

エネルギー回収型コヒーレント X 線源の輸送路設計

DESIGN OF THE TRANSPORT AT ERL COHERENT X-RAY SOURCE

玄知奉^{#,A)}, 吉田光宏^{B,A)}, 佐藤政則^{B,A)}, 境武志^{C)}, 早川恭史^{C)}, 田中俊成^{C)}, 早川建^{C)}, 佐藤勇^{D)}, 遠藤克己^{E)}
Jibong Hyun^{#,A)}, Mitsuhiro Yoshida^{B,A)}, Masanori Satoh^{B,A)},
Takeshi Sakai^{C)}, Yasushi Hayakawa^{C)}, Toshinari Tanaka^{C)}, Ken Hayakawa^{C)}, Isamu Sato^{D)}, Katsumi Endo^{E)}

^{A)} The Graduate University for Advanced Studies, SOKENDAI

^{B)} High Energy Accelerator Research Organization, KEK

^{C)} Laboratory for Electron Beam Research Application (LEBRA), Nihon University

^{D)} Advanced Research Institute for the Sciences and Humanities (ARISH), Nihon University

^{E)} TOYAMA CO., Ltd.

Abstract

At present, KEK, Nihon University and TOYAMA CO., Ltd. have been developing Energy Recovery Linac with coherent X-ray sources. This accelerator is the machine that generates parametric X-ray radiation (PXR) when a bunch of energy is 75 MeV collides with a single crystal. The bunch passes through the crystal is transported into the decelerator cavity and then decelerated to 3 MeV there. To get the high Q-value, the accelerator and decelerator cavities are operated under low temperature. For getting rid of the radiation which generally occurred when the high energy beam is damped, we attempt to reduce it in our system. Therefore, the accelerator that can generate PXR without shield is proposed in this paper. For achieving it, the optics of transport and emittance growth in our accelerator are calculated and simulated.

1. はじめに

現在、日本大学、高エネルギー加速器研究機構、株式会社トヤマの共同研究の下、エネルギー回収型冷却式電子線形加速器をベースとしたコヒーレント X 線源の開発が進められている^[1]。この X 線とは、相対論領域の電子を単結晶に衝突させることで発生するパラメトリック X 線(Parametric X-ray Radiation : PXR) のことである^[2]。PXR の大きな特徴は、コヒーレント、指向性、単色性であり、これらの特徴を活かした材料の結晶構造解析やイメージング、あるいは医療現場での診断や治療に応用が期待されている。

現在開発中の加速器のコンセプトは、低放射線量と小型化である。現在、指向性と単色性を兼ね備えたコヒーレント X 線発生装置は、基本的には周囲を分厚いコンクリート壁で覆われた施設に限られており、装置建設時には多額の費用を要する。そこで、できる限り小型化し、さらに、ビームダンプ時の放射線量や輸送路中でのエネルギーロスを減らし、シールドレス化を試みることで総合的な建設費を抑え、どこにでも設置可能な装置にすることを目標としている。

単結晶衝突後のバンチは、エミッタンスが増加し、ビームの質が悪くなっているため、蓄積リングのような使用はエネルギーロスにも繋がるので避ける。そのため、バンチは輸送路を一周させた後に捨てる。放射線量を抑えるために電子は高エネルギーのまま

ダンプせず、減速管に入れ低エネルギー状態にした後に捨てる。

できる限り小型化するために、使用する加速周波数は C バンドの 5712 MHz を用いることとし、さらに加減速管は 20 K の低温環境下で使用する。それにより、常温で使用するよりも Q 値が高くなり、長時間加速が可能となる。今回我々は、上述の加速器の輸送路の基本設計をおこなったので報告する。

2. PXR の発生とエミッタンスの悪化

PXR は、相対論領域の速度の電子を結晶に入射し、通過する時に発生する。これは、電子が結晶内部を通過する時に結晶内で分極が生じ、その後、分極が元の状態に戻ることで発生する。また、PXR は式(1)で表したブラッグの法則で表された角度 θ に放射されるという特徴がある。

