四極電磁石を適当に配置し計算コードSADを用いてディスパージョンを0.3m程度に抑えるようにした。また、ダイナミックアパーチャーを調整するための六極電磁石も配置した。SADによるアーキの半分の計算結果を図1に示す。

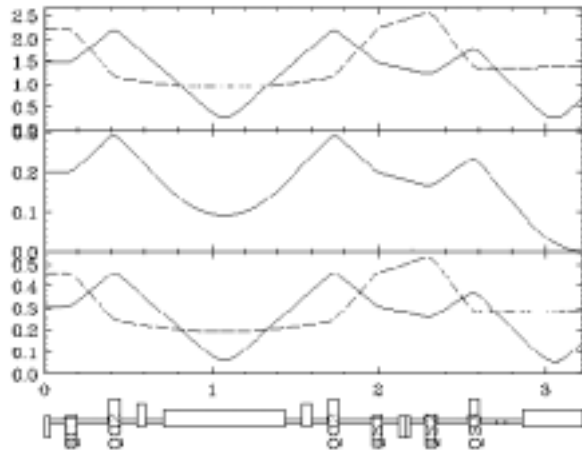


図1. SADによるアーキ半分の計算結果。上段が $\beta_x^{1/2}$ 及び $\beta_y^{1/2}$ [m^{1/2}]、中段がディスパージョン η [m]及び下段がビーム径 σ_x 及び σ_y [mm]を示す。

アーキ部と直線部とのマッチング部分は、マッチングと同時にチューンの調整も行なえるように四極電磁石7台を設置した。また、直線部分の中央に四極電磁石3台を設置し衝突点でのビーム径を絞れるようにした。二つの直線部には、衝突点の他にキッカー電磁石、セプタム電磁石及びRF空洞が設置される。このラティスを基に、SADを用いてビームに関する要求、エネルギーアクセプタンス、ダイナミックアパーチャー、ディスパージョン、エミッタンス及び衝突点でのビーム径の計算を行なった。図2にリング全体の計算結果、図3にアクセプタンスの計算結果を示す。ダイナミックアパーチャーDとアクセプタンスAとは $D=(\beta A)^{1/2}$ の関係にある。また、その他の主な計算結果を以下に示す。

- Momentum compaction factor $\alpha = 0.02$
- RF Bucket Height = 0.02 at $V_c = 0.18\text{MV}$
- Emittance without IBS = 4.5×10^{-9} m
- Emittance with IBS = 1.6×10^{-8} m
- Beam radius $\sigma = 180$ μm

2.3 検討

この節ではリングに対する要求とDesignしたリングの性能との比較検討を行なう。第1の要求であるリングの小型化に関しては、偏向電磁石の台数を

制限することにより、予定の設置場所に収まる大きさとした。

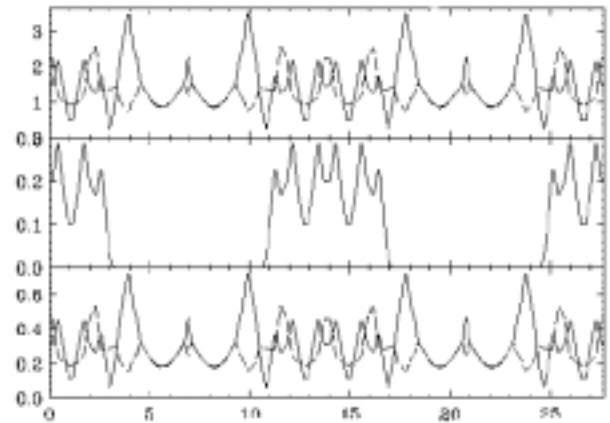


図2. SADによるリング全体の計算結果。表示は図1と同様。

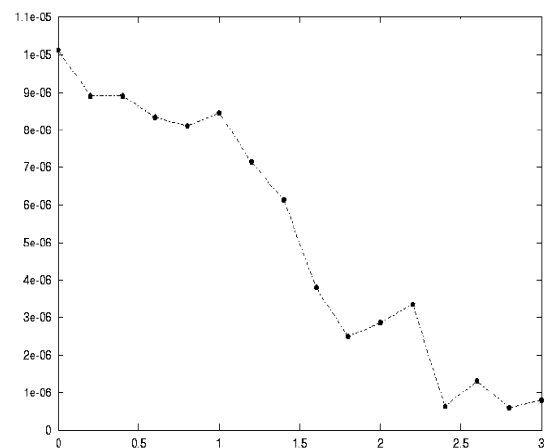


図3. SADによるアクセプタンスの計算結果。縦軸はアクセプタンス[m]を示し、横軸は運動量誤差[%]を示す。

第2の要求に対しては、エネルギーアクセプタンス、ダイナミックアパーチャー及びディスパージョンともSADによる計算結果は要求をほぼ満たしている。

第3の要求に関しては、エミッタンスはIntra Beam Scattering(IBS)の効果を入れると要求を満たすことはできない、これは $\ln C/\text{Bunch}$ という電荷量の大きさによる影響である。また、衝突点でのビーム径も要求よりも大きな値となっている。これは、衝突点でビームを絞ろうとすると、大きなクロマチシティが発生し、結果としてダイナミックアパーチャーが小さくなってしまふのを避けた為である。今回はダイナミックアパーチャーを確保する方を優先した。

