

東北放射光(SLIT-J)入射器の設計検討

DESIGN STUDY OF THE INJECTOR OF SLIT-J

三浦禎雄^{#, A)}, SLIT-J デザインチーム

Sadao Miura ^{#, A)}, SLIT-J Design Team

^{A)} Research Center for Electron Photon Science, Tohoku University

Abstract

Synchrotron Light in Tohoku, Japan (SLIT-J) is the next generation high-brilliance light source and is designed compactly for energy saving. The energy is 3 GeV with the circumference 354 m. The natural emittance is 0.92 nm [1]. SLIT-J is proposed to be constructed in Miyagi-prefecture aiming to finish the construction by 2020. Full energy injection scheme by Linac is employed considering energy saving. We designed a compact and stable Linac based on the C-band (5712 MHz) accelerator developed by SACLA at RIKEN, and employed the ITC (Independently Tunable Cells) thermionic cathode RF gun as electron source developed by ELPH at TOHOKU University. We report this Linac.

1. ライナック構成

SLIT-J 入射器に要求される仕様を Table 1 に示す。放射光リング入射器としてはシンクロトロンが初期建設費はやや安価であるが、シンクロトロンは運転経費(電力費用)が高く、10 年程度の運転で初期建設費と運転経費がライナック建設費を上回る見込みでコストメリットが少なく、SLIT-J 計画の省電力というコンセプトに合致しないこと、将来的な発展性が無いこと、また理化学研究所播磨研究所 SACLA で高精度、高安定な線形加速器の実績があることから[2]、SLIT-J 入射器としては線形加速器を選択した。

Table 1: Specifications of Injector

Item		Specifications
Beam energy	E	3 GeV
Energy spread	$\Delta E/E$	<0.1% (1 σ)
Energy stability	δE	<0.1% (1 σ)
Beam charge	Q	0.3 nC/sec
Charge stability	δQ	~1%
Normalized Emittance	$B_{\gamma e}$	<5 $\mu\text{mm}\cdot\text{mrad}$
Un-normalized emittance	E	<1 nmrad
Bunch length	σ_z	<5 ps
Repetition rate	f_{rep}	25 Hz (max)

Figure 1 に入射器線形加速器概略図を示す。加速器全長を短くして建屋建設費を抑制するために高電界加速を行う点と省電力の点から主加速部は理研 SACLA と同じ C バンド 5712MHz を選択した。運転はシングルバンチモードのみを想定しているため、加速管は C バンドディスクロード型 2m 管とし、軸上電界 42MV/m、加速管 2 本で 1 ユニットとして 18 ユニットで電子ビームを 3GeV まで加速する。最初の 3 ユニットは 1 ユニット毎、後半は 4 ユニット毎に 4 極電磁石とビームモニターを配置した。

電子銃は、電子ビーム集群部を単純化して建設費を抑制する点と、機器の安定度、メンテナンスの容易さの点から東北大学で使用実績のある S バンド(2856MHz) ITC 型熱カソード RF 電子銃を選択した。RF 電子銃から出射した 1.9MeV の電子ビームは大きなエネルギーテールを引いており、このビームをエネルギーフィルターでエネルギー幅 0.06MeV、マイクロバンチ幅約 12ps 分だけ透過させる。さらにビームチョッパーでバンチ列のマクロパルス幅 0.4 μs を 1ns (350ps 間隔 3 バンチ分) に切り出し、後段の S バンド 2m 管で 35MeV 程度まで加速すると同時に電子バンチ内にエネルギー変調をかけ、シケイン(BC)にてバンチ長を 1ps 程度に圧縮する。この電子バンチを C バンド加速管で高電界加速し、ビームエネルギーを 3GeV まで加速する。線形加速器全長はビーム輸送部を除き、100m 強を想定している。パルス繰り返しはリング入射時で MAX5Hz、RF エージング用として MAX25Hz とする。

2. 主加速器

主加速部の加速管は C バンド(5712MHz) ディスク

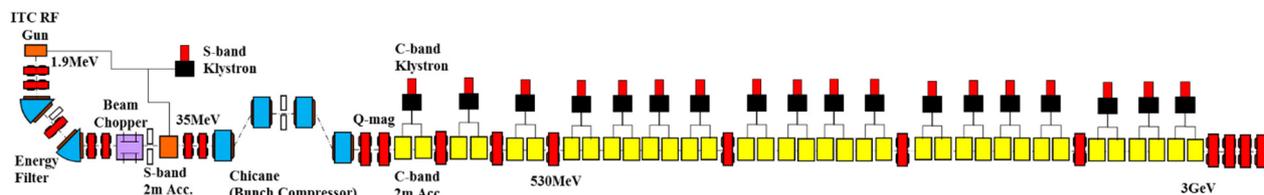


Figure 1: Schematic layout of the injector linac.

