



展 TENBO 望

電子線形加速器の 電子ビームの高強度化



浦川 順治

Urakawa Junji

(高エネルギー加速器研究機構)

1 はじめに

電子源として熱電子銃や高周波電子銃等色々なものが使われ、既に大電流発生が可能になっている。一方、電子ビーム加速として、DC 高圧電源を使った静電加速は数十 kV～数 MV 程度までが可能で、より高いエネルギーまで加速するには高周波線形加速器を使う。また、最近超高強度レーザーを使った電子ビーム加速が話題になっている。本稿では、最も電子ビームを高エネルギーまで加速している実用的な高周波電子線形加速器のビーム強度 100 倍実現に向けた問題点と実情について報告する。

100 W クラスの工業・医療用電子線形加速器が色々な用途に使われているが、透視、撮影、分析、医療診断・治療用 X 線発生装置は主に数十～百数十 kV 程度までの直流電子 X 線管であり、数百 W～数十 kW のものが市販されている。そのため、電子線形加速器の利用は数 MeV を超える高エネルギー電子ビーム生成に限定されている。また、重合、架橋、分解、殺菌等の放射線処理のための工業照射用高出力電子加速器として、エネルギーが 10 MeV 以下、150 kW の電子ビームパワーの電子加速器ロードトロン (100 MHz 程度の連続高周波加速による新型加

速器)¹⁾ をベルギーの Ion Beam Applications 社が販売しているので、電子線形加速器の工業利用は更に制限されている状況である。しかし、工業・医療用電子線形加速器の高度化によって、電子ビームの高輝度化と高強度化技術が進展しているため、電子線形加速器の利用は高エネルギー電子ビーム生成にとどまらず、応用の展開が期待できる状況になってきた。

本稿では、電子ビームの高強度化のために克服すべき問題点と技術開発について、高エネルギー加速器研究機構が進めている文部科学省受託事業“量子ビーム基盤技術開発プログラム”²⁾ の最近の成果と展望も含めて報告する。また、ビーム強度を実用的な観点から、ビーム電荷量、ビームエネルギー及びビーム繰り返しの積、すなわちビームパワーとして解説する。

2 線形加速器による電子ビーム強度増強上の問題点

線形高周波加速空洞で大強度電子ビームを安定に加速するには、電子ビームのサイズが高周波加速空洞の大きさ (高周波の波長) に比べて十分に小さく (高品質電子ビーム)、エネルギー拡がりも小さな多バンチ (粒子塊) 電子ビー

ムを加速空洞の中心に向かって加速電場と平行な軌道を保って安定に入射しなければならぬ。この軌道制御が不十分であるとビームサイズが増大したり、多バンチ電子ビームが振動したりすることによって、ビームロスが発生する。また、多バンチ電子ビーム加速に伴うビーム負荷補正を的確に行わなければ、多バンチ電子ビームのエネルギー拡がりが大きくなり、エネルギー分散がある場所でビームサイズが大きくなることによってビームロスが発生する。まず、電子ビーム生成過程で高周波加速に適した多バンチ電子ビーム生成を実現することが電子ビーム強度を上げるのに必須である。

カソード物質から発生する熱電子や光電子は外部電界によって加速され、カソード物質近傍から取り出されて利用に供されるが、大電流を発生するためにはカソード物質から発生した電子による空間電荷に打ち勝つ外部高電界が必要になる。外部高電界をカソード物質表面に生成する方法は、カソード物質を負電位にして(-500~-10 kV) アノード側に電子ビームを引き出すか、電子源を高周波空洞にすることによって高周波高電界で電子ビームを加速・引き出して使う方法がある。カソード電極やアノード電極のDC電界強度が10 MV/mを超えると放電が発生しやすくなるので、カソード上に100 MV/m程度の高電界を発生して電子生成するには高周波電子銃かレーザー電場を使うことになる。数MeV以上の高エネルギーまで大強度電子ビームを加速する方法は、放電対策や高輝度化の観点から高電界高周波加速器によるものである。最近、高輝度-短パルス大電流電子ビーム発生にフォトカソードを使った高周波電子銃が使われるようになってきた。電子源からの電子ビームを高周波加速空洞で追加速するためには、電子ビームの加速方向の長さ(バンチ長)を高周波波長の1/20以下にする必要がある。熱電子銃の場合、速度変調を利用したバンチ長圧縮装置を導入して、電子バンチ長をS-band (2,856 MHz) 加速空洞に入る前で3 mm