以上の様に、ほぼ要求を満たすリングの大まかな Design ができたので、今後はこれに沿って更に計算を進めていく予定である。

3 . 光共振器

3.1 開発方針

今回の計画では、発生させる X 線の強度を高めるために、空間的にビームを絞り、さらに時間的にも絞れるようにパルスレーザーの使用を考えている。しかしパルスレーザーを使用しても発生させる X 線の強度は動的血管造影写真測定を考えた場合には弱い。そこで、光共振器をリング内に設置し、その共振器内にパルスレーザーのパワーを蓄積することにより X 線の強度を強くする必要がある。このパルスレーザーのパワーを光共振器に蓄える技術(Pulse Stacking[3,4])に関しては、開発要素が多い為、最終的に使用するレーザーとしては、レーザーパワー強度及び単位パワー当たりの光子の数の多さから CO₂ レーザーを候補として考えているが、当面は、Nd:YVO₄ モードロックレーザーを用いて Pulse Stacking 技術の開発を行なうこととした。目標は、入射の数百倍のパワーを蓄積することである。以下に、現在所有しているモードロックレーザーの主な仕様を示す。

・波長	1064 nm
・パルス幅	9 ± 1 psec
・モードロック繰返し	357MHz
・モードロック方式	SESAM 方式

3.2 レーザーに対する要求

レーザーのパワーを光共振器に蓄える技術に関しては、CWの場合 KEK/ATF のダンピングリング内に設置した光共振器(レーザーワイヤー)で、サブナノメートルの範囲で共振器長を制御することにより入射の 500 倍以上のパワーを蓄積し、コンプトン散乱による X 線を測定することにより、実際にビームプロファイルの測定を行なっている[5]。レーザーパワーを光共振器に蓄えることに関しては、CWレーザーでもパルスレーザーでも本質的には同じで、入射光と共振器内で蓄積されているレーザー光の位相を合わせることが重要である。このためには、CWレーザーの場合はレーザー波長が重なるように線幅の細かいレーザーが必要であり、Pulse Stacking では、最低条件としてレーザーパルスのピーク間のジッターがレーザーの中心波長と比較して十分に短い必要がある。

3.3 レーザー予備測定

本試験を開始する前に、レーザーのピーク間のジッターを調べるために、モードロックレーザーから

のレーザー光を Photo Detector で検出しその周波数成分を測定した。測定時には、357MHz の Reference 信号を入力し、共振器長が一定になるように feedback を行なった。結果は、ピークの中心周波数はレーザーの共振器長 42 cm に対応する 357MHz で、ピーク値から半分の位置での中心周波数からのズレは 10Hz 以下であった。この値はレーザーの中心波長に換算すると約 0.02 波長分に相当する。このことは、測定した半分以上のパルスの間隔は ±0.02 波長以内であり、このレーザーで Pulse Stacking を行なえる可能性を示唆している。

今後は実際に共振器を製作し、レーザーワイヤーの共振器長制御の技術を用いて共振器内にパワーを蓄積し、その測定を行なう予定である。

4 . まとめ

小型高輝度硬 X 線源開発計画では、発生させる X 線の強度を強くし動的血管造影写真測定を開発の目的としている。その重要なコンポーネントである電子蓄積リングと光共振器について検討を行なった。電子蓄積リングに関しては、ほぼ要求を満たすリングの大まかな Design ができた。光共振器については使用するレーザーの予備測定を行い Pulse Stacking を行なえる可能性を見出した。

謝辞

リングの Design や SAD の計算に関して多くの情報を与えて下さった ATF のメンバーに感謝いたします。光共振器に関してはレーザーワイヤーグループの豊富な経験が非常に役立ちましたのでここに感謝いたします。また、この研究開発は放医研・先進小型加速器計画として進めているもので、本推進委員会のご理解に感謝いたします。

参考文献

- [1] 山崎良雄 他 "小型高輝度硬 X 線源開発-(1)" Proceedings of the 27th Linea Accelerator Meeting in Japan, Kyoto, Aug. 7-9,2002
- [2] 平野耕一郎 他 "小型高輝度硬 X 線源開発-(2)" Proceedings of the 27th Linea Accelerator Meeting in Japan, Kyoto, Aug. 7-9,2002
- [3] 西森信行 他 "JAERI-FEL の efficiency detuning curve の detuning 長絶対測定" Proceedings of the 26th Linea Accelerator Meeting in Japan, Tsukuba, Aug. 1-3,2001
- [4] P.Haar *et al.* "Pulse stacking in the SCA/FEL external cavity" Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. **A358**(1995)319
- [5] H.Sakai *et al.* "Measurement of an electron beam size with a laser wire beam profile monitor" Phys. Rev. special topics Vol.4,022801(2001)