[#] miura@lns.tohoku.ac.jp

ロード型 2m 管で、50MW の RF 源(クライストロン)1 本で 2 本の加速管を運転する。クライストロン後段には RF パルスコンプレッサー (SLED)を設置し、クライストロン出力パルス幅 2.5 μ s、50MW のマイクロ波を、パルス幅 0.5 μ s、200MW に圧縮増倍する。Figure 2 に C バンドユニット構成図を示す。理研 SCSS+加速器では同様の構成で、加速管のビーム加速勾配 45MV/m が得られている[3]。SLIT-J 入射器ではビーム加速勾配を 42MV/m に設定し、本ユニット 18 ユニットで電子ビームを 3GeV まで加速する。ビーム加速勾配を最大加速勾配である 45MV/m まで上昇させれば、1 ユニット/18 ユニットが予備となる(Table 2)。

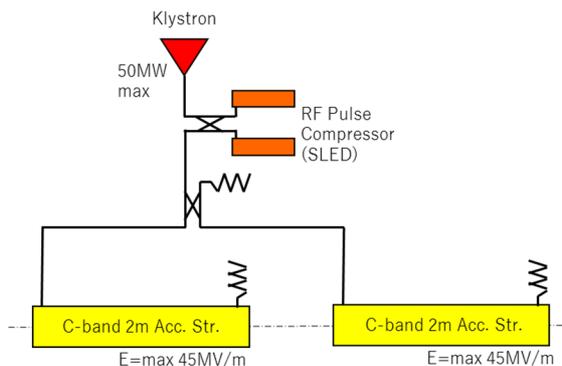


Figure 2: Layout of the C-band unit.

Table 2: Main Parameters of the C-band Unit

Component	Item	Specification
Klystron	Operating frequency	5712 MHz
	Output power	50 MW
	Output pulse width	2.5 μ s
	Repetition rate	Max. 25 Hz
RF pulse compressor (SLED)	Q	180000
	Output pulse width	0.5 μ s
	Voltage enhanced Ratio V/V_0	2.07
Accelerating structure	Acceleration mode	$2\pi/3$ mode, traveling wave Disc-loaded
	Number of cells	112+2 coupler cells
	Effective acceleration length	1.994 m
	Attenuation constant τ	0.604
	Filling time t_f	299.8 ns
	Shunt impedance r	64 M Ω /m
	Q	8900
	Acceleration gradient	Max. 45 MV/m

3. 電子源

SLIT-J 入射器用の電子源は、東北大学で 2005 年に

開発され[4]、2013 年より東北大学シンクロトロンリングへの入射を行っている S バンド(2856MHz) ITC 型熱カソード RF 電子銃を選択した(Figure 3)。本電子銃は独立可変 2 空洞の RF 電子銃でリエントラント型の第 1 空洞に ϕ 3mm の CeBx 熱カソードが設置されている。カソード最大表面電界は約 25MV/m でカソードエミッション電流密度は 8.5A/cm²、第 1 空洞で約 300kV で引き出された電子は、第 2 空洞の加速位相で増速され、エネルギー約 1.9MeV、1 バンチあたりの電荷量 20pC で RF 電子銃より出力する。

東北大学で運転されている ITC 型 RF 電子銃の各空洞のカップリング係数 β_e は約 4 で、フィリングタイムは 0.25 μ s 程度、3 μ s 幅のマイクロ波を投入し、2 μ s 幅の電子ビームを出力させている。SLIT-J 入射器のビーム出力はシングルバンチで良いため、本 ITC 型 RF 電子銃のカップリング係数 β_e を 15 に変更し、フィリングタイム t_f を短くすることにより入力マイクロ波のパルス幅を短くし、マイクロ波パルス内のバックスキヤッタによるカソードへのダメージを抑制する。Table 3 に本 RF 電子銃の東北大学の仕様と SLIT-J 入射器用に変更した仕様を示す。

