

# 高繰り返し自由電子レーザー用加速器の設計検討

## DESIGN STUDY FOR HIGH REPETITION RATE FEL

許斐太郎<sup>#, A)</sup>, 山本尚人<sup>B)</sup>, 保坂将人<sup>B)</sup>, 加藤政博<sup>A, B)</sup>

Taro Konomi<sup>#, A)</sup>, Naoto Yamamoto<sup>A)</sup>, Masato Hosaka<sup>B)</sup>, Masahiro Katoh<sup>A, B)</sup>

<sup>A)</sup> Institute for molecular science, UVSOR

<sup>B)</sup> Aichi SR

### Abstract

To meet the increasing demands for high repetition rate laser in the soft-X-rays and VUV region, we have started a feasibility study on high repetition rate relatively low energy free electron laser based on accelerator technologies which have been developed for ERL and XFEL in these years. The accelerator system would consist of a superconducting electron gun, a superconducting linear accelerator, multi return loops, undulators and a laser system. Currently we are studying each portion and have not yet completed the overall design.

### 1. はじめに

SASE の原理に基づく一回通過型の自由電子レーザーの波長はX線領域に到達し、光科学の新しい領域を切り拓きつつある。現在稼働中の自由電子レーザー装置は、パルス強度は極めて大きいものの、その繰り返しは 10Hz 程度と低く、これの改善は今後の自由電子レーザーの発展の一つの方向であると思われる。

Table 1: Tentative Target Parameters

Parameter	Value	Parameter	Value
Undulator period	18 mm	Repetition rate	1 MHz
Wavelength	13.4 nm	Electron energy	750 MeV
Maximum K-Value	2.1	Pulse charge	0.3 nC
Avg. beta function	10 m	Normalized emittance	1 $\pi$ $\mu$ m.rad
FEL parameter	9.8 $\times 10^{-4}$	Energy Spread	0.025 %
Gain Length	0.842 m	Bunch length	0.5 ps
Saturation Length	21.18 m	Peak current	239 A
Saturation Power	0.183 GW		
Energy/pulse	2.3 $\times 10^{-4}$		
Peak Brilliance	1.25 $\times 10^{29}$		

我々はX線と並んで幅広い応用が見込まれる真空紫外領域での高繰り返し自由電子レーザーの実現可能性の検討を行っている。Table 1 に波長 13.4nm の真空紫外光発生を例とした XFEL パラメータを示す。計算には SIMPLEX を使用した[1]。

現在検討を進めている加速器の概念図を Figure 1 に示す。高繰り返しを実現するために、加速部には全て超伝導 RF 空洞を用いる。主加速空洞を一回通過することでビームが得るエネルギーは 250MeV とし、3 周の周回部を使用することで最大 750MeV まで加速する。これにより小型化を図るとともに、超伝導空洞冷却によるエネルギー消費を抑制する。

アンジュレータ部は主加速空洞と概ね等しい長さである 20m 程度を確保する。シーディング技術を積極的に用いることも想定している。

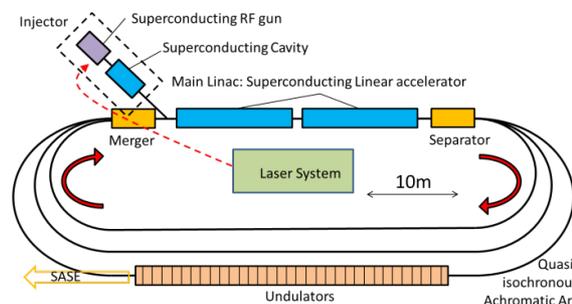


Figure 1: Conceptual drawing of the accelerator layout.

### 2. 主加速空洞

主加速空洞には ILC に用いられる KEK-STF 9セル超伝導空洞を使用することを想定している[2]。加速空洞の冷却に必要なエネルギーと加速空洞の全長を考慮して本加速器に最適な加速空洞台数について計算を行った。

超伝導空洞の冷却に必要なエネルギーはカルノー効率式から見積もった[3]。式(1)は高温の  $T_H$  から低温  $T_L$  まで冷却するために必要なエネルギー  $W$  を求めた式を示す。  $Q_L$  は低熱源から吸収する熱を表す。COP は成績係数と呼ばれる。

$$W_R \geq Q_L \left( \frac{T_H}{T_L} - 1 \right) = \frac{Q_L}{COP} \quad (1)$$

実際の冷凍機では式(1)から見積もられる値より下がり 10~20%程度の効率である。Table 2 に 300K から 70 K、4.2 K、2K に冷却する場合の COP と実際の冷凍機の効率、2 つを積算した最終的な効率を示す。

Table 2: Refrigerator Efficiency

Temperature	COP	Refrigerator Efficiency	Combine Efficiency
300K→70K	30.4 %	20 %	6.09 %
300K→4.2K	1.42 %	20 %	0.28 %
300K→2K	0.67 %	10 %	0.07 %