程度まで圧縮する。光高周波電子源では光電子生成用レーザーパルス幅が短く、加速されてくる電子ビームバンチ長は十分に短いので、バンチ圧縮装置は不必要である。高周波加速に同期した多パルスレーザー生成技術も既に開発され、安定に動作させることができるようになった^{3,4)}。近い将来、高周波の周波数でmode-lockedされた連続レーザーパルスによって、高周波空洞の加速周期に同期した光電子バンチ列生成可能なレーザー装置開発が行われ、実用化されるだろう。

多バンチ電子ビーム生成・加速によるビームパワー増強で最も重要な克服すべき問題点は、多バンチ電子ビームを生成・加速する軌道上で発生するウェークフィールドによる電子ビーム不安定性抑制とビーム負荷補正を最適にする制御技術の高度化にある。しかし既に、多バンチ電子ビーム軌道測定装置としてシングルパス高精度位置検出器(分解能10 μm以下)やバンチごとのエネルギー測定装置の技術は確立している。また、多バンチ電子ビームのビーム負荷補正に関する技術実証実験⁵⁾も行われ、ビーム負荷補正技術の実用化を行うことによって、現状の数十MeV電子線形加速器のビームパワーを数百W~数十kW以上に増強できる状況になった。

3 光高周波電子源

1980年ごろから高輝度電子ビーム生成を目指して、空間電荷効果によるビーム品質の劣化を抑制しながら直接短バンチビーム生成を実現するために、フォトカソードを高周波空洞の端板部に取り付けた光高周波電子源開発が始まった。Half cell photo-cathode RF GunやMulti-cell RF Gun等の開発が行われ、現状世界の多くの研究所や大学の研究室で使用されているのはBrookhaven National Laboratoryが長年使用している1.6 cell photo-cathode RF Gunタイプである。このRF Gunではフォトカソード部の最高

高周波高電界が100~130 MV/m程度^{6,7)}で電子ビーム生成が行われ、規格化エミッタンス1 mm-mrad以下の短パルス電子ビーム生成を実現している。大電流ビーム生成のためには、多バンチ電子ビーム生成技術が必須である。同時に、我々は多バンチ電子ビームをより高いエネルギーにして高周波加速管に直接入射できるように、3.6 cell photo-cathode RF Gunを開発した。図1にその高周波電子銃と構造を示す。

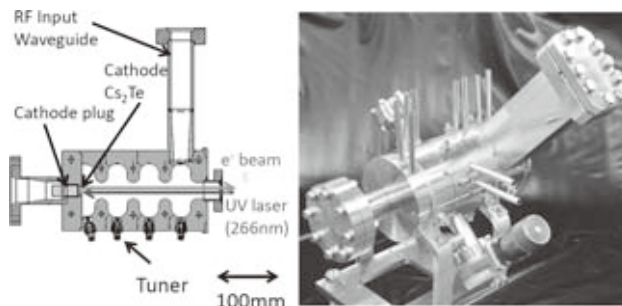


図1 3.6 cell RF 電子銃

入力高周波パルスパワー24 MW、パルス幅12.5 μsec を電子銃空洞に入力した場合、ビーム加速とビーム負荷補正を考慮するとパルス当たり4,000バンチ以上生成でき、エネルギーは10 MeV以上である。単バンチ電荷量は1~2 nCが可能であるので、50 Hz運転した場合のビームパワーは4 kW程度になる。電子銃空洞内の電子バンチ生成・加速中の軌道はソレノイド磁場と光電子生成位置によりほぼ決定するため、高電界電子銃空洞・ソレノイド電磁石の設置精度及びレーザーパルス列軌道制御を10 μm 精度で行えるように電子ビームの特性測定によって、それぞれの位置を微調整することになる。また、多バンチ電子ビーム負荷補正は空洞内に高周波パワーが蓄積される立ち上がりのパワー増加分と電子バンチが得るエネルギー分を平衡させることによって行う。動的な多バンチ電子ビーム負荷補正が必要になれば、高周波入力パワーの振幅変調制御も行うことになる⁸⁾。

さらにビームパワーを上げるために、ビームパルス長を伸ばすことが行われ、最終的に連続ビーム生成技術の確立を目指した研究開発が進められている。既にフォトカソード高圧DC電子源(500 kV以上)、クライオ光高周波電子源や超伝導高周波電子源などの開発が進められ、10 mA電子ビーム生成が実現している^{9,10)}。最近、我々はL-band (1.3 GHz)の超伝導加速空洞で大電流電子ビーム加速を行うために、1.3 GHz L-band 1.6 cell 光高周波電子銃を使って、1 msec