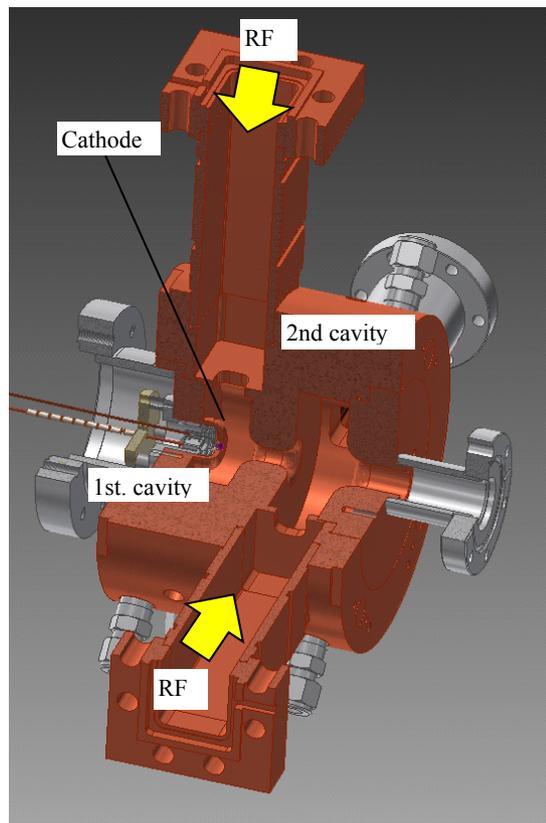


Figure 3: ITC thermionic cathode RF gun.

Table 3: Specifications of the ITC RF Electron Guns

item		Tohoku University	SLIT-J
Input RF pulse width		3 μ s	0.4 μ s
Output beam pulse width		2 μ s	1 ns
1 st cavity	Max. cathode electric field	25 MV/m	←
	Coupling β_e	4.26	15
	Q_0	8232	←
	Filling time t_f	0.17 μ s	0.057 μ s
	Input power P_0	92 kW	332 kW
2nd cavity	Max. axial electric field	70 MV/m	←
	Coupling β_e	4.59	15
	Q_0	12653	←
	Filling time t_f	0.25 μ s	0.088 μ s
	Input power P_0	2.4 MW	6.2 MW

4. ビームチョッパー

ITC 型 RF 電子銃から出射したロングパルスの電子ビームを 1ns 幅に切り出すために、ITC 型 RF 電子銃後段にビームチョッパーを設置する。ビームチョッパーとは 1 組のビーム偏向用空芯コイルと、コイル磁場と直交方向に電界を生成する 2 枚の平行平板電極および、後段に設置されたコリメータで構成されており、平行平板電極にパルス電圧を印加し、印加パルス幅に応じたパルス幅の電子ビームを切り出すもので、Figure 4 にその模式図を示す。本ビームチョッパーは理研 SACLA においてもビーム切り出し用として使用されており[5]、SLIT-J 用としてもその詳細仕様は SACLA に準ずる。しかしながら、理研 SACLA と SLIT-J の場合はビームチョッパーに入射するビームエネルギーが異なるため、平行平板電極長さ及び電極からコリメータまでのドリフト距離を変更する。これを Table 4 に比較して示す。ビームチョッパーによって与えられる変位は SACLA の場合で 9.0mm、SLIT-J の場合で 10.4mm である。

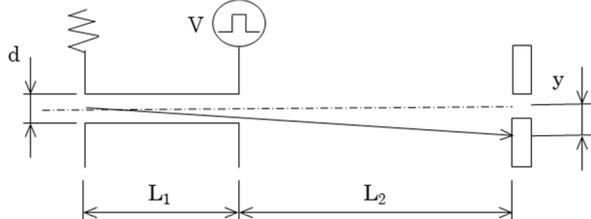


Figure 4: Beam chopper Schematic view.

Table 4: Beam Chopper Specifications

item	RIKEN SACLA	SLIT-J
Injection beam energy	500 keV	1.9 MeV
Applied voltage V	3 kV	←
Parallel plate interval d	15 mm	←
Parallel plate length L_1	150 mm	300 mm
Drift distance L_2	150 mm	250 mm
Vertical displacement y	8.96 mm	10.4 mm
Beam segmentation time	1 ns	←
Pulse charge time	0.5 ns	1 ns
Beam passage time	0.58 ns	1.02 ns
Pulsar pulse width	2.1 ns	3 ns

5. バンチコンプレッサー

ITC 型 RF 電子銃より出射し、エネルギーフィルターを通過した電子ビームのバンチは 15~20ps 程度の長さを持っている。この電子ビームを C バンド加速管でクレスト加速すると位相分散によりエネルギー分散を生じ、バンチ内に 4~6%のエネルギー差を持つことになり、リングの要求であるエネルギー分散 0.1%という要求値を大幅に逸脱する。このため、C バンド加速管クレスト加速前にバンチコンプレッサーにてバンチ長を圧縮する。