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (1)$$

結晶をゴニオメータに取り付け、電子の入射角度を変えることで任意の波長を取り出すことが可能となる。

相対論領域の電子が結晶と衝突すると、電子は結晶を構成している原子核とクーロン相互作用し、多重散乱する。その時、電子はある角度で散乱され、その散乱角度は式 (2) で表すことができる。

$$\theta_0 = \frac{13.6[\text{MeV}]}{p[\text{MeV}/c]c\beta} Z_1 \sqrt{\frac{L}{L_R}} \left(1 + 0.038 \ln \frac{L}{L_R} \right) \quad (2)$$

[#]hyon@post.kek.jp

p : 運動量、 Z_1 : 原子の電荷、 c : 光の速さ、 L : 結晶の厚み、 L_R : 結晶の放射長。

また、電子は結晶内でクーロン散乱された時に電離損失し、エネルギーを失う。そのエネルギー損失は Bethe-Bloch の式で評価することができ、式(3) のように表される。

$$-\frac{dE}{dx} [\text{MeVcm}^2/\text{g}] = 2\pi N_a r_e^2 m_e c^2 \frac{Z}{A} \frac{z^2}{\beta^2} \left[\ln \left(\frac{2m_e \gamma^2 v^2 W}{I^2} \right) - 2\beta \right] \quad (3)$$

N_a : アボガドロ数、 r_e : 古典電子半径、
 m_e : 電子の半径、 c : 光の速さ、 v : 粒子の入射速度、
 Z : 媒体の原子番号、 A : 媒体の質量数、
 z : 入射粒子の電荷量、 β : 入射粒子の v/c 、
 γ : $(1-\beta^2)^{-1/2}$ 、 W : 単衝突での最大エネルギー移行、
 I : 平均イオン化ポテンシャル。

実際に式(2)と(3)に数値を代入しプロットしたものとモンテカルロ法でシミュレーションした結果を Figure 1, 2 に示す。モンテカルロ法のシミュレーションは Geant4 ツールキット^[3]を用いた。結晶はシリコンとダイヤモンドを用いている。また、Figure 2 のエネルギー損失は、式(3)に結晶の密度を掛けて算出している。

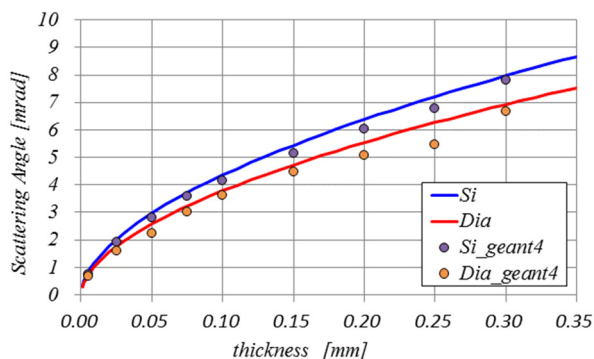


Figure 1: Crystal thickness vs scattering angle. Red is diamond crystal and blue is Si crystal.

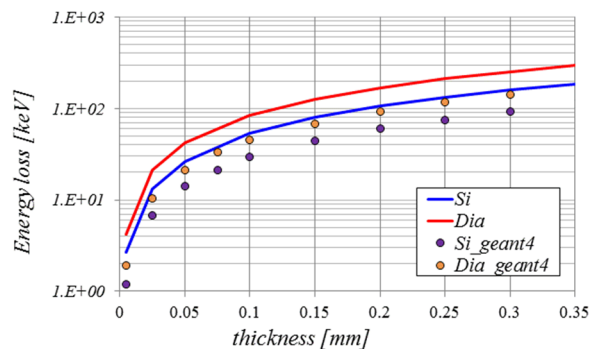


Figure 2: Crystal thickness vs energy loss. Red is diamond crystal and blue is Si crystal.