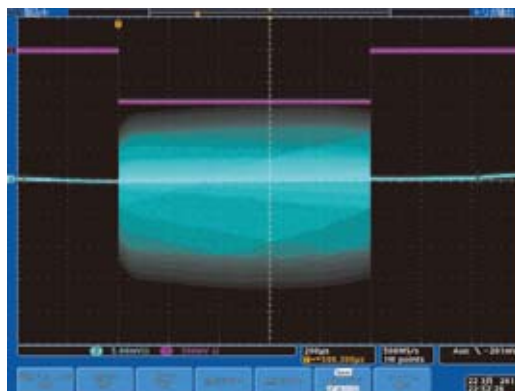


図2 1 msec 均一ビームの様子
(~40 pC/bunch), 青: BPM (位置検出器)の信号, 紫: 266 nm レーザーのゲート信号

パルス長の電子ビーム生成を行った。図2は常伝導高周波電子銃から162,500 bunches/pulse, 3 MeV多バンチ電子ビームを生成した時の信号波形である。バンチ間の時間差は6.15 nsecで、電子ビーム輝度も十分に高く(規格化エミッタンス1 mm-mrad以下)、エネルギー拡がり(0.2%以下)も小さくなっている¹¹⁾。このように6 mA程度のビーム生成・加速を行うための多バンチ電子ビーム生成は可能になってきた。さらに電子線形加速空洞で追加速することによって、ビームパワーは上がるが、ビームロスが起きれば高放射線レベルが問題となり加速器として実用化できない。多バンチ電子ビームのビームサイズ、エネルギー幅とビーム軌道の管理は最も重要な課題である。

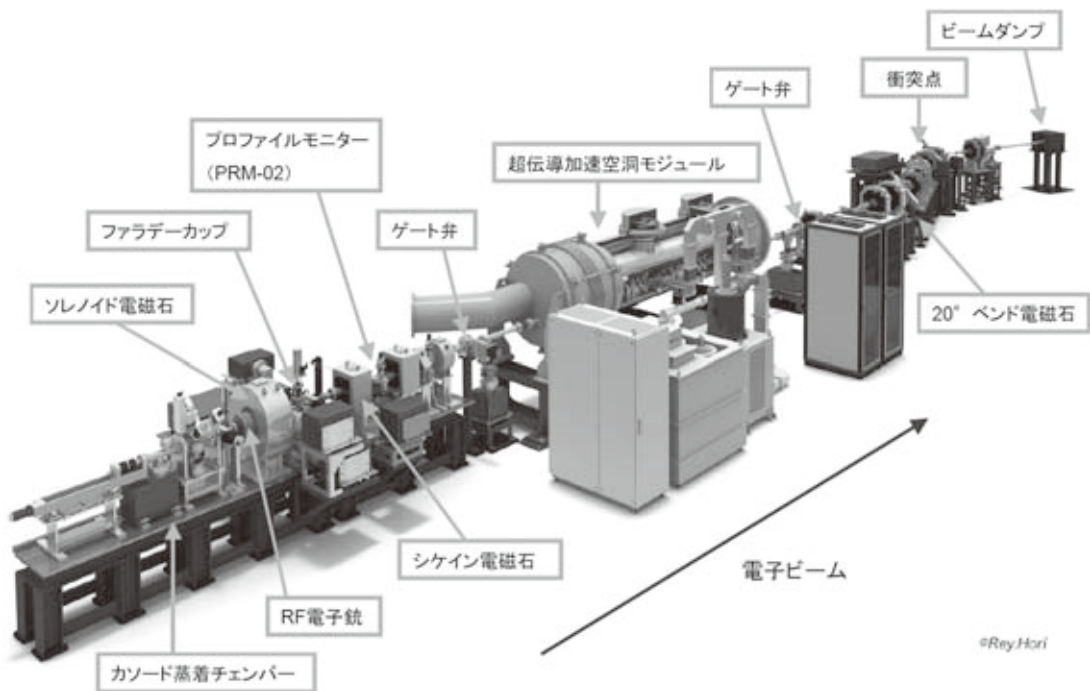


図3 1.3 GHz 超伝導線形加速器 (STF) による高輝度 X 線発生実験装置

4 超伝導線形加速器による超多バンチ電子ビーム加速

常伝導線形加速器では加速管の空洞壁での高周波ロスが大きいために、高周波のパルス幅は数 μs ~数十 μs 程度である。空洞壁での高周波ロスを最小にするために、超伝導高周波加速空洞を使う。この場合、高周波のパルス幅は msec 以上、又は連続運転が可能になる。我々は、図3に示す超伝導線形加速器を高エネルギー加速器研究機構内で構築し、常伝導高周波電子銃から 1 msec 長の電子パルスを発生して、2 台の超伝導加速空洞により 5 Hz 運転で 40 MeV 以上まで多バンチ電子ビーム加速を行っている。図4は使用した約 1 m 長の超伝導加速空洞の写真である。超伝導加速空洞に入射する超多バンチ電子ビームの軌道補正が非常に重要で、まず 100 バンチ程度のビームを使って軌道を測り、軌道補正後に 1 msec 多バンチ電子ビ

