

Beam Measurement and Future Plan on S-band Compact Electron Linac

Ryunosuke Kuroda^{1,A)}, Hiroyuki Toyokawa^{A)}, Masato Yasumoto^{A)}, Norihiro Sei^{A)}, Hiroshi Ogawa^{A)},
Masaki Koike^{A)}, Kawakatsu Yamada^{A)}, Fumio Sakai^{B)}, Terunobu Nakajyo^{B)}, Tatsuya Yanagida^{B)}

A) National Institute of Advanced Industrial Science Technology (AIST)

1-1-1 Umezono, Tsukuba, Ibaraki 305-8568, JAPAN

B) Sumitomo Heavy Industries, Ltd (SHI)

2-1-1 Yatocho, Nishitokyo, Tokyo, 188-8585, JAPAN

Abstract (英語)

The compact hard X-ray source via laser Compton scattering (LCS) based on S-band compact electron linac was developed in collaboration between AIST and SHI. In case of the LCS X-ray generation especially the head on collision, the X-ray pulse length depends on the electron bunch length. So electron bunch length is the very important term for the control the X-ray pulse length. Moreover, the high intensity ultra short bunch beam is very useful for the THz radiation using the coherent synchrotron radiation (CSR). In this study, the numerical simulation with PARMELA and Trace-3D for the bunch compression using the achromatic arc section was carried out about 1 nC electron beam. Moreover the ultra short bunch length measurement using two-frequency analysis method have been developed and we have performed preliminary bunch length measurement. In this conference, we will talk about results of the simulations, future plans and its applications.

Sバンド小型電子リニアックにおけるビーム計測と今後

1. はじめに

現在産総研では、住友重機械工業との共同により、Sバンド小型電子リニアックとフェムト秒Ti:Saレーザを用いたレーザーコンプトン散乱(LCS)硬X線源の開発と利用研究を行っている[1-2]。特に、X線の収量増加を目的としたフォトカソード改良研究を進めている。これまで、ハイチャージ電子ビーム(5 nC/bunch)、及びマルチバンチ電子ビームのトラッキングシミュレーションを行ってきたが、実際に高量子効率のフォトカソード(Cs-Te等)に変更することにより、表1に示すようなハイチャージビーム、マルチバンチビーム、高輝度超短バンチビームの生成を計画している[3]。

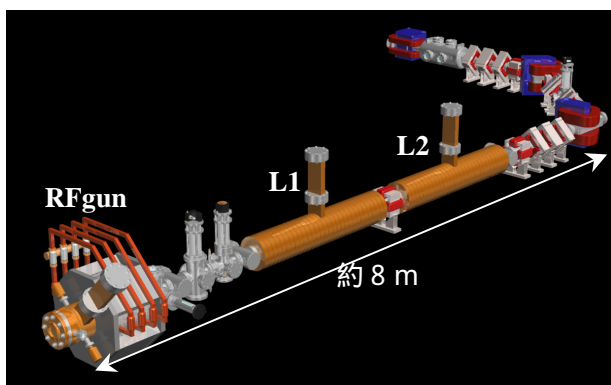


図1：Sバンド小型電子リニアック

産総研におけるSバンド小型リニアックは、フォトカソードRF電子銃、ソレノイド電磁石、1.5 m 定在波加速管2本(L1、L2)、アクロマティックアーク部、及びビーム収束部(Qトリプレット)で構成されている(図1)。RF電子銃により約4 MeVの高品質電子ビームが生成され、2本の加速管によって約20~40 MeV(可変)まで加速される。加速された電子ビームはアクロマティックアーク部によって90度方向を変え、ビーム収束部によってレーザーコンプトン散乱の衝突点に絞られる。

表1：電子ビームのパラメータ

Electron Beam	Energy	20 MeV ~ 42 MeV
	Charge per bunch	1 nC ~ 5 nC
	Bunch number	1 ~ 100
	Energy spread	~ 0.2 %
	Energy Spread (for compression)	~ 5%
	Bunch length	3 ps (rms)@1 nC
	Bunch length (after compression)	500 fs (rms) @1 nC
	Rep rate	10 Hz ~ 25 Hz