結晶の厚みが薄い時の方が、散乱角度は小さくなる。また、エネルギー損失も小さくなるので、結果としてエミッタンスの増加を抑えることができる。使用する結晶厚は 0.2 mm 以下を想定している。その時のエネルギー損失は、Figure 2 からおよそ 170 keV 程度となる。あまり結晶厚を薄くすると、結晶作成が困難になる。さらにバンチとの衝突の影響で熱が発生し、結果として結晶を破壊してしまう恐れがある^[4]。実際のコミッショニングの時は、結晶厚は最大が 0.2 mm とし、端に行くにつれて厚みが薄くなるようなテーパ型にしておき、衝突点をスキャンしながら最適値を決める。

3. 入射器

入射器は、電子銃、チョッパー、プリバンチャー、バンチャーで構成する。電子銃には、カソード電圧-100 kV の熱陰極 DC 電子銃を採用した。バンチ長及び規格化エミッタンスの目標値はそれぞれ、 $\pm 3^\circ$ 以下及び 10~20 mm-mrad である。プリバンチャー・バンチャーのみの構成では、バンチされない電子が本体加速部加速管に送られ、不要な放射線を発生させる。これを避けるため RF チョッパーを使用し、予め、バンチされない電子を取り除いておく。RF チョッパーは、RF 空洞、スリットと四極電磁石、RF 空洞の構成となっている^[5]。RF 空洞に供給する周波数は、加速周波数と同じ 5712 MHz である。Figure 3 にチョッパーシステムの概略図を示す。

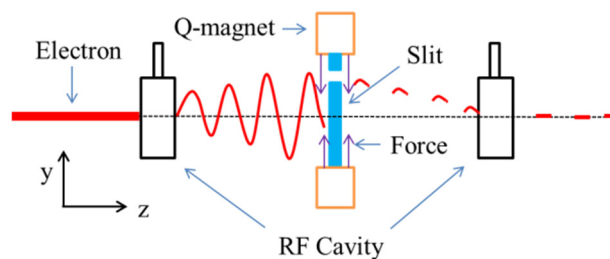


Figure 3: Double chopper system. ^[5]

1 台目の RF 空洞でバンチを上下方向に蹴り出し、四極電磁石中に設置したスリットで下流の加速管で加速されない部分をカットする。さらに、2 台目の RF 空洞で、1 台目の RF 空洞で蹴り出された角度をキャンセルする。チョッパーで切り出す位相幅は 120° とした。

バンチを 75 MeV まで加速させ、ダンプ時に放射化などの影響が起きない程度のエネルギー (約 10 MeV 以下) まで下げるためには、バンチ長の適正な長さにする必要がある。バンチ長の伸び Δz は以下の式で表すことができる。

$$\Delta z = R_{56} \frac{\Delta P}{P} \quad (4)$$

$$R_{56} = \rho\theta - \rho \sin \theta$$

θ : 偏向電磁石の偏向角、 ρ : 曲率半径、 $\Delta P/P$: エネルギー分散である。また、式(4)は1台の偏向電磁石でのバンチ長の伸びを示している。今回の加速器では、偏向電磁石は4台使用する予定であるので、輸送路一周した時のバンチ長の伸びは、式(4)を4倍する必要がある。実際に、 $\Delta P/P = \pm 0.3\%$ 時の計算してみると、

$$\Delta z = 4 \cdot \left(400 \cdot \frac{\pi}{2} - 400 \cdot \sin \frac{\pi}{2} \right) \times 0.003 = 2.8 \text{ mm}$$

となる。さらに、バンチャー出口でのバンチ長を $\pm 3^\circ$ と仮定すると、位相角は約 26° となり、バンチのエネルギーは 10 MeV 以下に下げることが可能となる。

プリバンチャーとバンチャーは、電子銃を出た電子を上記の検討に従って、バンチを $\pm 3^\circ$ 以下となるように集群させ、さらに 100 keV の電子を 3 MeV まで加速できるように設計した。投入する RF 周波数は加速管と同じ 5712 MHz を使用する。Figure 4 に入射器の全体を示す。