バンチコンプレッサーはエネルギー変調用加速管と偏向電磁石 4 台からなるシケインで構成される。バンチをエネルギー変調用加速管のマイクロ波クレストよりも早い位相で加速するとバンチ後半は前半よりも高いエネルギーを持ち、このバンチがシケインを通過すると、高エネルギー部は低エネルギー部よりも短い軌道を通過するために、高いエネルギーを持つバンチ後半がバンチ前半に接近し、バンチ長が圧縮される。

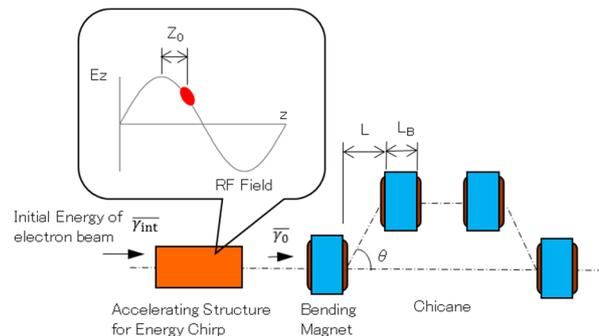


Figure 5: Beam chopper Schematic view.

Figure 5 にバンチコンプレッサーの概念図を示す。シケインへの入射エネルギーが低い方がバンチ圧縮率は大きくなるが、低いエネルギーでバンチ圧縮をかけるとエミッタンスの増大を招くため、シケインへの入射エネルギーは 30MeV 以上に設定した。また大きなエネルギー変調をかけた方がバンチ圧縮率は大きくなるが、リング

からの要請でエネルギー分散 0.1%という要求値があるため、エネルギー変調加速管ではエネルギー変調幅は 3MeV 以下とした。また、シケインディメンションは SACLA の BC1 シケインに準拠し、大幅なディメンション変更は行わないこととし、バンチコンプレッサーの設計を行った。

Table 5 にエネルギー変調加速管の仕様を、Table 6 にシケインの仕様を示す。エネルギー変調用加速管は S バンド進行波型加速管で、RF 電子銃側の要請で、S バンドのマイクロ波パルス幅は 0.4 μ s と短いため、フィリングタイムの短い 2m 加速管を採用した。S バンドマイクロ波源は 50MW 出力のものを想定しており、RF 電子銃に 10MW のパワーを供給したとしても、本加速管への入力パワーは十分に余力がある。本加速管のマイクロ波クレストより 24° 前側でバンチを加速し、シケインでバンチ圧縮する。シケインの偏向角は 7.8deg とやや SACLA よりも大きめであるが偏向電磁石の磁場は 520gauss と大きな値ではない。

Table 5: Specifications of the Accelerating Structure for Energy Modulation

item	Specification
Operating frequency	2856 MHz
Acceleration mode	2 π /3 mode, traveling wave
Number of cells	57+2 Coupler cell
Attenuation constant τ	0.25
Filling time t_f	0.377 μ s
Diameter of entrance aperture	26.330 mm
Diameter of exit aperture	22.866 mm
Input power	27 MW
Acceleration voltage	34.9 MV
Acceleration phase	24°

Table 6: Specifications of the Bunch Compressor

item	Specification
Bending magnet length L_B	300 mm
Bending magnet interval	1 m
Deflection angle	7.8°
Dipole field	520 Gauss

6. ビームシミュレーション

本ライナックのビーム性能は計算機コード PARMELA で計算した。ITCRF 電子銃出口のビーム進行方向位相分布を Figure 6 に示す。ここで横軸は 2856MHz の位相で 1deg あたり約 1ps である。電子銃出口では 0deg 付近にビームは集群しているが、大きくエネルギーテールを

引いていることがわかる。このビームをエネルギーフィルターでマイクロバンチ幅 12ps 程度に切り出す。この進行方向位相分布を Figure 7 に示す。マイクロバンチ幅は 12ps 程度に切り出せているが、ビームの先頭は空間電荷効果でエネルギーが上昇していることが見て取れる。このビームをバンチコンプレッサーで 1ps 程度に圧縮した結果を Figure 8 に示す。バンチ幅は 1ps に圧縮され、エネルギー分散も 3MeV 以下となっている。C バンド加速管で加速されたライナック出口での進行方向分布を Figure 9 に、位相空間分布を Figure 10 に示す。バンチ幅 2ps、エネルギー分散 3MeV、ノーマライズドエミッタンス ϵ_x は 1.5 μ rad、 ϵ_y は 2.9 μ rad であった。Table 7 にライナック出口での PARMELA 計算結果をまとめて示す。本結果は Table 1 に示したリングの要求性能を満たす。