LCS-X線では、特に正面衝突の場合、X線のパルス幅が電子ビームのバンチ長に依存するため、バンチ長を制御し、尚且つバンチ長を計測する方法が重要となる。更に、産総研のSバンド小型電子リ

¹ E-mail: ryu-kuroda@aist.go.jp

ニアックでは、超短バンチ電子ビームによるコヒーレント放射光（ミリ波～テラHz）生成も計画しているため[4]、アクロマティックアーク部を用いたバンチ圧縮によるサブピコ秒電子ビーム生成、及びリアルタイムな超短バンチ長計測システムの開発を進めている。本研究会では、電子ビームの現状について、超短バンチ生成と計測システムの開発、及び今後の計画について報告する。

2. バンチ圧縮研究

2.1 バンチ圧縮シミュレーション

バンチ圧縮は、リニアック直後のアクロマティックアーク部で可能である（図2）。まず、シミュレーションコードPARMELAによって、RFgunの位相をエミッタンス最小となる40度（1nC, 4MeV）に固定した。アーク部でバンチ圧縮のため、2本の加速管の位相について、L1の位相は、約4~6%のエネルギー幅を持つ18 MeV以上の電子ビームを生成するため、140度（>0）と220度（<0）を選定した。L2の位相は、最終的に30 MeV以上約6%のエネルギー幅を持つ電子ビームを生成するため、120度（z>0, L1=140度）と200度を選定（z<0, L1=220度）した。

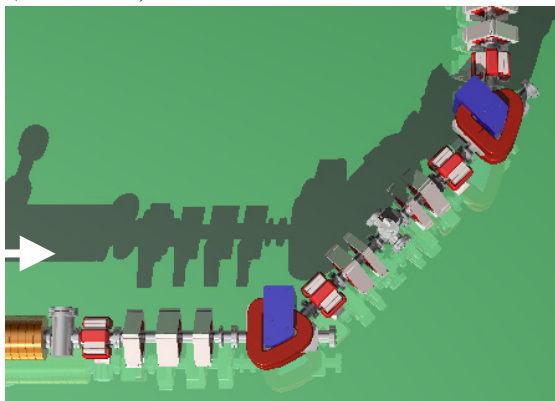


図2：アクロマティックアーク部

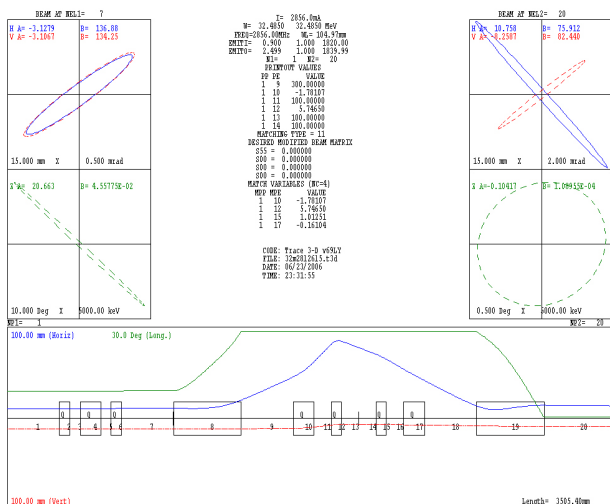


図3：Trace-3Dによるバンチ圧縮シミュレーション

次に、PARMELAによって計算した1nCの電子ビームに対して、Trace-3Dを用いてアクロマティックアーク部における4つのQマグネットを変化させバンチ圧縮の計算を行った。その結果、L2の位相120 deg@L1-140degと、200 deg@L1-220degで、アークの出口において、それぞれ約450 fs (rms)と約550 fs (rms)に圧縮できることがわかった。図3にL2の位相120deg時の電子ビームに対するTrace-3Dの計算結果を示した。