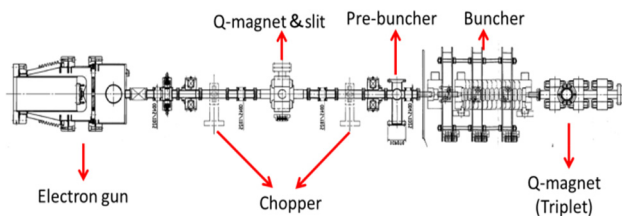


Figure 4: Layout of the injector.

4. 加減速管

加速管は、バンチャーを出た 3 MeV の電子を 75 MeV まで加速させるために使用し、減速管は周回してきた 75 MeV の電子を 3 MeV まで減速させるのに使用する。そのため、加速管と減速管の 2 本の空洞がある。両空洞は平行となるように設置する。Table 1 に加減速管のパラメータを示す。

加速管と減速管は全く同じ寸法にし、材料は高純度銅 (6N8 材) を使用する。空洞の向きは、加速管の場合、エネルギーが増大するにつれて 2a が小さくなるように設置し、減速管はエネルギーが減少するにつれて 2a が大きくなるように設置する。今回、短い加減速管で高い加減速勾配を得るために、加速周波数は C バンドの 5712 MHz を使用し、さらに両

空洞共にクライオスタッド内に入れ、20 K の低温環境下で運転する。それにより、Q 値が常温よりも 5 倍程度上がる。Figure 5 にクライオスタッド内の加減速管の概略図を示す。

Table 1: Parameters of the Accelerator and Decelerator

Cavity structure	Constant Gradient
Frequency	5712MHz
2a	16-13 mm
2b	43-42 mm
Thickness of disk	2.5 mm
Cavity length	1.2m
Mode	$2\pi/3$
Q	~ 74000
Input klystron power	45 MW

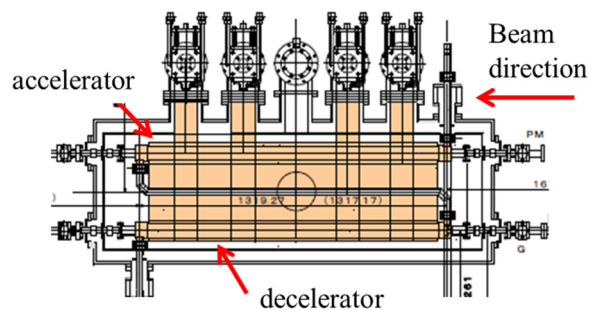


Figure 5: Accelerating and decelerating cavities in the cryostat.

5. 輸送路のラティス

5.1 輸送路前半 (ターゲット前) のオプティクス

Figure 6 にバンチャー出口から結晶までの輸送路のオプティクスを示す。オプティクスは、SAD^[6]を用いて計算した。Table 2 にオプティクスを構成する時に必要な初期条件などを示す。

電子銃から放出された電子のエネルギーは、100 keV であり、プレバンチャー・バンチャーで 3 MeV まで加速と集群がおこなわれる。チョッパーでは、縦方向のビームサイズが ± 0.5 mm になるように切り出す。規格化エミッタンスは < 20 mm-mrad である。最終的に電子のエネルギーは、加速管出口で 75 MeV になる。

加速管出口から結晶までの高エネルギー輸送路は、偏向角 90° 、曲率半径 400 mm の偏向電磁石を 2 台、四極電磁石は、磁石長が 90 mm (ボア径 30 mm) を 2 台、45 mm (ボア径 30 mm) を 8 台、70 mm (ボア径 28 mm) 2 台の合計 12 台を用いて構成した。今回、ダクトの内径は四極電磁石のボア径から 26 mm とし、ビーム径は $10\sigma < 26$ mm となるよ