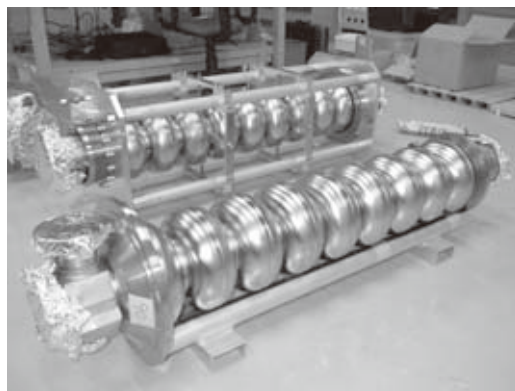
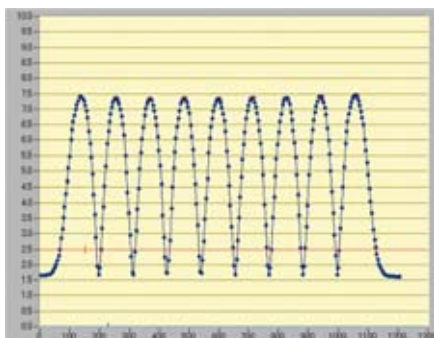
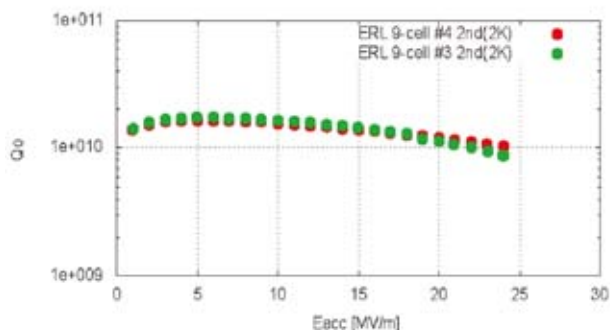


図4 9 cell 1.3 GHz 超伝導加速空洞

ームを加速する。空洞電場の一様性や空洞の設置精度もビーム加速運転上重要であり、図5に示す加速電場測定を行い、十分な性能であることを確認している。この超伝導線形加速器を使って、43 MeV、162,500 bunches/pulse の超多バンチ電子ビームをレーザーパルスと衝突させ



ビーズを用いて計測された9連超伝導加速空洞の軸上加速電場分布



実機9連超伝導加速空洞の性能試験結果。加速電場25 MV/mを確認した

図5 1.3 GHz 超伝導加速空洞の加速電場分布測定と加速電界測定

て、33 keV 高輝度 X 線生成の実験を現在進めている。衝突点では電子ビームを 10 μm に収束させ、30 mJ のレーザーパルスと 162.5 MHz の繰返しで 1 msec 間衝突させると、逆コンプトン散乱によりレーザー光子が 33 keV の X 線に変換され、電子ビーム方向に放出される。この高輝度準単色 X 線は色々な分析等に利用できる輝度であり、短パルス性やエネルギー可変性等の有用な特徴がある。この加速器は第 2 世代放射光源からの X 線と比べて同等以上の性能を持った X 線を提供できる。現状のビーム強度は、10 mA、50 MeV、5 Hz 1 msec パルス運転であり、2.5 kW である。100 kW 程度のビームパワーを実現するためには、ビームパルス幅を更に広げるか連続運転を行うことになる。この高強度電子ビーム運転の場合、電子ビームを捨てるビームダンプ設計が放射線防護と熱破壊の問題から大型になる。この問題を解決する方法は大強度電子ビームからエネルギーを高周波に戻し、減速して 5 MeV 以下にした後にビームダンプに捨てる ERL (Energy Recovery Linac, エネルギー回収型リニアック) 技術である¹²⁾。