しかしながらTrace-3Dは、スペースチャージ効果は含んでいないもの、Momentum Compactionの線形な効果しか考慮していない。Trace-3Dで計算したアーク内4つのQのパラメータを用いて、PARMELAでバンチ圧縮計算を行ったところ、図4左図のように、圧縮はされるものの、Trace-3Dの計算結果のように理想的に圧縮されず、高いエネルギーと低いエネルギーの電子が非常に長いテールを引いてしまうことがわかる。そのため、バンチ圧縮時には2次、3次の効果を補正することを検討する必要がある。ただ、アーク中央に2%程度のエネルギーアパーチャーを入れたところ、電荷量は200pCに減ってしまいが、図4右図のように、バンチ圧縮された部分のみ取り出すことができる。すなわち、L1、L2において電子ビームにエネルギー幅を2%以上もたせても、実際は圧縮に寄与しない事がわかる。

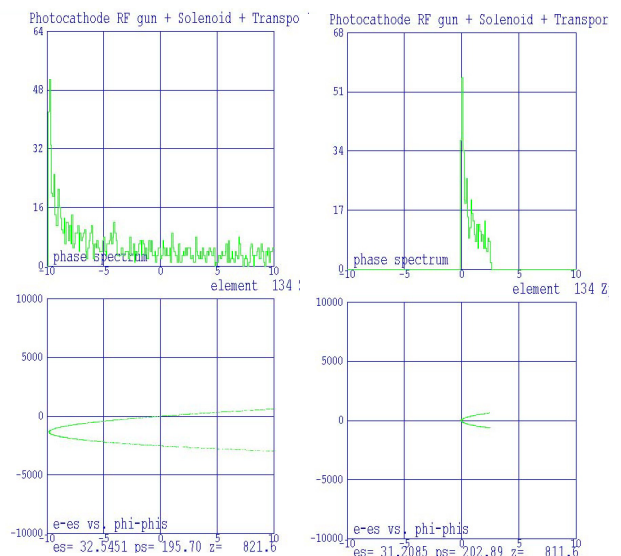


図4：PARMELAによるバンチ圧縮シミュレーション結果（左：アパーチャーなし、右：あり）

3. 超短バンチ長計測

現在産総研では、超短バンチのバンチ長を計測する方法としては、二周波測定法、及びRFキッカー法、ストリークカメラ法等を検討している。今回は、アーク直後にボタン電極型のBPMを設置し、二周波解析法[5]のPreliminary測定を行った。この方法は、

ストリークカメラと比較し、安価で且つ、非破壊型であるためリアルタイムな測定が可能といった大きな特徴がある。

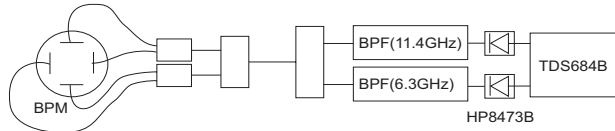


図5. 二周波解析法を用いたバンチ長モニター
セットアップ

信号のピックアップには、ボタン電極型BPMの4つの電極で誘起される信号を結合・分配し、スペクトルの二周波数成分をバンドパスフィルター（BPF）（ここでは中心周波数11.4GHzと6.3GHz）を用いることにより分離し、それぞれ検波器（HP8473B）によって検出する。電圧信号のAD変換には、積分型のADCモジュールやオシロスコープ（TDS684B）を用いた。そして、その電圧信号の強度比を式(1)を用いて解析することによりバンチ長を求めることが出来る。

$$\sigma_t = \sqrt{\frac{2}{\Delta\omega^2} \ln \left\{ \frac{|F_1(\omega_1)|}{|F_2(\omega_2)|} \right\}} \quad (1)$$

$$\Delta\omega^2 = \omega_2^2 - \omega_1^2, \quad \omega_2 > \omega_1$$

ここで、 σ_t はrms(root mean square)バンチ長、 ω_1 、 ω_2 は検波する周波数、 $|F_1(\omega_1)|$ 、 $|F_2(\omega_2)|$ は、それらの信号強度である。今回検波する周波数を代入すると式(2)のように簡略化することができ、RMSバンチ長が容易に求まる。しかし、補正係数 をRFコンポーネントの周波数特性を考慮し校正する必要がある。

$$\sigma[ps] = 23.7 * \sqrt{\ln \left\{ \alpha \frac{V1}{V2} \right\}} \quad (2)$$