うにラティスを組んだ。ターゲットとの衝突点での
ビーム径は、あまり絞りすぎると結晶を破壊して恐
れがあるので、 $1\sigma = 0.1\sim 0.15\text{ mm}$ の範囲に収まる
ようにした。Table 3 に得られた四極電磁石の K 値
を示す。

第二偏向電磁石から衝突点までは、エネルギー分
散の影響でビーム径が変動しないように、分散がゼ
ロになるようなオプティクスを組んだ。第一偏向電
磁石と第二偏向電磁石の間で分散を作り、それ以外
の場所では分散がないラティスである。

Table 2: Parameters of the Quadrupole Magnet

Type		length [mm]	K [m ⁻¹]	dB/dx [T/m]
triplet	QF1_0	40	-4.81	-0.56
(exit of buncher)	QD1_0	40	8.54	0.72
triplet	QD1_1	45	-2.53	-14.06
	QF1_1	70	5.01	17.89
doublet	QF2_1	90	2.31	6.42
(arc section)	QD3_1	45	-0.85	-4.71
doublet	QF4_1	45	2.90	16.11
(after arc section)	QD4_1	45	-2.00	-11.11

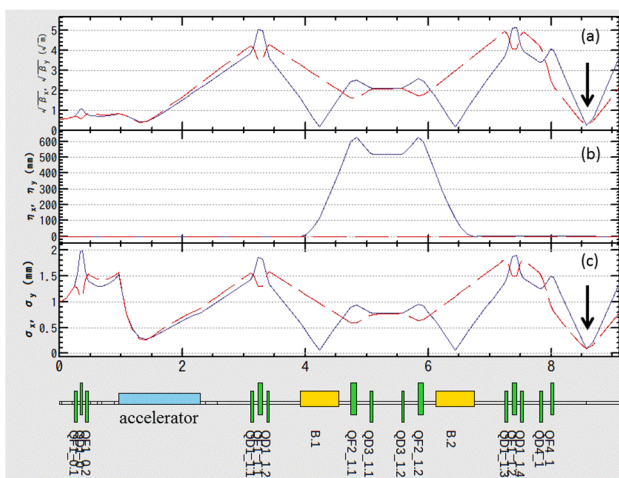


Figure 6: (a) Beta function, (b) Dispersion function and
(c) Beam size. Blue and red lines indicate x-direction, y-
direction. Aqua part is the decelerator cavity, green parts
are the quadrupole magnet and yellow parts are bending
magnet. Arrows show the collision point.

5.2 輸送路後半のオプティクス

まず、バンチが結晶と衝突しない時のオプティク
スを組んだ。Figure 7 に結晶から減速管出口までの
オプティクスを示す。基本的には、5.1 節の加速管
から結晶直前のオプティクスと同じ構成とし、偏向
電磁石 2 台と三種類の四極電磁石を合計 10 台使用
した。また、減速管は加速管よりも内側に位置して
いるので、アーク部の距離は第一アークの距離より
も短くしている。また、オプティクスを構成するに
あたり、初期値の Twiss パラメータは Figure 6 から

得られた数値を使用し、連続性が保たれるようにし
ている。

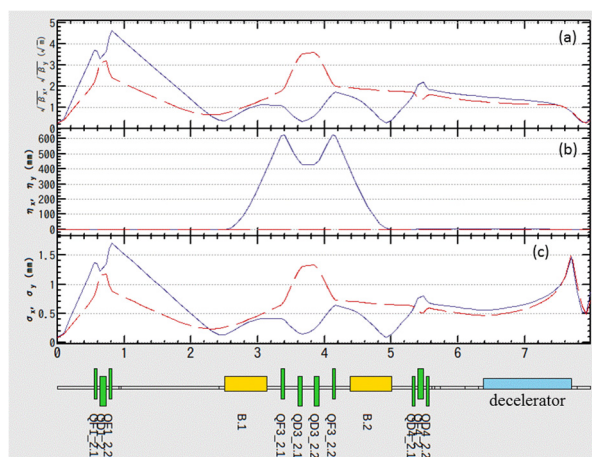


Figure 7: (a) Beta function, (b) Dispersion function and
(c) Beam size. Blue and red lines indicate x-direction,
y-direction. Aqua part is the decelerator cavity, green
parts are the quadrupole magnet and yellow parts are
bending magnet. Start is the collision point.