Table 3 に空洞台数をパラメータとして主加速空洞の全長と必要な冷凍能力、RF パワーを計算した結果を示す。超伝導空洞を格納するクライオモジュールの長さは STF で用いられているクライオモジュールを参考に推定した。超伝導空洞の Q 値は  $1 \times 10^{10}$  として、入力 RF パワーはカップラー部の結合を  $1 \times 10^6$  として計算した。

主加速空洞の全長さがアンジュレーター長と釣り合い、消費電力が中規模放射光施設(~3MW)と同等になる Case 2 が適していると考え、この条件を基に周回部の設計を進めている。

Table 3: Parameters of the Main Accelerator

Parameter	Case 1	Case 2	Case 3
Number of Cavities	12	16	20
Gradient (MV/m)	20.07	15.05	12.04
Total length (m)	15.8	21.1	26.3
Wall loss power @2K (W)	466	350	280
Cryogenic power @RT (MW)	0.66	0.50	0.36
Input RF power (MW)	2.5	1.9	1.5
Total Power	3.16	2.40	1.86

### 3. 入射器

入射器は超伝導 RF 電子銃と KEK-STF 9 セル超伝導空洞 1 台で構成される。Figure 2 と Table 4 にドイツ ELBE の超伝導電子銃を参考にした電子銃の電磁界分布と電子銃出口でのビームパラメータを示す。電磁界分布とビームパラメータはそれぞれ SUPERFISH と GPT を使い計算した。

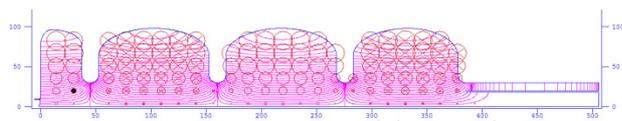


Figure 2: Field distribution of superconducting RF e-gun.

Table 4: Beam Parameters at E-gun

Parameter	Value
Frequency	1300 MHz
Beam Energy	10 MeV
Charge	0.3 nC
Repetition rate	1 MHz
Pulse length (rms)	6.5 ps
Normalized emittance	$1.15 \pi \mu\text{m}\cdot\text{rad}$
Energy spread (rms)	17 keV

電子銃は、KEK、三菱重工と協力して本加速器に適した加速空洞形状の設計を進めており、現在プロトタイプ製作が進行している[4]。また、本電子銃では背面照射が可能となる透明超伝導フォトカソードを使用する計画である[5]。

入射器では主加速空洞で空間電荷効果の影響を抑制するために、20MeV 以上のエネルギーまで加速する。超伝導 RF 電子銃と KEK-STF 9 セル超伝導空洞のレイアウトと入射器出口(Screen)でのビームパラメータを示す。

入射器出口での規格化エミッタンスが Table 4 に示した。値より低くなっているのは電子銃下流に置いたソレノイドレンズが電子銃出口に侵入してビームの発散を抑制しているためだと考えられる。

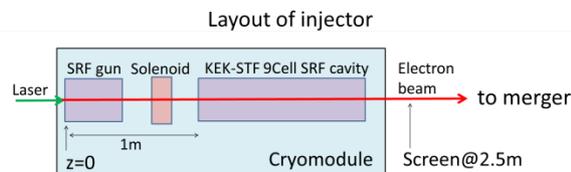


Figure 3: Layout of the injector.

Table 5: Beam Parameters at the Exit of the Injector

Parameter	Value
Beam Energy	30 MeV
Charge	0.3 nC
Repetition rate	1 MHz
Pulse length (rms)	6.5 ps
Normalized emittance	$1.05 \pi \mu\text{m}\cdot\text{rad}$
Energy spread (rms)	51 keV

### 4. 周回部

周回部の設計においては、コヒーレントシンクロトロン放射 (CSR) のビームパラメータへの影響を考慮する必要がある。CSR はパルス内のエネルギー分布を不均一にし、これが投影エミッタンスの増大を

もたらず。これを抑制するのに効果があるとされているアイソクロナス・アクロマート  $8\pi/3$  セル<sup>6)</sup>を基に周回部の設計を進めている。

周回部での CSR の効果について検討を行うために、まず簡単のため、シングルループのアクロマティックセルを設計し、周回ごとのエネルギーについてシミュレーションを行った。Figure 5 は電荷量  $0.3\text{nC}$ 、規格化エミッタンス  $1\pi\ \mu\text{m}\cdot\text{mrad}$ 、エネルギー幅  $5\times 10^{-4}$ 、エネルギー  $250\text{MeV}$  と  $750\text{MeV}$  のビームを Figure 4 のシングルループラティスに入射した場合、周回後に生じる、エミッタンスとパルス幅、エネルギー広がりを入射パルス幅依存性を示したものである。