5 将来展望

高強度・高輝度電子ビーム生成は、高周波線

形加速器による大強度多バンチ電子ビーム加速のために最も重要な技術である。現在、DC 高圧電子源の電圧を 500~750 kV まで上げて、フォトカソードから高品質の光電子を取り出す実験が行われている¹³⁾。電子バンチの生成繰返しは現状 100 MHz 程度であるが、将来は 1.3 GHz の超伝導高周波源の周波数になるように開発が進められている^{14,15)}。一方、超伝導高周波電子源の開発と実用化実験が進められ、数 MHz~75 MHz 程度までの繰返しで電子ビーム生成が実現している¹⁶⁾。今後フォトカソードに照射するレーザーパルスの繰返しを上げることによって、1.3 GHz の連続電子バンチ生成を目標にした開発が進められている。

超伝導線形加速器の連続運転が可能になれば、10~100 mA までの電子ビーム加速も現実的になる。例えば、100 mA、50 MeV 電子ビームのパワーは 5 MW になり、これで逆コンプトン散乱による X 線生成を行えば、第三世代放射光源に相当する高輝度 X 線源を小型装置で実現できる。これらの技術が確立され社会に貢献できるようになれば、電子ビームエネルギーを高周波空洞に戻して、新しい電子ビーム加速に使う ERL 技術がより身近なものになる。

100 kW クラスの 50 MeV 以下の電子線形加速器は、ビームロスのほとんど起きない高精度安定化制御と超伝導加速技術が普及すれば、多

くの高度な利用方法によって社会に貢献できる技術になる。最先端の基礎研究装置として電子線形加速器が活躍するには、数 MW レベルのビームパワーが要求され今も開発が進められている。

【謝辞】

量子ビーム次世代ビーム技術開発課題「超伝導加速による次世代小型高輝度光子ビーム源の開発」は文部科学省委託事業であり、社会に貢献するための高輝度 X 線源の小型化基盤技術開発である。本技術開発の重要性を理解して、援助と協力してくださっている高エネルギー加速器研究機構、日本原子力研究開発機構及び大学関係者に感謝いたします。また、文部科学省からの支援に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) Jongen, Y., Abs, M., Genin, F., Nguyen, A., Capdevila, J.M. and Defrise, D., The Rhodotron, a new 10 MeV, 100 kW, cw metric wave electron accelerator, *NIM B*, **79**(1-4), 865-870 (1993)
- 2) Urakawa, J., Compact X-ray source at STF (Super Conducting Accelerator Test Facility), *Journal of Physics: Conference Series*, **357**(1), 012035 (2012), doi:10.1088/1742-6596/357/1/012035
- 3) Hirano, K., *et al.*, *NIM A*, **560**, 233 (2006)
- 4) 福田将史, 他, 日本加速器学会誌 **9**(3), 156 (2012)
- 5) Kashiwagi, S., *et al.*, *Jpn J. Appl. Phys.*, **43**(8A), 5617 (2004), and Proc. XIX Int. Linear Accelerator Conf., Chicago, p.91 (1998)
- 6) Terunuma, N., *et al.*, *NIM A*, **613**, 1 (2010)
- 7) Deshpande, A., *et al.*, Experimental results of an rf gun and the generation of a multibunch beam, *Physical Review STAB*, **14**(6) (2011), doi:10.1103/PhysRevSTAB.14.063501
- 8) Yokoyama, Y., *et al.*, Study on Energy Compensation by RF Amplitude Modulation for High Intensity Electron Beam Generated by a Photocathode RF-Gun, Proc. IPAC11, TUPC059 (2011)
- 9) 渡邊謙, 他, 日本加速器学会誌, **9**(2), 82 (2012)
- 10) Hoffstaetter, G.H., Cornell sprints past milestones towards hard X-ray source, CERN Courier (2012), <http://wwwold.jlab.org/FEL/felspecs.html>
- 11) Kuriki, M., *et al.*, 1 ms Pulse Beam Generation and Acceleration by Photo-cathode RF gun and Superconducting Accelerator, to be submitted to *Jpn J. Appl. Phys.*
- 12) Hajima, R., *et al.*, *NIM A*, **507**, 115 (2003)
- 13) Nagai, R., *et al.*, *Rev. Sci. Instr.*, **81**, 033304 (2010)
- 14) Dunham, B., *et al.*, Performance of the Cornell high-brightness, high-power electron injector, Proc. IPAC12, MOOAA01 (2012)
- 15) Honda, Y., Development of a Photo-injector Laser System for KEK ERL Test Accelerator, Proc. IPAC12, TUPPD056 (2012)
- 16) <http://www.hzdr.de/db/>, <http://jlab.org/FEL/felspecs.html>