Table 3: Parameters of Transport Line at the Buncher
Exit

Beam Energy at exit of buncher	3 MeV
Beam Energy at exit of accelerator	75 MeV
Frequency	5712 MHz
Normalized emittance	20 mm-mrad
bunch length (10σ)	1 mm
Dispersion	$\pm 0.3\%$
$\alpha_x, \beta_x, \eta_x$	0, 0.3, 0
$\alpha_y, \beta_y, \eta_y$	0, 0.3, 0

5.3 結晶との衝突後のオプティクス

バンチが結晶と衝突すると、多重クーロン散乱に
よってエミッタンスが増加する。ビーム径がアパー
チャー内に収まるように式(2)の結晶厚と発散角の関
係からエミッタンスを求め、それを基にしてラティ
スを組んでいった。Figure 8 に得られたオプティ
クスを示す。結果として、規格化エミッタンスは
 $\epsilon = 29\text{ mm-mrad}$ 、結晶の厚みが $30\ \mu\text{m}$ 以下であれば、
バンチはエネルギーロスをほとんどすることなくダ
クトを通り抜け、さらに減速管でエネルギーを 3
MeV まで下げることができることが分かった。
Table 4 に Figure 8 で求めたオプティクスの電磁石の
パラメータを示す。バンチが結晶を出た直後のトリ
プレット四極電磁石の K 値が、他の四極電磁石に比
べて高い値となっている。

Table 4: Parameters of the Quadrupole Magnet

Type		length [mm]	K [m ⁻¹]	dB/dx [T/m]
triplet	QF1_2	45	4.30	23.89
	QD1_2	90	-7.82	-21.72
doublet (arc section)	QF3_2	45	2.90	16.11
	QD3_2	70	-1.86	-6.64
triplet (after arc section)	QF4_2	90	6.10	16.94
	QD4_2	45	-2.67	-14.83

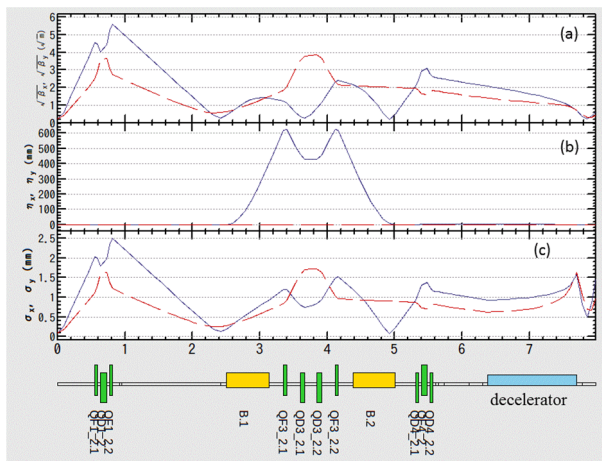


Figure 8: (a) Beta function, (b) Dispersion function and (c) Beam size. Blue and red lines indicate x-direction, y-direction. Aqua part is the decelerator cavity, green parts are the quadrupole magnet and yellow parts are bending magnet.