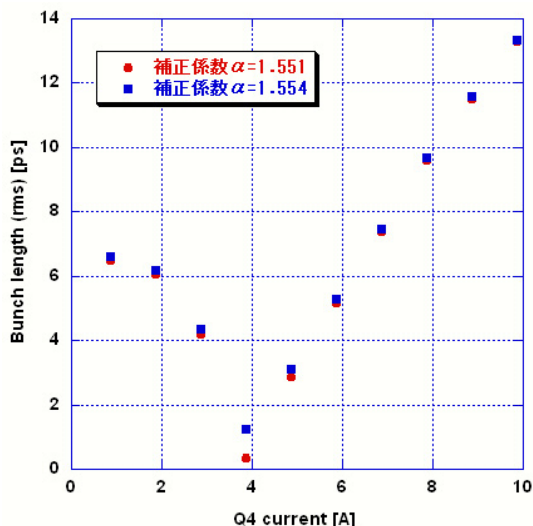


図6：二周波数解析法を用いたバンチ長測定

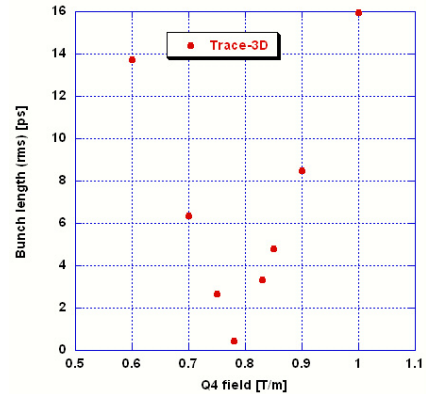


図7：Trace-3Dを用いたバンチ圧縮時の
Q4磁場強度とバンチ長との関係

実験では、約40MeV、0.8nCの電子ビームに対し、Trace-3Dでのマッチング計算によって求めたQの磁場強度になるように電流値を設定し、Q4のみ電流値を変化させ、二周波解析法によって測定した結果を図6に示した。この結果から、Qの電流値4A近辺でバンチ長が圧縮していることがわかる。図7にTrace-3DでQ4のみを変化させた時のバンチ長の変化を示したが、同様の傾向になることがわかる（線形計算であるため、変化が直線的になっている）。しかし、補正係数 に関してRMSバンチ長の絶対値を比較すると、バンチ長が1ps以下の極端に短い部分では、補正係数によって大きく変わることがわかる。すなわち、超短バンチを測定するためには、RFコンポーネントの周波数特性を精度良く測定し、精度良く校正係数を決定する必要がある。ただ、リアルタイムにバンチ形状の相対変化をみるだけでは、係数の精度はそこまでの精度は必要ない。

4.まとめ

今回、Sバンド小型リニアックにおけるバンチ長圧縮研究により、Trace-3Dによるシミュレーション及び二周波解析法によるPreliminaryなバンチ長測定を開始した。今後は、2次、3次の項を考慮したシミュレーション、及び高周波数領域を用いたバンチ長計測を行い、更なる超短バンチ生成、及びコヒーレント放射実験を行っていく。

参考文献

- [1] H. Toyokawa et al., “産総研におけるSバンド小型電子リニアックを用いたレーザーコンプトン散乱硬X線装置開発の現状”, 本研究会, WO11 (2006)
- [2] M.Yasumoto et al., “レーザーコンプトン散乱硬X線の屈折コントラストイメージングへの応用”, 本研究会, TP75 (2006)
- [3] R. Kuroda et al., Proc of EPAC 2006
- [4] N. Sei et al., “Sバンド小型リニアックを用いたテラヘルツ帯光源開発の計画”, 本研究会, TP68 (2006)
- [5] R. Kuroda et al., JJAP **43**, 2004, 7747-7752