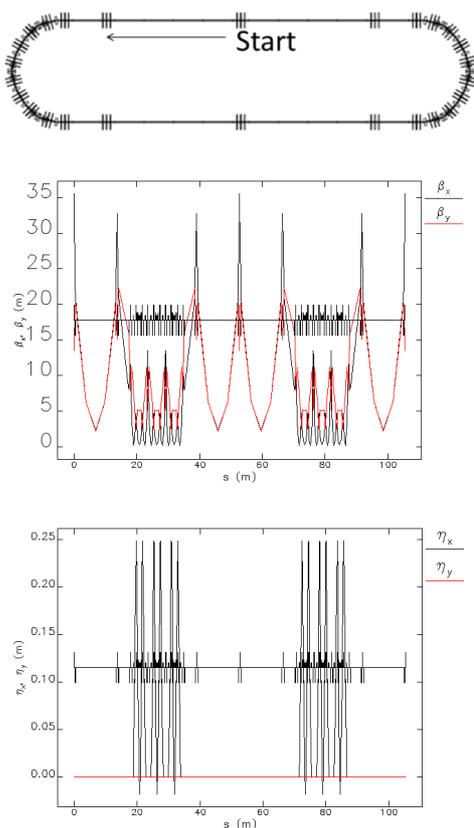


Figure 4: Single loop lattice.

$250\text{MeV}$  から  $750\text{MeV}$  まで周回ごとにパルス長さを  $3\text{ps}$ 、 $2\text{ps}$ 、 $1\text{ps}$  と圧縮していくことで CSR によるエネルギー広がりとおエミッタンスの増大は 1 割以下の変化に抑えることができると見積もられ、さらにバンチ圧縮部を設けることでアンジュレーター直前でサブピコ秒を達成できると考えられる。

現在設計を進めている 3 週の周回部ラティスの設計例を Figure 6 に示す。入射器-周回部間、周回部-主加速空洞間、周回部-アンジュレーター間の各部分でバンチ長の最適化のためのバンチ圧縮部を設置する必要があり、検討を進めている。

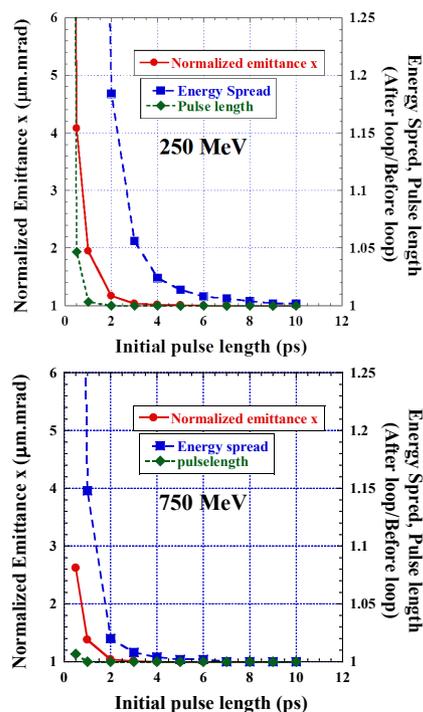


Figure 5: Emittance, energy spread and bunch length after one circulation of the loop.

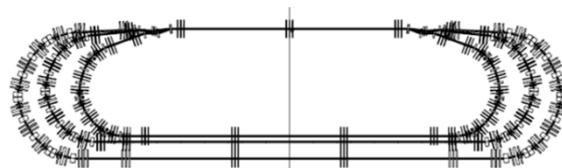


Figure 6: Layout of the triple loop (under designing).

#### 4. まとめ

超伝導加速空洞と複数周回部を用いた高繰り返し FEL の実現可能性について検討を進めている。中規模放射光源程度の電力消費量の真空紫外高繰り返し自由電子レーザーが実現できる可能性がある。今後、電子銃から加速部、周回部及びレーザー発振までを含めた start-to-end シミュレーションにより、実現可能性の議論を深めたいと考えている。

#### 参考文献

- [1] SIMPLEX URL: <http://radiant.harima.riken.jp/simplex/H.Kobayashi>.
- [2] ILC TDR URL: <http://www.linearcollider.org/ILC/Publications/Technical-Design-Report>
- [3] K.Nakai, 「2K ヘリウム冷凍システム」OHO セミナー 2008.
- [4] R.Matsuda et al., 「KEK における超伝導 RF 電子銃の開発状況」, 第 11 回日本加速器学会年会, 2014 MOOL13.
- [5] R.Inagaki et al., 「背面照射型透明超伝導マルチアルカリフォトカソードの初期エミッタンス測定」 第 11 回日本加速器学会年会, 2014 SAP031.
- [6] Bassi et al., NIMA 557, 189 (2006).