5.4 周長補正とバンチ長

バンチを減速管に入れエネルギーを下げるためには、バンチを減速管内の適正な減速位相に乗せる必要がある。もし、バンチが加速位相に乗ってしまうと、バンチは加速され、エネルギーは最大で $75 \text{ MeV} \times 2 = 150 \text{ MeV}$ となりそのままダンプされる。その結果、周囲に放射線をまき散らし、さらに放射化の問題も起きる。そのため、エネルギー回収型加速器では、位相調整は非常に重要である。大型の加速器施設であれば、シケインにより周長補正をおこなうことも可能であるが、今回の加速器は小型化を目標としており、シケインを導入するためのスペースの確保が難しい。また、導波管に位相器を取り付けることも可能であるが、費用などの問題がある。そのために、今回は、第三・四偏向電磁石を含めた第二アーク部全体をモーターで動かし周長を調整することとした。これにより、周長の微調整を容易にすることが可能となる。

また、得られたオプティクスからトラッキングをおこないバンチの伸びを調べた。Figure 9 に結晶と衝突しない時のバンチ長とエネルギー分散の結果を示す。(a)がバンチャー出口、(b)がターゲット直前、(c)が減速管に入る直前である。減速管に入る直前のバンチ長は $10\sigma = 7 \text{ mm}$ 程度となっており、減速管で 10 MeV 以下に減速できる。

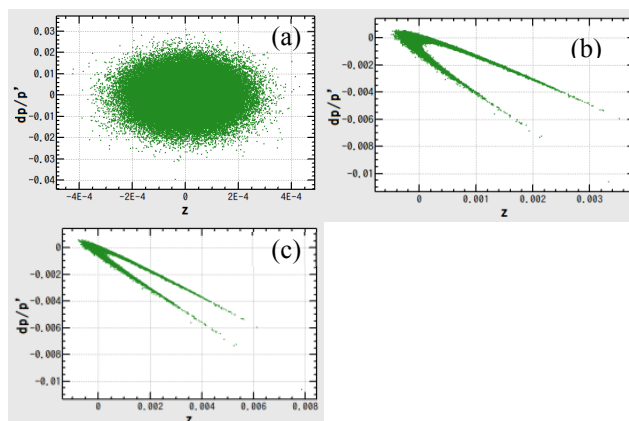


Figure 9: Longitudinal bunch length. (a): exit of the buncher (b):collision point, (c): entrance of decelerator.

6. まとめ

今回、コヒーレント X 線源の輸送路の基本設計をおこなった。その全体図を Figure 10 に示す。また、バンチが結晶と衝突していない条件で粒子トラッキングをおこない、バンチ長の変化を調べた。結晶との衝突に関しては、まだ一次近似でのオプティクスしか計算していないが、基本的な構造を決めることができた。今後は、この結果を基にして電磁石のミスアライメントや磁場誤差の値を入れ、最適化をおこなっていく。また、エネルギーを回収するために必要な高周波制御などを含めたトータル設計を試みる。

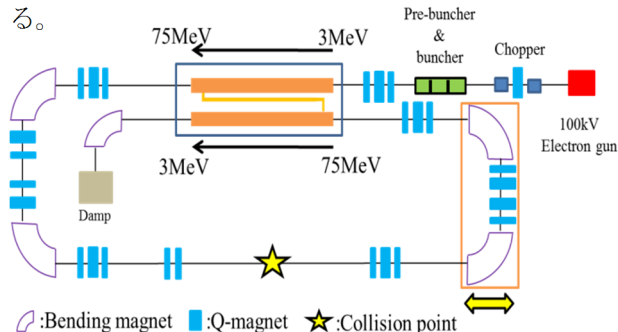


Figure 10: Layout of the coherent X-ray source.

参考文献

- [1] I. Sato, et al., "Developments of Coherent X-ray source based in cryogenic electron Linac" Proceedings of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (2014).
- [2] Endo Ichita, et al., The Physical Society of Japan., Vol. 48, (1993), 11.
- [3] Geant4, <http://geant4.cern.ch>
- [4] Y.Hayakawa, et al., "Compact and Spatially Coherent X-ray Source based on Cryogenic ERL: Basic Design of the X-ray Radiator" Proceedings of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (2014).
- [5] Y.L.Wang, et al., Proceedings of the 18th Linear Accelerator Meeting in Japan (1994) p145-147.
- [6] SAD, <http://acc-physics.kek.jp/SAD/>