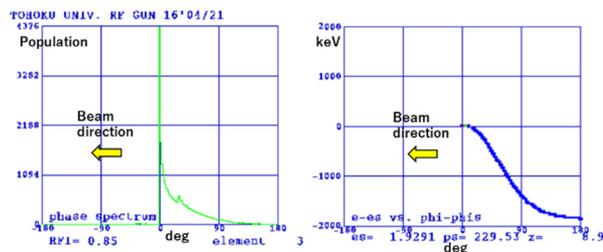


Figure 6: Electron beam distribution in the longitudinal phase space after ITCRF gun.

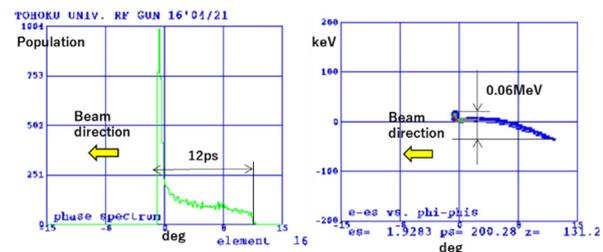


Figure 7: Electron beam distribution in the longitudinal phase space after energy filter.

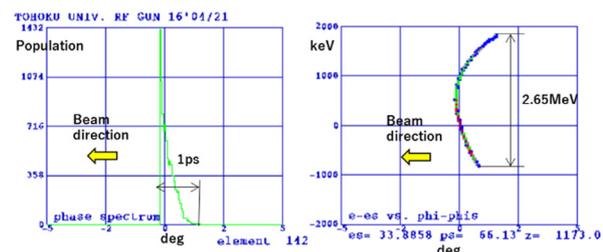


Figure 8: Electron beam distribution in the longitudinal phase space after bunch compressor.

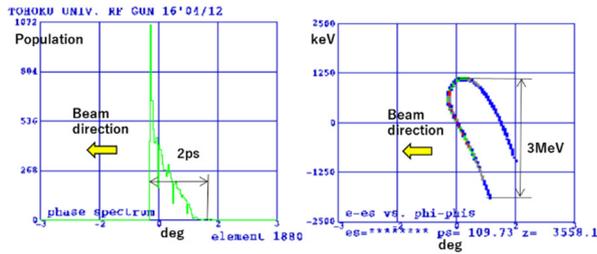


Figure 9: Electron beam distribution in the longitudinal phase space at exit of Linac.

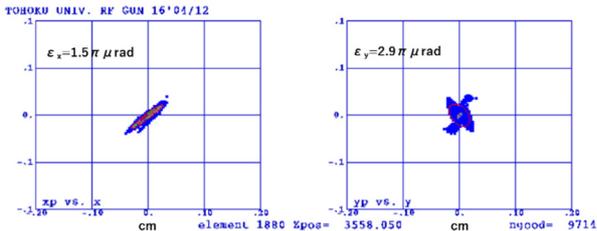


Figure 10: Electron beam distribution in the transversal phase space at exit of Linac.

Table 7: Simulation Result at Exit of the Linac

Item		Specifications
Beam energy	E	3 GeV
Energy spread	ΔE	3MeV (0.1% full width)
Beam charge	Q	0.02 nC×3 bunch×5 Hz =0.3 nC/sec
Normalized Emittance	$\beta\gamma\epsilon_x$	1.5 π mm·mrad
	$\beta\gamma\epsilon_y$	2.9 π mm·mrad
Bunch length	σ_z	1 ps
Repetition rate	f_{rep}	5 Hz (max)

7. まとめ

理研 SACLA で開発された C-band 加速器及び東北大学で開発された ITCRF 電子銃を用いて SLIT-J 入射器ライナックを計画し、ビームシミュレーションを行いリングの要求性能を満たしていることを確認した。今後はさらに検討を継続し、建設費の抑制、信頼性の高いライナックを設計していく予定である。

参考文献

- [1] SLIT-J Design Team, “Proposal for 3-GeV High-Brilliance Light Source Accelerator Complex Version 2.0”, May 2016.
- [2] SCSS X-FEL Conceptual Design Report, May 2005.
- [3] T. Sakurai *et al.*, Proc. of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aomori, p.1047 (2014).
- [4] T. Tanaka *et al.*, Proc. of PAC05, Knoxville, p. 3499 (2005).
- [5] K. Togawa *et al.*, Proc. of the 3rd Annual Meeting of